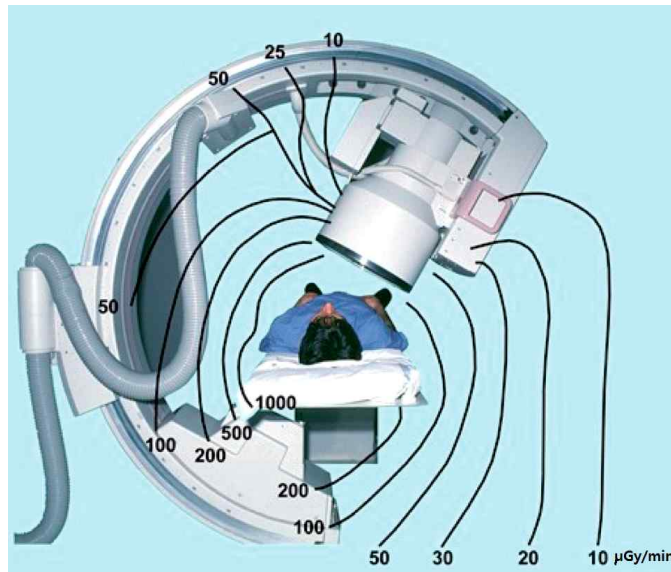


중재절차에서 직무피폭 방호

Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures



이 번역본 발간은 방사선안전문화연구소 자체사업의 일환으로 이루어졌습니다. 학회는 이 번역본 배포를 승인해준 ICRP 호의에 감사합니다.

<표지그림> 전형적 중재절차 설정에서 환자주변 선량률 분포(자료: 본문 중에서). 시술자 위치가 영상강화기 옆이어야 피폭을 줄일 수 있음을 보인다.

ICRP Publication 139

중재절차에서 직무피폭 방호

Occupational Radiological Protection in
Interventional Procedures

ICRP 승인: 2017년 10월

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은
ICRP의 허락(2018년 6월)을 받았으며
ICRP 정신에 따라 무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

역사서문

현대 중재방사선술은 과거에는 없었던 기술과 기법을 사용하여 치명적 질환을 다스린다. 시술의사에게 눈을 제공하는 방사선 촬영기기도 전통적 형광투시기로부터 디지털 투영, CT, CBCT, PET-CT까지 동원되어 기능을 넓히고 있다. 도관도 다양하여 분지스텐트처럼 복잡한 기구도 발전한다. 기술의 발전은 절차를 더욱 효과적으로 개선한다는 의미도 되지만 점점 어려운 시술에 도전한다는 의미도 내포한다.

고난도 시술에 도전은 필연적으로 시술 시간과 방사선 노출을 늘린다. 이는 곧 중재시술자와 보조 의료진의 직무피폭을 증가시키는 원인이 된다. 더욱이 평균수명의 연장으로 순환계 질환 환자가 늘어나 중재방사선 절차 수요도 계속 증가한다.

중재절차 기술의 특성상 환자에 근접하여 실시간으로 방사선 영상을 보면서 시술하는 의료진의 피폭 잠재도가 높다. 투과력이 약한 X선 특성 덕분에 납치마로 차폐되는 몸통의 선량은 쉽게 낮출 수 있지만, 불가피하게 납치마 밖에 있는 머리와 팔다리는 훨씬 높은 선량을 받는다. 그 결과로 불행히도 이러한 작업환경에서 장기간 일한 많은 의사가 눈 수정체혼탁을 겪고 있는데, 이는 ICRP가 수정체 등가 선량 한도를 대폭 낮춘 원인이 되기도 한다.

수정체혼탁이나 백내장이 비치명적 질환이고 비교적 용이하게 치료할 수 있음은 그나마 다행이지만, 중재방사선 시술의사는 타인의 생명을 구하기 위해 자신의 상해를 감수하는 가치 ‘살신성인’ 즉, 위험을 무릅쓰고 인(仁)을 실천하는 본보기라 할 수 있다. 희생정신은 칭송받아 마땅하지만 현명하면 자신을 희생하지 않고도 사람을 살릴 수 있다는 것이 이 간행물의 주제이다.

중재시술실 환경은 복잡하고 가변적이다. 이러한 상황에서 최선의 방호를 위해서는 시술의사 자신이 방사선방호에 상당 수준의 지식과 경험이 있어야 하지만, 방사선방호에 최고 수준 훈련을 받은 의학물리사나 방사선방호 전문가가 작업환경과 절차는 물론 결과까지 분석하고 조언해야 한다.

현재 국내 의료환경에서 의학물리사는 주로 치료방사선 분야에만 배정되어 있고 달리 방사선방호 전문가를 고용하는 경우도 드물다. 따라서 중재시술실의 방호는 대개 담당의사와 방사선사가 관리하는 셈이다. 이런 현실은 우리 제도와 맞물리는데, 현행 원자력안전법은 진단X선을 제외하고는 인체에 방사선 사용은 방사선취급자 특수면허 소지자(특수면허 시험에 합격한 의사)의 감독 아래 수행하도록 하고 있다. 많은 병원에서는 법규 요건을 따르기 위해 특수면허 소지자 1명이 선임되어 있는데, 그 사람이 임상을 포함한 자신의 업무를 수행하면서 방사선안전관리를 감독한다는 것은 현실적이지 않다.

이제 의료 전문분과를 불문하고 방사선 사용은 보편화되어 있다. 이런 환경에서 특수면허를 받은 의사만 방사선 절차를 수행할 수 있다는 기본개념은 더 이상 적절하지 않다. 진료를 위해 X선이나 방사성물질을 사용하는 것은 모든 의사에게 일반적으로 허용하되, 수반되는 안전관리는 따로 전문가의 지원을 받게 하는 것이 적합하다. 다만, 의사 일반에게 방사선방호 기초 교육은 한 차원 강화해야 한다.

이 간행물의 주제인 중재방사선이 원자력안전법에서 정하는 '인체에 방사선 사용'인지 의료법이 정하는 진단X선인지 갈래가 불명확하다. 그러나 이 문제는 애초 진단X선과 기타 의료방사선으로 나눠 접근한 자체가 잉태한 것이다. 종사자 직무 피폭 관리는 병원 X선기사(방사선사), 핵의학기사, 산업비파괴검사 X선 촬영자, 원전종사자 모두에게 같은 개념이다.

보다 논리적인 구분은 환자방호 즉, 의료피폭 관리와 종사자 및 일반인 방호(방사능물질 환경배출 포함)로 나누는 것이다. 의료피폭이 실질적으로 국민의 인공방사선피폭의 대부분(99%)을 차지하는 만큼 진료목적을 달성하면서 환자피폭을 최소화하는 노력은 무엇보다 중요하다. 환자 신체에 방사선 에너지를 전달하는 것은 의료행위이므로 의료 감독청이 규제함이 합리적이다. 반대로 그 사용 과정에서 의료진이나 주변 일반인이 받는 피폭은 다른 분야 방사선 사용과 동일하므로 방사선방호 감독청(현 정부조직에서는 원자력안전위원회)이 감독하는 것이 책임을 명확히 하는 방향이다.

물론 이 간행물에서 수차례 강조하듯이 환자방호와 의료진 안전은 밀접한 관계에 있다. 환자 의료피폭을 최소화하기 위한 대부분 노력은 동시에 의료진의 직무피폭도 감축한다. 의료피폭과 직무피폭 감독청이 다르더라도 방사선 의료절차를 수행하는 사람은 동일한 의료진이므로 밀접한 관계에 있는 두 피폭을 조화시키는 데는 어려움이 없다.

어떻든 이 간행물의 주제는 중재절차에서 직무피폭 관리이다. 내용 중 일부는 중요성보다 장황하게 설명하는 경우도 있지만 매우 현실적인 정보를 담고 있음은 분명하다. ICRP 간행물의 형식이 독자 친화적이지 못해 정보와 지식의 전달 효율은 부족할 것 같다. 규제자, 방사선방호전문가 또는 중재절차를 수행하는 기관의 방호 담당자가 이 간행물의 권고를 바탕으로 보다 효과적인 자료로 편집하여 활용하면 중재절차에서 직무피폭 개선에 도움을 줄 것이다.

2018년 6월

역자 이재기

(대한방사선방어학회 방사선안전문화연구소장, 전 ICRP위원)

서 문

ICRP는 다년간 전리방사선에 수반되는 위험에 대한 방호에 관한 권고와 지침을 발간해 왔다. ICRP 103(2007a)은 최근 갱신된 기본권고를 수록하며, ICRP 105(2007b)는 의료피폭에 기본권고 적용에 대해 요약한다.

위 간행물은 일반적 속성에 관한 것인데, ICRP는 특히 빠르게 발전하는 의료방사선 분야에서 관찰된 구체적 문제나 어려움에 대해서도 다루기로 했다. 어려움이 있는 분야에 관한 보고서를 집중되고 간명하게, 그리고 절차에 직접 참여하여 일상 업무에서 직접 관계하는 사람들이 접근할 수 있는 형식으로 써서 간행물이 널리 활용되도록 노력했다.

그러한 간명한 간행물 중 중재절차와 관련된 예는 방사선 상해 예방에 관한 ICRP 85(2000b), 영상의학과 밖에서 형광투시 안내절차에서 방호에 관한 ICRP 117(2010a), 심장학에서 방사선방호에 관한 ICRP 120(2013) 등이다. 이들 간행물은 중재절차에 참여하는 모든 의료진 구성원의 방호를 겨냥한 실전적 조언을 제공한다.

그러나 병원 관리자, 병원 방사선방호 담당 직원, 선량계측 서비스 전문가, 공급자 및 유지관리 회사에서 오는 임상적용 지원인력 및 규제자를 포함하는 독자도 직무피폭 평가, 방호 도구 및 방법에 관한 조언을 필요로 한다. 또한 이들은 수족 및 눈 수정체 피폭 평가(보안경 없이 또는 없이), 방호복 선정(예: 납치마, 갑상선 보호대, 보안경), 납치마를 착용한 경우 선량계 읽음값으로부터 유효선량의 평가, 직무 선량이 비정상적으로 높거나 낮을 때(이는 선량계를 패용하지 않았을 수 있음을 의미한다.) 중재절차의 감사와 같은 구체적 문제에 대한 조언도 필요로 한다. 이러한 이슈에 대한 지침을 제공하는 것이 이 간행물의 목적이다.

작업반 위원은 다음과 같다.

P. Oritz López(위원장)	R. Loose	D.L. Miller
L.T. Dauer	C.J. Martin	E. Vañó

객원위원은 다음과 같다.

M. Doruff	R. Padovani	G. Massera
C. Yoder		

제3분과위 검토위원은 다음과 같다.

K. Applegate M.M. Rehani

제2분과위 검토위원은 다음과 같다.

J. Hunt J.D. Harrison N. Petoussi-Henns

본위원회 검토위원은 다음과 같다.

D. Cool C. Cousins

이 보고서를 준비하는 기간의 제3분과위 위원은 다음과 같다.

E. Vañó(위원장)	L.T. Dauer	P. Ortiz López
D.L. Miller(부위원장)	S. Demeter	P. Scalliet
M.M. Rehani(서기)	K. Kang	Y. Yonekura
K. Åhlström Riklund	P-L. Khong	B. Yue
K. Applegate	R. Loose	
M. Bourguignon	C.J. Martin	

역사란 대중 허튼소리다 - 그럴까?

1928년에 국제X선라듐방호위원회International X-ray and Radium Protection Committee (IXRPC)[현재의 국제방사선방호위원회]가 설치되었을 당시의 주요 관심사는 그때 이미 알려진 결정론적 영향과 의료진의 직무피폭이었다. 손가락을 잃거나 피부에 흉터가 있는 의사를 보이는 낡은 사진은 위험에 주목하지 않아 적절한 방호가 없어 초래된 방사선 유발 영향을 오늘날 의료진에게 상기시키는 걸출한 자료가 된다. 2018년으로 ICRP가 90주년을 맞기에 의료진(즉, 중재절차에 관계하는)에 대한 직무피폭 방호를 겨냥 간행물을 발간하는 것은 시간적 의미가 크다.

방사선을 사용하는 중재절차는 지난 수십 년간 진단, 치료 또는 통증관리 의학에 혁신을 이끌었기에 많은 환자에게 과거에는 가능하지 않았던 처치를 제공할 수 있게 되었다. 기술은 눈부신 속도로 발전하고 있어서 중재절차는 점점 복잡해져 어떤 경우는 마칠 때까지 여러 시간이 걸리기도 한다. 양전자방출단층촬영-전산화단층촬영(PET-CT) 안내 중재술이나 선택적 내부 방사선요법selective internal radiation therapy(SIRT)과 같은 신기술은 방사선방호에도 새로운 도전을 부른다.

손가락 없는 사진은 이제 과거사이지만 중재방사선의사에게 눈 수정체 혼탁과 때로는 백내장이 증가했다는 여러 연구가 있다. 모범관행은 환자뿐만 아니라 의료진 방사선량도 줄이기 때문에 중재절차를 시술하거나 참여하는 사람에 대한 교육 훈련은 늘 강조해도 지나치지 않다. 그러한 절차를 위한 성공적 방사선방호 프로그램은 의사, 간호사, 방사선사, 의학물리사, 규제자 및 행정관리자를 포함한 모든 관계자의 팀 노력을 요구한다. 나아가 의료진은 선량계는 물론 개인 방호장구 착용에 경각심을 가져야 한다. 위반임을 모르거나, 높은 선량이 기록되어 임상업무 계속에 지장이 있을 것을 꺼려 선량계 패용이나 납보안경 사용을 하지 않는 사례가 너무 빈번하다. 참여자 방호가 방사선취급감독자나 의학물리사 역할이라 전제하지 말고 중재방사선의사도 어느 정도 책임을 인식해야 한다. 권고된 사람 방호 준수를 개선하기 위해서는 행동변화가 필요하며, 이 목표를 달성하는 데는 교육이 관건이다.

거의 30년을 중재방사선의사로 일해 온 나는 여러 선량계, 보안경 및 목깃 갑상선 보호대 착용이나 패용을 잊지 않는 것을 일종의 자기수양으로 생각하는데, 이러한 물품을 같이 보관하고 매번 같은 준비 의식을 거치는 것이 어렵지는 않다. 오늘날 자동차 여행을 시작하는 거의 모든 운전자가 안전벨트를 맬 것을 예상하듯이 중재절차 시작에도 방호장구를 갖추는 유사한 일상절차가 있어야 한다.

ICRP가 출범하기 조금 앞서 100년 전인 1916년, 헨리 포드는 시카고트리분지

와 인터뷰에서 다음과 같이 말했다.

역사란 대충 허튼소리다. . . . 우리는 현재에 살기를 원한다. 별 볼일 없는 가치나마 있는 역사는 우리가 지금 만드는 역사이다.

그러나 우리가 현재나 미래에 안전한 관행을 채택하기를 바란다면 과거의 사건을 돌아보고 그로부터 교훈을 얻어야만 한다고 주장할 수 있다. 결국, 이것이 방사선 사용과 관련해 권고와 지침을 제공하는 ICRP 업무의 핵심인데, 의료 이용은 매우 중요한 분야이다. 현재 수행되는 일부 중재절차는 신기술 개발로 대체될 것이기에 수십 년 후에는 낙후한 것일 수 있다. 역사가 허튼소리로만 간주되었다면 지금까지 발전해 온 방사선방호체계는 없었을 것이기도 하지만, 한편으로는 오늘 우리가 분명히 역사를 만들고 있음도 잊지 말아야 한다.

CLAIRE COUSINS(ICRP 위원장)

목차

역자서문	iii
서문	v
논설	vii
요지	1
요약	3
용어집	11
제1장 서론	17
1.1. 배경	17
1.2. 이 간행물의 목적	19
1.3. 간행물의 범위	19
제2장 이슈	21
2.1. 중재절차	21
2.2. 중재절차에서 방사선 유형과 에너지	24
2.3. 직무피폭	25
2.4. 중재시술 참여 전문인에게서 보고된 방사선 상해	32
2.5. 피폭감시 난제	34
제3장 중재절차에 직무피폭 방호체계의 적용	39
3.1. 방사선방호 원칙	39
3.2. 구역과 작업장 분류	43
3.3. 배태아	43
제4장 개인감시와 선량평가	45
4.1. 개인피폭 감시	46

4.2. 개인선량계 특성과 사용	47
4.3. 직무피폭 평가	52
제5장 방사선방호 방법과 프로그램	63
5.1. 환자 방호와 의료진 방호 사이 관계	63
5.3. 몸통 방호	65
5.4. 갑상선 방호	68
5.5. 머리와 눈 방호	71
5.6. 사지 방호	76
5.7. PET 중재절차에서 방호	80
5.8. SIRT에서 방호	80
5.9. 방호복의 취급, 저장 및 시험	82
5.10. 교육훈련	82
5.11. 직무피폭 방호 관련 기록	83
5.12. 품질보증체계 필요성	83
제6장 요약 및 권고	85
6.1. 일반	85
6.2. 개인피폭감시	85
6.3. 직무피폭 방호 방법 및 도구	87
6.4. 임신종사자 방호	88
6.5. 방호복 보관 및 품질관리	88
6.6. 품질보증 프로그램	89
6.7. 교육훈련	89
6.8. 기록	90
부록 A: 방사선방호의 생물학적 근거의 개요	91
부록 B: 양과 단위	95
참고문헌	101

사용 두자어 및 두자성어

APD active personal dosimeter 능동형 개인선량계
CBCT cone beam CT 콘빔CT
CONRAD Coordinated Network for Radiation Dosimetry 방사선량계측 조정네트워크
(유럽연합 연구사업)
CT computed tomography 전산화단층촬영
DNA deoxyribonucleic acid 디옥시리보핵산
DRF dose reduction factor 선량감축인자
DSA digital subtraction angiography 디지털차감 혈관조영술
EU European Union 유럽연합
FDG fludeoxyglucose, 2-Deoxy-2-[¹⁸F]fluoroglucose (PET 종양 추적자 물질)
FGI fluoroscopy guided intervention 형광투시 안내 중재술
GM Geiger-Muller 가이거뮐러
IAEA Internaltional Atomic Energy Agency 국제원자력기구
ICRP International Commission on Radiological Protection 국제방사선방호위원회
ICRU International Commission on Radiation Units and Measurements 국제방사선단위측정위원회
IEC International Electrotechnical Commission 국제전기기술위원회
IRPA International Radiation Protection Association 국제방사선방호학회연합
ISEMIR Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research
의료, 산업 및 연구에서 직무피폭 정보체계(IAEA 연구 프로그램)
ISO International Standardization Organization 국제표준화기구
LAT lateral 측방
LET linear energy transfer 에너지전달선밀도
MAA macro aggregated albumin 대응집 알부민
MRI magnetic resonance imaging 자기공명촬영
NCRP National Council on Radiation Protection and Measurements 미국 방사선방호측정위원회
NRPB National Radiological Protection Board 영국 방사선방호원(현 HPA)
ORAMED Optimization of Radiation Protection for Medical Staff 의료진 방사선방호
최적화 연구(유럽연합)
OSL optically stimulated luminescence 광자극발광
PET positron emission tomography 양전자방출단층촬영

PLLA poly-L-lactic acid 생분해성 섬유물질명
PTA percutaneous transluminal angioplasty 경피경관혈관성형술
QA quality assurance 품질보증
RANDO RSD사의 Alderson 인형모의체[종종 ARTAlderson Radiation Therapy 모의체라 부름]
RELID retrospective evaluation of lens injuries and dose 선량과 수정체상해 소급평가 (IAEA 연구프로그램)
SIRT selective internal radiation therapy 선택적 내부 방사선요법
SIRTEX SIRT용 수지구를 생산하는 호주 회사
SPECT single photon emission computed tomography 단일광자방출 CT
TIPPS transjugular intrahepatic portosystemic shunt 목정맥경유 간속문맥 전신순환연 결술
TL thermoluminescent 열발광
TLD thermoluminescent dosimeter 열발광선량계
WHO World Health Organization 세계보건기구

중재절차에서 직무피폭 보호

ICRP 간행물 139

2017년 10월 ICRP 승인

요지 - ICRP 117과 ICRP 120 같은 근간 간행물에서 ICRP는 의사나 기타 보건관리인이 중재절차에서 환자와 자신들을 보호하기 위한 수단에 대한 실전적 조언을 제공한 바 있다. 이런 수단들은 방사선방호 요소의 기틀에 합체되고 방사선방호 책임을 지는 전문가가 가용할 때에만 유효할 것이다. 그러한 기틀은 방사선방호 프로그램과 함께 피폭감시, 방호복, 교육훈련, 그리고 프로그램 이행의 품질보증을 포함한다. 중재절차를 위한 직무 방사선방호 책임이 있는 전문가에는 의학물리사, 방사선방호 전문가, 선량계측 서비스 전문가, 공급자 및 유지관리 회사에서 오는 임상적용 지원인력, 훈련이나 기기 또는 절차 표준화 담당자, 직장보건 담당자, 재정 지원을 맡는 병원 관리자, 전문기구나 규제자도 포함된다. 이 간행물은 이러한 요소와 독자를 겨냥하고 납치마를 착용한 경우 선량계 판독치로부터 유효선량의 평가나 눈 수정체 피폭 평가(보안경 없이 또는 없이), 사지 감시, 방호복 선정 및 시험, 직무 선량이 비정상적으로 높거나 낮을 때(이는 선량계를 패용하지 않았을 수 있음을 의미한다.) 중재절차의 감사와 같은 구체적 문제에 대해 조언한다.

중심어: 직무 방사선방호, 중재절차, 피폭감시, 눈 수정체 피폭, 방호복

ICRP를 대신한 저자

P. Ortiz López, L.T. Dauer, R. Loose, C.J. Martin, D.L. Miller,
E. Vañó, M. Doruff, R. Padovani, G. Massera, C. Yoder

요 약

1. 배경

(a) 다양한 내외과 전문의는 방사선사와 간호사 도움 아래 전통적 수술의 대안으로 방사선 촬영 안내 중재술을 수행한다. 평균적으로 이러한 중재술은 덜 침습적이어서 대등한 전통적 수술에 비해 회복기간이 짧고 많은 유형의 중재에서 부작용 비율도 낮다. 나아가 어떤 환자는 마취나 전통적 수술을 감수하지 못할 수도 있을 뿐만 아니라 과거에는 접근할 수 없었던 병소도 이제 덜 침습적인 영상안내 중재술로 처치할 수 있게 되었다.

(b) 선진국과 개발도상국 모두에서 촬영 안내 중재술 수는 크게 증가하고 있다. 새로운 유형의 중재술은 복잡도도 증가해서 직무피폭 방호에 새로운 문제를 제기한다. 중재시술의사와 심장학자 뿐만 아니라 방사선방호 훈련이 없거나 부족한 다른 전문의도 이제 안내 중재술 사용자가 되고 있다.

(c) 동일 유형 절차에서 관찰된 직무피폭의 큰 편차는 방사선방호 관행에 개선여지가 있음을 시사한다. 국제원자력기구(IAEA) 프로그램 아래 수행된 ‘선량과 수정체 상해에 관한 소급평가’(retrospective evaluation of lens injuries and dose(RELID 연구)와 같이 아래서 설명하는 근년의 몇몇 안과학적 연구는 방사선방호장구를 적절하게 사용하지 않고 방사선방호 원칙을 준수하지 않은 때 중재시술의사의 눈 수정체에 방사선 관련 혼탁이 증가함을 보이고 있다.

2. 이 간행물의 목적과 범위

(d) ICRP 117(2010a)과 ICRP 120(2013a)에서 ICRP는 중재절차에 참여하는 의사나 기타 보건관리인의 직무피폭 방호에 관한 실전적 조언을 제공한 바 있다. 이 간행물은 피폭감시 전략, 방법 및 방안, 방사선방호 접근, 방호복 사용과 시험, 교육훈련, 방사선방호 프로그램 개발, 프로그램 이행의 품질보증에 대한 지침을 제공한다. 지침은 의학물리사, 직업보건에 책임 있는 기타 보건전문인, 그리고 전반적 안전문화와 품질보증 및 개선에 영향을 미치는 모든 사람을 염두에 둔다. 나아가

지침은 훈련, 기기나 절차 표준화, 직업보전에 책임 있는 사람, 재정지원 책임이 있는 병원 경영자 및 관리자, 그리고 전문기구(중재방사선 의사, 의학물리사, 간호사, 방사선사 단체)에게도 유용할 것이다.

3. 영상안내 중재술 사용과 직무피폭 및 관찰된 영향

3.1. 사용

(e) 중재술은 보통 형광투시로 안내되며, 진료 결과나 정상 또는 비정상 조건을 기록하기 위해 영화 같은 투과영상 시리즈를 획득한다. 전산화단층촬영(CT) 안내로 중재술이 이루어지기도 하는데, 촬영하는 동안 중재시술의사는 이동형 차폐 뒤나 방 밖에 머무른다. CT 형광투시로 수행할 때는 기구를 조작하는 동안 영상을 획득하기 위한 환자 노출이 진행될 때 중재시술의사가 그 방에 머무르게 된다. 통상적 CT 영상에 비해 CT 형광투시의 주된 장점은 환자 호흡이나 다른 움직임으로 체내에서 움직이는 병소를 실시간으로 감시하면서 접근할 수 있는 것이다. 반면, CT 형광투시는 환자, 중재시술의사 및 기타 중재술에 참여하는 의료진에게 상대적으로 높은 방사선피폭을 준다.

(f) ^{90}Y 표지 마이크로구로 방사선색전(선택적 내부 방사선요법; SIRT)과 같은 X선 영상안내 치료적 중재술은 절제할 수 없는 1차 또는 2차 간암 환자를 치료하는 대안요법이다. 여러 병원에서 생검이나 고주파절제와 같은 중재절차 과정에서 실시간 양전자방출단층촬영(PET)-CT 안내 사용을 시도하고 있다. 생검이나 절제를 수행할 장소의 확인, 중재술 효과의 점검, 또는 잔류 질환의 조기 발견(예: 고주파절제 후 필요하면 최대 치료이득을 얻도록 절제를 반복할 수 있도록)을 위해 ^{18}F FDG PET-CT 촬영실에서 이를 수행한다.

3.2. 직무피폭과 관찰된 영향

(g) 적절히 방호한다면 중재시술의사의 연간 직무피폭 유효선량을 10 mSv 미만으로 유지할 수 있는데, 전형적으로는 2~4 mSv 또는 그 이하이다. 그러나 일부 조사는 개인 직무피폭이 이 값을 초과하고 상당한 편차가 있음을 보인다.

(h) 백내장 발생이 역사적으로 믿어왔던 것보다 훨씬 낮은 문턱을 가질 수 있다는 증거가 나타남에 따라, 눈 수정체가 받는 등가선량에 대한 관심이 높아졌다. ICRP 권고는 눈 수정체 등가선량한도를 150 mSv/y로부터 특정 한 해에 50 mSv를 넘기지 않으면서 지정된 5년 평균 20 mSv/y로 낮췄다. 방사선 촬영 안내로 수행하는

중재술의 본질상 눈에 대한 방호수단 없이는 업무량이 중간 이상인 시술자의 눈 수정체 피폭이 새로운 연간 등가선량한도를 초과할 수 있고, 시간이 지나면 수정체 혼탁으로 이어질 수도 있다.

(i) 심장학 학술회의에 참석하여 IAEA 조정 아래 수행되는 프로그램인 RELID 연구에 자발적으로 참여한 중재시술의사와 간호사 표본에 대해 여러 안과학적 연구가 실시되었다. 대체로 40~50%의 중재시술의사와 20~40%의 간호사 및 방사선사가 방사선피폭으로 인한 손상으로 볼 수 있는 후방 낭하혼탁이 있음을 보였다. 중재시술의사에서 발병률은 피폭하지 않은 대조군보다 4~5배 높았다(10% 대 40~50%). 어떤 경우에는 생애 수정체 흡수선량이 수 Gy를 넘는 것으로 평가되었다.

(j) 노출되는 환자 체적에 가장 가까운 중재시술의사 손의 선량이 높을 수 있기에 손 등가선량이 관심 대상이 되며 구체적인 손 감시를 필요로 한다. 처치 침상 측면에 거는 방호커튼을 사용했음에도 발의 연간 등가선량이 110 mSv까지 이르는 것으로 나타났다. 이러한 피폭은 방호 커튼과 바닥 사이 틈 때문으로 간주되는데 틈 간격은 노출 중 X선 침상의 높이에 따라 달라진다.

4. 직무피폭 감시 및 피폭 평가

(k) IAEA의 ‘의료, 산업 및 연구에서 직무피폭 정보체계’ Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research(ISEMIR) (IAEA 2014b)에서 수행한 조사는 심장 중재시술의사의 76%가 항상 선량계를 패용하고 45%가 선량계 둘을 패용하는 것으로 나타났다. 이 조사는 자기보고에 따른 것이므로 실제 선량계 사용보다 과장되었을 수는 있다. 나아가 일부 국가에서는 중재절차에 참여하는 전문가에 대한 적절한 방사선량 감시가 부실하거나 종종 개인선량계를 일상적으로 패용하지 않는다.

(l) 유효선량 평가에 추가하여, 방사선 촬영 안내 중재술에서 직무피폭 감시는 눈 수정체가 받는 등가선량과 때로는 수족 선량 평가를 포함해야 한다.

4.1. 유효선량 평가

(m) 납치마¹⁾로 차폐된 선량계와 납치마 위 목깃 높이에 패용하는 선량계로 구성되

1) <역주> 이 간행물에서 납치마를 지칭하는 용어로 ‘leaded apron’ 또는 ‘protective apron’이 혼용되고 있다. 용어 ‘납치마’는 초기 방호 앞치마에 실제로 납지가 사용된 데

는 두 선량계 읽음값의 조합으로 유효선량의 최선 평가치를 얻는다(이전 간행물에서 ICRP가 설명한 것처럼). 납치마 아래 선량계는 충분한 차폐를 제공하는 납치마를 일상적으로 착용하는지에 대한 증거도 제공한다.

4.2. 눈 등가선량 평가

(n) 노출되는 환자 체적에 가까운 쪽 중재시술의사의 목깃 높이에 납치마 위에 패용하는 선량계는 유효선량 평가에 기여함은 물론, 눈 수정체나 머리의 등가선량에 대한 무난한 평가를 제공한다.

(o) 고선량 절차에서 눈 수정체 등가선량을 포함한 직무피폭 선량을 평가하기 위해서는 개선된 전산기법의 개발이 필요하다. 이 방법은 개인선량계의 일상적이고 바른 패용을 감사하거나 추가 방호(예: 보안경) 필요성을 평가하는 데 도움이 된다. 눈 선량을 포함한 개인선량을 평가하기 위해, 사람 위치 감지기와 함께 전산기법(선량계를 요구하지 않는) 개발을 위한 연구를 추진할 필요가 있다.

4.3. 수족 등가선량

(p) 앞으로는 일부 특정 복잡한 중재절차에서 손의 등가선량 평가에 더 주목할 필요가 있을 수 있다. 손이 X선빔에 매우 가까이 놓이는 경우 반지선량계가 필요할 것이다. 마찬가지로 발을 포함한 다리의 피폭 평가에도 주의가 요구될 것인데, 특히 방호 커튼이 없거나 커튼과 바닥 사이 틈이 있을 때는 더욱 그러하다. 중재절차 중 침상 높이에 따라 이런 틈이 있을 수 있다.

4.4. 선량계 오사용 사례와 시정에 대한 간접적 접근

(q) 오사용 예는 지급된 선량계 미사용, 납치마 안에 패용하도록 한 선량계를 납치마 위에 패용, 반지선량계를 다른 손에 사용, 다른 사람 선량계 패용, 그리고 선량계 분실이다.

(r) 간접 선량평가법이 개인선량계 패용 미준수를 식별하는 데 또는 개인선량계를 사용하지 않은 경우 직무피폭을 평가하는 데 유용할 수 있다. 이 방법은 환자 주변(예: C암 위)에 산란방사선에 대한 지역감시에 기반을 둘 수 있는데, 상이한 절차나 기하배열에서 커마면적곱과 같은 환자 관련 양을 종사자 수정체 선량과 연계하는 환산계수와 함께 사용할 수 있다.

서 기인한다. 근래에는 납이 아닌 소재도 사용되지만 방호효과는 '납등가두께'로 표현하므로 이 번역본에서는 납 사용 여부와 관계없이 그러한 X선 방호복을 '납치마'로 적는다.

5. 직무피폭 방호 지침

5.1. 환자선량과 의료진 선량 관계

(s) 방사선촬영 안내 중재술에서 종사자 방호는 환자 방호와 밀접하게 연계되며, 환자 방호를 위한 대부분 조치는 의료진도 보호한다. 그러나 의료진만 방호하는 추가적 수단이나 방호장구들도 있다. 그러나 이러한 장구의 사용이 절차 조작을 방해하거나 환자선량을 증가시켜서는 안 된다.

5.2. 차폐물에 의한 방호

(t) 납치마는 X선실에 종사하는 모든 중재술 의료진이 착용해야 한다. 납치마는 보통 0.25 mm, 0.35 mm 또는 0.5 mm 납등가물을 내장한다. 일부 디자인은 앞쪽을 겹치게 하여 다른 부위는 0.25 mm 납등가일 때 전면은 0.5 mm 등가의 방호를 제공한다. 70~100 kV 범위에서 투과도는 통상 0.5~5% 범위에 있다(즉, 감쇠인자가 200~20 범위). 납치마는 몸통을 산란방사선으로부터 차폐하지만 머리, 팔, 손 및 다리와 같은 신체부위는 방호하지 않는다. 방사선방호 프로그램은 이러한 부위를 고려해야 한다.

(u) 머리 방호에서 가장 중요한 인자는 천정걸이형 납 아크릴 차폐의 적절한 사용이다. 이 차폐는 머리 전체나 목 부위 선량을 인자 2~10으로 줄일 수 있으므로 중재술 시설에는 항상 이를 포함해야 한다.

(v) 간호사나 마취사처럼 환자 가까이 머물러야 하는 의료진은 산란방사선 선원(환자)과 자신 사이에 둘 수 있는 이동식(바퀴가 있는) 차폐를 사용하여 추가 방호 이득을 얻을 수 있다.

(w) 위 (h)항에서 설명한 것처럼, 방호대책이 부실하면 직무피폭에서 수정체 등가 선량이 새 선량한도를 초과할 수 있다. 시간이 경과하여 선량이 누적되면 이 때문에 수정체 혼탁이 발생할 수 있다. 역으로 중재 형광투시 장비를 바르게 운용하고 절차 프로토콜이 최적화되고, 운전자가 훈련되고 눈 보호구를 사용한다면 수정체 선량은 선량한도 아래에 머물 것이다.

(x) 의사는 X선 노출 중 영상 모니터를 바라보기 때문에 눈이 측면이나 하부에서 피폭할 수 있으므로 납안경이 특히 안경 측면과 하부에서 얼굴 윤곽과 밀착되게 하는 것이 중요하다.

(y) 일부 절차에서는 천정걸이 차폐 하단에 부착하는 납 장막이 기타 차폐막이나 차폐패드와 함께 시술자 손을 보호하는 데 효과적이다. 시술자가 산란방사선 선원(즉, 조사되는 환자 신체 체적)에 근접할 필요가 있는 절차에서는 이런 유형 방호를 고려해야 한다. 일회용 차폐막을 환자 위에 둘 때에는 차폐막이 1차빔에 들어가지 않도록 주의해야 한다. 1차빔에 차폐물이 들어가면 환자와 시술자 선량을 증가시킨다.

(z) 중재시술 중 환자 침상 근처에 서는 의료진은 빔 입사 쪽에 가까운 곳의 방사선장이 더 강함에 유의해야 한다. 이는 특히 투영이 경사지거나 측방으로 이루어질 때 더욱 중요하다. X선관을 침상 아래 둔 형광투시로부터 중재시술의사의 머리, 상체 및 손이 받는 선량은 하체 말단이 받는 선량보다 상당히 낮다.

(aa) 이는 하체 말단을 위한 차폐커튼이 없을 때나 침상이 높은 위치에 있어 커튼이 있어도 발이 보호되지 않을 때는 특히 그러하다. 바퀴 달린 이동형 차폐가 가용해 적절히 사용하면 의료진 유효선량을 90% 이상 감축할 수 있다.

(bb) 요약하면, 중재시술실 안의 모든 의료진은 납치마를 착용해야 한다. 빔이 가동될 때 항상 환자를 향해 서 있지 않을 수도 있는 사람에게서는 몸을 감싸는 납치마가 바람직하다. 중재시술의사는 가능하면 천정걸이 스크린, 침상걸이 커튼, 차폐장막으로 방호를 받아야 한다. 높은 선량 영상획득 모드(예: 영상획득 시리즈 또는 디지털 차감 혈관조영)를 사용할 때나 자동주입기로 조영제를 주입하는 동안은 뒤로 물러서 환자로부터 거리를 늘임으로써 의료진 선량을 줄일 수 있다. 간호사나 마취사처럼 환자 근처에 있어야 하는 의료진은 이동형 스크린을 사용해 방호 이득을 얻을 수 있다. 다른 의료진은 조사되는 환자 체적으로부터 멀리 떨어지거나 가능하면 영상획득 동안은 방을 나감으로써 방호를 높일 수 있다.

5.3. 배태아 방호

(cc) 임신을 선언한 여성의 작업조건은 잔여 임신 기간 동안 배태아의 추가 선량이 1 mSv를 초과하지 않도록 되어야 한다.

(dd) 현재 데이터는 임신 여성이 적절한 절차를 따른다고 볼 때 임신 여성을 방사선 촬영으로 안내되는 중재술 수행으로부터 완전히 배제하는 것을 정당화하지는 않는다. 어느 경우든 임신은 고용주가 임신 종사자의 피폭조건이나 기타 직무해독 특성(예: 납치마 착용으로 인한 척추 통증)을 신중하게 검토하기를 요구한다.

6. 품질보증

(ee) 방사선 촬영 안내 중재술에 참여하는 전문가가 항상 선량계를 패용하고 보안경을 포함한 방호복을 착용하는지를 확인하기 위해 일상적으로 점검하고 기록함에 대한 품질보증은 매우 중요하다.

(ff) 일부 결함 있는 방호복 공급이 알려진 바 있으므로 방호장구의 수용시험은 필수적이다. 나아가 제5장에서 설명하는 것처럼 방호장구의 조심스런 취급과 정규시험이 품질보증과 개선 프로그램의 일환으로 요구된다.

7. 교육훈련

(gg) 의료진에 대해서는 직장 안전과 방사선방호에 관한 초기 교육훈련과 계속 교육훈련이 요구된다. 안전문화 및 촬영기와 방호도구(예: 천정걸이 차폐, 납 보안경, 차폐 커튼)의 합당한 사용과 관련한 교육훈련은 특히 중요하다.

(hh) 실시간 능동형 선량계 사용은 특정 높은 선량 절차에서 방호최적화를 도울 뿐만 아니라 전문가에게 자신이 받는 선량 준위에 대해 교육하는 데도 기여한다.

(ii) 방사선방호 일반에 대한 지식에 추가하여 직무피폭 방호를 담당하는 병원 직원, 선량계측 서비스 직원, 공급사의 임상적용 지원인력 및 규제자는 임상관행, 중재절차에 사용되는 X선장치, 직무피폭 평가 전략, 방호 방법과 방호복 선정과 시험에 대해 지식을 필요로 한다.

8. 방사선방호를 위한 핵심 전문가 가용성

(jj) 의학물리사나 기타 방사선방호와 훈련 프로그램을 수립하고 유지하는 책임이 있는 사람의 역할이 중요하다. 이들은 중재시술의사나 방사선사, 간호사가 최적 방사선방호 및 보호를 설계하고 이행하는 팀의 일부이다.

용어집

흡수선량absorbed dose (D)

전리방사선이 질량 dm 에 부여한 평균에너지 $d\bar{\varepsilon}$ 를 dm 으로 나눈 몫으로서 기본 선량 양.[†] 즉,

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}.$$

흡수선량은 기본적인 물리적 선량관계량이며 모든 종류 방사선과 모든 종류 물질에 적용된다. 흡수선량은 1차 표준이 존재하는 측정 가능한 양이다. 국제 표준단위계(SI)에서 흡수선량의 단위는 킬로그램 당 줄(Jkg^{-1})이며, 그 특별명칭은 그레이(Gy)이다.

간병인 및 위안자carers and comforters

의료진 외에 환자를 돌보거나 위안하는 사람. 이들에게는 진단절차 동안 아이를 잡고 있거나 핵의약품 투여 후 또는 근접치료 시간에 환자에게 접근하는 부모나 가족, 기타 친지가 포함된다(ICRP 2007a).

결정론적 영향deterministic effect

‘조직반응’ 참조.

선량계수dose coefficient

피폭의 원인이 되는 양과 종점인 선량 사이의 관계를 짓도록 모델과 기준값을 사용하여 평가한 계수.²⁾ 방사성물질 단위 섭취 당 선량을 표현하는 데 사용하지만, 표면에 분포하는 어떤 방사성핵종의 단위면적 당 방사능으로부터 일정 거리 떨어진 지점에서 외부선량률과 같이, 선량이나 선량률을 방사능의 양이나 농도와 연계하는 계수를 설명하는 데에도 사용한다(ICRP 2007a).

선량한도dose limits

계획피폭상황에서 초과해서는 안 되는 개인 유효선량이나 등가선량 값(ICRP 2007a).

2) <역주> 원문에 없는 설명이지만 이해를 돕기 위해 용어의 의미를 역자가 정의했다.

납치마 위 선량계 dosimeter over apron

방호납치마에 의해 차폐되지 않은 선량계.

납치마 아래 선량계 dosimeter under apron

방호납치마에 의해 차폐된 선량계.

유효선량 effective dose (E)

단일 양으로 방사선에 피폭한 사람의 종합 위험을 근사적으로 나타내기 위해 도입한 방호량.³⁾ 인체의 모든 특정 조직과 장기에서 등가선량을 조직가중치로 가중한 합으로서 다음과 같이 표현된다.

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T w_R D_T$$

여기서 H_T 나 $w_R D_T$ 는 조직이나 장기 T의 등가선량, w_T 는 조직가중치, w_R 은 방사선가중치이다. 유효선량의 단위는 흡수선량 단위와 같이 킬로그램 당 줄(Jkg^{-1})이지만, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

합산⁴⁾은 인체에서 확률론적 영향에 민감한 것으로 간주되는 모든 장기와 조직에 걸쳐 수행된다. 조직가중치는 성별과 연령에 대한 평균으로서 모든 연령 남녀 집단에 근사값으로 적용하려는 것이다.

고용주 employer

상호 합의 관계에 의해 고용관계에 있는 종사자에 대해 책임, 약속 및 의무와 관련된 국가 법령에 따라 지정된 기관, 법인, 공동투자회사, 기업, 조합, 트러스트, 경제실체, 공공 또는 민간 기관, 단체, 정치적 또는 행정적 실체나 기타 개인. 자영업자는 고용주와 종사자 모두에 해당된다(ICRP 2007a).

등가선량 equivalent dose

조직이나 장기 T의 선량이며 다음과 같이 주어진다.⁵⁾

$$H_T = w_R D_T$$

여기서 D_T 는 조직이나 장기 T가 방사선 R로부터 받은 평균 흡수선량, w_R 은

3) <역주> 원문에 없지만 역자가 의미를 부여한 것이다.

4) <역주> '합산'으로 적고 있지만 조직 T에 대한 합산 기호는 합이라기보다 가중평균을 의미한다. 즉, 유효선량은 조직 등가선량에 위험을 가중하여 전신에 대해 평균한 선량에 해당한다.

5) <역주> 용어의 의미를 정의하자면 "다른 선질의 방사선이 미치는 생물학적 효력 차이를 반영하기 위해 조직이나 장기의 평균 흡수선량에 그 흡수선량을 유발한 방사선의 방사선가중치를 가중한 선량"으로 표현할 수 있다. 아래 식에서 합산기호는 역자가 삭제했다.

방사선가중치이다. w_R 는 무차원이므로, 등가선량 단위는 흡수선량 단위와 같이 킬로그램 당 줄($J kg^{-1}$)이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

형광투시 또는 CT 안내 중재술fluoroscopically or computed tomography guided intervention

병소나 치료사이트 찾기, 절차 감시 또는 치료 관리 및 기록을 위해 형광투시나 CT 촬영으로 수행되는 안내 중재진료로 구성되는 절차로서 보통 국부마취나 진정 아래 경피나 다른 접근로를 통해 수행됨(ICRP 2000b). 일부 절차에서는 형광투시 장비를 이용한 3차원 촬영(콘빔CT)도 사용된다.

그레이gray (Gy)

흡수선량의 SI 단위에 대한 특별명칭: $1 Gy = 1 J kg^{-1}$.

조직/장기 평균 흡수선량mean absorbed dose in a tissue or organ (D_T)

조직 또는 장기 T에서 평균한 흡수선량 D_T .

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

여기서 ϵ_T 는 조직 또는 장기 T에 전달된 평균 총에너지이고, m_T 는 그 조직 또는 장기의 질량이다(ICRP 2007a).

의료피폭medical exposure

자신의 의료 또는 치과 진료의 일부로 환자가 받거나, 직무로 피폭하는 사람이 아니면서 자발적으로 환자를 보좌 또는 위안하거나, 피폭이 수반되는 의생명연구 프로그램의 연구대상 자원자가 받는 방사선 피폭.⁶⁾

직무피폭occupational exposure

작업 중 종사자에게 발생하는 모든 피폭. 다만, 1) 배제된 피폭 및 면제된 선원 또는 방사선에 관련된 면제된 활동으로부터 피폭과 2) 모든 의료피폭, 3) 지역의 정상적인 자연 백그라운드 방사선피폭은 제외한다. 그러나 방사선의

6) <역주> 뒤에 열거된 그룹의 사람이 받는 피폭은 원론적으로는 의료피폭이 아니다. 그러나 현재 ICRP의 피폭유형 분류가 직무피폭, 의료피폭, 일반인피폭의 셋만으로 구성되는데 이들 특별한 그룹의 피폭은 정의상 직무피폭이 아니며, 일반인피폭으로 분류하면 관리가 어려워져 편의상 의료피폭에 편입시킨 것에 불과하다. 따라서 이 간행물에서 논의하는 진단참조준위는 이들 그룹의 피폭과는 무관하다. 이들에게는 최적화 도구로 선량제약치 개념을 적용한다.

만연성 때문에 ICRP는 '직무피폭'이란 용어의 사용을 운영관리자의 책임으로 합리적으로 간주되는 상황의 결과로 발생하는 방사선피폭으로 한정한다. 배제된 피폭이나 면제된 행위나 선원으로부터 피폭은 일반적으로 직무 방호에서 고려할 필요가 없다(ICRP 2007a).

실용량^{operational quantity}

외부피폭이 관련된 상황의 조사나 감시 실제에 사용되는 양으로서 인체 선량의 측정과 평가를 위해 정의한다. 내부피폭 선량계측에는 등가선량 또는 유효선량을 평가하기 위해 직접 사용할 수 있는 실용량을 정의한 것이 없다. 인체 내 방사성핵종으로 인한 등가선량 또는 유효선량 평가에는 다른 방법들을 적용하는데 대개 여러 방사능 측정법과 생물역동학적 모델(계산 모델)을 적용한다.⁷⁾

방호최적화^{optimization of protection (and safety)}

피폭 및 잠재피폭의 확률과 크기를 경제사회적 인자를 고려해 합리적으로 달성 가능한 낮은 수준으로 유지하기 위해 방호와 안전의 수준을 결정하는 절차(ICRP 2007a). 의료 촬영 및 방사선치료 절차에서는 방호최적화는 방사선량을 '경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 최소'로 유지하는 것을 의미하며, 환자 선량 관리가 의료목적과 부합하도록 관리하는 것으로 설명하면 적절하다.

개인선량당량^{personal dose equivalent}

실용량의 하나. 몸체의 특정 지점 아래 적절한 깊이 d에서 연조직의 선량당량. 개인선량당량의 단위는 킬로그램 당 줄($J kg^{-1}$)이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다. 특정 지점은 일반적으로 개인선량계가 위치한 부위이다. 유효선량 감시를 위해서는 실용량 $H_p(10)$ 을 사용하며 피부, 손발의 선량을 평가하는 데는 $H_p(0.07)$ 을 사용한다. 눈 수정체 선량 감시에는 깊이 $d = 3mm$ 가 적절하다. 그러나 실제 많은 국가에서 선량계가 $H_p(3)$ 을 측정하도록 설계되어 있지 않는데⁸⁾, 방사선 촬영 안내 중재에서 해당되는 광자 방사선에 의한 수정체 감시목적에서는 $H_p(0.07)$ 을 사용할 수도 있다.

7) <역주> 의미를 정의하자면 “실측이 불가능한 방호량을 대신하여 사람의 선량을 평가할 수 있는 체계를 제공하도록 도입한 측정 가능한 선량”이다. 실용량은 적절한 등가선량으로 정의된다.

8) <역주> 원문은 선량계가 $H_p(3)$ 에 대해 교정되어 있지 않다고 표현하고 있으나 교정 이전에 설계되어 있지 않기에 표현을 수정했다.

방호원칙principles of protection

모든 관리 가능한 피폭상황에 동일하게 적용되는 일련의 원칙. 정당화 원칙과 방호최적화 원칙은 선원중심이며 모든 피폭상황에 적용된다. 선량한도 적용 원칙은 개인중심이며 계획상황에만 적용된다(ICRP 2007a).

방사선가중치radiation weighting factor

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 2007a).

시버트sievert (Sv)

등가선량, 유효선량 및 실용량의 SI 단위에 대한 특별명칭. SI 단위는 킬로그램 당 줄($J\ kg^{-1}$)이다.

의료진staff

이 간행물의 어떤 맥락에서는 의료진은 방사선절차 동안 환자관리에 참여하거나(예: 의사, 간호사, 방사선사) 직무 과정에서 의료촬영기기로부터 방사선을 피폭하는(예: 기기 유지관리자, 건물 관리자) 보건관리인이다.

확률론적 영향stochastic effect

영향이 발생할 확률(심각도가 아님)이 문턱치 없는 선량 함수로 간주되는 악성 질환과 유전영향.

조직반응 문턱선량threshold dose for tissue reaction

1%에게 조직반응을 유발할 것으로 추정되는 선량(ICRP 2007a).

조직반응tissue reaction

문턱선량 존재와 선량이 더 증가함에 따라 반응의 심각도가 증가하는 것으로 특정 지어지는 세포집단의 손상. 과거에는 조직반응을 '결정론적 영향'이라고 불렀다. 때로는 건강관리나 생물학적 반응 수정인자를 포함하는 피폭 후속절차에 의해 조직반응이 수정될 수 있다(ICRP 2007a).

조직가중치tissue weighting factor

신체가 균질하게 피폭할 때 총 보건위해에 대한 조직이나 장기 T의 상대적 기여를 나타내기 위해 그 등가선량에 가중하는 인자.⁹⁾ 가중치의 합은 1이다 (ICRP 2007).

$$\sum_T w_T = 1.$$

종사자worker

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

9) <역주> 보건위해의 상대적 기여를 나타내기 위해 등가선량에 가중하는 인자라는 설명보다 '전신 위해를 표현하기 위해 조직 등가선량을 위해가중평균하기 위한 가중치'로 설명하는 것이 적절하다고 본다.

제1장 서론

- 방사선 촬영으로 안내되는 최소 침습적인 중재술은 여러 의학적 조건에서 전통적 수술에 비해 많은 장점이 있다.
- 동일 유형 절차에서 관찰된 직무피폭에는 상당한 차이가 있는데 이는 방사선방호 관행에 개선여지가 있음을 시사한다.
- 최근 연구는 중재절차에 참여하는 중재시술의사나 기타 의료진의 눈 수정체에 방사선 유관 수정체 혼탁(전백내장) 발생률이 높음을 보였다.
- 중재시술실에서 종사하는 의료진에 대한 합당한 방사선량 감시가 필수적이지만 세계 여러 곳에서는 개인선량계가 가용하지 않거나 일상적으로 패용하지 않고 있다. 이런 이유 때문에 직무피폭 선량 데이터가 항상 믿을 만한 것이 아닐 수도 있다.
- 관련된 모든 사람을 위해 병원에서 직무피폭 방호와 안전문화에 관한 지침이 필요하다.

1.1. 배경

(1) 복잡하고 위험이 큰 전통적 수술의 대안으로 내과나 외과 여러 분야 전문의가 방사선사와 간호사의 도움을 받아 방사선촬영 안내 중재술을 수행한다. 이 접근은 여러 장점이 있는데, 전통적 수술법에 비해 중재술이 덜 침습적이고 회복기간이 짧으며, 일부 절차에서는 부작용률이 낮다(NCRP 2010).

(2) 어떤 의사(예: 영상의학자)는 다수 장기계통이 관계하는 중재술을 수행하며, 또 어떤 의사(예: 심장학자, 소화기방사선학자, 비뇨기학자)는 한 두 장기체계에 대해 수행한다. 하지동맥질환 치료를 위한 혈관내절차와 같은 일부 중재술은 과거에는 주로 영상의학자가 수행했지만 이제 혈관외과의사나 심장학자가 수행하는 비율이 증가하고 있다(Goodney 등 2009, Harris 등 2011). 미국의 경우 영상의학자는 이들 절차의 20% 미만을(Goodney 등 2009), 모든 형광투시 안내 중재절차의 35% 미만을(NCRP 2009) 수행한다.

(3) 새로운 유형의 방사선 영상안내 중재술의 빈도, 다양성 및 복잡성이 증가하는 것은 이러한 중재술의 이점이 확장됨을 의미한다. 그러나 이는 피폭을 증가시켜 기술발전으로 얻는 선량감축을 상쇄하는 것으로 나타난다(Kim 등 2008). 나아가 중재시술자의 직무피폭 선량이 의료계 종사자에서 관찰되는 가장 높은 축에 속한다(Padovani 등 2011). 많은 보건관리 상황에서 의료진에 대한 합당한 직무피폭 감시가 결여되고 그 결과 신뢰할만한 직무피폭 선량 데이터가 드물다(Padovani 등 2011, IAEA 2014b). 너무 자주 개인감시 배지를 간헐적으로만 또는 부적절하게 패용하거나(Padovani 등 2011) 감시가 수행되지 않고 있다. 일부 개발도상국에서는 선량 감시체계조차 없다(Tsapaki 등 2009). 나아가 과거 연구에서는 사용한 선량계측 방법이 크게 다르거나(Kim 등 2008), 사용하는 선량계 수나 선량계를 신체의 어디에 패용하는가에 대한 합의가 없어 보고된 선량계측 결과를 비교하기 어렵다. 모든 유형 절차에서 유효선량을 적격히 평가하는 알고리즘이 없다는 사실이 어떤 알고리즘을 사용해야 하는가에 대한 국제적 합의를 어렵게 만든다.

(4) ICRP는 일부 조직반응이 특히 매우 늦게 발현하며 그 문턱선량이 과거에 생각했던 것보다 낮거나 그럴 수 있을 것임을 시사하는 최근의 역학적 증거를 검토했다. 눈 수정체 경우가 그러하다(ICRP 2011). 근래 연구는 방사선 방호장구를 적절하게 사용하지 않고 방호원칙을 준수하지 않은 때 중재 심장학자의 눈 수정체에 방사선 관련 혼탁의 발생이 증가함을 보이고 있다(Vañó 등 1998, 2010, 2013a, Ciraj-Bjelac 등 2010, Rehani 등 2011, Jacob 등 2012). 중재시술자의 손과 다리에 상당히 높은 선량이 관찰되기도 했고(Balter 2001), 방호장구로 보호되지 않은 다리의 일부에서 탈모가 발견되기도 했다. 동일 유형 절차에서 관찰된 시술자 선량의 큰 편차는 방사선방호 관행을 개선할 여지가 있음을 시사한다(Kim 등 2009).

(5) 중재절차에 참여하는 의사의 방사선방호 훈련수준은 다양하다. 예를 들어 많은 나라에서 영상의학자는 영상의학 교육과정의 일환으로 방사선물리, 방사선생물학과 방사선방호 및 안전에 관한 훈련을 받지만, 다른 전문분야 의사는 방사선 관련 주제의 교육량이 다양하며 그 인정과정의 일부로 시험이 있을 수도 없을 수도 있다. ICRP 113(2009b)에 교육훈련, 훈련받을 전문가, 목적, 내용, 관리 방식, 인증 및 증명에 관한 권고를 제공했다.

(6) 여러 국가 또는 국제 의학회가 직장 방호를 개선하고 수정체 혼탁과 같은 종사자 방사선상해를 예방하기 위한 지침을 채택해 왔다(Miller 등 2010, Durán 등 2013).

(7) ICRP는 중재시술의사 및 X선 안내 중재술에 관여하는 기타 보건관리 종사자의 직무 방사선방호에 대한 실질적 조언을 ICRP 85(2000b)와 ICRP 117(2010a) 및 ICRP 120(2013a)로 제공한 바 있다.

1.2. 이 간행물의 목적

(8) 이 간행물의 목적은 중재술에 참여하는 사람뿐만 아니라 병원 관리자, 의학물리사, 직장 방호에 책임 있는 사람, 공급사의 임상적용 지원인력, 선량계측 서비스 담당자, 규제자 및 전반적 병원 안전문화에 영향을 미치는 모든 사람을 위한 방사선방호 지침을 제공하는 것이다.

(9) 이 지침은 직장 방사선방호를 위한 도구와 방법, 피폭감시 전략, 방호복의 선택과 사용 및 시험, 방사선방호 프로그램 개발, 교육훈련, 그리고 프로그램 이행을 위한 품질보증을 포함한다.

1.3. 간행물의 범위

(10) 이 간행물에서 제공하는 지침은 CT, 콘빔CT(CBCT), PET-CT, 선택적 내부방사선요법(SIRT)을 포함하는 방사선촬영 안내 중재술에 적용된다. 그러나 중재절차의 거의 대부분은 X선 형광투시 안내 중재술과 영상획득 시리즈에 관련되므로, 이 간행물에서 특별한 언급이 없으면 중재절차는 X선촬영에 의한 것을 말한다. PET-CT와 SIRT도 중재시술실에서 이루어지고 중재방사선학과 연계해 이루어지므로 이들에 관한 절을 포함시켰다. 중재절차와 관련된 양과 단위에 대해서는 부록 B에 요약했다.

(11) 이 간행물의 목적에서 중재절차는 보통 국부마취나 경정맥 진정과 함께 경피 또는 다른 접근로를 통해 수행되고 안내되는 진단이나 치료로서, 병소나 진료 사이트를 확인 및 특성화하거나 치료를 조절하고 기록하기 위해 형광투시나 CT, PET 형태로 방사선을 사용한다.

제2장 이슈

- 선진국이나 개발도상국 모두에서 방사선 촬영으로 안내되는 중재술 건수는 크게 증가하고 있다. 새 유형 중재술은 복잡도도 높아져 장시간 X선촬영을 요구해 종사자 방호 이슈를 제기한다. 중재방사선학자나 심장학자 뿐만 아니라, 이제 통상 방사선방호 훈련이 거의 없거나 전무한 다른 전문의들도 중재안내 사용자가 되어 있다.
- ICRP가 새로운 수정체 선량한도를 권고했기에 눈의 방호 없이는 수정체 등가선량이 직무를 제한하는 선량이 될 수 있다.
- 근래 연구는 수정체 후방 낭하 변화 발생이 크게 증가했음을 보였다. 그러나 적절히 방호하면 방사선 백내장 위험은 큰 폭으로 줄일 수 있다.
- 방사선안전 전문가가 선량을 줄이고 방사선방호를 최적화하도록 개선을 제안하는 데 필요한 정보를 갖기 위해서는 믿을만한 피폭감시가 필수적이다.
- PET이나 SIRT가 관련된 중재술은 방사선방호에 새롭고 다른 도전을 제기한다. 그러나 신중한 최적화와 방사선장에 대해 주의를 기울이면 시술자의 유효선량을 적절한 범위 내에 유지할 수 있다.

2.1. 중재절차

2.1.1. 중재 형광투시 절차

(12) 세계적으로 중재절차 수가 크게 증가하고 있다. 미국에서는 2006년에 중재 형광투시 절차가 환자 의료피폭에서 세 번째로 큰 피폭원이었는데, 집단유효선량으로 의료피폭의 14%(0.43 mSv/y)를 차지했다(NCRP 2009). 심장도관 진단을 포함하는 심장 형광투시 절차는 총 중재 형광투시 절차의 28%에 해당하지만 중재 형광투시 피폭은 53%를 차지했다. 유럽 36개국에서는 형광투시로 안내되는 모든 중재술 빈도는 모든 X선 절차의 0.03~2.74% 범위에 있고 평균으로 0.6%이다. 집단선량으로는 중재절차로 인한 의료피폭 기여는 0.001~0.34 mSv/y로서 총 집단선량의 0.4~28.7%에 해당한다(EC 2015). IAEA 과제의 일환으로 조사한 11개 개발도

상국 중 7개국에서 2004년과 2007년 사이 수행된 중재절차 수가 50% 이상 증가했음을 보였다(Tsapaki 등 2009).

2.1.2. CT안내 중재절차

(13) 중재술은 CT 안내로도 수행될 수 있다. 수행된 CT 안내 중재술 수나 그 시간적 경향에 관한 데이터는 상대적으로 빈약하지만 그 수나 절차 유형이 증가하고 있음은 분명하다. 예를 들어 미국 Mayo클리닉에서 CT 안내로 수행된 영상안내 경피 폐 생검의 백분율은 1996~1998년 66%에서 2003~2005년에는 98%로 증가했다(Minot 등 2012). 나머지는 형광투시 안내로 수행한 것이다. CT는 주로 초음파나 형광투시로 잘 볼 수 없는 흉부, 복부 및 골반의 깊거나 작은 병소의 생검을 안내하기 위해, 그리고 다른 절차에서 바늘 정위를 안내하기 위해 사용된다.

(14) CT 안내 중재술은 의사가 이동형 차폐 뒤로 피하거나 중재시술실 밖으로 나간 동안 간헐적으로 CT 스캔을 수행하거나, 바늘이나 기구를 조작하면서 의사의 제어로 간헐적 또는 연속적 CT 형광투시법으로 수행한다. CT 형광투시는 피부 진입부터 목표점까지 바늘 궤적을 가시화함으로써 CT 안내 생검 절차를 편리하게 한다. CT 형광투시는 다양한 비혈관 중재술에 적용 가능하다(Darly와 Templeton 1999). CT 형광투시는 체액 집적이나 농양 배액, 척추 통증관리, 종양절제, 목, 흉부, 복부, 척추 및 골반의 경피침생검을 수행하는 동안 바늘 안내에 사용된다(Buls 등 2003, Joemai 등 2009, Hoang 등 2011, Trumm 등 2012). 표준 CT 대비 CT 형광투시의 주된 장점은 환자 호흡이나 기타 움직임의 결과로 체내에서 움직이는 병소에 접근하도록 실시간 감시를 사용할 수 있는 역량이다. 이 기술 사용은 중재시술을 보다 빠르고 효율적으로 수행할 수 있게 하기에(Gianfelice 등 2000b) 인기를 얻고 있다. 한편으로는, CT 형광투시도 환자와 시술자 모두에게 더 높은 선량을 준다(Gianfelice 등 2000a, Saidatul 등 2010, Kim 등 2011). CT 형광투시 영상은 일반적 CT보다 잡음이 높기 때문에 폐 생검처럼 움직이는 고대비 물체에 대해 적용하는 것이 지배적이다.

2.1.3. 선택적 내부 방사선요법(SIRT)

(15) 현재로서는 1차 또는 2차 간암 환자의 20% 미만이 치유된다. 따라서 순수 베타 방출체인 ^{90}Y 마이크로구로서 방사선색전을 위한 중재절차(SIRT) 또는 국부치료 loco-regional therapy와 같은 통증치료가 절제할 수 없는 간 종양 환자를 치료하는

대안 요법이 되고 있다(Camacho 등 2015).

(16) 간동맥을 특성화한 뒤 ^{90}Y 마이크로구(최대 베타에너지 2.27 MeV, 반감기 64.1 h)를 형과투시 안내로 전달한다. 두 유형 ^{90}Y 마이크로구가 사용되는데 수지 마이크로구(SIR-Sphere, SIRTEX, 호주 Lane Cove; 직경 20~60 μm)와 유리 마이크로구(TheraSphere, Nordion, 캐나다 Ottawa; 직경 22 μm)이다.¹⁰⁾ SIRT 원리는 악성환부로 주요 간동맥 공급을 막는 것이다. SIRT는 환자 생존시간을 상당히 증가시키는 것으로 나타났다(Bester 등 2012).

(17) 보통 SIRT는 2단계로 수행되는데, 첫 단계에서는 진단 혈관조영술을 비표적 동맥의 보호폐색과 결합하여 수행한다. 다음으로 간동맥에 주입한 $^{99\text{m}}\text{Tc-MAA}$ ¹¹⁾ 입자로 폐와 상복부에 대해 단일광자방출 전산화단층촬영(SPECT) 스캔을 이용해 폐의 지름길(단락)을 평가한다. 폐 질러가기가 <10%이면 온전한 ^{90}Y 방사능을 전달할 수 있다. 질러가기 10~20%이면 약간 줄인 ^{90}Y 방사능(20~40% 적게)이 권고된다(SIRTEX). 질러가기가 20%를 넘으면 SIRT를 금기로 본다. 보통 하루 이상 지난 후 수행하는 둘째 단계는 간동맥이나 기타 간종양에 공급하는 동맥에 도관을 설치하고 마이크로구를 투여하는 것이다. 둘째 단계 동안 비표적 동맥에 대한 일시적 풍선 폐색과 역류방지 도관설치가 마이크로구 전달에 앞선 방호폐색의 대안이 될 수 있다(Hagspiel 등 2013, Fischman 등 2014).

(18) 둘째 단계에는 선량계산, ^{90}Y 구 준비 및 도관을 통한 간동맥 주입이 포함된다. 전형적 방사능은 수지구는 2~3 GBq(Jakobs 등 2007), 유리구는 3~7 GBq(Andrew 등 1994)이다. 목표 선량은 전형적으로 120 Gy(범위 80~120 Gy)이다. 핵종분포는 평판촬영, SPECT 제동복사 촬영 또는 PET-CT로 검사할 수 있다. PET-CT가 높은 공간분해능을 가지며 전달된 방사능의 정량화가 더 정확할 것으로 본다(Camacho 등 2015).

2.1.4. 중재절차에 PET 사용

(19) PET은 보이지 않고 가시화하기 어렵거나 CT나 MRI로 검출되지 않는, 생리학

10) <역주> 이 밖에도 ^{166}Ho (반감기 26.8 시간)를 생분해성 수지인 PLLA와 결합한 마이크로구가 네덜란드 Quirem Medical사에 의해 개발되어 유럽에서 시판 중이다. ^{166}Ho 은 반감기가 다소 짧은 것은 장점이지만 81 keV 감마선을 약간 방출하므로 취급자 선량을 증가시키는 단점도 있다.

11) <역주> MAA: macro aggregated albumin 대응집 알부민

적으로 활성인 표적에 대해 영상안내 기법을 제공하기 때문에 영상안내 중재술에서 역할이 증가하고 있다(Ryan 등 2013). 여러 병원이 연구 프로그램 일환으로 생검이나 RF 절제와 같은 중재절차 중에 실시간 PET-CT 안내 사용을 탐험하고 있으며(Purandare 등 2011, Venkatesan 등 2011, Ryan 등 2013a, Aparici 등 2014, McLoney 등 2014), CT와 PET 영상을 사용하는 실시간 융합 촬영도 개발하고 있다(Purandare 등 2011, Beijst 등 2016). 중재시술실에서 PET과 복수 기 통합촬영법 사용은 효과적 색전이나 생검 위치 식별을 도울 뿐만 아니라 치료 효과의 즉각적 평가도 제공할 수 있다.

2.2. 중재절차에서 방사선 유형과 에너지

(20) 대부분 중재절차는 형광투시와 영상획득 시리즈의 조합으로 수행된다. 빔 스펙트럼은 관전압과 여과에 따라 달라지는데 관전압은 50~125 kVp, 부가필터는 구리 1 mm까지 사용된다(NCRP 2010). 관전압이나 관전류, 펄스 지속시간, 그리고 종종 빔 여과와 같은 운전변수와 빔 품질은 시스템의 자동노출조절이 제어한다(NCRP 20101). 영상획득 모드에서는 낮은 관전압(예: 68~84 kVp 및 3.5~4.0 mm 알루미늄 반가층)이 사용되는 반면, 낮은 선량 모드에서 형광투시를 위해서는 높은 빔 투과(즉, 더 높은 kVp와 여과)가 사용된다(예: 88~114 kVp 및 8~10 mm 알루미늄 반가층)(Principi 등 2014). 어떤 장비에서는 낮은 관전압(옥소 함유 조영물의 가시화 증강을 위해)과 증가된 여과(낮은 관전압에 수반되는 환자선량 증가를 제한하기 위해)의 조합으로 영상획득을 위한 스펙트럼 조형을 수행한다¹²⁾(NCRP 2010). 직무피폭과 가장 관계가 큰 환자 주변 산란방사선 분포는 제5장에서 논의한다.

(21) CT 형광투시에서는 관전압이 80~140 kVp 범위이다. ¹⁸FDG를 사용하는 PET-CT 검사에서 511 keV 광자 에너지는 전통적 중재절차에서 산란방사선 에너지보다 훨씬 높다(NCRP 2010). SIRT에 사용되는 ⁹⁰Y의 최대 베타에너지는 2.27 MeV이다. 거의 대부분 중재절차는 X선촬영으로 안내되는 절차이므로 이 간행물에서는 특별히 말하지 않으면 X선안내 중재절차를 의미한다.

12) <역주> 관전압을 높이면 방출 X선 스펙트럼이 높은 쪽으로 확장되며 출력도 높아진다. 부가필터를 증가시키면 낮은 에너지 X선을 차단하여 스펙트럼을 경화시킨다.

2.3. 직무피폭

2.3.1. 유효선량

(22) 직무피폭 데이터에 관한 요약과 편집물이 여럿 있다(Kim 등 2008, ICRP 2010a, NCRP 2010). 활발한 중재시술자가 자신의 연간 직무 유효선량을 10 mSv 미만으로 유지할 수 있음은 분명한데, 전형적으로는 유효선량이 2~4 mSv 혹은 그 이하이지만 조사결과 개인 직무피폭 선량이 이 값을 초과할 수도 있는 것으로 나타났다(Padovani 등 2011).

(23) 의료진이 받는 연간 유효선량은 중재시술팀(주로 중재시술의사, 방사선사, 간호사, 마취사)에서 개인의 기능과 역할, 중재시술 수, 사례의 의학적 특성 및 복잡성, 환자집단(예: 소아 환자, 동통한 환자), 그리고 중재시술의사의 솜씨나 기기와 같은 기타 인자뿐만 아니라 형광투시나 영화 모드 시간에도 달려있다. 문헌 검토에서 Martin(2009)은 연간 심장절차 500건 업무량이 주 중재시술의사에게 연간 유효선량 약 2 mSv를 줄 것으로 평가했다. Glasgow의 한 병원 심장학자에서 최대 연간 선량 1.2 mSv[납치마 아래서 측정된 $H_p(10)$]가 관찰되었다(Maritin 2009). 중재시술의사에게 절차 당 유효선량 10 μ Sv 이상을 주는 다른 유형 절차는 갑상선 보호대 착용 여부에 따라서는 많게는 10 mSv까지 줄 수 있다. Lie 등(2008)은 납치마 아래와 위에 패용한 두 선량계 판독을 결합해 평가하여 평균 유효선량 5 mSv와 최대 11 mSv를 보고했다. 미국에서 한 선량계측 서비스가 2011년과 2012년에 수행한 월간 유효선량 검토 결과를 그림 2.1에 보인다. 종합해서 102,199건 관측은 두 선량계(납치마 아래와 위에 각 하나)로 감시한 종사자에 대한 것이고, 196,526 관측은 납치마 위 목깃에 패용하는 한 선량계로 감시한 종사자에 대한 것이다. 결과로 평가된 유효선량 평균은 각각 0.12 mSv와 0.27 mSv였으며 중앙값은 각각 0.03 mSv와 0.1 mSv였다(Yoder와 Salasky 2016).

(24) Sánchez 등(2012)은 1467 절차를 수행한 종사자 43명에 대한 연구에서 월간 납치마 아래 선량으로 심장학자는 0.11 mSv, 간호사는 <0.01 mSv임을 발견했다. 납치마 위 선량은 심장학자와 간호사 모두에서 0.4 mSv/월을 보였다. 저자는 많게는 심장학자 50%가 개인선량계를 바르게 패용하지 않았을 것이며 종종 납치마 위 선량계를 패용하지 않았을 것 같다고 언급했다(Sánchez 등 2012). 독일의 14개 병원에서 9 유형 절차를 수행한 의사 39명에 대한 다수기관 연구는 절차 당 몸통 선량 중앙값은 차폐하지 않은 사람에게는 16 μ Sv이고, 국부 등가선량은 눈 수정에

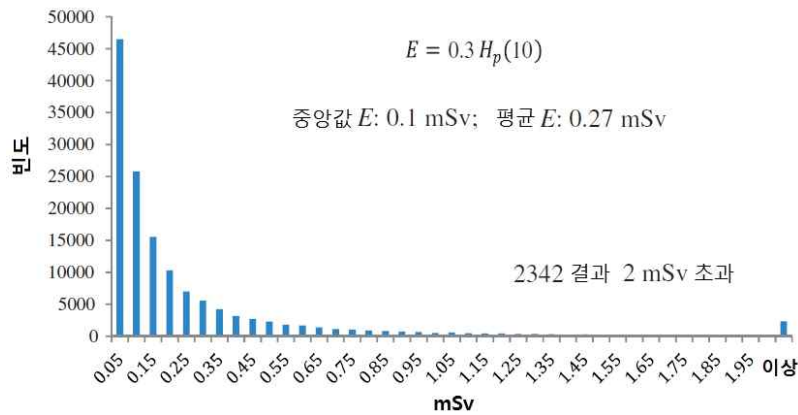
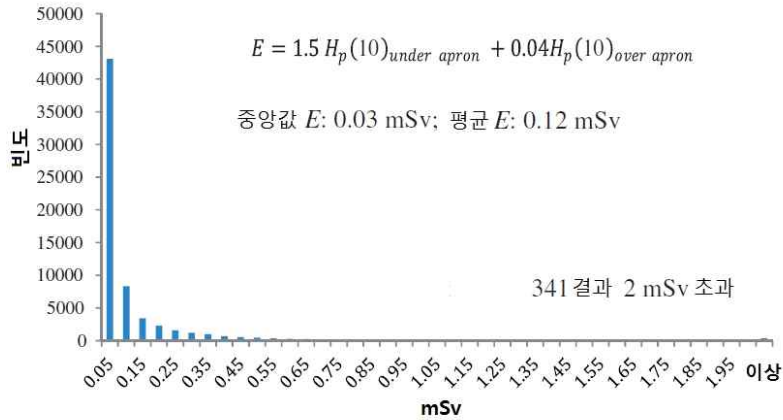


그림 2.1. 평가된 유효선량(E) 분포. (위) 두 선량계(납치마 아래와 위 하나씩)로 평가, (아래) 납치마 위 선량계 하나로 평가(Yoder와 Salasky 2016).

2.8 μSv , 갑상선 4.1 μSv , 한 발은 44 μSv , 한 손은 75 μSv 였다. 손에 높은 선량이 측정되었는데 때로는 선량한도 500 mSv를 초과했다(Hausler 등 2009).

(25) 주 중재시술의사뿐만 아니라 마취사와 같은 다른 의료진도 유의한 피폭을 받을 수 있다. Kong 등(2015)은 마취사의 방사선피폭은 업무량뿐만 아니라 중재절차 과정에서 그들의 위치와 빔 투사방향에도 크게 의존함을 보였다. 빔 투사방향은 유효선량에 대해서는 10배까지, 수정체 선량에는 200배까지 차이를 낸다. 좌측방 투영일 때 환자에 근접하면 높은 선량을 초래한다. 마취장비의 최적 배치가 피폭을 줄이는 데 유용한 것으로 나타났다.

(26) CT 형광투시 안내 중재술에서 직무피폭 데이터는 제한적이다. 의사의 손, 눈 및 갑상선이 가장 높게 피폭한다(Saidatul 등 2010). 갑상선차폐 사용은 갑상선에 큰 방호를 제공하는데(Saidatul 등 2010), 이는 젊은 전문가에게 특히 중요하다. 평균 환자선량이 절차 유형에 따라 달라지므로(Leng 등 2011), 절차 당 의사의 평균 유효선량도 예상하는 바와 같이 절차 유형에 의존한다. 납치마 위에서 측정된 평균 $H_p(10)$ 보고 값은 $2\sim 25\mu\text{Sv}$ 범위이며 최댓값은 절차 당 0.4 mSv나 되었다(Paulson 등 2001, Teeuwisse 등 2001, Joemai 등 2009). 직무피폭을 감축할 수 있는 다양한 기술적 접근과 방호법이 개발되어 왔다(Day와 Templeton 1999, Paulson 등 2001, Carlson 등 2005, Hoang 등 2011).

(27) 대동맥 밸브 경도관 교체(transcatheter aortic valve replacement)나 경도관 이식에서 받는 직무피폭은 접근(경대퇴동맥 또는 경꼭지(transapical))에 따라 다르다. Shatila(2015)는 주시술자의 납치마 위 선량계에서 절차 당 0.23 mSv까지의 $H_p(10)$ 값을 얻었으며(중앙값은 0.11 mSv), 나머지 의료진 10명 중 8명도 상당히 피폭했다.

2.3.2. 수정체 등가선량

(28) ICRP는 특히 매우 늦게 발현하고 문턱선량이 이전에 생각했던 것보다 낮거나 낮을 것 같은 일부 조직반응이 있음을 암시하는 역학적 증거를 검토 후, 2011년에 성명을 내고 ICRP 118(2012)의 일부로 발간했다. 눈 수정체에 대해서는 이제 흡수선량 문턱을 0.5 Gy로 본다. 계획피폭상황에서 직무피폭에 대해 ICRP는 수정체 등가선량 한도로 규정된 5년 동안 평균하여 연간 20 mSv 이내에서 단일 연도에 50 mSv를 권고했다. 보안경이 없으면 눈 수정체 선량이 개정된 선량한도를 초과할 수 있어서 수정체 선량이 직무에서 제한적 선량이 될 수 있다(Lie 등 2008, Korir 등 2012).

(29) 눈 피폭에 관한 대부분 데이터는 정적 실험이나 목에 패용한 개인선량계로부터 온 것이다. 소수 연구에서만 눈 근처 앞머리에 선량계를 두었다. 주로 심장절차이지만 Lie 등(2008)은 144 절차에서 왼쪽 눈과 눈 사이에 둔 열발광선량계를 비교했다. 절차 당 수정체의 등가선량 중앙값은 $23\mu\text{Sv}$ 였고 환자를 향한 1차 빔의 커마면적곱 당 등가선량 중앙값은 $0.4\mu\text{Sv Gy}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 이었다. 왼쪽 눈 선량이 양미간 선량보다 높은 경향이었는데 보통 왼쪽 눈이 X선관에 더 가깝기 때문이다. Kicken 등(1999)은 X선관을 침상 아래 둘 때와 위에 둘 때 이마에서 흡수선량을

평가하였는데, 한 병원에서는 시술자와 보조자의 평균 흡수선량이 각각 $8 \mu\text{Gy}$ 와 $6 \mu\text{Gy}$ 였고 다른 병원에서는 16과 $14 \mu\text{Gy}$, 셋째 병원에서는 43과 $28 \mu\text{Gy}$ 로 나타났다. 앞의 두 병원에서는 침상 하부 X선관 방식을 사용한 반면, 셋째 병원에서는 침상 위에 X선관을 두어 의료진 머리가 빔이 들어가는 환자의 조사체적에 더 가까웠다. Vañó 등(2016)은 납치마 위에서 측정한 선량으로부터 수정체 선량을 도출하고 신장절개결석제거술nephrolithotomy 절차 당 비뇨기과전문의 수정체 선량을 심장중재학자와 영상의학자의 선량과 비교했다. 이 보고는 비뇨기과에서 방호차폐의 결여로 비뇨기전문의의 선량이 천정걸이 차폐를 사용하는 심장중재학자보다 18.7배였다고 결론지었다.

(30) 의료인에게서 방사선방호 최적화에 관한 유럽 연구에서 심장절차 3종과 일반중재절차 5종에 대해 TLD 측정과 몬테칼로 시뮬레이션 캠페인을 수행했다(Vanhavere 등 2012). 절차 선정은 종사자 연간 피폭 잠재성에 근거했다(즉, 빈도가 높거나 커마면적곱이 크거나 또는 양쪽 모두인 절차). 시술자는 색전술 절차와 팔다리 또는 신장 동맥에 대한 경피경정맥 혈관성형술에서 많은 피폭을 받는 것으로 나타났다. 뇌동맥이나 경동맥 절차에서는 시술자 선량이 상대적으로 낮았는데, 대개 대퇴부 접근을 선택함으로써 흉부 혹은 복부 영역에 대해 수행되는 다른 절차에 비해 조사되는 환자 부위로부터 시술자가 멀리 서기 때문이다. 디지털 차감혈관조영술(DSA)과 PTA에서 수정체 등가선량은 약 $40 \mu\text{Sv}$ 였고, 색전술에서는 $120 \mu\text{Sv}$ 까지 이르렀다. 측정 캠페인에 포함된 심장학 절차에서는 심박동기와 심장세동제거기 이식이 커마면적곱이 상대적으로 작음에도 불구하고(이들 중재절차에는 형광투시만 사용되었기 때문이다.) 시술자 선량이 높았다. 이들 절차에서 종사자 선량이 높은 이유는 시술자가 조사빔에 매우 가까이에서 일하고 종종 방호차폐 없이 작업하기 때문이다. 평균 눈 선량은 $40\sim 60 \mu\text{Sv}$ 범위에 있었다.

(31) 다른 연구에서는 일부 중재시술의사의 연간 눈 등가선량이 $50\sim 100 \text{mSv}$ 범위에 이를 수 있다고 적시한다(Vañó 등 2008a, Ciraj-Bjelac 등 2010, Koukorava 등 2011, Jacob 등 2013, Martin과 Magee 2013, IAEA 2014b, Principi 등 2015). 그래서 적절한 방사선방호 수단이 강구되지 않으면 업무량이 많은 중재시술의사 수정체 선량이 개정된 수정체에 대한 선량한도 20mSv (ICRP 2012)를 초과하기 쉽다.

2.3.3. 손 등가선량

(32) X선관이나 X선빔 경로에 가장 가까운 의사나 보조자의 팔다리 특히 손의 선량은 몸통에서 평가된 선량보다 훨씬 높을 수 있다는 것은 손의 피폭과, 다소 덜 보편적인 상황이지만 방호차폐가 X선관 훨씬 아래 발 높이까지 내려오지 않는다면 발의 피폭도 특별히 감시할 필요성이 있음을 시사한다. Felmlee 등(1991)은 Mayo 클리닉에서 경간담관조영술, 담도배액술, 신루설치술 절차를 포함한 30 사례에 대해 손 선량을 다른 세 연구와 비교했다. 절차 당 측정된 최대 손 선량은 5.5 mGy 였고 중앙값은 1 mGy였다. 참조한 다른 연구는 절차 당 손 선량이 신경중재술에서 0.01 mGy로부터 말초혈관조영술에서 0.4 mGy까지 범위로 보고되었다. Whitby와 Martin(2005)은 18편 연구를 검토했는데 절차 당 손 선량이 0.01 mGy 미만으로부터 거의 2 mGy까지 보고되고 있었다. 손 선량에 영향을 미치는 중요 인자는 절차 유형, 사용한 X선장비, 시술자 숙련도, 그리고 특히 접근로(순방향 대퇴동맥 접근이 뚫뚫한 환자에서는 어려워 더 높은 선량을 낼 수 있다)였다. Sauren 등(2011)은 경꼭지 접근으로 경도관 대동맥밸브 설치나 교체에서 절차 당 손 선량을 약 2 mSv로 보고했다.

(33) 유럽연합의 '의료진 방사선방호 최적화(Optimization of Radiation Protection for Medical Staff(ORAMED) 연구'에서는 절차 당 왼손의 평균 등가선량은 하지 DSA/PTA에서 약 240 μ Sv, 색전술에서 약 320 μ Sv, 뇌 DSA/PTA 절차에서 약 60 μ Sv였다. 심장세동기 이식에서는 왼손 손가락 평균선량이 410 μ Sv를 기록했고 심장혈관 조영술과 성형술 및 RF 색전술에서 평균 선량은 각각 180 μ Sv 및 60 μ Sv이었다(Vanhavere 등 2012).

(34) Felmlee 등(1991)은 모의체 입사선량률과 출구선량률이 각각 65 mGy/분과 0.7 mGy/분일 때 12 cm×15 cm 조사야로부터 거리별로 산란선을 측정했다. 측방 투영일 때 산란선량률은 거리 0 cm에서 0.7 mGy/분에서 거리 5 cm에서 0.13 mGy/분, 거리 15 cm에서 0.13 mGy/분이었다. 보고된 손 선량 차이는 X선빔 근처에서 선량률의 큰 구배, 손의 움직임과 정지, 그리고 X선관이나 환자와 의사 사이 상대적 위치를 다르게 요구하는 중재절차의 접근경로(대퇴동맥, 경피, 또는 내경정맥 도관삽입(internal jugular vein catheter insertion) 차이로 설명했다(Whitby와 Martin 2005, Martin 2009). 침상 위 X선관에서는 1차빔 산란이 더 많아 손 선량이 훨씬 높았다.

(35) CT 형광투시에서 부실한 기술은 의사의 손이 직접빔에 들어가게 만들어(Buls 등 2003) 수 분만에 연간 선량한도인 500 mSv에 이를 수 있다.

2.3.4. 하지 등가선량

(36) Artschen 등(2014)은 복부 절차를 모사한 모의체 조사와 실제 중재시술의사가 시술할 때 직무 유효선량을 구했고, 치료 침상 측면에 걸이 커튼을 사용했음에도 하지의 연간 등가선량 값이 110 mSv까지 이르는 것을 발견했다. 이 피폭은 방호 커튼과 바닥 사이 틈 때문으로 보았는데 틈 크기는 치료침상 높이에 따라 달랐다. 결과적으로 담도절차나 키 큰 중재시술자처럼 높은 침상을 요구하는 절차에서는 하지 선량이 증가할 수 있다.

(37) 위 연구 그룹은 방호 없이는 커튼이 있어도 절차 당 다리 평균 선량이 0.19~2.61 mSv로서 하지 선량이 손 선량을 종종 능가함을 발견했다(Artschen 등 2014). ORAMED 연구는 다리 선량이 160~250 μ Sv 범위에 있음을 보였다.

2.3.5. SIRT에서 직무피폭 특별 이슈

(38) SIRT의 여러 단계에서 상이한 사람들이 피폭한다.

- 핵의학 기사나 핵의학약사는 투여전 ^{90}Y 마이크로구를 준비하고 교정하면서 피폭한다.
- 중재시술자와 기타 의료진은 간동맥으로 경도관 주입 과정에서 피폭한다.
- 간호사는 절차 후 환자 퇴원까지 기간에 피폭한다.

(39) SIRT에서 직무피폭 선량에 대해서는 수편의 논문만 발간되었다. SIRT에서 직무피폭은 X선으로부터 상대적으로 낮은 선량률로, 그리고 주의가 부족하다면 직접 베타방사선에 의해 특히 손이나 손가락에 상대적으로 높은 방사선량률로 발생한다. 개별 환자에 대한 투여량을 준비하는 종사자의 손에 받는 선량이나 마이크로구를 이식하는 의사의 선량에 추가하여, 오염 위험요소가 내재한다. 오염 위험요소를 줄이기 위한 구체적 조언은 제5장에서 제시한다. 피폭데이터는 5 mL 주사기에 접촉한 피부 등가선량률은 $43.5 \text{ mSv MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 1 cm^2 에 $50 \mu\text{L}$ 오염된 피부 등가선량률은 $1.35 \text{ mSv kBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 이다(Kemerink 등 2012).

2.3.6. PET 안내 중재절차에서 직무피폭 특별 이슈

(40) ^{18}F FDG는 511 keV 광자 에너지를 갖는데 이는 CT나 형광투시 안내 절차에서 전형적인 산란광자 에너지보다 훨씬 높다(NCRP 2010). PET 투여를 받은 환자로 부터 방사선량을 평가한 여러 연구가 있다(Chiesa 등 2006, Benatar 등 2000, White 등 2000, Seierstad 등 2006, Heckathorne과 Dahlbom 2008, Hippelainen 등 2008, Nye 등 2009, Demir 등 2010, Quinn 등 2016). 이들 연구는 ^{18}F FDG 투여 직후 환자 가슴 앞에서 주위선량당량률의 무난한 대표가 1 m에서는 약 $0.09 \mu\text{Sv h}^{-1}\text{MBq}^{-1}$, 30 cm에서는 $0.37 \mu\text{Sv h}^{-1}\text{MBq}^{-1}$ 임을 보였다. 이 값은 계획이나 전망적으로 종사자 선량을 평가할 때 희망하는 시간과 거리에 대해 스케일링하는 데 무난하다. 구체적 측정 위치에 따라서는 이보다 낮은 값도 나타났다(Quinn 등 2016).

(41) PET-CT 안내 생검은 흔하지 않지만, CT만으로는 가능한 암 영역을 식별하는 데 충분하지 않을 때 수행된다(Werner 등 2011, Aparici와 Win 2014). PET-CT 안내 중재절차는 전형적으로 ^{18}F FDG를 사용한다. Ryan 등(2013b)은 직무피폭을 정량화했는데 절차 당 유효선량 중앙값이 주시술자는 0.02 mSv(0~0.13 mSv), 간호사나 마취사는 0.01 mSv(0~0.05 mSv), 방사선사는 0.02 mSv(0~0.5 mSv)로 나타났다. 시술자의 손발 등가선량 중앙값은 절차 당 0.05 mSv(0~0.62 mSv)였다. 종사자 피폭은 절차 지속시간과 시술실내 영상안내 사용과 상관성이 있었다. 저자는 PET-CT 안내 절차에서 시술자의 유효선량은 형광투시 안내 절차에서 전형적 선량과 유의하게 다르지 않다고 결론지었다. PET-CT 안내 중재절차에서 시술자에게 방사선피폭의 주 결정자는 환자에 접근하여 머무는 시간이다. 신형 PET 동위원소가 개발되면 환자 주변에서 선량 단면이 달라질 수 있다(Holland 등 2010, Williamson과 Dauer 2014).

(42) ^{18}F FDG로부터 손가락 끝 선량에 관련해 Sánchez 등(2015)이 FDG를 준비하고 주입하는 전자동시스템을 사용할 때 선량감축을 측정했는데, 방사성의약품을 준비하는 방사선사 손가락 끝의 평균 피부선량은 $223 \mu\text{Sv GBq}^{-1}$ 로부터 $83 \mu\text{Sv GBq}^{-1}$ 로 감소했다(63% 감축). 간호사 손가락 끝 평균 피부선량은 $83 \mu\text{Sv GBq}^{-1}$ 로부터 $11 \mu\text{Sv GBq}^{-1}$ 로 감소했다(87% 감축). 투여된 방사능 정확도는 2%였다.

2.4. 중재시술 참여 전문인에게서 보고된 방사선 상해

2.4.1. 눈 수정체 상해

(43) 눈에 방사선피폭은 혼탁으로 이어지는 특징 있는 수정체 변화를 초래한다. 그러한 혼탁의 초기단계는 시력상실을 초래하지 않을지라도 선량이 증가하면 그러한 변화의 심각도가 점진적으로 커져 시력상실 손상으로 이르게 된다. 그러한 변화의 잠복기는 선량에 반비례한다(ICRP 2012). 전형적 형광투시 작업조건에서 방사선방호 도구를 정상적으로 사용하지 않으면 중재시술의사나 환자 가까이서 일하는 의료진의 눈 피폭이 높다.

(44) 중재시술의사의 방사선 기인 수정체혼탁의 첫 보고 사례의 하나는 1998년에 있었는데, 방사선상해 이유는 최적화되지 않은 중재방사선실 사용과 방사선방호 프로그램의 부재였다(Vañó 등 1998). 2004년에는 Haskal(2004)이 중재방사선 시술 의사 59명에 대해 X선 관련 수정체 변화에 대한 시험적 연구를 보고했는데, 검사한 대상의 37%에서 방사선피폭과 일관된 수정체 후방의 변화가 관찰되었다(Junk 등 2004). 수정체 방사선량은 보고되지 않았지만, 저자들은 후방 낭하 수정체혼탁의 빈도와 심각도가 연령과 업무 연수의 함수로 증가하였기에 어떤 선량-영향 관계를 암시하는 것으로 적시했다.

(45) 이러한 발견에 따라 2008년 IAEA는 수정체 선량 추정과 가능한 수정체 혼탁을 평가할 목적으로 '선량과 수정체손상의 소급적 평가(RELID)'라는 과제를 조장했다.

(46) 개인 선량계측 데이터가 가용하지 않았으므로, 대부분 경우 직무피폭 수정체 선량은 신고한 종사 연수, 업무량, 형광투시나 영화노출 조건, 사용한 방사선기기, 시술실에서 종사자의 위치, 사용한 방사선방호 도구에 관한 정보를 발표된 전형적 산란선량 값(Vañó 등 2008a,b)과 결합하여 평가했다. 가용했던 일부 개인감시 배지 데이터는 그러한 상관관계를 평가하는 데 도움이 되었다.

(47) 후방 낭하 혼탁의 안과학적 검사에는 Merriam-Focht 스코어¹³⁾를 사용했다

13) <역주> 수정체 혼탁 정도를 반점 수와 투명도에 따라 0(깨끗함)~4.0(수정체 전후면이 완전 불투명)까지 0.5 간격으로 수치화한 스케일.

Merriam, G. and Focht, E. A clinical study of radiation cataracts and the

(Ciraj-Bjelac 등 2010,2012, Rehani 등 2011, Vaňo 등 2010,2013a). 스코어(즉, 0.5, 1.0, 1.5 등)는 양쪽 눈 각각에 대해 얻었다. 총 8회 조사(2008년 Bogotá, Kuala Lumpur; 2009년 Varna, Sofia, Bangkok; 2010년 Buenos Aires, 2011년 Kuala Lumpur 2차)가 RELID 연구로 수행되었다.

(48) RELID 연구는 심장도관 시술실 종사자에게서 방호도구의 바른 사용 없이 다년간 종사한 경우 수정체 혼탁 발병률이 증가를 보였다고 결론지었다. 대략 자발적으로 수정체손상 검사를 받은(심장학 학술대회 기간 중) 중재시술자의 40~50%, 기사나 간호사의 20~40%에서 방사선피폭에 기인한 손상과 양립 가능한 후방 낭하 혼탁이 발견되었다. 중재시술자에서 발병률은 피폭하지 않은 대조군에 비해 4~5배 높았다(약 40~50% 대 10%). 어떤 경우는 전 업무기간에 걸쳐 평가된 수정체 선량이 10 Gy에 육박했다. 그러나 수정체 혼탁이 시력을 상실하는 백내장으로 진행될지는 아직 불확실하다.

(49) 연구집단에서 방사선 유발 대비감도¹⁴⁾ 감소를 보고하지는 않았지만 최근 RELID 연구(Vaňo 등 2013a)에서 관찰된 수정체 변화가 있는 참여자의 약 20%에 대해 슬릿램프 검사로 제한적 대비감도 시험을 수행했다. 이들 참여자에게서 대조감도 곡선이 표준화 정규데이터에 비해 상당한 대비감도 감소를 보였다. 방사선량과 수정체혼탁 사이 상관관계를 찾기 위해서는 소급적 선량평가가 필요하다(Vaňo 등 2013a). 눈 수정체에 미치는 방사선 영향에 대한 포괄적 검토는 ICRP(2012)와 NCRP(2016)으로 제공되었다.

(50) 이들 연구 중 여럿에서 개인선량계나 방호도구가 일상적으로 사용되지 않았다. 이러한 결과는 제5장에 주어지는 권고에 따라 방사선방호를 개선할 필요성을 적시한다.

2.4.2. SIRT에서 보고된 사건

(51) Tosi(2003)는 단클론항체와 펩타이드를 사용하는 방사선면역치료를 수행하는 과정에서 사건을 보고했다. 150 GBq/mL 농도까지의 ⁹⁰Y을 사용했다. 시술자는 제공된 특수 집계를 사용하지 않고 직접 손으로 잡아 감쇠가 낮은 납무장갑(0.1 mm 납등가)과 덧낀 일회용 장갑만으로 방호되었다. 며칠 후 손가락 홍반이 발견되었

relationship to dose. Am. J. Roentgenol. 1957; 77: 759-785

14) <역주> 대비감도contrast sensitivity: 눈이 명암과 패턴의 미묘한 차이를 식별하는 능력지표.

다. 필름배지, 반지 TLD 판독결과와 소변 방사능은 정상이었다. 손가락 부위에 대해 평가한 선량은 12 Gy였다(베타입자 에너지, 바이얼과 장갑의 차폐 및 진술한 조작 시간에 근거해 평가).

2.4.3. 하지에 보고된 탈모

(52) 방호도구로 차폐되지 않은 다리부위에 탈모가 관찰되었는데, Wiper 등(2005)은 여러 선임 중재심장학자의 양 다리에 탈모가 일어나고 있음을 보고했다. 피부과 조언은 그 양상이 만성적 직무피폭으로 인한 방사선피부염과 일치하는 것으로 보았다.

2.4.4. 뇌암 증가 주장

(53) 중재절차에 참여한 의료종사자에게서 높은 뇌암 발생을 시사하는 몇몇 소규모 사례 시리즈(Wenzel 2005, Roguin 등 2013, Smilowiz 등 2013)와는 반대로, 미국 정신과의사와 비교한 미국 방사선의학자의 사망률에 대한 대규모 역학연구는 방사선 관련 암 사망 증가에 대한 증거를 드러내지 않았다. 이 연구에는 영상의학자 43 000 명, 중재시술자 45 000 명과 정신과의사 60 000 명을 포함되었다. 중재방사선학자는 정신과의사에 비해 뇌종양(주로 뇌 악성신생물) 위험이 낮게 나타났다. 10만 명 이상의 미국 방사선 기사(방사선사)에 대한 추적연구(longitudinal study)에서 뇌의 누적 직무피폭은 악성 두개내 종양 사망률과 관련을 보이지 않았다(Kitahara 등 2017). 형광투시 안내 중재절차에 종사한 것으로 보고한 방사선사에서 방사선량-반응 관련에 대한 증거는 없었다.

2.5. 피폭감시 난제

(54) 중재절차 종사자의 피폭감시에서 난제에는 간단하고 쉽게 이행할 수 있으며 지나치게 자주 조사¹⁵⁾하게 하지 않는 직무피폭 감시 접근, 하나 이상의 선량계 읽음값으로부터 유효선량과 등가선량의 평가, 종사자의 감시절차 준수가 포함된다.

15) <역주> 여기서 말하는 조사란 감시결과가 사전에 설정된 ‘조사준위’를 초과할 때 원인을 규명하여 필요한 시정을 위해 실시하는 자체조사(주로 방사선관리자나 품질관리자 주도로)를 의미한다.

(55) 종사자가 받은 유효선량은 몸통이나 허리에 패용한 선량계로부터 평가된다. 손발 감시에서는 손 선량계의 패용 편이 및 감염관리와 관련해 현실적 어려움을 가져온다. 특히 보안경을 쓴 경우 눈 선량 평가는 단순한 문제가 아닌데, 선량계를 보안경 안에 패용할 수 있는 장치가 개발되었다. 이에 대해서는 소절4.2.7에서 설명한다. 그러나 이런 선량계는 세계적으로 보편적이지 않고 일상적으로 사용되지도 않고 있다.

2.5.1. 개인선량계 오사용 및 비정규적 사용

(56) 조사결과 개인선량계의 오사용과 일관되지 않은 사용이 드러났다. IAEA ISEMIR 조사(IAEA 2014b)는 중재 심장학자의 76%만 항상 선량계를 패용하고 45%가 두 선량계를 사용함을 보였다. Sánchez 등(2012)은 의사 50%가 선량계를 패용하지 않거나 가끔 패용하고 신체의 엉뚱한 곳에 패용함을 지적했다. 또 이들은 월간 선량계 판독의 33%만 믿을만한 것으로 판단된다고 보고했다. 의사들은 간호사보다 선량계를 바르게 사용하는지 않는 것 같다. 미국의 한 선량계측서서비스가 제공한 형광투시 선량계 결과 데이터는 많은 판독에서 신뢰도가 부족한 것을 드러냈다. 신뢰할 감시자료 없이는 방사선방호 전문가가 피폭 감축이나 방호 최적화를 위한 도구나 제안을 제공하는 데 필요한 정보를 가질 수 없다.

(57) 비슷하게, 안과학적 연구(RELID 연구)에서도 중요한 지적은 비정규적 선량계 패용, 한 선량계를 목깃 높이 납치마 위에 패용하여 수정체 선량을 추론할 수 있도록 두 선량계 사용에 대한 ICRP 권고의 불성실 준수였다. Vañó 등(2013b)의 한 연구는 중재시술자의 약 50%만 개인선량계를 사용하고 30%만 일상적으로 패용한다고 보고했음을 보였다. 방사선사나 간호사의 약 90%가 개인선량계를 패용한다고 보고했지만 일상적 패용은 약 40% 뿐이었다. 선량계를 사용할 때도 대부분 납치마 안에 패용하고 있어 그 결과로부터 눈 선량을 소급적으로 평가하는 것은 부정확할 우려가 컸다. 이전 연구에서 Niklason 등(1993)은 종사자의 절반은 정규적으로 개인선량계를 패용하지 않는 것으로 나타났다.

(58) 심장학과에서 15년간 추적한 한 소급연구는 심장학자 20~30%는 일상적으로 선량계를 패용하지 않음을 관찰했다(Vañó 등 2006). IAEA가 56개국에서 온 심장학자에 대한 훈련을 포함하는 여러 방사선방호 훈련과정에서 실시한 조사의 대답은 중재 심장학자의 33~37%만 개인선량계를 일상적으로 패용하는 것으로 나타났다(IAEA 2014b).

(59) 납치마 아래와 위의 두 선량계가 비슷한 읽음값을 냈다면 이는 선량계가 무작위하게 뒤바뀌었을 것임을 시사한다.¹⁶⁾ 보안경이 일부 절차에서만 사용되면 또 다른 불일치를 초래할 수 있다. 따라서 일관된 선량계 지급과 일관된 선량계 사용을 강조할 필요가 있다. 종사자에게는 각자에게 가장 제한적인 업무와 피폭 위험에 맞게 몇 개 선량계를 어디에 패용하는가에 대한 한 세트 지침이 필요하다. 중재방사선 부서는 종사자가 두 선량계를 패용하는 정책과 좋은 습관을 발전시키기를 ICRP(2000b)와 NCRP(2010)는 권고한다.

2.5.2. 감시절차 미준수의 가능한 이유

(60) 선량계 사용을 꺼리는 것은 개인 누적 유효선량이 선량한도에 근접할 때 업무 수행이나 환자 처치를 하지 못하게 제약하거나, 아직 직무피폭 선량한도 이내이지만 높은 선량 읽음값 때문에 시간을 뺏는 조사가 시작될 우려 때문일 수 있다.

2.5.3. 유효선량 평가

(61) 하나 또는 복수 선량계로부터 유효선량을 평가하는 접근은 여럿 있다. 형광투시에서처럼 선량 공간분포가 많이 바뀌는 상황에서는 선량평가에 큰 불확도가 지배한다. 일련의 보수적 가정은 참값의 여러 배까지 선량을 평가하게 할 수 있다. 개인선량당량 $H_p(10)$ 은 여러 단순한 피폭 가정 즉, 인체의¹⁷⁾ 앞에서 뒤로, 측방으로, 회전형 또는 등방으로 입사조건에서 유효선량에 대한 보수적 평가치로 권고된다. 이 개인선량당량이 비균질 피폭조건을 고려하도록 사용될 때는 추가 보수성이 도입된다. 선량계를 최고 광자 플루언스 영역에 두면 과대평가가 추가될 것이다. 피폭감시 전략은 제4장에서 주어지며, 배태아에 대한 선량평가는 소절4.3.6에 주어진다.

2.5.4. 수정체 감시 난제

(62) 제4장에 보일 것처럼 원칙적으로 납치마 위 목깃 높이의 선량계 읽음값은 보안경을 착용하지 않은 때 수정체 선량에 대한 합리적 지표이지만, 보안경을 사용한

16) <역주> 납치마 아래용(몸통용) 선량계와 납치마 위용 선량계는 본질적으로 같은 설계이므로 용도를 가려 명확히 표시(예: 다른 색깔)하지 않으면 바꿔 패용할 우려가 있다.

17) <역주> 원문에는 “인체의 수학적 표현”으로 적어 모의체를 설명하고 있지만 모의체는 선량계측 과정에 필요한 도구일 뿐이며 결과는 사람의 선량이어야 하기에 수정했다.

때에는 목깃 선량계가 수정체 선량을 크게 과대평가할 수 있다. 나아가 수정체 선량계측에 관련된 상당한 불확도와 함께, 그리고 수정체 실제 선량이 그 선량한도와 같은 자릿수라는 사실은 선량한도 준수 평가에 중요한 도전을 제기한다.

제3장

중재절차에 직무피폭 방호체계의 적용

- 방사선방호 목적은 방사선피폭을 관리하여 조직반응(결정론적 영향)을 예방하고 확률론적 영향 위험을 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 가능한 수준으로 줄이는 것이다. 중재절차에 참여하는 전문인에게 가장 해당되는 조직반응은 수정체 혼탁과 사지에 발생할 수 있는 탈모이다.
- 이 목적을 달성하기 위해 ICRP는 방사선방호의 3 원칙을 권고하는데, 행위의 정당화, 방호최적화, 선량한도의 적용인데, 이 간행물 맥락에서 개인은 중재기술에 참여하는 전문인이다.
- 나아가 직장 방호 관리에는 방호가 최적화되지 않음에 대한 경보를 제공할 지표가 필요하며, 이때는 피폭과 작업조건에 대한 조사를 실시해야 한다. 중재절차에 적합한 지표는 조사준위이다.
- 또한, 선량계를 바르게 패용하지 않았음을 경보할 수 있도록 납치마 위 선량계의 최소 선량에도 조사준위를 선정할 수 있다.
- 종사자가 임신을 선언한 후에는 그 여성 종사자의 작업조건이 잔여 임신기간에 배태아의 추가 선량이 1 mSv를 초과하지 않게 해야 한다.
- 배태아에 대한 선량 제한이 임신한 종사자가 방사선 작업을 하지 않아야 함을 의미하지는 않는다. 그러나 이는 고용주가 의학물리사나 방사선방호 전문가의 조언에 따라 임신 종사자의 작업조건에 대한 신중하게 검토해야 함을 의미한다. 현재 가용한 데이터는 임신한 의사나 다른 종사자를 자동으로 중재기술실에서 수행하는 절차로부터 배제하는 것을 정당화하지는 않는다.

3.1. 방사선방호 원칙

3.1.1. 일반론

(63) ICRP 방사선방호체계는 기본적으로 사람 보건을 겨냥한다. 방호체계의 목적은 방사선 피폭을 관리하여 조직반응(결정론적 영향)을 예방하고 확률론적 영향의 위험을 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 가능한 정도로 줄이는 것이다 (ICRP 2007a). 이 목적을 달성하기 위해 ICRP는 기본 3 원칙을 권고하는데, 정당

화, 방호최적화, 그리고 선량한도의 적용¹⁸⁾이다(ICRP 2007a). 정당화와 최적화 원칙은 모든 유형 피폭 즉, 직무피폭, 일반인피폭 및 의료피폭에 적용되는 반면, 선량한도 적용 원칙은 종사자와 일반인에게만 적용되며 환자, 간병인 및 위안자, 의생명연구 대상 참여자의 의료피폭에는 적용되지 않는다.¹⁹⁾

3.1.2. 행위나 절차의 정당화

(64) 정당화 원칙은 방사선피폭상황을 변경하는 모든 결정은 해로움보다 이로움이 커야한다는 것이다. 이는 새로운 방사선원 도입이나 기존피폭 또는 잠재피폭 위험을 줄이기 위한 작업은 그것이 유발하는 위험을 상쇄하기에 충분한 개인적 또는 사회적 이득을 달성해야만 함을 의미한다(ICRP 2007a). 의료 방사선 맥락²⁰⁾에서는 정당화 목표는 방사선작업자 및 기타 사람의 부수적 방사선 위해까지 고려하여 환자에게 해로움보다 이로움이 크도록 하는 것이다.

3.1.3. 방호최적화

(65) 방호최적화 원칙은 ‘방호수준은 여건 아래서 해로움을 상회하는 이득 여분을 극대화하는 최선이여야 함(NCRP 1993, ICRP 2007a)’을 의미한다. 보다 구체적으로는 피폭 발생 가능성, 피폭자 수, 개인선량의 크기를 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 가능한 낮게 유지해야 함을 의미한다. 방사선 촬영으로 안내되는 중재술로부터 피폭 맥락에서는 방호최적화는 환자와 종사자의 선량을 중재의 임상목적과 합치하면서 가능한 한 낮게 유지함을 의미한다. 최적화 원칙은 방사선을 사용하는 시설의 설계, 기기의 선정, 설치 및 사용, 그리고 일상 작업절차에 적용되어야 한다.

18) <역주> 원문은 개인선량제한^{limitation of individual dose}로 적고 있으나 본래 ICRP 103(2007a) 표현은 ‘선량한도 적용 원칙^{principle of application of dose limits}’이어서 수정했다. 선량한도 적용과 선량제한의 의미가 사뭇 다르다. 선량한도는 법정 요건이 되는 기준으로 이를 초과하면 위법인 경직된 개념인데 반해, 선량제한은 피폭을 관리하기 위해 활용하는 일반적 개념이다.

19) <역주> 현행 ICRP 권고(ICRP 2007a)에서는 위안자나 의생명연구 대상 자원자의 피폭을 일종의 의료피폭으로 분류하고 있어 ‘의료피폭에는 선량한도를 적용하지 않는다’는 전제 때문에 선량한도^{dose limits}는 적용하지 않는다. 그러나 ‘선량제한^{limitation of dose}’은 적용되는데 ICRP 103에서도 간병인이나 연구대상자에게는 합당한 선량제약치를 적용하도록 권고한다.

20) <역주> 원문은 ‘의료피폭 맥락^{context of medical exposure}’으로 적고 있으나 의료피폭은 이 간행물의 주제인 직무피폭과 어긋나 ‘의료 방사선 맥락’으로 수정했다.

3.1.4. 선량한도 적용

(66) 선량한도 적용 원칙은 ‘환자의 의료피폭이 아닌 계획피폭상황에서 관리되는 선원으로부터 개인의 총 선량은 ICRP가 권고하는 적절한 선량한도를 초과해서는 안 된다.’고 말한다(ICRP 2007a). 이 원칙은 의료 종사자에게도 적용된다.

(67) 의료 중재절차에서 직무로 피폭하는 종사자에 대해서도 ICRP가 권고하는 종사자 선량한도가 적용된다. 계획피폭상황에서 종사자에 대해 권고된 선량한도는 ICRP 103(2007a)에 설정되어 있고 갱신된 수정체 한도는 조직반응에 관한 ICRP 성명(ICRP 2012)에 있다.

(68) 적용할 선량한도는 다음과 같다.

- 전신: 유효선량이 한 해에 50 mSv를 넘지 않으면서 지정된 5년 기간에 평균하여 20 mSv/y
- 사지: 손과 발에 등가선량 500 mSv/y
- 피부: 피폭 면적에 관계없이 1 cm²에 평균한²¹⁾ 등가선량 500 mSv/y
- 눈 수정체: 등가선량이 한 해에 50 mSv를 넘지 않으면서 지정된 5년 기간에 평균하여 20 mSv/y.

(69) 권고된 한도의 목적은 확률론적 영향의 발생을 용인 불가한 수준 이하로 유지하고 조직반응(결정론적 영향)을 회피하는 것이다.

3.1.5. 선량제약치

(70) 방호최적화에서 예상 선량에 어떤 경계를 설정함으로써 최적화를 돕는다(ICRP 2007a). 계획피폭상황에서는 그러한 경계를 ‘선량제약치’라 부르며, 계획목적에서 현재 선량분포를 고려하여 최적화 과정에서 효과적으로 도움을 주도록 설

21) <역주> 1 cm²에 평균한다는 것은 피폭한 피부의 최대 선량 부위 값을 적용한다는 의미와 같다. 1 cm²로 평균할 면적을 지정하는 것은 피부에 농도가 높은 작은 핵의약품(베타 핵종)의 미세 방울(가령 1 mm²에 1 mg)이 오염된 경우 그 오염면적만 피부선량을 평가하면 매우 높아져(분 단위 시간에 수 Gy까지 이를 수 있음) 선량한도 초과(위법)가 쉽게 발생할 수 있다. 이러한 미세부위의 고선량 피폭은 피부 건전성에 심각한 영향을 미치지 않음에도 불구하고 빈번한 법규 위반을 유발할 수 있다. 이런 문제를 완화하기 위해 평균 면적을 1 cm²로 넓힌 것이다(미국 규정은 1 cm²도 좁다고 보아 10 cm²에 평균을 허용한다). X선빔에 노출되는 경우는 노출부위 중심부 선량(대개 최고 선량)으로 간주하면 된다.

정된다. 뒤에 선량제약치 초과가 발견되면 방호가 최적화된 것 같지 않으므로 여건을 이해하기 위해 조사를 실시해야 한다. 따라서 선량제약치는 해당 연간 선량한도보다 낮다. 선량제약치는 방호최적화 목적에서 전망적으로 수립되며 선원 중심적이다. 의료진이 두 시설 이상에서 일한다면 해당 시설에서 발생하는 모든 개인선량의 합에 대해 적용해야 한다.²²⁾ 수정체에 대한 선량제약치는 국제방사선방호학회연합 International Radiation Protection Association(IRPA)가 제안하고 있다(IRPA 2017).

3.1.6. 비정상 선량의 조사

(71) 선량한도나 제약치를 초과하여 방호가 최적화되지 않았음을 알 때까지 기다릴 필요는 없다. 최적화되지 않은 방호는 한 달에 받은 유효선량이나 등가선량 또는 납치마 위 목깃 선량계 읽음값과 같은 관련된 변수의 값으로 조사준위를 설정함으로써 발견할 수 있다.

(72) 월간 조사준위 초과가 그 기간에 최적이지 못하는 방호에 대해 경보를 제공하면 기존 방사선방호에 대한 검토가 필요하다. 선량계 읽음값의 증가는 중재시술 수의 현저한 증가, 절차 복잡도 심화에 따른 절차 당 선량의 증가, 또는 방호대책 준수의 부족 때문일 수 있다.

(73) 2000년도에 세계보건기구(WHO)는 월간 피폭이 유효선량은 0.5 mSv, 수정체 등가선량은 5 mSv, 또는 수족 선량은 15 mSv에 도달하면 조사를 실시할 것을 권고했다(WHO, 2000). 수정체 등가선량 새 한도에 따라 이 조사준위는 그 만큼 낮춰야 한다. 중재 심장학자에 대해 목깃 선량계 읽음값을 사용해 조사준위 2 mSv/월을 제안한 바 있다(Durán 등 2013. 태평양 중재심장학회, 유럽 경피심혈관중재협회, 라틴아메리카 중재심장학회, 심혈관조영술중재학회가 추진함).

(74) 월간 선량에 대한 조사준위는 1년으로 외삽할 때 해당 선량한도나 선량제약

22) <역주> 이 표현에는 약간의 혼란이 있다. 선량제약치는 선원중심적이므로 선원별로 설정하게 되는 것이므로 한 선원의 경영관리자는 선량제약치를 설정할 때 복수 선원에 노출되는 사람을 고려하지 않는다. 복수 선원에 노출되는 특별한 경우(예: 원전을 순회하며 서비스 작업을 수행하는 의무제공자)은 특정 선원이 아니라 그 행위(즉, 의무제공 서비스)를 하나의 선원으로 보아 해당 고용주가 선량제약치를 설정하는 것으로 보아야 한다. 그러면 그 행위에 관련된 종사자의 피폭은 여러 선원에서 피폭한 선량의 합에 대해 선량제약치가 적용된다. 그런 일은 드물겠지만 한 중재시술의사가 독자적으로 여러 병원의 의뢰를 받아 중재절차를 시술한다고 가정하면 그 의사 자신이 하나의 행위(곧 선원에 해당)를 하는 주체로서 선량제약치는 자신이 정하는 방식이 될 것이다.

치를 초과하지 않도록 해야 한다. 나아가 제2장에서 설명한 것처럼 개인선량계를 패용하지 않거나 잘못 패용하기도 한다(Padovani 등 2011, Sánchez 등 2012). 이런 경우 납치마 위 선량계와 손 선량계에 대해 최소 선량값을 설정함으로써 조사준위가 가능한 선량계 패용 절차의 준수미흡에 대해 경보를 제공해 도움을 줄 수 있다.

3.2. 구역과 작업장 분류

(75) ICRP 57(1990, 제129항)은 개인감시 필요성과 관련해 종사자의 가능한 분류를 논의했는데 중재 방사선학자나 심장학자는 범주 A에 속하게 될 것으로 말했다. 그러나 종사자 분류는 ICRP 60(1991)에서는 지원되지 않는데 ICRP 103(2007a) 제184항은 “ICRP는 계속해서 종사자 분류보다 작업장 분류를 권고한다.”고 말했다. 따라서 개인감시 기기의 지급은 종사자의 작업장과 임무, 위치, 방사선장 노출 시간, 사용한 방호장비가 제공하는 차폐에 근거하여 분석해야 한다.²³⁾

3.3. 배태아

(76) ICRP는 ICRP 84(2000a)에서 임신한 의사나 기타 종사자의 관리에 대한 조언을 제공했다. 임신 초기(임신을 선언하기 전)에는 종사자 정규 방호로 다룬다. 배태아²⁴⁾ 방호의 1차 책임은 임신 여성 종사자 자신에 있으므로 임신이 확인되면 즉시 이를 고용주에게 선언하여야 한다(ICRP 2000a). 일단 임신이 선언되어 고용주가 통보를 받으면 임신 종사자의 작업조건은 잔여 임신기간에 배태아의 추가 선량이 1 mSv를 초과하지 않도록 되어야 한다(ICRP 2000a).

(77) 임신 종사자에 대한 불필요한 차별은 피해야 한다. 배태아 선량에 대한 선량 제한이 임신 종사자가 방사선작업을 피해야 한다거나 지정구역²⁵⁾에 들어가거나 그

23) <역주> 이 설명이 원론적으로는 옳을지라도 현실적으로는 이러한 피폭인자들을 고려하면 결국은 각 종사자의 피폭 잠재도에 따라 개인감시 수준이 결정되기 때문에 종사자를 분류하는 것과 유의한 차이가 없다. 이런 이유 때문에 ICRP 103을 반영하여 개정된 유럽연합 기본안전표준은 여전히 종사자를 A/B군으로 분류하고 있다.

24) <역주> 원문 용어는 conceptus(수태물)이지만 번역본에서는 embryo and fetus를 ‘배태아’로 줄여 표현하고 있기에 물건 낱어인 ‘수태물’ 대신 ‘배태아’로 통일했다.

25) <역주> 지정구역designated area: 방사선관리구역과 감시구역을 말한다.

안에서 일하지 말도록 해야 한다는 것은 의미하지는 않는다(ICRP 2000a). 그러나 이는 그 고용주는 임신 종사자의 작업조건을 조심스럽게 검토해야 함을 암시한다. 임신 여성은 일에서 특히 우발적 높은 피폭을 받을 확률이 거의 없도록 해야 한다 (ICRP 2000a).

(78) 중재방사선에서 임신했거나 그 잠재성이 있는 종사자의 직무피폭 방호에 관한 임상행위 지침을 중재방사선학회와 유럽 심혈관중재방사선학회 합동 지침으로 개발한 바 있다. 이 지침은 임신 종사자를 배태아에 대한 방사선 위험만에 근거하여 형광투시 절차로부터 배제하는 것은 과학적 근거에서 정당화될 수 없다고 적시한다(Blake 등 2006, Best 등 2011, Dauer 등 2015).

제4장

개인감시와 선량평가

- 개인감시 기구 필요성은 종사자의 작업장과 업무, 방사선장에서 위치와 피폭시간, 사용한 방호도구의 차폐를 바탕으로 분석해야 한다.
- 전문인이 선량계를 바르게 패용하는 것이 중요하다.
- 한 선량계는 납치마로 차폐(납치마 안)하고 다른 한 선량계는 차폐 없이(납치마 위) 목깃에 패용한 두 선량계는 유효선량의 좋은 평가를 제공한다. 납치마 아래 선량계는 납치마를 실제로 착용했는가와 그 차폐가 납치마 아래 선량을 낮추기에 충분한가를 확인할 수 있게 한다. 납치마 위 선량계는 눈 수정체 선량 평가를 제공한다.
- 높거나 매우 낮은 선량 읽음값 모두 선량계 오사용이나 미패용을 지시할 수 있다.
- 개인선량계는 사용자가 자기 선량계와 예정된 위치를 식별할 수 있는 방법을 갖춰야 한다.
- 한 사람이 둘 이상의 고용주를 위해 일할 때는 고용주간 협조가 필요하다. 각 시설에서 받은 모든 개인선량의 합을 확보해 완전한 기록으로 유지해야 한다.
- 능동형 전자선량계가 감시 최적화, 교육목적, 절차별 선량에 대한 특별 연구, 절차의 특성 분석에 유용함이 밝혀졌다.
- 전자 개인선량계와 지역감시기의 형식시험과 교정은 고선량을 펄스모드를 포함해 중재절차에서 대표적인 방사선장을 포함해야 한다.
- 주위감시기(예: C암 위 선량계)는 산란방사선장을 지속적으로 평가하거나 개인선량계에 후비 역할을 하며, 개인선량계 패용 미준수를 발견하고 개인선량계를 패용하지 않은 경우 선량평가에 유용하다.
- 연구개발 기틀에서 측정과 결합한 몬테칼로 계산에 관한 연구가 많은데 고선량 절차에 대해 수정체 선량을 포함해 직무피폭 선량을 평가하기 위해 발전된 기법을 개발할 필요가 있다.
- 이 방법은 일상적이고 바른 개인선량계 사용을 감사하고 추가 방호(예: 보안경) 필요성을 평가하는 데 도움이 될 수 있다. 연구 프로그램은 눈 선량을 포함한 개인선량 평가를 위한 사람 위치감지와 함께 전산기법(선량계를 요구하지 않는) 개발을 추구할 가치가 있다.

4.1. 개인피폭 감시

4.1.1. 피폭감시와 선량한도 준수 확인

(79) 연간 선량한도 준수의 입증과 방호 최적화를 위해 피폭감시가 필요하다. 선량한도 준수 감시는 유효선량, 피부, 수정체, 손발의 등가선량의 평가를 필요로 한다. 등가선량이나 유효선량은 인체 조직에서 직접 측정할 수는 없기에 피폭감시 양으로 직접 사용할 수는 없다. 선량계측체계²⁶⁾는 측정 가능한 실용량을 포함하여 그 측정값으로부터 등가선량이나 유효선량을 평가할 수 있게 한다(ICRP 2007a). 외부 피폭에 대해 지역감시와 개인감시를 위한 실용량은 ICRU가 정의하는데, 중재절차와 관련 있는 것에 대해서 부록B에 요약한다.

(80) 직무피폭 감시²⁷⁾는 선량계로 측정하는 양과 사람이 받은 선량 사이 관계에 관련된 일련의 가정에 의지한다. 표준은 선량계측체계의 정확도 요건과 불확도를 포함함으로써 이들 가정이 실용량과 방호량 사이 관계를 성립시킨다. 종사자가 모든 작업시간에 선량계를 바르게 착용하게 하는 것은 이 일련의 가정과 관계에서 가장 중요한 성분이다. 모든 피폭시간에 종사자 몸 위에 둔 어떤 유형의 개인선량계 없이는 매우 가변적인 방사선장에서 믿을만한 개인선량을 평가할 수 없다. 절차 준수에 대한 감사는 종사자가 선량계를 일상적이고 바르게 착용하는지를 검증하는데 중요하다.

4.1.2. 피폭감시 및 방호최적화

(81) 준수 검증은 개별 중재절차로부터 선량을 점검하는 것으로만 수행되지는 않으며 지정된 감시주기 동안 행한 많은 중재술에 걸친 선량을 합산하여 수행된다. 감시주기는 규제자가 설정하며 보통 1개월이다.²⁸⁾ 이 주기가 연간 선량한도 준수를

26) <역주> 원문은 '방호체계'로 적고 있으나 방호체계는 광범한 개념이어서 선량계측체계를 포괄하므로 틀린 표현은 아니나 이 문장에서 말하고자 하는 것은 구체적으로 ICRP의 선량계측체계이기 때문에 역자가 수정했다.

27) <역주> 원문은 '직무피폭'으로 기술하나 위와 마찬가지로 문장에서 설명하고자 하는 내용에 비해 불필요하게 광범하여 '직무피폭 감시'로 구체화했다.

28) <역주> 개인선량 측정주기는 피폭수준과 계측체계의 경시 변동률을 참조하여 결정한다. 외부피폭의 경우 피폭수준이 높거나 변동이 클 가능성이 높은 경우에는 1개월, 피폭수준이 낮고 안정적인 경우에는 3개월까지 연장될 수 있다. 지금은 사용되지 않지만 필름배지의 경우 선량계 자체의 시간경과에 따른 변화(잠상퇴행) 때문에 최대 1개월로 본다. X선 사용 중재절차는 외부피폭만 관련되는데 작업자의 행동에 따라 비정상적 피폭(빔에

점검하는 데 충분하지만 이를 위해서는 때로는 여러 감시주기에 걸쳐 동일 유형 절차에 대한 정보수집을 요구할 수 있다. 따라서 준수 검증은 종종 방사선방호 노력의 효력평가를 포함해 방호최적화를 위해 설계된 감시에 의해 보완된다.

4.2. 개인선량계 특성과 사용

4.2.1. 선량계 유형: 피동형과 능동형

(82) 선량계는 다양한 피폭조건에서 적절한 정확도를 갖고 사용에 편리하도록 작고 가벼워야 하며, 의료진이 직무를 수행하는 역량을 저해하지 않아야 할 필요가 있다. 그래서 피동형 선량계를 의료진 행동을 방해하지 않고 편안하며 선량한도 준수를 입증하는 데 널리 사용되는 방안이라는 틀에 쉽게 합체되도록 한다. 그러나 직독기능 부재는 최적화 감시와 특히 중재술과 관련된 교육기능 측면에서 피동형 선량계의 약점이다.

(83) 작은 반지형 선량계는 비교적 쉽게 수술장갑 안에 사용할 수 있기 때문에 손 감시를 위해 사용된다. 반지는 손가락 크기에 맞출 수 있지만 오랜 절차에서는 손가락이 부풀 수 있음에 주의가 필요하다. 나아가 멸균 가능성과 도관이나 기구를 정교하게 조작하는 시술자 역량에서 촉각의 저해가 작아야 하는 추가적 특성도 중요하다. 반지 선량계 대안으로 손가락에 맞는 선량계 봉지를 사용하여 높은 선량이 예상되는 부위 근처의 손에 붙이기도 한다. 촉각 방해 줄이기 위한 대안 해법은 조사되는 환자 체적에 가장 가까운 손가락에 TLD형 선량계를 붙이는 것이다.

(84) 선량계의 물리적 구성은 패용할 위치와 양립해야 한다. 반지선량계는 보통 감염관리가 긴요한 절차 동안 패용해야 하는데 멸균 과정을 견디지 못할 수 있어 감염관리가 특히 문제될 수 있다.

(85) 몸통에 패용하는 선량계는 무거운 납치마와 사용자 옷 사이에 위치할 때 불편을 초래하는 예리한 압력을 형성하지 않아야 한다. 차폐되지 않은 부위 선량을 평

노출) 가능성이 있으므로 1개월이 적절하다. SIRT에 사용하는 방사성핵종은 반감기가 짧아 내부피폭 감시주기 책정뿐만 아니라 내부피폭 감시 자체에 어려움이 있다. 따라서 종사자가 스크리닝 준위(연간 1 mSv)를 넘어 내부피폭을 받지 않도록 작업 환경관리 수준을 높이는 것이 현실적 해결책이다.

가하기 위해 납치마 위 목깃 근처나 갑상선보호대 위에 몸통 선량계를 둘 때는 선량계 모서리가 목이나 볼을 자극하지 않게 해야 한다. 모든 부착 방식은 분투적인 절차 동안 풀어지지 않도록 충분히 단단해야 하지만 선량계가 외부 물체에 걸릴 때 납치마의 변위나 의복에 손상을 주지 않아야 한다.

(86) 능동형 개인선량계(APD)나 전자선량계는 방호를 최적화하거나 절차별 선량 분석이나 절차의 차별특성(예: 영상획득과 형광투시에서 받는 상대 선량)을 분석하기 위해 사용된다. APD는 선량률에 대한 즉각적 정보를 제공하여 의료진에게 신속한 피드백이 가능하여 자신의 행동 변화를 평가하도록 함으로써 선량률을 낮추고 누적선량도 줄일 수 있게 한다. 절차에서 행동이 요구되면 직접 절차 변화로 이어질 수 있기 때문에 선량률 정보가 필요하다. 나아가 APD는 각 노출마다 시간 정보를 제공하여 환자선량과 직무피폭 사이 상관관계 분석이나 절차 중 APD 패용의 감사를 용이하게 한다.

(87) 전자선량계는 의료진 교육에도 유용하다. 예를 들면 천정걸이 차폐가 설치될 때 큰 선량률 감소는 매우 좋은 실례가 되어 임상 의사가 그런 차폐를 일상적으로 사용하도록 권장한다.

(88) 근래까지 전자선량계는 납치마 안에 편리하게 패용하기에는 너무 컸다. 구형 기기의 전원요구는 긴 절차 동안 기기가 꺼지지 않았는지 배터리 충전을 확인하는 운영 부담도 있었다. 전원관리와 전자선량계로부터 기지까지 신호를 무선으로 송신하는 기술의 발전은 전자선량계 사용의 단점 일부를 해소했다. 일부 중재시스템 제작사는 무선 데이터 송신을 갖춘 전자 감시기를 포함시켜 선량률이나 선량을 시술자가 보는 영상 비디오 스크린 위나 옆에 전시하고 있다.

(89) 최적화 감시는 준수 감시에 요구되는 선량관계량의 확인을 엄밀히 요구하지는 않는다. 최적화는 선량 감축을 위한 여러 조치의 효용성을 평가하기 위해 조건외 변경에 따른 상대 값 비교를 추구한다. 전자선량계는 중재절차 과정에서 신체의 불균일 피폭을 고려하지 않고 실용량을 평가하도록 교정되는 것이 보통이다. 개념적으로는 다수 전자선량계를 사용하여 종합된 데이터가 준수 목적 선량 정보를 제공하도록 하게 하지 못할 기술적 이유는 없다. 그러나 현실적인 이슈가 전자선량계를 조사나 최적화 감시로 그 용도를 한정시키는 경향이다.

(90) 손가락이나 눈 근처에 일상적으로 사용하도록 개발된 전자선량계는 아직 없다. 손가락에 작은 전자 검출기를 두는 시도는 있지만 전원이나 전자기기로 연결하

는 전선이 일상 사용에 비현실적이거나 편이하지 않다.

4.2.2. 선량계 사양

(91) 선량계측 시스템은 중재절차에 사용되는 스펙트럼과 20~150 keV 범위 광자 에너지 범위에서 정확도, 정밀도, 재현성에 대해 IEC 62387(2012)나 국제적으로 채택된 지침(ICRP 2010b, IAEA 2014a)과 같은 표준요건을 충족해야 한다.

4.2.3. 선량계 신뢰성 및 단순성

(92) 선량계측 시스템은 믿을만하고 안전향고장failsafe 특성을 가져야 한다(즉, 방사 선장을 측정하는 지속 역량을 가져야 한다). 나아가 사용자가 취할 조치는 단순하고 수행이 효과적이어야 한다. 사용자가 선량계를 작동시켜야 하는 전자선량계는 의료진이 선량계를 사용할 때 기억할 항목을 절차에 포함해야 한다. 의료진에게 요구되는 조치나 결정이 적을수록 바른 사용 가능성이 높아진다. 형광투시실에서 준수를 감시하기 위해서는 보통 필름, TL결정, OSL 결정, 방사발광 유리 radiophotoluminescent glass와 같이 선량을 누적하는 적산선량계가 사용된다.

4.2.4. 선량계 교환 주기

(93) 피동형 선량계는 사용한 기간에 누적된 총 선량을 제시하며 사용 주기말에 새로운 선량계로 교체해야 한다. 교체주기는 사전 설정된 계획대로 하여 의료진의 습관적 일상이 되도록 해야 한다. 일반적으로 중재 의료진은 월 주기로 감시하여 비정상적인 방사선량과 사건을 식별하여 적절한 대응을 이행할 수 있도록 충분한 빈도로 선량 데이터를 제공하게 한다. 따라서 TL물질, OSL물질 또는 필름과 같은 방사선 감지 물질은 최단 예상 사용주기에 최소 해당 선량을 검출하는 감도를 가져야 하고, 최장 예상 사용주기 동안 선량 정보를 유지해야 한다.

4.2.5. 중재절차에서 선량계 오패용 식별 접근

(94) 선량계 패용에서 문제로는 매우 높은 선량 읽음을 내는 것도 있지만 선량계 오패용이나 미패용을 암시하는 매우 낮은 선량 읽음을 내는 것도 한다. 오용의 예에는 납치마 아래에 패용하도록 된 선량계를 납치마 위에 패용, 반지선량계를 다른 손에 사용, 타인에게 지급된 선량계를 패용, 선량계 분실 등이 포함된다. 개인선량

계 패용 미준수를 식별하거나 개인선량계를 패용하지 않았을 경우 직무피폭 선량을 평가하는 데 간접 접근법이 유용할 수 있다. 이러한 접근법으로 환자 주변 산란방사선을 측정하는 구역감시(예: C암 위)를 활용하는 법이 있는데²⁹⁾, 상이한 유형 절차와 기하배열마다 커마면적곱과 같은 환자 관련 계측량으로부터 종사자 눈 수정체 선량을 연계하는 환산계수를 같이 이용할 수 있다. 선량계를 줄에 매달면 몸 전방에서 움직일 수 있거나 목깃 아래 매달려 납치마에 입사하는 방사선과 차이가 커지므로 바람직하지 않다.

4.2.6. 형식시험과 실제 시술 사이 상이한 산란조건

(95) 유효선량 감시는 하나 또는 두 선량계를 이용하여 도모하고 있다. 선량계 읽음값을 조정하는 알고리즘은 이 절 뒤에서 논의하지만, 여기서 한두 가지만 적시한다. 선량계는 차폐물질의 영향을 고려하지 않고 시험되고 교정된다. 형식시험 표준은 선량계를 조직등가 모의체 평면 위에 놓고 단순한 조건에서 성능을 평가하는 경향이다. 중재시술실에서는 선량계를 원자번호가 높은 물질을 함유한 납치마 아래나 위에 패용한다. 차폐물질에 가까이 있음으로 인해 선량계가 전형적 형식시험에서 가정한 것과 다른 산란환경에 놓이게 된다. 실용량 측정이 예상한 선량계 성능과 정규 사용 조건과 유사한 조건 범위에 있음을 확인하는 보장을 공급자에게 요구해야 한다.

4.2.7. 수정체 선량계

(96) 눈 수정체 감시는 선량계를 눈 가까이 부착하는 기구를 배치하는 어려움으로 인해 특별한 도전이 된다. 수정체 선량한도 감소와 함께, 보안경 사용이 보다 보편화되었다. 이로써 선량계를 방호유리 안쪽에 배치할 수 있는 기회가 늘어났다. 눈 선량은 납치마 위 목깃 높이에 패용한 선량계, 또는 머리띠에 부착한 플라스틱 조각 위에 배치하여 X선관에 가장 가까운 관자놀이에 근접시킨 선량계로부터 추산할 수 있다. 일부 시도에서는 탄성 있는 밴드에 짚 TLD를 눈 근처 머리에 맞춰 배치한 선량계로 눈 피폭을 감시하고자 했다(Bilski 등 2014). 부착된 선량계를 안경 안에 둘 수 있게 머리 둘러싸는 기구를 사용하기도 했다(IRSН 2014). 어쨌든 눈

29) <역주> 국내에서는 현실적으로 모든 병원이 외부 선량계측서비스의 지원을 받고 있어 선량계가 분실되거나 읽음 오류가 발생하면 판독오류 사건으로 규제기관(위임받은 원자력안전기술원)에 보고하고, 선량평가위원회의 평가를 통해 그 감시주기의 '인정선량'을 책정하게 된다. 따라서 의료기관 스스로 간접법을 적용할 수는 없으며 선량평가위원회가 평가할 때 간접 감시 결과를 참조로 제시할 수 있다.

가까이 둔 선량계가 패용자의 시야를 가려서는 안 된다. 보안경 안에 선량계를 둔다는 것은 세 선량계를 사용함을 의미하는데 즉, 하나는 납치마 안에, 하나는 납치마 위에, 그리고 눈 선량계이다. 믿을만하고 일관된 사용 측면에서는 세 선량계에 근거한 대책이 난제가 될 수 있다. 그러나 단기간에 비교목적으로 이를 사용할 수는 있을 것 같다. 실제로 보안경을 쓰고 주 중재시술자가 천정걸이 차폐를 사용한다면 눈 선량계 필요는 결정적이지는 않지만 실제로 차폐와 보안경이 사용됨을 보장하도록 품질관리가 필요하다. 언제 보안경을 써야 하는지 하는 문제가 주된 이슈가 된다.

4.2.8. 선량계와 종사자 식별

(97) 개인선량계는 사용자가 자신의 선량계를 식별할 수 있는 수단을 갖춰야 한다. 선량계 결과가 특정인에게 적용되려면 선량계와 사용자의 1대1 관계가 필수적이다. 한 사람이 다른 사람 선량계를 사용하는 것을 방지하려면 라벨과 같은 식별수단을 쉽게 읽을 수 있어야 한다. 적절한 접근은 선량계를 보관하는 랙을 갖추고 랙과 선량계에 시각적 식별표지를 붙이는 것이다.

4.2.9. 패용 위치

(98) 시각적 식별수단이 의도된 패용위치를 지정하고 선량계를 바른 위치에 두도록 도울 수 있는데, 이는 특히 선량계 모양이 바른 패용위치를 보이지 않을 때 더욱 그렇다. 유효선량을 평가하기 위해 납치마 위와 아래에 하나씩 두 선량계를 사용할 때는 시술자가 종종 상/하 선량계를 바꿔 패용할 수 있는데, 그러면 보고되는 선량이 두 값의 평균에 가깝게 된다. 이러한 불일치는 보고되는 유효선량을 높이게 되며 이는 사용자에게 좌절감을 주어 두 선량계나 심지어 하나마저 사용하지 않도록 만들 수 있다. 나아가 보다 나은 반응 재현성을 위해서는 선량계를 납치마 위와 아래의 정확한 위치에 패용해야 한다. 바른 관행을 증진하기 위해 색깔 및 라벨과 함께 선량계를 패용할 위치에 아이콘이나 그림을 표지하기도 한다. 양 손을 각각 감시할 때에도 비슷한 상황이 발생한다. 구분되는 모양이 아니면 좌우 반지가 바뀔 수도 있다. 반지에 필요한 정보 모두를 적기에는 공간이 제한되므로 손이나 손가락 선량계 표지는 쉽지 않다. 좌우를 구분하는 데는 다른 색깔이 유효한 방법이 된다. 수지 선량계가 바뀔 잠재성 때문에 X선빔에 더 가까운 손에 끼는 단일 선량계 사용이 보편화되고 있다. 보통은 왼손의 약지가 그 손가락이 된다(Martin 2009).

4.2.10. 능동형 개인선량계 교정

(99) 유럽 ORAMED 프로젝트에서 Clairand 등(2011)과 Sánchez 등(2014)은 선량률, 펄스 주파수 및 지속시간이 APD 반응에 미치는 영향을 시험했다. 펄스모드에서 신호를 전혀 내지 못하는 GM관 APD를 제외하고도 선량당량률에 영향을 받은 반응을 보였는데 이는 보정인자를 적용한다면 이들 APD는 일상감시에 사용할 수 있음을 의미한다. APD와 구역감시기의 형식시험 절차와 교정은 중재절차에서 대표적인 방사선장을 포함해야 하며, 펄스모드 높은 선량률에서 시험도 포함해야 한다(Chirioti 등 2011, Clairand 등 2011, Sánchez 등 2014).

4.3. 직무피폭 평가

4.3.1. 유효선량 평가

(100) 일반적으로 전신 균일피폭에서 유효선량은 개인선량당량 $H_p(10)$ 으로 교정된 개인선량계 읽음값으로 평가된다. 선량계를 신체 위 대표적 노출 위치에 패용한다면 이러한 유효선량 평가는 방사선방호 목적에서는 충분히 근사하다³⁰⁾(ICRP 2007a). 그러나 중재절차에서는 신체의 일부는 방호되고 나머지는 그렇지 않다. 따라서 방호 납치마 위에 둔 단일 선량계 읽음값은 납치마로 방호된 몸통의 장기 선량을 반영하지 못해 유효선량을 과대평가한다. 반대로 납치마 아래의 한 선량계 읽음값은 머리, 목, 겨드랑 구멍을 통한 피폭하는 흉곽 내 폐와 다른 장기의 일부 등 방호되지 않은 신체부위의 높은 피폭을 고려하지 않아 유효선량을 과소평가한다(Franken 2002, Siiskonen 등 2007). 따라서 단일 선량계 읽음값으로부터 유효선량을 평가하기 위해서는 $H_p(10)$ 값을 보정해야 한다. 보정인자는 선량계를 납치마 위에 둔 경우는 1보다 작고, 선량계를 납치마 아래에 둔 경우는 1보다 크게 된다.

4.3.1.1. 두 선량계 접근에 대한 고려

(101) ICRP 85(2000b)는 보다 나은 유효선량 평가를 위해서는 납치마 아래와 위에 각각 하나씩 두 선량계를 사용할 것을 권고한 바 있다. 또, 미국 방사선방호측정위원회(NCRP 2010)도 두 선량계법이 확률론적 영향에 대한 선량한도와 비교를

30) <역주> 원문 표현은 '충분히 정확하고 정밀하다.'로 적고 있으나 개인선량계와 같은 간단한 도구로 측정하는 선량은 '정확하고 정밀하다'고 표현할 정도는 못 된다. 방호목적에서 수용할 수 있을 정도로 근사하다고 보는 것이 적절하다.

위한 유효선량의 최선 평가치를 제공하고, 방호 납치마의 차폐를 잘 지시하기(가슴이나 허리에 납치마 안에 패용한 선량계로부터) 때문에 이 방법을 권고했다.

(102) 두 선량계의 $H_p(10)$ 읽음값은 일반적으로 다음처럼 단순한 선형 알고리즘으로 결합된다.

$$E = \alpha H_u + \beta H_o$$

여기서 E는 유효선량, H_u 와 H_o 는 개인선량당량 $H_p(10)$ 으로서 H_u 는 납치마 아래 가슴이나 허리 전방에서 측정되며 H_o 는 납치마 위 일반적으로 목깃에서 측정된다. α 와 β 는 각 선량계 읽음값에 적용할 가중치 쌍이다.

(103) 여러 해에 걸쳐 α 와 β 쌍의 여러 값이 제안되었지만 어느 한 쌍의 α 와 β 값도 모든 유형 절차에서 직무피폭을 적절히 대표하지는 않는다는 사실 때문에 어느 것을 사용할지에 대해서는 세계적 합의가 없다. 어떤 표준으로 지원되는 국제적 합의 없이, 그리고 두 선량계를 실수 없이 위치시키는 방법 없이는 평가된 유효선량 값이 믿을만하지도 않고 비교할 수 있지도 않다.³¹⁾

(104) 유럽 방사선량계측 조정네트워크Coordinated Network for Radiation Dosimetry(CONRAD) 프로젝트에서 13개 유럽국가에서 사용되는 선량계측법을 비교했다. 5개국에서는 납치마 위에 선량계 하나를 패용했고, 7개국에서는 납치마 아래에 하나의 선량계를, 한 국가에서만 두 선량계(납치마 위와 아래)를 패용하고 있었다(Järvinen 등 2008). 일부 국가에서는 규제기관 권고가 없어 병원들이 서로 다른 방법을 채택하고 있었다(IAEA 2014b).

(105) 또, CONRAD 연구에서 Järvinen 등(2008)은 여러 저자가 두 선량계에 대해 제안한 11쌍의 α 와 β 값과 단일 선량계 접근용 4개 값에 대해 포괄적 비교를 수행했다. 연구는 몬테칼로 시뮬레이션과 H_o 보정목적으로 Rando-Alderson 모의체에서 몇몇 측정을 포함한다. 몬테칼로 시뮬레이션과 측정 모두에서 모의체는 0.35 mm 납치마와 따로 목깃 보호대로 둘러쌌다. α 와 β 쌍 값으로부터 최선의 평가를 구하기 위한 명시된 기준은 전형적 피폭 기하배열에서 몬테칼로 시뮬레이션으로 얻은 유효선량을 과소평가하지 않고 과대평가를 최소로 하는 것이었다.

31) <역주> 국제적 표준은 없더라도 국가는 기준을 정할 수 있다. 미국의 경우 ANSI가 두 선량계 알고리즘 표준을 정하고 있다. 그러나 우리나라 진단방사선을 규제하는 질병관리본부는 복수선량계 요건은 없으며, 납치마를 입은 경우는 납치마 아래에 몸통 전면에 패용하도록 규정하고 있다. 납치마를 입은 경우에는 읽음값 보정인자도 채택하고 있지 않으므로 이 간행물에서 권고하는 방식보다는 유효선량 평가치가 낮을 것으로 보인다.

(106) CONRAD 연구는 모든 가능한 기하배열에서 최적 알고리즘은 없으며 따라서 하나를 선택하려면 타협이 필요하게 된다. 시험한 모든 복수선량계 알고리즘 중에서 둘이 최선 평가를 구하는 기준에 가까운 것으로 나타났는데 이는 스위스 시행령(Swiss Ordinance 2008)과 McEwan(2000)에 주어진 α 와 β 값 세트였다. 이 값들을 표4.1에 보였다. 최근에는 ICRP 103 가중치에 근거한 유효선량에 맞춘 알고리즘도 개발되었는데(Von Boetticher 등 2010) 그 값도 표4.1에 보였다.

표4.1. 전형적 기하배열에서 유효선량의 과소평가 없이 최소한 과대평가하는 기준을 잘 만족하는 알고리즘과 ICRP 103(2007a) 가중치에 근거한 유효선량을 위한 알고리즘의 α 와 β 값[Järvinen 등 2008에서 차용]

알고리즘	갑상선차폐 있을 때		갑상선차폐 없을 때	
	α	β	α	β
Swiss Ordinance(2008)	1	0.05	1	0.1
McEwan(2000)			0.71	0.05
Von Boetticher 등(2010)	0.79	0.051	0.84	0.10

(107) 그러나 평가된 유효선량이 연간 선량한도에 가까울 때는(예: 15 mSv 초과) 어느 α , β 를 사용한 단순 접근보다 해당 기하배열과 노출인자를 고려하여 보다 정확한 평가를 해야 한다(Järvinen 등 2008)³²⁾

4.3.1.2. 단일 선량계 접근에 대한 고려

(108) 몇몇 연구자는 두 선량계의 일반화된 사용에 대해 반대했는데(Kuipers 등 2008, Martin 등 2012), 중재시술자 선량 평가에 납치마 위에 패용한 단일 선량계의 유용성에 대해 연구도 수행되었다(Stranden 등 2008). 여러 연구에서 복수 선량계와 단일 선량계의 정확성에 유의한 차이가 없다고 결론짓고 있다(Schultz와 Zoetelief 2006, Järvinene 등 2008, Kuipers 등 2008, Kuipers와 Velders 2009). 원론적으로 두 선량계 접근이 보다 정확하지만 다음과 같은 단점이 있다고 주장한다.

- 결합 알고리즘에 대한 국제적 합의가 없어 유효선량 비교를 설명하기 어렵게 만든다.

32) <역주> 유효선량한도를 예로든 이 설명에 대해 역자는 지나치게 조심스럽다고 본다. 특정 조직의 등가선량한도를 위협한다면 최선의 재평가가 합당하다고 보지만 유효선량한도(연간 수십 mSv) 수준에서 구체적 재평가 의미는 크지 않다. 특히 어떤 구체적 평가를 수행하더라도 방사선장의 변화가 심하고 피폭자가 움직이는 상황에서 '정밀한' 선량평가가 예상되지도 않는다.

- 임사의사가 두 선량계를 바르고 일관되게 패용함에 대한 신뢰성에 의문이 있다.

- 두 선량계 사용 비용이 높다.

실제로 중재시술 의사들이 종종 두 선량계 위치를 바꿔 패용하는데 차폐되지 않은 납치마 위 선량계가 받는 노출이 납치마 아래 선량계 노출의 10배나 될 수 있어 이러한 오류는 유효선량을 크게 과대평가할 수 있다. 의사들은 둘째 선량계 패용을 잊을 수 있고 심지어는 첫 선량계마저 잊기도 한다.

(109) 나아가 노출 기하배열이 가변적이었고 방사선이 비균질하게 분포하며 신체의 일부만 차폐된다. 따라서 유효선량 평가에서 높은 정확도를 달성하는 것은 가능하지 않다. 선량이 해당 선량한도보다 충분히 낮으면 이행하기 쉽고 선량 준위에 대한 무난한 지시를 제공한다는 목적에 맞는 실용적 선량계측체계로도 선량한도 준수를 확인하는 데 충분하다.

(110) 납치마 아래 패용하는 단일 선량계는 몸통 내 방사선에 민감한 장기가 받은 선량에 대한 지시를 제공한다. 그러나 납치마 아래 선량계의 월간 읽음값은 종종 검출한계 미만이어서 기술의 정확성이 부족하며 정보를 제공하는 가치가 제한된다.

(111) Martin(2012)은 납치마 위 목깃에 패용하는 단일 선량계를 사용하는 실용적 접근을 제기했다. 1년 또는 지정된 그 미만 기간에 목깃 선량계 읽음값이 소정 값에 이를 때에만 둘째 선량계 패용이 정당화된다고 주장한다. 목깃 선량계 읽음값도 차폐되는 장기를 고려한 인자로 보정하면 유효선량에 대한 지시가 될 수 있고, 수정 선량 지시자로도 활용될 수 있다.

(112) 납치마 위 목깃 선량계의 $H_p(10)$ 과 몬테칼로 시뮬레이션이나 인형모의체에서 TLD 측정값에서 도출된 유효선량 값의 비교는 보정인자로서 납치마만 입고 갑상선보호대가 없는 경우에는 0.011~0.18, 납치마와 갑상선보호대 모두를 착용한 경우에는 0.02~0.083 범위였다(Martin과 Magee 2013). Martin과 Magee(2013)는 납치마를 입고 진단방사선 절차에 참여하는 의료진에 대해 유효선량(E)의 합리적 지시는 다음의 간단한 관계식으로 얻을 수 있다고 제안했다.

$$E = 0.1 H_0.$$

(113) 이 제안된 인자 0.1은 유효선량의 보수적 평가를 제공하여 중재 방사선학이나 중재심장학에 관계하는 의료진을 포함해 방사선과에서 일하는 의료진 대부분에

게 적합할 것으로 본다. 만약 H_0 읽음값이 20 mSv(1개월에 유효선량 약 2 mSv)에 근접하거나 초과하면 납치마 안에 둘째 선량계 패용과 특정 알고리즘 적용을 고려할 수 있다. NCRP(2010)도 만약 단일 선량계를 사용한다면 이는 납치마 위에 패용해야 한다고 결론을 내렸다(즉, 납치마 아래에 단일 선량계는 용인되지 않는다).

4.3.1.3. 유효선량 평가 방안에 대한 권고

(114) 납치마 위 목깃 높이에 단일 선량계가 유효선량의 합리적 추정치를 제공하고 단일 선량계가 두 선량계보다 단순하며 선량계 위치 오류 가능성이 낮지만, $E = 0.1 H_0$ 라는 식은 모든 중재절차에서 납치마를 입고 모든 납치마 감쇠가 유사하다는 가정에 근거한다. 그러나 모든 나라나 의료기관에서 모든 의료진이 납치마를 입는다는 가정이 항상 사실일 수는 없고, 납치마들이 유사하고 충분한 감쇠를 제공할 것으로 가정하기도 어렵다. 여러 수준 납등가 납치마가 가용하며 납이 아닌 감쇠물질을 내장한 경량 납치마도 있다. 납치마의 납등가두께가 납치마 라벨에 적힌 납등가두께와 다른 경우도 있다(Lichliter 등 2017). 따라서 ICRP는 기준을 만족하는 것으로 나타나고 CONRAD 연구(표4.1 참조)에서 제안된 알고리즘의 하나와 같은 간단한 알고리즘과 함께 두 선량계 접근을 사용하도록 한 기본 권고를 유지한다.

(115) 만약 어떤 기관에서 모든 의료진이 모든 중재절차에서 충분한 감쇠를 갖는 납치마를 입는다고 믿을만하게 가정할 수 있다면 그들의 피폭을 평가하는 데 납치마 위 선량계로 충분할 수 있으므로, 중재 의료진 구성원 대부분에 대해 납치마 안 선량계를 생략할 수는 있다. 그러나 중재시술자는 전형적으로 가장 높은 직무피폭을 받고 그들이 입는 납치마의 실제 감쇠는 잘 알려지지 않기 때문에 절차를 시술하는 중재시술자에게는 두 선량계를 권고한다.

(116) 의료진 중 한 사람이 둘 이상의 고용주를 위해 일한다면 두 고용주 사이 협조는 필요하다. 선량계측 대안의 하나는 그 종사자는 각 고용주가 제공하는 다른 선량계를 가질 것이지만 각 시설에서 발생한 개인선량 모두의 합을 얻어 완전한 기록선량을 유지하는 것이다.³³⁾

33) <역주> 각 고용주 책임 아래 피폭한 선량의 합이 개인 선량한도를 초과하지 않아야 하므로 복수 직장을 가진 종사자의 경우는 고용주 상호 피폭정보를 교류해야 한다. 기록선량은 국가 방사선작업자 등록센터(현재 중재절차 의료진은 질병관리본부)가 한 종사자에 대해 복수기관에서 보고된 선량을 합산하도록 해야 한다. 편의를 위해 주된 근무지 고용주를 정하고 기록선량은 주된 기관이 주관하게 할 수도 있다. 이런 사례는 종종 해외를

4.3.2. 수정체 등가선량 평가

4.3.2.1. 수정체 선량 감시에서 실용량 사용

(117) ICRP(2010b, 부록 F)는 두 가지 선량계측 접근을 사용한 수정체 흡수선량 계산을 고려한 바 있는데, 첫째는 ICRP 110(2009a)의 전산모의체를 사용하는 것, 둘째는 Behrens 등(2009a)와 Behrens(2012a)가 개발한 정형화한 눈 모델을 사용하는 것이다. 정형화 눈 모델은 낮은 에너지 입사 입자에 의한 눈의 외부피폭에서 큰 선량구배를 포착하도록 사용되어 ICRP 110(2009a) 모의체로부터 도출된 수정체 선량 환산계수를 보완했다. ICRP(2010b)는 또한 전방 상피조직층이 기저의 무핵 수정체 섬유세포를 생성함에 주목하여 수정체 전체에 평균한 선량을 전방 상피조직층 선량과 비교했다. 비교는 매우 낮은 광자나 전자 에너지를 제외하고는 두 기하모델이 유사한 선량을 냄을 보였다. Bolch 등(2015)은 눈과 수정체의 선량계측 모델과 눈 피폭 선량계수 계산에 적용에 대해 상세하게 보고했다.

(118) ICRU(1992)는 눈 수정체에 대해 실용량으로 개인선량당량 $H_p(3)$ 사용을 권고했다. 그러나 $H_p(3)$ 이 수정체선량 평가에 잘 부합하지만 많은 나라에서 $H_p(3)$ 를 측정하는 선량계가 가용하지 않다³⁴⁾(Cantone 등 2017). ICRP 103(2007a, 부록 B)과 ICRP 116(2010b)에는 광자피폭에 대해서는 실용량 $H_p(0.07)$ 이 수정체 감시에 적합하다고 권고했다. Behrens와 Dietze(2010, 2011) 및 Behrens(2012b)는 실물 모의체와 베타 방사선장을 사용해 권고된 세 깊이(0.07, 3 및 10 mm)에서 해당 실용량 값과 수정체 등가선량을 비교했다. 저자들은 X선장에 대해 후방산란을 모의하기 위한 평판 모의체 위에서 교정된 $H_p(3)$ 과 $H_p(0.07)$ 모두가 적합하다고 결론지었다. Vanhavere 등(2012)와 Sánchez 등(2014)도 비슷한 결과를 보고했다.

(119) 수정체 선량계측에 $H_p(10)$ 의 적합성과 관련해 Sánchez 등(2014)은 전형적으로 형광투시나 CT안내 절차에 사용되는 것처럼 평균에너지가 44 keV 이상인 4종 광자 스펙트럼에 대해 OSL 선량계로 측정한 $H_p(10)$ 과 $H_p(0.07)$ 의 차이는 10% 미만이지만, 광자 스펙트럼의 평균에너지가 36 keV일 때는 17%로 증가함을 보였다. IAEA(2013)와 국제표준화기구(ISO 2015)는 광자 방사선 일반에 대해

포함한 다른 기관 연수에서 발생한다.

34) <역주> 원문은 “ $H_p(3)$ 에 대한 선량계 교정이 가용하지 않다.”고 적고 있으나 사실은 $H_p(3)$ 을 측정하도록 설계된 선량계가 가용하지 않은 것이어서 수정했다. 교정은 다른 실용량에 대한 교정과 크게 다르지 않다.

$H_p(0.07)$ 을 $H_p(3)$ 근사로 사용할 수 있으며 선량계에 도달하는 광자 스펙트럼의 평균에너지가 40 keV 이상이고 주로 전방에서 입사되면 $H_p(10)$ 도 사용될 수 있다고 제안했다. 수정체 감시절차는 ISO(2015), IAEA(2013, 2014b) 및 IRPA(2017)가 제공하고 있다.

4.3.2.2. 보안경 미착용시 수정체 선량 평가

(120) 실험이나 전산 모델로 수정체 선량을 평가하는 최신 방법은 문헌(Vanhavere 등 2012, Carinou 등 2015)에 있다. 주어진 X선관 전압과 전류에서 발생하는 수정체 선량은 여러 인자에 의해 영향을 받는데 환자체격, 투영 각도, X선관 초점 및 환자로부터 중재시술자까지 거리, 시술자 기법 등이다(Vañó 2015).

(121) 눈 방호가 없을 때 눈 선량계를 패용할 위치에 관한 여러 연구가 있다. 머리의 왼눈썹 끝이나 이마 중앙에 패용한 선량계가 일반적으로 눈 선량을 잘 제공할 것이다. 일부 연구는 X선관에 가까운 쪽 눈썹 끝에 둔 TLD가 양미간에 둔 것보다 3~5배 높은 선량을 낸다고 보고한 반면, 다른 연구는 후자 위치에서 선량이 더 높은 경향이라고 보고한다(Efstathopoulos 등 2011, Vanhavere 등 2012, Principi 등 2014). 따라서 최적 위치는 절차 유형과 시술자 관행에 따라 달라지는 것 같다.

(122) X선관에 인접하는 쪽에 목깃 선량계를 패용하면 눈 방호가 없는 경우 눈이 노출되는 방사선 준위에 대한 좋은 지시를 제공할 것이다. 문헌 결과는 가변적이지만(Martin과 Magee 2013) 이 선량계는 수정체 선량을 과대평가할 것 같다. 중재시술자에 대한 합리적 근사는 $H_{eye} = 0.75 H_0$ 로 주어지며, X선관으로부터 먼 의료진에 대해서는 $H_{eye} \approx H_0$ 로 주어진다(Clerinx 등 2008, Martin 2009). 여기서 H_0 는 목깃에 패용한 선량계(납치마 위)의 개인선량량량으로서 $H_p(3)$ 또는 $H_p(0.07)$ 이다.

(123) 그러나 목깃 선량계는 눈 선량에 대한 지시자일 뿐 바른 측정치는 아니다. 그 선량계 읽음값 누적이 어떤 소정 값(예: 10 mSv)을 초과할 것으로 예상되고 보안경을 쓰지 않았다면 많이 피폭하는 눈 근처에 눈 선량계를 패용하여 평가의 정확성을 높이기를 조언한다.

(124) 중재시술자가 시술 중 선량계를 일상적으로 사용하지 않는 상황이 있고 기간 중 어느 정도 보수적 선량평가 필요성도 있다. 이러한 상황에서 눈 선량의 합리적 평가를 얻는 방법에 대한 탐구에서 Vañó 등(2013b)은 수정체 선량의 대체로

서 중재 심장학에서 커마면적곱과 회전중심에 95 cm 거리의 C암 위에 둔 능동형 선량계 읽음값의 비를 조사했다. 1,969 중재절차에 근거한 이 연구는 커마면적곱에 대한 C암에서 산란선량의 비가 $10.3\sim 11.3 \mu\text{Sv Gy}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 범위에 있었다. 이 비값은 조사한 유형의 중재절차와 시설의 특성조건에만 맞는 한 예에 불과하다. 다른 정보가 없고 절차의 유형과 근사적 횡수를 안다면 방사선관리책임자는 눈 선량 평가에 그러한 간접 접근을 활용할 수 있다.³⁵⁾ 선량이 선량한도에 가깝다면 더 상세한 연구가 필요하다.

4.3.2.3. 보안경 착용시 수정체 선량 평가

(125) 수정체 선량을 직접 평가하기 위해 선량계를 안경 뒤쪽에 위치시키는 기구를 사용하여 눈 선량을 계측하려는 시도도 있다(Bilski 등 2011, IRSN 2014). 그러나 세계적으로 많은 의료진이 납치마 위 목깃의 표준 선량계로 감시를 계속하려 할 것이다. 따라서 수정체의 방사선 피폭 평가에서 언제 얼마나 안경에 의한 감쇠를 고려할 것인가에 대한 의문이 있다.

(126) Magee 등(2014)는 선량감축인자 dose reduction factor(DRF, 즉 보안경 없을 때 선량을 보안경 사용시 선량으로 나눈 비)를 결정하기 위해 Rando모의체를 이용하여 보안경 30 세트에 대해 측정한 것을 보고했다.

(127) 납 보안경이 제공하는 방호는 환자로부터 산란방사선이 머리로 입사하는 각도에 따라 달라진다(McVey 등 2013, Magee 등 2014, Van Rooijen 등 2014). 중재시술자나 심장학자가 절차를 수행하는 대부분 시간동안, X선을 조사할 때 의사는 환자를 향해 보지 않고 모니터의 결과 영상을 볼 것이다. 따라서 수정체 선량평가에서 안경의 DRF를 적용할 때는 머리 높이에서 측면과 아래쪽에서 입사하는 X선을 고려해야 한다.

(128) 나아가 보안경에 관한 연구는 보안경을 썼을 때 눈 선량은 주로 중재시술자의 주변 조직에서 산란된 방사선으로부터 온다는 결론을 내린다(Moore 등 1980, Day와 Foster 1981, Cousin 등 1987, McVey 등 2013, Magee 등 2014). 렌즈 크기, 안경의 측면차폐 유무, 안면 윤곽에 맞게 밀접한 정도가 제공되는 방호 정도를 결정하는 데 모두 중요하다. 산란방사선이 시술자 머리 아래와 측면으로부터 입사하므로 얼굴에 밀착되는 정도와 얼굴 측면과 눈 아래 영역을 렌즈가 방호하는

35) <역주> 이런 대안을 적용하는 절차는 국가나 규제기관에 따라 다를 수 있다. 원자력안전법 하부 규정은 안전관리자가 독자적으로 이런 대안을 적용할 수는 없으며 '판독특이자'로서 선량평가위원회가 결정한다.

정도가 DRF를 정하는 결정적 인자이다.

(129) Magee 등(2014)은 대부분 상황에서 0.75 mm 납등가 보안경 대다수가 임상 관행에서 일어나는 피폭에 대해 3~6 사이의 방호를 제공하는 것으로 결론지었다. 이 결과를 바탕으로 0.75 mm 납등가 보안경이 제공하는 방호를 고려할 때 DRF 2를 나누는 것이 합리적이고 보수적일 것이다. 이 인자는 보안경이 측면차폐가 있거나 둘러싸는 모양이며 테에도 방호를 고려하고 있어 적합한 디자인이며(Martin 2016) 일관되게 착용할 때 목깃 선량계 읽음값에 적용해야 한다. 나아가 DRF를 적용하기 위해서는 관련 중재시술자가 항상 보안경을 착용하는지를 확인하기 위해 기록되는 일상점검을 포함한 품질보증 프로그램이 있어야 한다.

(130) Hu 등(2017)은 몬테칼로 시뮬레이션과 측정을 활용하고 납등가와 안경 크기를 고려한 연구를 수행했다. 이 연구에 따르면 0.1~1 mm 납등가 두께이고 20 cm² 크기 렌즈를 갖는 보안경을 착용할 때 수정체 선량이 인자 3~9로 감소했다. 납등가를 0.35 mm 이상 증가시켜도 DRF 증가는 유의하지 않은 데 비해, 같은 납등가에서 안경렌즈 크기를 6 cm²에서 30 cm²까지 늘일 때 DRF는 비례하여 커졌다. 저자는 0.5 mm와 큰 렌즈(적어도 렌즈 당 27 cm² 이상)가 합리적이고 효과적인 방호를 달성한다고 결론지었다.

(131) 높은 DRF값이 적절하다고 보는 기관에서는 수평과 연직면에서 각도를 포함해 임상 실제에서 1차 X선과 산란선의 방향을 고려하여 많은 측정이 필요하며 이러한 측정을 충실히 기록해야 한다. ISEMIR 연구는 언제 보안경을 써야 하는지를 포함하여 수정체 선량의 개선된 평가기법을 개발할 필요가 있다고 권고했다(IAEA 2014b).

4.3.3. 손 등가선량 측정

(132) 피부에 대한 선량한도는 가장 높이 피폭하는 1 cm²에 평균한 값에 적용하므로 손에서 가장 심하게 피폭한 부위에 적용된다. 중재시술자의 손은 X선빔에 근접할 수 있고 절차 유형과 접근로가 결정하는 시술자 위치가 그 선량평가에 중요한 인자가 된다.

(133) X선빔 측방에 있고 조사되는 환자체적에 가까이 있는 손의 척골ulnar 특성은 높은 선량을 받으므로 선량계를 X선관에 가까운 손의 약지나 팔목 옆에 패용해야

한다(Whitby와 Martin 2005, Vanhavere 등 2012).

(134) 손이나 손가락 선량을 평가하기 위한 바른 선량계측이 임상실제에서 간단하지는 않다. 중재방사선에서 손 선량 평가법은 손목 선량계이지만 환자 주변 방사선장의 비균질성과 손 일부가 직접빔에 들어갈 수 있는 가능성 때문에 손목 선량계로 측정한 선량은 실제 손가락 선량보다 크게 낮을 수 있다.

(135) CT 형광투시에서 손가락 선량 평가에는 특별한 어려움이 있다. CT 스캐너의 1차빔은 수초에 수백 μGy 를 전달할 수 있다. 제2장에서 적시한 것처럼 시술자 손이 직접빔에 들어가면 수분에 연간 선량한도인 500 mSv에 이를 수 있다(Buls 등 2003, Saidatul 등 2010). 5 mm 폭 수준의 상대적으로 좁은 CT빔 때문에 손가락 깊숙이 낀 선량계는 손가락 나머지 부위가 1차빔에 노출되는 것을 기록하지 못할 수 있다. CT 형광투시에서 수지 감시는 이 경우 제한적일 수 있고 잘못된 안심을 줄 수 있다.

(136) CT영상은 손 일부가 1차빔에 들어가면 시술자에게 경보를 주어야 한다. 나아가 CT 영상을 검토하는 역량은 이러한 피폭을 조절하고 조사를 용이하게 하는 수단을 제공한다. 피폭이 일어났다면 실제 위치에서 적절한 시간 동안 측정을 통해 선량평가를 수행할 수 있다. CT빔에서 선량준위를 측정할 수 있으므로 평가에는 선량데이터도 포함되어야 한다.

4.3.4. 다리와 발의 등가선량 측정

(137) X선관이 침상 아래 있을 때 1차빔은 환자와 침상 하부로부터 아랫방향으로 산란되므로 발 선량이 많을 수 있다. 침상 차폐를 사용하지 않으면 다리 선량이 손 선량보다 클 수 있다(Whitby와 Martin 2003). 납치마나 납/고무 천으로 차폐하지 않은 다리 부위 선량 평가도 고려해야 한다.

4.3.5. SIRT에서 선량평가

(138) SIRT 중재절차를 위해 베타방출체를 사용하는 데 표면화된 문제는 의료진의 손가락 선량계측이다. TLD 손가락 선량계를 방사선원에 가까운 손의 약지에 끼야 한다. 베타 선원과 피부 사이의 매우 짧은 거리와 이에 따른 큰 선량구배 때문에 선량이 과소평가되기 쉽다. Rimpler와 Barth(2007)은 손가락 끝 국부 피부선량

$H_p(0.07)$ 을 측정했는데 부실한 방호로 작업하면 의료진이 연간 선량한도 500 mSv를 초과할 수 있음으로 발견했다. 차폐되지 않은 바이얼이나 주사기에 손가락 끝이 접촉하게 될 것 같으면 손가락 골무(또는 봉지형) 선량계를 낄 필요가 있다.

4.3.6. 배태아 피폭 평가

(139) 임신한 종사자가 형광투시 절차를 수행하거나 돕는다면 배태아에 대한 선량 평가는 보통 어머니 복부 허리 높이에 방호복 아래에 패용한 선량계로 평가한다 (Miller 등 2010, NCRP 2010). 어머니 조직에 의한 감쇠는 고려하지 않기 때문에 이 선량계는 배태아 선량을 과대평가한다. 어머니 복부벽과 전방 자궁벽에 의한 감쇠 덕분에(Trout 1977, Faulkner와 Marshall 1993, NCRP 2010) 태아 선량은 전형적으로 종사자가 패용한 선량계에 기록되는 선량의 절반을 넘지 않는다(Dauer 등 2015). 따라서 두 선량계가 사용되고 납치마 아래 선량계의 개인선량당량 $H_p(10)$ 가 0.2 mSv/월 미만이라면 9개월 기간에 걸친 배태아의 증가선량은 해당 선량한도 미만일 것이다. 선량계는 매월 평가해야 한다. 데이터에 빠른 접근을 위해서는 전자선량계를 사용할 수도 있다(Badal과 Lamont 2002).

4.3.7. 실시간 감시를 위한 전산방법

(140) Badal 등(2013)은 가속한 몬테칼로 코드, 상세한 해부학적 모의체 및 촬영실의 물리적 검출기를 사용한 선량감시 시스템에 대해 설명했다. 이 시스템은 기존 선량계측 시스템보다 높은 정확도로 중재 형광투시 중에 환자와 의료진의 선량을 정확하고 실시간으로 제공하는 기능을 가진다. 이 방법은 개인선량계의 일상적이고 바른 사용을 감사하고 추가 방호(예: 보안경) 필요성을 평가하는 데 도움을 줄 수 있다. 눈 선량을 포함한 개인선량 평가를 위해 사람 위치감시와 함께 전산기법(선량계를 요구하지 않는)의 개발을 위한 연구 프로그램을 추구해야 한다(IAEA 2014b, NCRP 2016).

제5장

방사선방호 방법과 프로그램

- 중재절차에서 직무피폭은 환자피폭과 밀접하게 관련되므로 직무피폭 방호는 환자방호와 통합된 접근으로 관리해야 한다. 의료진을 보호하기 위한 수단이 임상 결과를 훼손하지 않아야 하고 환자피폭을 증가시켜서도 안 된다.
- 시술실내 모든 의료진은 납치마를 착용해야 한다. 중재시술자는 천정걸이 스크린, 침상걸이 커튼, 그리고 가능하면 차폐장막으로 방호되어야 한다. 간호사, 마취사처럼 환자 가까이 있어야 하는 다른 의료진은 이동형 스크린을 활용할 수 있다. 기타 의료진은 거리에 의한 방호도 받을 수 있다.
- 천정걸이 납-아크릴 차폐는 목이나 머리 선량을 인자 2~10으로 줄이므로 중재 시설에는 항상 포함되어야 한다.
- 침상 위부터 늘어트린 납커튼이 있더라도 시술자 발이 피폭할 수 있다. 높은 침상 위치를 요구하는 키 큰 시술자에게는 특히 그러하다.
- SIRT를 수행할 때 ^{90}Y 방사능을 담은 모든 바이얼, 모든 기기 및 투여량을 준비하고 기구를 삽입하는 데 사용되는 1회용품은 손가락 선량을 줄이도록 적절한 차폐와 함께 집게forcep로 다뤄야 한다. 고에너지 베타 방출 때문에 차폐는 아크릴과 같이 원자번호가 낮은 물질로 제공해야 한다.
- 보안경을 쓰더라도 눈 피폭은 중재시술자의 주변 조직에서 산란된 방사선으로부터 여전히 발생할 수 있다. 렌즈 크기, 측면 차폐, 얼굴 윤곽에 밀착 정도 모두가 제공되는 방호 정도를 결정하는 데 중요하다.
- 직무피폭 방호에 책임 있는 병원 의료진은 일반 방사선방호에 관한 지식이 필요하고 임상관행, 중재절차, 그리고 방사선촬영 안내 중재술에 사용되는 X선기기에 익숙할 필요가 있다.

5.1. 환자 방호와 의료진 방호 사이 관계

5.1.1. 환자와 의료진 피폭을 경감하는 조치

(141) 환자 피폭 감축은 비슷한 비율로 산란방사선을 줄여 직무피폭을 감축한다.

따라서 다음과 같은 조치는 환자뿐만 아니라 종사자도 방호한다. 즉, 형광투시 시간, 영상획득 횟수 및 회 당 획득 영상 수의 절감, 형광투시와 영상획득에 낮은 선량 모드 사용, 펄스 주파수 낮추기, 최종영상 유지 및 영상루프 저장, 환자 가까이 영상 수감부 배치, 필요한 시야로 콜리메이션, 가능하면 급경사 투영 및 썬키 감쇠물 사용 지양, 소아 절차에서 반산란그리드 제거 등이다.

5.1.2. 의료진 피폭만 절감하는 추가 수단

(142) 다음과 같은 직무피폭 방호장구와 조치는 환자피폭은 줄이지 않으나 의료진 피폭을 경감한다. 즉, 납치마, 목방호대, 천정걸이 차폐, 보안경, 침상걸이 납커튼, 환자 위 차폐천, 가능하면 환자로부터 거리를 늘이도록 물러서기, X선관 쪽보다는 영상수감부 쪽에 서기 등이다.

5.1.3. 환자 피폭과 의료진 피폭 관계에서 기타 문제

(143) 앞 장에서 중재절차에 참여하는 의료진은 X선촬영에 관계하는 다른 직무그룹에 비해 상대적으로 많은 피폭을 받는다고 언급했다(Kim 등 2008,2012, Martin 2009, Koukorava 등 2011, Vanhavere 등 2012, Jacob 등 2013, ICRP 2013a,b, Vaňo 등 2015a). 나아가 절차에 따라서는 중재시술의사가 도관이나 기타 기구를 조작하기 위해 환자 가까이 머무르기를 요구할 수 있다. 보조하는 다른 의료진도 환자 가까이 설 필요가 있을 수 있다.

(146) X선 형광투시실에서 환자 주변의 높은 선량률은 환자로부터 후방산란하는 방사선에서 온다. X선관을 침상 아래에 두면 이 기하배열에서는 의료진으로 향하는 산란방사선이 환자 몸을 지나면서 감쇠되므로 중재시술자의 머리, 상체 및 손의 선량을 크게 줄일 수 있다(그림5.1. 참조). 따라서 침상 아래 X선관은 대다수 절차에 대해 권고되는 배열이다(ICRP 2013a,b).

(147) C암 각도가 연직으로부터 벗어나면 침상에서 X선관과 같은 쪽에 서 있는 의료진이 환자 측면으로부터 산란된 X선에 의해 더 높은 수준으로 피폭하게 될 것이다. 반대로 그 반대쪽에 있는 의료진으로 향하는 산란선은 환자를 통과하면서 감쇠된다(그림5.2 참조)(Balter 1999, Whitby와 Martin 2003, Schueler 등 2006, Morrish와 Goldstein 2008). 침상 양쪽에서 선량률 비는 X선관 각도 증가에 따라 변한다. X선빔이 연직으로부터 10° 방향을 향하면 X선관에 가까운 쪽 선량률이 반

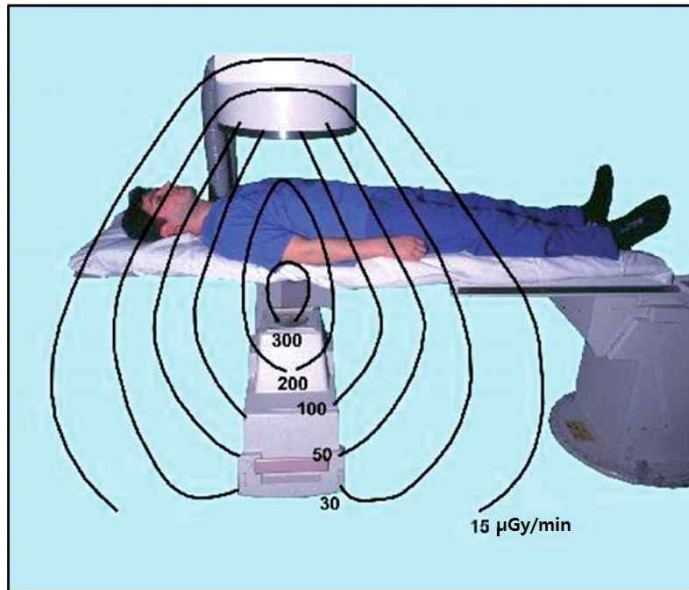


그림5.1. 침상 아래 X선관으로부터 공기커마율 분포(Whitby와 Martin 2003)(British J. Radiology 승인을 받아 재현함).

대쪽의 두 배가 될 수 있다. 각도가 30°로 증가하면 반대쪽 선량률의 5배에 이를 수 있다. 따라서 중재절차를 실시하거나 보조하는 의료진은 경사지거나 측방 투영일 때 침상 가까이 서는 의료진은 X선관 쪽을 피해야 한다.

(148) 몸통 검사를 위해 X선관 각도가 측방을 향해 증가하면 X선이 더 두터운 조직을 지나게 된다. 이는 적합한 영상을 형성하기 위해 X선관 출력을 높이도록 요구하여 환자와 의료진 모두의 선량을 추가로 증가시킨다. 따라서 환자 피부가 과도한 선량을 받지 않도록 X선장을 움직이는 것이 중요하지만 갠트리의 큰 각도 사용은 삼가야 한다.

5.3. 몸통 방호

5.3.1. 산란방사선 지식

(149) 산란방사선 양과 이로 인한 직무피폭은 절차 복잡성, 환자체격, X선장치에

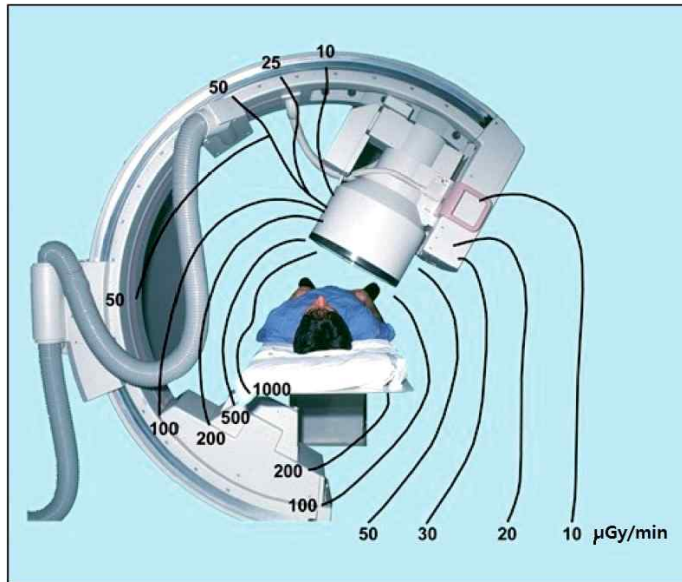


그림5.2. 경사진 X선관일 때 중재용 X선장치 주변의 공기커마율 분포(Whitby와 Martin 2003)(British J. Radiology 승인을 받아 재현함).

가용한 운전모드, 그리고 시술자 숙달에 의해 지배를 받는다(Vañó 등 2015a). 환자 주변 산란방사선 수준의 분포에 대한 지식과 여러 인자가 이에 미치는 영향, 방호도구의 효과적 사용에 대해 이해하는 것이 중재절차에 관계하는 모든 의료진에게 자신의 방호를 위해 필수적이다(ICRP 2009b).

(150) 여러 전문학회와 방사선방호 기관 등이 따를 관행에 관한 지침을 발행했고, 방호장구 사용에 대해 권고한 바 있다(Miller 등 2010, NCRP 2010, Chambers 등 2011, Sauren 등 2011, Durán 등 2013, ICRP 2013a,b, Hiles 등 2016).

5.3.2. 납치마

(151) X선실 내에서 형광투시로 일하는 모든 중재 의료진은 납치마와 같은 개인 방호용구를 착용해야 한다. 납치마는 보통 0.25, 0.35 또는 0.5 mm 등가 납을 함유하며, 일부 디자인은 앞에는 겹치게 하여 0.5 mm 납등가 방호를 제공하고 나머지 부분은 0.25 mm 납등가로 하고 있다. 70~100 keV 범위에서 투과율은 전형적으로 0.5%~5%이다(Marx 등 1992). 납치마가 산란방사선으로부터 몸통을 보호하

지만 머리, 팔 및 다리를 포함한 다른 신체부위는 납치마가 방호하지 않으므로 방사선방호 프로그램에서 이를 고려할 필요가 있다. 납치마의 납등가나 투과율은 의료진 선량을 규제 선량한도를 충족하고 방호를 최적화하는 데 충분해야 한다. 이장의 후반에 설명하듯이 실제 의료진 선량은 여러 인자에 의존하므로 단순히 납치마 두께뿐만 아니라 이들 인자 모두를 고려하여 방호를 최적화해야 한다. 나아가 최적화에는 납치마 무게로 인한 근골격계 부상도 고려해야 한다.

(152) 납치마의 맞음이 때로는 그 납등가보다 유효선량을 줄이는 데 더 중요하다 (Detorie 등 2007). 시술자가 측면에서 납치마 겨드랑이로 피폭하면 폐와 식도를 포함한 흉부 장기가 높은 선량을 받을 수 있다(Franken 등 2007). 이점은 여성 유방 겨드랑이 부위 방호에 특히 중요하다. 일부 병원은 이 피폭을 줄이기 위해 어깨방호가 있는 납치마를 선호한다(Guersen 등 2013).

5.3.3. 경량 납치마

(153) 납치마 무게는 종종 의료진의 불편을 초래하는데 피로, 척추 문제를 포함한 근골격계 문제에 특별한 고려가 필요하다(Papadopoulos 등 2009, NCRP 2010, Klein 등 2015). 여러 디자인의 납치마가 가용한데 어떤 것은 허리 부상 위험을 최소화하기 위해 인간환경공학적 위험인자의 감소를 겨냥한다. 조끼와 치마로 구성된 투피스는 허리에 걸리는 스트레인을 줄이도록 무게 일부를 둔부가 지지하게 한다 (Klein 등 2009).

(154) 납 대신 또는 납과 함께 주석이나 비트무스와 같이 원자번호가 큰 물질로 된 복합층 또는 겹층을 내장한 경량 납치마가 있다. 대체 물질이 40~88 keV X선 흡수에서 납보다 단위 질량 당 효율이 좋아 덜 무거우면서 비슷한 감쇠를 달성할 수 있다. 이런 납치마는 70~80 kV 관전압에서 산란선 감쇠에 더욱 효과적일 수 있지만, 관전압 100 kV 이상에서는 비효율적이다(Christodoulou 등 2003). 허리나 목 문제를 완화하기 위해 무게 감축이 필요할 때 경량 납치마가 합리적 대안이 된다. 경량 또는 “비납lead-free” 납치마는 다른 X선 스펙트럼에 대해서는 납 함유 납치마와 X선 감쇠가 다를 수 있다.

(155) 제조사는 종종 감쇠 특성을 납등가(예: 0.5 mm 납등가)로 표시하는데, 진단 촬영 영역에서 크게 변하는 광자 에너지 스펙트럼에 걸쳐 감쇠가 상당히 변동하므로 추가 명세 없이는 이 데이터가 오도할 수 있다(Finnerty와 Brennan 2005,

Schlattl 등 2007, Eder 등 2010). 또한 제조사는 의료진이 처하는 상황인 산란방사선에 의한 넓은빔 기하배열이 아니라 1차방사선을 사용한 좁은빔 기하배열에서 방호복의 투과율을 시험하기 마련이다. 한 연구는 납치마가 라벨에 언급하거나 제조 증명서에 있는 납등가보다 낮은 값을 제공할 수도 있다고 결론을 내렸다(Papadopoulos 등 2009). 비납 방호천을 사용하는 의료진이나 환자가 알지 못하면서 일반적으로 가정하는 선량보다 높이 피폭할 수 있다.

(156) 방호복의 방호값 지시는 방사선 빔 특성(IEC 2014)과 감쇠를 측정하는 데 사용된 기하배열, 그리고 방호복이 사용되는 조건을 반영하기 위해 여러 빔 품질에서 수행한 측정 조합에 따른 사양을 동반해야 한다. Jones와 Wagner(2013)는 단일 빔 품질에 대한 감쇠나 납등가 측정은 부적절하다고 결론짓고, 방호복의 방호값 사양은 방호복이 사용되는 빔 품질 범위에 걸쳐 제공하는 방호를 정확히 반영해야 하고 그러한 사양을 최종 사용자가 쉽게 검증할 수 있어야 한다고 제안했다. 이들은 또 선정한 4종의 표준 빔 품질을 제안하고 이 빔 품질로 임상에서 사용될 것으로 보는 방호복 모양에서 투과율을 측정하고, 이 4종 빔 품질에 대해 업무량 분포를 가중한 방호지수를 쓸 것을 제안했다(Jones와 Wagner 2013).

(157) 사용자가 특정 방호복의 납등가 라벨을 이해하는 것이 중요하다. 예를 들면 제조사가 '0.35 mm 납등가'라고 쓴 것이 방호복의 전체 부위에 걸쳐 0.35 mm 납이 아니라 두 자락이 겹쳤을 때만 0.35 mm 납일 수 있다. 그런데 사용자는 자락을 겹쳤을 때 0.7 mm 납등가일 것으로 오인할 수 있다.

5.3.4. 납치마 무게의 독립지지대

(158) 시술자가 쉽게 이동시킬 수 있는 방식으로 된 납치마 독립지지대로 납치마와 관련된 인간환경공학적 위험인자를 감축을 달성할 수 있다(Klein 등 2009). 한 제작사는 이를 '무중력 방사선방호구'라고 부른다. 독립 바닥거치대(Pelz 2000) 또는 천정걸이 형태(Savage 등 2009)로 이를 달성할 수 있다. 최신 버전은 머리부터 발까지 확장되고 천정에 걸린 레일을 따라 이동한다.

5.4. 갑상선 방호

(159) 납치마는 목을 방호하지 않는다. 갑상선은 젊을수록 방사선에 민감한데, 갑

상선보호대를 착용하지 않으면 방호되지 않은 갑상선 선량이 유효선량을 배가할 수 있다(Niklason 등 1993, Meteya와 Claycamp 1997, Theocharopoulos 등 2006, Siiskonen 2007,2008, Martin 2009).³⁶⁾ 그러나 ICRP 103(2007a)의 데이터에 근거한 그림5.3에서 보는 것처럼 암 유발 위험은 피폭시 연령에 강하게 종속되고 30세 이상 남성과 40세 이상 여성의 위험은 작다(NA/NRC 2006, NCRP 2010). NCRP(2010)는 젊은 종사자나 목깃 높이에서 개인 선량계(무차폐) 읽음값 $[H_p(10)]$ 이 1개월에 4 mSv를 초과하는 모든 사람은 갑상선보호대나 갑상선까지 덮는 납치마 착용을 제안했다(Wagner와 Archer 2004).

(160) 몬테칼로 시뮬레이션(Marshall 등 1992)은 0.5 mm 납등가 목도리는 갑상선 증가선량을 인자 12로 줄이며, 0.35 mm 납등가 목도리는 인자 7로 줄임을 보였다. 그러나 갑상선보호대를 목 둘레에 꼭 맞게 하면 불편하기에 종종 편안함을 위해 느슨하게 착용한다. 보호대가 후두보다 낮은 높이에 있으면 갑상선 상부 약 10 mm가 방호 받지 못한다. 그러면 두 두께 방호대의 방호인자를 각각 6과 5까지 줄인다. 이 계산은 모사된 환자노출 동안 인형모의체에서 방호인자 측정값 6과 대체로 합치한다(Marx와 Balter 1995). 그래서 임상관행에서 갑상선보호대 착용으로 얻는 갑상선 증가선량 전반적 감축은 인자 5~10 범위이다.

(161) 중재 방사선학자 및 심장학자에 추가하여 외과의사와 같은 다른 의사 그룹도 표준 수술실에서 이동형 C암 형광투시기로 진료를 수행한다(ICRP 2010a). 때로는 머리와 갑상선 선량이 상당할 수 있지만 수술실에서 방호장구 가용성은 종종 제한적이다. 사용하는 기술을 평가하고 의료진이 납치마는 물론 갑상선보호대를 착용해야 할지 판단을 위해 위험평가가 필요하다(Vañó 등 2016).

(162) 대부분 정형외과 절차에서 방사선량은 낮다. 그러나 일부 절차에서는 의사가 조사되는 환자 체적 가까이서 일하며 X선관을 침상위에 두는 구성을 필요로 할 수도 있는데, 이때는 머리와 상체에 산란선 선량이 높아질 것이다. 침상걸이 납커튼이나 천정걸이 차폐는 거의 가용하지 않는다. 그러나 환자 사지와 관련된 절차에서는 환자 몸통이 빔에 들어가는 절차에 비해 선량준위는 상대적으로 낮다. 척추성형술이나 후만증성형술(kyphoplasty)처럼 척추를 고정하기 위해 척추골에 시멘트를 주입하는 소수 정형외과 절차(중재방사선학자에 의해 수행되기도 함)는 시술자의 눈과 손에 높은 선량을 전달할 잠재성이 있다(Struelens 등 2013).

36) <역주> 유효선량을 배가한다는 것은 갑상선보호대를 착용하지 않으면 갑상선 증가선량이 유효선량의 20배 쯤 된다는 말이다.

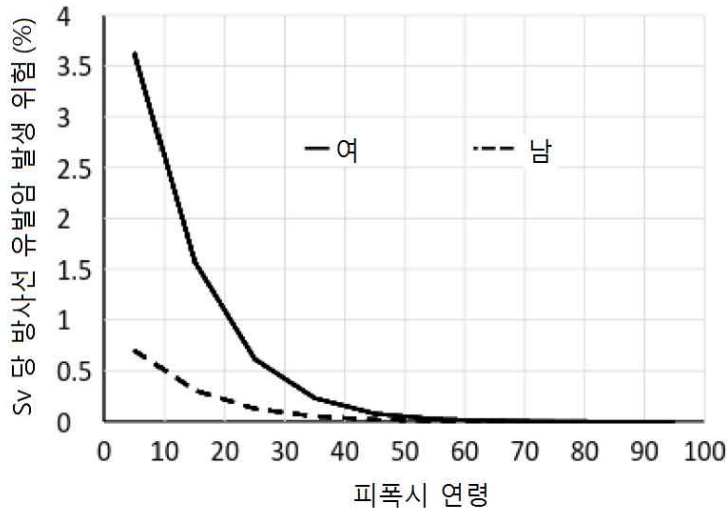


그림5.3. ICRP 103(2007a)에서 정의한 복합집단 데이터에 근거한 갑상선 등가선량 Sv 당 방사선유발 갑상선암 발생 위험.

(163) 홀로 서고 조절 가능하며 환자 신체 윤곽에 가깝게 맞춰 도려낸 침상위 차폐가 중재시술자에게 좋은 방호를 제공하지만 중재시술자에게는 종종 거추장스럽다. 필요한 조작을 방해하는 어떤 것도 절차를 지연시켜 환자와 의료진 선량을 증가시키므로 피해야 한다.

5.4.1.1. 간편 장막³⁷⁾

(164) 산란방사선 준위를 낮추기 위해 텅스텐/안티모니 또는 비트무스를 함유하여 경량이고 간편한 비납 장막이나 패드를 1차빔 외곽에 둘 수 있다(King 등 2002, Dromi 등 2006, Thornton 등 2010, Politi 등 2012, Ordialis 등 2015, Martin 2016). 그러한 장막은 도관을 피부로 삽입할 수 있는 개구부가 있을 것이고 둘러싼 차폐가 환자로부터 산란된 방사선을 잘라낼 수 있다. 이런 장막들은 X선빔장 밖에 시술 사이트가 준비된 다음에 배치한다. 이러한 유형의 방호는 시술자가 조사되는 환자 체적에 매우 가까이 있어야 할 때 정형화된 절차로서 고려되어야 한다. 이러한 장막은 머리, 손 및 상체를 방호하며 눈 선량을 인자 5~25로 줄인다 (Thornton 등 2010). King 등(2002)이 보고했듯이 경피 신장배액절차에 사용된

37) <역주> 간편 장막: 원문은 disposable drape인데 '1회용'으로 적기는 적절하지 않아 '간편'으로 적었다.

평균 비납 간편 장막에 대한 평가는 그 사용에 필요한 약간의 시간과 상대적으로 작은 비용의 가치가 충분하다고 결론지었다. 조각낸 납치마나 차폐물로 재사용 가능한 장막도 만들 수 있다(Miller 등 1985). 간편 장막은 특히 천정걸이 상체 차폐를 효과적으로 사용할 수 없을 때 시술자 피폭을 크게 줄일 수 있다(Fetterly 등 2017). 그러나 간편 장막을 환자 위에 둘 때는 장막이 1차빔 안에 들어가지 않도록 주의해야 한다. 장막이 1차빔에 들어가면 환자와 시술자 피폭이 증가하게 될 것이다.

5.5. 머리와 눈 방호

5.5.1. 천정걸이 차폐³⁸⁾

(165) 제1.1절에서 논의한 것처럼 눈 선량은 X선관 각도, 시술자 위치 및 빔 콜리메이션의 영향을 받는다. 머리 방호에서 가장 중요한 인자는 차폐의 바른 사용이다 (Vaño 등 1998, ICRP 2013a, Vaño 2015). 천정걸이 납아크릴 차폐는 전체 머리나 목의 선량을 인자 2~19으로 줄일 수 있으므로 중재시술실에서는 항상 가용하게 해야 한다(Martin 2016).

(166) 천정걸이 차폐나 보안경이 제공하는 눈 방호도 선량감축인자(DRF)로 정량화할 수 있다. 천정걸이 차폐로 눈 선량감축에 관한 보고는 다양한 DRF 값을 제시한다. 중재절차에서 임상 측정에 대한 대규모 보고는 1.3~7 범위의 DRF를 준다 (Vanhavere 등 2012). 유사 절차를 수행하는 여러 병원의 그룹에서 선량의 비교 검토는 0.7~2.5 범위의 DRF를 보이며(Jacob 등 2013), 방사선학자가 차폐를 사용할 때와 하지 않을 때 선량률을 비교한 한 연구(Magee 등 2014)는 차폐를 사용할 때 DRF 5를 제시한다. 그러나 천정걸이 차폐의 상세한 배치에 대한 모의체 시뮬레이션은 더 높은 DRF를 보였다. Galster 등(2013)의 모의체 연구는 목정맥경류 간속문맥 전신순환연결술transjugular intrahepatic portosystemic shunt(TIPSS), 복강출혈 색전술 및 골반 색전술에서 DRF 8.5~17.6을 보고했다. 천정걸이 차폐는 보안경보다 상당히 큰 선량감축을 보였고 눈뿐만 아니라 머리와 목 전체를 방호한다

38) <역주> 천정걸이 차폐란 시술자의 조작성을 방해하지 않으면서 납등가가 충분한 투명 차폐(납이나 기타 X선 차폐능이 높은 높은 원자번호 물질을 함유한 유리 또는 아크릴)를 천정에 걸어(몇 개 관절을 두어 임의 위치로 조정 가능) 사용자에게 어떠한 무게를 부과하지 않도록 설계한 장치이다. 여러 상용 제품이 가용하다.

(Galster 등 2013). 경피심장중재술에서 세밀한 차폐배치에 대한 한 임상 연구는 DRF 19를 관찰했다(Maeder 등 2006).

(167) 천정걸이 차폐를 사용할 때 달성할 수 있는 선량감축은 차폐 사용법과 효율적 배치에 의존한다. 차폐를 환자 바로 위에 배치하여 시술자가 차폐를 통해 환자의 조사부위를 볼 수 있게 해야 한다. 이것은 중재시술자에 대한 방사선방호 훈련에서 중요한 요소이다(Vanhavere 등 2012). 그러나 X선관이 경사지거나 측방 투영일 때는 종종 이 차폐를 효과적으로 사용하기 어렵다. 효과적 차폐 사용은 X선관이나 침상 이동에 따라 계속적 위치조정을 필요로 한다. 따라서 원론적으로 천정걸이 차폐가 좋은 방호를 제공하지만 임상절차에서 사용되는 여러 투영에 대해 차폐의 효과적 전개가 어렵다는 것이 임상 사용에서 달성 가능한 전반적 방호수준을 제한할 수 있다. 그렇지만 부지런하면 2~5 정도 DRF는 달성할 수 있다. 이 감축은 중재시술자에게 눈 선량을 선량한도 이내로 유지하고, 그렇지 않으면 직업수명 동안 선량 누적으로 발생할 수 있는 수정체 혼탁을 방지할 수 있게 할 것이다.

(168) Vaňo 등(2015b)은 천정걸이 차폐의 바른 사용을 가정할 때 납치마 위 목깃 선량계로부터 수정체 선량을 보수적으로 평가하여, 세 유형 중재시술 전문인(심장학, 신경학 및 영상의학)이 수정체 선량한도에 이르기 위해서는 시술자 당 연간 800 절차 이상을 수행해야 할 것으로 추정했다.

(169) 몇몇 연구자가 방사선 차폐 수술모자의 감쇠와 중재시술자의 뇌 선량 잠재적 감축을 보인바 있다(Alazzoni 등 2015, Uthoff 등 2013). 다른 연구자는 RANDO 모의체에 방사크롬필름radiochromic film을 사용하여 머리 내부 선량분포를 측정하는 데 초점을 맞춰 차폐 수술모자가 중재시술자 뇌 방호에 기본적으로 방호를 제공하지 못함을 보고했다(Fetterly 등 2017). 저자는 조사 기하배열 때문으로 설명했다(즉, 중재시술자 머리보다 낮은 위치에서 산란방사선이 발생하므로 아래 방향에서 오는 방사선에 대해 모자가 방호할 수 없다는 사실 때문임).

(170) 이러한 발견은 의료진의 실제 선량은 여러 인자에 의존하며, 이들 인자를 알고 천정걸이 차폐의 효율적 사용과 함께 이를 관리함으로써 방사선방호가 최적화된다는 사실과 일관된다. 제2장에서 논의한 것처럼 발표된 데이터가 중재 의료진의 뇌 선량 때문에 뇌암 발생이 증가했다는 증거 없이 뇌에 대한 추가 차폐를 제공할 필요성이 있는지를 식별하는 것이 첫 번째 고려이다. 의료진은 추가 방호수단을 실행하기 전에 중재절차와 뇌 방사선피폭 평가를 포함해 방사선방호와 관련된 질문에 익숙한 의학물리사나 방사선방호 전문가와 협의하여야 한다.

5.5.2. 기타 이동형 차폐

(171) 간호사나 마취사처럼 환자 가까이 머물러야 하는 의료진은 X선원과 자신 사이에 둘 수 있는 이동형(바퀴달린) 차폐를 사용하여 추가 방호 이득을 얻을 수 있다.

5.5.3. 보안경

(172) 보안경은 산란방사선으로부터 눈 방호에 중요 요소이다. 보안경 사용은 수정체 선량을 크게 줄이는 것으로 입증되어 있다. 보안경은 0.75 mm 납등가로 상용으로 가용한데 이는 모든 관전압에서 수정체 선량을 85% 이상 줄일 수 있다 (Sandlom 2012, Magee 등 2014, Martin 2016).

(173) 여러 보안경에 대해 실험적 측정(Moore 등 1980, Marshall 등 1992, Thornton 등 2010, McVey 등 2013, Van Rooijen 등 2014)과 몬테칼로 시뮬레이션(Carinou 등 2011, Koukorava 등 2014)은 눈 높이에서 수평으로 입사하는 X선에 대해 5~10 범위의 DRF를 보고하고 있다.

(174) 그러나 임상에서 DRF는 환자로부터 산란방사선이 시술자 머리에 이르는 각도에 의존하며(McVey 등 2013, Magee 등 2014, Van Rooijen 등 2014), 종종 중재시술자 눈이 측방이나 하방에서 수평면으로부터 20°~90° 각으로 피폭한다. 일반 처방 안경일 때 머리와 안경 사이 공간이 큰 측면에서 조사되면 DRF는 감소하는 경향이다(Magee 등 2014). 중재시술자가 절차를 수행하는 대부분 시간 동안 시술자는 환자를 바라보는 것이 아니라 모니터 영상을 볼 것이다. 그러면 산란방사선이 안경유리 뒤 간극이나 방호가 없는 안경테 부위를 통과하여 눈을 직접 조사할 수도 있다.

(175) 또, 보안경을 쓴 경우 눈 주변에 입사한 감쇠되지 않은 X선이 조직에서 산란되어 눈 수정체에 주된 피폭원이 될 수 있다(Moore 등 1980, Cousin 등 1987, Marshall 등 1002, McVey 등 2013, Koulorava 등 2014, Magee 등 2014). 정면에서 입사할 때 여러 범주 보안경 사이 차이는 렌즈 크기, 방호되지 않은 인접 조직체적과 관련된다. 측방에서 노출될 때는 눈 선량은 안면 윤곽에 밀착되는 정도와 측면의 방호 수준에 의존한다. 환자로부터 산란된 방사선이 아래로부터 눈으로 입사할 때는 추가 산란 없이 안경렌즈 아래 틈을 통해 직접 들어오게 된다.

(176) 대부분 보안경은 0.75 mm 또는 0.5 mm 납등가 방호를 가지며 측면 차폐는 0.5 mm 또는 0.3 mm 납등가 방호를 가진다. 디자인은 아래와 같이 몇몇 범주로 나눌 수 있다.

- (A) 큰 평판렌즈와 측면 차폐를 가진 목적에 맞춰 디자인한 보안경
- (B) 측면 입사하는 방사선에 대해 더 나은 방호를 위해 앞 렌즈를 휘어 둘러싸는 형식의 보안경
- (C) 일반 안경에 납유리를 끼고 측면에 납유리를 추가하여 개작한 보안경
- (D) 범주 A와 유사한 디자인이지만 일반 안경 위에 덧씌우는 보안경
- (E) 머리띠로 장착하는 납등가가 낮은 전면 마스크.

(177) 0.75 mm 납등가를 갖는 범주 A, B형 주문설계 보안경은 3.5~6 범위 DRF 로 눈을 방호하며(Cousin 등 1987, Vankavere 등 2012, Koukorava 등 2014, Magee 등 2014, Principi 등 2015, Martin 2016), 0.5 mm 납등가 보안경은 DRF 3~4를 제공한다. 둘러싸는 형식의 보안경은 안경테와 머리 사이 틈이 작은 편이어서 측방에서 오는 방사선에 더 나은 방호를 제공한다. 일반 안경 개작에 근거한 0.75 mm 납등가와 측면 차폐를 갖춘 보안경은 안경과 머리 사이 틈이 큰 편이어서 DRF 3~4를 가진다(Magee 등 2014).

(178) 처방안경 위에 쓰는 덧씌움 보안경은 크고 일반안경을 쓸 수 있도록 아래 틈이 크다. 특히 덧씌움 보안경의 일부 모델은 무게를 줄이기 위해 테에 방호물질을 사용하지 않으므로 테의 중요 부위가 방호물질인지를 확인하는 것이 중요하다.

(179) 머리가 천정걸이 차폐 스크린 뒤에 있을 때 보안경의 추가 DRF는 1.8과 5.8 사이라고 Galster 등(2013)이 보고했다.

(180) 0.1 mm 정도로 낮은 납등가인 안면 마스크나 면갑은 얼굴 전체를 덮어 후 방산란으로 눈 선량에 크게 기여하는 눈 주위 머리 부분의 피폭을 줄인다(Martin 2016). 낮은 납등가에도 불구하고 이 방호는 보안경에 대한 실용적 대안이 되지만 크기와 김 서림 경향 때문에 때로는 의사가 좋아하지 않는다.

(181) 보안경이 제공하는 방호의 측정은 차폐되지 않은 눈 선량계에 기록된 읽음 값을 조정하여 중재방사선의사의 수정제 선량을 대표하는 선량을 도출할 수 있는 유용한 자료를 제공한다. 이러려면 의사가 일관되게 보안경을 씌울 보장해야 한다. 모든 계산은 모든 절차에서 보안경을 쓴 것을 가정한다. 따라서 감쇠인자를 적용하기 위해서는 관심 중재시술자가 보안경을 항상 낀을 확인하기 위한 정규 문서화된

점검을 품질관리에 포함해야 한다.

(182) 적용되는 감쇠인자는 해당 보안경에 대해 측정에 근거한 값일 수 있지만, 임상실제에서 접하는 각도로 X선이 조사되는 것을 고려해야 한다. 측정기법과 결과를 기록해야 하고, 적용하는 DRF는 4를 넘지 않아야 한다.

(183) DRF 확인을 위한 측정이 없더라도 보안경이 제176항의 A나 B형이고 0.5 mm 납등가 이상이라면 보안경이 제공하는 방호를 고려할 때 DRF 2는 보수적 접근이 된다(Magee 등 2014).

(184) 거의 모든 모델 보안경에서 반대쪽 눈에 대한 방호는 X선관에 근접한 쪽 눈에 대한 방호보다 낮아서 반대쪽 눈에 대한 DRF는 1.5~2가 된다(Geber 등 2011, Galster 등 2013, Van Rooijen 등 2014, Fetterly 등 207). 이는 머리가 빔 방향을 향할 때 방사선이 비강에 해당하는 틈을 통과하기 때문이며 선량의 상당 부분이 주변 조직에서 산란선 기여라는 특성 때문이기도 하다. 그러나 반대쪽 눈 수정체 선량은 여전히 선원에 가까운 쪽 수정체 선량보다 낮다.

(185) 요약하면 여러 보안경이 가용하지만 그 선정에는 주의가 필요하다. 보안경이 하방이나 측방으로부터 피폭도 방호해야 하므로 얼굴 윤곽, 특히 안경 아래 주변의 밀착이 납등가보다 더 중요하다.

5.5.4. 방호수단의 결합사용

(186) ORAMED 프로그램 기틀에서 여러 방호도구가 수정체와 수족 선량에 미치는 효과를 구하기 위해 임상조건과 기하배열에 대한 몬테칼로 시뮬레이션과 측정을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 천정걸이 차폐는 눈 선량을 인자 2~7로 줄일 수 있다. 보안경은 눈 선량은 1/10(90% 감축)까지 줄일 수 있다. 침상걸이 차폐커튼은 다리 선량을 인자 2~5로 줄일 수 있다. 침상 아래 X선관 위치는 침상 위 X선관에 비해 눈 선량은 인자 2~27로 줄이고, 손 선량은 인자 2~50으로 줄인다. 적절한 차폐를 사용하면 대퇴동맥을 통한 동맥계통 접근이 요골 접근보다 선량을 인자 2~7로 감축한다. 영상획득 시간에 물러서거나 방을 나가면 선량을 인자 4~7로 줄일 수 있다(Vanhavera 등 2012, Martin 2016).

(187) Thornton 등(2010)은 통상적 방사선차폐 전략이 각개로 사용될 때와 조합

으로 사용될 때 형광투시 시술자 눈의 산란선 선량에 미치는 영향을 평가하였다. 침상걸이 납 스커트(커튼), 납 또는 비납 보안경(0.75 mm 납등가), 간편 텅스텐-안티모니 장막(0.25 mm 납등가) 및 천정걸이 투명 차폐(0.5 mm 납등가)가 있을 때와 없을 때 시술자 모의체 수정체 선량률을 기록했다. 또, 시술자가 환자 상복부 위치에 있을 때 영상강화기가 좌나 우로 15° 경사에서, 그리고 DSA(매초 두 영상)에서 시술자가 환자 대퇴부 위치에 있을 때 수정체 선량을 측정했다. 각 전략에서 차폐효능을 수정체 선량률 감축인자로 표현하여 차폐가 없는 조건과 비교했다. 보안경만 사용할 경우 수정체 선량은 인자 5~10으로 줄었고, 산란 차폐장막만으로는 선량률은 인자 5~25로 줄었다. 둘을 모두 사용한 경우 개별적으로 사용한 때보다 더 높은 방호를 제공하여 선량률을 인자 25 이상으로 감축했다(Thornton 등 2010).

5.6. 사지 방호

5.6.1. 손

(188) 중재시술자 손은 X선 1차빔에 근접할 수 있다. 시술자 손이 환자를 투과한 빔에 들어가면 환자 위에서 흡수선량률은 전형적으로 2~5 $\mu\text{Gy/s}$ 이어서 1분간 피폭하면 100~300 μGy 선량이 된다. 침상의 X선관 쪽 환자 표면으로부터 산란되는 X선 선량은 높으며 입사되는 1차빔에 직접 노출은 50배 정도 더 높다.

(189) 중재시술을 위해 상이한 접근로 적용은 시술 중 시술자 손 위치에 영향을 미치며, 선량 준위에 큰 영향을 준다(그림 5.3 참조). 심장학자에게서 대퇴동맥이 아닌 요골동맥을 통한 도관 도입은 빠른 환자 기동성을 달성하지만 심장학자 손이 X선빔에 더 근접하여 특히 손의 측면이 받는 선량이 높아진다(Mann 등 1996).

(190) 중재방사선학에서 많은 경우 대퇴동맥 접근이 사용되지만, 경피 담즙배액술, 신루설치술, 위조루설치술과 같은 경피절차는 시술자가 촬영되는 부위에 근접하여 도관 삽입을 조작해야 하므로 손가락 끝에 상대적으로 높은 선량을 줄 수 있다(Whitby와 Martin 2005).

(191) 시술자가 안쪽 목정맥을 통해 접근하는 TIPSS와 같은 절차에서는 손이 촬영되는 부위와 멀리 위치하지만 TIPSS 절차는 기술적으로 어렵고 형광투시 시간이

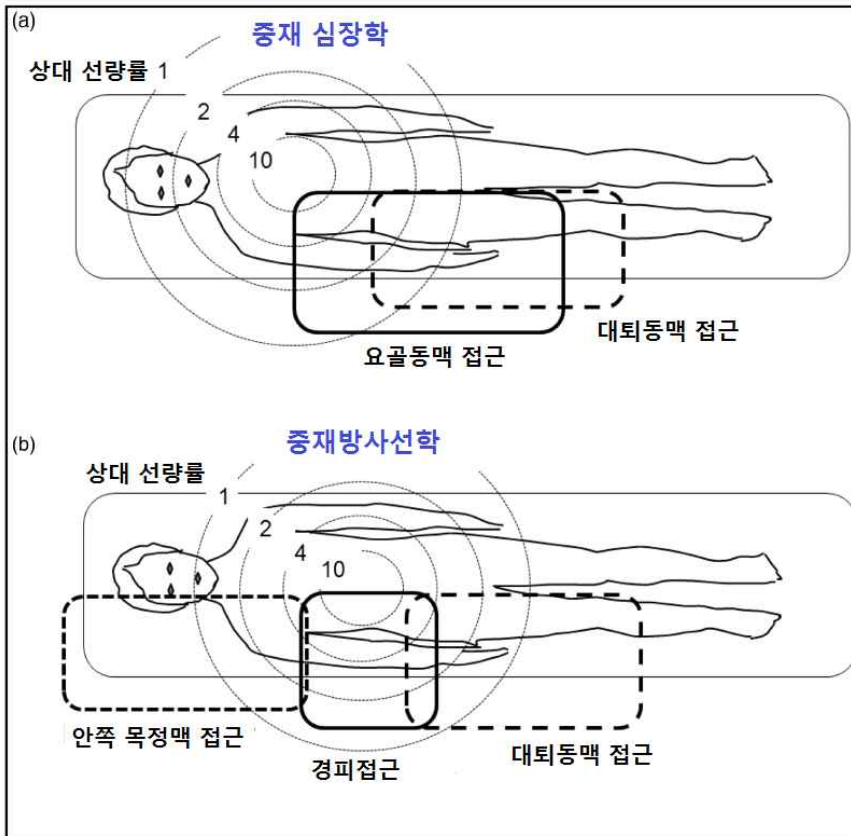


그림5.4. 도관을 조작하는 동안 시술자 손의 위치. (a) 요골동맥 및 대퇴동맥 접근을 통한 중재 심장학, (b) 안쪽 목정맥, 경피 및 대퇴동맥 접근을 통한 중재절차[Martin과 Sutton(2014)]. (옥스퍼드대학 출판부 승인을 받아 재현).

길며 선량도 상대적으로 높다(그림5.4 참조).

(192) 한 손이 조작을 하는 동안 도관을 잡는 손은 일반적으로 X선빔 외곽에 근접하고 더 높은 선량을 받는다(그림5.5 및 그림5.6 참조).

(193) 천정걸이 차폐는 머리와 상체에 대해 훌륭한 방호를 제공하지만 손은 일반적으로 그 차폐 아래에 있어 방호되지 않는다. 그러나 신중하게 행동하면 약간의 방호를 달성할 수 있다(Maeder 등 2006). 천정걸이 차폐 아랫단에 납이나 고무 커튼을 붙이면 일부 절차에서 손 방호에 효과를 볼 수 있다(Vanhavere 등 2012).

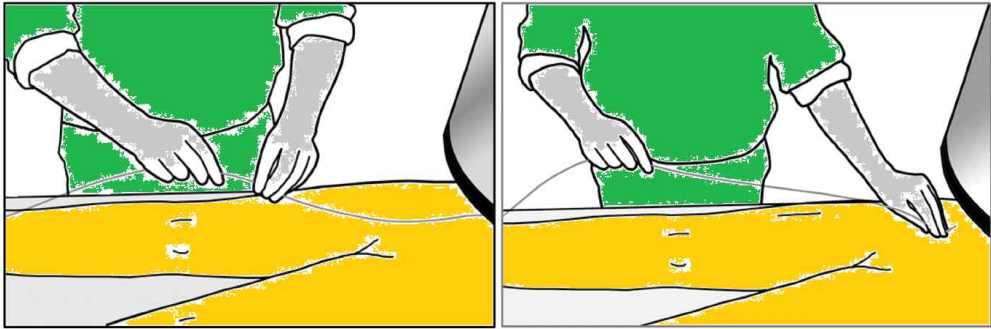


그림5.5. 대퇴동맥 접근으로 수행하는 절차에서 도관 조작을 위한 손 위치(Whitby와 Martin 2005)(British J. Radiology 승인을 받아 재현).

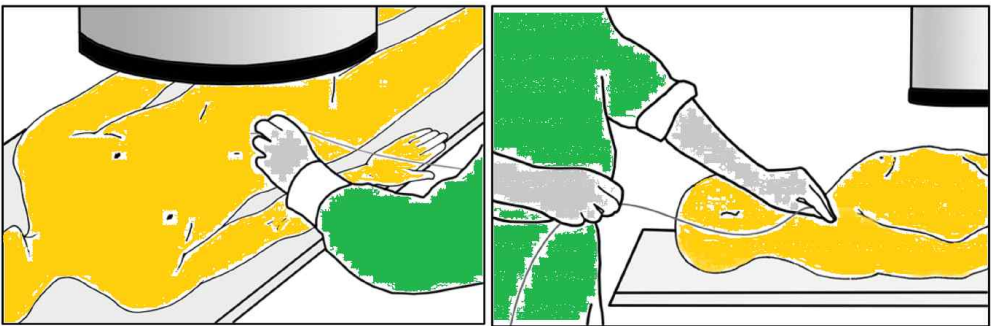


그림5.6. 경피접근과 안쪽 목정맥 접근로에서 손 위치의 예(Whitby와 Martin 2005)(British J. Radiology 승인을 받아 재현).

(194) 독립이고 조정 가능한 침상 위 차폐로 시술자 손을 차폐할 수도 있지만 손이 차폐 아래로 뺏어나가면 방호가 줄어들다. 방호 장막이나 패드도 손에 좋은 방호를 제공하며, 한 연구(King 등 2002)에서는 손 선량을 1/29로 감축했음을 보였다.

(195) 얇은 방호장갑도 가용하지만 제공하는 방호 보고는 차이가 있다(15~60%). 장갑으로 방호된 손이 X선장에 들어가면 선량률이 자동적으로 증가하여 장갑에 의한 감쇠를 상쇄하게 된다. 결국 중재시술자 손 방호 달성 없이 환자선량만 증가시킨다(Wagner와 Mulhern 1996). 손 방호를 위해 새로운 차폐물질(예: 비트무스)을 함유한 손크림과 이를 잡아두기 위한 수술장갑 형식으로 제안되기도 했다(McCaffrey 등 2012). 이 크림도 손이 X선장에 들어가면 마찬가지로 선량증가 잠재성이 있다. 나아가 방사선 감쇠물질로 인한 촉각 피드백의 저하는 정교한 절차에

서 형광투시나 CT 노출시간을 늘일 수 있다(NCRP 2010).

5.6.2. 다리와 발

(196) X선관이 침상 아래에 있을 때 1차빔이 침상 바닥³⁹⁾으로부터 아래로 산란되어 시술자 다리가 상당한 선량을 받게 된다. 차폐가 없으면 다리 선량이 손 선량보다 높을 수 있다. 방호가 없다면 중재시술자 발 선량은 커머면적곱과 밀접하게 연계되는데, 커머면적곱 100 Gy cm^2 인 절차는 시술자 다리에 약 1 mGy 를 준다(Whitby와 Martin 2003).

(197) 침상 측면에 붙인 납커튼(전형적으로 0.5 mm 납등가)은 시술자에게 훌륭한 방호를 제공한다(Whitby와 Martin 2003, Short 등 2007). 절차 동안 바르게 배치한다면 이 커튼은 다리 선량을 인자 $10\sim 20$ 로 줄이지만(Martin 2009), 실제에서는 인자 $2\sim 7$ 이 전형적이다(Vanhavere 등 2012). 이러한 커튼은 모든 중재시술실의 사양으로 포함해야 한다.

(198) 침상에 걸어 늘어뜨린 납커튼은 가능하면 선원에 가까이 두어야 하며 의식적 사용 결정이 아니더라도 항상 거기에 있도록 해야 한다. 중재시술자가 침상 옆에 서는 대부분 절차에서 침상걸이 장막이 좋은 방안이다. 그러나 이것이 발을 충분히 방호하는 경우는 드물다.

(199) 일반적으로 침상걸이 납커튼은 침상 전체 길이까지 연장되지는 않으므로 시술자나 보조자의 위치가 방호에 중요하다. 침상 곁에 서는 시술자는 적절히 방호되지만 TIPSS 절차에서처럼 시술자가 머리쪽이나 그 부근에 선다면 침상걸이 커튼을 침상 머리쪽으로 이동시킨 때만 방호를 제공한다. 이러한 차폐는 시술자가 침상 머리나 발 쪽에 서야하는 절차에서는 효과가 작을 수 있다. 그러한 절차에서는 다른 의료진도 다리를 방호할 수 있도록 침상 측면에 서도록 한다.

(200) 다리를 방호하기 위한 독립 이동형 차폐도 가용하다. 멸균 환경을 유지하기 위해서는 절차 시작 전에 그러한 차폐를 제자리에 두도록 의식적 결정이 필요하다. 그러한 차폐는 절차를 보조하는 다른 의료진을 방호하는 데도 사용할 수 있다. 침상이나 C암이 상하로나 경사지게 움직일 때 침상과 C암이 충돌할 위험이 있다.

39) <역주> 그리고 환자 몸으로부터 후방산란도 있다.

(201) 투과촬영 중에는 침상으로부터 물러서는 것도 직무피폭을 줄이는 유효한 방법이다. 형광투시 중에는 시술자가 절차를 수행하기 위해 환자에 근접해야 하므로 물러서기가 거의 가능하지 않지만, 영상획득 시리즈 중이나 자동주입기로 조영제를 주입하는 동안은 물러설 수 있다.

5.7. PET 중재절차에서 방호

(202) 납치마나 보안경과 같은 전통적 형광투시 안내 중재를 위한 개인방호용구는 PET의 511 keV 소멸광자에 대해서는 비효과적이다(Ahmed 등 2007).⁴⁰⁾ X선 양이나 품질을 운영자가 직접 조절할 수 있는 형광투시나 CT 안내 절차와는 달리, 환자가 핵의약품을 주입받고 나면 중재시술자가 환자로부터 방출되는 방사선을 관리할 방법이 거의 없다. 따라서 PET-CT 안내 절차에서 방호를 보장하려면 의료진 및 인접 차폐가 최적화되도록 PET-CT실의 설계에 신경써야 한다(Madsen 등 2006, Cruzate와 Discacciatti 2008, IAEA 2008, Elschot 등 2010). 제2장에서 보였듯이 PET-CT 안내 중재절차에서 시술자 피폭의 주된 결정자는 환자 가까이서 머무는 시간이며, 이 시간을 줄이는 것이 중요한 직무피폭 방호인자가 된다. PET/형광투시 안내 중재에서도 동일한 고려가 적용된다.

5.8. SIRT에서 방호

(203) ⁹⁰Y 방사능을 내장한 모든 바이얼, 투여량을 준비하고 기구를 삽입하는 데 사용되는 모든 기구 및 1회용품은 손가락 선량을 줄이도록 집게로 다루고 적절히 차폐해야 한다. 고에너지 베타 방출에 대한 좋은 차폐는 폴리메틸메타크릴레이트⁴¹⁾와 같은 낮은 원자번호 물질이다. 여기에는 준비와 투여를 위한 특수한 차폐 상자 사용도 포함된다. 나아가 장갑끼 손으로 오염된 바깥 장갑을 벗을 수 있도록 겹장갑도 권고된다. 마이크로구 이식을 위해 공급자는 아크릴 전달 상자와 전달 세트도 제공한다. 이들은 ⁹⁰Y 바이얼과 모든 차단꼭지나 튜브에 직접 접촉을 예방한

40) <역주> 납등가 0.5 mm 미만인 개인 방호용구는 일반적으로 감마선에 대해서는 방호인자가 미미하여 납치마(또는 조끼)를 착용할 때 불편함으로 인한 작업시간 지연 문제를 고려할 때 종합적 방호효과를 기대하기 어려워 실제로 착용하지 않는다.

41) <역주> PMMA. 달리는 폴리poly 또는 acrylic, acrylic glass 또는 상용명칭으로 Crylux, Plexiglas, Acrylite, Lucite, Perspex 등으로도 불리는 투명 경질 플라스틱이다.

표5.1. 전형적 환자 투여량을 준비하는 기사 및 핵의약사와 준비된 투여량을 이식하는 의사의 전형적 피폭(SIRTEX 2016으로부터 채용)

직무피폭자	피폭선량(mSv)			
		몸통	눈 수정체	손
핵의약사	H _p (0.07)	0.027	0.026	0.35
	H _p (10)	0.003	0.004	
중재시술의사	H _p (0.07)	0.038	0.12	0.32
	H _p (10)	0.004	0.054	
방사선관리책임자	H _p (0.07)	<0.02	0.04	0.2
	H _p (10)	0.01	0.017	

다. 주입을 위해 수동 조작 전에 모든 튜브나 도관을 물이나 식염수로 세척하는 것이 요긴하다. 표5.1에 단일 SIRT 절차에서 의료진 구성원의 전형적 피폭에 대한 개괄을 보였다.

(204) 방사선방호의 모든 기술적 수단에 추가하여 절차의 모든 단계를 신속히 진행하기 위한 훈련은 직무피폭의 상당한 감축으로 이어진다. Aubert 등(2003)은 ⁹⁰Y 주입 기술을 최적화하여 손 선량 감축을 보였는데, 절차 최적화 후 손 선량을 인자 10 이상으로 줄였다.

(205) SIRT 후 환자에 대해 관찰, 일반 간호 및 병실이 필요하다. 의료진이나 방문객 또는 다른 환자에게 주는 선량이 상대적으로 낮음에도 많은 병원에서 환자를 핵의학과 1인실로 보낸다. McCann 등(2012)은 143 건의 SIRT 절차(124 건은 수지구, 19 건은 유리구)에서 수지구에서는 1m에서 평균 등가선량률이 1.1 μSv/h, 유리구에서는 2.4 μSv/h임을 보였다. 2 GBq ⁹⁰Y 방사능 이식 6시간 후 거리별로

표5.2. ⁹⁰Y 방사능 이식 6시간 후 거리별 전형적 주위선량당량률(SIRTEX 2016으로부터 채용)

선원으로부터 거리(m)	주위선량당량률(μSv/h)
0.25	18.8
0.5	9.2
1	1.5
2	0.4
4	<0.1

전형적 선량률을 표5.2에 보였다(SIRTEX 2016).

5.9. 방호복의 취급, 저장 및 시험

(206) 병원은 방호장구에 대해 수용기준을 수립하고 적용해야 한다. 방호복의 구매, 시험 및 교체를 위한 적절한 재원도 배정해야 한다. 납치마를 접으면 접는 선에 방호 안감에 균열이 생길 수 있으므로 접어서는 안 된다. 납치마는 매 사용에 앞서 손상, 비틀림, 비정상 여부를 육안으로 점검해야 한다.

(207) 방호복을 수령한 때는 방호물질에 결함여부를 X선으로 검사하고 이후 연례적으로 성능저하를 검사하여야 한다. Clements 등(2015)은 평가 시간 단축, 의료진 피폭 경감 및 영상 저장을 통해 시험 증거를 제시하기 위해 CT를 사용해 평가하는 새 방법을 개발했다. 저장 영상은 후일 비교에도 사용될 수 있다. 납치마의 실제 감쇠값에 큰 차이가 있기도 하므로 납치마 검수 시험의 표준방법이 필요하다(CRCPD 2001, Christodoulou 등 2003, Finnerty와 Brennan 2005). 비납 납치마에 대해서는 투과율 측정에는 Pasciak 등(2015)이 제안한 것처럼 산란X선을 포함하여 납치마가 사용되는 병원에서 수행되는 중재술에 수반되는 방사선장에서 관찰되는 X선 스펙트럼의 넓은 빔을 사용해야 한다.

(208) 물품을 손상하지 않는 방호장구 청소 지침을 품질보증 프로그램에 포함해야 한다(Vañó 등 2016).

5.10. 교육훈련

(209) 중재절차에 참여하거나 품질보증 프로그램에 관계하는 의료진은 방사선방호 교육훈련을 받아야 한다. 훈련에는 환자 주변에서 산란방사선 분포, 여러 인자가 어떻게 선량분포에 영향을 미치는지에 대한 이해, 그리고 천정걸이 차폐, 보안경, 차폐 커튼이나 장막과 같은 방호장구와 친숙 및 효과적 사용을 포함해야 한다. 이러한 지식은 초기 훈련으로 습득하고 계속교육으로 유지, 갱신하여 기술발전과 부합하게 해야 한다.

(210) 중재시술 시설을 지원하는 의학물리사나 방사선방호 전문가는 중재시술의사

와 중재기술에 관여하는 다른 보건 전문인의 훈련자로서 추가 책임이 있으므로 방사선방호의 최고 수준 훈련을 받아야 한다(ICRP 2009).

(211) 중재절차에서 환자방호와 직무피폭 방호가 밀접한 관계라면 직무피폭 방호 책임자, 규제자, 선량계측 서비스 직원, 공급자의 임상적용 전문가에게는 방사선방호 일반지식 뿐만 아니라 중재절차의 임상관행과 사용하는 방사선기기에 대한 지식도 요구된다. 나아가 선량계측 서비스 직원은 선량계 교정과 비정상 선량값의 조사를 위해 펄스 방사선을 포함한 방사선질과 산란방사선장에 대한 기초지식도 필요로 한다.

5.11. 직무피폭 방호 관련 기록

(212) 보존할 기록은 표준이나 규정에서 요건이 수립되어야 한다. 직무피폭 기록은 종사자가 직무피폭 감시를 받아야 하는 작업특성에 관한 정보, 비정상 피폭값에 대한 조사 결과를 포함한 피폭감시 및 선량평가 결과, 방사선 피폭이 있는 다른 고용주를 위한 작업 정보, 보건감시 결과, 방사선방호에 관한 초기 및 주기 교육훈련, 보수교육 등을 포함한다. 보안경을 착용했고 제공한 방호에 대해 눈 선량계 읽음값에 보정이 이루어졌다면 개별 중재기술자가 보안경과 눈 선량계를 사용했음을 입증하기 위한 기록도 유지해야 한다. 고용주는 종사자에게 자신의 직무피폭 기록에 대한 접근을 허용해야 한다.

(213) 연간 절차 수로 업무량에 관한 정보도 방호최적화와 비정상적 피폭의 비교와 조사에 유용하다.

5.12. 품질보증체계 필요성

(214) 기관은 포괄적 품질보증 프로그램을 수립해야 한다. 품질보증 프로그램은 적절한 직무피폭 관리를 위해 최선의 방사선방호 관행을 목표로 해야 한다(ICRP 2007, IAEA 2014a). 계획피폭상황에 대한 ICRP 권고를 고려하여 방사선을 취급하는 의료진의 능동적 참여가 바람직하다. 품질 프로그램은 정규적이고 독립적인 감사(내부 및 외부)와 함께 기관 차원 경영체계의 일부이어야 한다.

(215) 방사선방호 교육훈련, 이전 선량계측 이력의 확보 및 검토 대책, 고용전 건강감시, 두 곳 이상에서 일할 종사자의 경우 다른 고용주와 정보교환 대책 등을 보장하기 위해 방사선 촬영 안내 중재기술에 참여할 것으로 예상되는 신규 의료진 고용에 대한 절차가 있어야 한다.

(216) 적절한 방사선측정기 및 선량계측 기기의 선정을 위한 절차가 있어야 한다. 이 절차는 국제 권고에 따라 수립되어야 하고 인정된 품질표준에 부합해야 한다. 방사선방호 프로그램 개시부터 몸통, 눈 및 손 피폭의 감시, 작업장 감시와 함께 의료진 방사선방호와 건강감시를 위한 대책이 있어야 한다. 납치마, 갑상선보호대, 보안경, 천정걸이 차폐, 침상걸이 커튼과 같은 개인 보호장구를 갖춰야 하고 정기적으로 이들의 형상을 관리해야 한다.

(217) 개인감시와 작업장 감시 결과는 방사선방호 프로그램의 일환이어야 하고, 비정상적 결과에 대해서는 필요한 시정조치가 이루어져야 한다. 개인선량계측 서비스 제공자는 공급한 개인선량계로부터 선량평가 성능과 인증을 문서화해야 하며, 그러한 정보는 기록하고 규제에서 정하는 기간 동안 안전하게 보존해야 한다.

(218) 사고나 사건의 경우, 관련 절차는 조사, 보고, 결과 기록, 직무피폭 선량 감사 및 시정조치를 포함해야 한다.

(219) 천정걸이 차폐와 보안경 사용을 포함하여 중재절차 성공과 상응하는 가능한 범위까지 방호장구 착용에 대한 지침과 요건이 절차에 기술되어야 한다. 절차에는 보안경 착용에 대한 감사와 기록을 포함해야 하는데, 특히 감쇠를 고려하기 위해 DRF를 적용한 때는 더욱 그렇다.

(220) 중재기술자에 대한 방사선방호 훈련과 인정은 기록하고 수립된 주기마다 또는 중요한 변화가 있을 때마다 검토해야 한다. 품질보증체계의 연수훈련은 기관 전략의 일부이어야 한다. 품질보증 활동과 방사선방호 대책의 전반적 효과에 대한 검토 및 평가를 위해 책임 분담을 포함한 행정절차가 수립되어야 하며 품질보증 매뉴얼의 일부이어야 한다.

(221) 직무피폭 방호는 환자 방호와 밀접하게 연계되므로 전반적 품질보증 프로그램은 방사선기기의 선정, 수용시험 및 취역, 방사선기기의 온전한 특성화, 공기커마곱 측정기 교정, 그리고 개인방호장구의 품질관리를 포함해야 한다.

제6장 요약 및 권고

6.1. 일반

(222) 이 장에서 요약하는 권고는 제3장부터 제5장까지에서 제시했던 조언의 요약이다. 중재절차에서 직무피폭은 환자피폭과 밀접하게 연계되어 환자피폭을 줄이기 위한 대부분 조치는 종사자 방호에도 기여한다. 나아가 직무피폭 방호는 방호복과 차폐의 바른 사용을 요구한다. 의료진을 방호하기 위한 조치가 중재기술의 임상결과를 저해해서는 안 되며 환자피폭을 증가시켜서도 안 된다. 따라서 직무피폭 방호는 환자 방호와 통합적 방법으로 관리해야 한다. 중재절차에서 방사선방호에 책임 있는 병원 직원은 이러한 절차에 익숙해야 한다.

6.2. 개인피폭감시

(223) 중재절차에서 직무피폭감시는 두 가지 주 목적이 있는데, 선량한도 준수의 입증과 직무피폭 방호최적화이다.

(224) 준수 감시는 유효선량 평가뿐만 아니라 눈 수정체나 사지와 같이 납치마 방호가 없는 장기가 받는 선량도 포함해야 한다. 근래 연구는 중재기술자에서 방사선 관련 수정체 혼탁 발생률이 높음을 보였는데 이는 눈 수정체 피폭을 평가할 필요성을 강조한다.

(225) ICRP는 한 선량계는 납치마 안에, 다른 하나는 납치마 위 목킷에 패용하는 두 선량계 사용을 중재절차에 대해 권고해 왔다. 이는 두 선량계 접근이 유효선량 평가에 좋은 접근일 뿐만 아니라 머리와 수정체 선량의 합리적 지표를 제공하며 납치마를 실제 착용했는지 확인할 수 있기 때문이다.

(226) 사용자가 자신의 선량계를 바른 위치에 패용하도록 돕는 시각 요소를 갖춰야 한다. 두 선량계 읽음값의 일관성 분석은 선량계의 바른 사용에 대한 지시를

제공해 감시체계를 보다 공고히 한다.

(227) 최적화 감시는 절차의 성공을 저해하지 않으면서 의료진 선량을 줄이기 위한 방호조치의 효과를 평가한다. 시간이 지나면 최적화 효과는 낮은 직무피폭으로 나타날 것이다. APD는 최적화 감시 목적과 절차 유형별 피폭 연구, 절차의 구체적 특성, 교육 목적에 유용한 것으로 입증되었다.

(228) APD와 지역감시기의 형식시험 절차와 교정은 펄스모드와 고선량률에서 시험을 포함하여 중재절차에서 접하는 대표적 방사선장을 고려해야 한다.

(229) 보안경을 착용한 때 수정체 선량을 평가하는 개선된 기술과 방법이 필요하다.

(230) ICRP는 바른 선량계를 절차서에 규정한 바른 위치에 항상 패용하고 절차 준수에 대한 감사를 수행할 것을 권고한다. 나아가 주위 선량계가 산란방사선장을 지속적으로 평가하고 개인선량계에 대한 후비를 제공하는 데 유용하다. 주위 선량계가 직무피폭(특히 차폐되지 않은 수정체 선량)에 대한 합리적 추정치를 제공하므로 개인선량계 읽음값을 환자 주변(예: C암 위) 주위 선량계 값과 비교하면 개인선량계 패용 절차의 미준수를 발견하는 데 도움이 될 것이다. 방호최적화 관리를 위해서는 피폭이 정상수준보다 높을 때 경보를 주어 작업조건을 검토할 수 있도록 조사준위가 필요하다. 나아가 납치마 위 선량계나 손 선량계 읽음값에 대한 낮은 조사준위도 이들 선량계 읽음값이 예상보다 낮을 때 선량계를 일관되고 적합하게 패용했는지 검토를 격발하는 데 이용될 수 있다.

(231) 일반적 진단방사선에 사용되는 모든 에너지 광자 방사선에 대해서는 실용량 $H_p(0.07)$ 을 $H_p(3)$ 의 근사로 사용할 수 있다. 광자 스펙트럼의 평균 에너지가 40 keV 이상이면 $H_p(10)$ 도 같은 목적으로 사용될 수 있다.

(232) 손 일부 부위가 직접 X선빔에 매우 근접하거나 안으로 들어가는 경우에는 손목 선량계는 실제 손가락 선량을 반영하지 못할 수 있다.

(233) 납치마나 침상걸이 커튼으로 차폐되지 않는 다리 부위의 선량평가에는 주의가 필요하다.

(234) 눈 선량을 포함해 개인선량을 평가하기 위해 사람 위치감지와 함께 계산기

법(선량계 없이) 개발을 위한 연구 노력을 추구해야 한다.

(235) 방사선방호 프로그램은 직무피폭의 감사, 비정상적 선량의 조사, 결과의 보고 및 기록유지 및 필요한 시정조치도 포함해야 한다.

6.3. 직무피폭 방호 방법 및 도구

(236) 환자 방호를 위한 조치는 일반적으로 유사한 비율로 의료진도 방호한다. 나아가 납치마 및 갑상선보호대, 천정걸이 차폐 및 보안경, 침상걸이 커튼, 환자와 거리를 두기 위한 물러서기, X선관 쪽이 아닌 영상강화기 쪽에 서기 등과 같은 수단과 조치가 특히 직무피폭 방호를 위해 적용될 수 있다.

(237) 납 대신 주석이나 비트무스와 같은 원자번호가 높은 물질의 복합층이나 복합층을 내장한 경량 납치마도 있다. 광자 감쇠는 촬영 범위에서 매우 크게 변하는 광자 에너지 스펙트럼에 걸쳐 상당히 다를 수 있으므로 감쇠 특성을 단순히 '납등가'로만 특성화하는 것은 오도할 수 있다. 감쇠인자는 방호복을 사용할 조건을 반영하기 위해 감쇠를 측정하는 데 사용한 방사선빔 품질에 대한 정보와 상이한 빔 품질에서 측정한 비중과 함께 명시해야 한다.

(238) 눈에 대한 방호수단을 사용하지 않은 경우, 전형적 업무량을 가진 사람이 선량한도를 초과한 수정체 선량을 받을 수 있어 시간이 지나면 수정체혼탁으로 이어질 수도 있다. 중재시술자는 일할 때 가용하면 언제나 천정걸이 차폐를 사용해야 한다. 이 차폐의 효과는 배치와 바른 사용 여부에 의존한다.

(239) 보안경을 착용한 경우, 눈 선량은 주로 중재시술자 머리 내 눈 주위 조직에서 후방산란된 방사선으로부터 온다. 나아가 형광투시 중 중재시술자는 통상 영상 모니터를 보기 때문에 수정체가 머리 높이에서 측방이나 하방에서 오는 방사선을 피폭할 것이 예상된다. 따라서 보안경은 착용자 얼굴 윤곽에 밀착되어야 한다. 보안경을 사용하면 수정체 선량을 인자 2~7로 감축할 수 있다.

(240) X선빔이나 조사되는 환자 체적에 가까운 중재시술자 손은 높은 선량을 받는다. 천정걸이 차폐 하단에 부착한 납장막과 환자 위에 배치한 장막이나 패드는 많은 절차에서 시술자 손을 방호하는 데 유효하다. 그런 장막은 도관을 삽입할 수

있는 개구부가 있어야 한다.

(241) 참상겉이 커튼이 있는 경우조차 커튼과 바닥 사이에 틈이 있을 수 있어 시술자 발이 피폭할 수 있다. 침상이 높이 위치할 때는 더욱 그러하다. 영화 모드나 DSA 획득 동안, 그리고 자동주입기를 사용해 조영제를 주사하는 동안은 가능하면 중재시술자는 물러서야 한다.

(242) 방호복 방호값 명세는 감쇠를 측정된 방사선빔의 특성에 대한 지시를 동반해야 한다. 여러 빔 품질에서 측정치의 조합은 방호복을 사용하는 조건을 반영해야 한다.

6.4. 임신종사자 보호

(243) 임신 초기(임신을 선언하기 전)는 일상 종사자 보호로 감당한다. 임신을 선언하고 고용주에게 고지한 후에는 배태아 보호에 추가 배려가 요구된다. 임신 선언 후 임신 종사자의 작업조건을 배태아에 대한 추가 선량이 잔여 임신기간에 약 1 mGy를 넘을 것 같지 않게 만들어야 한다.⁴²⁾

(244) 임신 종사자에 대한 불필요한 차별은 피해야 한다. 현재 가용한 정보는 임신한 중재시술자나 기타 종사자를 중재시술실에서 수행되는 절차로부터 자동적으로 배제하는 것을 정당화하지는 않는다.

(245) 두 선량계를 사용한다면, 배태아 선량을 감시하기 위해 납치마 아래 선량계를 복부에 패용하게 해야 한다. 이 선량계가 0.2 mSv/월 미만의 개인선량당량 $[H_p(10)]$ 값을 보인다면 배태아 등가선량은 선량한도 미만이 될 것이다.

6.5. 방호복 보관 및 품질관리

(246) 방호복을 구매, 시험, 교체하는 데 필요한 적정 재원을 확보해야 한다. 병원

42) <역주> 배태아에는 선량한도가 적용되므로 '약 1 mGy'라는 표현은 선량한도의 엄격성과는 맞지 않는다. 여기서 '약'이란 배태아 선량 평가에 내재된 불확도를 표현한 것일 뿐이다.

은 검수 기준을 수립하고 적용해야 한다.

(247) 납치마를 접으면 접은 선에 방호안감에 금이 갈 수 있으므로 납치마는 접지 말아야 한다. 납치마는 매 사용 전에 결함, 비틀림, 또는 비정상 여부를 육안으로 검사해야 한다. 납치마는 수령할 때와 이 후 매년 결함이나 기능저하 여부를 X선으로 검사하여야 한다.

(248) 품질보증 프로그램에는 방호장구에 손상을 주지 않으면서 청소하는 서면 절차를 포함하고 충실히 따르게 해야 한다.

6.6. 품질보증 프로그램

(249) 기관은 포괄적 품질보증 프로그램을 수립해야 한다. 품질 프로그램은 적절한 직무피폭 관리를 위해 최상의 방사선방호 관행을 유지함을 목표로 해야 한다. 프로그램은 특히 선량계 패용, 방호장구 사용, 직무피폭 방호 최적화와 관련된 절차를 사람들이 준수하도록 적절한 감사를 포함해야 한다.

6.7. 교육훈련

(250) 중재절차에 참여하는 의료진은 피폭감시 및 선량평가 전략, 방호방법 및 방호복 적용을 포함해 품질보증 프로그램에 대해 초기 교육훈련과 주기적 교육훈련을 받아야 한다.

(251) 환자 방호와 중재절차에 개입하는 의료진 방호 사이에 밀접한 관계가 있으므로, 직무피폭 방호에 책임 있는 사람, 선량계측 서비스 직원, 공급사의 임상적용 전문가 및 규제자까지 일반 방사선방호 지식뿐만 아니라 중재절차에서 임상관행과 사용하는 X선장치의 특성에 관한 지식이 필요하다.

(252) 중재시술시설을 지원하는 의학물리사나 방사선방호 전문가는 중재시술자와 기타 중재절차에 참여하는 보건전문인을 훈련시키는 추가 책임이 있으므로 방사선 방호에 대한 최고수준 훈련을 받아야 한다(ICRP 2009). 선량계측 서비스 직원은 선량계 교정과 비정상 선량 값을 조사할 때 사용자와 협조하기 위해 임상관행에

관한 기본지식(예: 방사선질, 산란방사선장, 펄스 방사선)을 필요로 한다.

6.8. 기록

(253) 직무피폭 기록은 작업 특성, 다른 고용주를 위한 일로부터 피폭, 건강감시 결과, 방사선방호 교육훈련(연수과정 포함), 비정상 피폭값에 대한 조사 결과를 포함한 피폭감시 및 선량평가 결과에 관한 정보를 수록해야 한다. 고용주는 의료진에게 자신의 직무피폭 기록에 접근할 수 있게 해야 한다.

부록 A

방사선방호의 생물학적 근거의 개요

(A1) 방사선의 생물학적 영향은 두 유형으로 분류할 수 있는데 조직반응(결정론적 영향)과 확률론적 영향(암과 유전결함)이다. 여기서 이 두 영향에 대해 간략히 언급한다. 방사선방호를 위한 생물학적 근거에 대해서는 ICRP 103(2007a)과 기타 ICRP 간행물에서 심층 다룬 바 있다.

A.1. 결정론적 영향(유해한 조직반응)

(A2) 조직이나 장기의 많은 세포가 살상된 결과로만 영향이 나타난다면 그 영향은 방사선량이 어떤 문턱을 넘은 경우에 임상적으로 관찰될 수 있을 것이다. 그 문턱의 크기는 선량률(즉, 단위 시간 당 선량)과 방사선의 에너지전달선밀도(LET), 조사된 조직이나 장기, 그 장기나 조직에서 조사된 부위의 체적, 그리고 관심 임상영향의 종류에 의존할 것이다. 문턱을 넘어 선량이 증가하면 발생 확률은 급하게 증가하여 100%로 되며(즉, 피폭한 모든 사람이 그 영향을 나타내며), 영향의 심각도는 선량에 따라 증가할 것이다. ICRP는 이러한 영향을 ‘결정론적(조직반응)’이라고 부르는데, 결정론적 영향에 대한 상세한 논의와 정보는 ICRP 103(2007a)에서 볼 수 있다. 그러한 영향은 방사선치료나 중재절차에 방사선 이용에서 발생할 수 있는데, 특히 형광투시 안내 중재절차가 복잡하여 긴 형광투시 시간과 다수 영상 획득을 필요로 할 때 그러하다.

A.2. 결정론적 영향(암과 유전질환)

(A.3) 방사선이 한 세포의 DNA에 손상을 주어 생식 가능하지만 변형세포가 될 수 있음은 세포생물학이나 분자생물학으로부터 충분한 증거가 있다. 일반적으로 매우 효과적인 세포의 복구기전에도 불구하고 이러한 손상이 반드시 방사선과 관련되지 않을 수도 있는 다른 작용제의 영향으로 진전되어 악성(신체적 영향)으로 귀착될 작은 확률이 있다. 확률이 낮기 때문에 이 영향은 피폭자 중 소수에게서만 발생할

것이다. 초기 손상이 생식선의 생식세포에서 발생하면 유전적 영향으로 귀착될 수 있다.

(A4) 확률론적 영향에 대해서 방사선방호 목적으로 문턱 없는 단순한 선형 선량-반응 관계를 가정하는데 이는 현재 지식의 합리적 설명으로 본다. 선량이나 선량률이 높으면 확률이 선량에 따라 단순 비례보다 현저히 높게 증가할 수 있다. 선량이 더 높아 결정론적 영향(조직반응)의 문턱 가까이서는 세포사멸의 경쟁효과 때문에 확률 증가가 느려지고 감소하기 시작할 것이다. 신체적이든 유전적이든 이러한 영향을 '확률론적 영향'으로 부른다.

(A5) 신체적 영향과 유전적 영향에 대한 상세한 논의와 정보는 ICRP 103(2007a)에 있고, 낮은 선량에서 암 위험에 대한 ICRP 견해는 ICRP 99(2005)에서 제시했다. 역학 근거만으로 약 100 mGy 이하의 흡수선량에서 일반인에게 암위험 증가가 있는지 아닌지를 결정하는 것은 가능하지 않다. 문턱 없는 선형모델은 낮은 선량, 낮은 선량률에서 방사선방호를 위한 현실적 목적에서 여전히 신중한 근거이다.

(A6) ICRP는 암에 유전적 감수성이 있는 사람에 대한 주제를 검토했는데, 가용한 정보가 이 이슈에 대해 의미 있고 정량적인 판단을 제공하기에는 부족하다는 예비적 견해를 ICRP 79(1998)에 밝힌 바 있다. 방사선방호 맥락에서 ICRP는 이 주제를 계속 추적할 것이다.

A.3. 태내피폭 영향

(A7) 임신 중 배태아에게는 방사선 관련 위험이 있는데 이는 배태아의 흡수선량과 임신 단계와 관련된다. 배태아 영향은 치명적 영향, 기형, 중추신경계 영향 및 백혈병과 소아암이란 주제별로 아래에 설명한다. ICRP는 태내피폭 영향에 대해 ICRP 90(2003)에서 상세히 평가했다.

A.3.1. 치명적 영향

(A8) 수정란 발달에서 착상전기에는 피폭의 치명적 영향에 대한 배태아 감수성이 있다. 100 mGy 미만에서는 그러한 치명적 영향은 매우 드물고 출생 후 유의한 보

건 위험이 나타날 것으로 생각할 이유가 없다.

A.3.2. 기형

(A9) 전통적으로 수태 후 셋째 주부터 8째 주까지의 주요 기관형성기에는 특히 피폭 당시 발달 중인 장기에서 기형이 발생할 수 있다. 이 영향은 약 100 mGy의 문턱선량을 가진다.

A.3.3. 중추신경계

(A10) ICRP 85(2000a)은 수태 후 8~25주에는 중추신경계가 방사선에 특별히 민감하다고 적시했다. 태아선량 100 mGy 미만에서는 IQ 감소는 임상적으로 식별될 수 없다. 같은 시기에 태아선량이 1 Gy에 이르면 심각한 지능저하가 발생할 확률이 높아진다. 수태 후 8~16주가 가장 감수성이 높고 태령 16~25주에는 낮아진다.

A.3.4. 백혈병과 아동암

(A11) 방사선은 아동이나 성인에게 백혈병과 여러 종류 암의 확률을 높이는 것으로 밝혀졌다. 임신기 대부분을 통해 배태아는 아동의 잠재적 발암영향 위험(전체 집단 위험의 약 3배)과 거의 같은 위험에 놓이는 것으로 본다.

(A12) 임신 환자가 방사선을 이용한 진단검사, 중재절차 및 방사선치료를 거칠 때에는 위에 열거한 영향의 고려가 중요하다. 특정 방사선학적 절차에 수반되는 환자 보건관리와 배태아의 잠재적 유해 보건영향 사이 균형이 유지되어야 한다.

부록 B

양과 단위

(B1) 방사선방호체계 적용에는 사람의 방사선피폭으로부터 선량을 평가할 필요가 있다. 방호량은 조직반응을 방지하고 확률론적 영향을 용인 불가한 수준 미만으로 유지하도록 피폭 한도를 규정하는 데 사용된다.⁴³⁾

B.1. 흡수선량 D

(B2) 흡수선량은 방사선이 물질 요소에 부여한 평균에너지를 그 요소의 질량으로 나눈 몫으로 정의된다. 흡수선량은 기본 물리적 선량 양으로 모든 종류 방사선과 모든 물질에 적용된다. 흡수선량은 측정표준이 있는 측정 가능한 양이다.

(B3) 국제표준단위계에서 흡수선량의 단위는 $J\ kg^{-1}$ 이며 그 특수명칭은 그레이(Gy)이다.

B.2. 선량의 평균: 장기선량

(B4) 실제 방사선방호 적용에서 '흡수선량'을 사용할 때는 선량을 조직 체적에 걸쳐 평균한다. 낮은 선량에서는 특정 장기나 조직에 평균한 흡수선량의 평균값이 방사선방호 목적에 충분한 정확도로 그 조직에서 확률론적 방사선위해와 관련될 수 있다.

(B5) 외부피폭에서는 평균 흡수선량이 조직이나 장기에서 선량분포의 대표가 되는 정도는 피폭 균일성과 방사선 투과도에 의존한다. 약투과성 방사선이나(예: 산란 X

43) <역주> 방호량(등가선량, 유효선량 등)이 피폭 한도를 위해 사용된다는 표현은 지나치게 좁다. 방호량을 정의한 의도는 방사선 위험의 관리를 위한 위험 정량화 척도로 사용하기 위한 것이다. 기본 물리량인 흡수선량만으로는 방사선 위험을 반영하지 못하고 선량당량이 불편하여 실용적인 대안으로 정의한 것이 등가선량이다. 마찬가지로 조직별 구체적 위험을 다루는 것은 비현실적이어서 단일한 양을 종합 위험지표로 활용하기 위해 유효선량을 도입했다.

선) 널리 분산된 조직(예: 피부)에서는 흡수선량 분포가 매우 비균질할 수 있다. 이 점은 중재시술 업무에 종사하는 의료진의 개인 구성원의 직무피폭에 대해 장기나 조직의 평균선량을 평가할 때 특별한 고려를 필요로 한다. 중재절차에서 손가락 선량처럼 극단적 국부피폭인 경우, 평균 피부선량은 낮게 유지됨에도 조직 일부의 선량이 조직반응 문턱을 초과할 수도 있다. ICRP 103(2007a)에 따르면 조직반응 평가에 적용할 양은 등가선량이나 유효선량보다 흡수선량과 그 분포이다.

B.3. 등가선량과 방사선가중치

(B6) 방호량 정의는 특정 장기나 조직 T의 평균흡수선량 D_T 에 바탕을 둔다. 방호량인 장기나 조직 T의 등가선량 H_T 는 그 조직이나 장기의 평균흡수선량 D_T 에 방사선가중치 w_R 을 곱한 양이다. 즉, $H_T = w_R D_T$.⁴⁴⁾

(B7) 등가선량의 단위는 $J\ kg^{-1}$ 이고 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

(B8) 방사선의 종류와 에너지에 따른 방사선가중치 w_R 은 주로 낮은 선량에서 상이한 방사선의 생물학적효과비(RBE) 실험 결과에 근거하며 ICRP가 그 값을 지정한다. 광자와 베타 방사선은 w_R 은 기본값 1을 가지며 무거운 전리입자, 양성자, 알파

44) <역주> 원문 식은 다음과 같다.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \dots (1)$$

방사선 종류에 대해 합을 쓴 것은 과거에 사용하던 선량당량(지금도 실용량으로 사용함)에서 적용하던 습관이 잘못 남은 것이다. 선량당량은 $H=QD$ 로서 흡수선량에 그 흡수선량을 발생시킨 방사선의 선질계수 Q를 가중한 값이다. 그런데 중성자처럼 여러 종류 2차 방사선을 발생시키는 방사선일 때는 선량 발생점에서 여러 성분의 D와 해당 Q의 곱을 합해야 입사한 중성자의 선량당량이 된다. 즉, $H = \sum_R Q_R D_R$ 으로 되어 식(1)과 같은 형태

이다. 예를 들어 인체에 중성자가 입사하여 반도양성자(p)와 감마선을 내고 감마선이 다시 전자(e)를 발생시켜 관심 체적에 양성자에 의한 흡수선량 D_p 와 전자에 의한 흡수선량 D_e 가 발생했다면 중성자에 의한 그 체적의 선량당량 H는 $H = Q_p D_p + Q_e D_e$ 로 산출된다 (실제로는 단순 곱이 아니라 흡수선량의 LET 분포에 대한 적분으로 산출됨).

그런데 방호량인 등가선량은 사뭇 다르게 정의된다. w_R 과 곱할 흡수선량은 최종적으로 흡수선량을 발생시키는 2차 방사선에 의한 것이 아니라 처음 인체에 입사한 방사선이 궁극적으로 발생시킨 총 흡수선량이다. 즉, 위 중성자 예라면 등가선량은 $H_T = w_n D_T = w_n (D_{T,p} + D_{T,e})$ 로 되어 달리 쓰면 $H_T = w_R \sum_r D_{T,r}$ 으로 식(1)과 형태가 다르다. r은 2차 방사선의 종류이다.

입자, 중입자, 중성자 등은 방사선가중치는 20까지 값이 지정된다.⁴⁵⁾

B.4. 유효선량과 조직가중치

(B9) 유효선량 E는 전신 조직 등가선량의 위해가중 평균으로 정의되며 다음처럼 표현된다.

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T w_R D_T$$

여기서 w_T 는 조직 T의 조직가중치이다.⁴⁶⁾

(B10) 평균은 인체 내에서 확률론적 영향 발생에 민감한 것으로 간주되는 모든 조직과 장기에 걸쳐 수행된다. 조직가중치는 연령과 성별에 평균이며 남녀와 모든 연령 인구집단에 대한 근사값으로 적용하려는 것이다.

(B11) 유효선량의 단위도 $J kg^{-1}$ 이고 특별명칭은 시버트(Sv)이다. 등가선량과 유효선량 뿐만 아니라 일부 실용량에서도 같은 단위이다. 사용하는 양이 항상 명확하도록 주의할 필요가 있다.⁴⁷⁾

B.5. 위해와 위해조정 명목위험 계수

(B12) 방사선 위해(detriment)는 피폭집단과 후손이 그 피폭의 결과로서 겪게 되는 보건에 대한 총 해로움을 정량화하는 데 사용하는 개념으로서 기인 치사암 확률, 기인 비치사암 가중 확률, 해로움이 발생한 경우 수명손실을 고려한다.

45) <역주> 방사선가중치는 낮은 선량에서 확률론적 영향을 고려한 상대적 값이다. 외부피폭에서는 신체로 들어가는 방사선의 가중치가 적용되고, 내부피폭에서는 체내 핵종에서 방출되는 방사선의 가중치가 적용된다.

46) <역주> 식의 일부를 역자가 수정했다.

47) <역주> 자격 없이 단순히 '선량'이란 표현이 종종 사용된다. 사람이 받은 선량이라면 대개는 전신에 대한 유효선량을 의미한다. 다른 용도로는 구체성 없이 피폭한 수준 정도의 의미로도 '선량'이 사용된다. 이때는 '노출량'과 같은 용도이다. 혼동을 피하기 위해 특정 조직의 노출량을 표현할 때는 '갑상선 등가선량'처럼 그 조직을 밝혀 말할 것을 권고한다. 그러나 규칙이 명확하지는 않으므로 '선량'이 무엇을 의미하는지는 항상 문맥에서 판단해야 한다.

(B13) 위해는 명목 위험계수를 사용하여 구한다. 총 위해는 신체의 각 조직이나 장기 위해의 합이다.

(B14) 방사선 유발 암과 유전결함에 대한 정보로부터 ICRP는 성인(종사자)에 대한 위해조정 암 위험의 개정된 명목 확률계수로 $4.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 를 제안한 바 있다(ICRP 2007a). 유전적 위험에 대해서는 성인에 대한 계수가 이전 ICRP 60(1991)에서 권고한 값의 1/8로 줄어 $0.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 이다.

(B15) 남녀 사이와 피폭연령에 따라서도 위험에 큰 차이가 있음을 인식하면서 방호체계의 단순성과 견고성을 위해 명목 위험계수는 특정 개인이 아니라 전체집단(이 경우에는 성인 종사자)에 적용해야 한다는 정책을 ICRP는 고수한다. ICRP는 여전히 방사선방호 목적에서 전체적 치사위험계수 5%/Sv가 적절하다고 본다.

B.6. 실용량

(B16) 등가선량과 유효선량을 체내 조직에서 직접 측정할 수는 없다. 따라서 방호체계는 측정할 수 있고 그것으로부터 등가선량이나 유효선량을 평가할 수 있는 실용량을 두고 있다(ICRP 2007a). 방사선감시를 위한 선량계나 측정기는 실용량으로 교정된다. 중재절차와 관련된 실용량에 대해 아래에 요약한다. 보다 상세한 것은 ICRP 103(2007a) 부록B에 있다.

B.7. 선량당량과 선질계수

(B17) 선량당량은 연조직 내 한 점에서 D와 Q의 곱으로 정의된다.

$$H = QD$$

여기서 D는 흡수선량이고 Q는 이 점에서 방사선 종류와 에너지에 대한 선질계수이다. 형광투시 안내 중재에서 산란광자 에너지 범위에서는 Q 값은 1이다. 선량당량의 단위는 J kg^{-1} 이며 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.⁴⁸⁾

48) <역주> 원문은 단위에 대한 설명을 B18항에 적고 있다. 그러나 실용량은 선량당량으로 정의되기 때문에 선량당량의 단위를 명시하는 것이 적절하여 옮겨왔다.

B.8. 지역감시를 위한 실용량

(B18) 지역감시를 위한 실용량은 주위선량당량 $H^*(10)$ 와 Ω 방향으로 방향성선량당량 $H'(0.07, \Omega)$ 이다. 주위선량당량은 어떤 점에서 방사선장을 확장, 정렬한 방사선장에서 ICRP구이 정렬 방향을 마주하는 방향 반경 위 10 mm 깊이에서 형성될 것으로 보는 선량당량이다.⁴⁹⁾ 방향성선량당량은 확장된 방사선장에 있는 ICRU구의 Ω 방향 반경 위 d mm 깊이에서 선량당량이다.⁵⁰⁾

B.9. 개인감시를 위한 실용량

(B19) 개인감시를 위한 실용량은 개인선량당량인데 인체의 특정점 아래 적절한 깊이 d mm에서 ICRU 연조직의 선량당량이다. 특정점은 보통 개인선량계를 패용한 위치로 된다.

(B20) 유효선량을 감시하는 데는 실용량 $H_p(10)$ 를 사용한다. 피부나 손발 선량을 평가하는 데는 실용량 $H_p(0.07)$ 을 사용한다.

(B21) 눈 수정체 선량을 감시하는 데는 깊이 d = 3 mm가 적절하다. 그러나 실제로는 많은 국가에서 $H_p(3)$ 로 선량계 교정이 이루어지지 않아 왔다. 그러나 광자에 대해서는 수정체 감시에 $H_p(0.07)$ 을 사용할 수 있고 방사선 촬영 안내 중재술이 이 경우가 된다.

49) <역주> 주위선량당량의 정의에서 선량평가 깊이(mm 단위의 깊이 d)는 지정되지는 않는다. 실용량 사용에서 대신 측정하고자 하는 선량에 따라 깊이가 지정되는데 유효선량을 위해서는 10 mm, 피부를 위해서는 0.07 mm, 수정체를 위해서는 3 mm이다.

50) <역주> 원문에서 누락된 부분을 역자가 추가했다.

참고문헌

- Ahmed, S., Zimmer, A., McDonald, N., et al., 2007. The effectiveness of lead aprons in reducing radiation exposures from specific radionuclides. *J. Nucl. Med. Meet. Abstr.* 48, 470.
- Alazzoni, A., Gordon, C.L., Syed, J., et al., 2015. Randomized controlled trial of radiation protection with a patient lead shield and a novel, nonlead surgical cap for operators performing coronary angiography or intervention. *Circ. Cardiovasc. Interv.* 8, e002384.
- Andrews, C., Walker, S., Ackermann, R., et al., 1994. Hepatic radioembolization with yttrium-90 containing glass microspheres: preliminary results and clinical follow-up. *J. Nucl. Med.* 35, 1637-1644.
- Aparici, C.M., Win, A.Z., 2014. Use of positron emission tomography/CT to perform biopsy of a mesenteric mass. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 25, 1609.
- Aparici, C., Aslam, R., Win, A., 2014. Initial experience of utilizing real-time intraprocedural PET/CT biopsy. *J. Clin. Imag. Sci.* 4, 54.
- Artschan, R.E.R., Brettell, D.S., Chase, K., et al., 2014. An investigation of the radiation doses to the lower legs and feet of staff undertaking interventional procedures. *Br. J. Radiol.* 87, 20130746.
- Aubert, B., Guilabert, N., Lamon, A., Ricard, M., 2003. Which protection against radiation for new protocols of internal radiotherapy by yttrium-90? 6th European ALARA Network Workshop on Occupational Exposure Optimisation in the Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 23-25 October (2002), Madrid, Spain, pp. 47-49.
- Badal, A., Zafar, F., Dong, H., Badano, A., 2013. A real-time radiation dose monitoring system for patients and staff during interventional fluoroscopy using a GPU-accelerated Monte Carlo simulator and an automatic 3D localization system based on a depth camera. *Proc. SPIE* 8668.
- Balter, S., 1999. Radiation safety in the cardiac catheterization laboratory: basic principles. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 47, 229-236.
- Balter, S., 2001. *Interventional Fluoroscopy: Physics, Technology, Safety.* Wiley-Liss, New York.
- Balter, S., Lamont, J., 2002. Radiation and the pregnant nurse. *Cath. Lab. Digest.* 10, e1. Available at <https://www.cathlabdigest.com/articles/>

- Radiation-and-Pregnant-Nurse (last accessed 21 January 2018).
- Behrens, R., Dietze, G., Zankl, M., 2009. Dose conversion coefficients for electron exposure of the human eye lens. *Phys. Med. Biol.* 54, 4069-4087 (corrigendum at *Phys. Med. Biol.* 55, 3937-3945).
- Behrens, R., Dietze, G., 2010. Monitoring the eye lens: which dose quantity is adequate? *Phys. Med. Biol.* 55, 4047-4062.
- Behrens, R., Dietze, G., 2011. Dose conversion coefficients for photon exposure of the human eye lens. *Phys. Med. Biol.* 56, 415-437.
- Behrens, R., 2012a. Air kerma to $H_p(3)$ conversion coefficients for a new cylindrical phantom for photon reference radiation qualities. *Radiat. Prot. Dosim.* 151, 450-455.
- Behrens, R., 2012b. On the operational quantity $H_p(3)$ for eye lens dosimetry. *J. Radiol. Prot.* 32, 455-464.
- Beijst, C., Elschot, M., Viergever, M.A., De Jong, H.W.A.M., 2016. Toward simultaneous realtime fluoroscopic and nuclear imaging in the intervention room. *Radiology* 278, 232-238.
- Benatar, N.A., Cronin, B.F., O'Doherty, M.J., 2000. Radiation dose rates from patients undergoing PET: implications for technologists and waiting areas. *Eur. J. Nucl. Med.* 27, 583-589.
- Berrington de González, A., Ntowe, E., Kitahara, C.M., et al., 2016. Long-term mortality in 43763 U.S. radiologists compared with 64990 U.S. psychiatrists. *Radiology* 281, 847-857.
- Best, P.J., Skelding, K.A., Mehran, R., et al., 2011. SCAI consensus document on occupational radiation exposure to the pregnant cardiologist and technical personnel. *EuroIntervention* 6, 866-874.
- Bester, L., Meteling, B., Pocock, N., et al., 2012. Radioembolization versus standard care of hepatic metastases: comparative retrospective cohort study of survival outcomes and adverse events in salvage patients. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23, 96-105.
- Bilski, P., Bordy, J-M., Daures, J., et al., 2011. The new EYE-D dosimeter for measurements of $H_p(3)$ for medical staff. *Rad. Measur.* 46, 1239-1242.
- Blake, M.E., Oates, M.E., Applegate, K., Kuligowska, E., 2006. Proposed program guidelines for pregnant radiology residents: a project supported by the American Association of Women Radiologists and the Association of Program Directors in Radiology. *Acad. Radiol.* 13, 391-401.

- Bolch, W.E., Dietze, G., Petoussi-Henss, N., Zankl, M., 2015. Dosimetric models of the eye and lens of the eye and their use in assessing dose coefficients for ocular exposures. *Ann. ICRP* 44(1S), 91-111.
- Buls, N., Page´s, J., de Mey, J., Osteaux, M., 2003. Evaluation of patient and staff doses during various CT fluoroscopy guided interventions. *Health Phys.* 85, 165-173.
- Cantone, M.C., Ginjaume, M., Miljanic, S., et al., 2017. Report of IRPA task group on the impact of the eye lens dose limits. *J. Radiol. Prot.* 37, 527-550.
- Carlson, S.K., Felmlee, J.P., Bender, C.E., et al., 2005. CT fluoroscopy-guided biopsy of the lung or upper abdomen with a breath-hold monitoring and feedback system: a prospective randomized controlled clinical trial. *Radiology* 237, 701-708.
- Camacho, J.C., Moncayo, V., Kokabi, N., et al., 2015. 90Y radioembolization: multimodality imaging pattern approach with angiographic correlation for optimised target therapy delivery. *Radiographics* 35, 1602-1620.
- Carinou, E., Ferrari, P., Koukorava, C., Krim, S., Struelens, L., 2011. Monte Carlo calculations on extremity and eye lens dosimetry for medical staff at interventional radiology procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* 144, 492-496.
- Carinou, E., Ferrari, P., Bjelac, O.C., et al., 2015. Eye lens monitoring for interventional radiology personnel: dosimeters, calibration and practical aspects of Hp(3) monitoring. A 2015 review. *J. Radiol. Prot.* 35, R17-R34.
- 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.
- Chiesa, C., 1997. Radiation dose to technicians per nuclear medicine procedure: comparison between technetium-99m, gallium-67, and iodine-131 radiotracers and fluorine-18 fluorodeoxyglucose. *Eur. J. Nucl. Med.* 24, 1380-1389.
- Chiriotti, S., Ginjaume, M., Vañó, E., et al., 2011. Performance of several active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology. *Rad. Measur.* 46, 1266e1270.
- Christodoulou, E.G., Goodsitt, M.M., Larson, S.C., et al., 2003. Evaluation

- of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter. *Med. Phys.* 30, 1033.
- 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.
- Ciraj-Bjelac, O., Rehani, M.M., Minamoto, A., et al., 2012. Radiation-induced eye lens changes and risk for cataract in interventional cardiology. *Cardiology* 123, 168-171.
- Clairand, I., Bordy, J-M., Carinou, E., et al., 2011. Use of active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology: tests in laboratory conditions and recommendations - ORAMED project. *Radiat. Meas.* 46, 1252-1257.
- Clements, J., Moirano, J., Sherry, C., Barr, P., Berg, J., 2015. Best practices for evaluating and tracking protective garments. *J. Am. Coll. Radiol.* 12, 531-532.
- Clerinx, P., Buls, N., Bosmans, H., De Mey, J., 2008. Double-dosimetry algorithm for workers in interventional radiology. *Radiat. Prot. Dosim.* 129, 321-327.
- CRCPD, 2001. Quality Control Recommendations for Diagnostic Radiography. Vol. 3 Radiographic or Fluoroscopic Machines. Conference of Radiation Control Program Directors, Inc. in Cooperation with Center for Devices and Radiological Health of the Food and Drug Administration, Frankfort, KY.
- Cousin, A.J., Lawdahl, R.B., Chakraborty, D.P., Koehler, R.E., 1987. The case for radioprotective eyewear/facewear. Practical implications and suggestions. *Invest. Radiol.* 22, 688-692.
- Cruzate, J., Discacciatti, A., 2008. IRPA Refresher Course 18: Shielding of Medical Facilities. Shielding Design Considerations for PET-CT Facilities. International Radiation Protection Association, Buenos Aires. Available at: <http://www.irpa.net/members/54302/%7BEF74BEF9-6C7E-4DFC-9B4E-DD9EC8813764%7D/RC%2018%20Shielding%20of%20Medical%20Facilities.%20Shielding%20Design%20Considerations%20for%20PETCT%20Facilities%20PPT.pdf> (last accessed 25 January 2018).
- Daly, B., Templeton, P.A., 1999. Real-time CT fluoroscopy: evolution of an interventional tool. *Radiology* 211, 309-315.
- Dauer, L.T., Miller, D.L., Schueler, B., et al., 2015. Occupational radiation protection of pregnant or potentially pregnant workers in IR: a joint

- guideline of the Society of Interventional Radiology and the Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 26, 171-181.
- Day, M.J., Forster, E., 1981. Protective effect of spectacles. *Br. J. Radiol.* 54, 137-138.
- Demir, M., Demir, B., Sayman, H., et al., 2010. Radiation protection for accompanying person and radiation workers in PET/CT. *Radiat. Prot. Dosim.* 147, 528-532.
- Detorie, N., Mahesh, M., Schueler, B.A., 2007. Reducing occupational exposure from Fluoroscopy. *J. Am. Coll. Radiol.* 4, 335-337.
- Dromi, S., Wood, B.J., Oberoi, J., Neeman, Z., 2006. Heavy metal pad shielding during Fluoroscopic interventions. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 17, 1201-1206.
- Dura' n, A., Hian, S.K., Miller, D.L., et al., 2013. Recommendations for occupational radiation protection in interventional cardiology. *Catheter. Cardio. Interv.* 82, 29-42.
- EC, 2015. Medical Radiation Exposure of the European Population. Radiation Protection No. 180. European Union, Luxembourg.
- Eder, H., Schlattl, H., Hoeschen, C., 2010. X-ray protective clothing: does DIN 6857-1 allow an objective comparison between lead-free and lead-composite materials? *Fortschr. Röntgenstr.* 182, 422-428.
- Efstathopoulos, E.P., Pantos, I., Andreou, M., et al., 2011. Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology. *Br. J. Radiol.* 84, 70-77.
- Elschot, M., De Wit, T., De Jong, H., 2010. The influence of self absorption on PET and PET/CT shielding requirements. *Med. Phys.* 37, 2999-3007.
- Faulkner, K., Marshall, N.W., 1993. Personal monitoring of pregnant staff in diagnostic radiology. *J. Radiol. Prot.* 13, 259.
- Felmlee, J.P., McGough, P.F., Morin, R.L., Classic, K.L., 1991. Hand dose measurements in interventional radiology. *Health Phys.* 60, 265-267.
- Fetterly, K., Schueler, B., Grams, M., et al., 2017. Head and neck radiation dose and radiation safety for interventional physicians. *JACC Cardiovasc. Interv.* 10, 520-528.
- Fischman, A.M., Ward, T.J., Patel, R.S., et al., 2014. Prospective, randomized study of coil embolization versus Surefire infusion system during yttrium-90 radioembolization with resin microspheres. *J. Vasc.*

- Interv. Radiol. 25, 1709-1716.
- Finnerty, M., Brennan, P.C., 2005. Protective aprons in imaging departments: manufacturer stated lead equivalence values require validation. *Eur. Radiol.* 15, 1477-1484.
- Franken, Y., 2002. Guidance on the use of protective lead aprons in medical radiology protection efficiency and correction factors for personal dosimetry. Proc. 6th European ALARA Network Workshop on Occupational Exposure Optimisation in the Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 23-25 October 2002, Madrid, Spain, pp. 135-139.
- Galster, M., Guhl, C., Uder, M., Adamus, R., 2013. Exposition of the operator's eye lens and efficacy of radiation shielding in fluoroscopically guided interventions. *RoFo* 185, 474-481.
- Geber, T., Gunnarsson, M., Mattsson, S., 2011. Eye lens dosimetry for interventional procedures - relation between the absorbed dose to the lens and dose at measurement positions. *Radiat. Measur.* 46, 1248-1251.
- Gianfelice, D., Lepanto, L., Perreault, P., Chartrand-Lefebvre, C., Milette, P.C., 2000a. Effect of the learning process on procedure times and radiation exposure for CT fluoroscopyguided percutaneous biopsy procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 11, 1217-1221.
- Gianfelice, D., Lepanto, L., Perreault, P., Chartrand-Lefebvre, C., Milette, P.C., 2000b. Value of CT fluoroscopy for percutaneous biopsy procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 11, 879-884.
- Goodney, P.P., Beck, A.W., Nagle, J., Welch, H.G., Zwolak, R.M., 2009. National trends in lower extremity bypass surgery, endovascular interventions, and major amputations. *J. Vasc. Surg.* 50, 54-60.
- Guersen, J., Cassagnes, L., Mechin, G., et al., 2013. Interventional radiologists: a necessary evolution of leaded protective aprons design. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 24, 443.
- Hagspiel, K.D., Nambiar, A., Hagspiel, L.M., Ahmad, E.A., Bozlar, U., 2013. Temporary arterial balloon occlusion as an adjunct to yttrium-90 radioembolization. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 36, 809-813.
- Harris, T.J., Zafar, A.M., Murphy, T.P., 2011. Utilization of lower extremity arterial disease diagnostic and revascularization procedures in Medicare beneficiaries 2000-2007. *Am. J. Roentgenol.* 197, W314-W317.
- Haskal, Z.J., 2004. Interventional Radiology Carries Occupational Risk for

- Cataracts. RSNA News. Available at: <http://www.barrieronline.com/info/RSNAreprint.pdf> (last accessed 3 January 2018).
- Haussler, U., Czarwinski, R., Brix, G., 2009. Radiation exposure of medical staff from interventional x-ray procedures: a multicentre study. *Eur. Radiol.* 19, 2000-2008.
- Heckathorne, E., Dahlbom, M., 2008. Radiation dose to surgical staff from positron-emitterbased localization and radiosurgery of tumors. *Health Phys.* 95, 220-226.
- Hiles, P.A., Hughes, H., Arthur, D., Martin, C.J., 2016. Personal Protective Equipment. British Institute of Radiology, London.
- Hippelainen, E., Nikkinen, P., Ihalainen, T., Uusi-Simora, J., Savolainen, S., 2008. Personal radiation doses in PET/CT facility: measurements vs. calculations. *Radiat. Prot. Dosim.* 132, 57-63.
- Hoang, J.K., Yoshizumi, T.T., Toncheva, G., et al., 2011. Radiation dose exposure for lumbar spine epidural steroid injections: a comparison of conventional fluoroscopy data and CT fluoroscopy techniques. *Am. J. Roentgenol.* 197, 778-782.
- Holland, J., Williamson, M., Lewis, J., 2010. Unconventional nuclides for radiopharmaceuticals. *Mol. Imag.* 9, 1-20.
- Hu, P., Kong, Y., Chen, B., et al., 2017. Shielding effect of lead glasses on radiologists' eye lens exposure in interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* 174, 136-140.
- IAEA, 2008. Radiation Protection in Newer Medical Imaging Techniques: PET/CT. Safety Reports Series No. 58. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2013. Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye. IAEA-TECDOC-1731. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2014a. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Series No. GSR Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2014b. Recommendations of the Working Group on Interventional Cardiology on Occupational Doses to the Lens of the Eye in Interventional Cardiology: the Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR). IAEA-TECDOC-1735. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2016. Radiation Protection of Patients. Retrospective evaluation of

- lens injuries and dose study. International Atomic Energy Agency, Vienna. Available at: <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/News/reliid-activities.htm> (last accessed 3 January 2018).
- ICRP, 1990. Radiological protection of the worker in medicine and dentistry. ICRP Publication 57. Ann. ICRP 20(3).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1998. Genetic Susceptibility to Cancer. ICRP Publication 79. Ann. ICRP 28 (1-2).
- 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, 2003. Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33 (1-2).
- ICRP, 2005. Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk. ICRP Publication 99. Ann. ICRP 35 (4).
- ICRP, 2007a. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
- ICRP, 2007b. 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, 2009a. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
- ICRP, 2009b. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP Publication 113. Ann. ICRP 39(5).
- ICRP, 2010a. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department. ICRP Publication 117. Ann. ICRP 40(6).
- ICRP, 2010b. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. ICRP Publication 116. Ann. ICRP 40(2-5).
- ICRP, 2011. Statement on Tissue Reactions. International Commission on

Radiological Protection, Ottawa.

- ICRP, 2012. ICRP statement on tissue reactions and 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, 2013a. Radiological protection in cardiology. ICRP Publication 120. Ann. ICRP 42(1).
- ICRP, 2013b. Radiological protection in paediatric diagnostic and interventional radiology. ICRP Publication 121. Ann ICRP 42(2).
- ICRU, 1992. Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations (Report 47). International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda.
- IEC, 2012. Radiation Protection Instrumentation - Passive Integrating Dosimetry Systems for Personal and Environmental Monitoring of Photon and Beta Radiation. IEC-62387. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2014. Protective Devices Against Diagnostic Medical X-Radiation - Part 1: Determination of Attenuation Properties of Materials. IEC 61331-1. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IRPA, 2017. IRPA Guidance on Implementation of Eye Dose Monitoring and Eye Protection of Workers. International Radiation Protection Association, Paris. Available at: [http://www.irpa.net/docs/IRPA%20Guidance%20on%20Implementation%20of%20Eye%20Dose%20Monitoring%20\(2017\).pdf](http://www.irpa.net/docs/IRPA%20Guidance%20on%20Implementation%20of%20Eye%20Dose%20Monitoring%20(2017).pdf) (last accessed 24 January 2018).
- IRSN, 2014. Le dosimètre cristallin DOSIRIS. Institut de Radioprotection, Sureté Nucleaire, Croissy Sur Seine. Available at: http://dosimetre.irsn.fr/fr-fr/Documents/Fiches%20produits/IRSN_Fiche_dosimetre_Cristallin.pdf (last accessed 3 January 2018).
- ISO, 2015. Radiological Protection: Procedures for Monitoring the Dose to the Lens of the Eye, the Skin and the Extremities. ISO 15382, second ed. International Organization for Standardization, Geneva.
- Jacob, S., Boveda, S., Bar, O., et al., 2012. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study. *Int. J. Cardiol.* 167, 1843-1847.
- Jacob, S., Donadille, L., Maccia, C., et al., 2013. Eye lens radiation exposure to interventional cardiologists: a retrospective assessment of cumulative doses. *Radiat. Prot. Dosim.* 153, 282-293.

- Jakobs, T.F., Hoffmann, R.T., Poepperl, G., et al. 2007. Mid-term results in otherwise treatment refractory primary or secondary liver confined tumours treated with selective internal radiation therapy (SIRT) using ⁹⁰ytrium resin-microspheres. *Eur. Radiol.* 17, 1320-1330.
- Järvinen, H., Buls, N., Clerinx, P., et al., 2008. Overview of double dosimetry procedures for the determination of the effective dose to the interventional radiology staff. *Radiat. Prot. Dosim.* 129, 333-339.
- Joemai, R.M., Zweers, D., Obermann, W.R., Geleijns, J., 2009. Assessment of patient and occupational dose in established and new applications of MDCT fluoroscopy. *Am. J. Roentgenol.* 192, 881-886.
- Jones, A.K., Wagner, L.K., 2013. On the (f)utility of measuring the lead equivalence of protective garments. *Med. Phys.* 40, 063902.
- Junk, A.K., Haskal, Z., Worgul, B.V., 2004. Cataract in interventional radiology - an occupational hazard? *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 45 (Suppl. 1), U178.
- Kemerink, G.J., Vanhavere, F., Barth, I., Mottaghy, F.M., 2012. Extremity doses of nuclear medicine personnel: a concern. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* 39, 529-532.
- Kicken, P.J.H., Kemerink, G.J., van Engelshoven, J.M.A., 1999. Dosimetry of occupationally exposed persons in diagnostic and interventional arteriography. Part I: Assessment of entrance doses. *Radiat. Prot. Dosim.* 82, 93-103.
- 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. Dosim.* 133, 227-233.
- Kim, G.R., Hur, J., Lee, S.M., et al., 2011. CT fluoroscopy-guided lung biopsy versus conventional CT-guided lung biopsy: a prospective controlled study to assess radiation doses and diagnostic performance. *Eur. Radiol.* 21, 232-239.
- Kim, K.P., Miller, D.L., Berrington de Gonzá lez, A., et al., 2012. Occupational radiation doses to operators performing fluoroscopically-guided procedures. *Health Phys.* 103, 80-99.
- Kitahara, C.M., Linet, M.S., Balter, S., et al., 2017. Occupational radiation exposure and deaths from malignant intracranial neoplasms of the

- brain and CNS in U.S. radiologic technologists, 1983-2012. *Am. J. Roentgenol.* 208, 1278-1284.
- King, J.N., Champlin, A.M., Kelsey, C.A., Tripp, D.A., 2002. Using a sterile disposable protective surgical drape for reduction of radiation exposure to interventionalists. *Am. J. Roentgenol.* 178, 153-157.
- Klein, L.W., Miller, D.L., Balter, S., et al., 2009. Occupational health hazards in the interventional laboratory: time for a safer environment. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 20, 147-152, quiz 153.
- Klein, L.W., Tra, Y., Garratt, K.N., et al., 2015. Occupational health hazards of interventional cardiologists in the current decade: results of the 2014 SCAI membership survey. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 86, 913-924.
- Kong, Y., Struelens, L., Vanhavere, F., et al., 2015. Influence of standing positions and beam projections on effective dose and eye lens dose of anaesthetists in interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* 163, 181-187.
- Korir, G.K., Ochieng, B.O., Wambani, J.S., Korir, I.K., Jowi, C.Y., 2012. Radiation exposure in interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* 152, 339-344.
- Koukorava, C., Carinou, E., Simantirakis, G., et al., 2011. Doses to operators during interventional radiology procedures: focus on eye lens and extremity dosimeters. *Radiat. Prot. Dosim.* 144, 482-486.
- Koukorava, C., Farah, J., Struelens, L., et al., 2014. Efficiency of radiation protection equipment in interventional radiology: a systematic Monte Carlo study of eye lens and whole body doses. *J. Radiol. Prot.* 34, 509-528.
- Kuipers, G., Velders, X.L., De Winter, R.J., Reekers, J.A., Piek, J.J., 2008. Evaluation of occupational doses of interventional radiologists. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 31, 483-489.
- Kuipers, G., Velders, X.L., 2009. Effective doses to staff from interventional procedures: estimations from single and double dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* 136, 95-100.
- Leng, S., Christner, J.A., Carlson, S.K., et al., 2011. Radiation dose levels for interventional CT procedures. *Am. J. Roentgenol.* 197, W97-W103.
- Lichliter, A., Weir, V., Heithaus, R.E., et al., 2017. Clinical evaluation of protective garments with respect to garment characteristics and manufacturer label information. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 28, 148-155.

- Lie, Ø.Ø., Paulsen, G.U., Wøhni, T., 2008. Assessment of effective dose and dose to the lens of the eye for the interventional cardiologist. *Radiat. Prot. Dosim.* 132, 313-318.
- Linet, M.S., Kitahara, C.S., Ntowe, E., et al., 2017. Mortality in U.S. physicians likely to perform fluoroscopy guided interventional procedures compared with psychiatrists, 1979 to 2008. *Radiology* 284, 482-494.
- Madsen, M.T., Anderson, J.A., Halama, J.R., et al., 2006. AAPM Task Group 108: PET and PET/CT shielding requirements. *Med. Phys.* 33, 4-15.
- Maeder, M., Brunner-La Rocca, H.P., Wolber, T., et al., 2006. Impact of a lead glass shield on scatter radiation to eyes and hands in interventional cardiologists. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 67, 18-23.
- Magee, J.S., Martin, C.J., Sandblom, V., et al., 2014. Derivation and application of dose reduction factors for protective eyewear worn in interventional radiology and cardiology. *J. Radiol. Prot.* 34, 811-823.
- Mann, J.T. 3rd, Cubeddu, G., Arrowood, M., 1996. Operator radiation exposure in PTCA: comparison of radial and femoral approaches. *J. Invas. Cardiol.* 8 (Suppl. D), 22D-25D.
- Marshall, N.W., Faulkner, K., Clarke, P., 1992. An investigation into the effect of protective devices on the dose to radiosensitive organs in the head and neck. *Br. J. Radiol.* 65, 799-802.
- Martin, C.J., 2009. A review of radiology staff doses and dose monitoring requirements. *Radiat. Prot. Dosim.* 136, 140-157.
- Martin, C.J., 2012. Personnel dosimetry in UK radiology: is it time for a change? *J. Radiol. Prot.* 32, E3-E6.
- Martin, C.J., 2016. Eye lens dosimetry for fluoroscopically guided clinical procedures: practical approaches to protection and dose monitoring. *Radiat. Prot. Dosim.* 169, 286-291.
- Martin, C.J., Magee, J.S., 2013. Assessment of eye and body dose for interventional radiologists, cardiologists, and other interventional staff. *J. Radiol. Prot.* 33, 445-460.
- Martin, G.J., Sutton, D.G., 2014. *Practical Radiation Protection in Healthcare* (2 ed.). Oxford University Press, Oxford.
- Marx, D.L., Balter, S., 1995. The distribution of stray radiation in a cardiac catheterization laboratory. *Med. Phys.* 22, 1018.

- Marx, M.V., Niklason, L., Mauger, E.A., 1992. Occupational radiation exposure to interventional radiologists: a prospective study. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 3, 597-606.
- Mateya, C.F., Claycamp, H.G., 1997. Phantom-derived estimation of effective dose equivalent from x-rays with and without a lead apron. *Health Phys.* 72, 842-847.
- McCaffrey, J.P., Tessier, F., Shen, H., 2012. Radiation shielding materials and radiation scatter effects for interventional radiology (IR) physicians. *Med. Phys.* 39, 4537-4546.
- McCann, J.W., Larkin, A.M., Martino, L.J., et al., 2012. Radiation emission from patients treated with selective hepatic radioembolization using yttrium-90 microspheres: are contact restrictions necessary? *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23, 661-667.
- McEwan, A.C., 2000. Assessment of occupational exposure in New Zealand from personal monitoring records. *Rad. Prot. (Australasia)* 17, 60-66.
- McVey, S., Sandison, A., Sutton, D.G., 2013. An assessment of lead eyewear in interventional radiology. *J. Radiol. Prot.* 33, 647-659.
- McLoney, E., Isaacson, A., Keeting, P., 2014. The role of PET imaging before, during, and after percutaneous hepatic and pulmonary tumor ablation. *Semin. Intervent. Radiol.* 31, 187-192.
- Miller, D.L., Vucich, J.J., Cope, C., 1985. A flexible shield to protect personnel during interventional procedures. *Radiology* 155, 825.
- Miller, D.L., Van o' , E., Bartal, G., et al., 2010. 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. Intervent. Radiol.* 33, 230-239.
- Minot, D.M., Jaben, E., Aubry, M.C., et al., 2012. Evolution of transthoracic fine needle aspiration and core needle biopsy practice: a comparison of two time periods, 1996-1998 and 2003-2005. *Diagn. Cytopathol.* 40, 876-881.
- Moore, W.E., Ferguson, G., Rohrmann, C., 1980. Physical factors determining the utility of radiation safety glasses. *Med. Phys.* 7, 8-12.
- Morrish, O.W.E., Goldstone, K.E., 2008. An investigation into patient and staff doses from X-ray angiography during coronary interventional procedures. *Br. J. Radiol.* 81, 35-45.

- NA/NRC, 2006. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. BEIR VII, Phase 2. National Academies Press, Washington, DC.
- NCRP, 1993. Limitation of Exposure to Ionizing Radiation. NCRP Report No. 116. 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.
- NCRP, 2016. Guidance on Radiation Dose Limits for the Lens of the Eye. Commentary No. 26. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Niklason, L.T., Marx, M.V., Chan, H.P., 1993. Interventional radiologists: occupational radiation doses and risks. *Radiology* 187, 729-733.
- Nye, A., Dubose, M., Votaw, J., 2009. A comparison of AAPM TG-108 PET/CT shielding recommendations and measurements in an oncology center. *Med. Phys.* 36, 5017-5021.
- Ordiales, J.M., Nogales, J.M., Sa´ nchez-Casanueva, R., et al., 2015. Reduction of occupational radiation dose in staff at the cardiac catheterisation laboratory by protective material placed on the patient. *Radiat. Prot. Dosim.* 165, 272-275.
- 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. Dosim.* 144, 437-441.
- Papadopoulos, N., Papaefstathiou, C., Kaplanis, P.A., et al., 2009. Comparison of lead-free and conventional x-ray aprons for diagnostic radiology. *International Federation of Medical and Biological Engineering (IFMBE) proceedings* 25/III, 544-546.
- Pasciak, A.S., Kyle, J.A., Wagner, L.K., 2015. Application of the diagnostic radiological index of protection to protective garments. *Med. Phys.* 42, 653-662.
- Paulson, E.K., Sheafor, D.H., Enterline, D.S., McAdams, H.P., Yoshizumi, T.T., 2001. CT fluoroscopy-guided interventional procedures: techniques and radiation dose to radiologists. *Radiology* 220, 161-167.

- Pelz, D.M., 2000. Low back pain, lead aprons, and the angiographer. *Am. J. Neuroradiol.* 21, 1364.
- Politi, L., Biondi-Zoccai, G., Nocetti, L., et al., 2012. Reduction of scatter radiation during transradial percutaneous coronary angiography: a randomized trial using a lead-free radiation shield. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 79, 97-102.
- Principi, S., Ginjaume, M., Duch, M.A., et al., 2014. Influence of dosimeter position for the assessment of eye lens dose during interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosim.* 164, 79-83.
- Principi, S., Soler, C.D., Ginjaume, M., et al., 2015. Eye lens dose in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosim.* 165, 289-293.
- Purandare, N., Rangarajan, V., Shah, S.A., et al., 2011. Therapeutic response to radiofrequency ablation of neoplastic lesions: FDG PET/CT findings. *Radiographics* 31, 201-213.
- Quinn, B., Dauer, Z., Pandit-Taskar, N., Schoder, H., Dauer, L.T., 2016. Radiation dosimetry of ^{18}F -FDG PET/CT: incorporating exam-specific parameters in dose estimates. *BMC Med. Imag.* 16, 41.
- Rehani, M.M., Vañó, E., Ciraj-Bjelac, O., Kleiman, N.J., 2011. Radiation and cataract. *Radiat. Prot. Dosim.* 147, 300-304.
- Rimpler, A., Barth, I., 2007. Beta radiation exposure of medical staff and implications for extremity dose monitoring. *Radiat. Prot. Dosim.* 125, 335-339.
- Roguin, A., Goldstein, J., Bar, O., Goldstein, J.A., 2013. Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures. *Am. J. Cardiol.* 111, 1368-1372.
- Ryan, E.R., Sofocleous, C.T., Schoder, H., et al., 2013a. Split-dose technique for FDG PET/CT-guided percutaneous ablation: a method to facilitate lesion targeting and to provide immediate assessment of treatment effectiveness. *Radiology* 268, 288-295.
- Ryan, E.R., Thornton, R., Sofocleous, C.T., et al., 2013b. PET/CT-guided interventions: personnel radiation dose. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 36, 1063-1067.
- Saidatul, A., Azlan, C., Megat, A.M., Abdullah, B., Ng, K., 2010. A survey of radiation dose to patients and operators during radiofrequency ablation using computed tomography. *Biomed. Imag. Interv. J.* 6, e1.
- Sánchez, R.M., Vañó, E., Ferná ndez, J.M., et al., 2012. Staff doses in interventional radiology: a national survey. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23,

1496-1501.

- Sánchez, R.M., Vañó, E., Fernández, J.M., Ginjaume, M., Duch, M.A., 2014. Measurements of eye lens doses in interventional cardiology using OSL and electronic dosimeters. *Radiat. Prot. Dosim.* 162, 569-576.
- Sánchez, R.M., Vañó, E., Fernández, J.M., Ginjaume, M., Carreras, J.L., 2015. Evaluation of an automated FDG dose infuser to PET-CT patients. *Radiat. Prot. Dosim.* 165, 457-460.
- Sandblom, V., 2012. Evaluation of Eye Lens Doses Received by Medical Staff Working in Interventional Radiology at Sahlgrenska University Hospital. MSc Thesis. Department of Radiation Physics University of Gothenburg, Gothenburg.
- Sauren, L.D., Van Garsse, L., Van Ommen, V., Kemerink, G.J., 2011. Occupational radiation dose during transcatheter aortic valve implantation. *Cathet. Cardiovasc. Interv.* 78, 770-776.
- Savage, C., Carlson, L., Clements, J., Rees, C., 2009. Comparison of the zero gravity system to conventional lead apron for radiation protection of the interventionalist. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 20, S53.
- Schlattl, H., Zankl, M., Eder, H., Hoeschen, C., 2007. Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses. *Med. Phys.* 34, 4270.
- Schueler, B.A., Vrieze, T.J., Bjarnason, H., Stanson, A.W., 2006. An investigation of operator exposure in interventional radiology. *Radiographics* 26, 1533-1541.
- Schultz, F.W., Zoetelief, J., 2006. Estimation effective dose for a cardiac catheterisation procedure with single and double dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* 118, 196-204.
- Seierstad, T., Strandén, E., Bjerding, K., et al., 2006. Doses to nuclear technicians in a dedicated PET/CT centre utilizing ¹⁸F fluorodeoxyglucose (FDG). *Radiat. Prot. Dosim.* 123, 243-249.
- Shatila, O.H., 2015. Occupational Radiation Dose During the Trans-Catheter Aortic Valve Replacement Procedure. Thesis for the Degree of Master of Science. Colorado State University, Fort Collins, CO. Available at: https://dspace.library.colostate.edu/bitstream/handle/10217/167256/Shatila_colostate_0053N_13242.pdf;sequence=1 (last accessed 3 January 2018).
- Shortt, C.P., Al-Hashimi, H., Malone, L., Lee, M.J., 2007. Staff radiation doses to the lower extremities in interventional radiology. *Cardiovasc.*

- Interv. Radiol. 30, 1206-1209.
- Siiskonen, T., Tapiovaara, M., Kosunen, A., Lehtinen, M., Vartiainen, E., 2007. Monte Carlo simulations of occupational radiation doses in interventional radiology. *Br. J. Radiol.* 80, 460-468.
- Siiskonen, T., Tapiovaara, M., Kosunen, A., Lehtinen, M., Vartiainen, E., 2008. Occupational radiation doses in interventional radiology: simulations. *Radiat. Prot. Dosim.* 129, 36-38.
- SIRTEX, 2016. SIR-Spheres (yttrium-90 resin microspheres), SIRTEX Medical, Sydney. Available at: <https://www.sirtex.com/media/155127/pi-ec-12.pdf> (last accessed 25 January 2018).
- Smilowitz, N.R., Balter, S., Weisz, G., 2013. Occupational hazards of interventional cardiology. *Cardiovasc. Revasc. Med.* 14, 223-228.
- Srinivas, Y., Wilson, D.L., 2002. Image quality evaluation of flat panel and image intensifier digital magnification in x-ray fluoroscopy. *Med. Phys.* 29, 1611-1621.
- Stranden, E., Widmark, A., Sekse, T., 2008. Assessing doses to interventional radiologists using a personal dosimeter worn over a protective apron. *Acta Radiol.* 49, 415-418.
- Struelens, L., Schoonjans, W., Schils, F., De Smedt, K., Vanhavere, F., 2013. Extremity and eye lens dosimetry for medical staff performing vertebroplasty and kyphoplasty procedures. *J. Radiol. Prot.* 33, 635-645.
- Swiss Ordinance, 2008. Eidgenössisches Departement des Inneren und Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation: Verordnung über die Personendosimetrie (Dosimetrieverordnung) vom 07.10.1999. SR 814.501.43. Swiss Ordinance, Bern (in German).
- Teeuwisse, W.M., Geleijns, J., Broerse, J.J., Obermann, W.R., van Persijn van Meerten, E.L., 2001. Patient and staff dose during CT guided biopsy, drainage and coagulation. *Br. J. Radiol.* 74, 720-726.
- Theocharopoulos, N., Damilakis, J., Perisinakis, K., et al., 2006. Occupational exposure in the electrophysiology laboratory quantifying and minimising radiation burden. *Br. J. Radiol.* 79, 644-651.
- 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.
- Tosi, G., 2003. Report on one accident occurred in a nuclear medicine department in Italy. 6th European ALARA Network Workshop on

- Occupational Exposure Optimisation in the Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 23-25 October 2002, Madrid, Spain.
- Trout, E.D., 1977. Isodose curves in a phantom due to diagnostic quality X-radiation. *Health Phys.* 33, 359-367.
- Trumm, C.G., Pahl, A., Helmberger, T.K., et al., 2012. CT fluoroscopy-guided percutaneous vertebroplasty in spinal malignancy: technical results, PMMA leakages, and complications in 202 patients. *Skel. Radiol.* 41, 1391-1400.
- 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. *Am. J. Roentgenol.* 193, 559-569.
- Uthoff, H., Penã, C., West, J., et al., 2013. Evaluation of novel disposable, light-weight radiation protection devices in an interventional radiology setting: a randomized controlled trial. *Am. J. Roentgenol.* 200, 915-920.
- Van Rooijen, B.D., de Haan, M.W., Das, M., et al., 2014. Efficacy of radiation safety glasses in interventional radiology. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 37, 1149-1155.
- Vanhavere, F., Carinon, E., Gualdrini, G., et al., 2012. ORAMED: Optimisation of Radiation Protection for Medical Staff. 7th EURADOS Report. EURADOS, Braunschweig.
- Vañó, E., 2015. Occupational radiation protection of health workers in imaging. *Radiat. Prot. Dosim.* 164, 126-129.
- Vañó, E., 2016. Personal communication. See also IAEA training material. Available at: https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/AdditionalResources/Training/1_TrainingMaterial/Non-radiologistsNon-cardiologists.htm (last accessed 3 January 2018).
- Vañó, E., González, L., Beneytez, F., Moreno, F., 1998. Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimised interventional radiology laboratories. *Br. J. Radiol.* 71, 728-733.
- Vañó, E., González, L., Fernandez, J.M., Alfonso, F., Macaya, C., 2006. Occupational radiation doses in interventional cardiology: a 15-year follow-up. *Br. J. Radiol.* 79, 383-388.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Fernandez, J.M., Haskai, Z.J., 2008a. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted. *Radiology* 248, 945-953.
- Vañó, E., Järvinen, H., Kosunen, A., et al., 2008b. Patient dose in interventional radiology: a European survey. *Radiat. Prot. Dosim.* 129,

39-45.

- Vañó, E., Kleiman, N.J., Durán, A., et al., 2010. Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. *Radiat. Res.* 174, 490-495.
- Vañó, E., Kleiman, N.J., Durán, A., Romano-Miller, M., Rehani, M.M., 2013a. Radiation-associated lens opacities in catheterization personnel: results of a survey and direct assessments. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 24, 197-204.
- Vañó, E., Fernández, J.M., Sánchez, R.M., Dauer, L.T., 2013b. Realistic approach to estimate lens doses and cataract radiation risk in cardiology when personal dosimeters have not been regularly used. *Health Phys.* 105, 330-339.
- Vañó, E., Sanchez, R.M., Fernandez, J.M., et al., 2015a. A set of patient and staff dose data for validation of Monte Carlo calculations in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosim.* 165, 235-239.
- Vañó, E., Sanchez, R.M., Fernandez, J.M., 2015b. Estimation of staff lens doses during interventional procedures. Comparing cardiology, neuroradiology and interventional radiology. *Radiat. Prot. Dosim.* 165, 279-283.
- Vañó, E., Fernandez, J.M., Resel, L.E., Moreno, J., Sanchez, R.M., 2016. Staff lens doses in interventional urology. A comparison with interventional radiology, cardiology and vascular surgery values. *J. Radiol. Prot.* 36, 37-48.
- Venkatesan, A., Kadoury, S., Abi-Jaoudeh N., et al., 2011. Real-time FDG PET guidance during biopsies and radiofrequency ablation using multimodality fusion with electromagnetic navigation. *Radiology* 260, 848-856.
- Von Boetticher, H., Lachmund, J., Hoffmann, W., 2010. An analytic approach to double dosimetry algorithms in occupational dosimetry using energy dependent organ dose conversion coefficients. *Health Phys.* 99, 800-805.
- 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., Archer, B.R., 2004. *Minimizing Risks from Fluoroscopic X-rays: Bioeffects, Instrumentation and Examination*, fourth ed. Partners in Radiation Management, Woodlands, TX.
- Wenzl, T.B., 2005. Increased brain cancer risk in physicians with high radiation exposure. *Radiology* 235, 709-710.

- Werner, M.K., Aschoff, P., Reimold, M., Pfannenber, C., 2011. FDG-PET/CT-guided biopsy of bone metastases sets a new course in patient management after extensive imaging and multiple futile biopsies. *Br. J. Radiol.* 84, e65-e67.
- Whitby, M., Martin, C.J., 2003. Radiation doses to the legs of radiologists performing interventional procedures: are they a cause for concern? *Br. J. Radiol.* 76, 321-327.
- 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.
- White, S., Binns, D., Johnston, V.V., et al., 2000. Occupational exposure in nuclear medicine and PET. *Clin. Posit. Imag.* 3, 127-129.
- WHO, 2000. Efficacy and Radiation Safety in Interventional Radiology. World Health Organization, Geneva.
- Williamson, M., Dauer, L., 2014. Activity thresholds for patient instruction and release for positron emission tomography radionuclides. *Health Phys.* 106, 341-352.
- Wiper, A., Katira, R., Roberts, D.H., 2005. Interventional cardiology: it s a hairy business. *Heart* 91, 1432.
- Yoder, C., Salasky, M., 2016. A review of the use of two methods practiced in the United States to assess the effective dose equivalent for fluoroscopic-based radiology. *Radiat. Prot. Dosim.* 170, 307-310.