



ICRP 간행물 120

심장학에서 방사선방호

Radiological Protection in Cardiology



대한방사선방어학회
방사선안전문화연구소



이 번역본은 대한방사선방어학회가 수행한 원자력안전연구사업(과제번호: 2016년-26호)의 일환으로 이루어졌습니다.

<표지 그림>

현대화된 모범적 도자시술실 모습.

사진자료: Northeast Georgia Health System

ICRP Publication 120

심장학에서 방사선방호

Radiological Protection in Cardiology

편집장: C.H. Clement

부편집자: M. Sasaki

저자

C. Cousins, D.L. Miller, G. Bernardi, M.M. Rehani, P. Schofield,
E. Vañó, A.J. Einstein, B. Geiger, P. Heintz, R. Padovani, K-H. Sim

역주: 이재기

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은 ICRP의
허락(2016년 3월)을 받았으며 ICRP 정신에 따
라 무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

역자 서문

고령화 사회가 심장질환이 증가하고 있다. 2015년 우리 사망원인통계를 보면 심장질환 사망률이 암에 이어 2위로서, 10만 명 당 55.6명을 차지하고 있다. 또한, 심장질환은 연간 1.63명 꼴로 거의 선형적으로 증가한다. 현재 국내에서 매년 심장질환으로 사망자 수는 2만 6천여 명에 이른다. 이와 같은 심장질환 사망자 수의 증가는 이에 비례하여 진단을 위한 심장 SPECT나 CT 촬영의 증가는 물론, 절차가 복잡하여 환자나 의료진의 피폭이 우려되는 중재방사선이나 전기생리학적 시술도 증가함을 암시한다.

진단절차인 심장 핵의학이나 심장CT는 환자선량이 상당한 수준이지만 비교적 정형화되어 있어 방사선방호 관점에서 중요한 이슈는 아니다. SPECT에서는 환자 체격을 고려한 핵의약품 투여량 결정 등 기본적으로 고려할 사항은 있다. 다행검출기 CT(MDCT)가 출현하면서 빠르게 움직이는 심장도 심장활동과 동조시킨 촬영기법을 통해 고해상도 영상을 얻을 수 있게 됨으로써 환자선량을 증가시키는 원인이 되고 있다. 그러나 이러한 진단촬영은 필요하기에 CT에서 관심은 동조촬영 변수 설정에 주의하여 부적절한 영상으로 인한 재촬영 빈도를 줄이는 것이 된다.

심장 중재방사선절차는 방사선방호 관점에서 복잡성이 높다. 관상동맥에 스텐트를 설치하는 것과 같은 심장 중재방사선절차는 형광투시 안내 아래 정교한 기술로 이루어진다. 일반적 절차는 침상 아래에 펄스형 X선관을 두고 동맥을 통해 실시간 X선 동영상 안내에 따라 병소에 접근하여 조영제를 투여하거나 스텐트를 설치한다. 이러한 처치는 민감하기 때문에 신중하고 정확해야 하므로 시술시간도 늘어난다. 분지형 스텐트 설치와 같은 어려운 절차도 시도되는 빈도가 늘어나고 있다.

심장 중재방사선절차는 비록 펄스 방식이지만 X선빔을 연속적으로 노출시키기 때문에 필연적으로 환자선량이 높아진다. 심장병이라는 생명을 직접 위협하는 중대한 질환의 치료를 위해 어느 수준까지 피폭은 감수할 수 밖에 없다. 그러나 중재방사선절차에 따르는 환자선량 수준이 높기 때문에 의도한 의료목적 달성하면서 환자선량을 어떻게 줄일 수 있는지에 대해 고민은 필요하다. 장기적 영향인 암 위험(확률론적 영향)의 증가는 감수할 수 있다고 하더라도 국부적 과다 노출로 인한 조직 괴사와 같은 결정론적 영향은 방지해야 한다. 프로토콜이 정립된 절차를 바르게 수행한다면 심각한 급성 방사선상해는 예상되지 않는다.

일반 방사선촬영 절차는 비교적 정형화되기 때문에 진단참조준위(DRL) 활용을 통해 부절절하게 높은 노출을 발견하고 시정해 나간다. 그러나 중재방사선 시술 시간은 환자나 병소의 특성에 강하게 의존하므로 '표준'관행을 설정하기 어렵다. 따라서 기본 원칙을 활용하여 경우별로 여건에서 최선의 방호를 모색해야 한다.

중재방사선 기술은 의료진이 환자 가까이서 장시간 작업해야 하는 특성 때문에 의료진의 신체가 직접빔에 노출되지 않더라도 산란선에 의해 의료진이 상당한 선량을 받을 수 있다. 특히 민감 조직인 수정체 피폭으로 인해 백내장이나 시력저하를 겪은 기술의사가 많다. 따라서 의료진은 이러한 산란선으로부터 자신을 보호하는 데 한결같은 주의가 필요하다. 중재방사선 기술부하가 큰 의료기관에서는 천정 걸이형 차폐나 스크린을 활용할 수 있도록 시설을 보완하기를 권고한다. 그렇지 않으면 최소한 개인이 납치마와 보안경을 착용해야 한다. 의학물리사나 방사선사와 협의하여 기술에 방해가 되지 않으면서 산란선을 줄이는 방법을 찾을 필요가 있다.

환자보호나 자신의 방호에서 가장 중요한 것은 기술의사의 방사선방호에 관한 관심 수준이다. 이에 반해 대부분 심장학자는 방사선방호에 대해 정규 훈련을 거치지 않았음이 문제로 지적되고 있다. 심장학회는 정기 학회행사에 방사선방호 프로그램을 운영하기를 권고한다.

2016년 8월

역주자: 이재기

한양대학교 명예교수, ICRP 위원

서 문

여러 해 동안 국제방사선방호위원회(ICRP)는 의료에서 방사선 방호와 안전에 관한 많은 보고서를 발간했다. 간행물 105(ICRP, 2007c)는 이 분야의 일반적 개괄을 다뤘는데, 방사선방호의 일반원칙을 요약하고 이 원칙을 의료에서 여러 전리방사선 사용에 적용함에 대해 권고를 제시했다.

몇몇 이전 보고서가 부분적으로는 심장학에 관련된 이슈를 다룬 바 있는데 발행된 것은 간행물 85, 87, 102, 103, 113(ICRP, 2000b,c, 2007a, 2009)와 보조지침 2(ICRP, 2001)이다. 이 보고서는 간략하고 초점을 맞춘 문서 이러한 시리즈의 계속이다.

심장학에서 환자의 방사선피폭은 주로 핵의학, CT, 경피 심장 중재방사선 및 전기생리학 절차에 의한 것이다. 이러한 분야 의료가 그 횟수나 복잡성이 빠르게 늘어나 시술자에게 지침이 필요하게 되었다.

2004년 베이징 회의에서 ICRP는 심장학자를 위한 방사선방호 지침을 개발할 가치가 있다고 결정했다. 다른 우선순위 때문에 이 문서를 위한 일은 상당기간 중단되었다가 2010년부터 본격적으로 재개되었다.

이 보고서를 준비한 작업그룹 위원은 다음과 같다.

C. Cousins(공동위원장)	D.L. Miller(공동위원장)	G. Bernardi
M. Rehani	P. Schofield	E. Vañó

객원위원은 다음과 같다.

B. Geiger	P. Heintz	R. Padovani
K-H. Sim	A.J. Einstein	

나아가 본위원회 위원인 Jaques Lochard와 John Boice가 심층검토자로서 크게 기여했다.

이 보고서가 준비된 마지막 단계에서 제3분과 위원회 위원은 다음과 같다.

E. Vañó (위원장)	M.M. Rehani (서기)	M.R. Baeza
J.M. Cosset	L.T. Dauer	I. Gusev
J.W. Hopewell	P-L. Khong	P. Ortiz López
S. Mattson	D.L. Miller	K. Åhlström Riklund
H. Ringertz	M. Rosenstein	Y. Yonekura
B. Yue		

심장학에서 방사선방호: 기술이 지원하는 지식

심장학은 의료방사선에서 최대 단일분야 사용자 중 하나이다. 적절한 방사선 사용은 절차를 지원하여 막대한 임상이득을 낸다. 이 보고서의 지침이 임상적으로 불필요하는 방사선 조사를 최소화하면서 환자 이득을 극대화하는 데 도움이 될 것이다.

의료행위는 최상의 임상목표를 이루기 위해 상당한 방사선을 불가피하게 사용한다. 일부 환자는 암 발생 증가를 우려하기에 충분히 높은 방사선량을 진단, 치료 및 추적 과정에서 현재 받고 있다. 소수 환자에서는 피부선량이 너무 높아 경미하거나 심각한 조직반응을 초래하기도 했다. 개별 환자, 의료진 및 일반 사회에 용인되는 위험 수준에서 적정 환자 이득을 얻기 위해서는 모든 의료피폭에 대해 임상적 수요의 정당화와 방사선방호 최적화가 필수적이다.

최적 방사선방호를 달성하기 위해서는 기술이 부가된 지식이 필요하다. 차폐구조물, 프로그램된 촬영 프로토콜, 선량 전시와 같은 공학적 관리는 적절히 사용된다면 안전을 증진시킬 뿐이다. 환자 치료에 직접, 간접으로 관계되는 모든 사람은 방사선방호 지식이 있어야 하고 환자 관리와 종사자 안전 모두를 위해 이러한 정보를 적극적으로 활용해야 한다. 필요한 지식수준을 확보하기 위해서는 직무 고유 교육자원과 공식 인증과정이 필요하다.

모든 비의료 이해당사자(정부, 규제자, 기기 소유자, 물리학자 등)은 임상 수요를 이해하는 데 필요한 공식적이고 실질적인 정보를 가져야 한다. 방사선안전관리 책임자는 임상절차를 주기적으로 살피는 것이 도움이 됨을 알게 될 것이다. 이는 중재방사선 분야에서 특히 중요한데 가용한 기기, 설정 선택, 시술자의 실제 작업 방법, 그리고 환자의 임상 요구 사이에 많은 실시간 상호작용이 일어나기 때문이다.

정당화는 절차를 요구하는 의료서비스공급자와 실제 서비스 제공자가 공유하는 책임이다. 영상화 절차를 요구하는 사람은 평가할 준비가 충분하고 제안된 절차의 방사선 위험과 기타 위험에 맞서 예상되는 정보를 평가할 주된 책임을 진다. 보건서비스제공자는 가용 정보에서 주어진다면 검사가 합리적 지시를 낼 것임을 담보할 책임을 공유한다.

방호최적화는 주치의와 함께 기기 소유주(적절한 기기를 구매, 유지함으로써), 의학물리사(기기 시험과 기타 품질과정의 측면에 참여함으로써), 방사선사/기사(환자 및 절차 고유의 프로토콜을 선정을 통해)의 책임이다. 가능하면 적은 방사선 사

용으로 필요한 임상정보를 얻을 확률을 최적화하기 위해 프로토콜은 판독 의사의 자문을 받아 구성해야 한다.

중재방사선에서 환자와 직원 모두의 방호를 위해 시술의가 기기 세팅이나 절차 과정에서 방사선 사용에 대해 적극적 관심을 갖도록 요구한다. 현재로서는 대부분 중재방사선 절차에서 의료진 피폭은 불가피하다. 방호최적화는 환자에게 해롭지 않고 달성할 수 있는 의료진 피폭의 최소화도 포함한다.

이 보고서에서 중재방사선, 핵 심장학, 심장 CT에 관한 실무 방사선방호 자료와 함께 요약된 해당 방사선생물학 관점에서 정당화와 최적화를 위한 배경정보를 제공한다. 추가 관련 자료는 지난 10여년 ICRP와 국제원자력기구(IAEA)가 발행한 문서와 훈련교재에서 가용하다. 이 주제를 포괄적 기관 프로그램으로 확장하는 데 사용할 수 있는 선별된 추가 문헌을 이 보고서의 참고문헌에 제공한다.

방사선의 바른 사용을 확립하는 데는 공식 품질보증 프로그램이 필요하다. 품질보증 프로그램은 영상품질과 절차 프로토콜에 대한 정기적 평가를 포함해야 한다. 환자선량 감시와 검토도 위에 설명한 조치에 추가해야 할 요소이다. 모든 방법, 모든 절차(진단과 치료)에 대한 모든 가용한 선량계측 정보는 데이터베이스에 수집되어야 한다. 이 데이터를 통계적으로 평가하여 기관 내부 변동성을 파악하고 발표된 외부 규범과 비교해야 한다. 피부나 다른 장기에 많은 선량을 초래한 절차에 대해서는 환자별 추가 조사와 결과의 소통이 필요하다.

이 보고서는 제목이 암시하는 것보다 폭넓은 독자에게 흥미와 관심을 끌 것으로 본다. 보고서의 대부분 내용은 중재방사선, 혈관수술, 그리고 고급 촬영 및 형광투시유도 치료절차가 수행되는 기타 임상 전문분야에 해당된다. 의뢰하는 보건서비스공급자, 의사, 간호사, 방사선사 및 방사선기사, 보건 행정관리자, 의학물리사 및 보건물리전문가, 규제자, 기기공급자 등이 이 보고서를 정독하면 유익할 것이다.

Stephen Balter

목 차

역자 서문	iii
서문	v
객원논설	vii
요지	1
요점	3
요약	5
용어집	11
1. 서론	21
1.1. 도입	21
1.2. 형광투시 안내 절차	21
1.3. 심장 전산화단층촬영	26
1.4. 심장 핵의학	26
1.5. 직무 방사선 위험	27
1.6. 요약	27
2. 방사선의 생물학적 영향	29
2.1. 방사선 영향의 유형	29
2.2. 배경	31
2.3. 피부와 방사선 영향	31
2.4. 눈의 수정체와 방사선	36
2.5. 방사선피폭의 심혈관 영향	38
2.6. 직무피폭과 두개강내 신생물	39
3. 형광투시 안내 심장절차로 인한 조직반응 임상 사례	41
3.1. 서론	41
3.2. 사례1	42
3.3. 사례2	42
3.4. 사례3	42

3.5. 사례4	44
3.6. 사례5	45
3.7. 사례6	46
4. 의료에서 방사선방호 원칙의 적용	49
4.1. 서론	49
4.2. 정당화	49
4.3. 방호최적화	50
4.4. 선량한도	51
5. 형광투시 안내 중재술에서 환자선량 관리	53
5.1. 서론	53
5.2. 절차 전	55
5.3. 절차 중	56
5.4. 절차 후	59
5.5. 소아환자	61
6. 형광투시 중재술에서 의료진 방호	63
6.1. 서론	63
6.2. 다른 의료진과 방사선피폭 비교	64
6.3. 직무피폭 방호의 핵심	64
6.4. 개인 방호용구	67
6.5. 기기거치 차폐	70
6.6. 형광투시의 직무피폭	71
6.7. 개인선량 계측	72
7. 심장 핵의학에서 방사선방호	75
7.1. 서론	75
7.2. 방사성의약품	76
7.3. 심장핵의학 선량계측	76
7.4. 현재의 선량평가	79
7.5. 선량계측 불확도	79
7.6. ICRP 선량계측과 제조사 정보의 불일치	81
7.7. 심장핵의학 환자의 방사선방호	81

7.8. 환자에 대한 권고.....	85
7.9. 진행 연구분야.....	86
8. 심장 CT에서 방사선방호.....	87
8.1. 서론.....	87
8.2. CT스캐너 유형.....	87
8.3. 선량계측량.....	88
8.4. 환자선량에 영향을 미치는 인자.....	89
8.5. 선량평가 현황.....	93
8.6. 심장 CT에서 환자 보호.....	94
9. 심장학자를 위한 방사선방호 훈련.....	97
9.1. 서론.....	97
9.2. 방사선방호 요건.....	98
9.3. 중재방사선 형광투시.....	99
10. 품질보증 프로그램.....	103
10.1. 서론.....	103
10.2. 시설.....	105
10.3. 수용시험과 항상성시험.....	106
10.4. 의료진.....	107
10.5. 훈련.....	108
10.6. 중재 형광투시에서 의심되는 방사선 유발 피부상해의 추적.....	108
10.7. 선량 감사.....	108
참고문헌.....	113

심장학에서 방사선방호

ICRP 간행물 120

ICRP 승인: 2011년 10월

요지- 심장 핵의학, 심장 전산화단층촬영(CT), 심장 중재방사선 절차, 전기생리학 절차 수가 증가하고 의료에서 환자 방사선피폭의 상당 부분을 차지하게 되었다. 복잡한 경피동맥 중재방사선이나 심장 전기생리학 절차는 높은 방사선량을 수반한다. 이를 절차는 방사선상해나 암 위험 증가를 초래할 정도로 높은 환자 피부선량을 낼 수 있다. 선천성 심장병 치료는 특별한 관심사이다. 나아가 심장 도관설치실 의료진은 방호도구를 적절히 사용하지 않으면 높은 방사선량을 받을 수 있다.

ICRP는 형광투시 안내 중재방사선에서 방사선방호에 관한 권고를 ICRP 85로 제공했고 CT에서 방호는 ICRP 87과 ICRP 102, 방사선방호 훈련에 대해서는 ICRP 113으로 제공한 바 있다(ICRP, 2000b,c, 2007a, 2009). 이 보고서는 특별히 심장학에 초점을 맞췄고 ICRP의 기존 간행물에서 심장학에 해당하는 정보를 종합했다. 심장학에 고유한 촬영절차나 중재방사선에 대해서는 강조하였다. 이 보고서의 자료와 권고는 ICRP의 최신 권고를 반영하여 업데이트 하였다.

이 보고서는 심장학자가 심장 CT 고찰, 심장 핵의학, 형광투시안내 심장 중재방사선에서 절차를 정당화하고 방호를 최적화하는 데 도움을 줄 지침을 제공한다. 보고서는 방사선의 생물학적 영향, 방사선방호 원칙, 형광투시 안내 중재방사선에서 의료진 방호, 방사선방호 훈련, 심장 촬영이나 중재방사선에서 품질보증 프로그램에 대한 논의를 포함한다.

주로 피부상해인 조직 상해는 형광투시 안내 중재방사선의 위험이므로 심장 중재방사선에서 방사선 관련 피부상해의 임상 사례, 환자선량을 감축하는 방법, 훈련에 관한 권고, 그리고 중재형광투시를 위한 품질보증에 특별한 관심을 두었다.

중심어: 심장학, 전산화단층촬영, 핵의학, 심장도관설치, 방사선방호

C. Cousins, D.L. Miller, G. Bernardi, M.M. Rehani, P. Schofield,
E. Vañó , A.J. Einstein, B. Geiger, P. Heintz, R. Padovani, K-H. Sim

요점

- 심장 촬영절차를 요청, 수행 또는 해석하는 사람은 그 절차의 방사선위험에 유의해야 한다.
- 전문학회의 합의된 노력을 통해 올바른 사용을 위한 기준과 지침을 개발했으며, 임상 행위에서 이를 사용해야 한다.
- 다른 모든 의료방사선에서와 마찬가지로 심장 핵의학 검사, 심장 CT 검사, 심장 중재방사선 절차 및 전기생리학 절차는 최적화되고 적용 가능하면 선량 감축기법을 사용해야 한다.
- 방사선 상해 위험이 상당하다고 생각되면 이해동의 과정에 방사선 위험에 관한 정보를 포함해야 한다.
- 절차 후에는 방사선량 데이터를 환자 의료기록에 기록해야 한다. 환자선량 보고는 품질보증 목적으로 저장되어야 한다.
- 중재방사선 절차에서 환자 방사선량이 기관의 방사쇠 준위를 초과하면 피부 상해의 조기 발견과 관리를 위해 임상적 추적을 수행해야 한다.
- 방사쇠 준위로 제안하는 값은 피부선량 3 Gy, 공기커마-면적곱 500 Gy cm², 또는 환자 입사기준점 공기커마 5 Gy이다.
- 조직반응 위험이 있는 심장학 절차를 수행하는 의료진은 피부상해를 식별할 수 있어야 한다.
- 심장 중재방사선이나 전기생리학 절차를 수행하는 의료진은 환자나 의료진 선량을 감축하는 방법에 익숙해야 한다.
- 촬영절차(형광투시, CT, 신티그래피)를 보조하는 간호사, 방사선사/기사 및 보건관리 전문인은 자신이나 다른 사람의 피폭을 최소화하기 위해 방사선 위험과 방사선방호 원칙에 익숙해야 한다.
- 직무피폭 위험이 있다면 의료진은 적절한 개인 방호차폐를 사용해야 한다.
- 전리방사선을 사용하는 모든 의사에게 권고된 훈련에 추가하여 중재방사선 심장학자와 전기생리학자는 2단계 높은 수준의 방사선방호 훈련을 받아야 한다.
- 방사선방호 훈련 프로그램은 모든 신규 의료진에 대한 초기훈련과 정기적 재훈련을 포함해야 한다.
- 심장학자는 심장학 절차를 위한 방사선방호의 품질보증 측면에 대한 관리책임이 있으며 의학물리사 지원을 받아야 한다.
- 심장학에서 품질보증 프로그램은 형광투시, CT, 신티크래피에서 환자선량 감사를 포함해야 한다.

- 품질보증 프로그램은 개인선량계 정규 사용을 보장해야 하고 모든 비정상적 선량에 대한 검토를 포함해야 한다.

요약

(a) 심장학에서 환자의 방사선피폭은 주로 핵의학, CT, 중재방사선 절차와 전기생리학 절차에서 발생한다. 심장 핵의학, 심장 CT, 경피 동맥 중재방사선 및 전기생리학 절차는 그 횡수가 증가하고 있고 의료에서 환자피폭의 중요한 부분을 차지한다. 복잡한 경피 동맥 중재방사선이나 심장 전기생리학 절차는 높은 선량을 수반한다. 이러한 절차는 환자의 피부에 방사선 상해를 유발하거나 암 위험을 증가시키기에 충분한 높은 선량을 줄 수 있다. 아동의 선천성 심장병 치료는 특별한 관심사이다. 나아가 심장 도관설치와 전기생리학 시술실의 의료진은 방사선방호 도구를 바르게 사용하지 않으면 높은 방사선량을 받을 수 있다.

1. 방사선의 생물학적 영향

(b) 확률론적 영향(악성질환 및 유전영향)은 영향이 발생할 확률—그러나 그 심각도는 아님—이 문턱 없이 선량의 함수일 것으로 보는 영향이다. 확률론적 영향 유발 가능성은 선량에 따라 증가하지만 선량과 영향의 정확한 관계는 알려지지 않았다. 아동은 성인에 비해 방사선의 확률론적 영향에 2-3배 민감하다. 또 아동은 성인에 비해 잠재적 수명이 더 길어 방사선 관련 후유증이 발생할 시간이 더 많다.

(c) 조직반응(예: 피부상해)는 세포집단의 손상 때문인데 문턱선량과 선량이 증가하면 반응의 심각도가 증가하는 것으로 특성화된다. 조직반응은 ‘결정론적 영향’으로도 불린다. 방사선 유발 피부상해는 방사선량이 부여된 후 몇 달까지 완전히 발현하지 않을 수도 있다. 방사선 유발 피부상해의 진단은 종종 지연된다. 피부상해가 깊은 조직까지 연장되어 증상이 수년 동안 지속될 수 있다. 조직반응은 확률론적 영향의 증가를 동반할 수도 있다.

(d) 심장 방사선손상의 기전은 염증성 과정을 포함한다. 높은 선량 이후에 열려있는 모세혈관 수가 점차 감소할 수 있고 결국 국소빈혈, 심근세포 사멸이나 섬유화, 주 혈관에서 아테롬성 동맥경화(atherosclerosis) 가속, 심장기능 저하, 그리고 치명적 울혈성 심장마비(congestive heart failure) 등으로 이어질 수 있다. 심혈관 방사선영향은 0.5 Gy 이상의 선량에서 일어나는 것으로 보고되어 있다. 일부 복잡한 형광투시 안내 심장 절차에서는 장기선량이 이 수준에 이를 수 있다. 낮은 선량에서 10-20

년의 잠복기가 있다.

(e) 눈의 수정체는 방사선에 민감한 조직이다. 전리방사선은 전형적으로 눈의 수정체에 후낭하백내장posterior subcapsular cataract을 유발한다. 심장도관 시술실에서 일하는 심장학자와 지원 의료진에 대한 조사에서 방호복과 방호용구를 적절히 사용하지 않고 방사선방호 원칙이 준수되지 않은 경우 직무피폭으로 인한 높은 비율의 수정체 혼탁이 발견되었다.

2. 의료에서 방사선방호 원칙의 적용

(f) ICRP는 세 가지 방사선방호 원칙을 권고하는데 정당화, 방호최적화, 그리고 선량한도 적용이다(ICRP, 2007b), 앞의 둘은 선원중심으로 모든 방사선 피폭상황에 적용된다. 셋째는 의료진에게는 적용되나 환자나 간병인, 위안자의 의료피폭에는 적용되지 않는다.

(g) 의료에서 정당화는 의료절차가 특정 환자에게 적절할 때만 수행되어야 함을 의미한다. 즉, 예상하는 임상 이득이 방사선 위험을 포함하여 예상되는 모든 절차상 부담을 상회해야 한다. 정당화는 의뢰의사와 심장 촬영자 또는 중재방사선 의사의 공동책임이다.

(h) 의료에서 최적화는 환자에게 주는 선량이 의료목적에 적절하고 임상적으로 필요하지 않거나 비생산적인 방사선을 회피함을 의미한다. 적절한 영상품질, 진단정보 그리고 형광투시에서는 영상안내를 제공하는 데 요구되는 최소한의 방사선 양으로 촬영이 수행될 때 환자 방사선방호는 최적화된다.

3. 형광투시 안내 중재방사선에서 환자선량 관리

(i) 방사선 상해 위험이 상당하다고 생각되면 이해동의 과정에는 방사선 위험에 대한 정보를 포함해야 한다(ICRP, 2000b). 방사선 위험을 평가할 때 고려해야 할 환자 의료이력의 중요한 측면은 유전적 인자, 병존하는 질환, 약물 사용, 방사선 이력, 임신 여부 등이 있다.

(j) 환자 선량에 영향을 미치는 일부 인자는 X선 시스템에 의존하지만 기타 많은 인자들은 운용자가 X선 시스템을 어떻게 사용하는가에 달려 있다. 절차 수행 중에

심장학자는 형광투시 시간, 시네 시리즈 수와 시네 프레임 수, 그리고 환자 총 선량에 주의를 기울여야 한다. 환자선량이 증가하면 시술자는 환자에게 이미 부여된 선량과 그 절차를 완료할 때까지 필요한 추가 선량을 고려해야 한다.

(k) 환자선량 보고는 절차 종료 시 작성하여 보존해야 한다. 절차 후에 방사선량을 환자 의료기록에 포함해야 한다. 절차로 인한 환자선량이 기관의 방아쇠 수준을 초과하면 피부상해를 조기에 발견하고 관리할 수 있도록 임상 추적이 이루어져야 한다. 방아쇠 수준으로 권고된 값은 피부선량 3 Gy, 공기커마-면적곱 500 Gy cm², 또는 환자 입자기준점 공기커마 5 Gy이다. 많은 선량을 피폭한 환자는 잠재적 방사선 상해 발견을 위해 절차 후 2-4주 동안 추적해야 한다.

4. 중재방사선 형광투시에서 의료진 방호

(l) 직무피폭 방호의 기본 도구는 거리, 시간, 차폐이다. 중재방사선 심장학이나 전기생리학 시술실에서는 개인 방호차폐의 사용이 필요하다. 천장거치 납차폐와 절차 침상 측면에 거는 납커튼의 바른 사용은 직무피폭 선량을 매우 낮은 수준까지 감축할 수 있다. 일반적으로 환자선량을 감축하면 시술자 선량도 줄어든 것이다. 방사선방호 도구와 기법을 적절히 사용하면 중재방사선 의사의 유효선량은 전형적으로 2-4 mSv/y 범위로서 ICRP가 권고하는 선량한도 즉, 5년 평균하여 20 mSv/y 보다 훨씬 낮을 것이다.

(m) 시술자의 방사선피폭은 균일하지도 대칭적이지도 않다. 중재방사선 의사에게는 수정체 방호가 필요하다. 직무피폭 방사선량을 감시하고 감사하기 위해 중재방사선 심장학 시술실에서는 개인감시 배지의 바른 사용이 요구된다.

5. 심장 핵의학에서 방사선방호

(n) 전문학회의 합의된 노력으로 적절한 사용을 위한 기준과 지침이 개발되었다. 이러한 기준과 지침은 심장 핵의학 절차의 정당화를 위한 표준 설정을 돕는다. 정당화는 개인 차원에서 환자별로 이루어져야 하고 고려하는 촬영검사의 이득과 위험을 견줄 뿐만 아니라 그러한 검사를 하지 않음의 이득과 위험도 견주어야 한다. 방사선 위험의 평가는 이러한 과정의 일부가 된다.

(o) 심장 핵의학 절차에서 방호최적화는 환자선량을 최소화하면서 진단영상 품질을

확보하기 위해 방사성의약품과 투여 방사능을 현명하게 선택하는 것과 관련된다. 투여 방사능은 국제 지침이나 국가 지침이 제공하는 규정된 범위 내에 있어야 하며 환자 체질을 반영해야 한다. 만약 부하 촬영이 정규라면 총 선량을 최소화하기 위해 이완 촬영은 생략할 수도 있다. 단일광자방출 전산화단층촬영(SPECT)에서 ^{99m}Tc 를 바탕으로 하는 시약이 ^{201}Tl 을 기반으로 하는 것보다 유효선량이 낮아 선량계측 관점에서 선호된다. 시술자가 환자에 대해 합당한 위험편익분석을 수행하기 위해서는 양질의 선량계측 데이터를 필요로 한다.

6. 심장 CT에서 방사선방호

(p) 심장 핵의학과 마찬가지로 심장 CT의 적절한 사용을 위한 기준과 지침도 개발 되어 있고 정당화도 유사한 방식으로 수행되어야 한다. 심장 CT로 인한 선량은 스캐너 모드, 관전류 및 관전압에 강하게 의존한다. 심박동률 <65-70 박동/분으로 리듬이 안정적인 환자에서는 일반적으로 축방 촬영이나 심전도(ECG) 제어 관전류 변조와 같은 선량감축법을 사용하면서 진단영상품질을 유지할 수 있다. 뚱뚱하지 않은 환자에게는 낮은 전압(예: 100 kVp) 스캐닝을 사용하여 진단영상품을 유지할 수 있다. 최대 관전류는 환자의 체질에 맞춰야 한다. 환자선량 감축법을 개발 하고 검증하는 추가 연구가 필요하다.

7. 심장학자를 위한 방사선방호 훈련

(q) 대부분 국가의 법률은 의료피폭에 책임이 있는 사람은 방사선방호에 적절한 훈련을 받을 것을 요구한다. 세계적으로 심장학자는 방사선방호 훈련을 받지 않거나 조금만 받는다. ICRP는 중재방사선 심장학자나 전기생리학자는 방사선을 사용하는 다른 의사들에게 권고된 훈련에 추가하여 2단계 방사선방호 훈련을 받기를 권고한다(ICRP, 2009).

(r) 훈련 프로그램은 모든 신규 의료진에 대한 초기 훈련과 정기적인 재훈련 및 보수교육을 포함한다. 전문 학회는 보습과정을 포함해야 하며 그 과정에 참여를 전문성 계속개발의 요건으로 할 수 있다.

(s) 방사선방호 훈련활동에는 훈련 프로그램으로부터 습득한 지식의 평가가 따라야 한다(공식 시험체계). 훈련을 이수한 의사는 적절한 인증시험에 합격함으로써 교과과정에서 명시하는 지식을 습득했음을 내보일 수 있어야 한다.

(t) ICRP는 형광투시 과정을 보조하는 간호사나 기타 보건관리 전문인이 자신이나 다른 사람의 피폭을 최소화하기 위해 방사선 위험과 방호원칙에 익숙하기를 권고한다. 훈련은 개인의 역할에 상응해야 한다(ICRP, 2009).

8. 품질보증 프로그램

(u) 방사선방호 품질보증 프로그램(QAP)의 두 가지 주목적은 환자선량을 주기적으로 평가하고 방사선이 사용되는 심장학 시설에서 일하는 종사자의 직무피폭 선량을 감시하는 것이다. 심장학자는 심장학 절차에서 방사선방호의 QAP 업무에 대한 관리책임을 지며, 의학물리사의 지원을 받아야 한다. 방사선방호 자문인 또는 방사선관리책임자도 직무피폭 선량의 감시에 참여해야 한다.

(v) 심장학 시설의 새로운 중재방사선 형광투시 시술실, CT 스캐너나 핵의학 시스템을 위한 계획과정 또는 기존 기기의 업그레이드에는 의학물리사, 선임 방사선사 및 선임 심장학자가 참여해야 한다. 이 사람들은 새로운 기기를 사용하여 수행하는 절차에 경험이 있어야 한다.

(w) QAP에는 영상품질과 절차 프로토콜의 주기적 평가가 포함되어야 한다. QAP는 방사선 유발 피부상해 위험이 있을 때 임상적 추적을 위한 방아쇠 준위를 수립해야 한다. QAP는 개인선량계의 일상 사용을 확립하고 모든 비정상적 선량값에 대한 검토를 포함해야 한다.

(x) 절차 종료 후에는 환자선량 보고를 작성하여 보존하고 환자 의무기록에 포함해야 한다. 선량보고가 가용하지 않다면 절차와 환자실식별과 함께 선량값을 환자 의무기록에 포함해야 한다. 환자선량 감사(진단참조준위와 비교 포함)와 보고는 QAP의 중요한 성분이다.

용어집

흡수선량absorbed dose **D**

다음과 같이 주어지는 기본 선량

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

여기서 $d\bar{\epsilon}$ 은 전리방사선이 질량 dm 인 물질에 부여한 평균에너지이다. 흡수선량의 SI 단위는 매 킬로그램 줄(J/kg)이고 그 특별명칭은 그레이(Gy)이다. 평상 용어로 흡수선량은 물질 단위질량에 흡수된 전리방사선 에너지량이다.

수용시험acceptance test

새로 설치한 기기나 중요한 수리가 이루어진 기존 기기에 대해 생산자 사양이나 계약 사양, 적용되는 법규나 기기표준에 부합하는지를 확인하기 위해 수행하는 시험.

ALARA

‘합리적으로 달성 가능한as low as reasonably achievable’의 단축어. 방호최적화 참조.

베크렐becquerel, Bq

방사능 표준 단위의 특별 명칭. 1 Bq = 1/s ($\approx 2.7 \times 10^{-11}$ Ci).

근접치료brachytherapy

환자 환부에 밀봉 또는 비밀봉 선원을 근접시켜 조사하는 방사선 치료 기법.¹⁾

서맥bradycardia

심박동 수가 분 당 60 미만. 심박동수 및 저변 비정상 여부에 따라 서맥은 치료가 필요할 수도 않을 수도 있다.

심근증cardiomyopathy

1) <역주> 원문은 방사선원을 환자 체내에 배치하여 치료하는 기법으로 설명하고 있으나 체
외에서 근접시켜 치료하기도 하므로(예: 피부암 치료) 표현을 일부 수정하였다.

항상은 아니지만 종종 심실의 펌핑력이 약해지는 심근 질환.

제세동기 cardioverter-defibrillator

일반적으로 맥박조정기처럼 삽식되는 기기로서 심박동률이나 리듬을 감시하여 심장학자가 지정하는 바에 따라 심박급속증tachycardia에 의한 쇼크와 같은 전기치료를 제공한다.

간병인 및 위안자 carers and comforts

의료진이 아닌 사람으로 환자를 돌보거나 위안하는 사람. 이러한 사람에는 일반적으로 가족 또는 친지로서 진단 절차에서 거동이 자유롭지 못한 환자²⁾를 잡고 있거나 핵의약품 투여 환자나 근접치료 중인 환자를 가까이 하는 사람이 포함된다.

취역 commissioning

새 기기가 설치된 후 기기가 병원에서 임상 적용을 위해 제대로 구성되었는가를 검증하기 위해 수행하는 시험.³⁾

항상성 시험 constancy test

기기의 성능이 설정된 기준을 충족함을 확신하기 위해 또는 기기 부품의 특성 변화의 조기발견을 위해 수행하는 일련의 시험(IEC, 1993).

결정론적 영향 deterministic effect

조직반응 참조.

진단참조준위 diagnostic reference level(DRL)

전리방사선에 α 의 회 안에서 의료 촬영에서 일상적 조건에서 특정 절차의 환자선량이나 투여 방사능(방사성물질 양)이 그 절차로서 비정상적으로 높거나 낮지 않은지를 지시하는 데 사용된다(ICRP, 2007b).

소장연동 diastasis

피가 심실로 느리게 들어가거나 정지되는 심장 이완기의 중간단계. 소장연동 시간은 심박동수에 반비례하며 매우 높은 심박동수에서는 연동 시간이 없어진다.

2) <역주> 원문은 아동을 잡고 있는 사람으로 되어 있지만 노약자도 포함되므로 표현을 수정했다.

3) <역주> 취역은 시험뿐만 아니라 기기를 임상에 적용하기 위한 모든 기술적, 행정적 절차를 포함한다.

선량계수dose coefficient

방사능이 있는 물질 단위 섭취 당 선량을 나타내는 데 사용된다. 그러나 때로는 단위 면적 당 특정 핵종 방사능이 침적한 표면 위 일정한 거리에서 외부 선량률처럼 방사능이나 방사능 농도를 선량으로 연계하는 다른 계수를 설명하는 데 사용되기도 한다(ICRP, 2007b).

선량한도dose limit

계획피폭상황에서 개인이 받는 유효선량이나 등가선량이 넘지 말아야 할 값(ICRP, 2007).

부정맥dysrhythmia/arrhythmia

심장 리듬의 부조. 부정맥은 전기적, 순환적 또는 구조적 질환으로부터 올 수 있다. 일부 부정맥은 무해하지만 일부는 치명적이다.

유효선량effective dose

체내의 모든 지정된 조직과 장기의 등가선량에 조직가중치로 가중한 합으로서 다음처럼 표현된다.

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad \text{또는} \quad E = \sum_T w_T H_T$$

여기서 H_T 또는 $w_R D_{T,R}$ 은 조직이나 장기 T 의 등가선량이며 w_T 는 조직가중치이다. 유효선량의 단위는 흡수선량 단위와 같이 J/kg이지만 그 특별명칭은 시버트(Sv)로 한다(ICRP, 2007). 유효선량은 일반 방사선방호체계에 사용할 현실적 양으로서 개발되었는데, 특히 방사선방호 최적화 원칙과 확률론적 영향에 대한 선량 제한에 적용된다.

전기생리학electrophysiology

심장 전기생리학은 심장의 전기 전도체계의 이상을 평가하고 치료함을 지향한다. 심장 전기생리학 절차는 심장 내부 전기체계와 심장의 프로그램된 전기적 자극을 기록하기도 하는데, 이 절차는 진단 목적으로만 수행되기도 하고 진단과 치료(예: 절개수술) 결합절차일 수도 있다. 조율이나 기록을 위한 도관은 혈관을 통해 여러 심실로 들어간다. 도관의 설계나 설치에 적합한 장소는 고찰하는 부정맥의 특성에 따라 결정된다.

고용주employer

국가 법률에 따라 상호 합의한 관계에 의거 고용된 종사자에 대해 인정된 책임.

약속 및 의무를 지는 기관, 회사, 조합, 기업, 협회, 기업합동, 공립/사설 기관, 그룹, 정치적/행정적 실체, 또는 다른 개인. 자기고용자는 종자자이면서 고용주가 된다(ICRP, 2007b).

등가선량equivalent dose H_T

다음처럼 주어지는 조직이나 장기 T의 선량.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

여기서 $D_{T,R}$ 은 조직 또는 장기 T가 방사선 R로부터 받은 평균흡수선량이고 w_R 은 방사선가중치이다. w_R 은 무차원이므로 등가선량의 단위는 흡수선량 단위와 같이 J/kg이지만 그 특별명칭은 시버트(Sv)로 한다(ICRP, 2007). 형광투시에 사용되는 X선은 $w_R = 1$ 이므로 등가선량은 흡수선량과 수치가 같다.

형광투시 안내 중재술fluoroscopically guided intervention

안내되는 진단 또는 치료 중재방사선 절차로서 병소나 치료부위의 확인에 형광투시가 사용된다. 시술은 경피 또는 다른 접근로를 통하여 통상 국부마취 및 진정제 아래서 수행된다(ICRP, 2000b).

그레이(Gy)

흡수선량 SI단위의 특별명칭: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

정당화justification

(1) 방사선이 관련된 계획된 활동이 전체적으로 유익한가(즉, 활동을 도입하거나 계속함에 따르는 개인이나 사회의 이득이 그 활동으로 인한 방사선 위해를 포함한 해로움을 상회함) 또는 (2) 비상피폭상황이나 기존피폭상황에서 제안된 방호전략이 전체적으로 유익할 것인가(즉, 방호전략을 도입하거나 유지함에 따르는 방사선 위해의 경감을 포함해 개인 또는 사회적 이득이 그 비용과 초래되는 해로움이나 손상을 상회함)을 결정하는 과정.

중재술 기준점interventional reference point

환자 입사 기준점 참조.

커마kerma K

질량 dm 내에 비하전 입자가 발생시키는 모든 하전입자의 운동에너지 dE_{tr} 의 합을 그 질량 dm 으로 나눈 몫:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

커마는 비확률론적인 양이며 dE_{tr} 은 운동에너지 합의 예상 값이다. 커마의 단위는 J/kg이며 그 특별명칭은 그레이(Gy)이다. 'kerma'는 'kinetic energy released in a mass'의 축약어이다.⁴⁾

커마-면적곱 kema-area product KAP

이 양은 주로 공기 중에서 구하므로 보다 정확히는 공기커마-면적곱이다. X선관으로부터 나오는 X선빔의 전 단면에 걸친 공기커마의 적분. 커마-면적곱은 빔이 환자에게 전달한 총 에너지의 대체 측정량이며, Gy cm² 단위로 측정한다. 이 양의 ICRU 표기는 P_{KA} 이다(ICRU, 2005). 이전 문헌들은 dose-area product의 축약어인 DAP를 사용했다(Stecker 등, 2009). (커마에 대한 각주도 참조하기 바란다.)

조직이나 장기의 평균 흡수선량 mean absorbed dose to tissue or organ D_T

조직이나 장기 T 에 걸쳐 평균한 흡수선량으로 다음과 같이 주어진다.

$$D_T = \frac{\epsilon_T}{m_T}$$

여기서 ϵ_T 는 조직 T 에 부여된 평균 총 에너지이고 m_T 는 그 조직이나 장기의 질량이다(ICRP, 2007b).

의료피폭 medical exposure

환자 자신의 의학적 또는 치의학적 진료의 일부로서 받는 피폭. 직무피폭이 아니면 환자를 돌보거나 위안하는 사람이 알면서 자발적으로 받는 피폭이나 의생명 연구 프로그램에 참여하는 자원자가 받는 피폭도 의료피폭에 포함시킨다(ICRP

4) 공기커마와 공기 중 선량에 대한 참고. 여러 해 동안 진단방사선학에서 공기 중 선량계측량은 공기 흡수선량으로 주어져 왔다. 비록 2차 전자의 평형일 때는 이 두 양의 값은 같지만 그러한 평형이 이루어지지 않는 공기와 조직의 경계 또는 공기와 모의체의 경계에서는 두 양이 다르다. 이러한 영역에서 공기 흡수선량을 일반적인 수단으로는 구할 수 없는 반면, 선량계측 기기가 공기커마로 교정되기 때문에 공기커마는 쉽게 측정된다. 따라서 보고된 모든 공기 흡수선량 값은 실상 공기커마 값이다. 나아가 장기선량은 공기커마를 장기 선량으로 변환하는 가용한 환산계수를 이용하여 구할 수 있다. 따라서 공기 중에서 흡수선량을 구하려 노력할 실질적 가치가 없다. 이러한 이유로 공기 중에서 구할 양으로 국제방사선단위측정위원회(ICRU)는 공기 흡수선량보다 공기커마를, 입사면 흡수선량보다 입사면 공기커마를, 흡수선량-면적곱보다 공기커마-면적곱을, CT 선량지수보다 CT 공기커마지수를 사용할 것을 권고했다(ICRU, 2005). 이 보고서에서 전통적 이유로 공기흡수선량을 사용하고 있는데 대부분 독자가 공기커마보다 (흡수)선량이라는 용어에 익숙해 있기 때문이기도 하다.

2007b).⁵⁾

심근관류myocardial perfusion

심장근육으로 가는 혈류.

직무피폭occupational exposure

직무의 과정에서 종사자에게 발생하는 모든 피폭을 말한다. 그러나 방사선은 어디나 있기 때문에 ICRP는 ‘직무피폭’ 사용을 경영자 책임으로 보는 것이 합리적인 상황의 결과로서 직장에서 방사선 피폭’으로 한정한다. 규제 배제된 피폭 또는 규제 면제된 행위나 선원으로 인해 발생한 피폭은 일반적으로 직무피폭 방호 대상으로 고려할 필요가 없다(ICRP, 2007b).

방호최적화optimisation of protection

ICRP는 개인선량의 크기, 피폭자 수, 그리고 피폭 발생 가능성(피폭이 불확실할 경우)을 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 범위에서 낮게 하려는 선원중심 과정으로 방호최적화 원칙을 정의하고 있다. 이는 방호수준이 여건에서 최선이어서 해로움에 대한 이득의 여분을 극대화 한다는 의미이다(ICRP, 2007b). 의료 촬영이나 치료에서 방호최적화는 환자선량이 그 의료목적에 적합하고 임상적으로 불필요하거나 비생산적인 방사선은 피해야 함을 의미한다. 적절한 영상품질, 진단정보, 그리고 형광투시에서는 영상안내를 제공하기에 필요한 최소한의 방사선량으로 촬영이 수행될 때 환자의 방사선방호는 최적화된다.

환자 입사기준점patient entrance reference point

C-암 형광투시기와 같은 동심 형광투시 시스템에서 환자 입사기준점은 회전중심에서 X선빔 축을 따라 초점 쪽으로 15 cm 거리에 위치한다(IEC, 2010). 과거 표준에서는 이 점을 ‘중재술 기준점interventional reference point’라 불렀다(IEC, 2000). 갠트리 회전중심에 심장이 놓일 경우 환자 입사기준점은 환자 입사면 피부에 가깝다.

피크 피부선량peak skin dose

높이 피폭하는 국부 피부(즉, 형광투시 절차 동안 X선빔 내에 가장 오래 놓인 국

5) <역주> 이들 피폭은 환자의 의료피폭과는 성격이 다르다. 그러나 현행 방호체계에서는 피폭범주가 직무피폭, 일반인피폭, 의료피폭의 셋으로만 나뉘기 때문에 이들의 피폭이 분류될 범주가 마땅하지 않아 유사한 의료피폭에 포함시키고 있지만 선량제약치를 적용하는 등 방호관리는 환자 의료피폭과 약간 차이가 있다.

부 피부) 에서 가장 높은 피부 흡수선량. 이 양에 대한 ICRU 표기는 $D_{skin,local}$ 이며(ICRU,2005) NCRP 표기는 $D_{skin,max}$ 이다(NCRP, 2010). 피크 피부선량은 Gy 단위로 측정된다.

경피 관상동맥 중재술percutaneous coronary intervention PCI

경피 관상동맥 중재술은 관상동맥 질환이 있는 환자를 치료하기 위한 여러 절차를 포괄한다. 도관을 동맥 환부에 도달시켜 협착부에 풍선을 붙여 넓히고 영구적 지지대 역할을 하도록 스텐트(금속 망 관)를 종종 설치한다. 이 절차를 보통 관상동맥 혈관성형술이라 부른다.

방호원칙principles of radiological protection

제어 가능한 피폭상황에 있는 방사선원이나 사람에게 적용되는 한 세트의 원칙. 정당화 원칙과 방호최적화 원칙은 선원 중심적이고 모든 피폭상황에 적용된다. 선량 한도 적용 원칙은 개인 중심적이고 계획피폭상황에만 적용된다(ICRP, 2007b).

방사선가중치radiation weighting factor w_R

낮은 LET 방사선에 비해 높은 LET 방사선의 생물학적 효력이 높음을 반영하기 위해 조직이나 장기의 흡수선량에 곱하는 무차원 인자. 이 가중치는 조직이나 장기에 평균한 흡수선량으로부터 등가선량을 도출하는 데 사용한다(ICRP, 2007b).

RF 절제술radiofrequency ablation

심장학에서 하나 이상의 도관을 형광투시 안내로 혈관을 통해 심장 근육까지 도달시켜 폭발적 고주파RF로 매우 작은 영역의 비정상적 전기신호를 야기하거나 전달하는 세포를 파괴하는 절차.

방사선사radiographer

방사선사는 의료용 X선장치를 이용하여 의사의 처방에 따라 체내 조직, 장기, 뼈나 혈관의 영상을 만들어 질환이나 부상의 진단을 돕는다. 방사선사는 책무를 수행함에 해부학, 생리학, 정위, 촬영기술, 방사선생물학 및 방사선방호 지식을 적용한다. 방사선사와 방사선기사radiation technologist는 동의어이다.

기준 공기커마reference air kerma RAK

특정 조건에서 1차 X선빔의 공기커마를 측정하여 환자 기준입사점에서 등가 값으로 나타낸 공기커마(IEC, 2004, 2010). RAK은 절차 동안 형광투시 갠트리에 대해

일정한 점(환자 입사기준점 참조)에 누적되는 공기커마이다. RAK는 후방산란을 포함하지 않으며 Gy 단위로 측정된다. RAK는 특수한 양이고 ICRU(2005)는 $K_{a,i}$ 로, NCRP(2010)는 $K_{a,r}$ 기호를 사용하고 있다. 때로는 RAK를 ‘기준선량reference dose’ 또는 ‘누적 공기커마cumulative air kerma’라고도 부른다. 이전 문서들은 ‘누적선량cumulative dose’라는 용어를 축약어 ‘CD’와 함께 사용했다(Stecker 등, 2009).

신티그래피scintigraphy

핵의학 촬영 절차.

시버트sievert Sv

등가선량, 선량당량 및 유효선량 SI 단위의 특별명칭. 단위는 J/kg이다.

의료진staff

이 보고서의 맥락에서 의료진은 보건관리 종사자(종사자 참조)로서, 방사선절차 동안 환자를 다루는 데 참여하는 사람(예: 의사, 간호사, 방사선사) 또는 그들의 직무 과정에서 영상의학 기기로부터 방사선을 피폭할 수 있는 사람(예: 기기수리사, 건물 관리인)이다.

방사선의 확률론적 영향stochastic effect of radiation

영향의 심각도가 아니라 영향이 발생할 확률이 문턱 없는 선량의 함수로 간주되는 악성질환 및 유전적 영향(ICRP, 2007b).

협착stenosis

공동 구조의 좁아짐. 관상동맥 해부학에서는 협착은 관상동맥의 내경이 좁아짐을 의미한다.

스트레스 시험stress test

심장 혈액역동학, 전기적 활동, 관류 또는 기능을 평가하기 위한 표준화된 절차. 운동이나 약물을 투여하여 운동을 모의하여 스트레스를 유발한다.

다대 방사선량 수준substantial radiation dose level SRDL

절차 동안 추가 선량관리 조치나 평균적 환자에게 임상적으로 어떤 상해를 줄 것으로 보는 방사선 수준에 대해 의학적 추적을 격발하는 데 사용하기 위해 적절히 선정된 참조 값. 이것이 SRDL를 넘는 선량 준위가 반드시 상해를 초래한다거나 SRDL 아래서는 상해가 일어나지 않는다는 것을 의미하지는 않는다(NCRP, 2010).

빈맥tachycardia

분 당 100 고동을 넘는 심박 수. 심박 수와 근본 이상 유무에 따라 빈맥⁶⁾은 치료가 필요할 수도 아닐 수도 있다.

조직반응 문턱선량threshold dose for tissue reaction

피폭자 1%에서 조직반응을 일으킬 것으로 평가된 선량.

조직반응tissue reaction

문턱선량과 선량 증가에 따라 반응의 심각도가 증가하는 것으로 특성화되는 집단 세포의 상해. '결정론적 영향'이라고도 부른다. 생물학적 반응 수정자를 포함하여 피폭 후 절차로 결정론적 영향을 수정할 수 있는 경우도 있다(ICRP, 2007b).

조직가중치tissue weighting factor w_T

조직이나 장기 T 의 등가선량에 가중하여 전신의 균등조사로 인한 총 보건위해에 대한 해당 조직이나 장기의 상대기여를 나타내게 하는 인자(ICRP, 1991).⁷⁾ 조직가중치는 $\sum_T w_T = 1$ 이 되게 한다(ICRP, 2007b).

심장판막 질환valvular heart disease

하나 이상의 심장판막이 비정상인 심장질환. 비정상적으로 좁거나 누설이 있는 심장판막은 심실이나 심방 사이 또는 폐나 전신으로 피를 내보내는 심장의 능력을 방해한다.

종사자worker

전일제, 시간제 또는 임시직 여부에 관계없이 고용주가 고용한 사람으로서 직무 방사선방호와 관련하여 분명한 권리와 의무가 있는 사람(ICRP, 2007b). 의료에서 방사선과 관계되는 종사자는 직무피폭을 받는다.

6) <역주> 빈맥을 심박급속증으로 부르기도 한다.

7) <역주> 조직가중치를 체내 각 조직의 등가선량으로부터 전신에 대한 위해(危害) 가중평균을 얻는 데 사용하는 가중치로 설명하는 것이 더 적절하다.

1. 서론

심장학에서 환자는 핵의약품, 전산화단층촬영(CT), 심장 도관 진단, 경피 관상동맥 중재술, 전기생리학 절차, 선천성 심장질환이나 후천성 판막질환의 교정 절차, 기타 혈관 중재술 절차 등에서 방사선을 피폭한다.

심장 핵의학, CT, 심장 중재술 절차 및 전기생리학 절차가 증가하고 있고 환자 방사선피폭의 큰 부분을 차지한다.

심장 중재술과 전기생리학 모두가 환자 피부에 방사선 상해를 입히거나 암 위험을 증가시킬 정도로 높은 피부선량을 줄 수 있다.

복잡한 경피 관상동맥 중재술이나 심장 전기생리학 절차는 높은 방사선량과 연계될 수 있다.

아동의 선천성 심장병 치료는 아동의 감수성이 크기 때문에 더욱 관심 대상이 된다.

심장 도관 시술실 의료진은 방사선방호복과 방호장구를 적절히 사용하지 않으면 높은 선량을 받을 수도 있다.

1.1. 도입

(1) 심장학에서 환자는 여러 상이한 방식으로부터 전리방사선을 피폭하는데 투과촬영, 형광투시(영화촬영 포함), CT, 핵의학 등이다. 이들 방법은 수행되는 빈도, 환자선량, 환자에게 부여되는 과정, 시술자와 의료진에게 주는 선량 측면에서 상당히 다르다. 투과촬영은 이 보고서에서 더 논의하지 않고 다른 세 유형만을 주제로 한다.

1.2. 형광투시 안내 절차

(2) 심장학자는 다양한 형광투시 안내 절차를 수행한다. 여기에는 비정상인 관상동맥의 진단 및 치료 절차, 심장 부정맥의 진료, 선천성 및 판막질환의 진료 및 기

타 혈관 중재술이 포함된다. 이러한 절차는 신생아부터 노인까지 모든 연령 환자에게 수행된다. ICRP는 이전에 형광투시 유도 절차에서 방사선상해의 예방을 논의한 바 있지만(ICRP, 2000b) 지난 10년간 기술과 방사선 영향에 대한 우리 이해의 발전이 있었다.

1.2.1. 경피 관상동맥 중재술

(3) 지난 10년 동안 심초음파조영술ecocardiography, 심장 CT, 심장 신티그래피, 심장 MRI를 포함한 비침습적 심장 조영술이 계속 발전하고 있지만 점차 많은 환자가 형광투시 안내 침습적 심장 진료절차를 거치고 있다. 유럽에서 1992년과 2001년 사이 심혈관조영술은 3배, 경피 관상동맥 중재술(PCI)는 5배 증가했는데 주로 심장 스텐트 도입 때문이다(Togni 등, 20014). 1990년과 2003년 사이 유럽에서 관상동맥 혈관성형술의 연간 평균 증가는 네덜란드의 2.78%에서 핀란드의 11.82%까지 범위에 있고 그 평균은 6.73%였다(Faulkner와 Werduch, 2008a). 유럽에서 2007년 관상동맥 조영술 3,043,000건, PCI 910,000건, 관상동맥 스텐트 설치

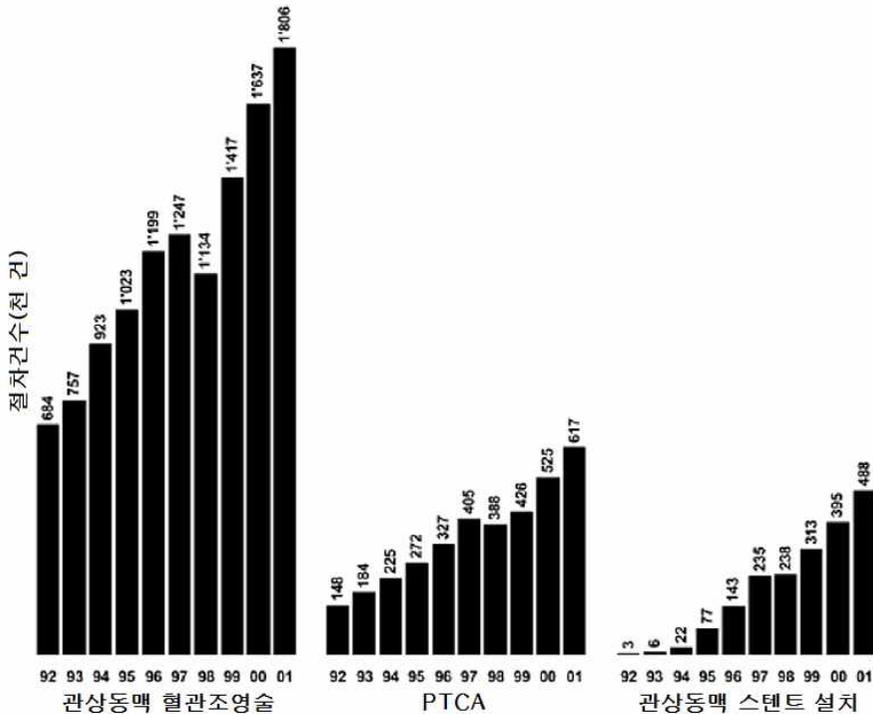


그림1.1. 유럽에서 1992년부터 2001년까지 관상동맥 혈관조영술, 경피관상동맥성형술(PTCA) 및 관상동맥 스텐트 설치 절차 수(천 건). Togni 등(2004)로부터 승인을 받아 재현.

690,000건이 행해졌다(Faulkner와 Werduch, 2008b).

(4) 북미에서도 1990-2000년 시기에 비슷한 증가가 관찰되었다(Laskey 등, 2000; Anderson 등, 2002). 그러나 2006년과 2008년 사이 미국에서 침습적 관상동맥 절차 수는 약 2% 감소했고(NCRP, 2010) 일부 유럽 국가에서도 감소하는 것으로 나타났다(Meier, 2010). 심장 CT 사용의 증가, COURAGE 시도 결과(Boden 등, 2007) 및 이들 절차에 대한 변제의 변화 등 여러 인자가 원인일 수 있다.

(5) 미국에서 2006년 중재방사선 형광투시 절차는 환자 의료피폭의 셋째로 큰 선원이었는데 의료피폭의 14%를 차지했다(NCRP, 2009). 심장 절차가 전체 중재방사선 형광투시 절차의 28%를 차지했지만 환자 피폭은 53%를 차지했다.

(6) 이러한 증가는 주로 서구 국가에 대한 것이지만 다른 국가에서도 비슷한 경향을 보인다. 예를 들면 중국에서 연간 PCI 증가율은 약 40%나 된다(Cheng, 2004). 총 수는 중국 인구에 비해 상대적으로 적은 편인데 이는 중국 인구에서 낮은 관상동맥 질환 이환율(3-7%, 서구 백인 비율의 약 1/4)을 반영하는 것 같다. 그러나 식습관과 생활방식 변화와 흡연으로 인해 증가할 것이 예상된다(Cheng, 2004; Moran 등, 2010). 개발도상국 조사는 20개 참여국의 30% 정도가 2004년에서 2007년까지 3년 사이 업무량이 배가된 것을 드러냈다(Tsapaki 등, 2009). 같은 연구는 소아 중재방사선 절차 수가 성인 중재방사선 절차 수만큼 높음을 보였다.

1.2.2. 피부상해

(7) PCI와 전기생리학 절차는 환자에게 피부상해(조직반응, 제2장과 제3장 참조)를 초래하기에 충분한 높은 선량을 줄 수 있다(Miller, 2008). 한 병원에서 피부상해 빈도는 0.03%로 평가되었다(Padovani 등, 2005). 비록 심장 절차로 인한 방사선 상해 수는 낮은 편에 머무르고 있지만 이러한 상해는 그 환자에게는 중대한 충격이 된다. 따라서 시술 임상 의사에게는 이들 절차로부터 잠재적 위험에 대해 알리고 계속 상기시키는 것이 중요하다.

(8) 다수 절차를 거치는 환자 수가 계속 증가하고 있다(Laskey, 2001). 복잡한 증례는 2회 이상 시술할 수도 있다. 재협착과 질환 진단도 중재술 반복을 초래할 수 있다. 최근의 3332 환자에게서 거의 1/3이 최소 2회의 절차를 거쳤다(Padovani, 2005). Vañó 등(2001)은 복수의 형광투시 관상동맥 절차를 거친 환자에게서 피부

영향률이 훨씬 높음을 관찰했다. 절차 반복 특히, 짧은 기간에 수행된 때에는 피부 상해 위험이 증가한다(Balter 등, 2010). 심장의 복수 형광투시 절차는 방사선방호 관점에서 관심의 대상이다. 피부 상해 위험을 과소평가하지 말아야 한다.

(9) 환자 방사선량은 절차 복잡성과 관련된다(Bernardi 등, 2000; Peterzol 등, 2005; Balter 등, 2008; IAEA, 2009). 다수 혈관 PCI는 복잡성 인자로 고려되지만 항상 그렇지는 않을 수 있다(Bernardi 등, 2000). PCI 복잡성에 영향을 미치는 다른 인자로는 병소의 유형, 폐색의 만성도, 혈관의 굴절수준, 혈관 분기점 관여 등이 있다(Balter 등, 2008; IAEA, 2009).

1.2.3. 심장 전기생리학 절차

(10) 절차의 수와 복잡성 모두에서 증가를 보이는 둘째 분야는 중재 전기생리학이다. 많은 환자가 서맥bradycardia으로 심박조정기를 영구 이식받는다. 1997년부터 2001년 사이 세계적으로 새로 심박조정기를 이식한 수가 약 50% 늘었다(Mond 등, 2004). 보다 최근에는 심장마비나 심근증 환자 치료에 양심실 심박조정기 biventricular pacemaker(심장 재동기화 치료법)이 도입되었다(Salukhe 등, 2004). 급성 심장정지 위험이 있는 환자에게서 구멍역할을 드러낸 연구(Moss 등, 2002; Salukhe 등, 2004)의 결과로 심실제세동기cardioverter-fibrillator 사용 역시 증가하고 있다. 2007년에 유럽에서 554,000 건의 심박조정기 이식이 수행된 것으로 평가되며(Faulkner와 Werduch, 2008b), 2008년 미국에서는 189,000건의 전기생리학 절차와 361,000 건의 심장기기 이식이 이루어진 것으로 평가했다(NCRP, 2010).

(11) 심장 전기생리학 절차는 재진입 빈맥 환자의 치료도 포함한다. 이러한 빈맥 환자는 종종 관상동맥 질환 환자보다 훨씬 젊기 때문에 진단 절차와 RF 절제술 모두를 요구한다. 이 절차에 필요한 형광투시 시간이 길기 때문에 형광투시 기술인자가 최적화되지 않으면 이 환자들이 매우 높은 선량을 받을 수 있고 조직반응을 겪을 위험이 상당하다(Rosenthal 등, 1998; McFadden 등, 2002).

1.2.4. 선천성 심장판막 질환

(12) 선천성 심장판막 질환은 두 그룹으로 나뉘는데 하나는 도관기법이 사용되는 것이고 하나는 새로운 도관기술이 계속 개발되어야 하는 것이다. 가까운 장래에 경피 중재술 시술 수가 늘어날 것으로 보인다. 이 그룹은 경피 중재술을 거치는 환

자의 작은 분율을 대표하지만 이 질환은 아동과 성인 모두에서 발견된다. 아동은 주로 암인 확률론적 방사선 영향의 발생 위험이 더 큰데 아동의 기대여명이 더 길고 성인에 비해 방사선 감수성이 크기 때문이다(Hall, 2009).

(13) 선천성 심장판막 질환을 치료하는 기술은 매우 위험한 수술적 절차를 대체하기 때문에 대체로 정당화 된다. 비록 경식도심장내 초음파가 부분적으로 형광투시를 대체할지 모르지만(Rice 등, 2002; Zanchetta와 Maiolino, 2004) 방사선 위험은 여전히 문제로 남아 있고 종종 과소평가되고 있다. 폐동맥판 하나를 이식하는데 자그만치 129분의 형광투시 시간이 필요할 수 있다(Bonhoeffer 등, 2002). 이 새로운 기기를 유아나 아동에 사용할 때 안전이슈에 대한 문헌은 거의 없다(Levi 등, 2003).

1.2.5. 소아 환자

(14) 모든 심장 혈관촬영 절차의 약 7%는 0-15세 아동에게 실시되는 것으로 평가된다(UNSCEAR, 2000). 가장 널리 수행되는 절차는 풍선 판막성형술balloon valvuloplasty, 심방중격결손atrial septal defect, 난원공 개존증patent foramen ovale(PFO) 또는 동맥관 개존증ductus arteriosus의 기구 막음, 폐동맥 협착부 또는 대동맥 축착부coarctation of the aorta 스텐트 설치, 전기생리학 등이다. 이들 절차는 긴 형광투시 시간을 요구한다. 이와 같은 정립된 절차 외에 경피 폐동맥 밸브 교체, 심실중격결손 막음ventricular septal defect closure, 폐동맥 혈류 제한을 위한 조임기구 삽식, 심실과 혈관 사이 연속성 유발을 위한 RF 천공과 같은 새로운 절차들도 소개되고 있다(Levi 등, 2003). 좌심형성부전증후군hypoplastic left heart syndrome과 같은 복잡한 질환 치료에 경피나 경피/수술 결합 접근이 제안되고 있다. 태아 중재술도 가능하다.

(15) 두 평면 평판검출기 X선 시스템을 사용하여 수행된 심장 절차를 거친 1세 미만에서부터 16세까지 소아 137명의 환자선량 조사에서 진단 절차에 대해 평균값은 1.9-8.6 Gy cm²로 나타났다. 치료절차에서 평균선량은 연령군의 양극단에서 2.4-17.8 Gy cm² 범위였다(Martinez 등, 2007). 심장 도자진단을 받은 205 아동 시리즈에서 평균 선량은 17 Gy cm²였다(Chida 등, 2010). 성인의 형광투시 안내 심장 중재술 진단절차와 치료절차⁸⁾에 대해 제안된 진단참조준위(DRL) 각각 50 Gy

8) <역주> 치료절차에 대해 진단참조준위를 설정하는 것이 모순처럼 보인다. 그러나 여기서 말하는 치료란 방사선이 치료제로 사용되는 것이 아니라 의사에게 눈을 제공하는 중재 역할만 하고 치료는 스텐트나 RF 등 다른 기전으로 이루어지므로 사실 치료보다는 진단

cm²와 125 Gy cm²와 비교할 때 전형적으로 소아 환자는 성인 환자 선량의 20% 이하를 받는다. 그러나 소아 심장 도자절차에서 방사선량이 주목할 대상이다 (Andreassi 등, 2006; Andreassi, 2009). 체중 30-40 kg 환자가 심장 도자시술실에서 받는 선량의 90 백분위는 200 Gy cm²까지 올라갈 수 있다(NCRP, 2010).

1.3. 심장 전산화단층촬영

(16) 심장 CT기술은 근년에 빠르게 발전했고⁹⁾ 이러한 발전은 다양한 유형의 심장 CT 고찰을 가능하게 했다. 현재 심장CT는 여러 고유한 절차를 포함하는데 관상동맥 석회측정(관상동맥 석회스캔), 관상동맥 CT 혈관조영술CT angiography(관상동맥 CTA), 폐정맥 CT 혈관조영술, 심근 CT관류, 핵의학 영상자료의 CT 감쇠자료 보정 등이 있다(Wiegold 등, 2011). 근년의 기술발전은 이들 절차의 수행 건수 증가도 동반했지만 세계적 통계는 아직 가용하지 않다. NCRP 보고서(2009)에 따르면 미국에서는 2006년 CT가 최대 의료피폭원으로서 환자 의료피폭의 49%를 차지했다. 이 보고서에서 심장CT(관상동맥 CTA 및 관상동맥 석회 스캔 포함)가 전체 CT 스캔의 4.7%를 차지하지만 CT 환자선량으로는 12.1%를 차지한다. 최신 세대 스캐너는 환자선량 감축 잠재력이 있는 기술을 포함하여 이러한 대상 집단에게 방사선 부담도 줄어줄 것이다.¹⁰⁾

1.4. 심장 핵의학

(17) 세계적으로 연간 3270만 건의 진단 핵의학 절차가 수행된다(UNSCEAR, 2008). 이 중 약 1400만 건이 핵의학 심장학 절차인데 그 빈도는 빠르게 증가하고 있다(Davis, 2006). 90% 이상이 심근 관류나 생존력의 평가를 위한 심근관류 신티그래피 고찰이다. 늘어나고 있지만 아직은 소수 기관에서는 양전자방출 단층촬영(PET)로 고찰하지만 심장 핵의학의 거의 대부분은 단일광자방출 CT(SPECT)를 이용해 수행된다.

에 가깝다. 즉, 중재술이 치료에 적용되는 경우에도 환자선량에는 DRL을 적용해도 무방하다.

9) <역주> X선관과 검출기 소자의 발전으로 64행 이상의 다행검출기 CT가 보급되어 스캔 속도가 혁신적으로 빨라짐에 따라 빠르게 움직이는 심장도 CT촬영이 가능해졌다.

10) <역주> 현재 몸통 CT 스캔에서 환자선량은 유효선량으로 10 mSv 내외인데 스캐너 공급사들은 이를 1 mSv 수준으로 낮추는 소위 “1 mSv 스캐너”를 개발하고 있다.

(18) 미국에서 2006년 환자 의료피폭의 26%를 핵의학 절차가 차지하며, 심장 고찰이 핵의학 절차의 85%를 차지한다(NCRP, 2009). 미국에서 핵의학 절차는 CT에 이어 두 번째로 큰 의료피폭원이다.

(19) 미국에서 이루어지는 심장 핵의학 절차는 나머지 세계 모두에서 수행되는 것보다 많다. 이러한 불균형의 추정 원인은 시험 접근성, 소송 선호 법의학 환경 및 시험의 수익 동기 등이다. 그러나 미국 시리즈는 적합성 평가를 승인하기에 충분한 데이터가 가용한 절차에 대해 약 15%가 부적절한 지시에서 수행되었음을 드러냈다(Gibbons 등, 2008; Hendel 등, 2010). 심장학자는 개인 환자 여건과 진단 요구를 바탕으로 임상 의사결정에 정당화 원칙을 내장해야 하며, 스트레스 초음파검사처럼 방사선을 필요로 하지 않는 대안 방법 사용을 고려해야 한다.

1.5. 직무 방사선 위험

(20) 방사선 위험은 환자에게만 국한되지 않는다. 시술자와 의료진도 형광투시 안내 절차로 상당한 방사선피폭을 받을 수 있다. 심장 중재방사선 절차의 복잡성 증가가 기술 발전으로 인한 선량 감축을 상쇄하는 것으로 나타난다(Kim 등, 2008). 시술자 선량에는 상당한 편차가 있어 방사선방호 관행이 개선될 여지가 있음을 지시한다(Kim과 Miller, 2009). 근래 연구는 방사선방호 용구를 적절히 사용하지 않고 방사선방호 원칙을 따르지 않으면 중재술 심장학자에게 방사선 기인 백내장 발생률이 증가한 것을 보여준다(Ciraj-Bjelac 등, 2010; Vañó 등, 2010). 불행히도 의료진에 대한 방사선량의 적절한 감시가 부족하고 직무피폭 선량 데이터의 신뢰성도 부족하다(Padovani, 2011).

1.6. 요약

(21) 요약하면 방사선을 사용하는 심장학 절차가 수나 복잡성에서 증가하고 있다. 환자에게 이득은 분명하지만 환자와 의료진에게 주는 선량이 중요하므로 적절히 관리해야 한다. 어린 환자에 대해서는 더 높은 암 위험을 절차의 최적화에서 고려해야 한다. 고령 환자에서는 암 위험은 중요하지 않지만 조직반응(피부상해) 예방을 고려해야 한다. 중재방사선 심장학자는 직무 방사선위험이 가장 높은 종사자에

속하므로 환자와 자신을 어떻게 방호하는지를 알아야 한다. 이 보고서는 이러한 목표의 달성을 도우려는 것이다.

2. 방사선의 생물학적 영향

- 조직반응은 세포 집단의 상해로 인한 것이며 문턱선량과 선량 증가에 따른 반응의 발현 및 심각도가 증가하는 것으로 특성화된다. 조직반응은 ‘결정론적 영향’으로도 불린다.
- 확률론적 영향(악성질환 및 유전적 영향)은 심각도가 아니라 영향이 발생할 확률이 문턱선량 없이 선량의 함수로 간주되는 영향이다.
- 방사선 유발 피부상해는 방사선량이 부여된 여러 달 후까지 제대로 발현하지 않을 수도 있다.
- 방사선 유발 피부상해의 진단은 종종 늦어진다.
- 눈의 수정체는 방사선에 민감한 조직이다.
- 방사선은 전형적으로 수정체에 후낭하백내장을 일으킨다.
- 도자 시술실에서 일하는 심장학자와 의료진에 대한 조사에서 방사선방호 도구가 적절히 사용되지 않은 경우 직무피폭으로 인한 수정체 혼탁 비율이 높게 나타났다.

2.1. 방사선 영향의 유형

(22) 방사선 영향은 두 그룹으로 나뉘는데 조직반응(유해한 조직반응)과 확률론적 영향(암과 유전질환)이다.

(23) 조직반응(예: 피부상해)은 고선량 피폭 후 세포의 생식멸절(reproductive sterilisation)에 의해 주로 유발된다. 조직반응 유발은 일반적으로 문턱선량으로 특성화된다. 문턱선량이 존재하는 이유는 주어진 조직에서 임상적으로 상당한 형태로 상해가 발현하기 전에 임계 세포집단의 생식 생존 상실이 발생해야하기 때문이다. 문턱선량 이상에서는 조직 회복 능력의 부전을 포함하는 상해의 심각도가 선량에 따라 증가한다(ICRP, 2007b). 문턱선량은 가변적이고 피폭 조직의 본질과 컨디션에 따라 변한다(Balter 등, 2010).

(24) 상해는 세포의 분열이나 분화 시도 실패로 사망하고 정규 세포대사의 일환으

로 소실될 때까지 임상적으로 나타나지 않는다(Balter 등, 2010). 고선량 피폭 피해자의 결과는 파괴적일 수 있다(Balter 등, 2010)

(25) 한 대규모 시리즈에서 방사선 유발 피부상해의 80%는 심장 절차에서 왔다(Koenig 등, 2001a). 그렇지만 심장학자들은 방사선이 피부상해를 초래하는지 모르거나, 전달하는 방사선량의 크기를 의식하지 않거나, 많은 방사선을 피폭한 환자를 추적하지 않거나, 피부상해가 발생하여 환자가 다시 올 때 방사선 관련 병리학 가능성을 고려하지 않기 때문에 방사선상해가 심장 절차와 관련된다는 것을 종종 인지하지 못한다.

(26) 일부 환자는 높은 선량을 받기도 하고 방사선 상해 건수도 증가하고 있다(NCI, 2005). 그러나 현재 실무를 하는 중재방사선 심장학자 대부분은 방사선상해 사례를 개인적으로 경험하지는 못했다. 방사선상해 건수는 세계적으로 수행되는 형광투시 안내 심장학 절차 수에 비해 적다.

(27) 확률론적 영향에 대해서는 1990년부터 방사선 종양형성에 관한 세포 및 동물 데이터의 집적이 단일 세포에서 DNA손상 반응과정이 방사선 피폭 후 암 발생에 결정적으로 중요하다는 관점이 강화되었다. 약 100 mSv 이하 선량에서는 불확실성이 있지만 역학적, 실험적 연구는 방사선 위험에 대한 증거를 제시한다(ICRP, 2007b; Linet 등, 2012).

(28) 이러한 영향은 확률론적이어서 영향이 발생하는 데 문턱이 식별되지 않는다. 확률론적 영향을 유발할 가능성은 선량에 따라 증가하지만 선량과 영향 사이 정확한 관계는 알려지지 않았다. 약 100 mSv 미만의 낮은 선량 영역에서는 암이나 유전질환의 발현이 해당 조직이나 장기의 등가선량 증가에 정비례하여 증가(문턱 없는 선형비례 모델, LNT 모델)한다는 가정이 과학적으로 이해할만 하다. 선량은 영향의 심각도와는 무관하다.

(29) 아동은 방사선의 확률론적 영향에서 성인에 비해 2-3배 민감하다(ICRP, 1991). 또, 아동은 성인보다 잠재 여명이 길어서 방사선 관련 후유증이 발현할 시간이 더 많다. 아동에게 형광투시 안내 절차 당 치명적 암의 확률은 약 0.07-0.08%로 평가되지만 위험은 환자의 연령, 기저 기대수명, 절차가 수행된 내용에 따라 크게 차이날 수도 있다(Bacher 등, 2005; Martinez 등, 2007).

(30) 실험동물에서는 방사선이 유전질환을 초래한다는 명백한 증거가 있지만 사람

의 방사선피폭이 후손에게 초과 유전질환을 낸 직접 증거는 여전히 없다(ICRP, 2007b).

2.2. 배경

(31) 1895년 X선을 발견한 몇 달 후에 방사선 유발 피부 변화가 관찰되었다(Codman, 1896; Daniel, 1896). 초기 방사선학자 일부는 심각한 피부염, 방사선 유발 암, 손가락 절제를 겪었다. X선은 보이지 않고 피폭 시 어떤 자극이 없기에 X선이 그 원인이라는 인식이 지연되었다. 간행물 103에서 적시했듯이 이러한 방사선상해를 예방하려는 목표가 오늘날 ICRP로 된 조직을 구성하게 된 원동력이 되었다(ICRP, 2007b).

(32) PCI 수가 드라마처럼 증가함에 따라 심부 피부 궤양이나 궤사가 발생한 환자 사례가 1990년대에 보고되었다(ACR, 1992; Shope, 1996). 1994년에 미국 식약처(FDA)는 형광투시 안내 절차로 인한 피부상해에 관한 조언을 냈다(FDA, 1994). 방사선 피부상해는 RF 도자 절제에서도 보고된 바 있다(Vañó 등, 1998a). 상해자 대부분이 젊은 성인이고 일부는 아동이었기 때문에 이것은 특히 주목을 받는다. ICRP는 ICRP 85(2000b)에서 중재술 형광투시에서 피부상해 예방에 대해 주의를 환기했고, ICRP 105(2007c)에서 피부상해 예방의 중요성을 재조명했다.

2.3. 피부와 방사선 영향

(33) 피부의 방사선 반응은 선량과 관계되고 선량이 한 부위에 집중될 때 일어나는데 통상 X선이 환자 몸으로 들어가는 부위가 된다. 조직 단위 질량 당 흡수된 방사선 에너지를 평가하는 데 ‘흡수선량’이란 용어가 사용된다(용어집 참조). 피부 반응은 시간적 과정에서는 변동적이지만 하나의 특성적 양상을 따른다(Balter 등, 2010). 여러 유형의 피부손상에 대해 문턱선량과 발현시기를 표2.1에 요약하였다.

(34) 혈관확장성 보행실조증의 원인인 ATM 유전자와 같은 DNA 보수 유전자 결손은 방사선 유발 암 소인을 주거나 조직반응 발현의 문턱을 낮출 수 있다(Hymes 등, 2006; Allan, 2008). 판코니 빈혈 Fanconi anaemia, 블룸 증후군, 색소성건피증 xeroderma pigmentosum을 포함하는 DNA 손상이나 수선에 영향을 미치는 유전 성분

표2.1. 목, 몸통, 골반, 둔부 및 팔 피부에 단일 전달 선량에 대한 조직반응

밴드	한 부위 급성 피부선량 범위(Gy)*	NCI 피부 반응 등급	영향 발현 근사적 시간			
			즉시: <2주	조기: 2-8주	중기: 6-52주	장기: >40주
A1	0-2	N/A	가시적 영향 없음 예상			
A2	2-5	1	일시 홍반	탈모	탈모 회복	예상되지 않음
B	5-10	1	일시 홍반	홍반, 탈모	회복 높은 쪽 선량이면 홍반 지속, 부분적 영구 탈모	회복 높은 쪽 선량이면 피부 위축/경화
C	10-15	1-2	일시 홍반	홍반, 탈모 건성/습성 박리 가능 박리 회복	홍반 지속 영구탈모	모세관확장증 [†] 피부 위축/경화 피부 약화 예상
D	>15	3-4	일시 홍반 매우 고선량에서는 수종과 급성궤양, 장기 외과적 개입 필요 예상	홍반, 탈모 습성 박리	피부 위축 습성 박리 치유 실패로 2차 궤양, 외과적 개입 필요 예상 고선량에서는 피부 궤사, 외과적 개입 필요 예상	모세혈관확장증 피부 위축/경화 지발성 피부손상 가능 상처가 고질적이고 심화 외과적 개입 필요 예상

자료원: Balter 등(2010) 및 NCRP(2010).

NCI: 미국 암센터 NA: 해당 없음.

* 피부선량계측은 ±50% 이상 정밀하기 어려움.

† 방사선 유발 모세혈관확장증 참조. 초기 습성 박리 부위와 연계된 모세혈관확장증이나 궤양의 치유는 빠를 수 있다.

이 표는 완화나 악화하는 물리적/임상적 인자 없이 감수성이 정상적 범위에 있는 환자에 적용할 수 있다. 피부선량이란 피부의 흡수선량(후방사선 포함)을 말한다. 이 양은 US FDA[Performance Standards for Ionizing Radiation Emitting Products, Fluoroscopic equipment, 21CFR1020.32(2012)] 또는 IEC(2010)이 말하는 기준공기커마($K_{a,r}$)는 아니다. 이 표는 두피에는 적용되지 않는다. 피폭한 부위에 찰과상이나 감염은 방사선영향을 악화시킨다. 선량이나 시간 밴드는 견고한 경계가 아니다. 피부선량이 증가할수록 신호나 징후가 빨리 나타날 것이다.

의 다른 질환도 방사선 감수성을 높일 수 있다. 가족성 용종증familial polyposis, 가드너 증후군, 유전성 악성흑색종, 이형성 모반증후군dysplastic nevus syndrome도 방사선 감수성을 증가시킨다(Hymes 등, 2006). 신경섬유종증neurofibromatosis, 리-프라우메니 증후군Li-Fraumeni syndrome, 유전성 망막모세포종hereditary retinoblastoma 과 같은 특정 가족성 암 증후군도 방사선 유발 암 감수성을 높인다(Allan 등, 2008).

(35) 자가면역 및 결합조직 질환은 환자에게 심각한 피부 방사선영향의 발생을 예측 불가능한 상태로 기울게 한다. 이들은 주로 방사선치료에서 고선량 투여와 관련하여 발생한다. 그 병인은 알려져 있지 않다. 이러한 질환에는 피부 경화증scleroderma, 전신 홍반성 루프스systemic lupus erythematosus, 그리고 어찌면 류마티스 관절염rheumatoid arthritis도 포함된다(Wagner 등, 1999; Hymes 등, 2006). 갑상선항진증hyperthyroidism과 당뇨병diabetes mellitus도 방사선 감수성 증가와 관련된 다(Koenig 등, 2001a). 당뇨병은 방사선 상해를 2차적으로 미세혈관 질환으로 기울게 하여 결과적으로 치유능력을 줄이는 것으로 보인다(Heroles 등, 1999). 악티노마이신actinomycin D, 독소루비신doxorubicin, 블레오마이신 bleomycin, 5-FU 5-fluorouracil, 메토트렉세이트methotrexate 등 여러 약물도 방사선 감수성을 키운다(Koenig 등, 2001a). 다시 말하지만 이 영향은 치료방사선의 높은 선량에서만 관찰된다.

(36) 위에 언급한 것과 표2.1에서 보면 방사선 유발 피부변화의 발현에 선량이나 시간의 문턱이 견고하지 않은 것으로 나타나는데 이는 사람들이 방사선 감수성과 반응성에서 편차가 크기 때문이다(Balter 등, 2010). 선량과 시간의 범위를 그림 2.1에 도시하였다. 이하의 논의에서 문턱선량은 평균적인 사람에 대해서 주어지지만 개인마다 차이가 있음을 이해해야 한다. 대부분 환자에서는 임상적으로 중요한 피부반응은 피부 흡수선량이 5 Gy 이상일 때만 발생한다(Balter 등, 2010; ICRP, 2012).

(37) 평균적 감수성을 가지는 사람에게서 인지할 정도의 피부변화가 발생하는 가장 낮은 선량은 전통적으로 2 Gy로 보아 왔다. 히스타민 유사 물질이 활성화되어 모세혈관을 팽창시켜서 붉게 만든다(일과성 홍반). 이것은 피폭 후 몇 시간 만에 나타나고 24시간 정도 지나면 사라진다. 이 현상은 짧은 영향 기간 때문에 보고가 축소되었을 것 같다.

(38) 약 6 Gy 이상에서는 약 10일 후에 2차 충혈단계(주홍반)이 시작된다. 선량이

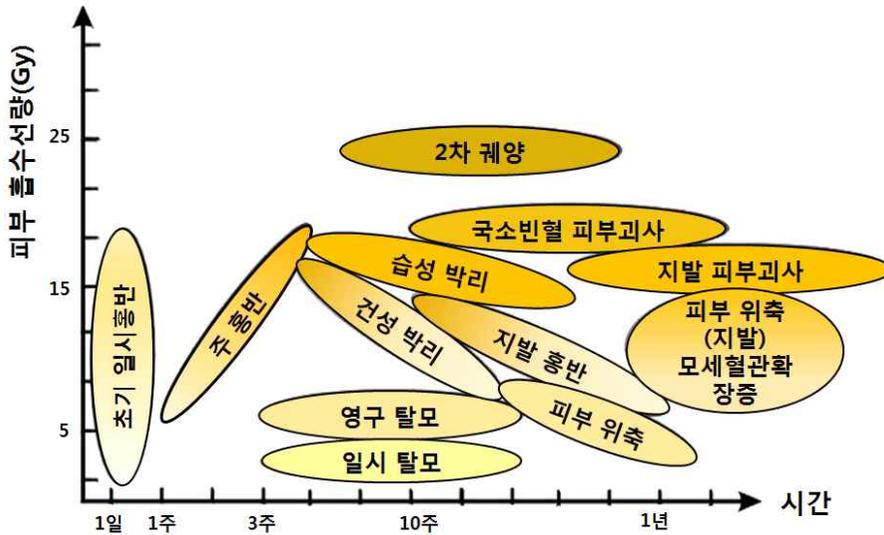


그림2.1. 표2.1의 데이터를 도시한 그림. 피부에 조직 영향이 선량과 시간에 따라 겹치는 상황을 보인다.

6 Gy보다 커지면 이 단계가 더 일찍 나타날 수 있다. 이 단계는 상피의 증식하는 기저세포의 파괴로 유발된다. 환자가 타는 듯한 느낌, 예민함 및 가려움을 호소할 수 있으며 피부가 화끈하고 부종이 나타난다. 홍반은 통상 2주에서 절정에 이르고 4주경에 사라져간다(Koenig 등, 2001b)

(39) 선량이 10 Gy를 초과하면 홍반이 더 오래 지속되고 색소침착과잉도 수반한다. 피부선량 14 Gy 이상에서는 염증이 건성박리까지 진행될 수 있는데 이때 홍반성 피부는 각질과 비늘층으로 덮히고 외관상 햇볕화상과 비슷하다. 습성 박리는 약 18 Gy 이상의 선량에서 일어난다. 피부에 물집이 생기고 벗겨지며 깊은 피부조직에서 혈장이 스며나온다. 상당한 통증이 동반되며 감염에 취약하게 된다. 적합한 항생제가 보통 필요하다(Shack과 Lynch, 1987). 상피 기저층의 증식세포가 손상을 받아 수가 줄어든다. 박리는 보통 피폭 후 4주에 나타나서 여러 주 지속될 수 있는데 2차 감염이 있다면 다 연장된다.

(40) 약 15 Gy를 피폭하면 피폭 후 8-10주에 지발성 홍반이 나타날 수 있다. 피부가 담자색이나 검은 색을 띤다. 피부선량이 약 18 Gy가 되면 피부의 혈관 부족이 되고 국소빈혈성 피부괴사로 이어질 수 있다. 선량이 증가할수록 손상도 심화된다(Koenig, 2001a).

(41) 지속성 홍반 후 특히 습성 박리를 동반한 경우에는 피부위축이 일어난다. 위축은 보통 두 단계로 나타나는데 처음에는 3개월경에, 다음은 1년경에 나타난다. 선량이 10 Gy를 넘으면 피부 모세혈관 팽창으로 인해 모세혈관확장증이 진행될 수 있다. 이는 보통 지발성 현상으로서 피폭 후 1년 이상에서 나타나지만 더 일찍 식별된 경우도 있으며 시간이 지나면서 증가한다(Turreson과 Notter, 1986). 외상이 지발성 괴사를 촉진하여 피부에 이러한 지발성 변화를 보인다. 그 문턱선량으 약 12 Gy이어서 피부 박리가 선행하지 않고도 발생할 수 있다.

(42) 방사선 유발 피부상해의 진단이 종종 늦어지는데 이런 상해가 드물고¹¹⁾ 원인을 인지하지 못하기 때문이다. 나아가 상해가 충분히 드러나려면 여러 달까지 잠복기가 있기도 하다(Balter 등, 2010). 환자는 종종 중재방사선 절차를 시술한 의사가 아니라 피부과 전문의를 찾아간다. 그 결과 형광투시 이력이 간과되거나 해당 없는 것으로 간주되었다(Frazier 등, 2007). 피부 생검이 종종 수행되지만 결과는 방사선상해 쪽으로 특성화되지 않아 난치성 궤양이나 외상의 다른 유형으로 인도했다. 그래서 종종 오진이 이루어졌는데 예를 들면 전기패드에 의한 접촉성피부염, 접착테이프나 피부소독제에 대한 알러지, 약물발진drug eruption, 바이러스나 박테리아 감염, 심지어 해충 물림까지 있다. 상해에 따른 심한 통증 때문에 가슴과 복부의 평가를 늘일 필요가 있다(Vliestra 등, 2004). 심한 손상이 하부 근육에까지 확장될 것이다¹²⁾(Monaco 등, 2003).

(43) 중재방사선 절차로 인한 방사선과 관련된 피부암에 대한 보고는 아직 없다. 머리 백선을 X선으로 치료 후 기저세포 암 사례들이 보고되었는데(Shore 등, 2002) 머리에 4.8 Gy 선량에서 상대위험은 3.6이었다. 중국에서 1950년부터 1995년까지 종사한 의료 X선 종사자 코호트의 피부암 상대위험은 4.1로 나타났다(Wang 등, 2002).

11) <역주> 사례가 드물어 거의 대부분 의사는 방사선 상해를 다른 임상 경험이 전무하다. 실제로 일어났던 방사선사고 피해자가 병원을 찾았을 때 피부의 중증 방사선상해를 해충에 물렸거나 타박상으로 진단한 경우가 있다.

12) <역주> 이것을 중증 방사선 피부상해의 중요한 특성으로 보아도 무방하다. 방사선 피부상해를 초래하는 주된 방사선인 베타 방사선도 조직 약 10 mm 깊이까지 침투한다. 중재 방사선에 사용하는 X이나 감마선은 표층 피부의 선량이나 그 아래 조직의 선량이 큰 차이가 없으므로 표피 상해가 발생했다면 진피나 하부 근육까지 유사한 손상을 예상해야 한다. 그래서 중증 방사선 피부상해는 치료가 어렵다.

2.4. 눈의 수정체와 방사선

(44) 백내장 정의에 따라 좌우되는 측면도 있어서 백내장 이환률을 평가하기 어렵다. Framingham 눈 연구(Kahn 등, 1977)는 75-85세에서 91%의 이환률을 발견했다. 그러나 정의에 경미한 시력 결손을 포함하면 이 수치는 46%로 줄어든다. 이 연구에 대한 근래 스페인 그룹의 재평가 연구는 75세 이상의 대상에서 백내장과 시력 날카로움 감소의 이환률로 60% 이상을 얻었다(Ascosta 등, 2006).

(45) 방사선 때문이 아닌 수정체 혼탁의 대부분은 수정체 외곽 세포층에서 피질의 변화와 관련된다. 수정체는 방사선에 민감한 조직이다. 방사선은 전형적으로 후낭하 posterior subcapsular(PSC) 백내장을 형성한다(그림2.2 참조). 시력 날카로움 변화를 초래하는 노안성 피질 또는 핵 백내장과는 달리 PSC 백내장은 시력 날카로움과 대비 감도 모두 저하시키기 쉽다(Stifter 등, 2006).

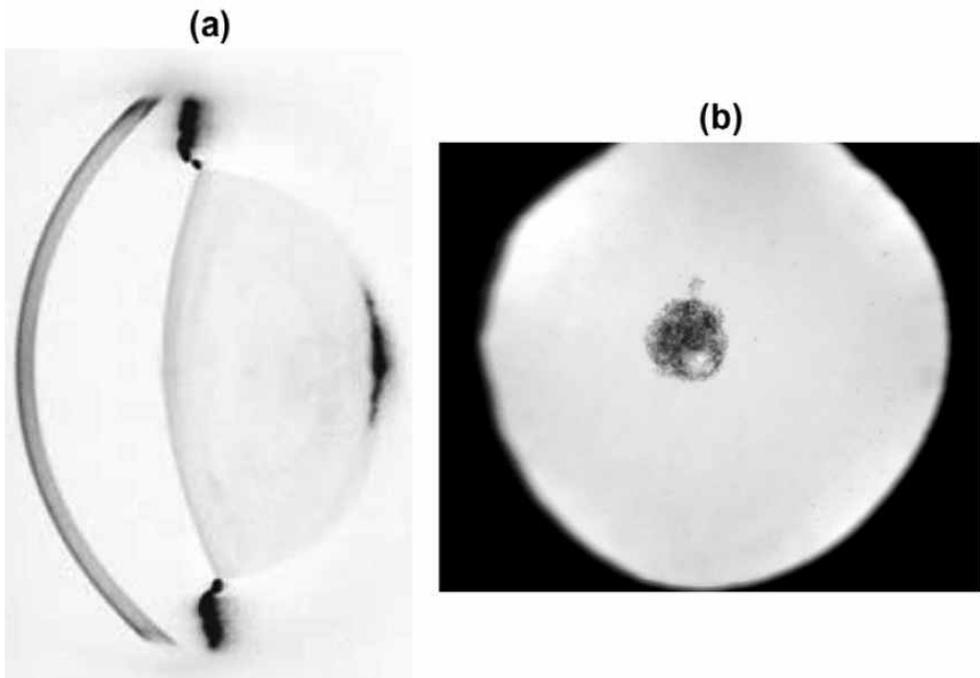


그림2.2. (a) 방사선으로 유발된 전형적 후낭하(PSC) 백내장이 수정체의 Scheimpflug 영상에서 PSC 중앙 부분에 검은 반사반점으로 모습을 보인다(우단). 각막 표면은 좌단에 보인다. 상하단의 수정체 적도에 강한 반사(검은 색)는 확장된 홍채이다. (b) 후방 시각축 위에 있는 PSC 백내장의 역조명 사진. 중앙부 혼탁은 독서 시각을 저하시키고 밝은 빛 환경에서 눈부심과 불량한 시각을 초래한다.

(46) 방사선피폭에 대한 수정체의 반응은 전통적으로 결정론적 조직반응으로 간주되어 왔다. 근래까지 사람 수정체의 혼탁 문턱선량은 단일 급성 노출에서는 2 Gy, 분할피폭에서는 5 Gy로 생각해 왔다. 실명을 부르는 백내장의 문턱선량은 각각 5 Gy와 8 Gy로 보았다(ICRP, 1991; NCRP, 1993). 낮은 선량을 피폭한 집단의 최근 데이터는 수정체 혼탁이 2 Gy보다 훨씬 낮은 피폭에서도 일어나고 문턱선량이 없을 수도 있음을 암시한다(Kleiman, 2007; Worgul 등, 2007; NCRP, 2010; Shore 등, 2010; ICRP, 2012).

(47) 다년간 중재방사선 절차를 수행해 왔고 혈관조영술 절차를 통해 연간 선량한도인 150 mSv에 근접하는 등가선량을 받아 온 중재방사선 의사들의 방사선 유발 백내장(그림2.3)에 대한 보고가 있다(Vañó 등, 1998b, 2010; Pages, 2000; Hidajat 등, 2006). 근래의 연구는 전형적으로 보고된 중재방사선 업무량에서 만약 방사선방호 용구를 적절히 사용하지 않고 방사선방호 원칙을 따르지 않는다면 몇 년 종사 후에는 수정체 선량이 기존 조직반응 문턱선량을 초과할 수 있음을 보인다(Kim 등, 2008; Vañó 등, 2008a). 도자 시술실에서 근무하는 심장학자와 보조의료진에 대해 국제원자력기구 주관으로 남미와 아시아에서 수행한 여러 조사는 방사선 직무피폭과 연계할 수 있는 유형의 수정체 혼탁의 높은 이환율을 발견했다(Ciraj-Bjelac 등, 2010; Vañó 등, 2010).



그림2.3. 낮은 X선 시스템을 사용하고 부적절한 작업조건 때문에 많은 산란방사선을 경험한 중재방사선의사의 눈에 나타난 후낭하 백내장. 자료: Vañó 등, 1998b.

(48) 근래 데이터와 백내장 발전에 관한 기계학적 이해는 눈 수정체의 방사선 감수성에 대한 상세한 재평가 필요성을 드러냈다. 이 이슈는 ICRP 118(2011)과 조직반응에 관한 ICRP 성명(ICRP, 2012)에서 다뤘다. 그래서 계획피폭상황(예: 종재방사선의사의 직무피폭)에서 직무피폭에 대한 등가선량한도가 150 mSv/y인 이전 ICRP 권고(ICRP, 1991)를 수정했다. 이제 ICRP는 만성 직무피폭에 대해 수정체 등가선량 한도로 지정한 5년에 평균하여 20 mSv/y로 하되 한 해에 50 mSv를 넘지 않기를 권고한다(즉, 종사자에 대한 연간 전신 한도와 값이 같다)(ICRP, 2011, 2012). 심장 종재술이나 형광투시 기기가 오늘날 것처럼 정교하지 않았던 1984년부터 1988년 사이 데이터로 수행한 연구에서 심장학자 머리 부위 연간 등가선량이 20-30 mSv였음은 유의할 일이다(Renaud, 1992).

(49) ICRP는 눈 수정체에 대한 흡수선량 문턱이 0.5 Gy이어야 한다고 생각한다(ICRP, 2011). ICRP는 있는 증거에 근거하여 급성 선량 약 0.1 Gy(100 mGy)까지는 조직의 기능부전이 없을 것으로 판단한다. 이 판단에는 백내장에 대한 눈 수정체도 포함되지만, 수정체에 문턱 모델을 사용에 불확실성은 남아 있다(ICRP, 2011).

2.5. 방사선피폭의 심혈관 영향

(50) 심장의 방사선 손상 기전은 염증성 과정을 포함한다. 높은 선량 피폭 후 열려 있는 모세혈관이 점차 감소하여 결국 국부 빈혈, 심근세포 사멸 및 섬유화, 주 혈관에서 아테롬성 동맥경화증 가속, 심장기능 약화 및 치명적 울혈성 심부전 등으로 이어진다. 방사선 유발 심혈관질환의 완화제는 알려진 것이 없다(ICRP, 2011).

(51) 원폭생존자 분석은 0.5 Gy를 넘는 방사선량은 뇌졸중과 심장질환 위험 증가와 관계가 있음을 보였다(Shimizu 등, 2010). 이 발견은 가슴에 방사선치료 후 심장질환 위험의 증가를 보인 다른 연구(Bhatti 등, 2008)와 일관된 것이다. 방사선 치료에 사용되는 수준의 방사선은 심장병 위험을 높일 수 있다는 것에는 분명한 증거가 있다(MaGale과 Darby, 2008). 심혈관질환의 초과위험은 1-2 Gy 수준의 선량을 피폭한지 10-20년 후에만 명백해진다(ICRP, 2011). 방사선의 심혈관질환 영향에 관한 역학은 2006년 UNSCEAR 보고서(UNSCEAR, 2008) 부록 B에서 심층 검토한 바 있다.

(52) 방사선 유발 심장병은 심근의 마이크로 혈관 손상이 국소적 심근 퇴화나 섬유화로 이어지거나, 주 혈관의 동맥경화로 발생할 수 있다. 방사선의 심혈관 영향은 선량이 0.5 Gy 이상에서 일어날 수 있다고 보고하고 있다(ICRP, 2011). 불확실성이 남아 있지만 의사는 순환계 질환의 흡수선량 문턱이 심장에 0.5 Gy 수준으로 낮음에 유념해야 한다(ICRP, 2011). 일부 복잡한 형광투시 안내 심장 절차에서는 장기 선량이 0.5 Gy를 넘을 수도 있다. 방호최적화를 고려할 때 이러한 방사선 영향을 고려해야 한다.

(53) 낮은 선량에서(<0.5 Gy), 방사선량과 심혈관 위험 증가 사이 관계는 불확실하다(Shimazu 등, 2010). 장기간에 걸쳐 낮은 선량을 피폭한 42,000명 방사선작업 종사자를 분석한 결과 방사선피폭과 암외 사인, 특히 순환계질환의 사망률이 관계 있음을 관찰했다(McGeohegan 등, 2008). 다른 연구는 엇갈린 결과를 보였다(McGale과 Darby, 2008). 의료, 직무 또는 환경에서 낮은 선량을 피폭한 집단에 대한 근래의 역학연구는 방사선피폭과 순환계질환 사이 단위 선량 당 위험으로 나타낸 상관성에서 큰 다양성을 보였는데, 편중이나 공동기여 인자 때문일 수 있다(ICRP, 2011). 기저의 생물학적 기전에 대한 명확한 이해가 없기 때문에 이러한 엇갈린 결과를 설명하기 쉽지 않다(Dauer 등, 2010b).

2.6. 직무피폭과 두개강내 신생물

(54) 방사선은 신경 종양과 관계가 수립된 소수 원인 중 하나이다(Yonehara 등, 2004). Preston 등(2002, 2007)은 원폭생존자에게서 신경계통 종양을 연구했는데 증가선량 1 mSv 미만의 낮은 선량에서도 신경계통 종양의 발생 증가와 관계되는 것으로 결론지었다. 아동에서는 방사선피폭이 뇌종양 발생과 관련됨이 분명하지만 성인으로 피폭한 사람들에게서는 훨씬 불분명하다. 두개강내 양성 종양과 방사선 사이 관계는 악성종양의 경우보다 훨씬 강력하다(UNSCEAR, 2000). 그러나 BEIR-VII 보고서는 뇌종양 발생이나 사망률의 생애 기인위험을 명시적으로 제시하지 않았다(NAS, 2006). 분명한 것은 시술자와 의료진에게서 중재적 형광투시 절차 동안 가장 덜 방호되는 장기가 뇌라는 점이다.

(55) 형광투시자의 뇌가 받는 선량은 충분히 연구되어 있지 않다. Wenzl(2005)은 중재술 절차를 사용하는 전문가 중 심장학자가 가장 많은 방사선을 피폭할 수 있다고 지적했다. Renaud(1992)는 심장학자 머리의 연간 증가선량을 20-30 mSv로

평가했다. Renaud 연구는 1984-1988년 데이터를 사용했는데 이때는 심장 중재적 절차가 덜 복잡했고 형광투시 기기의 방호특성은 오늘날보다 부실했다. Kim 등(2008)은 시간 경과에 따른 절차 당 심장학자 선량이 시장 도자진단과 전기생리학에서는 감소한 반면 PCI에서는 증가했음을 발견했다. 업무량의 변화도 개인 연간 등가선량에 영향을 미친다. 세계적으로 수행되는 총 절차 수는 근년에 증가하고 있다(소절1.1.1 참조).

(56) Finkelstein(1998)은 토론토에서 1년 기간에 심장학자 두 명에게서 뇌종양이 발생한 것은 그 종양이 방사선으로 유발된 것으로 지시해야 한다고 제안했다. 형광투시자에게서 방사선 유발 뇌종양에 대한 역학적 증거는 결론적인 것이 아직 없다. 1975년 Matanoski 등(1975)은 미국 방사선학의사의 뇌종양 사망률이 방사선을 사용하지 않는 다른 의료전문인에 비해 거의 3배나 높음을 발견했다. 뇌종양이 있는 233명에 대한 스웨덴의 증례-대조연구에서 Hardell 등(2001)은 형광투시를 사용한 의사로 종사가 뇌종양을 일으킬 위험을 높이는 데 그 공산비odds ratio는 6.0(공산비 95% 신뢰구간: 0.7-17.6)이었다. 그러나 233명 중 형광투시 관련자는 3명뿐이었다. 다른 보건종사자에서는 위험 증가가 발견되지 않았다. 1991-1994년 사이 샌프란시스코 지역에서 신경교종glioma를 진단 받은 476명에 대한 증례-대조연구에서 Carozza 등(2000)은 내과 및 외과 의사의 위험이 높게 나타났다(공산비 2.5, 공산비의 95% 신뢰구간: 0.7-17.6). 그룹 내 의사는 6명 뿐이었다. 저자들은 증가된 위험이 방사선뿐만 아니라 다양한 화학물질이나 생물학적 제제에 노출된 것 때문일 수도 있다.

(57) 한편으로 Blettner 등(2007)은 독일에서 자진 보고한 의료 및 직무 데이터를 이용해 뇌종양 환자 844명과 대조군 1737명에 대해 증례-대조연구를 수행했다. 직무로 방사선을 피폭한 91명의 2/3 이상이 의료분야(의사, 간호사, 방사선사)였다. 연구자들은 의료 방사선 노출로 인해 뇌종양 위험의 유의한 증가를 발견하지 못했다. Karipidis 등(2007)도 호주에서 신경교종 환자 416명과 대조군 422명에 대해 증례-대조연구를 수행한 결과 방사선과 신경교종 사이 관계에 대한 증거를 발견하지 못했다.

3. 형광투시 안내 심장절차로 인한 조직반응 임상 사례

- 심장학에서 피부 방사선량 수준에 대한 우려가 증가하고 있다.
- 이 장에서 제시하는 사례는 임상적 의미를 제공하고 방사선상해로 인한 피부의 변화를 설명한다.
- 조직반응이 심부 조직까지 확대됨으로써 다년간 지속되는 증후를 초래할 수 있다.
- 조직반응은 확률론적 영향 위험의 증가도 동반할 수 있다.

3.1. 서론

(58) 심장학에서 피부 방사선량 수준에 대한 우려가 증가하고 있다. 이는 최적에 미흡한 기기를 사용하고 방사선방호에 적절한 훈련을 받지 않은 의료진이 실시하는 장시간 걸리는 절차를 거친 환자에게서 조직반응이 발견되고 있기 때문이다(UNSCER, 2010). 그러나 잘 관리되는 최신 기기를 사용하여 잘 훈련되고 경험 많은 기술자가 수행하더라도 뚱뚱한 환자나 복잡한 중재방사선 절차를 거치는 환자는 높은 피부선량을 받을 수 있다(Bryk 등, 2006; Suzuki 등, 2008).

(59) 제2.3절에서 제시한 피부의 방사선생물학 정보는 임상 맥락 없이는 설명하기 어렵다. 이 장에서 제시하는 사례는 그러한 임상 맥락을 제시하고 제2장에서 논의한 피부변화를 예로써 설명한다. 이들 상해는 심각하고 보기 어려울 수도 있을 것이다. 어떤 환자는 평생 치료와 관찰이 필요할 수도 있다. 치료는 특화된 센터에서 여러 분야 전문의의 협력을 필요로 할 것이다. 통증관리와 심리적 안정도 치료의 중요한 요소가 된다.

(60) 환자선량 최적화와 피부선량 최소화 방법은 제5장에서 설명하고 표5.1에 열거되어 있지만, 중요하므로 여기서 요점을 반복한다.

- 형광투시 시간과 영화 프레임 수를 절차를 성공적으로 완료할 수 있는 최소로 제한한다.

- 절차 중 환자선량을 감시한다.
- 펄스모드 형광투시기를 사용한다.
- 적절한 형광투시 안내를 제공할 수 있는 최소의 펄스율과 투시 선량률을 사용한다.
- 가능하면 주기적으로 갠트리를 약간씩 돌려 입사빔이 서로 다른 피부 입사 위치를 향하도록 한다.
- 영상수감부(영상강화기나 평판검출기)를 환자에 최대한 근접시키고 X선관은 입사 피부로부터 최대한 멀리한다.

3.2. 사례1(Vliestra 등, 2004)

(61) 3년 전 2회의 PCI를 받은 체중 141 kg인 53세 남성에게 불안정한 불안정형 협심증unstable angina이 나타났다. 즉시 먼 회선동맥 PCI로 관상동맥 조영술을 실시했다. 절차에는 좌전방 경사 투사, 두면 영화형광촬영biplane cinefluorography, 고선량 형광투시 모드가 사용되었고 총 투시시간은 51.4분이었다. 평가한 피부선량은 22 Gy였다.

(62) 6주 후 그 환자가 아래쪽 등에 사각형 모양으로 통증과 가려움을 동반한 발진(그림3.1 참조)으로 내원했다. 이 부위는 고통스런 궤양으로 발전했다. PCI 후 6개월 후 피부 절제 및 이식이 필요했다. 국부 불편은 지속되고 있다.

3.3. 사례2(Koenig 등, 2001a)

(63) 과거에 관상동맥 조영술을 2회 받는 75세 여성이 우관상동맥의 90% 협착으로 PCI를 거쳤다. 절차 10개월 후 피부손상이 발생했다(그림3.2 참조). 피부선량 평가치가 없었다.

3.4. 사례3(Wagner와 Archer, 1997)

(64) 8년간 심실상성 빈맥supraventricular tachycardia을 겪은 49세 여성이 내원했다. RF도자절제를 수행했다. 전기생리학 절차 시술 중 환자 오른팔이 X선관 가까이 X



그림3.1. 사례1. 세부 내용은 본문 참조. 자료: Vliestra 등(2004).



그림3.2. 사례2. 우측방 가슴에 과다 및 과소 색소 형성, 피부위축 및 모세혈관확장을 보인다. 자료: Koenig 등(2001a).

선빔에 들어갔다. 분리구(간격 유지기구)를 X선관 외장에서 분리한 상태였다. 투시 시간은 약 20분이었고 피부선량은 기록이 없었다. 3주 후 환자가 오른 팔꿈치에 피부손상(그림3.3.)으로 내원했다. 환자 팔을 X선빔 밖에 두었더라면 상해를 피하거나 심각도를 줄일 수 있었을 것이다.



그림3.3. 사례3. 상세 설명은 본문 참조. (a) 3주: 예리하게 구분된 홍반 영역. (b) 5개월: 조직 궤사. (c) 6.5개월: 뼈가 노출되는 심부 궤양. (d) 피부 이식수술 후. 자료: Wagner와 Archer(1997).

3.5. 사례4(Vliestra 등, 2004).

(65) 체중 114 kg인 38세 남성 환자가 Wolff-Parkinson-White 증후군 진단을 받



그림3.4. 사례4. 우측 손상은 박리를 보인다. 등의 홍반은 탈색된 흉터로 치유되었다. X선관에 가까웠던 오른팔 손상은 궤사로 진행되어 피부이식이 필요했다. 자료: Vliestra 등(2004).

았다. 두면 형광투시를 이용한 RF절제 시도가 성공하지 못했다. 절차 수 주 후 환자가 등에 적갈색 영역이 나타났지만 해소되었다. 2.5개월 후 두 번째 전기생리학 절제를 수행했지만 역시 실패했고 그 1주 후 피부 반점이 다시 나타났다. 의사는 피부손상이 방사선이 아니라 RF절제술에 사용한 접지패드 때문인 것으로 생각했다. 세 번째 절제 시도로 실패했고 8일 후 피부 손상이 재발했다(그림3.4). 세 번의 절차 모두 각각 100 분 이상의 투시시간을 썼지만 피부선량은 평가되지 않았다. 오른 팔의 중증 상해는 그 위치 때문이다. 팔을 입사 X선빔에서 멀리했으면 상해는 피할 수 있었다.

3.6. 사례5(Vañó 등, 1998a)

(66) 17세 여성이 후방 경로 사전여기 치료를 위해 5시간에 걸친 전기생리학 절제 절차를 받았다. 11개월 후 두 번째 절차를 거쳤는데 역시 5시간이 걸렸다. 두 절차 모두 두면 형광투시로 이루어졌다. 측방평면 투시시간은 90-120 분으로 추정되지만 환자 피부선량은 평가되지 않았다. 2차 절차 12시간 후 환자 우측 겨드랑이에 홍반성 반점이 나타났다. 한 달 후 그녀는 우측 붉은 반점과 물집이 생기는 손



그림3.5. 사례5. 외곽선을 가진 무감각하고 위축되고 과다/과소 색소침착을 보이는 면. 자료: Vañó 등(1998a).

상에 대해 피부과전문의를 찾았다. 두 번째 절차 26개월 후 무감각하고 위축된 10×5 cm로 경계선이 분명한 반점이 보였다(그림3.5 참조). 진단은 만성 방사선피부염으로 나왔다. 그녀의 오른팔 근육도 영향을 받아 동작 범위에 제한을 받았다. 환자의 연령과 피폭한 부위 때문에 후속 유방암 위험도 높아졌다.

3.7. 사례6(호의: M. Portas, Buenos Aires, Argentina)

(67) 담배를 많이 피우는 57세의 뚱뚱한 여성이 PCI를 거쳤다. 절차 시간은 약 6시간이었으나 선량 데이터는 없었다. 초기 발증은 요추 부근의 등 피부에 수포였다. 피부과 의사가 이를 대상포진herpes zoster 감염으로 진단했다. 두 달 후 그 자리에 심부궤양(유럽 암 연구치료기구의 방사선종양치료 그룹 분류 피부 방사선위해 4등급)이 나타났다. 극심한 고통이 따랐다. 다음 해 환자는 성형수술을 받았는데 상처를 덮기 위해 회전피판술rotation flap 둘을 적용했다. 회전피판도 결과적으로 궤사로 진행되어 약 20×20 cm 궤양을 남겼다. 이후 몇 년 동안 특수 화상센터에서 보전치료를 수행했다. 상처를 덮는데 돈피, 타가이식, 자가이식이 수행되었고 항염증 치료와 항박테리아 치료도 병행했다. 이러한 치료로 점차 상처를 덮어 나갔다. 치료 3년(PCI 후 5년)에 궤양 크기는 3×1.5 cm 크기로 줄었다(그림3.7 참조).



그림3.6. 사례6. 초기 수술 후 환자 등 및 회전 플랩 궤사의 외관. 궤양은 약 20×20 cm이다(호의: Dr. M. Portas, Buenos Aires, Argentina).

방사선감수성에 대한 시험관 시험은 환자가 정상 감수성임을 보였다. 상해와 오랜 회복시간의 원인은 방사선피폭, 비만, 심한 흡연으로 보았다.



그림3.7. 사례6. PCI 5년 후 환자의 등 외관. 항염증 및 항박테리아 처치 및 고압산소치료와 함께 돈피 치료, 피부 타가이식, 자가이식으로 3년간 치료 후 궤양은 3× 1.5 cm로 줄었다(화살표). 환자 삶의 질은 크게 개선되었다(호의: Dr. M. Portas, Buenos Aires, Argentina).

4. 의료에서 방사선방호 원칙의 적용

- 의료에서 정당화란 의료절차가 특정 환자에게 적절할 때만 수행되어야 함을 의미한다. 예상되는 임상 이득이 방사선 위험을 포함한 절차의 모든 위험보다 커야 한다.
- 정당화는 의뢰의사와 심장 촬영자 및 중재시술 의사의 공동책임이다.
- 의료에서 방호최적화는 환자에게 주는 선량이 의료목적에 적합하고 임상적으로 불필요하거나 비생산적인 방사선은 피하는 것이다.
- 다른 모든 의료피폭과 마찬가지로 심장핵의학 검사, 심장 CT 검사, 심장 중재술, 전기생리학 절차는 최적화되어야 하며 적용 가능하면 선량감축 기법을 사용해야 한다.
- 촬영이 적정 영상품질, 진단정보 그리고 형광투시에서는 적정 촬영지침을 제공하는 데 필요한 최소량의 방사선으로 수행될 때 환자 방사선방호는 최적화된다.
- 심장학자나 의료진의 직무피폭에는 선량한도가 적용된다.
- 환자, 간병인 및 위안자의 의료피폭에는 선량한도가 적용되지 않는다.

4.1. 서론

(68) ICRP는 세 가지 기본원칙을 권고하는데 정당화, 방호최적화, 선량한도 적용이다(ICRP, 2007b,c). 첫 두 원칙은 선원중심이고 모든 방사선 피폭상황에 적용된다. 셋째 원칙은 의료진에게 적용되며 환자, 간병인 및 위안자의 의료피폭에는 적용되지 않는다.

4.2. 정당화

(69) 정당화 원칙은 일반적으로 '방사선 피폭상황의 모든 변경은 해로움보다 이로운이 커야 한다. 이는 새로운 선원의 도입, 기존피폭의 감축 또는 잠재피폭의 감축을 통해 얻는 개인이나 사회적 이득이 거기서 야기되는 위해를 상쇄하기에 충분해야 한다.(ICRP, 2007b)'는 것이다. 방사선 의료절차¹³⁾의 주된 목표는 환자에게 해

로움보다 큰 이로움을 주는 것이지만 부차적으로 의료진과 다른 사람의 피폭으로 인한 위해도 고려해야 한다(ICRP, 2007b).

(70) 의료절차는 특정 환자에게 적절할 때만 실시해야 한다. 흔히 사용하는 ‘적절하다’의 정의는 예상되는 이득(즉, 기대수명의 연장, 통증완화, 근심 감소, 기능의 개선)이 예상되는 부정적 결과(즉, 사망, 불구, 절차를 기다릴 때 근심, 절차에 의한 고통, 오도 및 오진, 일하는 시간 손실)를 큰 여유로 상회하여 절차를 수행할 가치가 있다는 것이다(NHS, 1993; Sistrom, 2008). 달리 말하면 예상되는 임상 이득이 방사선 위험을 포함해 예상되는 모든 절차적 위험을 상회해야 한다.

(71) 미국에서는 다양한 임상 시나리오에 대해 적합성기준이 개발되어 있다(Brindis 등, 2005; Douglas 등, 2010; Patel 등, 2009; Hendel 등, 2009a; ACR, 2010; Taylor 등, 2010). 잘 알려져 있지 않지만 유사한 지침이 영국에서도 가용하다(RCR, 2007). 유럽 지침도 가용하다(Hesse 등, 2005; Schoeder 등, 2008). 이러한 지침은 표준화된 문헌 검토와 편집된 증빙표를 바탕으로 하고 다양하게 구성된 전문가 패널이 각 지시의 순위를 부여한 것이다(Patel 등, 2005). 적합성은 국가나 현장 패턴, 그리고 환자와 가족의 가치와 선호에 따라 변할 수도 있다(Wolk 등, 2004).

(72) 특정 절차의 사용에 대한 정당화 책임은 해당 의사에게 있다(ICRP, 2007b). 의뢰의사와 심장 영상화 수행자나 중재방사선 의사의 공동책임이다. 의뢰의사에게 정당화는 시험의 이득을 방사선 피폭을 포함한 위험과 견주어 이러한 분석을 그 시험을 하지 않는 것을 포함한 모든 대안에 대해 수행하는 것을 의미한다. 심장 촬영자나 중재시술자에게 정당화는 정보가 가용할 때 시험이 합리적인 지시가 있음을 보장하는 것과 여기에 우려가 있을 때는 의뢰의사와 지시에 대해 상의하는 것을 의미한다.

4.3. 방호최적화

(73) 방호최적화 원칙은 ‘피폭 가능성, 피폭자 수 및 개인선량 크기를 경제사회적

13) <역주> 원문은 ‘의료피폭’으로 적고 있는데 진료가 의료피폭의 목표는 아니다. 역으로 의료피폭이 진료를 위한 방사선 의료절차의 결과이다. 정당화하는 것은 의료피폭이 아니라 선원중심인 의료절차이다.

인자를 고려하여 합리적으로 최소로 유지해야 한다.’는 것이다. 이는 방호수준이 여건에서 최선이어서 해로움을 상회하는 이득의 여유를 극대화함을 의미한다(NCRP, 1993; ICRP, 2007b). 최적화는 종종 ‘합리적으로 달성 가능한 최소as low as reasonably achievable’의 축약어인 ‘ALARA’¹⁴⁾로 요약된다.

(74) 심장절차에서 최적화 원칙은 방사선을 사용하는 심장 시술실의 설계, 적절한 기기의 서정, 설치 및 사용, 일상 작업 절차에 적용된다. 방호최적화는 의료목적에 적합한 환자선량으로 이어지는 과정과 임상적으로 불필요하거나 비생산적인 방사선을 회피하는 것으로 잘 설명된다.

(75) 방호최적화는 적절한 촬영에 필요한 것을 넘지 않게 임상적 관심 조직이나 장기에 방사선량을 부여하고¹⁵⁾ 다른 부위(예: 피부)의 선량을 최소화 하는 것을 의미한다. 촬영이 적합한 영상품질, 형광투시에서는 적절한 영상 안내를 얻는 데 필요한 최소량의 방사선으로 수행될 때 환자 방사선방호는 최적화 된다(NCI, 2005). 모든 촬영절차의 목표는 임상목적에 적합한 영상을 제공하는 것이다. 촬영요건은 특정 환자나 특정 절차에 따라 다를 수 있다. 영상이 부적절한 수준까지 환자선량을 낮추는 것은 반생산적이다. 그것은 임상 질문에 대답하지 않으면서 환자에게 선량을 준다. 임상적으로 필요한 수준 이상으로 영상품질을 높이면 임상 이득의 추가 없이 방사선량을 추가하는 것이다. 방사선 관리 목표는 특정 환자와 특정 절차에서 적절한 기기와 촬영요건을 사용하여 환자선량을 가능하면 낮게 유지하는 것이다.

4.4. 선량한도

(76) 선량한도 적용 원칙은 ‘계획피폭상황에서 규제되는 선원으로부터 특정 개인의

14) 축약어 ‘ALARA’가 종종 ‘방호최적화’와 대등하게 또는 그 대체로 사용된다. 그러나 ‘합리적으로 달성 가능한 최소’라는 표현은 방호최적화 개념의 일부일 뿐이다. 전체적 개념은 요구되는 의료목표(진료)를 달성하는 데 필요한 최소로 환자의 피폭을 유지함을 의미한다. 진단 X선 촬영이나 중재방사선에서 최적화는 영상의 수와 품질이 진단이나 중재술에 필요한 정도를 얻는 데 적절해야 함을 의미한다. 치료방사선에서는 ALARA는 정상조직에만 적용되는데 표적에 주는 선량은 합리적으로 달성 가능한 최소가 아니라 그 반대일 것이기 때문이다. 축약어 ALARA만을 이러한 맥락 밖에서 사용하면 오도하거나 불필요한 논쟁이 있을 수 있다.

15) <역주> 표현에 오해 소지가 있다. 치료방사선에서는 암세포를 파괴하기 위해 표적에 선량을 ‘부여’한다. 그러나 이 보고서의 주제인 심장학에서 방사선 사용과 같은 진단이나 중재방사선에서는 선량은 부여하는 목표가 아니라 목표인 영상을 얻는 데 수반되는 부산물일 뿐이다.

총 선량이 ICRP가 권고하는 적절한 한도를 초과해서는 안 된다.’라고 말한다 (ICRP, 2007b,c). 이 원칙은 환자의 의료피폭에는 적용되지 않는다. ICRP 105(2007c)에서 적시하듯이 ‘환자의 의료피폭이 합당하게 정당화되고 관련된 선량이 의료목적과 상응하다면 환자 의료피폭에 선량한도나 선량제약치를 적용하는 것은 적절하지 않다. 선량한도나 선량제약치가 종종 이로움보다 해로움이 클 수 있기 때문이다.’(ICRP, 2007c). 중재적 절차에서는 치료하는 의학적 상황이나 절차의 방사선 외적 위험이 방사선 위험보다 매우 큰 불부율이나 사망률을 낸다(Miller, 2008; NCRP, 2010).

5. 형광투시 안내 중재술에서 환자선량 관리

- 심장 중재술이나 전기생리학 절차를 시술하는 의사는 환자나 의료진 선량의 감축법에 익숙해야 한다.
- 방사선상해 위험이 상당하다고 생각된다면 이해동의 과정은 방사선 위험에 대한 정보도 포함해야 한다.
- 방사선 위험을 평가할 때는 고려해야 할 환자 의료이력의 중요한 측면은 유전 소인, 병존하는 질환, 약물 사용, 방사선 이력, 임신여부 등이다.
- 환자선량에 영향을 미치는 일부 인자는 X선 시스템에 의존하지만 다른 많은 인자는 시술자가 X선 시스템을 어떻게 사용하는가에 달려있다.
- 절차 중에 시술자는 형광투시 시간, 영화 시리즈와 프레임 수, 그리고 환자 총 선량에 주의를 기울여야 한다.
- 환자선량이 증가하면 시술자는 이미 환자에게 전달된 선량과 절차를 완료하기 까지 필요한 추가 방사선을 감안해야 한다.
- 절차 끝에는 환자선량 보고를 작성하여 저장해야 한다.
- 절차 후에는 환자선량 데이터를 환자 의료기록에 기록해야 한다. 중재술 절차에서 환자선량이 병원의 방아쇠 준위를 초과하면 피부상해의 조기 발견과 관리를 위해 임상적 추적이 따라야 한다.
- 방아쇠 준위로 제안하는 값은 피부선량 3 Gy, 커마면적곱 500 Gy cm², 환자 입사 기준점 공기커마 5 Gy이다.

5.1. 서론

(77) 형광투시 안내 중재술은 경피 또는 다른 접근로를 사용하여, 보통 국부마취나 진정제 사용 아래, 병소나 치료 부위를 확인하기 위한 형광투시 촬영으로 절차를 감시하면서 안내되는 진단/치료를 실시하고 치료를 조정, 문서화하는 것으로 구성된다(ICRP, 2000b), 이 장에서는 형광투시 안내 중재술의 전, 중, 후에서 임상 방

사선 관리를 다룬다.

(78) 형광투시 안내 심장절차에서 환자가 받는 선량은 높을 수 있고 일부 환자는 비교적 짧은 기간에 여러 절차를 받을 수도 있다. 그래서 심장학자는 환자 방호 최적화를 위해 방사선사 및 기타 의료진과 함께 일하는 것이 필요하다(Chamber 등, 2011). 어떤 선량문턱(제2장 참조)을 초과하면 절차가 조직반응을 초래할 수 있다. 형광투시 안내 중재술에서는 전형적 조직반응은 피부상해이다. 높은 선량은 확률론적 영향(암 및 유전질환) 위험도 높인다.

(79) 의사는 불확실성은 있지만 순환계 질환의 흡수선량 문턱이 심장이나 뇌에 0.5 Gy 수준까지 낮은 수 있음(ICRP, 2011)에 유의하는 것이 중요하다. 일부 복잡한 형광투시 안내 심장절차에서는 장기선량이 0.5 Gy를 넘을 수 있다. 초점형 심근변성focal myocardial degeneration이나 섬유화, 주 혈관의 동맥경화 가속을 포함하는 심혈관 방사선영향이 이 정도 선량에서 발생할 수 있다고 보고되고 있다(ICRP, 2011). 낮은 선량(1-2 Gy)¹⁶⁾에서 심혈관질환의 초과 위험은 피폭 10-20년 후에야 분명해진다.

(80) PCI를 거치는 환자의 평균 연령은 상대적으로 높다. 대부분 암 발생의 잠복기(10년 이상)와 상대적으로 짧은 기대여명 때문에 나이든 환자에게는 확률론적 영향의 위험은 큰 우려는 아니다. 전기생리학 절차를 거치는 환자는 젊은 경향이다. 젊은 성인이나 아동에게 형광투시 안내 절차가 수행되면 확률론적 영향의 위험의 우려가 커진다. 아동은 성인보다 기대여명이 길고 성인보다 방사선 영향이 2-3배 높기도 하다.

(81) 선량관리와 방사선방호에 관한 초기훈련과 계속훈련은 환자선량에 명확한 영향을 미치므로 중재방사선 의사에게는 필요하다(Hirshfeld 등, 2005; Rehani, 2007; ICRP, 2009). 근래의 여러 간행물이 이러한 훈련이 환자선량 최적화와 기술자 선량 감축에 도움이 됨을 내보이고 있다(Whitby와 Martin, 2005; Vañó 등, 2006a; Barbardi 등, 2008; Bor 등, 2008; IAEA, 2010; Kim 등, 2010). 훈련에 대해서는 제9장에서 추가로 논의한다.

16) <역주> 여기서 '낮은 선량'이라 함은 중재방사선 관점에서 말하는 것으로 특정 조직 등가선량으로 1-2 Gy를 제시하고 있다. 방사선방호에서 일반적으로 낮은 선량이라 말할 때는 유효선량 0.2 Sv 이하 수준을 의미하는 경우가 많다.

5.2. 절차 전

(82) 방사선 위험 요소가 있거나 상당한 선량이 예상되면 방사선 위험에 대한 의논은 이해동의의 적절한 성분이 된다. ICRP는 방사선상해 위험이 상당하다고 생각될 때는 절차에 앞서 환자와 상담해야 한다고 권고한다(ICRP, 2000b). 방사선 위험을 평가할 때 고려해야 할 환자 의료이력의 중요한 측면은 유전소인, 병존하는 질환, 약물 사용, 방사선 이력, 임신 여부 등이다(Miller 등, 2010a).

(83) 뚱뚱한 환자는 방사선 유발 피부상해 위험이 높는데 방사선 투과가 약하고 환자가 X선 선원에 더 가까이 접근하기 때문이다(Bryk 등, 2006).¹⁷⁾ 뚱뚱한 환자의 경우 입사 피부 부위 선량률이 보통 환자에 비해 10배나 높을 수도 있다(Wagner 등, 2000). 형광투시 절차와 관련하여 보고된 상해의 많은 경우가 체격이 큰 환자에게서 보인다(Koenig 등, 2001a). 침상을 높여 회전중심 밖에서 촬영하면 피부선량을 줄일 수 있다. 다른 절차적 수정도 뚱뚱한 환자에게 종종 필요하다(Bryk 등, 2006).

(84) 의학물리사가 중재방사선 절차에 유용한 조언을 제공할 수 있다. 절차 중에는 방사선사가 건전한 최적화 전략을 제공할 수 있다. 복잡한 절차나 반복되는 절차, 특히 뚱뚱한 환자에 대해서는 방호최적화에 주목하는 것이 매우 중요하다. 만약 앞 절차가 높은 피부선량을 주었다면 같은 환자에게 추가로 가능한 절차의 전략은 가능하면 피부선량을 줄이도록 후속 절차를 수정하는 것이 포함되어야 한다. 절차가 반복될 때는 임상 상황이 허락한다면 절차 간격을 늦출 것을 조언한다. 피부가 피폭한 후 DNA 수선 과정은 1일 이내에 본질적으로 완료된다. 반대로 세포의 재충전은 방사선량에 따라 완료까지 여러 달이 걸릴 수도 있다(Balter 등, 2010).

(85) 시간이 결정적인 긴급절차를 제외하면 형광투시 안내 중재술에 앞서 임신상태를 파악해야 한다(ICRP, 2007c; ACR, 2008). 가능하면 임신한 환자에게 긴급을 요하지 않는 절차는 임신 종료까지 연기해야 한다. 시간이 결정적인 긴급절차를 제외하고, 임신 환자에게 의학적으로 지시된 형광투시 안내 중재술을 실시해야만 한

17) <역주> 일반적으로 형광투시에 사용되는 C-암은 반경이 거의 고정되어 있으므로 회전 중심을 기준으로 촬영하면 환자 신체의 한쪽은 영상 수감부(영상강화기나 평판검출기)에 근접한다고 볼 때 뚱뚱한 환자는 그 반대쪽이 X선관 초점에 더 가깝게 된다. 입사면 선량률이 역자승법칙을 따른다면 10-20 cm 가까이 지는 것이 입사면(피부) 선량률을 상당히 증가시키게 된다. 또, 신체가 두터움으로 인해 방사선 투과량이 감소하므로 영상이 필요한 밝기(골 해상도와 연계된다.)를 얻기 위해서는 X선 출력(관전류, mA)을 높게 되어 선량률이 증가한다.

다면 절차 계획이 수태물 선량 최소화를 위한 가능한 수정, 수태물의 예상 선량 평가, 절차가 환자와 수태물에 줄 수 있는 예상 이득과 잠재적 위험에 대한 이해 등의 과정을 포함할 것을 ICRP는 권고한다(ICRP, 2000a). 가능하고 시간이 허락한다면 절차계획 과정에 의학물리사가 참여해야 한다(Dauer 등, 2012).

(86) ICRP는 일반적으로 태아선량 100 mGy 미만에서는 방사선 위험에 근거한 임신중절이 정당화되지 않는다고 말해 왔다(ICRP, 2000a). 비교를 위해 관상동맥 CTA로 인한 전형적 태아선량은 약 0.1 mGy이고 복부 CT로 인한 전형적 태아선량은 0.4 mGy이다(McCollough 등, 2007).

5.3. 절차 중

(87) 환자 방사선방호를 최적화 할 때, 최우선 순위는 진단이나 안내 중재술을 허용하기에 충분한 품질을 충분한 수만큼 얻는 것이어야 한다. 이 때문에 최소한의 형광투시 기간 또는 최소한 수의 영화 시리즈 수와 길이를 필요로 할 것이다. 환자선량의 최적 관리는 가장 보편적 시술 모드에서 전형적 형광투시 선량률과 영화 프레임 당 선량 값에 대한 지식과 관리를 필요로 한다.

(88) 보통 크기 환자에 대해 중재적 심장절차 동안 피부 선량률의 전형적 값(표면 입사 공기커마울)은 ‘중간’ 형광투시 모드에서는 15-45 mGy/분, ‘고’ 형광투시 모드에서는 50-150 mGy/분이다(NCRP, 2010). 심장 중재술이나 전기생리학 절차에서, 특히 복잡한 절차, 큰 경사 C-암 각도, 유사한 C-암 각도에서 다수 투사가 필요한 절차에서는 피부선량이 수 Gy를 넘을 수 있다(Miller, 2008). 이러한 절차는 심각한 피부상해를 초래할 수 있다(제3장 참조). 장기선량은 10 Gy를, 유효선량은 50 mSv를 초과할 수 있다(UNSCEAR, 1993; Stern 등, 1995; Bogaert 등, 2008). 병원 간 환자선량 편차가 클 수 있다. 이러한 편차의 일부는 X선 시스템의 설정 때문일 가능성이 크다. IAEA가 여러 나라의 X선 시스템을 비교하여 수행한 연구는 동일한 두께의 모의체를 영상화하는 데 선량값의 변동이 10 배 차이남을 내보였다(Ortiz 등, 2004).

(89) 여러 운영인자가 환자가 받는 선량에 크게 수정하여 커마면적곱($P_{K,A}$ 또는 KAP)과 환자 피부선량에 영향을 미친다(ICRP, 2000b). 이에 대해서는 영상의학과 밖에서 방사선방호에 관한 ICRP 간행물(2010)에도 논의하고 예시했다. 이들 인자

의 일부는 X선 시스템(예: 펄스모드 형광투시, 가상 필터, 형광투시 루프 저장, 추가 필터, 썸기필터, 회전형, 플빔 CT 입력모드 등의 가용성)에 의존하지만 다른 것은 시술자가 X선 시스템을 어떻게 사용하는지(예: 관심영역에 콜리메이션, 가능하면 저 형광투시 모드 사용, 가능하면 영화 시리즈를 12.5-15 프레임/s로 획득, 영상 수감부를 최대한 환자에 가까이 두기, 심하게 기울어진 노출방향angulation 지양 등)에 달려있다(NCRP, 2010). 영상의학에서 방호최적화를 위한 권고는 심장 중재술 절차에도 같이 적용된다(Wagner 등, 2000; Miller 등, 2010a; Wagner, 2007). 표5.1에 환자선량을 줄이기 위한 현실적 조언을 보였다.

(90) 절차 중에 심장학자는 가용한 선량 관계량-기준 공기커마(RAK), KAP, 투시 시간, 영화 시리즈 및 영화 프레임 수 등을 감시해야 한다(RAK, KAP는 용어집에서 정의하고 있다). 조직반응의 문턱선량을 넘거나 근접하는지를 실시간으로 감시

표5.1. 환자선량 감축을 위한 현실적 조언

-
- 가능하면 낮은 선량을 형광투시 모드를 사용하라
 - 가능하면 낮은 펄스율 형광투시 모드를 사용하라
 - 작은 아동에 절차를 수행할 때는 그리드를 제거하라
 - 요구되는 영상품질과 양립할 수 있다면 영상(영화) 획득에 최소 선량 모드를 사용하라
 - 형광투시 시간을 최소화 하라-형광투시는 기구의 안내와 움직임 관찰에만 사용하라
 - 검토에는 형광투시 대신 가능하면 최종영상유지 영상을 사용하라
 - 가능하면 영화보다 형광투시 루프를 저장하라
 - 가용하면 형광투시를 실시하는 대신 저장된 형광투시 루프를 활용하라
 - 영화 시리즈 수를 최소화 하라
 - 영화 시리즈 당 프레임 수를 최소화 하라
 - 형광투시 대신 영화를 사용하지 마라
 - 방사선빔을 관심 영역에 맞게 콜리메이션 하라
 - 가용하면 가상콜리메이션을 사용하라
 - 적합할 때는 썸기필터를 사용하라
 - 영상수감부(영상강화기나 평판검출기)를 최대한 환자에 가깝게 하라
 - 환자를 가능하면 X선관으로부터 멀리하라
 - 급하게 경사진 노출(특히 좌측 전방 신장방향 경사)을 피하라
 - 방사선량이 환자 피부 한 부위에 집중되지 않도록 C-암 각도를 조금씩 변경하라
 - 필요할 때만 확대하라
 - 체격이 큰 환자나 심하게 경사진 노출에서 환자선량이 크게 증가함을 기억하라
 - 시술실에 전시되는 환자선량에 주의하라
 - 환자가 유사 절차 이력이 있다면 후속 절차를 최적화하기 위해 이전 선량에 대한 정보를 얻도록 노력하라
-

하는 것이 중요하다(ICRP, 2007c; NCRP, 2010). 중재방사선 형광투시 시스템에 대한 국제표준에 부합하는 것이라면 현대 형광투시 기기는 절차 시간 중 선량 데이터를 시술자에게 전시한다. 방사선량을 감시하는 일은 국가 또는 지역 규정에 따라 또는 기관의 정책이나 수요에 따라 방사선사나, 간호사 또는 다른 사람에게 위임할 수 있다(NCRP, 2010). 특정인이 이 책임을 져야 한다. 선량 감시의 목적은 시술의사가 얼마나 많은 방사선이 조사되었는지 알도록 보장하기 위한 것이다.

(91) 환자선량이 증가하면 시술자는 환자에게 이미 전달된 선량과 절차를 완료하기 까지 필요한 추가 방사선을 고려해야 한다. 영화 시리즈 수 제한, 영화나 투시에서 선량을 낮춤, 콜리미이션 사용, 갠트리 각도를 조금 바꾸기 등으로 추가 방사선 사용을 줄이고 피부선량을 관리하는 것이 가능하다.

(92) 환자 피부선량 분포에 대한 지식은 피부상해 위험을 예방할 수 있지만 형광투시 절차에서 피부선량 분포를 측정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 어려움은 심장학에서 특별한데 여기서는 절차 동안 매우 다른 C-암 각도가 사용되어 조사되는 피부 부위가 매우 다를 수 있기 때문이다. C-암 각도를 조금씩 바꾸면 특히 콜리메이션

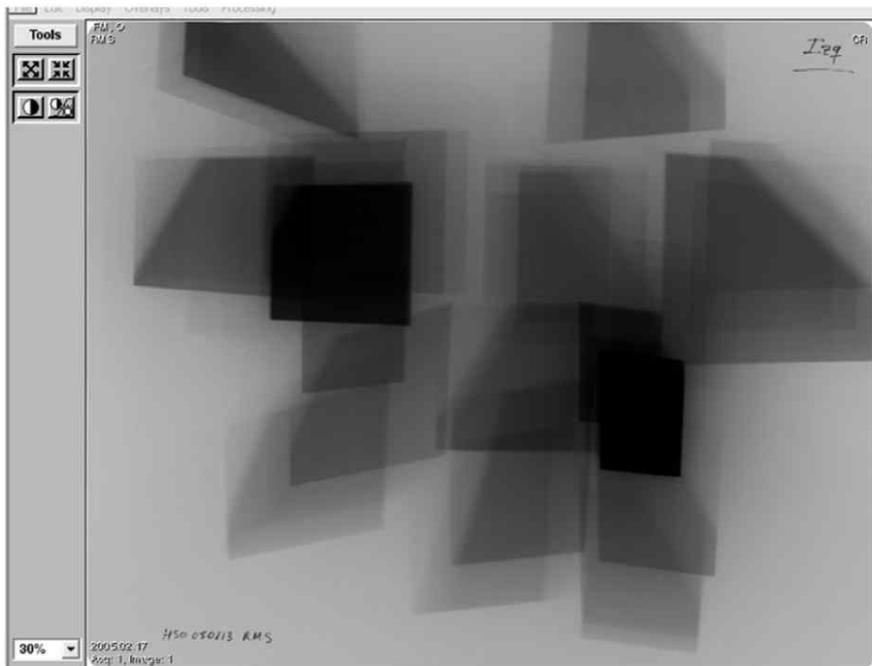


그림5.1. 심장절차에서 피부선량 분포의 예(마드리드 San Carlos 대학병원에서 저감도 필름으로 측정함). 피부선량 분포는 전통적인 경피 관상동맥 중재술 동안 측정된 것이다. 여기서 최고 피부선량은 0.4 Gy였다.

이 사용될 때 최고 피부선량을 줄일 수 있다(Miller 등, 2002). 그러나 이것이 극대 효과를 거두려면 절차 시작부터 계획되어야 한다(Pasciak 등, 2011). 그림5.1은 저감도 필름으로 측정하여 도시화한 피부선량 분포의 예를 보이는데(Vañó 등, 1997a) 방사선장의 중첩이 어떻게 피부의 특정 부위에 선량을 증가시키는지 내 보이고 있다.

5.4. 절차 후

(93) 형광투시 시스템에 대한 국제표준을 충족하는 현대 투시 시스템은 절차 끝에 선량보고를 제공한다(IEC, 2010). 전형적 선량보고서의 예를 그림5.2에 보였다. 여러 제작사가 형광투시 안내 심장절차에 대해 피부선량 분포도 포함하는 선량보고서를 제공하는 시스템을 내놓고 있다. 환자선량 보고서는 절차 끝에 생산되고 저장

Patient Position: HFS		04-Apr-05 10:57:10									
1	CARD	FIXED	Coro LD	4s	15F/s	04-Apr-05 11:04:59					
A	80kV	806mA	7.0ms	200CL large	0.0Cu	20cm	219.5 μ Gym ²	37.9mGy	1RAO	36CRA	61F
2	CARD	FIXED	Coro LD	2s	15F/s	04-Apr-05 11:16:39					
A	75kV	799mA	7.0ms	400CL large	0.1Cu	20cm	56.8 μ Gym ²	7.7mGy	24LAO	5CAU	27F
3	CARD	FIXED	Coro LD	3s	15F/s	04-Apr-05 11:21:31					
A	76kV	799mA	7.0ms	600CL large	0.1Cu	20cm	97.3 μ Gym ²	14.1mGy	30LAO	1CAU	47F
4	CARD	FIXED	Coro LD	4s	15F/s	04-Apr-05 11:28:03					
A	76kV	799mA	7.0ms	***** large	0.1Cu	20cm	138.5 μ Gym ²	20.0mGy	30LAO	1CAU	67F
5	CARD	FIXED	Coro LD	5s	15F/s	04-Apr-05 11:28:36					
A	90kV	819mA	7.0ms	***** large	0.0Cu	20cm	359.2 μ Gym ²	57.2mGy	0LAO	31CRA	71F
Accumulated exposure data		04-Apr-05 11:34:29									
Phys:		Exposures:	0	Fluoro:	7.0min	Total:	1705.4 μ Gym ²	246mGy			
=====											

그림5.2. Siemens Axiom Artis X선 시스템이 생산하는 환자선량보고서의 예. 항목 1-5는 시리즈 입력순서이고 각 입력은 한 영화 시리즈이다. CARD는 입력의 프로토콜이고, FIXED는 시리즈 실행 동안 일정 프레임율임을 의미하며 Coro LD는 입력 모드이다. 초 단위 시간은 그 시리즈의 지속시간이다. 시리즈마다 프레임율, 날짜, 입력 시각, kV, 피크 mA, 펄스시간, 초점크기, 추가 구리필터, 시리즈의 커마면적곱(KAP), 기준 공기커마(RAK), X선빔 각도 및 프레임 수가 보고된다. 총 투시시간과 총 KAP 및 RAK(형광투시 선량과 영화 입력 선량 포함)를 보고서 끝에 제공한다. X선 시스템의 초기 인쇄형식을 유지하고 있다.

되어야 한다. 절차 후에는 선량 데이터를 환자의 의료기록에 기록해야 한다 (Chambers 등, 2011).

(94) 심장절차 보고서는 방사선량을 기록해야 한다(Douglas 등, 2012). 모든 가용한 정보는 기록되어야 한다(NCRP, 2010; Miller 등, 2012). 심장절차에서 환자선량은 종종 KAP로 보고된다. 피부선량 분포와 특히 RAK과 피크 피부선량(용어집에서 정의)이 때로는 더 중요한데 특히 같은 환자에게 절차가 반복될 때는 더욱 그러하다(Miller 등, 2002). 투시시간은 형광투시 선량률의 영향을 포함하지 않으며 영화에 의한 선량을 지시하지도 않는다. 투시시간만으로는 환자선량에 대한 유용한 지표가 되지 않는다(Fletcher 등, 2002; Chida 등, 2006). 투시시간은 기록하거나 감사할 유일한 선량 관련 계량이어서는 안 된다(NCRP, 2010; Chamber 등, 2011).

(95) 고선량을 피폭한 사람의 관리와 추적도 중요하다. 방사선량을 감시하는 일을 보조자에게 위임했고 선량이 다대 방사선량 수준(SRDL)을 초과했다면 그 보조자는 절차 끝에 이를 시술자에게 알려야 한다. SRDL은 평균적 환자에게 임상적으로 유의한 상해가 발생할 것으로 보는 방사선에 대해 추적을 개시하는 방아쇠 수준이다 (SRDL은 용어집에서 정의하고 있고 소절10.6에서 추가로 논의한다). SRDL로 제한된 일부 값은 피부선량 3 Gy, KAP 500 Gy cm², 중재방사선 기준점 공기커마 5 Gy이다(NCRP, 2010). 심장절차에서는 조사야 크기와 특정 프로토콜에 따라 KAP 125-250 Gy cm²가 더 적절할 수 있다. 이들 SRDL 값은 단일 절차에서 2 Gy 이상의 피크 피부선량을 지시할 수 있다(Bogaert 등, 2009; Bor 등, 2009). 시술자는 환자 의료기록에 다대 방사선량이 부여된 점과 그 이유를 설명하는 적절한 노트를 기재해야 한다(Hirshfeld 등, 2005; NCRP, 2010). 이 정보는 절차 후 노트할 수도 있다.

(96) SRDL을 초과했다면 피부선량의 조기 발견과 관리를 위해 임상 추적이 불가결하다(NCRP, 2010; Chambers 등, 2011). 환자에게는 피부상해 가능성에 대해 조언해야 하며, 절차 후 2-4 주 후 빔 입사 부위를 검사 받도록 말해야 한다. 만약 어떤 피부변화가 나타나면 시술자에게 알려야 한다. 어떤 이상으로 시술자에게 이미 알리지 않은 환자는 절차 후 약 30일경에 시술자에게 전화로 (이상 없음을) 알리도록 하여 피부상해가 간과되지 않도록 보장해야 한다. 피부상해가 의심되면 중재방사선 의사는 환자를 진찰하고 적절한 추적관리를 배정해야 한다(NCRP, 2010; Chambers, 2011). 환자 주치의에게도 방사선 영향 가능성에 대해 알려야 한다. 이상적으로는 반복 절차를 식별하고 감시하는 시스템에 수립되어야 한다(ICRP,

2000b).

5.5. 소아환자

(97) 소아 심장절차는 특별한 고려를 필요로 한다. 이들에게 중재술은 종종 난제에 부딪치며 시간이 걸리고 다단계 절차를 요구하여 높은 선량 피폭을 초래할 수 있다. 기여 인자에는 높은 심박수, 작은 실혈관 구조, 작은 체구, 아동에게서 관찰되는 다양하고 특이한 해부학적 이형 등이 있다(Justino, 2006).

(98) 소아 심장 중재술 절차로부터 환자선량은 전용 촬영 프로토콜을 사용하면 줄일 수 있는데 여기에는 꼭 맞는 콜리메이션, 25-30 프레임/s의 펄스 투시 프레임율, 25-50 프레임/s의 영화 프레임율 사용이 포함된다. ‘발 가볍게(Step Lightly)’¹⁸⁾ 솔선의 하나로 소아촬영 방사선안전연합Alliance for Radiation Safety in Pediatric Imaging은 환자선량 감축을 돕기 위해 소아 중재방사선 형광투시에 적용할 점검표와 지침을 발행했다(Sidhu 등, 2009; Hermanz-Schulman 등, 2011).¹⁹⁾

18) <역주> CT 방사선으로부터 소아를 보호하기 위해 소아환자에게는 특별한 정성을 들이자는 캠페인인 ‘부드러운 촬영Image Gently’ 솔선의 세부 캠페인 성격으로서 소아 중재방사선에 초점을 맞춘 버전이다. ‘step lightly’는 형광투시기에서 X선을 가동하는 스위치인 발 페달을 가볍게(합리적 최소) 밟자는 의미에서 나왔으며 투시로 인해 연약한 소아에게 ‘발자국’을 남기지 않도록 정성을 들이자는 의미를 가진다. 형광투시 일반에서 소아환자 보호에 관한 슬로건으로

19) <역주> 방사선 의료절차에서 소아 보호에 초점을 맞춘 ICRP 간행물 121에 추가 정보가 가용하다. 우리말 번역본도 대한방사선방어학회(<http://karp.or.kr>) 홈페이지에서 내려받을 수 있다.



Image Gently... *Step Lightly*

**Interventional radiology
helps us save kids' lives!**

But, when we treat patients,
radiation matters!

Children are more sensitive
to radiation.

What we do now lasts
their lifetimes.

Treat kids with care:

- *Step lightly* on the fluoroscopy pedal.
- Stop and child-size the technique.
- Consider ultrasound or MRI guidance.

image
gently™



6. 형광투시 중재술에서 의료진 보호

- 일반적으로 환자선량 감축은 시술자 선량도 감축한다.
- 직무피폭 보호의 기본 수단은 시간, 거리, 차폐이다.
- 심장 중재방사선이나 전기생리학 시술실에는 개인 방호차폐 사용이 필요하다.
- 시술자는 눈의 방사선방호가 필요하다.
- 천정 걸이 납 스크린과 절차 침상 측면에 거는 납커튼을 적절히 사용하면 직무 피폭 선량을 매우 낮은 수준까지 줄일 수 있다.
- 시술자 선량은 전신에 균일하지도 않고 대칭적도 아니다.
- 심장 중재방사선 및 전기생리학 시술실에서는 직무피폭 선량을 감시하고 감사하기 위해 개인감시 배지의 적절한 사용이 필요하다.
- 심장 중재방사선이나 전기생리학 절차를 수행하는 사람은 환자와 의료진의 방사선량을 줄이는 방법에 익숙해야 한다.

6.1. 서론

(99) 직무피폭에 대한 ICRP 권고에도 불구하고 백내장, 의료진의 손이나 다리에 매우 높은 선량 피폭, 방호용구로 차폐되지 않은 다리 부분에 탈모 등이 발생했다 (Balter, 2001a). 시술자에게 방사선 유발 백내장 발생(Vañó 등, 1998b; ICRP, 2000b; Ciraj-Bjelac 등, 2010)과 중재방사선 심장학자에게 뇌종양 발생에 대한 논쟁(Finkelstein, 1998; Klein 등, 2009)은 형광투시를 실시하는 심장학자의 직무 피폭 보호, 특히 납치마로 보호되지 않는 신체부위에 대한 보호의 중요성을 강조한다.

(100) 시술자는 정상적으로는 X선빔에 직접 노출되지 않지만 산란방사선에 상당한 양을 피폭할 것으로 예상된다. 적절히 사용하면 규제 한도 이내로 시술자의 연간 유효선량을 규제 한도보다 충분히 낮출 수 있는 방호도구(이 장에서 논의)과 여러 기법(제5장에서 설명했음)이 있다. 방호도구와 기법을 적절히 사용하면 중재방사선 의사의 전형적 유효선량은 연간 2-4 mSv로서 ICRP가 권고한 선량한도 20 mSv/y 보다 충분히 낮다(Tsapaki 등, 2004; ICRP, 2007b; Dendy, 2008; Miller 등,

2010b). 심장 도자 시술실에서 직무피폭 방사선량을 감시하고 감사하기 위해서는 개인감시 배지를 바르게 사용하는 것이 중요하다. 개인감시 배지를 패용하지 않거나 부적절하게 패용하는 경우가 너무 많다(Padovani 등, 2011). 제9장에서 논의하듯이 방사선 관리와 방호 훈련이 중요하다(ICRP, 2000b, 2009).

6.2. 다른 의료진과 방사선피폭 비교

(101) 중재방사선 의사는 병원의 다른 의료분야나 준 의료분야, 심지어 핵의학이나 치료방사선 직원보다 많은 방사선을 접한다. 첫째로 중재방사선 의사의 작업 위치가 X선 선원과 산란방사선 선원(환자)에 매우 가깝다. 둘째로, X선빔의 강도가 핵의학 분야에서 관측되는 강도와 치료방사선 분야 강도의 중간에 있다. 셋째로, 형광투시에서 시술자와 X선 선원과 거리(시술자, 환자, X선 선원 사이의 상대 위치)와 절차 시간이 가변 폭이 크지 않아 차폐가 방호의 주역이 된다.²⁰⁾

(102) 도자 시술실의 시술자와 방사선사(방사선 기사) 사이 작업환경-차폐, 환자와 거리, 도자 시술에서 일하는 시간-차이를 살펴보면 중재방사선 의사의 노출인자가 제어실에서 일하는 의료진보다 1000배나 높다(Rehani와 Ortiz-Lopez, 2006). 중재방사선 시술실이지만 제어실에 있는 의료진은 X선빔으로부터 거리와 차폐에 의해 방호된다. 제대로 설계된 시설에서는 전형적으로 제어실에서 방사선 강도는 시술자 의치에서 강도에 비해 수만 분의 1 수준에 지나지 않을 수 있다(Rehani와 Ortiz-Lopez, 2006).

6.3. 직무피폭 방호의 핵심

(103) 직무 방사선피폭의 수단은 시간, 거리, 차폐이다. 의료진 방호와 환자 방호와 여러모로 연계되어 있기 때문에 의료진 방호만 독립적으로 다룰 수는 없다. 환자와 의료진 모두에 대한 방호를 영상의학과 밖에서 방사선방호에 전념한 ICRP 간행물(2010)에서 논의한 바 있다. 일반적으로 환자선량을 낮추면 시술자 선량도 낮아진

20) <역주> 본문 여러 곳에서 강조하듯 환자와 시술자 사이 거리도 중요한 방호인자이다. 그러나 손으로 시술해야 하는 형광투시 안내 절차의 특성 때문에 거리를 멀리할 수 있는 범위가 한정적이다. 시술시간도 비슷하다. 따라서 형광투시에서 의료진 방호는 먼저 차폐를 이용해 주변 방사선 준위를 최소로 줄인 다음 거리와 시간 원칙을 추가로 적용한다는 의미이다.

다.

(104) 시간-형광투시와 영화 모두에서 방사선방호의 핵심 인자-은 X선빔이 쬐지는 시간을 줄이는 것으로 관리된다. 형광투시 시간과 선량률을 낮추면 환자선량을 줄인다. 독자는 제5장에서 논의한 모든 인자를 기억하기 바란다.

(105) 거리는 방사선방호에서 가치 있는 도구이다. 방사선량은 방사선원과 시술자 사이 거리의 제곱에 따라 감소한다(역자승 법칙). 사람이 X선 선원(산란방사선 경우는 X선빔에 노출되는 환자 체적)으로부터 멀어지면 선량은 빠르게 줄어든다. 절차 중에는 시술자가 환자로부터 팔길이를 넘어 멀리할 수 없다. 이는 특히 혈관촬영 실시에서 조영물질을 수동으로 주입할 때 높은 시술자 선량을 초래할 수 있다. 그러나 조영물을 기계주입으로 하면 그동안 시술자가 환자로부터 멀리, 이상적으로는 차폐 뒤에, 있을 수 있다.

(106) 일반적으로 산란방사선은 환자로 빔이 들어가는 쪽에서 가장 강하다(Balter 등, 2010b; Schueler 등, 2006; Straraski 등, 2006). C-암을 사용할 때 가능하면 시술자는 영상수감부 쪽에 자리해야 한다. C-암을 정면투영으로 사용할 때는 X 선관을 침상 아래에 두면 후방산란이 높은 구역이 침상 아래가 되게 하여 시술자의 머리카락이 받는 선량이 낮아진다.

(107) 차폐는 세 유형이 있는데 구조architectural 차폐, 기기자체equipment-mounted 차폐, 개인보호 장구이다(Miller 등, 2010b). 구조차폐는 시술실 벽으로 시공되며 여기서는 더 논의하지 않는다.²¹⁾ 투명한 납함유 플라스틱으로 만들어 바닥에 세우는 이동형 또는 고정형 차폐 환자와 의료진에게 추가 차폐를 제공하는 데 유용하다. 이런 차폐는 간호사나 마취사에게 특별히 적합하다. 중재방사선 시술자는 절차 침상으로부터 드리워진 기기 부착 차폐, 납치마나 납안경 같은 개인방호용구, 그리고 때로는 천정으로부터 드리워진 차폐로 보호된다.

(108) 침상이나 환자로부터 약간 떨어져 서거나 조사야를 제한하거나(콜리메이션), 시술의 복잡도에 부합하게 절차를 재빨리 수행하는 것과 같은 단순한 수법들이 직무피폭 선량을 매우 효과적으로 감축할 수 있다. 표6.1은 도자 시술실에서 직무피폭 방호에 대한 실전적 조언 몇을 제시한다. 표6.2는 도자 시술실에서 기법의 변화에 따라 측정된 산란방사선 선량률의 상대변화를 보인다. 표6.2의 값은 기법과 환

21) <역주> 구조차폐에 대해서는 NCRP 보고서 147을 참고하기 바란다.

자 신체 크기의 변화에 따른 산란 선량률의 큰 변화를 강조하고 있다.

표6.1. 의료진 방사선방호를 개선하기 위한 실전적 조언(Vañó, 2003a; Miller 등, 2010b; ORAMED[<http://www.oramed-fp7.eu/>])

- 가능할 때는 환자(산란방사선 선원)와 당신의 거리를 늘이라. 당연히 이는 혈관촬영이 손으로 수행되지 않을 때만 가능하다. 환자의 노출체적으로부터 거리를 늘이면 산란방사선은 빠르게 줄어든다.
- 당신은 산란 방사선이 낮은 곳에 위치하라. 산란방사선은 갠트리의 X선관 쪽이 높고 영상 수감부 쪽이 낮다.
- 천정 길이 차폐, 침상에 거는 스크린, 그리고 가능할 때는 기타 방호차폐-납치마, 갑상선보호대, 측면 차폐된 납유리 안경과 같은-를 활용하라.
- 천정 길이 차폐는 가능한 한 환자에 가깝게 설치한다.
- 두 면 시스템을 사용한다면 측방 차폐의 적절한 사용이 눈 보호에 매우 중요하다.
- 적절하다면 도자 진입부에 선량 감축 패드나 커튼을 사용하여 당신의 손 선량을 줄여라.
- 가능하다면 형광투시 사용을 피하고 낮은 선량 형광투시 모드(예: 낮은 선량률 펄스 형광투시)를 사용하라.
- 영화 시리즈 사용을 최소화하고 시리즈 당 프레임 수를 최소화하라.
- 확대 사용은 최소화하라.
- X선빔을 가능한 꼭 맞게 콜리메이션 하라.
- 손의 1차빔 노출을 피하라.
- 적절한 방사선 관리 및 방호 훈련을 받으라.
- 개인선량계를 패용하고 자신의 선량을 알고 있으라.
- 나아가 최종 일반 개념을 기억하라: 환자 방사선량을 줄이면 자신의 선량도 감축된다.

표6.2. 필립스 Integris 5000 형광투시기에서 운전인자 변경에 따른 의료진 선량의 상대 증가(Vañó 등, 2006b)

행위	의료진 선량 증가
형광투시 모드를 '저'에서 '고'로 변경	×2.6
영상 수감부 형식을 23 cm에서 17 cm로 변경(두께 20 cm 환자 기준)	×1.0
환자 두께가 16 cm에서 27 cm로 바뀔	×4.2
형광투시 '저' 모드에서 영화 모드로 변경	×8.3

6.4. 개인 방호용구

(109) 심장 도자 시술실에서 개인 방호용구 사용은 필수적이다. 무게증가에 따른 감쇠 증가가 정비례하지는 않지만(표6.3 참조) 과거에는 납 등가가 큰 납치마(현재 많이 사용되는 0.25, 0.3 또는 0.35 mm 대신 0.5 mm)를 사용하는 경향이였다. 중재방사선 시술자나 규제자 입장 모두에서 본질적으로 보수적인 안전인자가 항상 방사선방호 관행에 영향을 미쳐왔다.

(110) 납은 방사선에 대한 방호가 매우 효과적이지만 무겁다. 그 무게는 납치마를 오랜 시간 입어온 의료진에게 문제를 초래하기도 했다(Goldstein 등, 2004). 다년간 납치마를 입어온 의료진 중에 척추 부상 보고들이 있다(NCRP, 2010). 새로운 치마는 감쇠물질로 납 대신 다른 물질로 대체했는데 같은 납 등가를 유지하면서 더 가볍다. 신형 치마 설계는 여러 방법으로 무게 분포를 배분한다. 신체를 감싸는 형의 투피스(조끼와 치마)는 납치마 무게를 분산하여 착용자의 척추를 보호하므로 권장된다.²²⁾

(111) 작은 환자 특히 아동에게 절차를 수행할 때는 0.25 mm 납등가로 의료진 방호에 충분할 것이다. 그러나 체격이 큰 환자에 수행되는 절차나 업무량이 많은 의사가 수행하는 절차에서는 더 두터운 납등가가 더 적절할 것이다. 납치마를 착용하는 사람이 적합하게 방호됨을 확인하기 위해 주기적 선량 감시를 실시할 수 있다(NCRP, 2010).

(112) 납치마는 지정된 길이에 바르게 비치해야 하며 접거나 주름잡거나 구겨서는 안 된다. 깔고 앉거나 접거나 부적절하게 걸어도면 효과를 줄이는 손상이 발생할 수 있다. 납치마나 납장갑 또는 기타 납을 함유한 방호복은 설계된 대로 차폐 이득을 제공하는지 확인하기 위해 사용을 개시할 때 검사하고, 주기적으로 재검사해야 한다. 방호 의류의 건전성을 확인하는 데는 시각적, 물리적, 형광투시적 검사를 적용할 수 있다. 불필요한 형광투시를 최소화함으로써 검사자의 피폭을 최소화하도록 고려해야 한다(NCRP, 2010).

(113) 납치마는 눈, 손, 무릎 아래 다리, 등(두루마기형 납치마를 사용하면 등도 보호한다)을 보호하지 않는다. 이처럼 노출된 신체부위의 피폭이 우려 대상이 되고

22) <역주> 모든 절차에 적합하지는 않지만 근래에는 한 세트로 구성된 천정걸이형(무하중) 개인 차폐물도 시판되고 있다.

표6.3. 표시된 kVp로 발생되고 3 mm Al로 필터된 X선에 대한 여러 납치마의 방호 (Vañó 등, 2006a)

kVp	방호 앞치마의 납 등가	에너지 투과 분율(%)
90	0.25	8.3
	0.35	4.9
	0.50	2.4
80	0.25	5.7
	0.35	3.0
	0.50	1.3
70	0.25	3.3
	0.35	1.5
	0.50	0.5

있다.

(114) 방사선에 대한 눈의 방호는 중재방사선 의사에게는 필수적이다(Dauer 등, 2010a). 우선적으로는 이 방호는 천정걸이 차폐(제6.3절 참조)로 제공하는 것이 좋는데 눈뿐만 아니라 머리 전체를 방호하기 때문이다. 그러나 천정걸이 차폐가 절차를 수행하는 기술자의 역량에 간섭을 일으키기도 하므로 그런 모델을 사용하는 것이 실용적이지 못한 절차들도 있다(Miller 등, 2010). 이런 때는 납안경을 써야 한다. 납안경은 측면차폐가 있어야 하며 잘 맞아야 한다(NCRP, 2010). 잘 맞지 않는 안경은 불편하고 잘 맞는 안경과 같은 수준으로 방호하지 못한다. 보안경을 착용하면 기술자의 눈 방사선량을 현저히 줄이는 것으로 나타났다(Vañó 등, 2008a; Thomton 등, 2010).

(115) 0.5 mm 납등가 보안경 렌즈의 선량감축인자는 약 0.03(즉, 방사선 97%가 감쇠됨)이지만 보안경 렌즈의 방사선감쇠인자 자체가 보안경의 효율에 대한 적절한 지시자가 되지 않는다(NCRP, 2010). 렌즈가 덮는 면적이 중요하다. 최대 효율을 위해서는 방사선 방호안경은 중재방사선 의사의 눈으로 향하는 산란방사선을 최대한 차단해야 한다. 중재술 기술 중 중재방사선 의사는 보통 형광투시 모니터를 보기 위해 머리를 1차빔과 다른 방향으로 돌리게 되는데 이 때문에 눈이 측면으로부터 산란방사선을 피폭한다. 보안경은 측면차폐나 둘러싸는 디자인으로 측면 피폭에 대한 방호를 제공해야 한다(NCRP, 2010).

(116) 보안경은 렌즈와 측면차폐가 눈을 적절히 보호하고 피폭을 최소화하면서 그

무게로 인한 불편도 최소화할 수 있도록 맞아야 한다(Schueler 등, 2009). 합당하게 설계되고 잘 맞는 보안경이 산란방사선을 두세 배만 감쇠시키는 경우도 있다(Moore 등, 1980; Thornton 등, 2010). 보안경의 순 효과는 안경설계, 임상절차의 속성 및 착용자의 습관에 의존한다.

(117) 갑상선 보호대와 방호 앞치마를 착용하면 앞치마만 착용하여 달성하는 것에 비해 유효선량을 약 50% 줄일 수 있다(Martin, 2009; von Boetticher 등, 2009). 젊은 사람에서는 갑상선이 방사선 유발 암에 상대적으로 민감하다. 암 발생 위험은 피폭 당시 연령에 강하게 의존하는데 남성은 30세 이후, 여성은 40세 이후에는 위험이 매우 작다(NRC, 2006). 갑상선 보호대(또는 갑상선도 보호하는 방호 치마) 사용은 위험평가에 근거해야 한다. 일반적으로 목깃 높이에서 개인선량계 판독 값(차폐 없을 때)이 월 4 mSv[H_p(10)]를 넘는 모든 사람은 갑상선 보호가 필요하다(Wagner와 Archer, 2004; NCRP, 2010). 이 그룹에는 대부분 중재방사선 의사가 포함된다. 많은 심장학 시술실은 모든 의료진이 갑상선 차폐를 착용할 것을 요구한다.

(118) 멸균된 유연하고 방사선을 감쇠시키는 수술장갑이 가용하여 중재시술자 손의 피폭을 줄일 수 있다. 방호장갑은 피폭이 높을 때만 착용하라는 과거 권고는 재고할 필요가 생겼다(NCRP, 2000, 2010). 손이 산란방사선에만 노출될 때는 방호장갑의 방호효과는 크지 않다. 그러나 방호장갑을 썼다고 중재방사선 시술자가 손을 1차빔에 넣는 것이 안전하여 허용된다는 것은 아니다(NCRP, 2010).

(119) 방호장갑을 사용하더라도 중재방사선 시술자 손이 높은 선량을 받을 수 있는 여러 인자가 있다(Miller 등, 2010b). 중재방사선 시술자 손과 X선빔과 거리를 멀리하는 특수용구와 마찬가지로 방사선 감쇠 수술장갑이 촉감 반응을 줄여 형광 투시 시간이나 정교한 절차를 위한 CT 노출시간을 증가시킬 수 있다. 어떤 차폐물이 1차빔 안에 있을 때 선량의 증가나²³⁾ 방호장갑이 주는 잘못된 안도감 때문에 방호장갑을 낀 손을 1차빔에 넣음으로써 방호장갑이 손 선량을 높일 수도 있다(Wagner와 Mulhern, 1996). 추가 방호가 있든 없든 환자 안전과 관리를 위해 불가피한 특별한 경우가 아니라면 손이 1차빔 안에 들어가서는 안 된다. 하나의 준칙으로 만약 시술자 손이 모니터에 보인다면 작업관행을 바꿔야 한다(Limarcher 등, 1998).

23) <역주> 시야에 감쇠물이 많으면 자동노출조절이 X선 강도를 높여 선량률이 증가한다.

6.5. 기기거치 차폐

(120) 현재 심장학 시술실에 사용하기 위한 형광투시 시스템과 함께 공급되는 표준 차폐는 천정걸이 함연 스크린과 절차 침상 측면에 걸리는 함연 방호커튼이다. 이 차폐를 제대로 활용하면 직무피폭 선량을 매우 낮은 수준으로 줄일 수 있다.

(121) 함연 유리나 플라스틱 스크린을 환자와 시술자 사이에 두면 시술자의 눈, 머리 및 목을 보호할 수 있다. 바르게 배치된 차폐(가능하면 영상수감부에 가까이, 환자 쪽으로 낮게, 그리고 시술자로부터 멀어지는 방향으로 약간 기울게 하여 시술자에게 가장 넓은 그림자를 던지도록)는 시술자 눈 선량을 획기적으로 줄이는 것을 보였다(Maeder 등, 2007; Thronton 등, 2010). 이러한 스크린은 보안경과 갑상선 보호대 모두를 대체할 수 있다. 스크린은 시술자에게 무게를 더하지도 않으므로 기존 방호용구의 인간공학적 영향을 제거할 수 있다.

(122) 정면 투영(후방에서 전방으로)이 사용될 때 X선관은 절차 침상 아래 있고 침상 아래 산란 선량률은 침상 위에 비해 3-4배 높다(Schueler 등, 2006). 중재방사선 시술자의 하지를 보호하기 위해 절차침상 옆에 거는 함연 커튼을 사용해야 한다. 현재 이러한 차폐는 거의 모든 중재방사선 시술실에 가용하다.

(123) 무연이어서 폐기 가능하고 경량인 멸균 방호차폐를 천이나 패드 형태로 가용한데 이를 환자 위 빔 경로 밖에 설치하면 산란방사선이 심장 중재방사선 시술자에게 주는 선량을 상당히 낮출 수 있다(Germano 등, 2005; Sawdy 등, 2009). 이들 차폐는 금속원소(대체로 비트무스 또는 텅스텐-안티모니)를 함유하며 시술부위를 준비하고 덮은 다음 환자 위에 배치한다. 이런 차폐는 시술자 선량을 크게 줄일 수 있는데 보고된 감축은 눈은 12배, 갑상선은 26배, 손은 29배이다(King 등, 2002; Dromi 등, 2006). 이런 차폐 사용은 시술 비용을 다소 증가시키지만 복잡한 절차나 시술자 손이 방사선장 가까이 있어야 하는 절차(예: 심박조정기 설치)에 대해서는 폐기 가능한 차폐 천 사용을 고려해야 한다(Miller 등, 2010b). 어떤 경우에는 이러한 차폐를 일상적으로 사용한다(Kim 등, 2010). 이 차폐는 형광투시 영상에는 보이지 않아야 한다. 만약 보인다면 환자선량을 증가시킬 것이다.

6.6. 형광투시의 직무피폭

(124) 절차 당 심장학자 유효선량은 $0.2-18.8\mu\text{Sv}$ (Padovani와 Rodella, 2001). 근래의 한 검토는 $0.02-38.0\mu\text{Sv}$ 를 보였다(Kim 등, 2008). 선량의 넓은 범위는 절차 복잡도의 넓은 범위와 차폐나 개인 방호용구 사용의 불균형 때문으로 보인다. 기술 발전으로 진단 도자와 절제 절차에서는 시간 경과에 따라 시술자 선량이 약간 감소했지만 PCI에서는 선량 감소가 보이지 않았다(Kim 등, 2008). PCI 절차의 복잡도가 증가했기 때문으로 보인다.

(125) 연간 1000 회의 혈관조영술 절차라는 높은 업무량을 가정하더라도 연간 유효선량 한도 20mSv 를 넘는 일은 드물 것이다. 한 연구(Efstathopoulos 등, 2003)는 시술자의 유효선량을 $0.04-0.05\text{mSv/y}$ 로 평가한 반면, 다른 연구는 $2-4\text{mSv/y}$ 로 평가했다(Tsapaki 등, 2004; Dendy, 2008). Kuon 등의 집중연구는 적절한 기술과 차폐 도구를 선택하면 시술자가 발전된 심장 도자시술실에서의 전형적 방사선 준위의 기껏 0.8% 를 피폭할 것이라고 했다(Kuon 등, 2002).

(126) 측방 투영이나 갠트리 높은 경사가 사용될 때 C-암 X선관 쪽에 서면 시술자 선량이 증가한다. Kuon 등은 X선관 경사도가 시술자 산란방사선 양에 미치는 영향을 평가했다(Kuon 등, 2004). 좌전방 경사 위치에서 가장 방사선 준위가 높았다. PA 우전방 경사각일 때는 방사선준위가 훨씬 낮았다(Kuon 등, 2002, 2003, 2004). 동시에 신장방향 경사는 선량을 더 증가시켰다. 연구진은 좌측관상동맥 표준시야(좌전방 경사 $60^{\circ}/-20^{\circ}$)는 선택적이지만 덜 자주 사용되는 경사(신장방향 PA $0^{\circ}/-30^{\circ}$)에 비해 시술자에게는 7.6배, 환자에게는 2.6배 선량을 증가시킴을 보였다.

(127) 유효선량은 피폭이 높을 수 있고 방호되지 않는 신체부위(즉, 손이나 눈) 선량은 단명하지 않는다. 시술자의 방사선피폭은 균질하지도 않고 대칭적이지도 않다. 오른 대퇴 동맥을 통해 수행하는 오른손잡이 시술자는 그 좌측을 환자 쪽으로 돌리게 된다. 따라서 시술자 신체의 왼편이 산란방사선을 가장 많이 피폭한다(Maeder 등, 2005). 이런 현상은 X선빔이 환자로부터 나오는 높이에 있는 손에서 특히 그러하다. 심장 도관시술에서 왼손이 오른손에 비해 두 배 선량을 받는 것으로 보고된다(Vañó 등, 1998c). 좌측 눈도 우측 눈보다 높은 선량을 받는다. 당연하지만 키가 큰 시술자는 작은 시술자보다 눈 선량이 낮는데 큰 시술자 눈과 환자 사이 거리가 길기 때문이다.

(128) 개인선량계를 항상, 그리고 바르게 패용하지 않으면 직무피폭 선량을 정확히 평가하는 것이 불가능하다. 개인선량계 패용 실패는 개인 직무피폭 선량이 낮은 것으로 잘못 믿게 만들 수 있다.

6.7. 개인선량 계측

(129) ICRP는 심장 도자시술실에서는 직무피폭 감시를 위해 선량계 둘을 사용할 것을 권고한다. 하나는 앞치마 아래 몸통 위에, 다른 하나는 앞치마 밖 목깃이나 왼쪽 어깨 높이에 패용한다(ICRP, 2000b). 적어도 하나(목깃 선량계)는 항상 패용해야 한다. 앞치마 아래 선량계는 차폐된 장기의 선량 평가치를 제공한다. 앞치마 밖에 패용하는 선량계는 갑상선과 눈 수정체(차폐하지 않았다면)를 비롯한 머리와 목 부분 장기 선량의 평가를 제공하는데 몸통 내 장기 선량은 크게 과대평가 한다. 목깃 선량계가 제공하는 수정체 선량 평가치는 X선관이 환자 아래 있을 때 일반적으로 용납될 수 있지만(Kim 등, 2008) 보안경을 썼다면 눈 선량은 과대평가 할 것이다. 손을 위한 선량계도 역시 유용하다.

(130) 감시결과를 해석하는 데는 의학물리사의 조언을 구해야 한다. 두 선량계로부터 얻은 결과는 NCRP(1995)나 ICRP(2000b) 권고에 따라 직무피폭 유효선량을 평가하는 데 사용될 수 있다. 선량계 값 H_w (앞치마 아래 허리부위. 허리라는 위치는 중요하지는 않다)과 H_n (앞치마 밖 목 위치)으로부터²⁴⁾ 다음 식을 사용하여 유효선량(E)을 평가할 수 있다.

$$E = 0.5H_w + 0.025H_n.$$

(131) NCRP 보고서 122(1995)는 형광투시가 관련된 진단 및 중재적 의료절차 중 방호앞치마를 입은 경우 유효선량을 산출하는 구체적 권고를 포함한다. 이 보고서는 위 식에 추가하여 만약 앞치마 밖 목 위치에 선량계 하나만 패용했다면 유효선량은 $H_n/21$ 로 산출할 수 있다고 설명한다.

(132) 유럽연합 DIAMOND 사업은 직무피폭 예비 선량제약치를 제안하려는 시도로

24) <역주> 전형적 개인선량계는 심부선량당량 $H_p(10)$ 과 표층선량당량 $H_p(0.07)$ 을 측정하도록 설계되고 교정된다. 여기서 말하는 H_w 과 H_n 은 각각 몸통과 목 위치에서 측정된 심부선량당량 $H_p(10)$ 이다.

의료진 방호의 최적화에 관한 이슈를 다뤘다. UNSCEAR(2000)는 심장학자가 의료 분야에서 가장 많이 피폭하는 경향이라 보고했다. 근래 30년 기간에 심장절차에서 시술자의 방사선피폭에 대한 한 검토(Kim 등, 2008)는 각 연구에서 선량계측 방법이 크게 다르기 때문에 보고된 선량계측 결과를 비교하기 어려움에 대해 강조했다. 선량계측 방법의 표준화 개선이 권고된다.

(133) 보고된 직무피폭 선량은 종종 놀랄 정도로 낮는데 그 이유가 높은 수준의 방사선방호일 것 같지는 않으며 개인선량계를 패용하지 않았기 때문으로 보인다. 선량계 패용 결여는 전 세계적 문제이다(Vañó 등, 1998c; McCormick 등, 2002; Padovani 등, 2011). 선량계 배지 정책의 준수 결여는 많은 중재방사선 심장 서비스에서 문제가 되어 있다(Vañó와 Gonzalez, 2005). 예를 들어 McCormick 등 (2002)은 의무적 방사선방호 훈련 이전에 의사와 간호사의 선량계 배지 정책 준수율이 36%에 불과했으나 훈련 후에는 최고 77%까지 이르렀다고 보고했다.

(134) 개인피폭을 감시하는 것에 추가하여 선량계 사용은 방사선방호에 대한 인식을 높인다. 심장학자에 대한 공식적 방사선방호 훈련이 없을 때는 훈련 과정의 의사는 선배의 관행을 받아들이는 경향이다(Rehani와 Ortiz-Lopez, 2006). 개인선량계 사용에 대한 엄격한 정책은 심장 시술실에서 품질 프로그램의 일부로 되어야 한다. 감시기 패용 결여는 고용주 절차나 지방 규정 또는 법률 요건의 위반이 될 수 있다.

7. 심장 핵의학에서 방사선방호

- 심장 핵의학에서 정당화를 위한 표준 설정을 돕기 위해 전문학회의 합의노력을 통해 적합한 사용에 대한 기준과 지침이 개발되었다.
- 심장 핵의학 절차의 방호최적화는 환자선량을 최소화하면서 진단영상 품질을 보장하기 위해 방사성의약품과 투여 방사능을 신중히 선정하는 것과 관계된다.
- 단일광자방출 전산화단층촬영(SPECT) 프로토콜에서 ^{99m}Tc 기반 제제가 ^{201}Tl 보다 낮은 유효선량을 주므로 선량계측 관점에서는 선호된다.
- 투여 방사능은 국제적 또는 국가 지침에 제공되듯이 사전 명시된 범위 내에 있어야 하며 환자 습관을 반영해야 한다.
- 부하 시험이 정상이라면 총 선량을 최소화하기 위해 휴식 촬영은 생략할 수 있다.
- 의사가 환자를 위해 적절한 이득-위험분석을 수행하는 데는 고품질 선량계측 데이터가 필요하다.

7.1. 서론

(135) 심장 핵의학 고찰의 90% 이상이 심근관류와 생조력 평가를 위한 심근관류 신티그라피 고찰이다. 심장핵의학 절차의 거의 대부분은 SPECT로 수행된다. 아직은 적지만 점점 많은 실험실이 PET 고찰을 수행하고 있다.

(136) 매년 세계적으로 3270만 건의 진단 핵의학 절차가 수행되는 것으로 평가된다(UNSCEAR, 2008). 이 중, 약 1400만 건은 심장핵의학 절차인데 이 수는 빠르게 증가하고 있다(Davis, 2006). 미국에서 이루어지는 심장 핵의학 절차 수가 나머지 전 세계에서 이루어지는 수보다 많다. 미국에서는 2006년 핵의학 절차가 환자 의료피폭의 26%를 차지했고, 심장 고찰이 핵의학 피폭의 85%를 차지했다(NCRP, 2009). Tl 사용 감소로 이 핵의학에서 심장 고찰 선량 비율도 2006년부터 근소하게 감소했다.

7.2. 방사성의약품

(137) 심장 핵의학 고찰에 자주 사용되는 방사성의약품을 표7.1에 요약했다. 유럽에서는 대부분 고찰이 ^{99m}Tc 기반 제제를 사용하여 수행되는 반면, 미국에서는 약간의 고찰에 ^{201}Tl 을 이용하고 있는데 대개 ^{201}Tl 휴식 촬영 후 ^{99m}Tc 부하 촬영으로 된 이중 동위원소 고찰 맥락이다. Tl 사용은 환자에게 더 높은 선량을 준다 (Einstein 등, 2007a).

(138) 심장 절차에 권고된 투여 방사능은 여러 나라의 전문학회나 인증기관에 따라 상당한 차이가 있다(Hesse 등, 2005). 미국심장핵의학회 American Society of Nuclear Cardiology(ASNC), 유럽심장핵의학위원회 European Council on Nuclear Cardiology(ECNC)가 프로토콜에 대한 상세 지침을 발간하고 있고, 유럽핵의학연합 European Association of Nuclear Medicine(EANM)과 유럽심장학회 European Society of Cardiology(ESC)도 합동으로 유사한 지침을 내놓고 있다(Depuey, 2006; Henzvola 등, 2009). 이들 지침에 주어진 주사 방사능이 표7.2에 요약되어 있다. 각개 방사성의약품의 투여 방사능에 대한 일부 권고도 미국방사선의학협회 American College of Radiology(ACR), 핵의학회 Society of Nuclear Medicine(SNM) 및 소아방사선과학회 Society for Pediatric Radiology(SPR)의 합동 문서로 제공되고 있다(ACR, 2009).

7.3. 심장핵의학 선량계측

(139) 두 종류 선량계수를 구할 수 있는데 하나는 조직선량계수로서 특정 조직이나 장기의 선량을 평가하는 데 사용되며, 다른 하나는 유효선량계수로서 개인의 유효선량을 평가하는 데 사용될 수 있다. 그러나 유효선량은 방사선방호량으로 사용하기 위한 것임에 유의하기 바란다. 유효선량을 역학적 평가나 사람의 피폭 또는 위험에 대한 구체적인 회귀적 조사에 사용하는 것을 권고하지 않는다(ICRP, 2007b).

(140) 장기선량이나 유효선량 평가치는 일반적으로 방사성의약품의 체내 분포와 대사를 정량화하는 수학적 생물역동학 모델을 이용하여 구한다. 이 모델은 사람이나 동물로부터 얻은 생물역동학 데이터를 내포하며 선량계수를 구할 수 있게 한다.

(141) 조직선량계수는 전형적 환자에게서 단위 투여 방사능 당 특정 장기의 흡수

표7.1. 심장 핵의학에 흔히 사용되는 방사성의약품

제제	형식	역할			물리적 반감기	단위 방사능 당 유효선량 10 ⁻³ mSv/MBq	ICRP 간행물
		관류	기능	생존력			
^{99m} Tc 세스타미비 ²⁵⁾	SPECT	+++	++	+	6 h	9.0 휴식/7.9 부하	80(1998)
^{99m} Tc 테트로포스민 ²⁶⁾	SPECT	+++	++	+	6 h	6.9 휴식/6.9 부하	106(2008)
²⁰¹ Tl 클로라이드		+++	+	++	73 h	140	106(2008)
^{99m} Tc 적혈구	평판 또는 SPECT MUGA ²⁷⁾	-	+++	-	6 h	7.0	80(1998)
⁸² Rb 클로라이드	PET	+++	++	-	75 s	3.4*	80(1998)
¹³ N 암모니아	PET	+++	++	-	10 min	2.0	80(1998)
¹⁸ F FDG	PET	-	-	+++	110 min	19	106(2008)

SPECT: 단일광자방출 전산화단층촬영, PET: 양전자방출 전산화단층촬영, MUGA: 다중게이트수집스캔.

* ICRP ⁸²Rb 선량계수는 ICRP 53(1988)에 주어진 것으로 ICRP 80(1998)에서 되풀이 했으며 ICRP 53에서 적시했듯이 일부 장기에 대해서는 ‘나쁜 조건’에 해당됨. 따라서 이 선량계수로 도출된 선량 평가치는 과도하게 보수적일 수 있음. 근래 세 연구진이 더 낮은 선량계수를 제안한 바 있음: Senthamizhchelvan 등, 2010 (1.11 μSv/MBq); Hunter 등, 2010 (0.74 μSv/MBq); Stabin, 2010 (1.7 μSv/MBq). ICRP는 현재 ⁸²Rb 선량계측 문제를 재 검토하고 있음.

25) <역주> hexakis(2-methoxy-2-methylpropylisonitrile) technetium, 통상명칭: 카디오라이트Cardiolite.

26) <역주> C₃₆H₈₀O₁₀P₄Tc. 상품명: Myoview(GE healthcare).

27) <역주> Multi Gated Acquisition Scan. 방사성핵종 심실촬영, 방사성핵종 혈관촬영 등의 원론적 명칭에 해당하며 게이트심혈액량촬영gated blood pool imaging 또는 SYMA SYnchronized Multigated Acquisition 스캔이라고도 부른다.

표7.2. 미국심장핵의학회(ASNC)와 유럽핵의학회(EANM)/유럽심장학회(ESC) 공동 그룹에 따른 SPECT와 PET의 표준 심장 프로토콜에서 주사 방사능 권고치

절차	주사 방사능 권고치(MBq)	
	ASNC	EANM/ESC
SPECT		
Tl: 1회 주사	92-148 ²⁸⁾	74-111
Tl: 2회 주사	92-148(부하), 37-74(재주사)	74-111(부하), 37(재주사)
Tc-99m: 1일	296-444(1차), 888-1332(2차)	400-500(1차), 1200-1500(2차)
Tc-99m: 2일	하루 888-1332	하루 600-900
두 동위원소	92-148(Tl), 888-1332(^{99m} Tc)	미제공
MUGA	925-1295*	미제공
PET		
Rb-82: 2회 주사	회 당 1480-2220†	회 당 1100-2200
N-13 암모니아: 2회주사	회 당 370-740	회 당 370-740
F-18 FDG	185-555	200-350

MUGA: 다중게이트수집, FDG: 불화데옥시글루코오스fluorodeoxyglucose

* 평판 촬영에서는 740-925

† BGO(Bi₄Ge₃O₁₂)나 LYSO(Lu_{2(1-x)}Y_{2x}SiO₅) 검출기 카메라를 사용하여 2차원 수집에 적용.

선량을 정량화 한다. 예를 들어 ¹⁸FDG PET 추적자의 성인에 대한 ICRP의 기준 간 선량계수는 2.1×10⁻² mGy/MBq이다(ICRP, 1998). 그러므로 ¹⁸FDG 200 MBq 주사는 간 추정선량 4.2 mGy로 연계된다.

(142) 유효선량계수는 단위 방사능 투여 당 유효선량을 정량화한다. 성인에 대한 ¹⁸FDG의 ICRP 주사 선량계수는 1.9×10⁻² mGy/MBq이어서(ICRP, 1998) 같은 200 MBq ¹⁸FDG를 주사하면 유효선량 3.8 mSv에 해당한다.

(143) ICRP 30(1979), 미국핵의학회(SNM) MIRD Medical Internal Radiation Dose위원회(Loevinger 등, 1988), 방사선량평가자원작업그룹(Stabin 등, 2001) 등 여러 시스템이 선량계수를 평가하는 모델을 제공한다. 이들 접근은 본질적으로 대등하며(Stabin, 2006) 단위 질량 당 에너지로 방사선량을 평가한다. 에너지는 일반적으로 방사성의약품의 생물역동학 모델에서 온 시간-방사능 곡선, 핵변환 당 평균 에너지 표, 그리고 몬테칼로 계산 모델로부터 산출된다. 장기 질량은 기준인²⁹⁾reference

28) <역주> 92-148과 같은 수치는 과거 방사능 단위인 Ci를 Bq로 바꾼 과정에서 나온 수치이다. SI 단위로 이 표를 재작성한다면 90-150 또는 100-150과 같이 수정하는 것이 바람직하다.

person 모델에서 결정된다.

(144) 구체적 방사성의약품에 대한 매우 많은 선량계수가 가용하다. 가장 방대한 편집은 ICRP가 제공하는 것으로서 ICRP 53(1988), 80(1998), 106(2008)로 주어진 것이다. 가장 최근 ICRP 선량계수 중 흔히 사용되는 방사성의약품의 유효선량계수가 표7.1에 주어져 있다. 이 유효선량은 ICRP 60(1991)의 조직가중치를 반영한 것이다. ICRP 103(2007)의 조직가중치를 반영한 업데이트된 유효선량계수는 후속 간행물로 제공될 것이다.³⁰⁾ 이제 많은 나라에서 방사성의약품의 선량계수를 제조사 포장 삽입지나 제품정보지에 선량계수를 제공하도록 하는 규제요건을 두고 있다.

(145) 이들 선량계수는 환자의 방사선피폭에 대한 것이기에 기사나 의사와 같은 심장핵의학 종사자에 대한 방사선량을 특징짓는 증거기반은 다소 제한되어 있다(Lundburg 등, 2002; Smart, 2004) 종사자 선량을 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 유지함을 보장하는 것이 역시 중요하다. 종사자는 개인선량계 사용, 선량한도, 임신, 물질 옆지름 등과 같은 이슈에 대해 기지의 방사선안전 요건을 준수하고 방사선방호에 관한 계속교육을 받아야 한다.

7.4. 현재의 선량평가

(146) 심장핵의학 고찰의 전형적 환자에게 주는 선량은 투여한 방사능에 선량계수를 곱해 평가할 수 있다. 최신 ICRP 선량계수를 사용하여 얻은 이러한 평가치가 제제별로 표7.2에 명시한 투여방사능 범위의 중간 값에 대해 그림7.1에 예시되어 있다.

7.5. 선량계측 불확도

(147) 선량계수를 구할 때 여러 항이 추정되고 서로 곱해지기 때문에 선량평가치

29) <역주> 원문은 대표인 representative person으로 잘못 적었다.

30) <역주> 조직가중치 변화는 크지 않으므로 그로 인한 유효선량계수 차이는 사소하다. 따라서 새로운 계수가 가용할 때까지 기존 값을 사용하더라도 문제는 없다. ICRP 110에서 기준 모의체를 사실적인 체적소형으로 변경했는데 이 변경은 체내 장기 사이 거리를 수정하기도 하므로 내부피폭 선량계수에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 현재 ICRP 작업그룹이 새로운 선량계수를 준비 중에 있다.

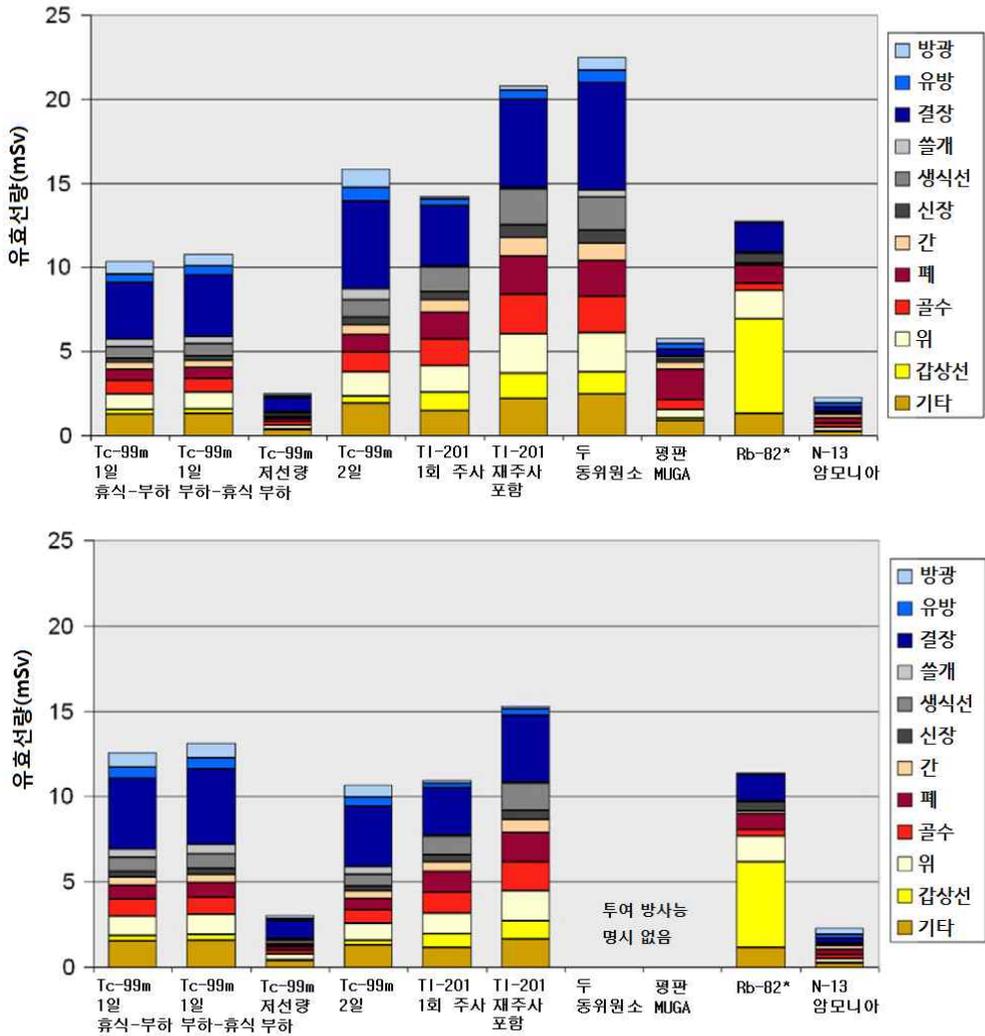


그림7.1. 최신 ICRP 선량계수와 ICRP 103(2007b)의 조직가중치를 사용해 평가한 표준 심장 핵의학 절차의 유효선량. 누적막대는 유효선량에 기여하는 장기의 가중 등가선량을 나타낸다. 99mTc에 대한 선량은 99mTc 세스타나비와 테트라포스민의 평균이다. 위: 미국심장핵의학회 지침(DePuey, 2006; Henzlva 등, 2009)에서 권고한 평균 투여 방사능 사용. 아래: 유럽심장핵의학위원회 지침(Hesse 등, 2005)에서 권고한 평균 투여방사능 사용.

* ICRP ⁸²Rb 선량계수는 ICRP 53(1988)에 주어진 것으로 ICRP 80(1998)에서 되풀이했으며 ICRP 53에서 적시했듯이 일부 장기에 대해서는 '나쁜 조건'에 해당됨. 따라서 이 선량계수로 도출된 선량 평가치는 과도하게 보수적일 수 있음. 근래 세 연구진이 더 낮은 선량계수를 제안한 바 있음: Senthamizhchelvan 등, 2010 (1.11 μ Sv/MBq); Hunter 등, 2010 (0.74 μ Sv/MBq); Stabin, 2010 (1.7 μ Sv/MBq). ICRP는 현재 ⁸²Rb 선량계측 문제를 재검토하고 있음.

에는 다양한 잠재적 불확도원이 있다. 일상 품질관리가 수행된다면 계획한 양과 실제 투여 방사능과 차이는 총 불확도에 작은 기여자가 될 것으로 본다. 불확도에 가장 큰 기여자 셋은 장기 질량의 개인차, 흡수분율, 그리고 각 장기의 총 방사능이다. 장기 방사능 차이는 생물역동학의 차이를 반영한다(Stabin, 2008a). 계산된 흡수선량의 실험적 검증은 20-60% 범위에서 일치하는 것을 보였는데 큰 값은 계산에 적용된 신체 크기와 형상이 많이 다른 환자에게 해당된다(Roedler, 1981). 비교적 근래 논문은 방사선의약품에 대해 어떤 주어진 선량 평가치의 결합 불확도는 일반적으로 적어도 2-3배라고 주장했다(Stabin, 2009).

7.6. ICRP 선량계측과 제조사 정보의 불일치

(148) 방사성의약품에 대해 가용 용이한 선량계측 데이터원은 전형적으로 제조사가 제공하는 정보이다. 때때로 ICRP 간행물이 제공하는 선량계수와 제조사가 제공하는 것이 상당히 다른 경우가 있다. 방사선 위험이 이득-위험 분석에 포함되는 한 인자이기 때문에 이 차이는 진단검사나 방사성의약품 선정에 영향을 미칠 수 있다.

(149) 미국에서 포장 삽입지를 평가한 한 보고서는 한 제조사 정보로 평가한 ^{201}Tl 유효선량이 ICRP 표를 사용해 평가한 것의 절반 미만인 반면, 다른 두 제조사 정보는 ICRP 유효선량보다 크거나 비슷한 수준임을 발견했다(Einstein 등, 2007a). 이러한 불일치는 부분적으로는 선량계수에 내포된 여러 불확도원 때문이지만, 제조사가 제한적이거나 오래된 데이터를 사용하기 때문일 수도 있다(Stabin, 2008b; Gerber 등, 2009).

(150) ICRP는 국가 규제당국이 포장 삽입지나 제품정보의 선량계측 데이터 품질을 보장할 수 있는 프로그램을 이행하기를 권고한다. 품질 측면은 유효선량계수(전신 선량계수에 대응하는), 가용한 선량계측 데이터를 반영하기 위한 승인 후 주기적 업데이트, 자료원의 투명성과 선량계수를 얻는 데 사용한 표본크기 등을 포함한다.

7.7. 심장핵의학 환자의 방사선방호

(151) 방사선방호 일반원칙(제4장)-정당화와 최적화-은 심장핵의학 환자를 보호하

는 데도 적용된다. 선량한도 적용은 적절하지 않지만 방사선량이 임상목적과 상응하도록 관리하는 것을 돕기 위해 방호최적화의 보조로서 DRL은 사용해야 한다(소절7.7.3 및 제10장 참조)(ICRP, 1977, 2007b,c).

7.7.1. 정당화

(152) 심장핵의학은 항상 임상기반에서 정당화되어야 한다(Gerber 등, 2009). 고도로 전문화된 기관에서조차 수행되는 심장핵의학 고찰의 상당 비율이 적합성 표준 기준을 충족하지 못하는 것 같다. 어느 정도는 확실히 특정 환자를 위한 의사결정에 포함된 모든 정보를 포함하기는 어려운 적합성기준의 한계를 반영하는 것일 수도 있다. 그러나 근래에 Mayo 클리닉에서 부하 핵의학 검사를 거친 284명 환자에 대한 회구적 분석에서 25%가 부적절하거나 불확실한 지시였다(Gibbons 등, 2008). 네 종류 부적절한 지시가 부적절한 고찰의 88%를 차지했다. 가장 흔한 부적절한 지시는 무자각 낮은 위험 환자에 대한 부하 검사였다.

(153) 식별된 적합 지시 없는 환자에 대한 구체적 지시 요건으로 검사전 지시에 따른 분류(Hendel 등, 2009b)는 정당화 되지 않고 수행된 부하 핵의학 검사 수를 줄이는 접근을 제공했다. ICRP는 심장 촬영에 적용하기 위한 국가 또는 지역 적합성 기준을 개발하고 검증할 것을 권장한다. 임상 결정을 지원하는 데 사용되는 적합성 기준은 증거에 기반을 두어야 하고, 겨누는 특정 서비스와 질환에 필요한 전문성이 있는 의사단체가 엄격하게 개발하고 검토해야 한다. 둘 이상의 영상화 방식을 사용해야 하는 임상 시나리오에서는 적합성 기준은 이들 다수 방식을 동시에 겨냥해야 한다(ACR, 2010). 둘 이상의 영상화 방식이 고려될 수 있는 임상 시나리오에서는 의사는 각 방안의 이득과 위험을 견주어야 하며, 어떤 방식이 진단정보 품질과 개별 환자 위험의 가장 좋은 균형을 제공할 것으로 예상되는지를 결정해야 한다.

7.7.2. 방호최적화

(154) 심장핵의학에서 환자선량을 관리하는 데는 여러 방법이 사용될 수 있다. 여기에는 가장 적절한 방사성의약품의 선정, 주사하는 방사능의 최적화, 부하 촬영이 정상이라면 휴식 촬영을 생략, 그리고 방사성의약품 투여 후 수액보충과 배뇨 권장 등이 포함된다. 수액보충과 조기 배뇨는 방광벽 선량을 반감시킬 수 있다(Einstein 등, 2007a).

(155) 프로토콜 선택이 특히 중요하다. 표7.2와 그림7.1에 보였듯이 다양한 표준 프로토콜이 심근관류 영상화를 위해 가용하다. 프로토콜의 유효선량은 2 mSv부터 약 30 mSv까지 차이가 있다. 선량이 가장 낮은 심근관류 영상화 프로토콜은 ^{13}N 암모니아를 사용한다. ^{13}N 암모니아는 반감기가 10 분이어서 병원 내 또는 인근에 사이클로트론을 필요로 하는 PET 추적자이다. 이것이 그 가용도를 제한한다.

(156) SSPECT 프로토콜은 1-2회 방사성의약품 주사를 요구한다. 방사성의약품은 ^{201}Tl 이나 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (세스타미비이나 테트로포스민) 또는 두 핵종 모두가 된다. 유효선량은 방사성의약품과 선정된 투여 방사능에 의존한다. 일반적으로 선량계측 근거에서 ^{201}Tl 보다 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 가 선호된다. 유효선량은 ^{201}Tl 을 사용하는 프로토콜이 현저히 높으며 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 부하 검사만 하는 프로토콜이 가장 낮다. 대안 영상화 방식을 사용하지 않는다면 ^{201}Tl 을 사용하는 프로토콜이 일부 환자(예: 횡경막 아래 추적자 흡취가 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 영상을 가린 이력이 있는 환자)에게는 최적일 수 있다. 시험전 관류 결합 확률이 낮거나 중간 미만인 환자에게는 부하 촬영으로 정상이 예상된다면 부하 검사가 정상일 경우 휴식검사를 생략할 수 있으므로 선부하/부하만 stress-first/stress-only 프로토콜이 권고된다(Hesse 등, 2005; Mahmarian, 2010). 이 접근은 감쇠보정과 관련하여 특히 유용한데, 감쇠보정이 인공물 때문에 관류결합이 있는 고찰의 비율을 줄인다(Ginson 등, 2002).

(157) 다른 모든 진단이나 중재방사선 방식에서와 마찬가지로 영상화 기기가 의도대로 기능을 낼 때만 방사선방호가 최적화될 수 있기 때문에 기기 품질관리는 핵의학에서도 중요하다. 방호최적화의 한 측면으로서 의학물리 감독이 있는 품질관리 프로그램을 권고한다.

(158) ICRP는 심장핵의학에 관련된 의사는 전문분야와 관계없이 모두에게 공식 방사선방호 훈련을 권고한다. 이 공식 훈련은 방호최적화 원칙에 따라 환자선량 최소화를 위한 방법의 적용에 관한 훈련을 포함해야 한다. 권고된 훈련은 ICRP 113(2009)에 기술하였다. 추가 권고는 IAEA(2001)에서 찾을 수 있다.

7.7.3. 심장핵의학에서 진단참조준위

(159) 의료영상화의 DRL은 일상적 상황에서 특정 촬영절차와 관련된 환자선량이나 투여 방사능 수준이 그러한 절차로서 너무 높거나 낮지 않은지 지시하는 데 사

용된다(ICRP, 2007b). 이에 대해서는 제10장에서 추가로 논의한다. 지나치게 높거나 낮다면 방호가 적절히 최적화되었는지 또는 시정조치가 필요한지를 결정하기 위해 현장 검토를 개시해야 한다.

(160) 전문 의학단체(국가 보건 및 방사선방호 당국과 협력하여)가 자신에 고유 수요에 가장 잘 맞고 그것이 적용될 지역, 국가 또는 현장과 부합하는 DRL을 설정하기를 독려한다(ICRP, 2007b). 심장핵의학을 위한 DRL 자료원으로는 ASNC, ECNC, 기타 국가 지침이 있어, 각 프로토콜에 대해 투여 방사능 범위를 제시하고 있다. 주어진 환자에게 투여 방사능은 환자 체질을 반영하기 위해 이 범위 안에서 조정할 수 있다. 예를 들어 2일 절차에서 주사 당 ^{99m}Tc 1332 MBq까지 권고되지만 이 상한은 큰 환자에게로 한정해야 한다.

7.7.4. 임신 또는 육아 중인 환자

(161) 시간이 결정적인 응급절차를 제외하고는 임신여부는 모든 심장핵의학 고찰에 앞서 확인해야 한다(ICRP, 2000a; ACR, 2008). 모든 가임여성에게 대해서 임신 가능성 평가를 위해 환자를 신중히 면담해야 하며 소변이나 혈청 임신 상태 시험을 권고한다. 배태아의 바라지 않은 방사선피폭 빈도를 최소화하기 위해 심장핵의학 시술실 여러 곳, 특히 접수구역에는 조연 공고를 게시해야 한다. 그러한 공고의 한 예는 다음과 같다.

만약 임신 중일 수 있다고 생각되면, 방사선 절차를 거치기 전에 의사나 기사에게 알려주세요.

(162) 임신 여성에게 심장핵의학 검사가 제안되었다면 즉각적 진단이나 치료를 필요로 하는 의학적 조건이 정말로 그 검사를 지시하는지를 확신하기 위해 신중해야 한다. 진단 검사에서는 그 검사를 수행하지 않을 때 어머니의 위험이 태아의 방사선 위험보다 크다. 가능하다면 임신 환자에게 긴급하지 않은 절차는 환자 임신이 종결될 때까지 연기해야 한다.

(163) 모든 환자에서와 마찬가지로 임신 환자에 대한 심장핵의학 고찰은 방호최적화 원칙의 이행에 신중히 주의하며 수행해야 한다. 임신 환자에게는 낮은 선량 프로토콜 사용(예: ^{99m}Tc 기반 방사성의약품을 사용하여 저선량 선부하 촬영)을 권장하며 부하 촬영에서 비정상이 발견된 경우에만 둘째 날 저선량 휴식 촬영이 따른다. 어머니 몸속의 방사성핵종이 배태아 선량에 영향을 미치므로 어머니에게 수액

보충과 빈번한 배뇨는 여러 방사성의약품 투여 후 배태아 선량을 줄일 수 있다.

(164) 때로는 핵의학 검사 후 임신에 대해 조언 가능성 질문이 있다. ICRP는 잔류하는 방사성핵종으로 인한 잠재적 배태아 선량이 1 mSv 미만이 될 때까지 임신하지 말 것을 권고해 왔다. 이 권고는 심장핵의학 고찰을 거치는 환자에게는 일반적으로 고려대상이 아니다.

(165) 많은 방사성의약품이 모유에 분비되므로 그렇지 않다는 데이터가 없다면 모유수유 여성에게 방사성의약품을 투여한 경우 일부 방사성화합물은 모유에서 발견될 것으로 가정하는 것이 안전하다. 분비되는 방사성의약품이 아이에게 주는 유효 선량 1 mSv 미만일 것으로 예상되는 때까지는 모유수유를 중지해야 한다. 따라서 ^{99m}Tc 세스타미비, 테트로포스민, 적혈구(체외)에 대해서는 4 시간, ^{99m}Tc 표지 적혈구(체내)에 대해서는 12 시간, ^{201}Tl 에 대해서는 48 시간은 모유수유를 중지하고 이 기간 중 나온 모유는 폐기할 것을 권고한다(ICRP, 2008). ^{13}N 암모니아와 같은 단반감기 PET 추적자에 대해서는 짧은 물리적 반감기 때문에 중단이 중요하지 않다. 다른 핵종에 대한 권고는 ICRP 106(2008) 부록 D에서 찾아 볼 수 있다.

(166) 임신했거나 그 가능성이 있는 환자의 핵의학 절차에 대한 추가 지침은 ICRP 84(2000b)에서 볼 수 있다.

7.8. 환자에 대한 권고

(167) 근년에 핵테러리즘 위협으로 공항이나 기타 공공장소에서 보안검색을 위한 방사선검출기 사용이 널리 확대되었다. 심장핵의학 고찰을 위해 방사성의약품을 투여 받은 환자 몸에는 이러한 검출기 경보를 격발시킬 충분한 방사능이 남았을 수도 있다(Dauer 등, 2007b). 특히 ^{201}Tl 을 투여 받은 환자는 절차 후 2개월까지 이러한 검출기 경보를 작동시킬 수 있다. 환자는 이 가능성에 대해 조언을 받아야 하며 ^{201}Tl 이나 기타 방사성의약품 사용과 관련된 진단 심장절차 후 보안용 방사선 검출기 경보를 울릴 잠재성에 대해 안내하는 정보카드를 발급해야 한다(Dauer 등, 2007b).

7.9. 진행 연구분야

(168) 보다 정교한 잡음감축형 영상재구성 알고리즘이나 고체상 검출기 배열을 적용한 새로운 카메라 등, 심장핵의학에서 근래의 기술발전은 카메라 효율 개선 가능성을 제공한다. 이러한 기술을 이용하는 연구활동은 주로 취득시간 감축과 영상품질 개선에 초점을 맞춘다. 이러한 기술은 전통적 스캐너에 비해 대등한 진단성능을 유지하면서 투여 방사능, 따라서 환자선량의 괄목할 감축을 제공한다. 추가 연구와 임상 검증이 필요하다(Patton 등, 2007).

8. 심장 CT에서 방사선방호

- 심장 CT를 위한 표준 설정을 돕기 위해 전문학회의 합의노력을 통해 적절한 사용을 위한 기준과 지침이 개발되었다.
- 정당화는 고려하는 각 촬영시험의 이득과 위험, 그리고 그 시험을 수행하지 않는 것의 이득과 위험을 견주어서 환자마다 개인적 근거 위에 이루어져야 한다. 방사선 위험 평가는 이 과정의 일부이다.
- 심장 CT로 인한 선량은 스캐너 모드, 관전류, 관전압에 강하게 의존한다.
- 심박수가 매 분 70 미만이고 심장 리듬이 일정한 환자는 전기심전도 기반 관전류 변조와 축방 영상화와 같은 선량감축법을 이용해도 진단 영상품질이 일반적으로 유지된다. 최대 관전류는 환자 체질에 적합해야 한다.
- 환자선량을 최소화하기 위해 새로운 스캔 모드와 같은 방법을 개발하고 검증할 추가 연구수요가 있다.

8.1. 서론

(169) 관상동맥 CT 가능성은 CT 발명자인 Godfrey Hounsfield경이 1979년 노벨 상 수상연설에서 제안되었는데 그는 “전도 유망한 분야로 관상동맥 질환의 발견을 들 수 있다. 특별한 스캔 조건에서 그러한 질환이 걸출될 수 있을 것이다”(Hounsfield, 1979). 이제 대체로 정체 상태인 심장핵의학 기술과는 달리 심장 CT는 근년에 빠르게 발전하고 있다. 이러한 발전은 다양한 종류의 심장 CT 고찰을 가능하게 했다. 오늘날 심장 CT는 관상동맥 석회 스캐닝, 관상동맥 CTA, 폐정맥 CT 혈관조영술, 심장핵의학 영상자료의 CT 감쇠보정 등 여러 차별되는 절차를 망라한다. 근래의 기술발전은 수행되는 절차 수로 연계되지만 세계적 건수에 대한 확실한 통계는 아직 가용하지 않다.

8.2. CT스캐너 유형

(170) 각각의 신세대 CT스캐너는 앞선 모델에 비해 기술인자(예: 시간 분해능, 공

간 분해능, 전신 촬영)와 환자선량 관점에서 달라졌다. 심장 고찰이 가능한 첫 스캐너인 역동적 공간 재구성기(dynamic spatial reconstructor)는 14개 X선원이 환자 주위를 회전했으며 환자선량은 100 mGy에 육박했다(Block 등, 1984). 우수한 시간 분해능 때문에 '초고속ultrafast' CT라고 불린 전자빔 CT스캐너가 이를 대체했다. 전자빔 CT의 환자선량은 훨씬 낮아서 관상동맥 석회 스캐닝이나 CTA에서 전형적 유효선량은 약 1 mSv였다(Morin 등, 2003). 전자빔 CT스캐너는 공간분해능이 낮아 다행검출기 CT(MDCT)가 그 자리를 빼앗았다. MDCT의 향상된 공간분해능은 관상동맥 협착증을 보다 정확히 평가하고 혈전 가시화를 가능하게 했다. 관상동맥 CTA 초기 시도는 4 절편 스캐너로 수행되었다. 더 빨라진 16, 64 절편 스캐너와 같은 후속 세대 CT는 CTA 인기를 높였고, 두 선원 및 체적 스캐너와 같은 더 진보된 스캐너의 출현으로 더 널리 퍼졌다. ICRP 102(2007a)는 MDCT를 집중해서 다루었다.

8.3. 선량계측량

(171) 현재 CT에서 3 종류 선량계측량이 사용되고 있는데 (i) 가중 CT선량지수 weighted CT dose index($CTDI_w$) 및 체적 CT선량지수 volume CT dose index($CTDI_{vol}$), (ii) 선량길이곱dose-length product(DLP), (iii) 유효선량이다. $CTDI_w$ 와 $CTDI_{vol}$ 은 스캔체적 중앙부의 평균 선량이다. DLP는 $CTDI_{vol}$ 을 스캔하는 길이에 대해 적분한 것으로서 환자의 더 긴 부위를 스캔할 때 늘어나는 환자선량을 반영한다(예: 가슴과 심장). 유효선량은 균일한 전신피폭으로 표현한 조사된 신체부위의 위험을 반영하기 위해 계산된 양이다. 유효선량은 방사선방호량으로 개발된 것으로서 상이한 진단검사 사이 방사선 위험을 비교할 때 사용할 수 있다(ICRP 2007b, McCollough, 2008).

(172) 현재 사용하는 MDCT는 전형적으로 개별 고찰에 대해 $CTDI_{vol}$ 과 DLP를 보고한다. DLP에 신체 부위별 환산인자(k 인자)를 곱하면 근사적 유효선량을 평가할 수 있다. 심장고찰에 대해서 가장 보편적으로 사용하는 환산인자는 $0.014 \text{ mSv mGy}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ 인데, 이 값은 유럽위원회의 2004년 CT 품질기준에서 가슴인자이다(즉, 유효선량은 $0.014 \times \text{DLP}$ 로 평가된다)(Bongartz 등, 2004). 이 환산인자는 최근 ICRP 103(2007b) 조직가중치를 반영한 것은 아니다. 나아가 그 값은 단일 절편 스캐너에서 도출된 것이며 심장 스캔이 아니라 가슴 스캔에 대한 것이다(Christner 등, 2010; Einstein 등, 2010)³¹). 이 방법은 쉽게 가용한 데이터로부터

유효선량 근사치를 얻는 유용한 방법을 제공하지만 보통 유효선량을 약간 과소평가한다. 유효선량을 구하는 보다 복잡한 다른 접근은 몬테칼로 모사를 통해 인형모의체 안에서 장기선량을 평가하는 것이다. 이에 대해서는 ICRP 102(2007a)에서 더 상세히 다뤘다.

8.4. 환자선량에 영향을 미치는 인자

(173) 심장 CT에서 환자선량에 영향을 주는 인자에는 스캐너 본질적인 것(예: 스캐너 세대, 모델, 제작사)와 운전자가 선정하는 변수가 포함된다. Hausleiter 등 (2009)은 관상동맥 CTA를 수행하는 50개 의료기관에 대한 관찰연구에서 스캐너 제작사 사이에 상당한 유효선량 차이가 있음을 발견했다. 관상동맥 CTA에서 보고된 선량은 몇 세대 MDCT가 사용되었는가에 따라 차이가 났다(Einstein 등, 2007a). 최신 세대 스캐너는 환자선량을 크게 줄이는 잠재력이 있는 기술을 내장한다. 운전원이 선정할 수 있는 변수로서 선량에 영향을 주는 것에는 X선관 전류(mA)나 관전류-시간곱(mAs), 관전압(kV), 피치(IEC, 2009), 스캔 길이(신장방향 범위) 및 스캔 모드 등이 있다.

8.4.1. 관전류

(174) 주어진 고찰에 대해 적절한 관전류 선택은 영상잡음과 방사선량 사이 교환을 반영한다. 관전류를 증가시키면 영상잡음을 줄이지만 방사선량은 증가한다. 선량 증가는 근사적으로 관전류 증가에 정비례하는 경향이다(Gerber 등, 2005). 큰 환자는 표준 잡음 준위의 영상을 얻는 데 더 높은 전류를 필요로 하므로 기본 관전류는 환자 체질에 맞춰 조정되어야 한다. 스캐너나 스캔 모드, 재구성 알고리즘이 다르면 동일 관전류에서도 잡음이 다른 영상을 만들므로 프로토콜은 맞춤이어야 한다. 민감한 균형이 요구되는데 방사선량을 과도하게 줄이면 스캔이 진단적이지 않게 만들 것이다. 반복적 잡음감축법을 내장한 새로운 영상 재구성 알고리즘은 낮은 관전류에서도 영상품질을 유지할 수 있다.

31) <역주> 이 말이 그 값을 사용해서는 곤란하다는 의미는 아니다. 조직가중치가 일부 변경되거나 기기 모델의 차이 등은 유효선량 평가에 현저한 차이를 내지는 않는다. 단순한 k인자를 곱해 유효선량으로 환산하는 것 자체가 근사일 뿐이며, 유효선량 개념도 엄정한 값이 아니라 포괄적 방사선 위험에 대한 근사적 지표에 해당하므로 작은 값 차이는 실질적으로 중요하지 않다. 따라서 새로운 인자가 가용할 때까지는 기존 인자를 사용해도 무방하다.

8.4.2. 관전압

(175) 심장 MDCT 적용에서 관전압은 120 kV가 보통이다. 많은 센터에서 작은 환자에 대해서는 낮은 관전압(예: 100 kV)을 사용하고 있다. 방사선량은 대략 관전압의 2.5승에 비례하므로 관전압을 워처럼 낮추면 37% 산량감축을 예상할 수 있다.³²⁾ 낮은 전압 관상동맥 CTA를 지지하는 증거(Abada 등, 2006; Bischoff 등, 2009; Hausleiter 등, 2010)는 120 kV CTA를 지지하는 증거(Abdulla 등, 2007)만큼 견고하지는 않다. 그러나 많은 센터에서 낮은 관전압으로 우수한 영상 품질을 얻고 있다(그림8.1 참조).



그림8.1. 100 kV 관전압과 단일 심박 체적 스캔으로 얻은 관상동맥 CT 혈관영상.
 자료원: A.J. Einstein, Columbia Univ. Medical Center, New York, NY, USA.

32) <역주> $(\frac{100}{120})^{2.5} = 0.63$ 이어서 37% 감축된다.

8.4.3. 스캔 길이

(176) 환자선량은 신체 부위가 조사되는 길이-이는 본질적으로 스캔 길이와 같다-와 정비례 관계에 있다. 전형적으로 관상동맥 CTA는 용골carina부터 심장 바닥까지 스캔하여 수행되는데 환자 움직임을 고려하여 양쪽으로 약간의 여유는 둔다. 스캔 길이 11-15 cm가 전형적이다. 과도하게 넓은 여유는 진단정보 추가 없이 환자선량 증가를 초래한다. 대동맥이 포함되어야 하거나 환자가 관상동맥 우회술 coronary artery bypass grafting을 받았다면 더 큰 신장방향 범위가 필요한데 이때 스캔 상단은 대동맥궁 위까지로 된다.

8.4.4. 스캔 모드

(177) 스캔 모드에는 일정 관전류 전통 나선촬영, 심전도 기반 관전류 변조 ECG-based tube current modulation(EBTCM)식 전통 나선촬영, 높은 피치 나선촬영, 축방 촬영을 포함하는데 여기에는 단계순촬영step-and-shoot이나 체적촬영 모두 포함한다(그림8.2 참조). MDCT를 이용한 관상동맥 CTA는 64절편 스캐너로 전형적 피치 0.2에서 일정 전류 나선 모드를 이용하여 처음으로 수행되었다(그림8.2a). 현재 모든 심장 스캐너는 EBTCM을 제공하는데 이는 관상동맥 움직이이 일반적으로 최소화되는 심박정지기diastasis에 관전류를 최대로 유지하고 나머지 심장 사이클 시간에는 관전류를 낮춘다(그림8.2b). 이렇게 하면 과도한 잡음 없이 영상재구성을 수행할 수 심장 사이클 위상 수가 제한되지만 심박수가 낮고(< 65 박/분) 정규 심박리듬인 환자에게는 일반적으로 문제가 없다. 보통 환자에게 베타 차단제 beta-blocker나 칼슘 채널차단제를 투여하여 심박수를 낮춰 EBTCM 효능을 높인다. 이러한 조건을 만족하지 않는 환자에 대해서는 심장 수축기말에 대한 재구성이 중앙부와 우중양 관상동맥을 보이는 데 상당히 유용하다(Sanz 등, 2005). 이런 환자에게 EBTCM을 적용하면 관전류가 최대로 유지되는 시간주기를 넓힐 것을 조언할 수 있다. EBTCM은 보통 유효선량을 약 1/3로 줄인다. 한 선원 스캐너에서는 이 선량 감축은 심박수가 낮을수록 현저하다(Jakobs 등, 2002).

(178) 근래에는 일부 MDCT스캐너에 축방 관상동맥 CTA 프로토콜이 내장되었다. 이 접근 스캔은 사전 지정된 심장 사이클 위상에만 영상 데이터를 수집하며 나머지 사이클 기간에는 X선빔이 꺼진다. 단계순촬영(전망적 ECG격발) 축방 스캔에서는 X선이 한 심장 사이클에서 조사되고 다음 사이클 동안 침상이 이동하고 하는 과정이 전체 신장방향 관심체적을 스캔할 때까지 반복한다. 64채널 스캐너에서 이

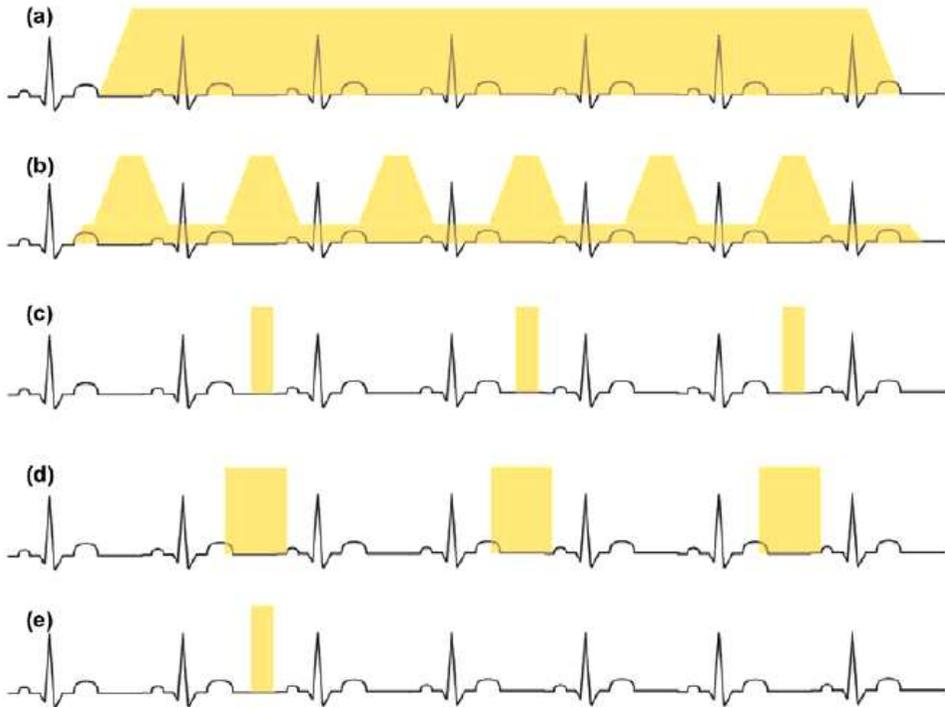


그림8.2. 심장CT에 사용되는 스캔모드. 검은 선은 심전도(ECG) 신호, 음영부는 관전류를 나타낸다. (a) 나선스캔, (b) ECG기반 관전류 변조 나선스캔, (c) 축방 단계순촬영(전망적으로 심전도 격발식) 스캔, (d) 여러 심장상태의 재구성을 위해 넓은 노출/데이터 취득 시간으로 축방 단계순촬영(전망적으로 심전도 격발) 스캔, (e) 총방 단일 심박 스캔(체적스캔 및 높은 피치로 나선스캔, 도시는 최소 노출시간을 보임). 모든 MDCT 스캐너에 이들 모든 모드가 가용하지는 않다.

과정은 3-4 반복(즉, 5-7 심박, 그림8.2c에는 5 심박이 예시됨)을 필요로 한다. 단계순촬영에서 설명 가능한 심장 영상을 얻으려면 심박율이 매 분 70박 미만이고 리듬이 정상이어야 한다고 일반적으로 생각하지만 연구가 충분하지는 않다. 단계순촬영의 장점은 대부분 심장 사이클 시간에 방사선 노출을 제거하고 나선 관상동맥 CTA의 특징은 노출 영역 중첩이 없기 때문에 선량이 감축되는 것이다. 단점에는 심장 사이클의 다른 위상에 대해 소급적 영상 재구성이 불가하며 따라서 심장기능이나 심벽 움직임을 평가할 수 없다는 점이 포함된다.

(181) 축방 관상동맥 CTA와 단일 심박 모드를 평가한 임상문헌(Sun과 Ng, 2011)은 나선 관상동맥 CTA 문헌보다 제한적이어서 침습적 혈관촬영에 의한 골드 표준

진단에 비해 진단 정확도 효능을 평가한 여러 센터 연구가 부족하다. 이 스캔 모드에 대한 추가 검증이 요망된다(von Ballmoos 등, 2011).

8.5. 선량평가 현황

(182) 관상동맥 CTA 선량계측은 여러 인자에 의존하며 프로토콜에 따라 상당히 차이난다. Einstein 등(2007a)은 2007년 심장 CT로부터 유효선량에 관한 발표된 문헌을 검토했는데 심장 석회스캔의 유효선량은 나선기술을 사용한 때 1.0-6.2 mSv, 축기술을 사용한 때 0.5-1.8 mSv였다. 64 절편 나선 관상동맥 CTA에서 EBTCM 없이는 8-21.4 mSv, EBTCM을 사용하면 6.4-14 mSv였다. 미국에서 15 개 센터에 대해 수행한 연구에서 k 인자로 $0.014 \text{ mSv mGy}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ 을 적용하여 평가한 유효선량 중앙값은 선량감측 모범관행에 대한 교육 개입 없었을 때 14 mSv였다(Raff 등, 2009). 세계적으로 50 센터에 대한 연구에서는 유효선량 중앙값은 12 mSv였다(Hausleiter 등, 2009). 이 Hausleiter 연구에서 관상동맥 CTA를 수행하는 센터 사이에 유효선량 중앙값이 6배 범위까지 차이가 있었다. EBTCM은 DLP 나 유효선량의 25%를 감축하는 것으로 나타났고(95% 신뢰구간은 23-28%), X선 관 전압으로 100 kV 사용은 46%(95% 신뢰구간은 42-51%), 축방 단계순촬영 스캔은 78%(95% 신뢰구간은 77-79%) 감축을 내었다. 다른 단일 센터 연구들은 축방 스캔을 평가했는데, 많은 경우 유효선량 범위로 2-4 mSv를 보고했지만(Earls와 Schrack, 2009) 2011년의 가장 큰 메타분석은 평균 유효선량으로 5 mSv를 얻었다(Sun과 Ng, 2011). 전통적 나선스캔과 비교할 때 체적 스캔은 84% 선량감축을 냈고(Einstein 등, 2010) 높은 피치 나선스캔은 k 인자로 $0.014 \text{ mSv mGy}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ 를 사용할 때 체중 100 kg 이하로서 느린 심박률(매 분 60 박 이하) 환자에게서 1 mSv 이하의 유효선량을 내었다(Achenbach 등, 2010).

(183) 임상관행에서 보는 유효선량의 매우 넓은 범위는 심장 CT에서 유효선량에 대한 '전형적' 값을 제시하기 어렵게 만든다. 유효선량은 CT 스캐너와 그 프로토콜 모두와 연관된다. 전형적 값의 평가치 한 세트를 표8.1에 보였지만 이 값들을 어떤 한 기관에서 목표 값이나 임상관행의 대표 값으로 간주하는 것은 적절치 않다.

(184) CT 프로토콜을 평가한 많은 연구에서 유효선량을 환자별 바탕으로 구했다. 'CT 품질기준에 대한 유럽 지침European Guidelines on Quality Criteria for

CT(Bongartz 등, 2000)'에 주어진 것과 같은 환산인자의 존재는 연구자가 한 고찰에 대해 스캐너가 보고하는 DLP로부터 '유효선량'을 평가하는 것을 쉽게 만들 수는 있지만 이것이 유효선량의 의도된 용도는 아니다(ICRP, 2007b; Einstein 등, 2008; Gerber 등, 2009). 유효선량은 평균적 사람에 대해 정의되므로 개인의 위험을 평가하기 위해 사용해서는 안 된다. ICRP가 위의 문헌들을 인용했다고 해서 그 접근을 추진하는 것은 아니다.

(185) 관상동맥 CTA에서 유효선량에 가장 큰 기여는 폐와 여성 유방의 가중 등가선량이다.³³⁾ 관상동맥 CTA의 흡수선량은 나선스캔을 적용할 때 폐와 유방에서 약 40-90 mGy로 보고되지만 축방 스캔에서는 10-12 mGy일 뿐이다(Einstein 등, 2007b; Huang 등, 2010).

표8.1. 여러 유형 심장 CT 검사의 근사적 평균 유효선량 평가치

검사	유효선량(mSv)*
CT 관상동맥 혈관촬영 (나선)	19
(관전류 변조)	13
(전망적 게이트 촬영)	4
관상동맥 석회 스캔	2

* 자료원: Einstein(2009). 다른 유효선량 평가치에 대해서는 Einstein 등(2007a), Earls와 Schrack(2009), Garber 등(2009), Hausleiter 등(2009), Kim 등(2009), Raff 등(2009), Smith-Bindman 등(2009) 및 Sun과 Ng(2011)을 참조하라.

8.6. 심장 CT에서 환자 보호

(186) 방사선방호의 일반원칙(제4장 참조)-정당화와 방호최적화-은 심장 CT 환자의 방호에 적용될 수 있다. 선량한도 적용은 해당되지 않지만 방사선량이 임상 목적에 상응하도록 선량관리를 돕기 위한 방호최적화의 보조로 DRL(소절8.6.3 및 제

33) <역주> 유효선량은 조직 등가선량의 위험 가중평균 개념으로서 $E = \sum_T w_T H_T$ 로 표현한

다. 심장 CT는 가슴의 심장 위치에 한정하여 등가선량(또는 흡수선량)을 받는 주된 조직은 유방, 폐, 심장, 피부이다. 피부 흡수선량은 더 높지만 조직가중치가 0.01로서 유효선량 기여는 작다. 폐와 유방의 조직가중치가 0.12이어서 지배적으로 기여한다. 심장은 등가선량은 폐보다 약간 낮은 정도이지만 13개 조직으로 구성된 기타조직의 하나일 뿐이어서 유효선량 기여는 피부와 비슷한 수준이 된다. 위, 결장, 갑상선 등 조사야 인근에 있는 주요 조직은 산란선 피폭효과만 있으므로 등가선량이 낮다. 결국 유효선량에 주된 기여자는 유방과 폐가 된다.

10장 참조)을 적용해야 한다(ICRP, 2007b,c).

8.6.1. 정당화

(187) ICRP는 심장 CT를 적절히 사용하도록 기준과 지침을 개발하고 적용하기를 권고한다. 심장 CT의 적절한 사용을 위한 기준과 지침은 전문기구들이 제공하고 있으므로 이를 활용해야 한다(Schroeder 등, 2008; Taylor 등, 2010).

(188) 특정 병원에 대한 한 보고서에서 관상동맥 CTA 고찰의 46%가 적합성 관점에서 분류 불가로 나타난 반면 부하 SPECT는 11%만 그러했다. 분류한 고찰 중 관상동맥 CTA의 51%, 부하 SPECT의 72%가 적합했다(Gibbons 등, 2008; Miller 등, 2010c). 기법간 차이가 많은 고찰을 분류할 수 없었던 미국 관상동맥 CTA 적합성기준 초판의 영향이 주인지 아니면 관상동맥 CTA 고찰이 SPECT 고찰에 비해 적절한 지시에 따라 수행될 가능성이 낮은 것인지 이 데이터에서는 불분명하다. 후속 연구가 필요하며 적합한 사용 기준의 최대한 준수를 보장하기 위한 프로그램도 권장된다.

8.6.2. 방호최적화

(189) 소절8.3에서 논의했듯이 운전자는 환자선량에 영향을 미치는 여러 스캔 변수를 조정한다. 운전자는 환자 신체 체질의 함수로서 관전류와 전압을 선택하는 적절한 지침을 제공받아야 한다. 관상동맥 혈전이나 협착이 주된 목표가 아닐 때(예: 관상동맥 기형 가능성 평가나 심장수술 반복에 앞서 흉골에 대한 우회로 평가)는 관전류나 전압을 낮출 것을 특별히 고려해야 한다. 스캔 길이는 관심체적을 촬영하는 데 필요한 만큼으로 제한해야 한다.

(190) 운전원에게 스캔 모드 선정에 대한 적절한 지침을 제공해야 한다. 적절하면 선량을 줄이는 스캔 모드를 사용해야 한다(Gerber 등, 2009). 관상동맥 석회 스캔에는 축방 촬영을 사용하고 관상동맥 CTA를 수행하기 전에 종합고찰에서 검토해야 한다. 관상동맥 중증 석회화의 만연은 평가할 수 없는 관상동맥 부위가 있을 높은 가능성 때문에 관상동맥 CTA를 수행해서는 안 됨을 암시할 수도 있다. 다선원 스캐너에서 가변 피치로 스캔 받는 환자는 예외일 수 있지만 모든 환자에 대해 영상품질을 높이고 선량을 줄이기 위해 필요에 따라 심박 조정제를 투여하여 심박수를 약 60 박/분까지 낮출 수 있다.

(191) 제9장에서 논의할 것이지만 ICRP는 환자를 의뢰하거나 심장 CT를 수행하는 의사-심장학자, 방사선기사, 핵의학 전문가, 내과의를 포함하여-모두에 대해 방사선방호 공식 훈련을 권고한다(ICRP, 2011). 이 공식 훈련에는 정당화와 방호최적화 원칙의 적용에 관한 훈련도 포함해야 한다.

(192) 품질향상계획(제10장 참조) 관상동맥 CTA 방사선량을 크게 줄이는 것으로 나타났기에(Raff 등, 2009) 그러한 프로그램의 시행을 권장한다. 의학물리 전문가가 방호최적화를 도울 수 있다.

8.6.3. 진단참조준위

(193) DRL에 대해서는 제10장에서 더 논의한다. 의료 촬영에서 DRL은 일상조건에서 투여 방사능이나 특정 촬영절차에서 환자선량 수준이 그 절차로서 비정상적으로 높거나 낮지 않은지를 지시하는 데 사용된다(ICRP, 2007b). 어느 한 쪽이라면 방호가 적절히 최적화되었는지 또는 어떤 시정조치가 필요한지를 결정하기 위한 자체검토를 착수해야 한다.

(194) 전문의료단체(국가 보건 및 방사선방호 당국과 협력하여)은 고유 수요에 알맞고 해당 지방, 국가 및 지역 여건에 부합하는 DRL을 설정할 것을 권장한다(ICRP, 2007c). 현재로서는 심장 CT에 대한 DRL이 없다.

8.6.4. 임신 환자

(195) 시간을 다투는 응급절차가 아니라면 CT 검사에 앞서 임신여부를 확인해야 한다(ICRP, 2000a; ACR, 2008). 가능하다면 임신 환자에게 긴급을 요하지 않는 절차는 임신 종료 후로 연기해야 한다. 관상동맥 CTA는 보통 하체방향으로 약 횡격막 수준에 이르는 스캔 범위를 가지므로 자궁은 직접 조사되는 영역 밖에 자리한다. 따라서 일반적으로 임신 환자의 수태물은 산란방사선에 의해 적은 선량(예: 0.1 mGy)만 피폭한다(McCollough 등, 2007). 이렇게 낮은 선량에서는 태아 기형이나 아동기 암의 기인위험은 매우 작으므로, 중요한 진단정보를 제공하는 적절하고 정당화된 관상동맥 CTA 검사라면 임신 환자라고 배제해서는 안 된다. 다른 환자에서와 마찬가지로 임신 환자의 관상동맥 CTA도 최적화 원칙의 이행에 충분히 주목하며 수행되어야 한다.

9. 심장학자를 위한 방사선방호 훈련

- 세계적으로 심장학자는 방사선방호 훈련을 거의 또는 전혀 받지 않는 관행이다.
- 대부분 국가의 법률은 의료피폭에 책임이 있는 사람은 적절히 방사선방호 훈련을 받도록 요구한다.
- 방사선방호 훈련에는 훈련 프로그램을 통해 습득한 지식에 대한 평가(공식 시험체계)가 있어야 한다.
- 훈련을 마친 의사는 적절한 인증시험에 합격하여 교과과정에 명시된 지식을 가졌음을 내보일 수 있어야 한다.
- 방사선을 다루는 모든 의사를 위해 권고된 훈련에 추가하여 중재 심장학자나 전기생리학자는 2단계 고급 방사선방호 훈련을 받아야 한다.
- 형광투시 절차를 돕는 간호사나 기타 의료진은 자신이나 다른 사람의 피폭을 최소화하기 위해 방사선방호 원칙과 방사선 위험에 대해 익숙해야 한다.
- 의학물리사는 현장에서 수행되는 구체적 절차의 임상 특성에 익숙해야 한다.
- 훈련 프로그램은 신입 의료진에 대한 초기훈련과 정기적 보수 및 재훈련을 포함해야 한다.
- 학술대회는 방사선방호에 관한 보습과정을 포함해야 하고 그 이수를 전문성 계속 개발의 한 요건으로 할 수 있다.

9.1. 서론

(196) 임상행위에서 일상적, 집중적으로 방사선을 사용함에도 불구하고 세계적으로 심장학자는 방사선방호에 대한 훈련을 거의 또는 전혀 받지 않고 있다. 전통적으로 의과대학생은 의과대학 과정에서 방사선방호 훈련을 받지 않는다. 후속적으로 진단 방사선, 핵의학 또는 치료방사선과 같은 방사선학을 전공하는 의료전문인은 그 전문 훈련의 일부로 방사선물리학과 방사선방호를 배우게 된다. 많은 나라에서 내과 학이나 심장학과 같은 다른 전문의 과정의 훈련에는 방사선방호를 가르치지 않는다.

(197) 과거에는 X선과 기타 방사선원을 방사선방호 훈련을 받은 의료진이 방사선과에서만 사용했기 때문에 방사선의학자가 아니면 방사선물리와 방사선방호 분야 훈련이 필요하지 않았다. X선 형광투시는 한 세기 이상 사용되어 왔지만 과거 이용은 신체 해부구조, 구조의 움직임 또는 조영제의 체내 이동로의 가시화 위주였고 방사선의학자가 이들 절차를 수행했다. 형광투시 중재술이 도입되자 다른 전문의(심장학자와 증가하고 있는 기타 의료전문인)도 이들 절차를 수행하기 시작했다. 처음에는 진단방사선과에서 방사선의학자와 함께 수행했다. 세월이 지나면서 기기(CT, 형광투시, 핵의학 및 투과촬영 기기)가 다른 과나 외래시설에도 설치되고 방사선의학자 참여 없이 다른 전문의가 사용하게 되었다. 이들 다른 전문의는 방사선의학자에게 필수인 방사선물리나 방사선방호에 관한 훈련을 받지 않았다. 이제 그러한 훈련이 긴요함이 분명해졌고(Douglas 등, 2012), 따라서 심장학에서도 구체적인 지침이 필요하다.

(198) ICRP는 중재방사선의사, 핵의학 전문의, 의학물리사, 간호사 및 방사선사/기사에 대한 훈련의 구체적 사항을 특히 ICRP 113(2009)에서 다룬 바 있다.

9.2. 방사선방호 요건

(199) 세계식량기구, 세계노동기구, 범미보건기구, 세계보건기구 등과 공동 주관으로 IAEA가 발행한 ‘방사선방호와 방사선원 안전을 위한 기본안전표준(BSS)’(IAEA, 1996)은 방사선을 사용하는 진료절차의 안전한 수행에서 부여된 업무를 완수하기에 충분하도록 적절한 훈련을 받기를 요구하고 있다.

(200) 대부분 국가의 법률은 의료피폭에 책임있는 사람은 방사선방호에 적절히 훈련받도록 요구한다. 그러나 많은 나라에서 아직 훈련 시스템이나 인증 메커니즘은 결여되어 있다.

(201) 방사선방호 훈련활동은 훈련 프로그램에서 습득한 지식의 평가가 따라야 한다. 방사선방호 교육훈련은 이수 인증서를 발급하기에 앞서 숙련도를 평가하는 공식 시험체제로 보완되어야 한다. 어떤 의료 전문분야에 방사선방호 인증을 요구한다면, 그 사람에게 해당 전문행위(예: 심장 중재술, 전기생리학)를 시행하도록 허가하기 전에 그 인증을 받게 해야 한다. 훈련 프로그램은 신입 의료진에 대한 초기 훈련과 정기적 보수 및 재훈련을 포함해야 한다. 과학이나 전문 학회는 일관된 접

근을 보장하고 교육훈련을 조장하고 지원하기 위해 훈련교과의 개발에 참여해야 한다. 학술대회는 방사선방호에 관한 보습과정을 포함해야 하고 그 이수를 전문성 계속 개발의 한 요건으로 할 수 있다(ICRP, 2009).

9.3. 중재방사선 형광투시

(202) ICRP는 ICRP 85(2000b)에서 중재방사선 절차가 복잡하고 힘들며 그 방사선량이 시술자 종속적이라고 말한 바 있다. 이 절차를 시술하는 의료인이 임상기술과 방사선방호 모두에 적절히 훈련되어야 함은 특히 중요하다. 나아가 ICRP는 병원에서 새로운 X선 시스템이나 기술을 실시할 때는 특별 추가훈련을 계획하도록 말했다. 방사선방호의 기초훈련이나 계속훈련은 이러한 교육의 일부이어야 한다. 훈련요건은 ICRP 113(2009)에서 다뤘다.

(203) 유럽연합 EC 97/43 Euratom의 의료피폭규정 Medical Exposure Directive of EC 97/43 Euratom의 제9조는 중재방사선을 환자에게 높은 선량을 주는 특수 진료로 간주한다(EU, 1997). 같은 규정 제7조에 따르면 회원국은 시술자가 방사선학 절차의 목적을 위한 적절한 이론적 및 실전적 훈련과 함께 방사선방호에도 해당 역량을 갖도록 보장해야 한다. 심장 중재방사선에 대해 특별히 언급된 것은 없다.

(204) ICRP 85(2000b)와 ICRP 113(2009)에서 ICRP는 중재방사선의사는 방사선을 사용하는 모든 의사에게 권고된 훈련에 추가하여 2단계 방사선방호 훈련을 권고했다. 또, ICRP는 형광투시 절차에서 보조하는 간호사나 기타 보건관리 전문인은 방사선 위험이나 자신과 다른 사람의 피폭을 최소화하기 위한 주의사항에 익숙해야 한다고 권고했다. 의학물리사는 현장 병원에서 수행되는 절차의 임상측면에 익숙해야 한다. 의학물리사가 임상절차와 그 촬영 요구사항에 대한 업무지식을 가진 경우 이들이 제공하는 실전적 조언은 거의 항상 발전되기 때문이다.

(205) 근년에 중재방사선 절차를 거치는 환자의 방사선 유발 상해 수 관점에서(ICRP, 2000b; Koenig 등, 2001a; Vañó와 Gonzalez, 2005; Rehani와 Ortiz-Lopez, 2006) 많은 기관이 훈련요건에 대한 권고를 제공하기 시작했다. 간행된 지침은 처음에는 중재방사선 방사선의사를 위한 것이었지만 점점 심장학에도 가용하게 되었다.

9.5.1. 미국

(206) 1994년 미국 식약청(FDA) 조언은 의료기관에 대해 합당한 훈련을 보장하도록 주의를 주었다(FDA, 1994). 침습성 절차가 이루어지는 의료시설에 대한 FDA의 구체적 권고는 다음을 포함한다.

- 형광투시를 수행하는 의사에 대한 훈련과 적절한 자격인증을 확립할 것.
- 시스템 운영자 모두는 훈련 받아 각 운영 모드의 방사선피폭 함의를 포함하여 형광투시 시스템의 운영을 이해해야 한다.
- 의료기관은 형광투시를 수행하는 의사가 교육 받아 연령, 빔 위치 및 방향, 빔에 노출 조직, 과거 형광투시나 방사선치료 이력 등을 고려하여 건별로 환자의 위험과 이득을 평가하여야 한다.

(207) 1995년에는 미국 심장학협회 American College of Cardiology(ACC)의 심장도자술 위원회 Cardiac Catheterization Committee는 의료진의 적절한 훈련이 필수적이며 ‘방사선물리와 안전의 원칙에 대한 적합한 강의는 모든 심장학자 교육의 일부가 되어야 한다.’는 성명을 발표했다(American College of Cardiology, 1995). 나아가 ACC 합의문은 심장학 의료진의 방사선안전 지식기반의 필요성에 대해 명확히 윤곽을 잡았다(Limacher 등, 1998).

(208) 2004년에는 미국심장학협회/미국심장협회 American Heart Association/미국의료인협회 American College of Physicians(ACC/AHA/ACP)의 작업그룹은 ACC의 1998년 보고서의 동반자로 훈련과 임상역량에 관한 보고서를 발행했다(Limacher 등, 2004; Hirshfeld 등, 2004). 2004년 문서에서 제안된 교과과정은 X선 형광투시 기기를 사용하는 자격을 얻기 위해 유자격 의사가 확보해야 할 지식을 명시하지만 훈련 최소 시간을 명시하지는 않았다. 훈련을 이수한 의사는 적절한 인증시험에 합격하여 교과과정에 명시된 지식을 가졌음을 내보일 수 있어야 한다.

(209) 특정 의사가 수행하는 형광투시 안내 절차에 따라 필요한 지식 깊이는 다르다. ACC/AHA/ACP 문서는 기초와 고급의 두 교과과정의 틀을 제시한다. 기초 교과과정은 우심장 도자설치, 임시 심박조정기 설치, 대동맥내 풍선펌프 설치와 같은 비교적 단순한 형광투시 안내 중환자실 절차를 수행하는 의사에게 적절하다. 고급 과정은 상이한 목적으로 더욱 복잡한 환경에서 더 많은 양의 방사선을 사용하기에 동반되는 환자의 위험이나 상해 우려가 큰 혈관조영, 중재방사선, 전기생리학 절차를 수행하는 의사에게 적절하다.

(210) 미국 NCRP는 근래에 형광투시 안내 중재방사선 절차에서 방사선량 관리에 관한 보고서를 발행했다(NCRP, 2010). 이 보고서는 다음을 포함하여 여러 구체적 권고를 제시한다.

- 형광투시 안내 중재술이 진행되는 동안 시술실에 출입하는 모든 사람은 적절한 방사선방호 훈련을 받아야 한다.
- 형광투시 안내 중재술에서 기기를 운전하거나 사용을 감독하는 모든 사람은 그 특정 기기의 안전사용에 관한 최신 훈련을 받아야 한다.
- 높은 환자선량 잠재성이 있는 형광투시 안내 중재술이나 기타 절차를 수행하는 중재방사선의사는 낮은 선량 형광투시 안내 중재술에 제한하여 시술하는 중재방사선의사에게 필요한 수준을 넘는 추가 지식과 훈련을 필요로 한다.
- 임상훈련과 경험은 방사선관리의 공식훈련을 대체로 용납되지 않는다.

9.3.2. 유럽위원회

(211) 유럽위원회 요건에 따라 중재방사선을 위한 방사선방호의 구체적 훈련 개요가 수립되었다(Vañó 등, 1997b; EC, 2000). 전문 그룹에 구체적으로 중재 심장학에 대한 언급은 없지만 희망 훈련시간을 제시하는 표에는 중재 심장학 전문가에 열이 있는데 20-30 시간 훈련을 제안하고 있다. 이 지침에 따른 초기 스페인 경험이 보고되었는데(Vañó 등, 2003) 여기에는 훈련용 CD 개발이 포함되어 있다(MARTIR³⁴), 2002).

9.3.3. 국제원자력기구

(212) IAEA는 구체적으로 중재 심장학자를 위한 교육 목적으로 교과과정을 개발했다. 이 교과과정은 개발도상국으로서 심장학회가 독자적으로 방사선방호 분야의 기초 및 고급 교과과정에 대한 독립적인 모듈을 개발하기에 충분히 성숙하지 않은 국가를 겨냥했다. 이러한 국가에서는 ‘샌드위치’ 모듈³⁵이 이상적인데 해당 주제를 가르칠 만큼 진단촬영에서 방사선방호에 충분한 전문성을 가진 사람이 부족하다는 관점에서 특히 그러하다. IAEA는 CD에 수록한 전자 발표 형태의 훈련교재도 개발했다. 심장학에서 방사선방호에 관한 이 IAEA 훈련교재는 무료로 가용한데

34) MARTIR: Multimedia and Audiovisual Radiation Protection Training in Interventional Radiology.

35) <역주> 샌드위치 코스로도 불리는데 일반적 교육과 현장 업무를 교대로 진행하는 훈련 방식을 의미한다.

patient.protection@iaea.org로 이메일을 보내 얻거나 웹사이트 <http://rpop.iaea.org>에서 내려받을 수 있다.

9.3.4. 세계보건기구

(213) WHO도 기본훈련에 추가하여 중재 심장학에 구체적 훈련이 필요하다고 말했고 훈련요건을 제시했다(WHO, 2000). 나아가 WHO는 새로운 기술의 도입, 새로운 방사선 시스템의 설치, 또는 새로운 의료진이 배치된 때에는 훈련과정이 계속되어야 한다고 말한다. 또한 정기적 계속 훈련과 보수과정도 권고하고 있다. 그러나 중재 심장학은 이 문서 범위에 포함되지 않았다.

9.3.5. 자격인증

(214) 한 의사를 어떤 절차를 수행할 기술역량이 있는가를 인증하는 것과 그 의사가 형광투시를 안전하게 사용할 수 있는 충분한 역량이 있는지를 인증하는 것은 다른 문제이다. 중재 심장학자나 전기생리학자가 환자 당 또는 연간 다루는 방사선의 양이 중재방사선의사가 다루는 양에 못지않기 때문에 중재 심장학에서 방사선 물리나 방사선보호 훈련표준도 중재방사선의사를 위한 것과 같아야 한다(ICRP, 2009).

10. 품질보증 프로그램

- 방사선방호 품질보증 프로그램의 두 가지 기본목적은 환자선량을 주기적으로 평가하는 것과 방사선이 사용되는 심장학 시설 종사자의 직무피폭을 감시하는 것이다.
- 촬영절차와 중재 심장학 절차에 관계하는 모든 의료진을 위한 방사선방호 훈련 (초기 훈련과 재훈련 모두)은 품질보증 프로그램에 포함되어야 한다.
- 한 심장학자가 심장학 절차를 위한 방사선방호의 품질보증 측면에 대한 관리책임은 져야 하며 의학물리사의 지원을 받아야 한다.
- 심장학 중재 형광투시 시술실, CT 스캐너, X선이나 핵의학 시스템을 새로 설치하거나 기존 기기를 업그레이드 하는 계획에는 선임 중재방사선 의사와 의학물리사 각 1명이 포함되어야 한다.
- 심장학 품질보증 프로그램에는 형광투시, CT 및 신티그라피에 대한 환자선량 감사를 포함해야 한다.
- 영상품질과 절차 프로토콜의 주기적 평가가 품질보증 프로그램에 포함되어야 한다.
- 품질보증 프로그램은 개인선량계의 정상적 사용을 보장하고 모든 비정상적 선량 값에 대한 검토를 포함해야 한다.
- 품질보증 프로그램은 방사선 유발 피부상해 위험이 있을 때는 그 사람의 임상적 추적을 개시하게 하는 방아쇠 준위를 수립해야 한다.
- 절차 끝에는 환자선량 보고를 생산하고 저장하며 환자 의료기록에도 기록해야 한다. 선량보고가 가용하지 않으면 선량 값을 절차와 환자 식별과 함께 환자 의료기록에 기록해야 한다.
- 품질보증 프로그램은 형광투시, CT, 신티그라피에 대해 환자선량 감사(진단참조준위와 비교 포함)를 포함해야 한다.

10.1. 서론

(215) 심장학에서 품질보증 프로그램quality assurance programme(QAP)은 전 진단과정에서 최적 품질이 달성됨(즉, 환자와 기타 사람이 수용 가능한 최소 피폭을 받으

면서 적절한 진단정보의 일관적 생산이 이루어짐)에 대해 확신할 수 있도록 필요한 계획적이고 체계적인 모든 조치를 포괄해야 한다(WHO, 1982).

(216) 심장학에서 QAP는 통상적 임상 측면에 추가하여 환자와 의료진의 방사선방호의 모든 측면을 포함한다. 여기서는 방사선방호 측면만 논의한다. QAP의 두 가지 기본 목표는 환자선량을 주기적으로 평가하는 것과 방사선이 사용되는 심장학 시설 종사자의 직무피폭을 감시하는 것이다. 심장학을 위한 QAP의 방사선방호 성분은 특정 의료센터에서 X선과 핵의학 부서의 일반 QAP와 독립적인 부분이 되어야 한다. 다음은 방사선방호 QAP에 포함해야 할 10가지 핵심 포인트이다.³⁶⁾

- 시설설계
- X선기기(선정기준)
- 방사선방호 용구
- 선량계 가용성
- 인력 가용성 및 책임
- 방사선방호 훈련(초기 및 계속)
- 환자선량 감사 및 보고
- 환자선량이 높은 경우 임상 추적
- 영상품질 및 절차 평가
- 의료진 선량.

(217) 한 심장학자가 심장학에서 방사선방호의 QAP 측면에 대해 관리책임을 져야 하며 이에 의학물리사의 도움이 있어야 한다. 방사선방호 조인자/방사선안전관리자 radiation safety officer(RSO)도 직무피폭 선량 감시에 참여해야 한다. 심장학을 위한 방사선방호 QAP는 업데이트나 주기적 추적 기회를 위해 적어도 매년 검토되어야 한다. QAP에 대한 자체감사 역시 가용하다. 다음 목록은 이러한 QAP에 대한 자체 감사의 일부로서 응답해야 할 몇 가지 질문을 보인다.

- 센터가 작년의 환자선량 값을 보고할 수 있는가?
- 높은 환자선량의 경우 임상 추적을 위한 절차가 있는가?
- X선 시스템에 대한 품질관리 시험 결과를 알고 있는가?
- 의료진 방사선량 값을 추적하고 있는가?
- 방사선방호에 관한 지속적인 훈련 프로그램을 가지고 있는가?

36) <역주> ‘품질보증은 문서화다.’라고 말할 정도로 관련 활동내용이 문서로 정리되어 이해 당사자에게 드러내 보일 수 있어야 한다. 업무수행 절차도 절차서 형식으로 문서화되고 수행 결과도 체계적으로 정리되어야 한다.

10.2. 시설

(218) 새 형광투시 중재 시술실의 설계, 새 X선이나 핵의학기기 시스템의 선정과 설치, 그리고 기존 기기의 업그레이드는 모두 복잡하고 비용이 드는 공정이다. 이러한 공정의 계획은 방사선방호를 포함해야 한다. 선임 의사(중재방사선의사, 전기생리학자, 핵의학 전문의 또는 CT 촬영 전문의 등 적절한 의사), 의학물리사, 선임 방사선사/기사 각 1명이 이 계획에 참여해야 한다. 새로운 시술실을 사용하게 될 모든 전문의학 분야를 대표하는 의사들이 시술실의 기기 구체화에 참여해야 한다. 고려할 중요 사항을 표10.1에 주었다.

표10.1. 시설구매 고려사항(ICRP, 2000b)

임상 요구 분석	업무량
기기 사양	일반요건 기기 주요 부품 기능요건 구체적 기기 요건
전산 능력	영상 전시 매트릭스 처리시간 메모리/영상저장장치 PACS 연계성 HIS 연계성
시스템 성능	영상품질 환자선량 선량관리수단 사용자가 선량 설정과 프로토콜을 최적화할 수 있는 여지
사용자 매뉴얼	기술훈련 운전훈련
국가/국제 표준 부합성	전기안전 기계안전 방사선안전 시술실 설계 및 차폐
서비스와 보증	유지관리 프로그램 품질관리 프로그램 서비스 프로토콜 접근성/서비스 일정 근거
운영비	소모품 비용-5년간 추산

PACS picture archiving and communication system 의료영상저장전송시스템

HIS hospital information system 병원정보시스템

(219) 도자시술실을 위해 제안된 건축구조 사양을 과학학회가 발간한 바 있는데 (ACC/AHA, 1991) 적합한 크기(50 m²), 충분히 크고 납유리창을 가진 제어실, 충

분한 천정고(3 m, C-암을 위한 천정 걸이 지지대를 수용하기 위함), 적절한 방사선 차폐(창문과 출입문 포함), 그리고 환자를 포함한 사람 출입 편의 등을 포함한다. 새로운 X선실은 절차 중 X선실에 있는 사람들이 환자로부터 거리를 두고 자리할 수 있도록 충분한 크기로 해야 한다. 시설은 넓은 차폐 유리창을 가진 제어실을 두어 다른 의사나 관계자가 방사선피폭 없이 절차를 관찰할 수 있도록 해야 한다.

(220) 적절한 차폐, X선실 출입, 방사선방호 용구(납치마, 갑상선보호대, 방호장갑, 보안경, 방호 스크린, 천정걸이 및 침상아래 차폐 등)는 도자기술이나 전기생리학 시술실 계획의 일부이어야 한다. 환자선량을 측정, 기록, 환자 의료기록으로 전송을 포함하는 선량감측 기법은 새로운 형광투시나 CT 기기를 선정할 때 중요한 인자로 고려되어야 한다. 적절한 표준을 고려해야 한다(IEC, 2010).

10.3. 수용시험과 향상성시험

(221) 수용시험은 시스템을 구매하는 센터 기술인력의 참관아래 기기 공급사가 수행하거나 센터 기술인력이 수행한다. 수용시험에는 기기의 방사선안전 특성의 성능을 결정하기 위한 시험이 포함된다. 새 기기를 임상에 사용하기 전의 취역과정은 센터 인력의 책임이다.

(222) 국제표준, 현장 규제요건, 현장 권고, 그리고 X선 시스템 제작사 권고를 고려하여 선량계 교정을 포함한 주기적 품질관리를 계획해야 한다. 제작사 권고는 환자선량 관리에서 심장학자를 돕도록 실제 결과(예: 여러 형광투시 모드에서 선량률, 영화 획득에서 프레임 당 선량)를 포함해야 한다.

(223) QAP에는 영상품질과 절차 프로토콜의 주기적 평가도 포함되어야 한다. 영상 품질은 수용시험과 향상성시험에서 시험대상물을 이용해 측정해야 한다. 디지털 촬영 검출기에서는 요구되는 수준의 영상 품질을 얻는데 넓은 폭의 선량 값을 선택할 수 있다. 심장학자는 방사선사/기사, 의학물리사, 산업체 기술자와 함께 영상품질과 선량 사이 적절한 균형을 맞추도록 형광투시와 CT 시스템 선량을 설정해야 한다.

(224) 임상 기준을 사용해 영상품질 주기적 평가를 수행할 수도 있다. 예로서 유럽의 DIAMOND 콘소시엄(http://www.diamond3.org/WEB_DIMOND3/home.htm)

은 형광투시 심장 촬영을 평가하는 한 세트 기준을 제안하고 있다(Bernardi 등, 2001a,b).

(225) 심장학자는 사용하는 촬영수단 각각에 대해 적정 수준 진단정보를 얻는데 필요한 선량을 알아야 한다. 형광투시 중재에 대해서 해당 인자는 제5장에서 논의했다. 핵의학 선량과 관련한 문제는 제7장에서 논의했다. CT스캔 프로토콜, 모드, 기술인자 및 환자선량에 영향은 제8장에서 논의했다.

10.4. 의료진

(226) QAP의 중요한 한 측면은 개인의 역할과 책임에 대해 기술하는 것이다. 전문의 당 과도한 절차를 피하기에 충분한 의료진이 있어야 하며 간호나 기술 지원도 마찬가지이다. 네트워크 전문가(특히 새 디지털 시스템에 대해), 보유유지 인력 및 의학물리 전문가의 지원도 권장된다. 의학물리사는 방사선이 사용될 때 심장내과에서 활발해야 하며 합당한 기기가 구매되고 사용됨을 보장하도록 심장학자와 같이 일해야 한다. 의학물리사는 심장학자가 영상물질과 선량 사이 균형을 맞추도록 인도하고 과의 모든 구성원의 훈련을 감독해야 한다.

(227) QAP에는 의료진 선량의 분석도 포함되어야 한다. 의료진을 위한 교정된 선량계가 가용해야 한다. 환자선량 평가를 위한 X선 시스템에 내장된 선량계에 추가하여 형광투시 시술실에 근무하는 사람들은 적절한 선량계를 패용해야 하며 그 사용에 대해서는 엄격한 정책이 시행되어야 한다. 추가적인 전자선량계도 유용할 수 있는데 특히 학생이나 경험이 작은 직원의 방사선방호 훈련에서 유용하다. QAP는 개인선량계의 일상적 사용을 보장해야 하고 모든 비정상적 선량 값에 대한 검토도 포함해야 한다.

10.5. 훈련

(228) 방사선방호 훈련(제9장 참조)도 QAP에 포함되어야 한다. 방사선방호에 대한 최초 인증은 현지 요건에 따라야 한다. 전공의와 전임의fellow의 방사선방호 훈련에 각별히 주의해야 한다. 환자와 의료진 선량의 분석에 대한 세미나는 훌륭한 교육수단이 되며 품질보증 활동에도 유용하다. 훈련에 대해서는 ICRP 113(2009)에 더욱

자세히 논의했다.

10.6. 중재 형광투시에서 의심되는 방사선 유발 피부상해의 추적

(229) QAP는 방사선 유발 피부상해 위험이 있을 때는 그 사람의 임상적 추적을 개시하게 하는 방아쇠 준위를 수립해야 한다(ICRP, 2000b; WHO, 2000; NCRP, 2010). SRDL은 환자 추적을 포함한 추가 선량관리 조치를 개시하는 데 사용하는 문턱값이다(NCRP, 2010). SRDL 미만의 선량은 완전히 안전하고 SRDL을 넘는 선량은 항상 상해를 초래한다는 의미는 아니다. SRDL로 제안된 값으로는 피부선량 3 Gy, KAP 500 Gy cm², 중재방사선 기준점에서 공기커마 5 Gy 등이 있다(NCRP, 2010). 심장학 절차에 대해서는 조사야 크기와 구체적 프로토콜에 따라 KAP 범위 150-250 Gy cm² 정도가 더 적절할 것이다. 이들 값은 단일 절차에서 최고 피부선량은 2 Gy를 초과할 수도 있음을 지시할 수도 있다. SRDL 값은 평균적 환자에게 임상적으로 의미 있는 상해를 일으킬 수 있는 방사선량에 대해 추적을 격발하려는 것이다. 기관의 판단에 따라 더 낮은 값을 사용할 수도 있는데 특히 피폭 이력이 있는 피부가 관련될 경우 그러하다(NCI, 2005).

(230) 만약 방아쇠 준위를 초과했다면 환자의 주치의에게 환자 선량과 방사선 영향 가능성에 대해 통보해야 하며 적절한 임상적 추적을 마련해야 한다. 만약 절차 후 선량이 조직반응 문턱에 근접했다면 중재방사선의사나 그 의료진이 환자에게 가능한 징후나 관찰 가능한 피부영향에 대해 알려야 한다. 그러한 영향이 나타날 경우 환자가 어떻게 해야 할지에 대한 정보를 제공해야 한다. SRDL을 초과한 경우 후속 평가는 QAP의 일부이어야 하며 환자를 추적해야 한다(소절10.7.3 참조).

10.7. 선량 감사

(231) 환자선량 감사 및 보고는 QAP의 중요 성분이다. 절차 끝에는 환자선량 보고를 생산하여 저장하며, 환자 의료기록으로 전송해야 한다. 환자선량 보고의 예가 그림5.2에 주어졌다. 그러한 보고가 가용하지 않으면 선량 값을 해당 절차 및 환자 식별과 함께 기록해야 한다(Miller 등, 2012). 만약 보고가 인쇄본으로만 가용하면 해당 데이터를 전자 데이터베이스로 보내 추가로 분석해야 한다. 보고가 전자형식

으로 가용하면 그 파일은 영상과 함께 저장되어야 한다.

(232) 중재 형광투시에서 상당히 많은 수 환자에 대해 주기적으로 측정하여 기록할 양은 KAP, 기준점 공기커마(X선 시스템에서 가용하다면), 형광투시 시간, 시리드 수, 프레임 수 등이다(NCRP, 2010). 기준점 공기커마를 측정하는 기능은 2006년 중반 이후 생산된 형광투시 기기부터 널리 가용해졌다. CT 검사에 대해서는 측정량은 $CTDI_w$, $CTDI_{vol}$, 또는 DLP(제8.3절 참조)이다. 핵의학에서 측정량은 투여 방사능이다.

(233) 선량 감사는 수립된 참조준위에 대비하여 센터의 성능을 평가하는 것도 포함해야 한다(소절10.7.1 참조). 심장 중재술 절차에서는 조직반응 위험을 동반하므로 선량 감사는 추가 분석도 요구한다(소절10.7.3 및 소절10.7.4 참조).

10.7.1. 진단참조준위

(234) 선량 지침이 처음 도입된 것은 미국에서는 1980년대였고 영국에서는 1990년대였다(Wall과 Shrimpton, 1998). ICRP 권고에서는 그러한 지침이 ICRP 60(1991)에서는 '조사준위(investigation level)'로, ICRP 73(1996)에서는 진단참조준위로 소개되었다. 이제 DRL은 흉곽 투과촬영이나 유방촬영과 같은 대체적(大體積) 검사에서 되먹임 수준을 정의하는 정립된 방법이 되었다. ICRP는 DRL 사용을 계속 권고한다(ICRP, 2000b, 2007b,c).

(235) DRL은 의학영상 역무에 기여하지 않는 환자선량을 회피함을 돕도록 사용된다. DRL은 의사에게 자신이 환자에게 전달한 선량을 동료들이 전달하는 선량과 비교하는 간단한 도구를 제공한다. DRL은 모범관행의 지침일 뿐이지 선량한도도 아니며 시술자나 기기의 유능한 역량을 규정하는 것도 아니다. DRL은 최적 성능보다는 현재 모범관행으로 무엇을 달성할 수 있는지에 대한 지침을 제공하려는 것이며, 비정상적으로 높은 선량이나 피폭수준을 식별하는 것을 도우려는 것이다. 어떤 절차의 평균 선량이 참조준위보다 낮다고 그 절차가 최적으로 수행되었음을 보장하지는 않는다.

(236) DRL을 품질향상 수단으로 사용하려면 기관이나 의사 개인이 자신의 업무에서 수행하는 절차 건들의 방사선량 데이터를 수집한다. 권고된 건수는 10 건부터 50 건 이상까지 다양하지만 영상안내 중재절차에서는 환자선량의 개인 변동이 크

므로 중재 투시절차에 대해서는 50 이상이 바람직하다(Wall과 Shrimpton, 1998; Vañó 등, 2008b). 그 절차의 평균선량을 DRL과 비교한다. 현지 결과가 DRL보다 큰 평균선량을 냈다면 기기를 조사해야 한다. 만약 기기가 바르게 작동하고 사양 내에 있다면 절차 프로토콜과 기술자 기술을 검사해야 한다(Vañó와 Gonzalez, 2001). 현지 값이 DRL보다 현저히 낮은 경우에도 조사가 역시 필요한데 과도하게 낮은 선량은 불량한 영상품질과 연계될 것이기 때문이다.

10.7.2. 중재 형광투시 절차에서 진단참조준위 적용

(237) 현재로서는 중재 심장학이나 전기생리학에서 선량 수준이 감소하고 있음을 지시하는 증거는 없다. 보이는 것은 형광투시 안나 절차의 복잡성이 증가함에 따른 선량 준위도 증가하는 것이다. ICRP가 적시했듯이 참조준위는 원칙적으로 중재 형광투시 절차에서도 방호최적화에 유용할 것이다(ICRP, 2007c). 그러나 중재 형광투시 절차에서 환자선량 분포는 절차 복잡성의 차이, 환자 체격 차이, 운영 모드 차이로 인해 넓은 영역에 걸쳐있고 매우 가변적이다. ICRP는 이 문제에 대한 가능한 한 접근은 절차의 상대적 '복잡도'를 반영하는 것이라고 제안한 바 있다(ICRP, 2007c). 다른 방법도 제안되어 있다(NCRP, 2010).

(238) 근래 연구는 심혈관 절차에 대한 DRL을 제시하고 있다(Veofotistou 등, 2003; Peterzol 등, 2005; Balter 등, 2008; D'Helft 등, 2009). 일부 침습적 진단 절차(예: 일상적 관상동맥 혈관조영술)는 비교적 표준화되어 충분히 많이 수행되므로 바른 DRL 값이 설정될 수 있을 것이다.

(239) 유럽 SENTINEL 컨소시엄은 관상동맥 혈관조영술과 경피경혈관관상동맥확장술(PTCA)의 두 가지 침습적 심장학 절차에 대해 환자에게 전달될 선량에 대한 참조준위를 제안했다(Padovani 등, 2008). 관상동맥 혈관조영술과 PTCA에 대해 제안된 DRL은 각각 KAP 값 45 Gy cm^2 와 85 Gy cm^2 , 형광투시 시간 6.5 분과 15 분, 프레임 수는 700과 1000이다. 컨소시엄은 절차 복잡도와 환자 체격을 고려하여 제안된 준위로부터 '공차tolerance'를 수립하기 위해서는 추가 연구가 필요하다고 결론지었다.

(240) Bernardi 등(2000)은 이태리 Udine에서, 나중에는 유럽 여러 병원(Neofotistou 등, 2003)에서 연구를 수행하여 환자의 방사선피폭과 연계하여 복잡도를 정량적으로 평가하였다. PTCA에 대해 여러 임상인자, 해부학적 인자, 기술적

인자 대 투시시간을 평가하였다. 계량체계를 개발하여 복잡도 지수 둘을 만들었고 이를 바탕으로 절차들을 단순, 보통, 복잡의 세 그룹으로 나누었다. 전형적 환자선량을 참조준위와 비교할 때는 상이한 센터에서 수행되는 절차의 상대적 복잡도를 고려하여야 한다.

(241) IAEA는 심장 도자시술과 PCI에 대해 지침준위를 수립할 가능성을 평가하기 위한 국제과제를 수행했다(IAEA, 2009). 그 IAEA 보고서는 다른 간행물(Balter 등, 2008)에 요약되어 있다. 보고서는 PTCA 절차에 대해서는 KAP을 사용한 참조준위로 간단한 절차는 120 Gy cm^2 , 보통수준 절차는 125 Gy cm^2 , 복잡한 절차는 200 Gy cm^2 를 권고한다. 불행히도 아직 전기생리학 절제술이나 심박조절기 삽식과 같은 다른 중재 심장학 절차에 대해서는 복잡도를 정량화하는 방법이 개발되지 못했다.

10.7.3. 고선량 중재 형광투시 절차의 평가

(242) 참조준위는 절차 당 평균선량을 평가하는 데 사용된다. 형광투시 안내 중재술의 특성인 선량의 대수정규분포 때문에 고선량 '꼬리'를 평가하는 데 추가 과정이 필요하다. 고선량 꼬리는 환자선량이 조직반응을 초래할 만큼 높은 경우들을 대표하므로 특별한 관심 대상이다.

(243) SRDL(제10.6절 참조)을 넘는 선량을 필요로 하는 사례는 식별하여 주기적으로 시술실 책임자와 시술실 품질관리자에게 보고해야 한다. 높이 피폭하는 환자가 적절한 교육과 추적을 받을 수 있도록 월간 보고가 적절하다.

(244) 그러한 매 절차마다 보고서는 환자식별항, 절차에서 전달된 선량, 절차 유형, 절차를 수행한 시술실, 시술자명, 환자의 이전 침습적 절차 이력(총 피부선량을 평가하는 데 필수적임), 그리고 해당 특기사항을 포함한다. 이 보고서의 목적은 높은 선량을 받는 모든 환자가 적절히 이해하고 필요한 추적이 계획되어 수행될 것임을 확신하기 위한 것이다(Miller 등, 2010a).

(245) 방사선 상해를 초래할 수 있는 사례는 차기 시술실 품질보증회의에서 논의해야 한다. 가용한 진단, 환자 추적계획 및 결과를 논의에 포함해야 한다. 상해가 방사선에 의한 것이 아님이 분명하지 않다면 적절한 방사선을 사용하는지 절차를 임상 맥락에서 검토해야 한다(Miller 등, 2010a).

10.7.4. 중재 형광투시 절차에서 피부선량 평가

(246) 방사선방호 기본원칙(예: 적절한 콜리메이션, 썬더필터 사용, 동일 피부 부위에 강한 방사선장 회피 등)이 지켜지는지 확인하기 위해 환자 표본에 대해 피부선량 분포를 측정하는 것(Vañó 등, 1997a; Guibelalde 등, 2003)과 시설에서 수행하는 절차에 대해 KAP와 피부선량 관계를 수립하는 것(IAEA, 2010)이 도움이 된다. 피부선량은 특수 필름(선량계)을 환자 피부에 직접 올려놓아 측정할 수 있고 다른 방법도 있다(Miller 등, 2012). 이 측정에는 자격 있는 의학물리사를 자문해야 한다. 머지않아 자동화된 방법으로 피부선량 평가치와 분포도를 실시간으로 얻을 수 있을 것으로 본다(Khodadadegan 등, 2010; Miller 등, 2012).

참고문헌

- Abada, H.T., Larchez, C., Daoud, B., et al., 2006. MDCT of the coronary arteries: feasibility of low-dose CT with ECG-pulsed tube current modulation to reduce radiation dose. *AJR Am. J. Roentgenol.* 186, S387-S390.
- Abdulla, J., Abildstrom, S.Z., Gotzsche, O., et al., 2007. 64-multislice detector computed tomography coronary angiography as potential alternative to conventional coronary angiography: a systematic review and meta-analysis. *Eur. Heart J.* 28, 3042-3050.
- Achenbach, S., Marwan, M., Ropers, D., et al., 2010. Coronary computed tomography angiography with a consistent dose below 1 mSv using prospectively electrocardiogram-triggered high-pitch spiral acquisition. *Eur. Heart J.* 31, 340-346.
- Acosta, R., Hoffmeister, L., Roman, R., et al., 2006. Systematic review of population-based studies of the prevalence of cataracts. *Arch. Soc. Esp. Oftalmol.* 81, 509-516.
- ACR, 1992. Proceedings of the ACR/FDA Workshop on Fluoroscopy. Strategies for Improvement in Performance, Radiation Safety and Control. American College of Radiology, Reston, VA.
- ACR, 2008. ACR Practice Guideline for Imaging Pregnant or Potentially Pregnant Adolescents and Women with Ionizing Radiation. Practice Guidelines and Technical Standards 2008. American College of Radiology, Reston, VA, pp. 23-37. Available at: <http://www.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality_safety/guidelines/dx/Pregnancy.aspx> (last accessed 11 August 2010).
- ACR, 2009. ACR-SNM-SPR Practice Guideline for the Performance of Cardiac Scintigraphy. American College of Radiology, Reston, VA. Available at: <http://www.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality_safety/guidelines/nuc_med/cardiac_scintigraphy.aspx> (last accessed 16 September 2011).
- ACR, 2010. American College of Radiology ACR Appropriateness Criteria. Clinical Condition: Chronic Chest Pain – High Probability of Coronary Artery Disease. American College of Radiology, Reston, VA. Available at: <http://www.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality_safety/app_criteria.aspx> (last accessed 2 January 2011).
- Allan, J.M., 2008. Genetic susceptibility to radiogenic cancer in humans.

- Health Phys. 95, 677-686.
- American College of Cardiology/American Heart Association Ad Hoc Task Force on Cardiac Catheterization (ACC/AHA), 1991. ACC/AHA guidelines for cardiac catheterization and cardiac catheterization laboratories. *J. Am. Coll. Cardiol.* 18, 1149-1182.
- American College of Cardiology, 1995. Use of radiographic devices by cardiologists. *J. Am. Coll. Cardiol.* 25, 1738-1739.
- Anderson, H.V., Shaw, R.E., Brindis, R.G., et al., 2002. A contemporary overview of percutaneous coronary interventions. The American College of Cardiology-National Cardiovascular Data Registry(ACC-NCDR). *J. Am. Coll. Cardiol.* 39, 1096-1103.
- Andreassi, M.G., 2009. Radiation risk from pediatric cardiac catheterization: friendly fire on children with congenital heart disease. *Circulation* 120, 1847-1849.
- Andreassi, M.G., Ait-Ali, L., Botto, N., et al., 2006. Cardiac catheterization and long-term chromosomal damage in children with congenital heart disease. *Eur. Heart J.* 27, 2703-2708.
- Bacher, K., Bogaert, E., Lapere, R., et al., 2005. Patient-specific dose and radiation risk estimation in pediatric cardiac catheterization. *Circulation* 111, 83-89.
- Balter, S., 2001a. *Interventional Fluoroscopy. Physics, Technology and Safety.* Wiley-Liss, New York.
- Balter, S., 2001b. Stray radiation in the cardiac catheterization laboratory. *Radiat. Prot. Dosimetry* 94, 183-188.
- Balter, S., Miller, D.L., Vañó, E., et al., 2008. A pilot study exploring the possibility of establishing guidance levels in x-ray directed interventional procedures. *Med. Phys.* 35, 673-680.
- Balter, S., Hopewell, J.W., Miller, D.L., et al., 2010. Fluoroscopically guided interventional procedures: a review of radiation effects on patients' skin and hair. *Radiology* 254, 326-341.
- Bernardi, G., Padovani, R., Morocutti, G., et al., 2000. Clinical and technical determinants of the complexity of percutaneous transluminal coronary angioplasty procedures: analysis in relation to radiation exposure parameters. *Catheter Cardiovasc. Interv.* 51, 1-9, discussion 10.
- Bernardi, G., Padovani, R., Morocutti, G., et al., 2001a. A method based on DIMOND quality criteria to evaluate imaging in diagnostic and

- interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 94, 167-172.
- Bernardi, G., Padovani, R., Morocutti, G., et al., 2001b. Quality criteria for cardiac images in diagnostic and interventional cardiology. *Br. J. Radiol.* 74, 852-855.
- Bernardi, G., Padovani, R., Trianni, A., et al., 2008. The effect of fellows' training in invasive cardiology on radiological exposure of patients. *Radiat. Prot. Dosimetry* 128, 72-76.
- Bhatti, P., Sigurdson, A.J., Mabuchi, K., 2008. Can low-dose radiation increase risk of cardiovascular disease? *Lancet* 372, 697-699.
- Bischoff, B., Hein, F., Meyer, T., et al., 2009. Impact of a reduced tube voltage on CT angiography and radiation dose: results of the PROTECTION I study. *JACC Cardiovasc. Imag.* 2, 940-946.
- Blettner, M., Schlehofer, B., Samkange-Zeeb, F., et al., 2007. Medical exposure to ionising radiation and the risk of brain tumours: Interphone study group, Germany. *Eur. J. Cancer* 43, 1990-1998.
- Block, M., Bove, A.A., Ritman, E.L., 1984. Coronary angiographic examination with the dynamic spatial reconstructor. *Circulation* 70, 209-216.
- Boden, W.E., O'Rourke, R.A., Teo, K.K., et al., 2007. Optimal medical therapy with or without PCI for stable coronary disease. *N. Engl. J. Med.* 356, 1503-1516.
- Bogaert, E., Bacher, K., Thierens, H., 2008. A large-scale multicentre study in Belgium of dose area product values and effective doses in interventional cardiology using contemporary x-ray equipment. *Radiat. Prot. Dosimetry* 128, 312-323.
- Bogaert, E., Bacher, K., Lemmens, K., et al., 2009. A large-scale multicentre study of patient skin doses in interventional cardiology: dose-area product action levels and dose reference levels. *Br. J. Radiol.* 82, 303-312.
- Bongartz, G., Golding, S.J., Jurik, A.G., et al., 2000. European Guidelines on Quality Criteria for Computed Tomography. EUR 16262. The European Commission's Study Group on Development of Quality Criteria for Computed Tomography. Available at: <<http://www.dr.dk/guidelines/ct/quality>> (last accessed 4 October 2012).
- Bongartz, G., Golding, S.J., Jurik, A.G., et al., 2004. CT Quality Criteria. European Commission. Available at: <http://www.msct.eu/CT_Quality_Criteria.htm> (last accessed 4 October 2012).

- Bonhoeffer, P., Boudjemline, Y., Qureshi, S.A., et al., 2002. Percutaneous insertion of the pulmonary valve. *J. Am. Coll. Cardiol.* 39, 1664-1669.
- Bor, D., Sancak, T., Toklu, T., et al., 2008. Effects of radiologists' skill and experience on patient doses in interventional examinations. *Radiat. Prot. Dosimetry* 129, 32-35.
- Bor, D., Olgar, T., Toklu, T., et al., 2009. Patient doses and dosimetric evaluations in interventional cardiology. *Phys. Med.* 25, 31-42.
- Brindis, R.G., Douglas, P.S., Hendel, R.C., et al., 2005. ACCF/ASNC appropriateness criteria for singlephoton emission computed tomography myocardial perfusion imaging (SPECT MPI): a report of the American College of Cardiology Foundation Quality Strategic Directions Committee Appropriateness Criteria Working Group and the American Society of Nuclear Cardiology endorsed by the American Heart Association. *J. Am. Coll. Cardiol.* 46, 1587-1605.
- Bryk, S.G., Censullo, M.L., Wagner, L.K., et al., 2006. Endovascular and interventional procedures in obese patients: a review of procedural technique modifications and radiation management. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 17, 27-33.
- Carozza, S.E., Wrench, M., Miike, R., et al., 2000. Occupation and adult gliomas. *Am. J. Epidemiol.* 152, 838-846.
- Chambers, C.E., Fetterly, K.A., Holzer, R., et al., 2011. Radiation safety program for the cardiac catheterization laboratory. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 77, 546-556.
- Cheng, T.O., 2004. The current state of cardiology in China. *Int. J. Cardiol.* 96, 425-439.
- Chida, K., Saito, H., Otani, H., et al., 2006. Relationship between fluoroscopic time, dose-area product, body weight, and maximum radiation skin dose in cardiac interventional procedures. *AJR Am. J. Roentgenol.* 186, 774-778.
- Chida, K., Ohno, T., Kakizaki, S., et al., 2010. Radiation dose to the pediatric cardiac catheterization and intervention patient. *Am. J. Roentgenol.* 195, 1175-1179.
- Christner, J.A., Kofler, J.M., McCollough, C.H., 2010. Estimating effective dose for CT using dose-length product compared with using organ doses: consequences of adopting International Commission on Radiological Protection Publication 103 or dual-energy scanning. *AJR Am. J. Roentgenol.* 194, 881-889.

- Ciraj-Bjelac, O., Rehani, M.M., Sim, K.H., et al., 2010. Risk for radiation induced cataract for staff in interventional cardiology: is there reason for concern? *Catheter Cardiovasc Interv.* 76, 826-834.
- Codman, E.A., 1896. The cause of burns from x-rays. *Bos. Med. Surg. J.* 136, 610-611.
- Daniel, J., 1896. The x-rays. *Science* 3, 562.
- Dauer, L.T., Williamson, M.J., St. Germain, J., et al., 2007a. Nuclear granny - reply. *J. Nucl. Cardiol.* 14, 904-905.
- Dauer, L.T., Williamson, M.J., St. Germain, J., et al., 2007b. Tl-201 stress tests and homeland security. *J. Nucl. Cardiol.* 14, 582-588.
- Dauer, L.T., Thornton, R.H., Solomon, S.B., et al., 2010a. Unprotected operator eye lens doses in oncologic interventional radiology are clinically significant: estimation from patient kerma-area-product data. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 21, 1859-1861.
- Dauer, L.T., Brooks, A.L., Hoel, D.G., et al., 2010b. Review and evaluation of updated research on the health effects associated with low-dose ionising radiation. *Radiat. Prot. Dosimetry* 140, 103-136.
- Dauer, L.T., Thornton, R.H., Miller, D.L., et al., 2012. Radiation management for interventions using fluoroscopic or computed tomographic guidance during pregnancy: a joint guideline of the Society of Interventional Radiology and the Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe with endorsement by the Canadian Interventional Radiology Association. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23, 19-32.
- Davis, W., 2006. Mapping improvements in molecular imaging. *Med. Imag.* Available at: <http://www.imagingeconomics.com/issues/articles/MI_2006-05_01.asp> (last accessed 31 December 2010).
- Dendy, P.P., 2008. Radiation risks in interventional radiology. *Br. J. Radiol.* 81, 1-7.
- DePuey, E.G., 2006. Imaging guidelines for nuclear cardiology procedures: a report of the American Society of Nuclear Cardiology Quality Assurance Committee. *J. Nucl. Cardiol.* 13, e21-e171.
- D'Helft, C.J., Brennan, P.C., McGee, A.M., et al., 2009. Potential Irish dose reference levels for cardiac interventional examinations. *Br. J. Radiol.* 82, 296-302.
- Douglas, P.S., Khandheria, B., Stainback, R.F., et al., 2008. ACCF/ASE/ACEP/AHA/ASNC/SCAI/SCCT/SCMR 2008 appropriateness

- criteria for stress echocardiography: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriateness Criteria Task Force, American Society of Echocardiography, American College of Emergency Physicians, American Heart Association, American Society of Nuclear Cardiology, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society of Cardiovascular Computed Tomography, and Society for Cardiovascular Magnetic Resonance endorsed by the Heart Rhythm Society and the Society of Critical Care Medicine. *J. Am. Coll. Cardiol.* 51, 1127-1147. Available at: <<http://content.onlinejacc.org/cgi/content/full/51/11/1127>> (last accessed 1 January 2011).
- Douglas, P.S., Carr, J.J., Cerqueira, M.D., et al., 2012. Developing an action plan for patient radiation safety in adult cardiovascular medicine: Proceedings from the Duke University Clinical Research Institute/American College of Cardiology Foundation/American Heart Association think tank held on February 28, 2011. *J. Am. Coll. Cardiol.* 59, 1833-1847.
- Dromi, S., Wood, B.J., Oberoi, J., et al., 2006. Heavy metal pad shielding during fluoroscopic interventions. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 17, 1201-1206.
- Earls, J.P., Schrack, E.C., 2009. Prospectively gated low-dose CCTA: 24 months experience in more than 2,000 clinical cases. *Int. J. Cardiovasc. Imag.* 25, 177-187.
- EC, 2000. Guidelines on Education and Training in Radiation Protection for Medical Exposures. Radiation Protection 116. European Commission, Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Luxembourg. Available at: <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/116.pdf> (last accessed 2 January 2011).
- Efstathopoulos, E., Makrygiannis, S.S., Kottou, S., et al., 2003. Medical personnel and patient dosimetry during coronary angiography and intervention. *Phys. Med. Biol.* 48, 3059-3068.
- Einstein, A.J., 2009. Medical imaging: the radiation issue. *Nat. Rev. Cardiol.* 6, 436-438.
- Einstein, A.J., Moser, K.W., Thompson, R.C., et al., 2007a. Radiation dose to patients from cardiac diagnostic imaging. *Circulation* 116, 1290-1305.
- Einstein, A.J., Henzlova, M.J., Rajagopalan, S., 2007b. Estimating risk of cancer associated with radiation exposure from 64-slice computed tomography coronary angiography. *JAMA* 298, 317-323.

- Einstein, A.J., Sanz, J., Dellegrottaglie, S., et al., 2008. Radiation dose and cancer risk estimates in 16-slice computed tomography coronary angiography. *J. Nucl. Cardiol.* 15, 232-240.
- Einstein, A.J., Elliston, C.D., Arai, A.E., et al., 2010. Radiation dose from single heartbeat coronary CT angiography performed using a 320 detector-row volume scanner. *Radiology* 254, 698-704.
- EU, 1997. Council Directive 97/43 Euratom, on health protection of individuals against the dangers of ionizing radiation in relation to medical exposure, and repealing Directive 84/466 Euratom. *Official Journal of the European Communities* L180, 22-27. Available at: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUri-Serv/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1997:180:0022:0027:EN:PDF>> (last accessed 4 October 2012).
- Faulkner, K., Werduch, A., 2008a. An estimate of the collective dose to the European population from cardiac x-ray procedures. *Br. J. Radiol.* 81, 955-962.
- Faulkner, K., Werduch, A., 2008b. Analysis of the frequency of interventional cardiology in various European countries. *Rad. Prot. Dosimetry* 129, 74-76.
- FDA, 1994. Public Health Advisory. Avoidance of Serious X-ray Induced Skin Injuries to Patients during Fluoroscopically Guided Procedures. Center for Devices and Radiological Health, US Food and Drug Administration, Rockville, MD. Available at: <<http://www.fda.gov/MedicalDevices/Safety/AlertsandNotices/PublicHealthNotifications/ucm063084.htm>> (last accessed 29 July 2010).
- Finkelstein, M.M., 1998. Is brain cancer an occupational disease of cardiologists? *Can. J. Cardiol.* 14, 1385-1388.
- Fletcher, D.W., Miller, D.L., Balter, S., et al., 2002. Comparison of four techniques to estimate radiation dose to skin during angiographic and interventional radiology procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 13, 391-397.
- Frazier, T.H., Richardson, J.B., Fabre, V.C., et al., 2007. Fluoroscopy-induced chronic radiation skin injury: a disease perhaps often overlooked. *Arch. Dermatol.* 143, 637-640.
- Gerber, T.C., Stratmann, B.P., Kuzo, R.S., et al., 2005. Effect of acquisition technique on radiation dose and image quality in multidetector row computed tomography coronary angiography with submillimeter collimation. *Invest. Radiol.* 40, 556-563.
- Gerber, T.C., Carr, J.J., Arai, A.E., et al., 2009. Ionizing radiation in

- cardiac imaging. A Science Advisory from the American Heart Association Committee on Cardiac Imaging of the Council on Clinical Cardiology and Committee on Cardiovascular Imaging and Intervention of the Council on Cardiovascular Radiology and Intervention. *Circulation* 119, 1056-1065.
- Germano, J.J., Day, G., Gregorius, D., et al., 2005. A novel radiation protection drape reduces radiation exposure during fluoroscopy guided electrophysiology procedures. *J. Invasive Cardiol.* 17, 469-472.
- Gibbons, R.J., Miller, T.D., Hodge, D., et al., 2008. Application of appropriateness criteria to stress single-photon emission computed tomography sestamibi studies and stress echocardiograms in an academic medical center. *J. Am. Coll. Cardiol.* 51, 1283-1289.
- Gibson, P.B., Demus, D., Noto, R., et al., 2002. Low event rate for stress-only perfusion imaging in patients evaluated for chest pain. *J. Am. Coll. Cardiol.* 39, 999-1004.
- Goldstein, J.A., Balter, S., Cowley, M., et al., 2004. Occupational hazards of interventional cardiologists: prevalence of orthopedic health problems in contemporary practice. *Catheter Cardiovasc. Interv.* 63, 407-411.
- Guibelalde, E., Vanó, E., Gonzalez, L., et al., 2003. Practical aspects for the evaluation of skin doses in interventional cardiology using a new slow film. *Br. J. Radiol.* 76, 332-336.
- Hall, E.J., 2009. Radiation biology for pediatric radiologists. *Pediatr. Radiol.* 39 (Suppl. 1), S57-S64.
- Hardell, L., Mild, K.H., Pa'hlon, A., et al., 2001. Ionizing radiation, cellular telephones and the risk for brain tumours. *Eur. J. Cancer Prev.* 10, 523-529.
- Hausleiter, J., Meyer, T., Hermann, F., et al., 2009. Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography. *JAMA* 301, 500-507.
- Hausleiter, J., Martinoff, S., Hadamitzky, M., et al., 2010. Image quality and radiation exposure with a low tube voltage protocol for coronary CT angiography. Results of the PROTECTION II Trial. *JACC Cardiovasc. Imaging* 3, 1113-1123.
- Hendel, R.C., Berman, D.S., Di, C.M.F., et al., 2009a. ACCF/ASNC/ACR/AHA/ASE/SCCT/SCMR/SNM 2009 appropriate use criteria for cardiac radionuclide imaging: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the American Society of Nuclear Cardiology, the American College of Radiology, the

- American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, and the Society of Nuclear Medicine. *Circulation* 119, 561-587.
- Hendel, R.C., Berman, D.S., Di, C.M.F., et al., 2009b. ACCF/ASNC/ACR/AHA/ASE/SCCT/SCMR/SNM 2009 appropriate use criteria for cardiac radionuclide imaging: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the American Society of Nuclear Cardiology, the American College of Radiology, the American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, and the Society of Nuclear Medicine. *J. Am. Coll. Cardiol.* 53, 2201-2229.
- Hendel, R.C., Cerqueira, M., Douglas, P.S., et al., 2010. A multicenter assessment of the use of singlephoton emission computed tomography myocardial perfusion imaging with appropriateness criteria. *J. Am. Coll. Cardiol.* 55, 156-162.
- Henzlova, M.J., Cerqueira, M.D., Hansen, C.L., et al., 2009. ASNC Imaging Guidelines for Nuclear Cardiology Procedures. Stress Protocols and Tracers. American Society of Nuclear Cardiology, Bethesda, Maryland. Available at: <<http://www.asnc.org/imageuploads/ImagingGuidelinesStressProtocols021109.pdf>> (last accessed 2 January 2011).
- Hernanz-Schulman, M., Goske, M.J., Bercha, I.H., et al., 2011. Pause and pulse: ten steps that help manage radiation dose during pediatric fluoroscopy. *AJR Am. J. Roentgenol.* 197, 475-481.
- Herold, D.M., Hanlon, A.L., Hanks, G.E., 1999. Diabetes mellitus: a predictor for late radiation morbidity. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 43, 475-479.
- Hesse, B., Tagil, K., Cuocolo, A., et al., 2005. EANM/ESC procedural guidelines for myocardial perfusion imaging in nuclear cardiology. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 32, 855-897. Available at: <http://www.eanm.org/scientific_info/guidelines/gl_cardio_myocard_per f.pdf> (last accessed 1 January 2011).
- Hidajat, N., Wust, P., Felix, R., et al., 2006. Radiation exposure to patient and staff in hepatic chemoembolization: risk estimation of cancer and deterministic effects. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 29, 791-796.
- Hirshfeld Jr., J.W., Balter, S., Brinker, J.A., et al., 2004. ACCF/AHA/HRS/SCAI clinical competence statement on physician knowledge to optimize patient safety and image quality in

- fluoroscopically guided invasive cardiovascular procedures: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association/American College of Physicians Task Force on Clinical Competence and Training. *J. Am. Coll. Cardiol.* 44, 2259-2282.
- Hirshfeld Jr., J.W., Balter, S., Brinker, J.A., et al., 2005. ACCF/AHA/HRS/ AI clinical competence statement on physician knowledge to optimize patient safety and image quality in fluoroscopically guided invasive cardiovascular procedures: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association/American College of Physicians Task Force on Clinical Competence and Training. *Circulation* 111, 511-532.
- Hounsfield, G.N., 1979. Computed Medical Imaging. Available at: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1979/hounsfield-lecture.pdf> (last accessed 4 October 2012).
- Huang, B., Li, J., Law, M.W., et al., 2010. Radiation dose and cancer risk in retrospectively and prospectively ECG-gated coronary angiography using 64-slice multidetector CT. *Br. J. Radiol.* 83, 152-158.
- Hunter, C., Ziadi, M., Etele, J., et al., 2010. New effective dose estimates for rubidium-82 based on dynamic PET/CT imaging in humans. *J. Nucl. Med.* 51 (Suppl. 2), 1429. Available at: <http://jnumedmtg.snmjournals.org/cgi/content/meeting_abstract/51/2_MeetingAbstracts/1429> (last accessed 2 January 2011).
- Hymes, S.R., Strom, E.A., Fife, C., 2006. Radiation dermdermatitis: clinical presentation, pathophysiology, and treatment. *J. Am. Acad. Dermatol.* 54, 28-46.
- IAEA, 1996. International Basic Safety Standards against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2001. Training in Radiation Protection and the Safe Use of Radiation Sources. Safety Report Series No. 20. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2009. Establishing Guidance Levels in X-ray Guided Medical Interventional Procedures: a Pilot Study. Safety Reports Series No. 59. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2010. Patient Dose Optimization in Fluoroscopically Guided Interventional Procedures. IAEA TECDOC-1641. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann.

- ICRP 1(3).
- ICRP, 1979. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30 (Part 1). Ann. ICRP 2(3/4).
- ICRP, 1988. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53. Ann. ICRP 18(1-4).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1996. Radiological protection and safety in medicine. ICRP Publication 73. Ann. ICRP 26(2).
- ICRP, 1998. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals (Addendum to ICRP Publication 53). ICRP Publication 80. Ann. ICRP 28(3).
- ICRP, 2000a. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84. Ann. ICRP 30(1).
- ICRP, 2000b. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85. Ann. ICRP 30(2).
- ICRP, 2000c. Managing patient dose in computed tomography. ICRP Publication 87. Ann. ICRP 30(4).
- ICRP, 2001. Radiation and your patient - a guide for medical practitioners. ICRP Supporting Guidance 2. Ann. ICRP 31(4).
- ICRP, 2007a. Managing patient dose in multi-detector computed tomography (MDCT). ICRP Publication 102. Ann. ICRP 37(1).
- ICRP, 2007b. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
- ICRP, 2007c. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. Ann. ICRP 37(6).
- ICRP, 2008. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals - Addendum 3 to ICRP Publication 53. ICRP Publication 106. Ann. ICRP 38(1/2).
- ICRP, 2009. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP Publication 113. Ann. ICRP 39(5).
- ICRP, 2010. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures outside the imaging department. ICRP Publication 117. Ann. ICRP 40(6).

- ICRP, 2011. Statement on Tissue Reactions. ICRP. Seoul, Korea. Available at: <<http://www.icrp.org/docs/ICRP%20Statement%20on%20Tissue%20Reactions.pdf>> (last accessed 9 May 2011).
- ICRP, 2012. ICRP statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissues and organs - threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2).
- ICRP, forthcoming. Radiological protection in pediatric and diagnostic interventional radiology. ICRP Publication 121. Ann. ICRP.
- ICRU, 2005. Patient dosimetry for X rays used in medical imaging. ICRU Report 74. J. ICRU 5, 1-113.
- IEC, 1993. Medical Electrical Equipment. Part 1-61223. Evaluation and Routine Testing in Medical Imaging Departments. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2000. Medical Electrical Equipment. Part 2-43. Particular Requirements for the Safety of X-ray Equipment for Interventional Procedures. IEC 60601-2-43. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2004. Medical Electrical Equipment. Technical Report 60788. Glossary of Defined Terms. IEC TR 60788, second ed. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2009. Medical Electrical Equipment. Part 2-44. Particular Requirements for the Safety of X-ray Equipment for Computed Tomography. International Standard IEC 60601-2-44, third ed. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2010. Medical Electrical Equipment. Part 2-43: Particular Requirements for the Safety of X-ray Equipment for Interventional Procedures. IEC 60601-2-43, second ed. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- Jakobs, T.F., Becker, C.R., Ohnesorge, B., et al., 2002. Multislice helical CT of the heart with retrospective ECG gating: reduction of radiation exposure by ECG-controlled tube current modulation. Eur. Radiol. 12, 1081-1086.
- Justino, H., 2006. The ALARA concept in pediatric cardiac catheterization: techniques and tactics for managing radiation dose. Pediatr. Radiol. 36, 146-153.
- Kahn, H.A., Liebowitz, H.M., Ganley, J.P., et al., 1977. The Framingham

- Eye Study. I. Outline and major prevalence findings. *Am. J. Epidemiol.* 106, 17-32.
- Karipidis, K.K., Benke, G., Sim, M.R., et al., 2007. Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and the risk of glioma. *Occup. Med. (Lond.)* 57, 518-524.
- Khodadadegan, Y., Zhang, M., Pavlicek, W., et al., 2010. Automatic monitoring of localized skin dose with fluoroscopic and interventional procedures. *J. Digit. Imaging* 24, 626-639.
- Kim, K.P., Miller, D.L., Balter, S., et al., 2008. Occupational radiation doses to operators performing cardiac catheterization procedures. *Health Phys.* 94, 211-227.
- Kim, K.P., Miller, D.L., 2009. Minimising radiation exposure to physicians performing fluoroscopically guided cardiac catheterisation procedures: a review. *Radiat. Prot. Dosimetry* 133, 227-233.
- Kim, K.P., Einstein, A.J., Berrington de Gonzalez, A., 2009. Coronary artery calcification screening: estimated radiation dose and cancer risk. *Arch. Intern. Med.* 169, 1188-1194.
- Kim, C., Vasaiwala, S., Haque, F., Pratap, K., Vidovich, M.I., 2010. Radiation safety among cardiology fellows. *Am. J. Cardiol.* 106, 125-128.
- King, J.N., Champlin, A.M., Kelsey, C.A., et al., 2002. Using a sterile disposable protective surgical drape for reduction of radiation exposure to interventionalists. *AJR Am. J. Roentgenol.* 178, 153-157.
- Kleiman, N.J., 2007. Radiation Cataract. Working Party on Research Implications on Health and Safety Standards of the Article 31 Group of Experts. Radiation Protection 145 EU Scientific Seminar 2006. New Insights in Radiation Risk and Basic Safety Standards. European Commission, Brussels, pp. 81-95. Available at: <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/publication/doc/145_en.pdf> (last accessed 28 July 2010).
- Klein, L.W., Miller, D.L., Balter, S., et al., 2009. Occupational health hazards in the interventional laboratory: time for a safer environment. *Heart Rhythm* 6, 439-444.
- Koenig, T.R., Wolff, D., Mettler, F.A., et al., 2001a. Skin injuries from fluoroscopically guided procedures. Part 1. Characteristics of radiation injury. *AJR Am. J. Roentgenol.* 177, 3-11.
- Koenig, T.R., Mettler, F.A., Wagner, L.K., 2001b. Skin injuries from fluoroscopically guided procedures. Part 2. Review of 73 cases and

- recommendations for minimizing dose delivered to patient. *AJR Am. J. Roentgenol.* 177, 13-20.
- Kuon, E., Schmitt, M., Dahm, J.B., 2002. Significant reduction of radiation exposure to operator and staff during cardiac interventions by analysis of radiation leakage and improved lead shielding. *Am. J. Cardiol.* 89, 44-49.
- Kuon, E., Birkel, J., Schmitt, M., et al., 2003. Radiation exposure benefit of a lead cap in invasive cardiology. *Heart* 89, 1205-1210.
- Kuon, E., Dahm, J., Empen, K., et al., 2004. Identification of less-irradiating tube angulations in invasive cardiology. *J. Am. Coll. Cardiol.* 44, 1420-1428.
- Laskey, W.K., Kimmel, S., Krone, R.J., 2000. Contemporary trends in coronary intervention: a report from the Registry of the Society for Cardiac Angiography and Interventions. *Cathet. Cardiovasc. Intervent.* 49, 19-22.
- Laskey, W.K., Williams, D.O., Vlachos, H.A., et al., 2001. Changes in the practice of percutaneous coronary intervention: a comparison of enrollment waves in the National Heart, Lung, and Blood Institute (NHLBI) Dynamic Registry. *Am. J. Cardiol.* 87, 964-969.
- Levi, D.S., Alejos, J.C., Moore, J.W., 2003. Future of interventional cardiology in pediatrics. *Curr. Opin. Cardiol.* 18, 79-90.
- Limacher, M.C., Douglas, P.S., Germano, G., et al., 1998. ACC expert consensus document. Radiation safety in the practice of cardiology. *J. Am. Coll. Cardiol.* 31, 892-913.
- Linnet, M.S., Slovis, T.L., Miller, D.L., et al., 2012. Cancer risks associated with external radiation from diagnostic imaging procedures. *CA Cancer J. Clin.* 62, 75-100.
- Loevinger, R., Budinger, T., Watson, E., 1988. *MIRD Primer for Absorbed Dose Calculations.* Society of Nuclear Medicine, New York.
- Lundberg, T.M., Gray, P.J., Bartlett, M.L., 2002. Measuring and minimizing the radiation dose to nuclear medicine technologists. *J. Nucl. Med. Technol.* 30, 25-30.
- Maeder, M., Verdun, F.R., Stauffer, J.C., et al., 2005. Radiation exposure and radiation protection in interventional cardiology. *Kardiovaskuläre Medizin.* 8, 124-132.
- Maeder, M., Brunner-La Rocca, H.P., Wolber, T., et al., 2006. Impact of a lead glass screen on scatter radiation to eyes and hands in

- interventional cardiologists. *Catheter Cardiovasc. Interv.* 67, 18-23.
- Mahmarian, J.J., 2010. Stress only myocardial perfusion imaging: is it time for a change? *J. Nucl. Cardiol.* 17, 529-535.
- Martin, C.J., 2009. A review of radiology staff doses and dose monitoring requirements. *Radiat. Prot. Dosimetry* 136, 140-157.
- Martinez, L.C., Vañó, E., Gutierrez, F., et al., 2007. Patient doses from fluoroscopically guided cardiac procedures in pediatrics. *Phys. Med. Biol.* 52, 4749-4759.
- MARTIR (Multimedia and Audiovisual Radiation Protection Training in Interventional Radiology), 2002. CD-ROM. Radiation Protection 119. European Commission. Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Luxembourg. Available at: <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/publications_en.htm> (last accessed 4 October 2012).
- Matanoski, G.M., Seltser, R., Sartwell, P.E., et al., 1975. The current mortality rates of radiologists and other physician specialists: specific causes of death. *Am. J. Epidemiol.* 101, 199-210.
- McCullough, C.H., 2008. CT dose: how to measure, how to reduce. *Health Phys.* 95, 508-517.
- McCullough, C.H., Schueler, B.A., Atwell, T.D., et al., 2007. Radiation exposure and pregnancy: when should we be concerned? *Radiographics* 27, 909-918.
- McCormick, V.A., Schultz, C.C., Hollingsworth-Schuler, V., et al., 2002. Reducing radiation dose in the cardiac catheterization laboratory by design alterations and staff education. *Am. J. Cardiol.* 90, 903-905.
- McFadden, S.L., Mooney, R.B., Shepherd, P.H., 2002. X-ray dose and associated risks from radiofrequency catheter ablation procedures. *Br. J. Radiol.* 75, 253-265.
- McGale, P., Darby, S.C., 2008. Commentary: a dose-response relationship for radiation-induced heart disease - current issues and future prospects. *Int. J. Epidemiol.* 37, 518-523.
- McGeoghegan, D., Binks, K., Gillies, M., et al., 2008. The non-cancer mortality experience of male workers at British Nuclear Fuels plc, 1946-2005. *Int. J. Epidemiol.* 37, 506-518.
- Meier, B., 2010. Cardiac Catheterization Interventions: European Statistics 2007/2008. Presented at Euro PCR, Paris, France. May 25-28, 2010. Available at: <<http://www.escardio.org/communities/EAPCI/Documents>>

/Cardiac-catheterization-Interventions-stats07-08-EAPCI-Assembly-may 2010.pdf> (last accessed 22 February 2011).

- Miller, D.L., 2008. Overview of contemporary interventional fluoroscopy procedures. *Health Phys.* 95, 638-644.
- Miller, D.L., Balter, S., Noonan, P.T., et al., 2002. Minimizing radiation-induced skin injury in interventional radiology procedures. *Radiology* 225, 329-336.
- Miller, D.L., Balter, S., Schueler, B.A., et al., 2010a. Clinical radiation management for fluoroscopically guided interventional procedures. *Radiology* 257, 321-332.
- Miller, D.L., Vañó, E., Bartal, G., et al., 2010b. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology. *Cardiovasc. Interv. Radiol.* 33, 230-239.
- Miller, J.A., Raichlin, E., Williamson, E.E., et al., 2010c. Evaluation of coronary CTA appropriateness criteria in an academic medical center. *J. Am. Coll. Radiol.* 7, 125-131.
- Miller, D.L., Balter, S., Dixon, R.G., et al., 2012. Quality improvement guidelines for recording patient radiation dose in the medical record for fluoroscopically guided procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23, 11-18.
- Monaco, J.L., Bowen, K., Tadros, P.N., et al., 2003. Iatrogenic deep musculoskeletal radiation injury following percutaneous coronary intervention. *J. Invasive Cardiol.* 15, 451-453.
- Mond, H.G., Irwin, M., Morillo, C., et al., 2004. The world survey of cardiac pacing and cardioverter defibrillators: calendar year 2001. *Pacing Clin. Electrophysiol.* 27, 955-964.
- Moore, W.E., Ferguson, G., Rohrmann, C., 1980. Physical factors determining the utility of radiation safety glasses. *Med. Phys.* 7, 8-12.
- Moran, A., Gu, D., Zhao, D., et al., 2010. Future cardiovascular disease in China: Markov model and risk factor scenario projections from the coronary heart disease policy model - China. *Circ. Cardiovasc. Qual. Outcomes* 3, 243-252.
- Morin, R.L., Gerber, T.C., McCollough, C.H., 2003. Radiation dose in computed tomography of the heart. *Circulation* 107, 917-922.
- Moss, A.J., Zareba, W., Hall, W.J., et al., 2002. Prophylactic implantation

- of a defibrillator in patients with myocardial infarction and reduced ejection fraction. *N. Engl. J. Med.* 346, 877-883.
- NCI, 2005. *Interventional Fluoroscopy: Reducing Radiation Risks for Patients and Staff*. NIH Publication No. 05-5286. National Cancer Institute, Bethesda, MD. Available at: <<http://www.cancer.gov/images/Documents/45bae965-697a-4de8-9dae-b77222e0e79d/InterventionalFluor.pdf>> (last accessed 1 January 2011).
- NCRP, 1993. *Limitation of Exposure to Ionizing Radiation*. NCRP Report No. 116. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 1995. *Use of Personal Monitors to Estimate Effective Dose Equivalent and Effective Dose to Workers for External Exposure to Low-LET Radiation*. NCRP Report No. 122. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2000. *Radiation Protection for Procedures Performed Outside the Radiology Department*. NCRP Report No. 133. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2009. *Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States*. NCRP Report No. 160. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2010. *Radiation Dose Management for Fluoroscopically Guided Interventional Medical Procedures*. NCRP Report No. 168. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Neofotistou, V., Vañó, E., Padovani, R., et al., 2003. Preliminary reference levels in interventional cardiology. *Eur. Radiol.* 13, 2259-2263.
- NHS, 1993. *What do we mean by appropriate health care? Report of a working group prepared for the Director of Research and Development of the NHS Management Executive*. *Qual. Health Care* 2, 117-123.
- NRC, 2006. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR-VII Phase 2*. National Academy Press, Washington, DC.
- Ortiz, P., Vañó, E., Padovani, R., et al., 2004. Influence of the Interventional Equipment Performance on Patient Dose and Image Quality. Results of a Survey under the IAEA International Action Plan for the Radiological Protection of Patients. ECR (European Congress of Radiology), Vienna.
- Padovani, R., Rodella, C.A., 2001. Staff dosimetry in interventional

- cardiology. Radiat. Prot. Dosimetry 94, 99-103.
- Padovani, R., Bernardi, G., Quai, E., et al., 2005. Retrospective evaluation of occurrence of skin injuries in interventional cardiac procedures. Radiat. Prot. Dosimetry 117, 247-250.
- Padovani, R., Vañó, E., Trianni, et al., 2008. Reference levels at European level for cardiac interventional procedures. Radiat. Prot. Dosimetry 129, 104-107.
- Padovani, R., Le Heron, J., Cruz-Suarez, R., et al., 2011. International project on individual monitoring and radiation exposure levels in interventional cardiology. Radiat. Prot. Dosimetry 144, 437-441.
- Pages, J., 2000. Effective dose and dose to the crystalline lens during angiographic procedures. JBR-BTR: Organe de la Societe Royale Belge de Radiologie 83, 108-110.
- Pasciak, A.S., Jones, A.K., 2011. Does 'spreading' skin dose by rotating the C-arm during an intervention work? J. Vasc. Interv. Radiol. 22, 443-452.
- Patel, M.R., Spertus, J.A., Brindis, R.G., et al., 2005. ACCF proposed method for evaluating the appropriateness of cardiovascular imaging. J. Am. Coll. Cardiol. 46, 1606-1613.
- Patel, M.R., Dehmer, G.J., Hirshfeld, J.W., et al., 2009. ACCF/SCAI/STS/AATS/AHA/ASNC 2009 appropriateness criteria for coronary revascularization: a report by the American College of Cardiology Foundation Appropriateness Criteria Task Force, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society of Thoracic Surgeons, American Association for Thoracic Surgery, American Heart Association, and the American Society of Nuclear Cardiology Endorsed by the American Society of Echocardiography, the Heart Failure Society of America, and the Society of Cardiovascular Computed Tomography. J. Am. Coll. Cardiol. 53, 530-553. Available at: <http://content.onlinejacc.org/cgi/content/full/53/6/530> (last accessed 1 January 2011).
- Patton, J.A., Slomka, P.J., Germano, G., et al., 2007. Recent technologic advances in nuclear cardiology. J. Nucl. Cardiol. 14, 501-513.
- Peterzol, A., Quai, E., Padovani, R., et al., 2005. Reference levels in PTCA as a function of procedure complexity. Radiat. Prot. Dosimetry 117, 54-58.
- Preston, D.L., Ron, E., Yonehara, S., et al., 2002. Tumors of the nervous system and pituitary gland associated with atomic bomb radiation

- exposure. *J. Natl. Cancer Inst.* 94, 1555-1563.
- Preston, D.L., Ron, E., Tokuoka, S., et al., 2007. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat. Res.* 168, 1-64.
- Raff, G.L., Chinnaiyan, K.M., Share, D.A., et al., 2009. Radiation dose from cardiac computed tomography before and after implementation of radiation dose-reduction techniques. *JAMA* 301, 2340-2348.
- RCR, 2007. *Making the Best Use of Clinical Radiology Services: Referral Guidelines*, sixth ed. Royal College of Radiologists, London.
- Rehani, M.M., 2007. Training of interventional cardiologists in radiation protection - the IAEA's initiatives. *Int. J. Cardiol.* 114, 256-260.
- Rehani, M.M., Ortiz-Lopez, P., 2006. Radiation effects in fluoroscopically guided cardiac interventions - keeping them under control. *Int. J. Cardiol.* 109, 147-151.
- Renaud, L., 1992. A 5-y follow-up of the radiation exposure to in-room personnel during cardiac catheterization. *Health Phys.* 62, 10-15.
- Rice, M.J., McDonald, R.W., Li, X., et al., 2002. New technology and methodologies for intraoperative, perioperative, and intraprocedural monitoring of surgical and catheter interventions for congenital heart disease. *Echocardiography* 19, 725-734.
- Roedler, H.D., 1981. Accuracy of Internal Dose Calculations with Special Consideration of Radiopharmaceutical Biokinetics, Third International Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium, HHS Publication FDA 81-8166. Department of Health and Human Welfare, Bureau of Radiological Health, Rockville, MD.
- Rosenthal, L.S., Mahesh, M., Beck, T.J., et al., 1998. Predictors of fluoroscopy time and estimated radiation exposure during radiofrequency catheter ablation procedures. *Am. J. Cardiol.* 82, 451-458.
- Salukhe, T.V., Dimopoulos, K., Francis, D., 2004. Cardiac resynchronisation may reduce all-cause mortality: meta-analysis of preliminary COMPANION data with CONTAK-CD, InSync ICD, MIRACLE and MUSTIC. *Int. J. Cardiol.* 93, 101-103.
- Sanz, J., Rius, T., Kuschnir, P., et al., 2005. The importance of end-systole for optimal reconstruction protocol of coronary angiography with 16-slice multidetector computed tomography. *Invest. Radiol.* 40, 155-163.
- Sawdy, J.M., Gocha, M.D., Olshove, V., et al., 2009. Radiation protection

- during hybrid procedures: innovation creates new challenges. *J. Invasive Cardiol.* 21, 437-440.
- Schroeder, S., Achenbach, S., Bengel, F., et al., 2008. Cardiac computed tomography: indications, applications, limitations, and training requirements: report of a Writing Group deployed by the Working Group on Nuclear Cardiology and Cardiac CT of the European Society of Cardiology and the European Council of Nuclear Cardiology. *Eur. Heart J.* 29, 531-556.
- Schueler, B.A., Vrieze, T.J., Bjarnason, H., et al., 2006. An investigation of operator exposure in interventional radiology. *RadioGraphics* 26, 1533-1541.
- Schueler, B.A., Sturchio, G., Landsworth, R., et al., 2009. Does new lightweight leaded eyewear provide adequate radiation protection for fluoroscopists? *Med. Phys.* 36, 2747-2748.
- Senthamizhchelvan, S., Bravo, P.E., Esaias, C., et al., 2010. Human biodistribution and radiation dosimetry of ^{82}Rb . *J. Nucl. Med.* 51, 1592-1599.
- Shack, R.B., Lynch, J.B., 1987. Radiation dermatitis. *Clin. Plast. Surg.* 14, 391-401.
- Shimizu, Y., Kodama, K., Nishi, N., et al., 2010. Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003. *BMJ* 340, b5349.
- Shope, T.B., 1996. Radiation-induced skin injuries from fluoroscopy. *Radiographics* 16, 1195-1199.
- Shore, R.E., Moseson, M., Xue, X., et al., 2002. Skin cancer after x-ray treatment for scalp ringworm. *Radiat. Res.* 157, 410-418.
- Shore, R.E., Neriishi, K., Nakashima, E., 2010. Epidemiological studies of cataract risk at low to moderate radiation doses: (not) seeing is believing. *Radiat. Res.* 174, 889-894.
- Sidhu, M.K., Goske, M.J., Coley, B.J., et al., 2009. Image gently, step lightly: increasing radiation dose awareness in pediatric interventions through an international social marketing campaign. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 20, 1115-1119.
- Sistrom, C.L., 2008. In support of the ACR appropriateness criteria. *J. Am. Coll. Radiol.* 5, 630-635.
- Smart, R., 2004. Task-specific monitoring of nuclear medicine technologists' radiation exposure. *Radiat. Prot. Dosimetry* 109, 201-

209.

- Smith-Bindman, R., Lipson, J., Marcus, R., et al., 2009. Radiation dose associated with common computed tomography examinations and the associated lifetime attributable risk of cancer. *Arch. Intern. Med.* 169, 2078-2086.
- Stabin, M., 2006. Nuclear medicine dosimetry. *Phys. Med. Biol.* 51, R187-R202.
- Stabin, M.G., 2008a. Uncertainties in internal dose calculations for radiopharmaceuticals. *J. Nucl. Med.* 49, 853-860.
- Stabin, M.G., 2008b. Radiopharmaceuticals for nuclear cardiology: radiation dosimetry, uncertainties, and risk. *J. Nucl. Med.* 49, 1555-1563.
- Stabin, M.G., 2010. Proposed revision to the radiation dosimetry of ⁸²Rb. *Health Phys.* 99, 811-813.
- Stabin, M., Siegel, J., Hunt, J., et al., 2001. RADAR: the radiation dose assessment resource - an online source of dose information for nuclear medicine and occupational radiation safety. *J. Nucl. Med.* 42 (Suppl.), 243.
- Stecker, M.S., Balter, S., Towbin, R.B., et al., 2009. Guidelines for patient radiation dose management. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 20, S263-S273.
- Stern, S.H., Renaud, L., Zankl, M., 1995. Handbook of Selected Tissue Doses for Fluoroscopic and Cineangiographic Examination of the Coronary Arteries (in SI Units). HHS Publication FDA 95-8288. Food and Drug Administration, Rockville, MD.
- Stifter, E., Sacu, S., Thaler, A., et al., 2006. Contrast acuity in cataracts of different morphology and association to self-reported visual function. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 47, 5412-5422.
- Stratakis, J., Damilakis, J., Hatzidakis, A., et al., 2006. Occupational radiation exposure from fluoroscopically guided percutaneous transhepatic biliary procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 17, 863-871.
- Sun, Z., Ng, K.H., 2011. Prospective versus retrospective ECG-gated multislice CT coronary angiography: a systematic review of radiation dose and diagnostic accuracy. *Eur. J. Radiol.* 81, e94-100.
- Suzuki, S., Furui, S., Isshiki, T., et al., 2008. Patients' skin dose during percutaneous coronary intervention for chronic total occlusion. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 71, 160-164.
- Taylor, A.J., Cerqueira, M., Hodgson, J.M., et al., 2010.

- ACCF/SCCT/ACR/AHA/ASE/ASNC/NASCI/SCAI/SCMR 2010 appropriate use criteria for cardiac computed tomography: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the American College of Radiology, the American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the American Society of Nuclear Cardiology, the North American Society for Cardiovascular Imaging, the Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. *J. Am. Coll. Cardiol.* 56, 1864-1894. Available at: <<http://content.onlinejacc.org/cgi/content/full/56/22/1864>> (last accessed 1 January 2011).
- Thornton, R.H., Dauer, L.T., Altamirano, J.P., et al., 2010. Comparing strategies for operator eye protection in the interventional radiology suite. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 21, 1703-1707.
- Togni, M., Balmer, F., Pfiffner, D., et al., Group Interventional Cardiology and Coronary Pathophysiology of the European Society of Cardiology, 2004. Percutaneous coronary interventions in Europe 1992-2001. *Eur. Heart J.* 25, 1208-1213.
- Tsapaki, V., Kottou, S., Vañó, E., et al., 2004. Occupational dose constraints in interventional cardiology procedures: the DIMOND approach. *Phys. Med. Biol.* 49, 997-1005.
- Tsapaki, V., Ahmed, N.A., AlSuwaidi, J.S., et al., 2009. Radiation exposure to patients during interventional procedures in 20 countries: initial IAEA project results. *AJR Am. J. Roentgenol.* 193, 559-569.
- Turreson, I., Notter, G., 1986. The predictive value of skin telangiectasia for late radiation effect in different normal tissues. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 12, 603-609.
- UNSCEAR, 1993. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation: Volume I, Sources: Annex D, Medical Radiation Exposure. Report to the General Assembly. United Nations, New York. Available at: <http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html> (last accessed 31 December 2010).
- UNSCEAR, 2008. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York.

- UNSCEAR, 2010. Sources of Ionizing Radiation: Volume I. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York. Available at: <http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html> (last accessed 31 December 2010).
- Vañó , E., 2003. Radiation exposure to cardiologists: how it could be reduced. *Heart* 89, 1123-1124.
- Vañó, E., Gonzalez, L., 2001. Approaches to establishing reference levels in interventional radiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 94, 109-112.
- Vañó, E., Guibelalde, E., Fernandez, J.M., et al., 1997a. Patient dosimetry in interventional radiology using slow films. *Br. J. Radiol.* 70, 195-200.
- Vañó , E., Gonzalez, L., Faulkner, K., et al., 1997b. Specific Training Objectives in Radiation Protection for Medical Staff in Interventional Radiology Installations. Draft document. DIMOND European Concerted Action.
- Vañó, E., Arranz, L., Sastre, J.M., et al., 1998a. Dosimetric and radiation protection considerations based on some cases of patient skin injuries in interventional cardiology. *Br. J. Radiol.* 71, 510-516.
- Vañó, E., González, L., Beneytez, F., et al., 1998b. Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimised interventional radiology laboratories. *Br. J. Radiol.* 71, 728-733.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Guibelalde, E., et al., 1998c. Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology. *Br. J. Radiol.* 71, 954-960.
- Vañó, E., Goicolea, J., Galvan, C., et al., 2001a. Skin radiation injuries in patients following repeated coronary angioplasty procedures. *Br. J. Radiol.* 74, 1023-1031.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Canis, M., et al., 2003. Training in radiological protection for interventionalists. Initial Spanish experience. *Br. J. Radiol.* 76, 217-219.
- Vañó, E., Gonzalez, L., 2005. Accreditation in radiation protection for cardiologists and interventionalists. *Radiat. Prot. Dosimetry* 117, 69-73.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Fernandez, J.M., et al., 2006a. Occupational radiation doses in interventional cardiology: a 15 year follow-up. *Br. J. Radiol.* 79, 383-388.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Fernandez, J.M., et al., 2006b. Influence of patient thickness and operation modes on occupational and patient doses in

- interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 118, 325-330.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Fernandez, M., et al., 2008a. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted. *Radiology* 248, 945-953.
- Vañó, E., Jaärvinen, H., Kosunen, A., et al., 2008b. Patient dose in interventional radiology: a European survey. *Radiat. Prot. Dosimetry* 129, 39-45.
- Vañó, E., Kleiman, N.J., Duran, A., et al., 2010. Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. *Radiat. Res.* 174, 490-495.
- Vliestra, R.E., Wagner, L.K., Koenig, T., et al., 2004. Radiation burns as a severe complication of fluoroscopically guided cardiological interventions. *J. Interv. Cardiol.* 17, 131-142.
- von Ballmoos, M.W., Haring, B., Juillerat, P., et al., 2011. Meta-analysis: diagnostic performance of lowradiation-dose coronary computed tomography angiography. *Ann. Intern. Med.* 154, 413-420.
- von Boetticher, H., Lachmund, J., Hoffmann, W., 2009. Cardiac catheterization: impact of face and neck shielding on new estimates of effective dose. *Health Phys.* 97, 622-627.
- Wagner, L.K., Mulhern, O.R., 1996. Radiation-attenuating surgical gloves: effects of scatter and secondary electron production. *Radiology* 200, 45-48.
- Wagner, L.K., McNesse, M.D., Marx, M.V., et al., 1999. Severe skin reactions from interventional fluoroscopy: case report and review of literature. *Radiology* 213, 773-776.
- Wagner, L.K., Archer, B.R., 1997. *Minimizing Risks from Fluoroscopic Radiation*, fourth ed. R.M. Partnership, The Woodlands, TX.
- Wagner, L.K., Archer, B.R., Cohen, A.M., 2000. Management of patient skin dose in fluoroscopically guided interventional procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 11, 23-33.
- Wagner, L.K., Archer, B.R., 2004. *Minimizing Risks from Fluoroscopic X-rays: Bioeffects, Instrumentation, and Examination*, fourth ed. The Woodlands, TX.
- Wagner, L.K., 2007. Radiation injury is a potentially serious complication to fluoroscopically-guided complex interventions. *Biomed. Imag. Intervent. J.* 3, e22. Available at: <<http://www.bijj.org/2007/2/e22/>> (last accessed 9 August 2010).
- Wall, B.F., Shrimpton, P.C., 1998. The historical development of reference

- doses in diagnostic radiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 80, 15-19.
- Wang, J.X., Zhang, L.A., Li, B.X., et al., 2002. Cancer incidence and risk estimation among medical x-ray workers in China, 1950-1955. *Health Phys.* 82, 455-466.
- Weigold, W.G., Abbara, S., Achenbach, S., et al., 2011. Standardized medical terminology for cardiac computed tomography: a report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography. *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* 5, 136-144.
- Wenzl, T.B., 2005. Increased brain cancer risk in physicians with high radiation exposure. *Radiology* 235, 709-710, author reply 710-711.
- Whitby, M., Martin, C.J., 2005. A study of the distribution of dose across the hands of interventional radiologists and cardiologists. *Br. J. Radiol.* 78, 219-229.
- WHO, 1982. *Quality Assurance in Diagnostic Radiology*. World Health Organization, Geneva.
- WHO, 2000. *Efficacy and Radiation Safety in Interventional Radiology*. World Health Organization, Geneva.
- Wolk, M.J., Peterson, E., Brindis, R., et al., 2004. President's page: the appropriate cardiologist: responsible stewardship in a golden era of cardiology. *J. Am. Coll. Cardiol.* 44, 933-935.
- Worgul, B.V., Kundiyevev, Y.I., Sergiyenko, N.M., et al., 2007. Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures. *Radiat. Res.* 167, 233-243.
- Yonehara, S., Brenner, A.V., Kishikawa, M., et al., 2004. Clinical and epidemiologic characteristics of first primary tumors of the central nervous system and related organs among atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki, 1958-1995. *Cancer* 101, 1644-1654.
- Zanchetta, M., Maiolino, P., 2004. Intracardiac echocardiography. Do we need a new ultrasonographic window? *Ital. Heart. J.* 5, 173-177.