

ICRP 간행물 147

방사선방호에서 방사선량의 적용

Use of Dose Quantities in Radiological Protection



이 번역본 발간은 2021년 한국원자력안전기술원의 위탁연구 사업의 일환으로 이루어졌습니다.

ICRP Publication 147

방사선방호에서 방사선량의 적용

Use of Dose Quantities in Radiological Protection

편집장

C.H. CLEMENT

부편집장

H. FUJITA

ICRP를 대신한 저자

J.D. Harrison, M. Balonov, F. Bochud, C. Martin, H-G. Menzel,
P. Ortiz-Lopez, R. Smith-Bindman, J.R. Simmonds, R. Wakeford

역주: 이재기

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은 ICRP의
허락(2021년 3월)을 받았으며 ICRP 정신에 따라
무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

역사 서문

방사선 개척자들이 처음으로 방사선 노출량을 정량적으로 표현하는 방법 즉, 방사선량을 정의한 것은 약 90년 전이다. 1928년 제2차 국제방사선의학회(ISR) 산하 국제방사선단 위측정위원회(ICRU)가 표준상태 공기 1 cm³에 전리 전하 1 esu(=1/3 × 10⁹ C=3.34 × 10⁻¹⁰ C)를 생성하는 노출량을 1 ‘뢴트겐(R)’으로 정한다는 안을 ISR이 채택한 것이다. 당시로서는 인체에 들어온 방사선이 만드는 측정 가능한 양이 마땅하지 않았음은 물론, 전리함 전하를 바르게 측정하는 기법도 1927년에 Glasser에 의해 겨우 정립되었다. 따라서 사람이 실제로 피폭한 양이 아니라 방사선장의 강도를 측정하는 수단에 의지할 수밖에 없었다.

이후 1940년대까지는 R 단위의 조사선량만이 방사선량으로 계속 사용되었다. 1940년대에 미국 핵무기 개발사업인 맨해튼 프로젝트 과정에서 중성자나 알파입자처럼 선질이 다른 방사선피폭이 발생하자 그런 방사선에 의한 피폭량을 전통적인 X선이나 감마선 피폭과 합쳐서 평가해야 할 수요가 발생했다. 그래서 고안한 것이 1 R과 대등한 생물학적 영향을 내는 방사선량인 roentgen equivalent man(rem)이며, 1945년께 사용이 시도되고 1947년에 정의해 1950년에 보완했다. 당시 제안된 생물학적 상대적 효과(현재 RBE)로는 알파 20, 느린 중성자 5, 빠른 중성자 10, 양성자 10을 적용했다.

ICRU가 공기가 아닌 임의 물체의 노출량인 ‘흡수선량’을 정의한 것은 몇 년 뒤인 1954년이고, 1 rad = 100 erg/g으로 규정했다. 같은 해에 ICRP도 흡수선량(rad)과 rem 개념을 도입했다. 선질이 다른 방사선 가중에 대한 ICRU와 ICRP 공동위원회에서 논의를 거쳐 1962년 ICRU가 RBE를 직접 가중하는 대신 LET 함수로서 ‘선질계수 QF’를 흡수선량에 가중한 ‘선량당량’을 채택했고, ICRP는 1964년 간행물 4로 이를 발간했다. 선량당량의 단위로 rem을 계속 사용했음은 우리가 익히 아는 바다.

1960년대 후반에 컴퓨터가 발전함에 따라 방사선 수송계산 코드들이 개발되고, 아울러 인체를 근사한 전산용 인형모의체 MIRD 모델이 핵의학 환자 장기선량 평가목적으로 개발되었다. 1970년대 초에 표준인 데이터 수립(ICRP 23)과 함께 이 전산 모델은 방사선방호량 산출 수단으로 이용되어 외부피폭이나 내부피폭 상황에서 사람 체내의 선량분포에 대한 정보가 가용해졌다. 그 결과를 바탕으로 1977년 ICRP 26에서 비로소 체내 조직/장기의 선량당량 분포와 조직의 상대적 확률론적 위험을 반영한 ‘조직가중치’를 적용한 단일 양인 ‘유효선량당량’ effective dose equivalent을 정의해 전신 위험지표이자 궁극적 방호량으로 도입했다.

그러나 유효선량당량은 개념적 '전신 평균 선량당량'의 성격이어서 측정 가능한 물리량이 아니기에 사람의 선량을 측정으로 감시하는 방법론으로 외부피폭 '실용량'을 고안했다. 1980년대 중반에 도입된 실용량은 측정 가능한 선량당량으로 표현하되 유효선량을 나쁘지 않게 대신할 수 있는 양으로 정의되었다. 지역감시를 위한 주위선량당량, 방향성선량당량과 개인감시를 위한 개인선량당량이 그것이다.

1990년 권고(ICRP 60)에서 ICRP는 LET함수인 선질계수가 현실적으로 여러 복잡한 어려움을 파생하는 문제점을 해소하기 위해 더 단순한 '방사선가중치'를 도입했고, 가중치가 바뀌므로 가중된 흡수선량도 새 이름인 '등가선량'으로, 이를 전신으로 확장한 양은 '유효선량'으로 정의했다. 외부피폭에서 유효선량 대체 측정량은 여전히 선량당량으로 표현하는 실용량이 유지되었다.

2000년대에 와서 우주방사선(특히 우주승무원이 대기권 밖에서 피폭하는 경우)이나 첨단고속기 환경과 같은 고에너지 방사선장까지 관심이 확장되자 보통의 방사선장에서는 무난하다고 본 실용량이 유효선량을 '무난하게 대신하지' 못하는 문제(1/10 수준으로 낮게 평가할 수도 있음)가 제기되었다. 결국 ICRU는 '측정 가능한 대체량'을 포기하고 보수적 유효선량 결과와 직접 연계하는 새로운 실용량을 정의하여 ICRU 95(ICRP와 공동 간행물)로 발행했다. 그러나 일반적 방사선장에서는 여전히 기존의 실용량이 무난히 적용될 수 있기에, 당장 어떤 특정 시점을 정해 새로운 실용량을 적용한다는 것이 아니라 차기 ICRP 기본권고를 발행할 때 이를 반영함으로써 국제표준이나 각국의 규제관리에 반영되게 한다는 것이 ICRP와 ICRU의 합의된 입장이다.

이 개정에서 중요한 변화는 흡수선량이나 공기커마와 같은 측정 가능한 물리량을 직접 유효선량과 연계함으로써 이제 선량당량이 필요하지 않게 되었고, 따라서 그 정의에 포함되는 선질계수 Q도, 등방성 실용량 정의 수단이었던 ICRU구도 역사가 된 것이다. 이로써 동일한 Sv 단위를 사용하는 선량당량dose equivalent과 등가선량equivalent dose의 혼동을 피해 간편한 체계로 되었다.

이 간행물의 본래 의도는 그 적용에 개념적 혼란이 있었던 유효선량의 적용과 이해에 대해 예시를 포함한 친절한 설명자료를 만드는 것이었는데, 준비 과정에서 방사선량계측량에 위와 같은 변화가 동반되어 기술하는 범위가 확장되었다. 이 간행물의 설명에도 불구하고 위험과 연계할 때는 여전히 유효선량 사용에 '주의'가 필요하다는 꼬리표를 달고 있다. 특정 개인이나 특정 소그룹과 평균적 명목 기준인 사이 간극 때문이다.

끝으로 이 번역본 발간을 위해 ICRP에 저작권료를 지불할 수 있도록 위탁연구를 지원한 한국원자력안전기술원에 감사한다. 또한 번역본 초안 마련에 애쓴 최호신 박사 덕분에 비교적 빨리 준비되었음을 밝히며 감사한다.

2021년 8월

역주자

방사선안전문화연구소장 이 재 기

목 차

역자 서문	iii
사용 두자어	vi
논설	vii
요지	1
요점	3
요약	5
제1장 서론	9
제2장 보건 영향과 위해	13
2.1. 방사선 영향의 범주	13
2.2. 조직반응(결정론적 영향)	13
2.3. 확률론적 영향(암 및 유전질환)	15
2.4. 명목위험계수 및 위해	16
2.5. 조직가중치	18
2.6. 연령별 및 성별 암위험	19
2.7. 알파입자 방출 핵종의 위험	23
제3장 선량 양	25
3.1. 방호량의 요건	25
3.2. 흡수선량	25
3.3. 등가선량	26
3.4. 유효선량	29
3.5. 예탁선량	30
3.6. 선량계수	31
3.7. 집단선량	33
3.8. 실용량	34

제4장 직무피폭과 일반인피폭	37
4.1. 직무피폭	37
4.2. 일반인피폭	42
4.3. 잠재피폭	45
제5장 의료피폭	47
5.1. 의료절차에서 유효선량	48
5.2. 유효선량을 사용한 응용	48
5.3. 유효선량이 권고되지 않는 적용	53
5.4. 유효선량과 위험의 소통	54
제6장 결 론	61
참고문헌	63
사 사	75

〈역주〉 사용 두자어

CT	computed tomography	전산화단층촬영
DDREF	dose and dose-rate effectiveness factor	선량선량률효과인자
DNA	deoxyribonucleic acid	데옥시리보핵산
EAR	excess absolute risk	초과절대위험
ERR	excess relative risk	초과상대위험
ICRP	International Commission on Radiological Protection	국제방사선방호위원회
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurement	국제방사선단위측정위원회
IDEAS	Internal Dose - Enhancement of Application System	유럽연합의 내부피폭 선량계측 연구사업
LET	linear energy transfer	에너지전달선밀도
LNT	linear non-threshold (model)	문턱없는 선형모델
MIRD	Medical Internal Radiation Dose (Committee)	미국 핵의학회 의료내부피폭위원회
RBE	relative biological effectiveness	생물학적효과비
UNSCEAR	UN Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation	유엔방사선영향과학위원회

논설

방사선량과 위험: 과학과 방호

국제방사선방호위원회(ICRP)의 방사선방호체계는 전리방사선의 유해 영향으로부터 사람과 환경을 보호를 다룬다. 이를 위해서는 현실적이고 효과적인 방사선량의 관리가 필요하고, 선량 관리는 다시 선량 관계량에 대한 명확한 이해와 합당한 사용에 달려있다.

방사선방호체계는 방사선 영향에 대한 과학적 지식의 발전에 적응하면서 90년 이상에 걸쳐 진화해 왔다. 사람의 방호는 정당화, 방호최적화 및 개인선량 제한이라는 기본 원칙의 적용을 통해 다음 두 가지 방호목표를 겨눈다.

- 해로운 조직반응(결정론적 영향)을 방지하기 위해 장기나 조직의 선량을 문턱선량 아래 유지함
- 확률론적 영향 발생 확률을 제한하도록 유효선량을 관리함.

선량과 건강위험 사이의 밀접한 관계는 방사선방호체계 구축에 기본인데, 구체적으로는 (i) 조직반응 문턱선량 위에서 선량과 영향 심각도 사이의 관계와 (ii) 확률론적 영향에 대해서는 선량과 영향 발생확률 사이의 문턱 없는 관계이다.

사람을 위한 방사선방호체계는 이제 세 가지 선량을 사용하는데 흡수선량, 등가선량 및 유효선량이다. 조직이나 장기의 흡수선량은 기본이 되는 과학적 양이며 기타 위험조정 양의 계산을 위한 출발점이다. 조직이나 장기의 등가선량은 다른 종류 방사선으로 인한 선량의 합산이 가능하게 하며, 현재 조직반응 방지를 위한 한도 설정에 사용된다. 유효선량은 확률론적 영향으로부터 방호를 위해 등가선량을 결합한다.

이 간행물의 요점 하나는 이제 ICRP가 조직이나 장기의 해로운 조직반응을 방지하기 위해 선량을 제한할 때 사용할 가장 적절한 양을 흡수선량으로 본다는 것이다. 이렇게 하면 흡수선량(Gy)으로 설정해 조직반응에 적용되는 한도와 유효선량(Sv)로 설정해 확률론적 영향에 적용되는 한도 사이에 명확한 구분선을 긋는다.

이 입장은 미국 방사선방호측정위원회(NCRP 2018)가 취한 접근이나 국제방사선단위측정위원회의 실용량 변경 제안(ICRU 2020)과 일관된다.

그러나 ICRP는 이를 방사선방호체계에 당장 반영하기를 권고하지는 않는다. 그보다는 ICRP의 다음 기본권고에 중요한 입력이 될 것으로 본다. 대략 10년 기간에 ICRP 103(2007)을 대체할 새로운 기본권고를 개발한다는 목표로 방사선방호체계에 대한 검토를 이미 진행하고 있다.

확률론적 영향에 대해 이제 개인의 특성(성별, 피폭연령, 거주국)과 피폭 선량(급성 또는 만성, 피폭 장기)을 고려하여 개인 위험평가가 가능하고, 따라서 특정 암에 대해 고유 위험평가도 가능하다. 이 간행물은 역학 문헌으로부터 고유 위험모델을 사용하는 이 접근이 위험평가에 바람직함을 적시한다. 성별과 연령에 따른 건강위험의 차이는 이 간행물 표2.4와 표2.5에 예시되어 있다. 예를 들어 유방을 피폭한 소녀에게 발생하는 생애 암위험은 복부를 피폭한 60세 남성의 위험과는 본질과 크기에서 같지 않음은 분명하다.

이를 명심하면서, 이 간행물의 또 다른 요점은 유효선량이 다양한 피폭조건에서 관련 건강위험 크기의 한 지표로 사용될 수 있다는 점이다. 3배 정도 위험 차이를 내는 피폭연령을 고려하면 유효선량은 확률론적 위험의 근사적 지표라 볼 수 있다. 이러한 근사는 예를 들면 의료에 방사선 이용과 환자와 소통과 같은 실제 방사선방호 대부분에서 판단과 가능한 위험의 평가를 유식하게 하는 데 충분하다.

방사선방호 목적에서 유효선량은 여전히 확률론적 위험의 현실적이고 효과적인 관리에 핵심이 된다. 유효선량은 남녀 모두, 모든 연령, 나아가 세계의 다른 인구집단에 대해서까지 방사선 유발 암 사이트인 모든 조직과 장기에 평균한 확률론적 위험과 연계하는 단일 값을 제공한다.

마찬가지로 위해 역시 정립된 방사선방호체계에 중심적 역할을 한다. 조직이나 장기 선량이 여러 연령군(신생아, 1세, 5세, 10세, 15세 및 20세) 사람의 선량계측용 남녀 인체 모의체를 사용하여 계산하므로 남녀와 연령군별 암위험과 위해를 따로 제공할 수 있다. 따름정리는 최적화도 가능한 위험에 대한 나은 이해를 바탕으로 적용된다는 것이다. 과학적 정밀도와 명확도 증가를 향한 이러한 진화는 적절한 방호수단의 실제 적용을 용이하도록 도울 것이다.

위에서 언급했듯이 차기 ICRP 일반권고 개발을 목표로 방사선방호체계에 대한 검토가 진행 중이다. ICRP 103(2007) 이후 과학과 보건 지식의 발전에 근거한 조직반응과 확률론적 영향 구별의 개선, 방사선 위험 모델의 갱신, 방사선 손상의 구축에 관련된 변수의 개편 등이 고려에 포함된다. 위해 계산, 선량선량률효과인자 결정, 유전결함과 심혈관질환 병합과 같은 관련된 주제를 겨누는 여러 작업그룹이 설치되었거나 고려 중이다. 이들 작업그룹의 결론이 새 기본권고의 초석이 될 것이다. 이 간행물은 이러한 움직임의 일부이며, 방사선량이 위험과 관련하여 방사선방호에 사용되는 방식을 고려하고, 향후 변화를 위한 길을 포장한다.

Dominique Laurier, ICRP 본위원회 위원
Christopher Clement, 편집장

방사선방호에서 방사선량의 적용

ICRP 간행물 147

ICRP 승인: 2019년 5월

요지- 방사선방호에 사용되는 핵심 선량 관계량은 흡수선량, 등가선량, 유효선량이다. 유효선량 개념은 주로 암인 확률론적 영향으로부터 보호관리를 위한 위험조정 선량계측량으로 ICRP가 개발한 것으로서, 평가한 선량을 유효선량으로 나타내는 선량한도나 선량제약치, 참조준위와 비교할 수 있게 한다. 유효선량 사용은 인체 외부나 내부 선원으로부터 모든 방사선피폭을 함께 고려하고 합할 수 있게 하는데, 이는 문턱없는 선형 선량-영향 관계 가정과 낮은 선량을 낮은 선량에서 급성피폭과 만성피폭의 동등성, 외부 피폭과 내부피폭의 동등성에 의존한다. ICRP 103은 유효선량과 개별 조직/장기 등가선량의 목적과 용도에 대해 상세한 설명을 제공했다. 이번 간행물은 선량 관계량을 사용해 방사선위험을 관리하는 과학적 근거에 대해 추가 지침을 제공하고 직무피폭, 일반인피폭 및 의료피폭에 적용을 논의한다. 개인 위험의 최선 평가는 장기/조직의 선량과 구체적 선량-위험 모델을 적용해야 함을 인식한다. 낮은 준위 피폭에서 받은 선량의 평가가 무난한 정확도를 가지더라도 낮은 선량에서 관련 위험의 불확도는 더 커진다. 낮은 선량을 낮은 선량으로 위험외삽에 수반되는 불확도를 명심하고, 생애 암위험이 피폭연령과 성별, 인구집단에 따라 달라짐을 고려하면, 유효선량은 가능한 위험의 근사적 지표가 된다고 결론지을 수 있다. 따름정리는 등가선량이 방호량으로 필요하지 않다는 것이다. 피부, 손발, 눈 수정체의 조직반응 방지를 위한 한도는 등가선량보다 흡수선량으로 설정하는 것이 더 적절할 것이다.

중심어: 흡수선량, 등가선량, 유효선량, 확률론적 위험, 조직반응, 직무피폭, 일반인피폭, 의료피폭

요점

- 이 간행물의 목적은 ICRP 103(2007a)에 제공된 설명을 통합하고, 보건 위험과 관련해 선량 관계량 용도를 명확히 하되, 일부 결론은 ICRP 103의 권고를 넘을 수도 있다.
- 유효선량과 집단선량은 직무피폭과 일반인피폭에 대해 주로 암인 확률론적 영향으로부터 방호 최적화에 유용한 도구이다.¹⁾
- 의료에서 유효선량은 상이한 의료절차의 선량을 비교하고 정당화 판단을 유식하게 하며²⁾, 의생명연구 대상 자원자나 간병인의 제약치를 수립하는 데 사용된다. 동일 기술로 인한 선량을 비교할 때는 측정 가능한 양이 선호된다.
- 일반적으로 유효선량은 100 mSv 미만에서 사용하지만, 특히 불균질한 선량분포로부터 조직반응 발생 가능성에 유의한다면 약 1 Sv까지 급성 선량에 사용해도 무방하다.
- 낮은 선량을 낮은 선량으로 위험 외삽과 관련된 불확도를 명시하고, 생애 암위험이 피폭연령, 성별 및 인구집단에 따라 달라짐을 인식하면, 유효선량은 가능한 위험에 대한 근사적 지표로 간주할 수 있다. 유효선량의 이런 사용이 장기/조직 선량을 이용해 개별 암 유형에 대한 구체적 위험분석을 대신하는 것이 아님을 강조한다.
- 잠재적/가능한 건강영향을 예측하기 위한 집단선량의 사용은 맥락에 맞게 주의해서 다루고 백그라운드 이환율과 연계해 판단해야 한다.
- 조직반응(결정론적 영향)을 방지하기 위한 조직/장기 선량의 한도 설정에는 흡수선량이 가장 적절한 양이다. ICRP는 새 일반권고를 발행할 때는 조직/장기 선량의 한도 설정에 등가선량을 사용하지 않을 예정이다.

1) <역주> 이 말이 유효선량 개념이 반드시 직무피폭과 일반인피폭만 겨누는 것으로 이해할 필요는 없다. 현행 권고는 피폭범주를 직무피폭, 의료피폭, 그리고 나머지 피폭 모두를 일반인피폭으로 포괄하고 있다. 따라서 이 문장의 의미는 유효선량이 의료피폭 방호최적화에 유용한 도구는 아닐 수도 있다는 정도로 볼 수 있다.

2) <역주> 이 번역본 곳곳에서 ‘유식하게 한다’ 또는 ‘유식한’이라는 표현이 있는데, 원문은 inform/informed이다. 이를 종종 ‘정보를 제공한다’/‘정보에 기반을 둔’으로 번역하기도 하지만, 맥락에서 보면 inform이 단순히 정보를 제공하는 것만이 아니라 정보를 받은 쪽이 이를 이해하는 수준까지를 포함한다. 이런 의미를 표현하는 어휘를 찾지 못해 마땅하지는 않지만 어휘 ‘유식하다’를 사용하고 있음을 알려둔다. 예를 들어 informed decision을 ‘정보에 기반을 둔 결정’보다는 ‘유식한 결정’이 더 함축적 의미를 가진다고 생각하기 때문이다.

요약

(a) 방사선방호에 사용되는 선량 계측량은 흡수선량[그레이(Gy) 단위 사용], 등가선량 및 유효선량[둘 다 시버트(Sv) 단위 사용]인데, 그 기본단위는 모두 J kg^{-1} 이다. 방호목적으로 흡수선량은 장기나 조직에 평균하여 계산되는 과학적 기본량이며, 이로부터 유효선량이 계산된다. 흡수선량은 조직반응(결정론적 영향)을 방지하기 위하여 장기나 조직 선량의 한도 설정에 사용하기에 가장 적절한 양이다. 등가선량은 유효선량 계산에서 중간과정의 양이고, 등가선량 계산에서 흡수선량에 가중하는 방사선가중치(w_R)는 조직반응보다는 낮은 준위 선량에서 확률론적 영향에 관련된다. ICRP는 조직반응을 방지하기 위한 장기/조직 선량의 한도를 정하는 데 등가선량 사용을 폐지할 것을 고려하고는 있으나, 새 일반권고가 발간되기까지는 현행 등가선량 한도 적용을 유지할 수 있다. 조직반응에 대한 방사선 가중은 추가 고려가 필요할 것이다.

(b) 유효선량은 암과 유전질환으로 인한 총 확률론적 위해에 장기나 조직의 기여분율을 단순화하여 나타낸 값인 조직가중치 w_T 를 등가선량에 곱하여 합한 양으로서, 장기/조직 등가선량의 가중평균으로 계산된다. 국제적으로 적용 가능한 계수를 제공하기 위하여 위해조정 명목위험계수(Sv^{-1})는 모든 종사자(피폭연령 18-64세)와 전체 인구(피폭연령 0-84세)에 대해 성별, 연령별 및 인구집단별 값의 평균으로 계산된다. 유효선량은 암 및 유전질환 위험과 관련하여 외부 및 내부 선원에 의한 전신 선량의 위험조정 척도를 제공하여, 국제적으로 중추적인 방사선방호량으로 채택되고 있다. 이는 종사자와 일반인 방호의 최적화, 관리기준(제약치, 참조준위 및 한도)의 설정 및 준수 입증에 사용되는 유효하고 견고한 양으로 증명되었다. 유효선량 적용은 낮은 선량을 낮은 선량에서 선량과 위험 사이 문턱없는 선량-반응 관계, 낮은 준위에서 급성피폭과 만성피폭의 대등성, 내부피폭과 외부피폭의 대등성을 가정한다. 유효선량은 통상적으로 100 mSv 미만 선량에 사용되나, 비상피폭상황에서 약 1 Sv까지 급성 피폭선량에 적용하는 것도 무난하다. 그러나 고선량에서 확률론적 영향 위험 증가에 추가하여, 그렇게 높은 선량에서는 조직반응 발생 가능성도 고려해야 함에 유의해야 한다. 이는 외부피폭이나 특정 조직/장기에 집중된 방사선해독에 의해 비균질분포 흡수선량의 기여가 클 때 특히 그러하다.

(c) 유효선량은 특정 연령군 기준인에 대하여 성 평균으로 계산된다. ICRP 103(2007a)의 유효선량 정의는 방사선 수송계산을 위한 기준 남성 및 기준 여성의 해부학적 모델 사양을 포함한다. 실제 피폭은 개인이나 인구집단에 관계되지만, 유효선량은 규정된 방

식으로 피폭하는 기준인에 대해 계산된다. ICRP는 종사자 및 일반인의 외부피폭과 내부 피폭 상황에 대한 유효선량계수 및 핵의약품 투여 환자에 대해 전망적 선량평가 또는 소급적 선량평가를 위한 기준계수를 제공한다. 내부피폭 기준 선량계수는 취식이나 흡입하는 방사성핵종의 물리화학적 형태를 포함하는 특정 피폭 상황에 대해 제공된다. 피폭 준위가 더 정밀한 선량평가를 정당화하고 가능하다면, 피폭의 현장고유 정보를 사용해야 한다.

(d) 연간 피폭 평가에서는 유효선량이 연간 외부피폭선량과 당해 연도 내부피폭 예탁선량의 합으로 계산된다. 여기서 예탁선량은 성인은 50년, 아동은 70세까지 기간에 적분한다. 이 절차는 생물학적 반감기가 긴 장수명 핵종에 대해 보수적 요소를 제공하지만, 많은 핵종에서는 선량의 전부 또는 대부분이 섭취 후 첫 1년에 전달된다. 선량계수가 여러 소아 연령그룹에도 제공되나, 일반인 선량평가에서 1세와 10세 연령그룹을 성인 그룹과 함께 고려하는 것으로 충분하다. 어머니의 방사성핵종의 섭취에 따른 태아의 유효선량 계수를 비교를 위해 다른 그룹과 함께 제시하는데, 소수 방사성핵종만 태아 선량에 고려할 필요가 있음을 보인다.

(e) Gy 당 위험에 있어서 연령별, 성별, 인구별 차이가 있지만, 유효선량으로 표현한 선량제약치, 참조준위 및 선량한도를 모든 종사자와 일반인에게 최적화와 함께 적용함은 개인을 구별하지는 않지만 실용적이고 공평하고 작동하는 방호체계를 제공한다. 작동하고 수용 가능한 방호체계를 구축하기 위해 과학적 지식을 사용하는 것과 개인 및 특정 그룹의 선량이나 위험에 대한 최선의 과학적 평가를 제공하는 것은 분명히 구별해야 한다.

(f) 의료 적용에서는, 다양한 진단 및 중재방사선 촬영기술(예: 전산화단층촬영 및 핵의학) 및 신체 조직에 방사선 공간분포를 다르게 주는 촬영기술의 비교에 유효선량을 사용할 수 있다. 이러한 맥락에서, 의사와 환자 사이 위험소통 목적으로 여러 종류 의료절차를 대략적 위험 범주로 구분하는 일반지표를 제공하는 데 유효선량이 사용된다. 유효선량은 또한 환자의 진단 및 중재 절차 정당화를 판단하고, 의료연구 요건을 계획하고, 또한 의도하지 않은 피폭을 평가하는 데 필요한 정보로도 이용된다. 이들 각개의 경우, 유효선량은 가능한 위해의 근사적 척도를 제공한다. 따라서 유효선량은 정당화 판단과 방사선피폭을 수반하는 의료연구를 계획할 때 방사선 위해의 전망적 지표로 사용될 수 있고, 또는 사고 피폭의 경우에는 소급적 지표로 이용될 수 있다. 그러나 여러 의료센터 사이 특정 의료절차로 인한 선량을 비교할 때는 측정 가능한 양을 직접 적용한다. 진단 참조준위를 설정하거나 환자기록 유지하는 데도 그렇다.

(g) 낮은 선량을 낮은 선량으로 위험의 압박과 관련된 불확실성을 감안하고, 생애 암위험이 피폭연령별, 성별, 및 인구집단별로 다름을 인식하면, 유효선량은 가능한 위험의 개략적인 지표로 볼 수 있다. 유방촬영에서 유방이나 치료준위 방사성옥소를 투여한 갑상선과 같은 의료절차처럼 단일 장기가 선량의 대부분을 받는 의료절차 등의 경우에는 유효선량보다는 관심 조직의 평균 흡수선량을 사용해야 한다. 예후가 나쁜 질환의 환자선량을 고려할 때는, 방사선 위험 평가에서 기대수명도 고려해야 한다. 가능한 위험의 개략적인 지표로서 유효선량을 사용하는 것이 다른 종류 방사선의 상대효과, 연령-, 성-, 집단-고유 위험인자, 불확실성 등을 고려한 장기나 조직 선량의 최선 평가치를 사용해 위험을 분석하는 것을 대체하는 것은 아니다.

(h) 집단유효선량은 종사자와 일반인의 방호최적화에 유용한 도구이다. 집단선량은 개인 선량 분포와 함께, 소수 종사자의 상대적으로 많은 피폭과 대규모 종사자의 소량 피폭 사이에 최적 균형 판단을 유식하게 만드는 데 사용될 수 있다. 일반인 피폭에서는 계획 피폭상황, 비상피폭상황 및 기존피폭상황에서 최적화 과정의 일부로 집단선량이 사용될 수 있다. 직무피폭, 일반인피폭 및 의료피폭에 대하여 집단선량은 여러 나라의 피폭을 비교하고 시간에 따른 선량준위 변화를 비교하는 데 사용되어 왔다(예: UNSCEAR 2008, NCRP 2019). 특별한 상황, 예를 들어 의료적 또는 역학적 추적의 필요성 판단을 유식하게 할 때는 잠재적/가능한 보건영향을 예측하는 데 집단선량을 적용하는 것은 유용할 수 있으나, 이 경우 시간적 및 공간적 선량분포와 선량이나 위험 평가의 불확실성을 고려하면서, 기저 이환율과 관련해 신중히 다루고 판단해야 한다. 극히 낮은 선량을 매우 많은 인구에 적용하여 도출한 집단선량으로 암 증례 수를 평가하는 것은 피해야 한다. ICRP는 ICRP 101(2006)에서 시간적, 공간적 선량분포에서 균질한 부분을 따로 고려할 필요가 있을 때는 선량의 분리 필요성을 고려하면서 최적화의 도구로 집단선량을 사용하는 데 대해 조언한 바 있다.

제1장 서론

(1) 방사선방호체계는 조직반응을 방지하기 위한 한도³⁾ 및 확률론적 영향으로부터 방호를 최적화하는 기준(한도, 선량제약치, 참조준위)을 정하기 위한 선량 양을 필요로 한다.⁴⁾ ICRP는 이러한 목적으로 2007년 권고(ICRP 2007a)에서 설명한 것처럼 흡수선량, 등가선량 및 유효선량을 사용한다.⁵⁾ 이들 양에 더하여 예탁선량과 집단선량도 사용된다. ICRP는 종사자, 일반인 및 환자의 피폭여건에 대한 선량계수를 제공한다. 국제방사선단위 측정위원회(ICRU)는 외부피폭⁶⁾에 대한 실용량을 정의하였는데, 이는 ICRP 방호량의 합리적 평가를 제공하는 측정 가능한 양이다. 방사선방호에 선량 양을 사용하는 상세 지침은 ICRP 103(2007a)에서 제공하고 있다. 이번 권고의 목적은 이전에 제공된 설명을 통합하고 확장하는 것이지만, 건강위험과 관련한 선량 양의 용도를 명확히 하고 ICRP 103에 주어진 조언을 넘어서는 결론도 포함한다.

(2) 외부 및 내부 방사선원에 의한 직무피폭 및 일반인피폭의 관리를 위해 단일 양을 사용하는 첫 개념은 1977년 권고(ICRP 1977)로 거슬러 올라가지만, 유효선량은 1990년 권고에서 도입되었다.⁷⁾ 유효선량 사용은 모든 연령대의 일반인 피폭과 태아의 태내피폭까지 확대되었다(ICRP 2001,2003a,2012b). 나아가주로 암 위험을 평가하는 것이 주요 요건인 의료분야에서도 다양한 진단기술의 함의를 이해할 목적으로 널리 사용되고 있다.

(3) ICRP 방호량, 즉, 등가선량과 유효선량은 외부선원과 내부 방사체로부터의 선량을 단일 수치로 합산하여 전신의 고른 방사선피폭에 의한 잠재적인 확률론적 영향, 즉 암 및 유전질환 위험과 관련된 선량한도, 선량제약치 및 참조준위와 비교할 수 있도록 한다. 유효선량은 방호계획을 수립하고 종사자와 일반인 피폭의 여러 상황에서 준수를 입

3) <역주> 현행 권고에서는 피부, 수정체 등에 적용되는 등가선량 한도이지만 이 간행물은 흡수선량 한도로 갱신을 제기한다.

4) <역주> ‘한도를 설정하기 위해 방사선량이 필요하다.’는 표현은 말과 마차가 바뀐 느낌이다. 방사선량은 방사선 노출량을 계량하기 위해 정의한다. 제한은 그 다음 일이다.

5) <역주> ICRP 103은 이 밖에도 선량당량을 정의하지만, 이 간행물은 그 폐기를 제안한다.

6) <역주> 원문은 ‘외부선원에 의한 직무피폭’으로 적고 있지만 외부피폭 측정은 직무피폭을 한정하지 않는다.

7) <역주> 1977년 ICRP 26에서는 조직 선량당량을 조직가중치로 가중평균한 양을 유효선량당량으로 불렀다. ICRP 60에서 선량당량의 실용적 대안인 등가선량이 도입됨으로써 이를 조직가중치로 전신에 평균한 양을 ‘유효선량’으로 부르게 된 것이다.

증하는 데 주로 적용된다. 유효선량 계산은 장기/조직의 평균흡수선량[그레이(Gy), J kg⁻¹ 단위]에서 시작하는 3단계 과정으로 된다. 둘째 단계는 방사선의 종류에 따라 암을 포함하는 생물학적 영향이 다르기에, 성글게 전리시키는 베타입자나 감마선에 비해 알파 입자와 중성자를 포함해 밀집하여 전리시키는 방사선의 효력을 고려하는 방사선가중치를 흡수선량 계산 값에 곱한다. 이 결과 값을 등가선량[시버트(Sv) 단위]이라 부른다. 마지막 단계는 개별 장기나 조직의 등가선량에 균일 전신 조사에서 총 위해에 대한 각 장기/조직의 기여를 나타내는 조직가중치를 곱하여 합친다.⁸⁾ 따라서 유효선량은 2중으로 가중된 장기/조직의 평균 흡수선량이다.⁹⁾ 이는 Sv 당 전체 위험이 방사선피폭의 유형이나 분포와 관계없이 비교할 수 있어야 한다는 의도이다. Sv로 표시되는 유효선량은 방사선방호에서 잘 알려져 종종 단순하게 '선량'으로 불린다.

(4) ICRP 103은 ICRP 방호량의 목적과 용도에 대한 상세 설명을 제공하였다. 그러나 경험에서 다음과 같은 이슈들이 확인되어 더 명확한 설명과 지침의 필요성이 나타났다.¹⁰⁾

- 특히 ¹³¹I처럼 특정 장기에 집중되는 내부 방사체로부터 오는 선량을 고려할 때 같은 단위(Sv)로 표시되는 등가선량과 유효선량을 세심하게 구별하지 않아 발생하는 두 선량 사이의 혼동(Gonzalez 등 2013) (제3.3절 42항 참조).
- 손발, 눈 수정체 및 피부 피폭의 경우 조직반응을 방지하기 위한 한도 설정에 등가선량 사용; 즉, 장기/조직에 급성 손상이 발생하는 문턱 아래에 설정하는 한도를 종사자와 일반인에 대해 달리 설정.¹¹⁾
- 외부피폭을 측정하는 데 사용하는 실용량과 방호량 사이 혼동; 구체적으로 심부선량당량¹²⁾(유효선량 평가치로 사용되는 외부피폭 측정량)과 등가선량(유효선량 계산에 사용되는 중간과정 양) 사이 혼동(제2.2절, 제3.3절 및 제3.8절 참조).

8) <역주> 수학적으로는 조직 등가선량에 조직가중치를 곱해 합산하는 형태이지만, 본래 다른 조직의 선량은 '합산'하는 것이 아니다. $E = \sum_T w_T H_T$ 로 표현되는 합산식은 사실 정규화된 조직가중치($\sum_T w_T = 1$)를 곱하므로 '합산'이라기 보다는 '가중평균' 의미이다. 즉, 유효선량은 '위해 가중평균한 전신 등가선량'으로 이해하는 것이 적절하다.

9) <역주> 이 표현보다는 '유효선량은 낮은 LET 방사선에 의한 흡수선량으로 환산한 위해 가중평균 전신 흡수선량'이 적절할 것 같다.

10) <역주> 방사선량과 관련해 이러한 이슈들이 제기된다는 것이지 제기된 이슈가 모두 개선되어야 할 중요한 문제라는 의미는 아니다.

11) <역주> 두 가지 다른 문제를 한 꼭지에 묶었다. 처음은 높은 선량에서는 등가선량보다 흡수선량이 적합하다고 말하면서 결정론적 영향 방지를 위한 한도를 등가선량으로 적고 있는 문제이며, 다음은 문턱선량은 종사자나 일반인 구별이 없는데 일반인 등가선량 한도를 종사자 한도보다 1/10 수준으로 낮게 설정하는 문제임.

12) <역주> 원문은 단순히 선량당량으로 적었는데 괄호내 설명처럼 유효선량 대체량이라면 Hp(10)이나 H'(10)인 심부선량당량이어야 한다.

- 방사선가중치 설정에서 나타나는 비일관성, 모든 낮은 에너지전달선밀도(LET) 방사선과 알파입자에 대해서는 단순하게 접근하나 중성자에 대해서는 매우 복잡하게 접근하며, 또한 실용량에 대해서는 선질계수를 사용하여 다르게 가중(제3.3절 참조).¹³⁾
- 암위험은 연령, 성 및 인구집단에 따라 차이가 있음에도 불구하고, 유효선량 계산에는 모든 연령과 남녀에 대하여 단일 세트의 조직가중치 사용(제2.5절, 제3.4절 및 제4.2절의 81항 참조).
- 남성과 여성, 성인뿐만 아니라 아동을 구별하지 않고, 성 평균 기준인에 대한 유효선량의 계산 및 기준인과 대표인의 혼동(제3.6절, 제3.4절 및 제4.2절의 79항 및 80항 참조).
- 개별 장거나 조직에 높은 흡수선량이 발생할 수 있는 사고로 인한 고선량 피폭을 고려할 때 유효선량이 적용 가능한 선량의 범위 문제(제3.4절 참조).
- 내부 방사체로부터 예탁선량 계산에서 나타나는 보수성; 즉, 성인은 50년 기간, 아동은 70세에 이르는 기간에 적분한 선량(ICRP 2007a)(제3.3절 참조).
- 어머니의 내부 방사체 노출로부터 태아에 대한 유효선량 계산(제3.6절 및 제4.2절 참조).
- 위험 평가에 유효선량 사용, 특히 의료절차에서 환자의 피폭 평가(제5장 참조).
- 인구집단의 위험을 평가하는 데 집단유효선량의 사용(제3.7절 참조).

(5) 이 간행물의 제2장은 방사선피폭에 따른 조직반응과 확률론적 영향에 대한 정보를 요약하여 ICRP 103(2007a)의 해당 내용을 갱신하고, 유효선량을 계산하는 데 사용된 위해조정 명목위험계수와 조직가중치를 도출하는 데 채택된 방법론을 설명하며, 피폭연령과 성별에 따른 생애 초과암위험을 평가치의 변동에 관하여 ICRP 103에서 제시한 것보다 많은 정보를 제공한다. 제3장은 흡수선량, 등가선량 및 유효선량을 제시하고 논의하며 또한 예탁선량과 집단선량 및 ICRU 실용량에 대해서도 논의한다. 제4장은 계획피폭, 기존피폭 및 비상피폭 상황에서 종사자와 일반인의 피폭 평가와 관리에 있어서 선량 양의 적용을 검토한다. 제5장은 의료분야에서 선량 양 사용과 가능한 위험의 개략적인 지표로서 유효선량 사용을 검토한다.

13) <역주> 이에 대해서는 ICRP 60에서 설명하고 있다. 중하전입자의 경우는 평가된 가중치가 에너지에 따라 큰 차이가 없으므로 단일 값으로 단순화한 반면, 중성자의 경우 에너지에 따라 10배까지 차이가 있어 에너지 구간에 대해 특정 값을 권고하지만 현실에서 중성자 에너지가 연속적 분포를 가지므로 계산에서는 에너지의 함수로 매끄럽게 처리한 계산식을 적용할 수 있다고 권고했다.

제2장 보건 영향과 위해

2.1. 방사선 영향의 범주

(6) ICRP 103(2007a)은 방사선방호 목적의 방사선위험 정량화에서 내린 판단과 선택한 접근법에 대하여 상세히 설명하고 있다. 보건 영향을 다음의 큰 부류 둘로 구분한다:

- 조직반응(결정론적 영향) - 선량 문턱을 넘는 경우 발생하는 기관/조직의 장애. 선량이 높을수록 심각도 증가.
- 확률론적 영향(암 및 유전질환) - 주로 피폭집단에서 발생하는 암위험. 선량이 증가하면 빈도(심각도가 아닌)가 증가하고 그 아래에서는 위험이 없는 문턱이 없다고 가정.

2.2. 조직반응(결정론적 영향)

(7) 계획피폭상황과 관련하여 ICRP 103(2007a)은 이전에 권고한 조직반응에 대한 연간 선량한도를 변경하지 않고, 직무피폭의 등가선량 한도로는 눈 수정체에 대하여 150 mSv, 피부 및 손, 발에 대하여 500 mSv, 일반인의 등가선량 한도로는 눈 수정체에 대하여 15 mSv, 피부에 대하여 50 mSv로 정했다. 그러나 눈 수정체에 혼탁 유발이 이전의 데이터에서 나타난 것보다 더 민감할 수 있다는 증거가 쌓였다(Neriishi 등 2007, Worgul 등 2007). ICRP 118(2012a)은 조직반응에 대한 문턱선량과 관련하여 광범한 검토와 분석 결과를 제공했는데, 대부분 경우 ICRP 103(부록 A)의 판단을 재확인했다. 그러나 ICRP 118에서 최근에 검토된 많은 역학데이터를 근거로 눈의 수정체 혼탁 문턱 선량으로 ICRP 103에 주어진 급성피폭 5 Gy, 분할 또는 장기간 피폭 4-5 Gy와 비교해 더 낮은 약 0.5 Gy를 제안하였다. 가용한 데이터는 급성과 만성 피폭의 영향이 유사하고, 문턱선량 0.5 Gy는 물론, 문턱이 없을 수 있다는 가정과도 일관성이 있음을 보였다(ICRP 2012a, Bouffler 등 2015). 이에 따라 ICRP는 눈 수정체에 대한 연간 등가선량 한도를 어느 한 해에 50 mSv를 넘지 않되 5년 평균 20 mSv로 줄이도록 권고하는 조직반응에 관한 성명을 발표하였다(ICRP 2012a).¹⁴⁾

(8) 백내장 위험에 관한 판단은 주로 감마선에 의한 외부피폭 영향의 역학연구에 기초한다(Ainsbury 등 2009, ICRP 2012a). 조직반응에서 다양한 선질의 방사선 효력을 비교하는 데 사용할만한 정보가 일반적으로 많지 않다(Hamada와 Sato 2016). 그러나 가용한 데이터는 조직반응을 일으키는 Gy 당 효력에 방사선의 종류(예: 감마선 대비 알파입자나 중성자)가 주는 차이는 암 유발 효력에 주는 차이보다는 작다(ICRP 1990,2003b).

(9) ICRP는 조직반응을 방지하는 한도를 설정하는 데는 등가선량을 사용하는 대신 흡수선량이 더 적합하다고 생각한다. 이 변경은 흡수선량(Gy)으로 설정하는 조직반응에 대한 한도와 유효선량(Sv)으로 설정하는 확률론적 영향에 대한 한도를 분명한 구분할 것이다. ICRP는 다음 일반권고 때 이 변경을 도입할 것으로 기대한다. 눈 수정체(백내장), 피부 및 손발을 위한 한도는 주로 투과성 낮은 LET 방사선 피폭여건과 관련된다. 그러나 때로 중성자나 다른 높은 LET 방사선 피폭을 고려할 필요가 있는 상황에서는 낮은 LET 방사선과 비교하여 Gy 당 효력의 증가를 고려할 필요가 있을 것이다. 그러므로 조직반응에서의 방사선 가중을 고려하게 될 것이다(제3.3절 참조). 예상되는 변경은 미국방사선방호위원회(NCRP 2018)의 접근법 및 ICRU의 실용량 변경에 관한 제안과 일치한다(제3.3절 및 제3.8절 참조).

(10) ICRP 118(2012a)은 순환계 질환, 즉, 심장과 뇌 및 관련 조직에 방사선량이 전달되어 일어나는 심혈관 및 뇌혈관 질환에 0.5 Gy의 문턱선량을 적용할 수 있을 것으로 결론을 내렸다. 조직반응에 대한 성명서(ICRP 2012a)는 복잡한 중재절차에서 환자선량이 이 크기에 도달할 수 있음을 의료시술자가 유의할 필요가 있음에 주목하게 한다. Little 등(2012)은 역학데이터를 메타분석하여 낮은 선량을 낮은 선량에서 문턱없는 선형(LNT) 선량-반응 관계를 적용할 수 있다고 제안하고, 낮은 선량을 낮은 선량에서 추론한 암 위험과 비슷한 크기 위험을 도출했다(Little 2016). 그러나 NCRP(2018)는 사람 대상연구의 검토 결과 0.5 Gy 이하의 흡수선량에서 심혈관질환의 증거는 충분하지 않다고 결론을 내렸다. ICRP는 심혈관질환을 낮은 선량을 낮은 선량의 위해에 포함할 것인지 판단하기 위한 과학적 검토를 계속할 것이지만, 확률론적 과정이 방사선에 의한 순환계 질환에 관련되는지 판단하려면 기계론적 추가 이해가 요구된다(Hendry 2015).

14) <역주> 2011년 4월 서울에서 개최된 ICRP 본위원회 회의에서 채택된 성명이다. 직무피폭 수정체 등가선량 한도는 이처럼 2/15로 크게 감소했음에도 일반인 수정체 등가선량 한도는 기존의 연간 15 mSv를 그대로 두었다. 이는 일반인 선량한도는 직무피폭에 비해 '1/10 원칙'을 벗어난 것인데, 1/10 원칙을 따를 경우 얻는 연간 2 mSv 등가선량은 조직반응 문턱선량과 연계가 어려울 정도로 낮은 값이 되기 때문이다.

2.3. 확률론적 영향(암 및 유전질환)

(11) 방사선의 주요 확률론적 영향은 암이다. 위험의 주요 정보는 히로시마와 나가사키의 일본인 원폭생존자에 대한 역학연구 결과이지만 다른 연구로부터도 중요한 정보도 있다(ICRP 2007a, UNSCEAR 2008, NCRP 2018). 일반적으로 역학자료는 암 발생률과 약 100 mGy에서 수 Gy의 감마선 흡수선량 사이에 선형 선량-반응 관계를 보인다. 관찰 결과를 낮은 선량 및 낮은 선량률로 확대하려는 시도도 진행되고 있는데, 특히 대규모 종사자 코호트연구(Muirhead 등 2009, Leuraud 등 2015, Richardson 등 2015, 2018, Sokolnikov 등 2015, Kuznetsova 등 2016, Haylock 등 2018)와 전산화단층촬영을 거친 아동 연구(Pearce 등 2012, Mathews 등 2013, Huang 등 2014, Journy 등 2015, Berrington de Gonzalez 등 2016, Meulepas 등 2019)이다. CT 연구는 수십 mSv에서 통계학적으로 의미 있는 암 발생률 증가를 보고했다. 그러나 이 연구의 해석에서 주의가 필요하다는 조언이 있다(Walsh 등 2013, 2014, Boice 2015). 촬영 이유에 대한 정보 부족, 개인선량 재구성 부족 등 여러 문제가 확인되었다. 환자들에게 발견되지 않고 있었던 암이 CT 검사로부터 발견되었거나(역인과관계), 암 취약인자가 CT 촬영을 불러온 결과(적응증 교란 confounding by indication의 예)로 생각된다(UNSCEAR 2013, Walsh 등 2013, 2014, Boice 2015).

(12) 낮은 선량률 낮은 선량에 의한 암 위험을 정량화하는 데 여러 가정과 판단을 하였다(ICRP 2007a). 1990년대의 역학연구에 기초하여 원폭생존자 연구에서 유도된 선량선량률효과인자(DDREF) 2가 고형암에 적용되었다. 오늘날도 역학연구는 계속되고 있으나(Rühm 등 2016, Shore 등 2017), 인간 고형암에서 DDREF가 1보다 크다는 증거는 제한적이지만, 동물 데이터와 시험관 데이터는 DDREF >1의 사용을 어느 정도 지지하는 곡선형 선량-반응 관계를 나타내고 있다. ICRP 131(2015c)에서 논의한 것처럼, 성분인자인 선량효과인자(DEF)와 선량률효과인자(DREF)는 기계론적으로 구분되는 것으로 간주되는데, 선량효과인자는 낮은 급성 선량에 적용되고, 선량률효과인자는 표적 줄기세포의 장기적 역동학이 반응을 수정할 수 있는 분할 선량에 적용되는 것으로 본다. 백혈병의 경우 원폭생존자 데이터는 선량-반응이 0.1 Gy 아래에서는 선형적인 선형-이차 선량-반응 관계와 일치한다. 수십 mGy의 낮은 선량 피폭에 대한 암위험 평가에서 LNT 선량-반응 관계가 가정되었다. LNT 선량-반응 관계는 낮은 선량률 낮은 선량에서 방사선 유발암의 기계론적인 이해를 포함하는 현재의 증거에 대한 신중한 해석이라고 생각된다(Preston 등 2003, 2007, ICRP 2007a, UNSCEAR 2012b). NCRP(2018)는 모든 관련 역학연구를 검토하여 방사선방호 목적으로 더 실용적이고 신중한 해석을 보이는 모델이 없는 한, 현행 역학연구 데이터는 LNT 선량-반응 관계의 계속 사용을 지지한다고 결론 내렸다.

(13) LNT 선량-반응 모델은 크기가 다르고 시간적 공간적 전달 패턴이 다른 외부피폭과 내부피폭 선량을 더할 수 있게 하는 방호량으로서 유효선량을 사용하는 뒷받침이 된다. 그러나 낮은 선량은 무난히 믿을 만하게 측정, 평가될 수는 있지만, 수반 위험은 불확실하고 선량이 낮아질수록 불확실성은 더 커진다는 점을 알아야 한다.

(14) ICRP 103(2007a)은 인간 역학연구에서 방사선에 의하여 해로운 유전적 영향에 신뢰할 만한 직접증거는 없으나, 동물실험에서 나타난 유전영향의 증거를 신중하게 해석하여 전체 확률론적 위험에 유전위험을 포함한다고 했다. UNSCEAR(2001)와 ICRP(2007a)에 의한 상세분석에 따라 방사선 위해의 계산에 유전질환 위험의 평가는 두 세대까지 적용하고 있다.

2.4. 명목위험계수 및 위해

(15) ICRP 103(2007a)의 부록 A는 방사선 유발 확률론적 보건영향의 명목 위험계수와 관련 위해 값 계산에 적용된 방법론을 설명하고 있다. '위해' detriment는 낮은 선량을 낮은 선량에서, 치사, 삶의 질 및 수명손실연수 관점에서 질병의 심각도를 고려하여 건강에 해로운 방사선 영향을 정량화하는 데 사용하는 개념이다. 계산 단계는 ICRP 103의 부록 A에 윤곽을 설명하였고, 여기서도 요약한다. ICRP는 위해 계산을 검토하고 계산에 도입된 가정의 민감도를 평가하는 별개의 보고서를 준비하고 있다.

(16) 대부분 일본 원폭생존자 추적 데이터 분석을 이용하여, 남녀의 생애 초과암위험을 14개 장기/조직에 대해 초과상대위험(ERR)과 초과절대위험(EAR) 모델을 모두 사용해 평가하였다. 위험에 대한 선형-이차 모델을 적용한 백혈병을 제외하고, DDREF를 고려하여 생애위험 평가치를 1/2로 낮췄다. 두 모델의 적용성이 상대적인 점에 근거하여 지정된 장기/조직 개개에 대하여 ERR과 EAR 생애위험 평가의 가중체계를 수립했다. 예를 들면, ERR:EAR 가중치는 유방과 골수에는 0:100%, 갑상선과 피부에는 100:0%, 폐에는 30:70%, 다른 모든 조직에는 50:50%을 할당했다. 위험평가 결과는 선정된 아시아 및 구미歐美 인구에 대해 성별로 평균하여 명목위험계수를 표2.1와 같이 제시했다. 아시아 인구는 중국(상하이)과 일본(오사카, 히로시마 및 나가사키)의 암 등록체계에 있는 인구의 조합이고, 구미 인구는 스웨덴, 영국, 미국의 암 등록체계(SEER: Surveillance, Epidemiology, and End Results Program)에 있는 인구의 조합이다.

(17) 암 발생의 생애초과위험에 암 생존 데이터로부터 유도된 치사율을 곱함으로써 치명

표2.1. 감마선에 의한 균일 전신선량에 대한 ICRP 103의 명목 암위험과 위해 요약 (ICRP 103, 부록 A의 표A.4.1)

조직	명목위험계수 (Gy 당 10000명 당)*	치사율	치사율과 삶의 질을 조정한 명목위험	암 없는 수명 상대손실	위해(열 1과 관련)	상대 위해†
a) 전체 인구(피폭연령 0-84세)						
식도	15	0.93	15.1	0.87	13.1	0.023
위	79	0.83	77.0	0.88	67.7	0.118
결장	65	0.48	49.4	0.97	47.9	0.083
간	30	0.95	30.2	0.88	26.6	0.046
폐	114	0.89	112.9	0.80	90.3	0.157
뼈	7	0.45	5.1	1.00	5.1	0.009
피부	1000	0.002	4.0	1.00	4.0	0.007
유방	112	0.29	61.9	1.29	79.8	0.139
난소	11	0.57	8.8	1.12	9.9	0.017
방광	43	0.29	23.5	0.71	16.7	0.029
갑상선	33	0.07	9.8	1.29	12.7	0.022
골수	42	0.67	37.7	1.63	61.5	0.107
기타 고형	144	0.49	110.2	1.03	113.5	0.198
생식선(유전적)	20	0.80	19.3	1.32	25.4	0.044
합계	1715		565		574	1.000
b) 근로연령인구(피폭연령 18-64세)						
식도	16	0.93	16	0.91	14.2	0.034
위	60	0.83	58	0.89	51.8	0.123
결장	50	0.48	38	1.13	43.0	0.102
간	21	0.95	21	0.93	19.7	0.047
폐	127	0.89	126	0.96	120.7	0.286
뼈	5	0.45	3	1.00	3.4	0.008
피부	670	0.002	3	1.00	2.7	0.006
유방	49	0.29	27	1.20	32.6	0.077
난소	7	0.57	6	1.16	6.6	0.016
방광	42	0.29	23	0.85	19.3	0.046
갑상선	9	0.07	3	1.19	3.4	0.008
골수	23	0.67	20	1.17	23.9	0.057
기타 고형	88	0.49	67	0.97	65.4	0.155
생식선(유전적)	12	0.80	12	1.32	15.3	0.036
합계	1179		423		422	1.000

* 위험계수는 균일 전신 감마선 피폭에 의한 흡수선량 1 Gy 당 10,000명 당 증례임.

† 이 값들을 정밀한 것으로 보면 안 된다. 계산의 추적성과 조직가중치의 선택을 위해 유효 숫자 셋을 사용하고 있을 뿐이다.

율이 조정되었다. 비치사성 암에 대한 이환율(morbidity)과 고통을 반영하기 위해 추가 조정이 적용되었다. 암 종류에 따라 발생 연령 분포가 다르듯이 수명손실 연수가 다르므로 가중계수의 조정에 이 차이가 적용되었다. 이 계산 결과로부터 나온 암 위해와 생식선 피폭에 의한 유전질환 위험 평가치도 표2.1에 있다. 위해 계산에 대해 곧 발간할 보고서에는 ICRP 103(2007a)에서 주어진 내용을 명료하게 하도록 더욱 상세한 설명이 제공될 것이다.

(18) 표2.2는 ICRP 103(2007a)에서 유도된 위해조정 위험계수와 ICRP 60(1991a)에서 사용된 계수를 비교하고 있다.

표2.2. 유효선량 당 위해조정 명목 위험계수(10^{-2} Sv^{-1}) (ICRP 1991a,2007a)

피폭 집단	암		유전적 영향		계	
	ICRP 103	ICRP 60	ICRP 103	ICRP 60	ICRP 103	ICRP 60
전체	5.4	6.0	0.2	1.3	5.7	7.3
성인*	4.1	4.8	0.1	0.8	4.2	5.6

* 근로연령 인구(피폭연령 18-64 세).

(19) 암 위해에 대한 ICRP 103(2007a)의 값은 상당히 개선된 역학분석을 적용하고 사망이 아닌 발생 데이터에 근거한다. 유전질환의 값이 낮아진 것은 가용한 실험 데이터와 사람의 유전질환 증거에 대한 과학적으로 더 견고한 해석에 따른 것이다. 명목 위험계수를 유도하는 데 사용된 암위험 데이터가 거의 감마선에 의한 외부피폭과 관련되지만, 전반적 인구집단의 값은 유효선량(Sv)로 표시하고 모든 방사선피폭에 적용한다(제2.7절 및 제3장 참조).

2.5. 조직가중치

(20) 표2.3은 ICRP 103(2007a)에서 표2.1의 상대위해에 기초하여 유효선량의 계산에 사용한 조직가중치를 보인다. 제1장에서 요약하고 제3장에 더 자세히 설명한 것처럼, 유효선량은 개별 장기나 조직이 전체 위해에 기여 정도를 표시하기 위하여 조직/장기 등가선량을 조직가중치로 가중평균한 등가선량으로 계산된다. 이 절차의 의도는 단위 유

효선량 당 총 위험이 개별 장기/조직 선량의 기여에 관계없이 대략 표2.2에 보인 값이 되게 하는 것이다. 표2.1에 보인 명목위험계수 및 위해의 계산과 관련된 불확도가 있고, 이를 외부피폭과 내부피폭으로 인한 낮은 선량률 낮은 선량에 적용하기에, 표2.3에 보인 조직가중치는 정확하다는 인상을 피해 단순화하고 반올림하였다. 나아가 모든 연령과 남녀 양성에 적용하는 단일 세트 값을 사용한다. 생식선 조직가중치 0.08에는 피폭자의 암위해와 유전영향이 반영된다. 구체적으로 정량화하기 어려우나 침샘과 뇌가 '잔여조직' 그룹에 있는 다른 조직들보다 방사선 유발암에 더 민감한 것으로 판단되어 각각 조직가중치 0.01을 적용했다.

표2.3. ICRP 103(ICRP 2007a)의 조직가중치

조직	w_T	$\sum w_T$
적색골수, 결장, 폐, 위, 유방, 잔여조직*	0.12	0.72
생식선	0.08	0.08
방광, 식도, 간, 갑상선	0.04	0.16
뼈 표면, 뇌, 침샘, 피부	0.01	0.04

* 잔여조직: 부신, 흉외기도 부위, 쓸개, 심장, 신장, 림프절, 근육, 구강 점막, 췌장, 소장, 비장, 흉선, 전립선(♂), 자궁/자궁경부(♀)의 남녀 각각 13개 조직/장기

2.6. 연령별 및 성별 암위험

(21) ICRP 103(ICRP 2007a)에 제시한 명목위험 및 위해계수는 연령, 남녀 및 인구집단 평균치이지만, 전체 집단(0-84 세)과 근로연령 인구(18-64 세)로 구분하였다. 전체 집단에 대한 위험이 약간 더 큰 것은 어린 시절 피폭의 위험이 더 크기 때문이다.

(22) Wall 등(2011)은 암의 종류와 성 및 피폭연령에 따른 생애 초과암위험의 변동을 조사하였다. 조사방법은 ICRP 103(ICRP 2007a)에서 사용된 것과 약간 다르나 결과는 연령과 성별에 따른 위험의 변화를 보인다. 장기/조직의 단위 흡수선량(Gy) 당 100 세에 이르기까지 누적 암위험을 남녀에 대해, 연령 구간을 10년 단위(0-9 세부터 90-99세)로, 11종의 암(여성 유방, 폐, 위, 결장, 방광, 간, 갑상선, 식도, 난소, 백혈병 및 기타 고형 암 사이트)에 대하여 계산하였다. 위험 모델은 ICRP 103 방법을 사용하여 원폭생존자 코호트(Preston 등 2007)로부터 유도했다. 기저발생률을 정의하기 위해, Wall 등(2011)은 구미 조합인구집단에 대하여 ICRP 103의 값을 사용하였다. 표2.4에 보인 값은 Wall

표2.4. ICRP 구미 조합인구집단(ICRP 2007a)에 대한 균일 감마선 외부피폭의 단위 흡수선량 당 생애 기인위험(Gy 당 100 명 당)

	피폭연령(세)									
	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99
남성										
폐	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.6	0.4	0.2	0.03
위	1.0	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.0
결장	1.6	1.3	1.1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.04	0.0
적색골수	1.3	1.3	0.8	0.7	0.7	0.4	0.3	0.1	0.07	0.02
방광	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.01
간	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.06	0.03	0.01	0.0
갑상선	0.4	0.2	0.06	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
식도	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.08	0.05	0.01
기타	4.9	3.2	2.4	1.4	0.9	0.5	0.3	0.1	0.03	0.0
모든 암	11.5	8.8	6.8	5.0	4.0	2.9	1.9	1.0	0.4	0.08
여성										
유방	6.7	4.1	2.5	1.5	0.8	0.4	0.2	0.07	0.02	0.0
폐	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	1.6	1.1	0.5	0.06
위	1.7	1.3	1.0	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.0
결장	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.08	0.03	0.0
골수	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.3	0.2	0.1	0.04	0.01
방광	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.01
간	0.3	0.2	0.2	0.1	0.09	0.06	0.04	0.02	0.01	0.0
갑상선	1.9	0.8	0.3	0.1	0.04	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0
식도	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.03
난소	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.06	0.03	0.01	0.0
기타	3.7	2.5	1.7	1.2	0.8	0.5	0.3	0.1	0.05	0.0
모든 암	18.5	13.0	9.4	7.1	5.7	4.4	3.2	2.1	1.0	0.1

위험은 초과절대위험(EAR)과 초과상대위험(ERR) 모델을 사용하고 백혈병을 제외한 모든 암에 선량선량률효과인자 2를 적용하여 계산되었다(ERR:EAR: 갑상선 100:0%, 폐 30:70%, 유방 0:100%, 다른 모든 조직 50:50%을 부여했다). Preston 등의 모델(2002)이 유방암에 사용되었다. 최소 잠복기는 백혈병에 대하여 2년 및 고형암에 대하여 5년을 적용했다.

등(2011)에서와 것과 같이 피폭기인 암이 아니라 생애기인위험lifetime attributable risk으로 계산된 것이지만 그 결과는 비슷하다.

(23) 표2.5는 ICRP 아시아 조합인구집단에 대한 기저발생률을 사용한 같은 계산 결과를

표2.5. ICRP 아시아 조합인구집단(ICRP 2007a)에 대한 균일 감마선 외부피폭의 단위 흡수선량 당 생애 기인위험(Gy 당 100명 당)

	피폭연령(세)									
	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99
남성										
폐	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	0.4	0.2	0.04
위	1.6	1.3	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.03	0.0
결장	1.9	1.5	1.2	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1	0.04	0.01
적색골수	1.3	1.3	0.8	0.7	0.7	0.5	0.3	0.1	0.07	0.02
방광	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.09	0.04	0.01
간	1.1	0.8	0.7	0.5	0.4	0.2	0.1	0.05	0.01	0.0
갑상선	0.3	0.1	0.06	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
식도	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.09	0.06	0.01
기타	2.9	1.9	1.3	0.9	0.6	0.5	0.2	0.07	0.02	0.0
모든 암	10.5	8.3	6.4	5.1	4.1	3.0	2.0	1.1	0.5	0.09
여성										
유방	6.8	4.1	2.5	1.5	0.8	0.4	0.2	0.06	0.02	0.0
폐	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.6	1.4	0.9	0.5	0.09
위	2.2	1.7	1.3	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.05	0.01
결장	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.06	0.02	0.0
골수	0.5	0.5	0.5	0.1	0.5	0.3	0.2	0.09	0.04	0.01
방광	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.07	0.01
간	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.08	0.04	0.01	0.0
갑상선	2.5	1.0	0.5	0.2	0.06	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0
식도	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.03
난소	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.07	0.04	0.02	0.01	0.0
기타	3.0	2.1	1.5	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.04	0.01
모든 암	18.8	12.8	9.4	6.6	5.5	4.1	2.9	1.8	0.9	0.2

위험은 초과절대위험(EAR)과 초과상대위험(ERR) 모델을 사용하고 백혈병을 제외한 모든 암에 선량선량률효과인자 2를 적용하여 계산되었다(ERR:EAR: 갑상선 100:0%, 폐 30:70%, 유방 0:100%, 다른 모든 조직 50:50%을 부여했다). Preston 등의 모델(2002)이 유방암에 사용되었다. 최소 잠복기는 백혈병에 대하여 2년 및 고형암에 대하여 5년을 적용했다.

보인다. 두 데이터를 비교해보면 양 인구집단에서 전체 위험은 같은 경향을 보이지만, 피폭연령 30-39 세 그룹의 위험은 최연소 그룹(피폭연령 0-9 세)의 약 2배 정도이고, 피폭연령 60-69 세의 반 정도 된다. 그러나 그림2.1¹⁵⁾에서 폐암과 갑상선암에 대해 보인 것

15) <역주> 원본의 그림2.1이 구미인 자료만 보이고 있어 표2.5와 표2.5 데이터를 이용해 역자가

처럼 암의 종류에 따라 크게 차이가 나고, 개별 암 위험의 피폭연령 의존성에도 있어서 두 인구집단 사이에 상당한 차이를 보인다. 암 종류별 총 생애위험에 기여 정도는 성 및 피폭연령에 따라 크게 변한다. 피폭연령에 따른 변동이 생애 누적암발생 위험을 반영하여, 피폭연령의 증가에 따라 위험이 감소하는 것은 피폭연령에 따른 민감도 변동보다는 잔여수명의 감소에 의한 것임에 유의할 필요가 있다. 표2.4 및 표2.5의 값은 모두 불확성이 있는 가정들을 바탕으로 한 모델링 결과임을 알아야 한다. 낮은 선량을 낮은 선량의 위험 평가치에 수반되는 상당한 불확도를 유념하는 것은 중요하지만(NCRP 2012, UNSCEAR 2012b), 개별 암에서 차이와 함께 피폭연령에 따른 위험의 변화에 대한 결론은 유효하다. ICRP 방법론을 이용하여 계산한 일본인 집단에서 암 위험의 연령별, 성별 차이 평가치는 Ogino 등(2016)이 발표했다.

(24) 태아의 태내 피폭의 위험과 관련하여 ICRP 103(2007a)은 ICRP 90(2003a)을 참조한다. 한정된 가용한 데이터로부터 주요 결론은 태내 피폭에 의한 암의 생애 초과위험은 전체 인구집단에 대한 위험의 수 배 정도를 넘지 않고, 소아기 피폭에 따른 암 위험보다 높지 않다는 가정이 합리적이라는 것이다.

(25) 명목위험계수와 위해 값은 일반인과 근로연령 집단에 대해 성별 피폭연령별로 평균하였다. 조직가중치는 남녀와 연령에 대해 평균한 상대위해 값(표2.1a)을 단순화하고 반올림해 결정했다. 그러나 다양한 인구집단과 개인 사이에 위험의 잠재적 차이를 이해하는 것이 이 권고의 목적에서 중요하다. 다른 분야에서도 그렇지만 특히 의료분야 적용에

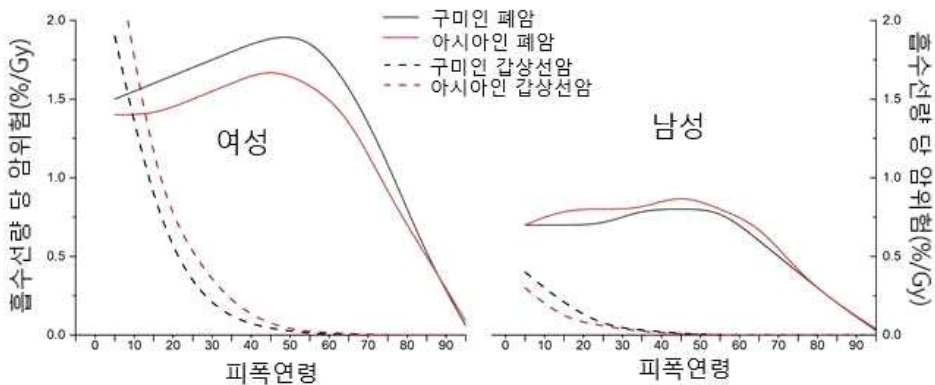


그림2.1. ICRP 구미 인구집단(ICRP 2007a)에 대하여 성별 연령별 균일 감마선 외부피폭의 단위 흡수선량 당 폐암 및 갑상선암의 생애 기인위험(Gy 당 100명 당; %/Gy) (표2.4 및 표2.5).

그림을 새로 그렸다.

서, 특정 절차에 수반되는 위험에 대하여 상당한 이해가 필요한 상황이 있는데, 명목 위험계수가 전하는 것보다 더 나은 정보가 요구될 수도 있다.¹⁶⁾

(26) 암 위험에서 피폭연령과 성별 차이에 더하여, 일반적으로 잘 알려지지는 않지만, 유전적 차이와 잠재적 환경/생활양식의 차이와 관련하여 개인 간 방사선 민감도 변동이 있다(ICRP 2007a, AGIR 2013, Bouffler 2016). 유전형질분석(genetic typing)과 유전자 검사의 진보로 더 많은 이해가 예상되나, 그러한 정보의 이용에 윤리적 도전도 있다(Bouffler 2016). 그러나 현행 정보로는 그러한 차이에 따른 영향을 개인별 암위험에 대해 그 차이를 정량화하기에는 충분하지 않다.

(27) 방호체계의 실제 이행에 있어서 모든 일반인과 모든 작업자에게 적용할 수 있는 방호기준을 수립하는 것이 대단히 유용하다. 방호체계를 적용하는 데 있어서, 특히 낮은 선량을 낮은 선량에서, 위험 평가치의 도출과 적용에 관련된 불확도의 맥락에서 이 절에서 보인 차이를 명심해야 할 것이다(위험 평가치의 불확도에 대해서는 NCRP(2012) 및 UNSCEAR(2012b) 참조).

2.7. 알파입자 방출 핵종의 위험

(28) 위에서 논의했듯이, 명목 위험계수, 위해 및 조직가중치를 유도하는 데 사용된 기본 역학 데이터는 거의 일본 원폭생존자의 감마선 외부피폭에 의한 암 발생과 사망 데이터에 관련된다(골수 및 피부암은 제외한다. ICRP 2007a). 방호체계의 이행에서 중요한 질문은 주로 투과성 외부 방사선에 단시간 피폭한 연구에서 도출된 위험을 중하전입자에 의한 장기간 피폭이나 조직간 또는 조직 내 비균질피폭에 어느 정도까지 적용할 수 있는지이다. 이 질문은 알파입자 방출 핵종의 내부피폭에 특히 해당된다.

16) <역주> 의료피폭의 특이성은 전신 노출이 아니라 한정된 신체부위에 선량이 전달되는 것이다. 그렇더라도 유효선량 개념이 위험 가중 전신 평균 등가선량이므로 국부 노출도 전신 평균으로 환산한다면 위험지표로는 의미는 있다. 다만, 전신 평균에 적용한 조직가중치가 개별 조직의 상대적 위해를 정교하게 반영한 것이 아니라 편의를 위해 그룹화 했기 때문에 의료피폭에서 집중적으로 노출되는 조직(예: 폐암 진단을 위한 폐 선량이나 유방암 진단을 위한 유방선량)의 가중치가 실질 상대위해보다 상당히 차이날 수 있어 유효선량을 어느 정도는 과소/과대 평가할 수는 있다. 특히 유방촬영은 여성만 대상인데 조직가중치는 남녀 평균(여성의 절반)을 반영한다. 무엇보다 의료피폭은 당면한 질병의 진료를 위한 목적이므로 위험관리 목적으로 정의한 유효선량을 그에 수반되는 위험 평가에 적용하려는 것은 본질에서 벗어나는 의미가 있다. 이 간행물에서도 강조하고 있듯이 절차들 사이 비교나 다른 분야 피폭과 견주어 보기 위해서는 같은 잣대가 필요하므로 유효선량으로 평가해 비교하게 된다.

(29) Harrison과 Muirhead(2003)은 알파 방출 핵종 피폭에 의한 방사선유발암과 원폭 생존자의 방사선유발암에 대한 위험 평가를 비교하였다. ^{222}Rn 과 자손 또는 ^{239}Pu 에 의한 폐암, Thorotrast(^{232}Th 를 함유한 조영제)¹⁷⁾에 의한 간암, 그리고 라듐 동위원소에 의한 골수암을 살폈다. 감마선에 비해 약 20배 높은 알파입자의 효력을 고려하면 사람 데이터는 이들 내부 방출체와 외부 방사선에 의한 암위험 평가 사이에 일관성을 보임을 확인했다. Little 등(2007)도 내부 방출체에 대한 역학 데이터 분석 결과와 원폭생존자 데이터를 비교하여 비슷한 결론을 도출했다. Marsh 등(2014)은 프랑스 우라늄 광부와 Mayak 작업자에 집중하여, ^{222}Rn 자손과 ^{239}Pu 흡입에 의한 Gy 당 폐암 위험을 비교하였다. 라돈자손의 알파입자에 의한 선량은 주로 기도에 집중되고 일부만 폐포 조직에 전달되나, ^{239}Pu 의 붕괴에 의한 알파입자는 반대로 작용한다. Marsh 등(2014)은 이들 연구 결과로 발표된 폐암의 초과상대위험(ERR) 값과 생애 초과절대위험(LEAR) 계산 값을 원폭생존자 데이터에 근거한 결과와 비교하였다. 발표된 ERR 및 LEAR 값은 ^{222}Rn 자손이나 ^{239}Pu 에서와 유사한 값을 보였고, 각각 생물학적효과비(RBE) 중앙값 10-20과 대략 부합한다.

(30) 여러 핵종과 외부 방사선의 피폭 영향을 비교한 동물실험이나 시험관 데이터도 이를 지지한다(UNSCEAR 2000,2008, WHO 2001). 그러나 내부 방출체에 대한 선량평가와 위험평가의 불확실성에 대해서는 유념해야 한다.

(31) 골수암의 경우 1990년대까지 원폭생존자 데이터는 의료에서 ^{224}Ra 를 체내에 투여한 영향의 역학연구보다 정보가 부족하였다. 표2.1의 골수암 위험계수는 ICRP 60(1991a)의 ^{224}Ra 데이터 검토를 기반으로 한다. 이때 낮은 LET 방사선의 Gy 당 위험을 평가하기 위하여, Gy 당 위험을 감마선과 비교한 알파입자의 가정된 RBE값 20으로 나누었다.

(32) 동물실험 및 기타 실험 데이터의 지지를 받는 가용한 역학 데이터는, 간단한 조정으로 RBE를 고려할 때, 외부 감마선과 내부 알파입자 피폭 사이에 Gy 당 위험이 동등하다고 가정해도 방호목적으로 합리적임을 지지한다고 결론지을 수 있다. ^{222}Rn 자손이나 ^{239}Pu 의 폐암 위험과 외부 감마선의 상세 비교에 관한 ICRP 보고서는 준비 중이다.

17) <역주> ThO_2 입자를 콜로이드 형태로 함유한 X선촬영 조영제 상품으로서 1930년대에 많이 사용되었다. 그 방사성 때문에 바륨 등 다른 조영제로 대체되었으나 당시 진단받은 많은 환자가 알파입자 방출 핵종(자손핵종 포함)으로 내부피폭을 받았다.

제3장 선량 양

3.1. 방호량의 요건

(34) 선량 양은 조직반응을 방지하기 위한 한도와 확률론적 영향으로부터 방호를 최적화하기 위한 방호기준(한도, 제약치, 참조준위)을 설정하는 데 필요하다. ICRP는 제 3.2-3.4절에서 보는 바와 같이 흡수선량, 등가선량 및 유효선량을 사용한다. 방사성핵종의 섭취는 수년 이상 장기간 선량을 초래할 수 있으므로, ICRP는 예탁선량 개념을 정의한다(제3.5절). 또한, 선량평가(제3.6절)에 사용하기 위한 선량계수(섭취 당 Sv, 제3.7절)를 제공한다. 방호최적화 목적으로 집단선량도 정의한다(제3.7절). ICRU는 외부선원에 의한 피폭¹⁸⁾에 대하여 측정 가능한 양인 실용량을 정의하는데, 이는 ICRP 방호량의 합리적 평가치를 제공한다(제3.8절).

3.2. 흡수선량

(34) 흡수선량은 모든 종류의 전리방사선에 적용되는 선량의 기본 물리량이다.¹⁹⁾ 흡수선량의 SI 단위는 J/kg이고 그 특별명칭은 그레이(Gy)이다.²⁰⁾ 흡수선량은 측정 가능한 양이고, 값을 결정하는데 1차 표준이 존재한다. 흡수선량을 방호목적으로 사용할 때는 선량을 조직 체적에 대해 평균한다. 낮은 선량을 낮은 선량의 경우 특정 장기나 조직에 평균한 흡수선량 평균값은 해당 조직의 확률론적 영향의 방사선 위해와 방사선방호 목적에서 충분한 정확도로 연계된다고 가정한다. 흡수선량의 평균은 특정 장기(예를 들면 간)이나 조직(예를 들면 적색골수), 또는 조직 민감부(예를 들면 뼈대의 뼈표면)의 체적/질량 전체에 대해서 수행된다.

18) <역주> 원문은 '직무피폭'으로 적고 있으나 실용량은 다른 피폭에도 적용할 수 있으므로 단순히 '피폭'으로 수정했다. 실용량 중 인체선량은 개인선량계를 패용하는 직무피폭자가 주된 대상이긴 하지만, 선량률계에 적용하는 주위선량은 사람이 아닌 장소를 대상으로 한다. 긴급작업자가 생명 위험을 무릅쓰고 받는 피폭은 '직무피폭'이 아닐 것이지만 개인선량계는 패용한다.

19) <역주> 또한 모든 종류 방사선에 적용된다.

20) <역주> 원문이 SI 단위가 Gy라 잘못 표현하고 있어 수정했다.

3.3. 등가선량

(34) 등가선량 정의는 방사선 종류 R 에 의한 특정 장기나 조직 T 체적의 평균 흡수선량에 $D_{T,R}$ 에 기초를 둔다. 방사선 R 은 인체에 입사하거나 체내에 존재하는 방사성핵종이 방출하는 방사선의 종류와 에너지에 대해 주어진다. 장기나 조직에서 등가선량 H_T 는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 w_R 은 방사선 R 의 방사선가중치이다. 관련된 모든 종류의 방사선에 대해서 합산한다.²¹⁾ 등가선량의 SI 단위는 J/kg이고 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

(35) 방사선 방호량 정의에서 방사선 가중은 처음에 ICRP 26(1977)에서 에너지전달선밀도(LET, L)의 함수로 제공되는 방사선 선질계수 Q(L)로 했다.²²⁾ ICRP 60(1991a)에서는 방사선가중 방법을 변경하여, 확률론적 영향, 즉 암과 관련한 방사선가중치(w_R) 값 한 세트를 선정했다. w_R 값은 확률론적 영향과 관련된 생물학적 귀착점에 대한 다양한 방사선의 생물학적효과비(RBE)의 측정에 주로 기초했다. RBE 값은 실험적으로 정해지는데, 관찰 결과 동일한 수준의 효과를 내는 시험 방사선과 낮은 LET 기준방사선의 흡수선량의 비로 결정된다(ICRP 2003b). 연구하는 생물학적 귀착점이나 기준방사선에 따라 다양한 RBE 값이 관찰되는데, 기준방사선은 보통 kV X선²³⁾이나 ⁶⁰Co 감마선이다. w_R 값은 낮은 LET 기준방사선의 낮은 선량을 낮은 선량에 상응하는 최대 RBE 값(RBE_{max})에 기초하여 선택되었다. 표3.1은 ICRP 103(2007a)에서 채택된 w_R 값을 보인다.

(37) 모든 광자, 전자 및 뮤온 방사선에 대해 w_R 값을 1로 한다고 해서 다양한 에너지에도 생물학적 작용력에 차이가 없음을 함의하는 것은 아니다. 이렇게 단순한 접근은 유효선량이 의도하는 적용에만 적절하다. 소급적 위험평가에서는 관련 데이터가 가용하면 방사선장과 RBE 값에 대한 상세 정보를 고려할 필요도 있을 수 있지만, 이는 유효선량

21) <역주> 등가선량 정의에서는 방사선 종류에 대한 합산은 포함하지 않는 것이 옳다고 본다. 감마선과 중성자 혼합 방사선장에 노출되는 조직의 등가선량은 반드시 두 방사선 모두 합산한 단일 양이 아니라 '감마선 등가선량', '중성자 등가선량'으로 분리할 수 있게 해야 한다. 등가선량 정의 목적이 다른 종류 방사선 선량을 동일 척도로 표현하기 위한 것이므로, 등가선량은 방사선 R에 대해 본질적으로 가산적이니 합산은 필요할 때 하면 된다.

22) <역주> 본문 설명이 번잡하여 역자가 표현을 수정했다.

23) <역주> 원문은 megavoltage로 적고 있으나 대부분 연구가 250 kVp X선을 기준방사선으로 사용했다.

표3.1. ICRP 103(2007a)의 방사선가중치

방사선 유형	방사선가중치, w_R
광자	1
전자 또는 뮤온	1
양성자 및 하전 파이온	2
알파 입자, 핵분열파편, 중이온	20
중성자	중성자 에너지의 연속함수(그림 3.1)

모든 값은 인체에 입사하는 방사선에 관련된다.

에 의도된 적용 범위를 넘어선다. DNA에 함유된 오제전자 방사체의 예에서처럼 발생할 것 같은 세포 내 방사선량 불균질성도 특별한 평가를 요구할 수 있다.

(38) 중성자 방사선가중치는 외부피폭에 따른 RBE를 반영한다. 인체에 입사하는 중성자의 생물학적 효력은 중성자 에너지에 의존한다(ICRP 2007a, 부록B 참조). 그림3.1에 보이는 에너지 함수는 낮은 중성자 에너지 영역에서는 인체의 흡수선량에 2차 광자의 기여가 커서, 50 MeV 이상에서는 물리적 이유로 RBE 값이 양성자 RBE에 접근하는 것으로 가정하기 때문에 중성자 w_R 값이 줄어든다.

(39) 우주 방사선장이나 고에너지 입자가속기 근처 양성자는 주로 매우 높은 에너지인데, 모든 에너지 양성자에 대해 10 MeV 이상 고에너지 양성자에 대한 방사선생물학 데

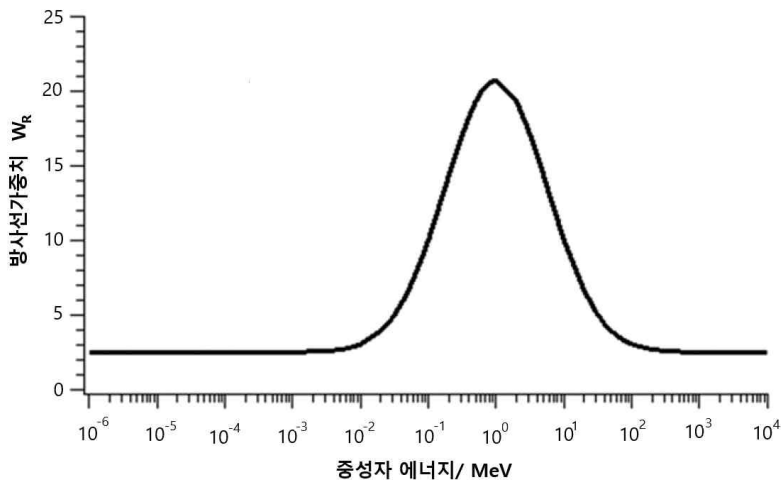


그림3.1. 에너지에 따른 중성자 방사선가중치, w_R .

이터에 근거한 단일 w_R 값을 채택하는 것이 적절하다고 본다. 파이온은 양전하나 음전하를 띠기도 하고 중성이기도 한 입자로서 대기 중 높은 고도에서 원자핵과 1차 우주선의 상호작용에서 형성되는 방사선장에서 접한다. 파이온 입자들은 항공기에서 피폭에 기여하며, 고에너지 입자가속기 차폐 뒤의 복잡한 방사선장의 일부로도 발견된다.

(40) 알파입자의 피폭은 알파 방출 방사성핵종의 흡입이나 취식 결과로 발생한다. 실험 및 역학연구로부터 도출한 정보는 RBE 값이 장기나 조직에 따라, 그리고 고려한 암 종류에 따라 달라짐을 보였다. 장기나 조직에서 방사성핵종의 분포와 선량의 평가는 복잡하며 큰 불확도도 수반되어, 광범한 RBE 값이 관찰된다(제2.7절 참조; ICRP 2003b, 2007a). 단일 w_R 값 20을 알파입자 피폭에 적용하며, 핵분열파편에도 이 값을 사용하고, 중이온에 대하여도 보수적으로 같은 값을 사용한다.

(41) 유효선량의 계산에 대하여 ICRP의 방사선 가중이 일관성이 없고 불필요하게 복잡하며 가용한 생물학적 데이터를 과대 해석한다는 논란이 있었다[예: Thomas와 Edwards 2003]. 방호목적으로 두 종류의 w_R 값 즉, 낮은 LET 방사선에 대하여는 1을, 높은 LET 방사선에 대하여는 중성자 선량의 높은 LET 성분을 포함하여 10을 사용하는 것으로 충분하다는 제안도 있었다. 그러나 이 단순화된 체계는 선량과 위험을 가능하면 정교하게 평가하기 위하여 최선의 가용 데이터를 사용해야 하는 상황, 예를 들어 피폭량이 많고 복잡한 방사선장인 우주비행사의 피폭선량 계산과 위험 평가처럼 복잡한 계산 수요를 해소할 수가 없다. ICRP는 현행 방법론에 대한 변경이 필요하지 않다고 보지만, 이러한 제안을 인식하여 차기 일반 권고의 검토 범위에 이 주제를 포함할 것이다.

(42) 등가선량은 유효선량 계산의 중간 단계이다. 확률론적 영향에 관계하는 선량제약치, 참조준위 및 한도는 유효선량 단위로 규정한다. 조직반응을 피하는 한도를 규정할 때 등가선량을 사용해 왔으나, 제2.2절에서 논의한 것처럼 흡수선량 단위로 규정하는 것이 더 적절하다. 같은 단위(Sv)로 표현되는 등가선량과 유효선량이 적절히 구분되지 않는 상황에서 소통에 어려움이 있다. 예로서 ^{131}I 섭취에 따른 선량을 표현할 때 갑상선 등가선량은 유효선량의 20배나 된다(Gonzalez 등 2013). 장기나 조직선량을 흡수선량 단위로 나타내면 이러한 어려움은 피할 수 있을 것이다. 예로서 ^{131}I 섭취로 갑상선 흡수선량이 240 mGy일 때 유효선량은 10 mSv가 된다. 그래서 이제 등가선량을 별도의 방호량으로 사용할 필요가 없다. ICRP는 등가선량을 조직이나 장기의 한도 설정에 더는 사용하지 않으려 하지만 유효선량을 계산하는 단계로는 계속 유지할 것이다.²⁴⁾

24) <역주> 그러나 이 판단은 실제 운용에서 애로를 초래할 수도 있다. 예를 들어 눈 수정체가 감마선과 중성자 혼합장에서 높은 선량을 받았을 때 백내장 문턱선량과 연계가 복잡해진다. 당연히 감마선 흡수선량 문턱과 중성자 흡수선량 문턱이 다르므로 흡수선량한도

3.4. 유효선량

(43) ICRP 60(1991a)에서 도입되고 ICRP 103(2007a)에서 유지하는 유효선량(E)는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} E &= \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \\ &= \sum_T w_T H_T \end{aligned}$$

여기서, w_R 는 조직 T 의 조직가중치이고 $\sum w_T = 1$, D 는 흡수선량, H 는 등가선량이다. 평균은 구체적인 방사선위해가 계산되고(표2.3) 조직가중치가 명시된(표2.3) 모든 인체 내 장기/조직에 대해 수행된다.²⁵⁾ 수학적으로 유효선량은 장기/조직에 대한 가중평균이다. 제2.5절에서 요약한 바와 같이 w_R 값은 확률론적 영향으로 인한 전체 위해에서 개별 장기 및 조직의 기여를 나타내도록 선정된다. 여기서 확률론적 영향은 모든 연령 및 남녀에 대해 평균한 값이다. w_R 값은 근사화하여 네 가지 값만 가진다. 이는 상대위해에서 가능한 상당한 차이에도 불구하고, 낮은 선량의 방사선 영향과 관련하여 부당하게 정밀한 인상을 피하기 위해서다.

(44) 유효선량의 SI 단위도 J/kg이며 그 특별명칭이 시버트(Sv)이다.²⁶⁾ 전적으로, 유효선량은 낮은 선량을 낮은 선량에서 확률론적 영향 유발에 대해 적용한다. 이에 따라 유효선량의 적용 상한에 관한 의문이 생긴다. ICRP 103(2007a)은 비상대응 계획과 관리에 관한 참조준위를 20-100 mSv 범위에 설정하는 것을 제안하고 있다. 100 mSv 이상에서 유효선량이 선량 양으로 사용되지 말아야 할 이유는 없다. 예를 들어 사고 시 관리 회복을 위해 단기간은 종사자 선량 제한을 완화할 필요도 있다. 원칙적으로 대략 1 Sv까지 사용될 수는 있을 것이나, 높은 선량에서 다음 두 가지 인자는 고려할 필요가 있다.

- 조직반응 발생 잠재성을 검토해야 한다. 유효선량이 수백 mSv에 이르더라도 피폭이 전신에 대체로 균일한 경우에는 심각한 조직반응이 발생할 것으로 기대되지는 않는다. 그러나 방사성핵종이 특정 장기/조직에 집중되거나 국부 외부피폭이 집중되어 그 정도의 유효선량에 기여한 경우에는 조직 손상이 발생할 수 있다.

를 광자와 중성자에 대해 따로 설정할 필요가 생긴다. 이전 권고에서 논의처럼 RBE 가중 흡수선량 개념이 필요할 수도 있다.

25) <역주> 조직가중치 가중평균이 수행되는 조직/장기는 표2.3에 열거된 27개(남녀 각각) 임은 분명하다. 그러나 이들 조직이 방사선을 피폭한 인체가 처하는 확률론적 영향 위험 거의 전부를 표현하는 셈이므로(만약 다른 장기가 상당하게 기여한다면 27개 조직 외에 추가해야 마땅) 유효선량 산출에서 평균은 사실상 인체 '전신'에 평균하는 것과 같은 개념이다. 개념상으로 '전신에 대한 평균'이어야 유효선량이 피폭자의 확률론적 영향 위험에 대한 '단일 지표'로서 개념적으로 일치한다.

26) <역주> 유효선량은 가중평균 등가선량이므로 단위는 당연히 등가선량과 같아야 한다.

- 둘째 고려사항은 > 100 mSv인 선량(또는 엄밀하게, 낮은 LET 방사선에 의한 조직/장기의 흡수선량이 > 100 mGy)이 고선량률(> 5 mGy h⁻¹)로 부여된 경우, 낮은 선량률 낮은 선량의 고형암 위험을 평가하는 데 적용하는 DDREF값 2를 적용하지 않을 것이고, 따라서 위험은 ICRP 103(2007a)의 명목위험계수가 암시하는 값보다 2배까지 높아질 수 있다.

3.5. 예탁선량

(45) 체내에 합체된 방사성핵종은 물리적 반감기와 체내 생물학적 잔류로 결정되는 시간 동안 장기와 조직에 피폭을 준다. 물리적 반감기가 길고 생물학적 반감기가 긴 방사성핵종은 섭취 후 수년 동안 오랜 시간 신체 조직에 선량을 계속해서 부여할 수 있다. 이러한 피폭을 관리할 필요 때문에 예탁선량이라는 양을 정의했다(ICRP 1991a,2007a). 체내 방사성핵종으로 인한 예탁선량은 일정 기간 발생할 것으로 예상되는 총 선량이다. 조직이나 장기 T 의 예탁등가선량 $H_T(\tau)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt$$

여기서 $\dot{H}_T(t)$ 는 시간의 함수로서 조직/장기의 등가선량률이며, τ 는 섭취시점 t_0 에서부터 적분시간이다. 예탁유효선량 $E(\tau)$ 는 다음처럼 주어진다.

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau)$$

(46) 예탁선량은 섭취가 발생한 연도에 배당한다. 종사자와 일반 성인에 대해서 예탁선량은 섭취 후 50년 기간 동안 평가한다. 유아와 아동의 예탁선량은 70세까지 기간에 대해 평가한다.

(47) 연간 섭취로부터 선량을 계산하는 데 선량예탁 사용은 보이지 않는 보수성을 도입한다는 주장이 있다(Gonzalez 등 2013). 반감기가 길고 생물학적 잔류시간이 긴 몇몇 핵종들은 예탁선량의 일부만 섭취 당해에 부여한다. ²³⁹Pu의 경우 섭취 후 첫해의 유효선량은 전체 예탁유효선량의 < 10% 정도 될 것이다. 그러나 대부분 방사성핵종에서는 이 현상이 크지 않을 것인데, ¹³¹I 및 ¹³⁷Cs을 포함한 대부분 방사성핵종에서는 선량의 전부 또는 매우 큰 부분이 섭취 당해 연도에 부여될 것이다. 현실적 목적에서 방사성핵종의 섭취에 의한 장기간 피폭을 고려하는 데 예탁선량을 사용한다.²⁷⁾

27) <역주> 물리적 반감기와 생물학적 반감기 모두 긴 핵종(예: Pu-239)을 다량 섭취한 사

3.6. 선량계수

(48) ICRP 기본권고의 개정은 등가선량 및 유효선량 계산에서 방사선가중치 및 조직가중치가 변경되므로 불가피하게 ICRP가 선량계수(단위 피폭/섭취 당 유효선량)를 재계산하여 제공하도록 요구한다. 또한 선량을 계산에 사용하는 모델의 개선도 계수를 개정하도록 한다. 생물역동학 모델과 선량평가 모델의 개정 및 개선을 포함하여 향상된 여러 방법론을 도입하여, 2007년 권고에 바탕을 둔 대체 선량계수를 제공하기 위한 작업을 진행하고 있다.

(49) ICRP119(2012b)는 ICRP 60(1991a)의 방법론에 따라 계산한 선량계수를 집대성하여 제공했는데, 3개월 된 신생아, 1세, 5세, 10세 및 15세 아동, 일반 성인 및 종사자의 예탁유효선량계수와 예탁등가선량계수를 제공한 이전 간행물(ICRP 1979,1980,1981, 1989,1993,1994a,b,1995a,b,1996a)을 참고했다. 여기에는 ICRP 74 자료를 참조한 외부 방사선 직무피폭에 대한 환산계수도 포함되는데, 이상적 표준 조사배열에서 단일 에너지 광자, 전자 및 중성자의 전신 피폭을 가정하여, 단위 공기커마 또는 플루언스 당 흡수선량 평가로부터 방호량을 계산한다. ICRP 128(2015a)은 이전 간행물(ICRP 1987,1998, 2008)을 참조하여, ICRP 60(1991a) 방법론으로 계산한 방사성의약품에 대한 선량계수를 집대성해 제공하였다. ICRP는 또한 ICRP 60 방법론에 기초하여 임신부의 방사성핵종 섭취에 따른 배태아 선량의 계산과 모유로 이전된 방사성핵종의 섭취로 인한 유아 선량 계산을 위한 선량계수도 제공하였다(ICRP 2001,2004).

(50) 전산용 인형모의체(또는 수학적 모델)는 내부 및 외부 방사선피폭으로부터 장기와 조직에 에너지 부여를 모델링하는 데 사용된다. 과거 모의체는 인체구조의 형태를 무난히 근사하게 기하학적으로 나타내는 수학적 표현에 기초했다. 이 모의체는 미국 핵의학 회 MIRD위원회(Medical Internal Radiation Dose Committee)를 위해 오크리지국립연구소(ORNL)에서 개발했다(Fisher와 Snyder 1967, Cristy 1980, Cristy와 Eckerman 1987). 최초의 성인 MIRD형 모의체 후속으로 여러 연령대 청소년을 모사한 다양한 소아 모의체도 개발되었다(Cristy 1980). Stabin 등(1995)은 임신부를 위해 세 임신단계에 대한 MIRD형 모의체를 개발하였다. 이러한 모델들을 사용하여 ICRP 선량계수를 계산해

건이 발생한 경우에는 내부피폭 선량을 연도별로 분할 산정하는 방안도 생각할 수 있다. 가령, Pu-239 섭취에 대해 평가한 예탁유효선량이 100 mSv로 나타난 경우 선량한도 위반 문제는 물론, 개념적으로는 화학적 개입을 고려해야 할 수도 있다. 그러나 실제 연간 선량은 수십 분의 1 수준일 것이므로 매년 수 mSv에 지나지 않으므로 화학적 개입은 부당하다. 이런 특별한 경우에는 규제기관과 합의를 거쳐 평가선량을 예탁유효선량 대신 매년 분할 선량으로 대신하는 것이 무방하다고 본다.

왔다.

(51) 근래에는 여러 그룹에서 실제 사람 해부를 더 잘 모사하는 의료영상 데이터에 기초한 소위 ‘단층’ 또는 ‘체적소형’ 모델을 개발하였다. ICRU와 공동보고서인 ICRP 110(2009a)은 개인 의료영상 데이터로부터 이 방식으로 얻은 성인 남성과 여성에 대한 기준모의체를 제공했다. 여기서 개인은 성인 기준남성과 기준여성의 외형 치수와 장기질량이 유사한 사람들로 선택하고, 기준인 값과 일치하도록 상당한 조정을 거쳐 모델을 만들었다. 양성^{兩性} 모의체가 아닌 남성 및 여성 모의체를 사용하게 되면, 유효선량 계산에 양성을 평균해야 마땅하다. 그래서 2007년 권고와 관련된 계산에서 등가선량은 남성과 여성을 따로 계산하고, 유효선량은 성 평균 기준인에 대해 계산하였다(그림3.2 참조). ICRP는 또한 여러 아동 연령군에 대한 기준 모의체 세트를 개발하였으며(ICRP 2020a), 임신부와 태아에 대한 기준 모의체도 제공할 것이다.

(52) ICRP 116(2010a)에서 ICRP 103 방법론과 ICRP 110(2009a) 모의체 모델을 사용하여 성인의 외부피폭²⁸⁾에 대해 계산한 첫 선량계수 세트를 제공했다. 여기서 고려한 방사선은 단일 에너지의 광자, 전자, 양전자, 중성자, 양성자, 음전/양전 파이온, 음전/양전 뮤온, 그리고 헬륨 이온(알파입자)이다. ICRP 116에 도표로 제시된 장기/조직선량

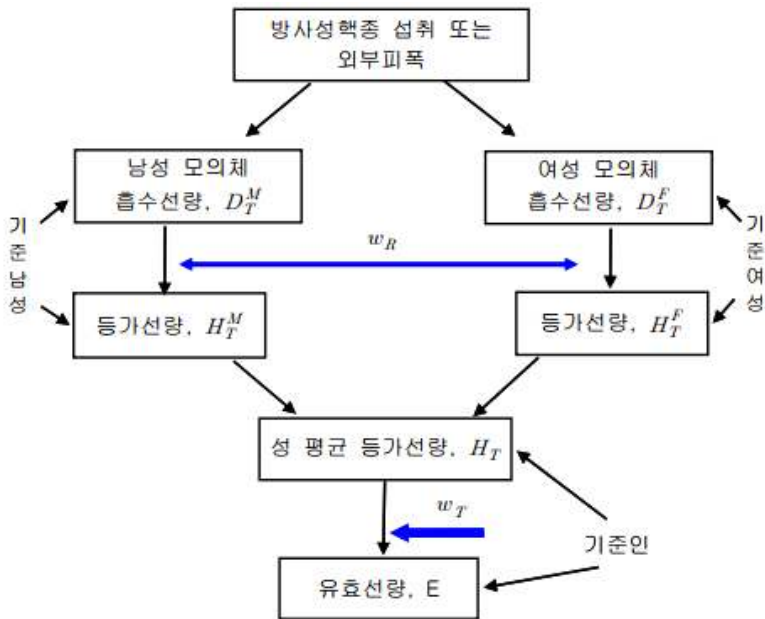


그림 3.2 ICRP 110(2020b) 기준 모의체를 사용하여 유효선량을 계산하는 성 평균.

환산계수는 ICRP/ICRU 기준값을 나타낸다. 등가선량과 유효선량을 상응하는 실용량과 비교하면 대부분 경우 실용량이 보수적²⁹⁾ 평가치를 보인다.

(53) 종사자 내부피폭에 대해서는 ICRP 130(2015b)에서 방법론을 제시하고 ICRP 134, 137 및 141(2016,2017,2019a)에 핵종들에 대해 선량계수와 생물분석bioassay 데이터를 갱신했다. 이 시리즈 보고서의 최종본³⁰⁾은 준비 중이다. 일반인의 외부피폭, 방사성핵종 섭취와 환자의 방사성의약품 투여에 대한 대체 선량계수는 작업 중이다. 그 첫 번째로 아동을 포함한 일반인의 외부피폭에 대한 선량계수를 제공했다(ICRP 2020b).

3.7. 집단선량

(54) ICRP는 방사선방호 최적화 목적을 위해 집단선량 양을 도입했다(ICRP 1977,1991a,2007a). 집단선량은 방사선을 피폭하는 사람그룹과 피폭 기간을 고려한다. 이는 한 선원으로부터 특정 기간에 모든 사람이 받는 선량의 합을 나타낸다. 이 양은 집단유효선량 S 로 정의된다(ICRP 1991a,2007a).³¹⁾ 집단선량 단위의 특별명칭으로 ‘인-시버트’man-sievert를 사용한다.³²⁾

(55) 매우 낮은 개인선량을 장기간에 걸쳐 매우 광범위한 지역에 합산하는 것을 피하도록 이상적으로는 제한 조건을 설정할 필요가 있다. 가능하면 선량과 시간 범위가 명시되어야 한다. 유효선량 E_1 과 E_2 사이의 집단 유효선량 S 는 다음처럼 정의된다.

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \frac{dN}{dE} dE$$

28) <역주> 원문은 외부 방사선 직무피폭으로 적고 있으나 외부피폭의 경우에는 직무피폭과 일반 성인의 피폭에 차이가 없다. 실제로 ICRP 116의 제목도 단순히 외부피폭 선량계수로 되어 있다. 내부피폭에서는 일반 성인과 직무피폭자 사이에는 섭취와 대사율 차이로 인해 선량계수가 차이난다.

29) <역주> ‘보수적’이란 측정하는 실용량이 평가할 유효선량이나 등가선량보다 높은 값을 지시한다는 의미이다.

30) <역주> 실제 내부피폭 기회가 흔하지 않은 핵종들에 대한 선량계수 제공이 남아있는데 이들에 대한 보고서가 마지막으로 발간되면 성인 직무내부피폭 계수가 완료된다.

31) <역주> 원문은 집단 등가선량 S_T 도 정의하는 것으로 적고 있으나, ICRP 103은 분명히 집단선량은 유효선량으로만 정의한다고 밝히고 있어 수정했다.

32) <역주> 집단선량은 개인선량의 합이므로 당연히 개인선량과 같은 단위(Sv)를 갖는다. 다만, 실제에서 집단선량임을 명백히 표현하기 위해 man-이나 person-을 붙여 사용하는 관행에 따른 것이다.

여기서 $\frac{dN}{dE}$ 는 E 와 $E+dE$ 사이 유효선량을 받은 사람 수를 의미하고, ΔT 는 유효선량이 발생한 기간이다. ICRP는 ICRP 101(2006)에서 시간과 공간의 선량분포가 균질한 부분을 분리할 수 있도록 필요할 때는 선량 분리 필요성을 고려하면서, 방호최적화 도구로 집단선량을 사용하도록 조언하였다.³³⁾

(56) 집단선량의 사용은 LNT 선량-반응 모델 적용의 유효성과 상이한 종류의 방사선에 의한 피폭의 선량 가산성에 의존한다. 예를 들면 UNSCEAR(2008,2012a)는 상이한 방사선원에서 받는 집단선량을 비교하였다. 집단선량은 역학적 위험평가 도구로서 사용하기 위한 것이 아니며, 위험 예측에 사용하는 것도 적합하지 않다. 특히 극히 낮은 피폭을 대규모 인구집단에 적용한 집단선량을 기초로 암 건수 계산은 피해야 한다. 평가와 관련된 많은 불확도 때문에 평가 결과는 정보를 제공하는 것이 아니라 오도할 것이다(ICRP 2007a).

(57) 적절히 신중하면 집단선량으로부터 평가한 보건영향이 방호조치를 계획하는 데는 유용한 상황도 있다. 예를 들어 심각한 원자력사고 후속 또는 그런 사건에 대비한 사전 계획에서 여러 방호방안을 계획하고 선택하는 데 도움이 되도록 집단선량 평가치가 보건영향의 척도로 사용될 수는 있을 것이다. 계획피폭 또는 기존피폭 상황의 소급적 평가에서는 의학적 평가나 역학 평가가 유익하도록 집단선량이 보건영향의 선별평가를 제공할 수 있다. 집단선량을 사용하는 이러한 분석에서는 인구집단의 이환율과 사망률을 포함하는 보건영향의 기저와 함께 불확실성을 고려하는 것이 중요하다. 질한 기저율과 비교는 피폭집단에 대한 역학적 분석이 통계적으로 의미 있는 결과를 제공할 것인지를 결정할 것이다.

3.8. 실용량

(58) 직업 환경에서 방사성핵종 섭취로 인한 선량평가는 직접 측정(예를 들면 전신 또는 특정 장기나 조직을 외부에서 감시) 또는 간접 측정(예를 들면 소변, 대변 또는 환경 시료 측정)으로 체내 방사능을 측정하고, 선량계수 계산에 사용하는 생물역동학 모

33) <역주> 표현이 어려운데 그 의미는 예를 들어 하나의 원전에서 피폭하는 두 직군 A, B의 선량분포가 현저히 다를 때(가령 직군 A 평균 선량은 6 mSv일 때 직군 B 평균 선량은 0.8 mSv) 전체 종사자의 집단선량을 전체 집단에 대한 방호 최적화에 고려하는 것보다는 직군 A의 집단선량을 직군 A에 대한 최적화 인자로 고려하는 것이 효과적이게 된다.

델을 사용하여 섭취량을 평가하여 수행할 수 있다(ICRP 2015b).³⁴⁾ 외부피폭 감시를 위해서는 지역감시 및 개인감시를 위한 실용량³⁵⁾이 ICRU에 의해 정의되었다(ICRP 1985,1988,1993,2020). 선량당량 양은 측정 가능한 양이며 방사선감시기는 이 양으로 교정되었다. 일상 감시의 경우 측정된 실용량 값은 해당 유효선량, 눈 수정체 선량 및 피부 등가선량의 합리적 추정치로 간주된다.³⁶⁾

(59) 개인감시를 위한 실용량은 몸체 특정 점 아래 ICRU 조직 적정 깊이 d 에서 선량당량인 개인선량당량 $H_p(d)$ 이다. 특정 점은 일반적으로 개인선량계를 패용한 부위이다. 개인선량당량 측정으로 유효선량 평가를 위해서는 깊이 $d=10$ mm인 $H_p(10)$ 을 선정하며, 선량계를 전신피폭을 대표하는 신체 부위에 패용했다면 $H_p(10)$ 값은 합리적인 유효선량 평가치를 제시한다고 가정한다. 피부와 손발의 선량평가를 위해서는 깊이 $d=0.07$ mm인 개인선량당량 $H_p(0.07)$ 을 실용량으로 사용하도록 권고한다. 눈 수정체 선량의 경우에는 깊이 $d=3$ mm를 제시했다. ICRP 103(2007a)은 $H_p(3)$ 의 측정은 불필요할 수도 있다고 간주하였으나, 수정체 선량한도의 감소로 눈 보호의 중요성이 증가하면서 그 적용을 재평가하게 되었다(ICRP 2010a, Bolch 등 2015). 개인 감시가 수행되지 않는 상황에서는 유효선량 평가가 주위선량당량 $H^*(10)$ 을 적용하는 지역감시에 의해 수행되기도 한다.

(60) 현재 사용 중인 ICRU 실용량 세트는 30여 년 전에 정의되었다. 새 성인 기준모의 체(제3.6절 참조)를 사용해 외부 선원에 대한 선량계수를 갱신한 ICRP 116(2010a)에서 지적한 문제에 따라, ICRU는 실용량 정의를 검토하였다(ICRU 2020). 검토 결과 기존 환산계수가 커마 근사(즉, 2차 하전입자의 에너지 수송 고려 없이)를 사용하여 계산한 점과, 실용량이 낮은 에너지와 높은 에너지에서 유효선량의 좋은 근사치가 되지 못하는 등 약점이 정의에서 확인되었다. 그 결과 개인감시와 지역감시에 대하여 새로운 실용량을 제안했다. 개인선량당량 $H_p(10)$ 및 주위선량당량 $H^*(10)$ 에 대한 제안은 플루엔스나 공기커마와 환산계수의 곱으로 다시 정의하고,³⁷⁾ 환산계수는 ICRP 116에서 고려한 모

34) <역주> 물론 실무 계산은 측정 방사능에 ICRP가 미리 계산해 제공하는(예: OIR 보고서) 잔류함수나 배설함수를 이용해 섭취량을 산출한다. 여기서 말하는 것은 내부피폭 코드를 이용해 선량계수를 산출하는 절차를 따라 직접 예탁선량을 산출할 수도 있다는 것이다.

35) <역주> 원문은 실용선량당량 양operational dose equivalent quantity으로 적고 있는데 바른 표현은 아니라고 본다. 인체 내부 조직/장기의 선량을 직접 측정할 수 없기 때문에(따라서 유효선량도 마찬가지로) 측정 가능하며 방호량에 대한 나쁘지 않은 근사적 척도로 선정된 대체량이 '실용량operational quantity'이다. 즉, '실용량'이라는 용어 자체가 그런 의미를 갖는 하나의 정체이다. 이것을 실용선량당량 양으로 부르면 선량당량에 실용량이 있고 비실용량이 있는 것으로 비치는데 그런 것은 아니다.

36) <역주> 원문 표현에 약간 문제가 있어 수정했다.

37) <역주> 새 실용량을 측정량인 플루엔스나 공기커와 "환산계수의 곱"으로 표현한다는 설

든 입자에 대하여 입자 에너지 함수로서 유효선량 환산계수 곡선의 최대치로부터 유도된다.³⁸⁾ 따라서 새로운 이름의 실용량인 인체선량(personal dose³⁹⁾ H_p 및 주위선량(ambient dose H^* 는 기준 인형모의체에서 암묵적으로 정의되고, 그 결과 체계의 일관성을 개선하고 단순화한다(ICRU 2020). 나아가 눈과 피부 선량의 측정을 위한 실용량은 흡수선량으로 하는데,⁴⁰⁾ 이는 이 간행물에서 조직반응 방지를 위한 한도 설정에 등가선량 대신 흡수선량을 사용하도록 제안한 변경과 일관된다. 인체선량 H_p 및 주위선량 H^* 은 직접 유효선량과 관련되고⁴¹⁾, 흡수선량이 눈과 피부 선량 측정에 사용되기 때문에, 선량당량 계산에 방사선질을 정의하는 $Q(L)$ 의 사용은 중단될 것이다.⁴²⁾

명은 어색하다. 새 실용량을 정의하는 접근은 측정량으로 실제 인체조직(또는 등가물질) 내에서 형성되는 물리량이 아니라 공간 중에서 정의되는 플루엔스나 공기커마로 단순화하고 직접 유효선량으로 연계를 도모하되 노출방향에 따라 달라지는 유효선량 속성을 고려하여 방향별로 산출된 유효선량의 최댓값을 겨눴다.

38) <역주> 새 실용량으로 정의한 주위선량 H^* 나 인체선량 H_p (‘당량’이 없어졌고 특정 점 깊이도 없어졌음에 주목)는 직접 노출 방향에 따른 보수적 유효선량으로 제시되기 때문에 이를 기존 개념의 ‘실용량’으로 부르는 것이 적합한지는 의문이다. 기존 실용량은 방호량인 유효선량 대신 다른 양(측정 가능한 선량당량 특정 값: 10 mm 깊이)을 사용하기 때문에 ‘실용량’은 ‘대체량’의 개념이었다. 그러나 새 실용량은 유효선량 평가에 보수적(방향 최대) 유효선량을 적용하는 것이니 같은 양이고 대체 개념이 아니다. 개념대로 말하면 ‘보수적 유효선량’에 해당한다.

39) <역주> 원문 용어는 personal dose이다. 기존 실용량인 개인선량당량(personal dose equivalent)의 전례를 따른다면 새 실용량의 우리말 용어를 ‘개인선량’으로 해야 하는데, 개인선량이란 용어는 특정 개인이 받은 선량이라는 의미로(또는 집단선량의 성분 개념으로) 널리 사용되고 있어서 혼동을 피해 ‘인체선량’을 선택했다. 개별 조직선량이 아니라 전신의 피폭 지표이므로 개념적으로는 ‘전신선량’이 적합할 수 있으나 이 용어 역시 전통적으로 whole body dose를 의미하도록 사용해 왔다. ‘인체’ 대신에 ‘신체’, ‘인신’, ‘인간’, ‘사람’도 고려했으나 ‘인체’가 그나마 어색하지 않다고 보아 이를 채택했다.

40) <역주> 수정체나 피부 흡수선량 측정에 사용하는 양인 방향성 흡수선량과 개인 조직흡수선량도 직접 흡수선량을 겨누므로 ‘실용량’으로 불러야할 이유가 없다.

41) <역주> 새 실용량은 더 이상 선량당량이 아니므로 기호로 H 를 사용하는 것도 의문이다.

42) <역주> 선량당량도 폐기된다.

제4장

직무피폭과 일반인피폭

(61) 직무피폭과 일반인피폭의 관리와 감시에 유효선량 사용은 정립되어 있다. 이는 다양한 선원과 방사선 종류에 의한 여러 장기와 조직의 외부 또는 내부피폭에 따른 유효선량⁴³⁾을 합치고 적절한 선량제약치, 참조준위 및 한도와 비교하는 견고한 접근법을 제공한다. 이러한 선량기준은 개인과 인구집단 사이 위험 차이를 인식하고, 또한 피폭이 전 고용 기간 또는 생애에 걸쳐 지속될 수도 있음을 인식하면서 모든 종사자와 일반인에 대하여 설정된다. 다음 절들은 계획피폭, 기존피폭 및 비상피폭 상황에서 직무피폭과 일반인피폭에 대한 유효선량의 적용을 개인선량과 집단선량에 대해 고려한다.

4.1. 직무피폭

(62) 유효선량은 모든 형태의 직무피폭을 관리하는 데 중요한 도구이다. 계획피폭상황에서 방호최적화를 위한 전망적 평가에 사용되고, 관련 선량한도와 선량제약치 이내에서 운영되는지 확인하는 데 사용된다. 그런 평가에서 개인피폭과 집단피폭을 고려하기 위해 예상 외부피폭 및 내부피폭의 합이 적용된다. 집단선량은 실무 방사선방호에서 개별 작업자의 개인선량과 함께 집단선량을 고려하는 것이 중요한, 다수 작업자가 참여하는 복잡한 작업을 계획할 때, 특히 방호방안 선택에서 유용한 도구다. 전망적 평가는 특정 유형의 작업에서 일어날 것으로 보이는 피폭을 유사한 상황에서 경험을 고려하여 평가한다. 몇몇 종사자의 피폭 감축이 낮은 선량을 받는 종사자 수의 잠재적 증가와 균형을 보장하는 방호최적화에 개인선량과 집단선량 평가치를 적용될 수 있는데, 여기에는 각 방안의 경제사회적 영향을 고려한다(ICRP 2007a).

(63) 계획피폭상황에서 직무피폭에 대한 유효선량의 소급 평가는 규제 요건 준수를 증명하고, 규제목적으로 피폭을 문서화하며(예: 종사자 선량기록), 방호체계의 효과적 이행을 입증하는 데 사용된다. 유효선량은 외부 및 내부피폭에 대하여 계산되고 종종 특정 측정

43) <역주> 원문은 흡수선량으로 잘못 적었다. 흡수선량은 다른 종류 방사선에 가산성이 없다.

(예: 개인선량계 또는 소변 방사능)에 기초한다. 비록 유효선량이 특정 개인에 대해서 평가되지만, 유효선량 자체는 일정한 인체 해부 및 생물역동학 변수를 갖는 기준인에 대해 정의된다(ICRP 2007a). 유효선량의 정의는 개인 고유 변수(예: 신체 크기 또는 성별)의 사용을 배제하고, 앞에서 설명한 것처럼 선량제약치, 참조준위 및 선량한도는 모든 종사자에게 적용되도록 정해진다. 방호에 이러한 실용적 접근은 공평하고 작동가능하다(제80항 참조). 임신 종사자가 임신을 선언하면 특별하게 대우하여, 일반인에게 제공되는 방호수준과 대체로 유사하게 배태아의 방호수준을 제공하도록 유효선량을 제한한다.

(64) 외부피폭의 경우, 유효선량이 평가해야 할 주요 양이지만, 눈 수정체, 피부 및 손발의 선량도 분명히 평가할 필요가 있다. 이들 장기/조직에 대한 구체적 직무피폭 선량한도는 특별한 상황에서는 지배적일 수 있는데, 특히 비균질 피폭이나 베타 선량 성분이 피부나 눈 수정체에 조사되는 경우에 그러하다. 외부피폭에 의한 직무피폭은 일반적으로 신체에 패용하는 개인선량계에 의한 개인감시로 결정한다. 개인감시의 주요 실용량은 제 3.8절에서 설명한 것처럼 $H_p(10)$, $H_p(3)$ 및 $H_p(0.07)$ 이고, 이 모든 양을 측정할 수 있도록 개인선량계가 만들어진다.⁴⁴⁾ 개인선량계가 전신에 균일한 피폭을 대표하는 인체 위치에 패용되면, $H_p(10)$ 은 대부분 피폭상황에서 유효선량의 합리적 평가치가 된다. 마찬가지로 $H_p(0.07)$ 은 대부분 상황에서 피부 등가선량의 합리적 평가치로 이용되고, 광자의 경우 $H_p(0.07)$ 이 수정체 등가선량으로 적절하지만, 낮은 에너지 전자의 경우 $H_p(3)$ 이 더 좋은 측정이 된다(ICRP 2010a, Bolch 등 2015).

(65) 신체 선량이 비균질인 경우, 눈의 수정체와 같이 최대 피폭 장기의 선량을 결정하기 위한 위치에도 선량계가 사용된다. 필요하다면 그럴듯한 유효선량 준위의 근사적 평가를 위하여 적절한 조정인자를 적용할 수도 있다. 예를 들어 영상의학과에서 몸통 안의 민감 장기를 보호하기 위하여 두르는 방호용 납/고무 앞치마는 머리와 목 부분이 노출된다. 선량계 하나를 앞치마의 목깃 노출 부위에 패용하면 눈과 몸통의 선량준위를 함께 지시하여, 추가 감시 필요성 평가에 적용할 수 있다(Martin과 Magee 2013).⁴⁵⁾ 중재절

44) <역주> 현재까지 개인선량계는 피부선량을 수정체 선량으로 갈음할 수 있다는 판단에 따라 $H_p(10)$ 과 $H_p(0.07)$ 둘만 측정하도록 설계되었다. 수정체 선량한도가 대폭 감소함에 따라 수정체 선량 과대평가로 자칫 잘못된 등가선량 한도 초과가 발생할 수 있게 되어 이를 예방하기 위해 이제 베타와 같은 약투과성 방사선에 눈이 유의하게 피폭할 때는 따로 눈 주위에 $H_p(3)$ 을 측정하는 수정체 선량계를 별도로 패용하도록 권고한다.

45) <역주> X선 작업자용 개인선량계를 $H_p(10)$ 과 $H_p(3)$ 을 측정하도록 설계해 납치마 위 목깃에 패용하고 판독 결과 $H_p(3)$ 이 1 mSv를 초과하면 따로 수정체 선량계를 패용하고(아니면 그 값을 수정체 선량으로 갈음), $H_p(10)$ 이 2 mSv를 초과하면 따로 납치마 아래에 몸통 선량계를 패용하여 피폭을 관리할 수 있다고 보고한다(아니면 목깃 선량계 $H_p(10)$ 값의 1/10을 유효선량으로 갈음). 그러나 이는 논문 수준이고 국제표준이나 규제

차를 수행하는 임상 의사는 두 개의 선량계를 패용하는데, 한 개는 앞치마 안쪽에 다른 하나는 앞치마 밖에 패용한다. 이로부터 유효선량 평가에는 여러 종류 식이 적용되고 있다(ICRP 2018). 보다 실질적인 유효선량을 얻기 위하여 눈의 수정체 선량 또는 방호된 조직의 선량에 대한 구체적 정보가 필요할 수도 있다. 드문 경우이나, 외부피폭에 약투과성 방사선에 의한 기여가 클 때는 피부선량의 유효선량 기여를 고려할 필요도 있을 수 있다.

(66) 내부피폭의 경우 개인감시 또는, 특별한 상황에서는 공기나 표면 오염 등의 방사성 핵종 농도 감시 결과를 근거로 예탁유효선량을 소급해 구한다. 개인감시 정보는 전신계수기를 이용해 전신에서 방출되는 방사선을 측정하든지, 다른 외부계수기(예: 갑상선 계수기)로 특정 장기/조직이 내는 방사선을 측정하여, 또는 소변이나 대변 배설물 측정으로 얻는다. 선량계수를 산출할 때 사용하는 생물역동학 모델로 측정치를 해석하여 흡입 또는 취식(또는 둘 다)에 의한 섭취량을 평가한다. 예탁유효선량 계산은 ICRP가 제공하는 기준 선량계수를 적용해 수행된다(제3.6절 참고).⁴⁶⁾ 충분한 정보가 가용하고 평가 선량이 상세평가를 정당화하면, 흡입물질의 입자크기 분포, 용해도 및 호흡기와 소화관의 흡수 특성 등에 가정한 값을 조정할 수 있다.⁴⁷⁾ 이와 같은 조정은 작업장의 피폭조건과 관련되므로 섭취량 평가와 유효선량 산정에 그러한 조건들을 적용하는 것이 적절하다. 흡입 방사성핵종에 의한 선량 계산에서 물질별 용해도 데이터의 사용 예를 ICRP가 제시한 바 있다(ICRP 2002b, 2016, 2017).

(67) ICRP는 유효선량 계산에서 개인에 관련된 생물역동학 가정을 변경하지 말도록 말했다(ICRP 2007a). 그러나 내부 방사선량은 특정 개인 소변에 대한 일련의 방사성핵종 측정에 근거하게 된다. 유효선량을 평가하는 표준모델이 관찰된 배설물 데이터와 잘 일치하지 않을 수 있는데, 기준 모델변수를 변경함으로써 더 잘 일치하게 될 수도 있다. 그러한 변경이 합리적인 것으로 생각될 수는 있으나, 그 선량평가 결과는 유효선량의 표준 계산과 분명하게 구별해야 한다. 그러한 선량정보를 개인 선량기록에 추가하도록 인정한다면 그 차이를 명기하여야 한다.⁴⁸⁾

실제에 채택된 것은 아니다.

46) <역주> 이 부분 설명이 중복되어 수정했다.

47) <역주> IDEAS 절차는 1차 평가 결과가 예탁유효선량이 6 mSv를 초과하면 가용한 최신 정보를 이용해 선량평가를 보완하도록 권고한다.

48) <역주> IDEAS 지침에 따라 예탁유효선량이 6 mSv를 초과해 상세평가를 수행해야 한다면 그러한 내부피폭은 그 사람 선량기록에 단순히 예탁선량 결과 뿐만 아니라 측정된 방사성핵종, 방사능, 측정방법, 추정 섭취 과정, 선량평가 절차 등에 대한 세부 기록을 첨부해 후일 필요하면 재구성 평가가 가능하게 하는 것이 바람직하다. 현행 국내 법규의 기록 요건은 이를 간과하고 있어 보완이 필요하다. 이는 사고나 긴급작업으로 단기간에 많은 외부피폭 선량을 받은 경우에도 해당된다.

(68) 특별한 여건의 직무피폭에서는 피부나 상처를 통한 방사성핵종의 침투를 고려할 필요가 있다. 그러나 이는 상황이 관리되는, 예를 들어 방호복을 착용하고 상처나 찰과상을 덮는 계획피폭상황에서 정상적으로 고려할 일은 아니다. 상처를 통한 핵종의 침투는 계획되지 않은 사건으로 그러한 섭취가 일어날 수 있는 잠재피폭⁴⁹⁾ 평가의 일부로 고려할 수는 있다(제72항 참조).⁵⁰⁾

(69) 기존피폭상황은 관리의 결정이 이루어지는 시점에서 선원이⁵¹⁾ 이미 존재하는 경우이다. 작업장에서 천연 방사성핵종에 의한 피폭이나 이전의 원자력시설 운영에 의한 토양 오염과 같은 인공 방사성핵종에 의한 피폭과 같은 상황을 포함한다. 나아가 비상상황의 결과로 장기적 오염의 관리 또한 기존피폭상황으로 고려되어야 한다.⁵²⁾ 라돈 동위원소, 주로 ²²²Rn과 자손에 기인하는 직무피폭의 관리는 ICRP 126에서 설명하고 있다(ICRP 2014). 다양한 산업체에서 천연 방사성물질의 사용은 ICRP 142의 주제이다(ICRP 2019b). 기존피폭상황에서 관리조치가 요구되는지 결정하는 근거로 유효선량을 적절히 사용한다. 위에서 계획피폭상황에 대하여 설명한 것과 유사한 고려사항들이 적용된다.

(70) 계획피폭상황 운영 중⁵³⁾ 또는 계획하지 않은 상황으로 작업장에서 비상피폭상황이 발생하여 종사자의 비상피폭이 초래될 수 있다. 비상피폭상황과 관련하여 두 가지 상황이 있다. 첫째, 작업장에서 사고⁵⁴⁾ 또는 관리의 실패로 종사자들이 정상 피폭보다 높게 피폭할 수 있다. 이때 의료 개입이 요구되는지 판단하기 위하여 피폭을 재빨리 평가하는

49) <역주> 역자의 이해로는 잠재피폭이 이런 사건을 고려하기 위한 것이 아니다. 잠재피폭은 원전 중대사고처럼 매우 확률이 낮지만 일단 발생하면 피해가 심대한 사건의 위험을 관리하기 위한 개념이다. 개인 종사자가 우발적 사건으로 상처를 입고 그 상처에 방사성 물질이 오염되어 경피섭취가 일어나는 사건은 예상할 수 있는 단순한 사고피폭으로 보는 것이 합당하다. 결국 상처를 통한 경피섭취 평가는 사고가 발생한 때 동일할 수 있는 선량계측 방법론을 준비하는 정도의 의미를 갖는다고 볼 수 있다.

50) <역주> 일상 방호에서 경피 섭취를 고려하는 경우가 있는데 삼중수소로 오염된 공기에 노출될 때 흡입으로 인한 섭취의 절반 정도는 피부(건전한)로 직접 침투할 수 있는 것으로 본다. 그러나 삼중수소 흡입 선량계수는 이 기여를 포함하고 있으므로 실제 선량평가에서는 따로 경피섭취를 고려할 필요는 없다.

51) <역주> ICRP 103의 정의는 관리를 결정할 때 선원이 아니라 '피폭상황'이 이미 존재하는 경우라 설명하는데, 이것이 옳다. 선원의 기존 여부가 문제라면 원전에 새로운 종사자가 취업하면 그 사람 피폭은 기존피폭이 되어야 할 것이다.

52) <역주> ICRP 103, ICRP 126, ICRP 132, ICRP 146 등 번역본에서 역자가 반복해 설명했듯이 이부분 ICRP 주장은 마땅하지 않다. 보편적 백그라운드를 넘는 직장의 라돈피폭이나 항공승무원의 우주방사선 피폭, 사고 후 후쿠시마에서 오염 제거작업에 일하는 종사자의 피폭은 모두 선량한도를 적용해 마땅한 계획피폭상황의 직무피폭으로 보는 것이 옳다.

53) <역주> 계획한 선원을 운영하는 것이지 계획피폭상황은 운영하는 것이 아니다.

54) <역주> 사고로 이미 과피폭을 받은 경우는 피폭상황이 아니고 비상피폭상황도 아니다. 단순히 옆질러진 물일 뿐이다.

것이 중요하다. 조직반응이 관찰될 수 있을지, 그리고 개별 장기선량이 추가 피폭을 관리할 때 고려될 필요가 있는지에 대해 유효선량은 초기 척도를 제공할 수 있다.⁵⁵⁾ 나중 단계에 과피폭에 따른 완전한 소급적 위험평가가 요구될 수도 있지만, 이 경우 유효선량은 최초 역할만 할 것이다. 이러한 상황에서는 개인 위험은 최선의 장기/조직 선량 평가, 적절한 RBE 데이터, 연령, 성별 및 인구집단의 구체적 위험인자를 사용하여 평가해야 한다(제2.6절 참조).

(71) 둘째 상황은 방출사고에 바로 이은 여파 또는 비상상황이 진행 중인 가운데 상황을 제어하기 위하여 또는 타인을 보호하기 위한 방호조치를 도입하기 위하여 종사자의 개입이 요구되는 경우이다. 이러한 상황에서는 피폭을 어느 정도 계획하는데, 이 과정의 일부로 유효선량을 적절히 사용할 수 있다. 그러나 피부의 높은 선량 또는 흡입에 의한 상당한 섭취가 있는 경우에는 장기선량을 고려하는 것이 중요하다(이 경우 개인 보호장구를 사용하여 내부피폭을 관리하여야 한다). 제3.4절에서 논의한 바와 같이, 선량이 100 mSv 이상인 사고 상황에서도 유효선량을 방호량으로 사용되지 말아야 할 이유는 없다. 그러나 조직반응을 피하기 위한 주의가 필요하다. 특히, 피부와 눈 수정체의 외부 피폭이 고려되는 때, 그리고 특정 장기에 방사성핵종이 집중되는 내부피폭의 경우에 그러하다.

(72) 상처, 찰과상, 화상, 또는 피부의 병리학적 손상은 방사성물질이 피부 피하조직과 혈액 및 전신순환 계통에 도달할 가능성을 높인다. 상처 부위에 침적된 방사성물질 중 많은 부분은 상처에 머물고 의료처치로 제거되지만, 수용성(운송 가능한) 물질은 혈액으로 전달되어 신체의 다른 조직으로 전이된다. 이러한 사건은 사고의 결과로만 나타나고, 매 사건이 독특해서 전문 보건물리학자와 의료전문가가 평가할 필요가 있다. ICRP는 상처 감시 데이터의 해석에 조언을 제시하지 아니한다. 그러나 여러 방사성핵종에 대하여 개발된 생체역동학 모델은 상처 침적물 중 혈액 순환계로 침투하는 수용성 성분에 적용할 수 있다. 상처에 오염된 방사성핵종으로부터 선량을 계산하는 방법을 제공하기 위하여 NCRP는 ICRP와 협력하여 생체역동학 및 선량평가 모델을 개발하였다(NCRP 2007). ICRP가 제시한 선량계수와 데이터는 NCRP 상처 모델 변수와 연계하여 상처 부위로부터 혈액으로 흡취되는 방사성핵종에 대한 장기/조직 선량 평가와 유효선량을 구하는 데 사용될 수 있다.

55) <역주> 유효선량과 개별 조직 흡수선량 사이 관계는 균질피폭이 아니라면 피폭 특성에 크게 달라지므로 이러한 고선량에서 유효선량은 위험 조직 흡수선량을 평가를 개시할 방식 역할 정도로 보아야 한다.

4.2. 일반인피폭

(73) 일반인이 외부 또는 내부 선원에 피폭할 수 있는 계획피폭상황은 다음을 포함한다.

- 관리구역 또는 감시구역 방문
- 관리구역에 인접한 출입 가능 구역에 일반인의 접근
- 방사성물질⁵⁶⁾을 환경으로 관리배출
- 고체 방사성폐기물 처분에 따른 환경 유출
- 방사성상품 사용.

(74) 계획피폭상황에 대하여 전망적 및 소급적 평가가 수행된다. 전망적 평가는 대표인(제79항 참조)의 유효선량이 관련 일반인 선량제약치 미만하도록 보장하는 최적화 목적으로 수행되는데, 이러한 평가는 모델링을 통한다. 소급적 평가는 선량한도 준수를 확인하고 선량제약치와 비교하기 위하여 수행된다.⁵⁷⁾ 이상적으로 이러한 평가는 환경감시에 근거한다.⁵⁸⁾ 이러한 평가와 관련한 불확도에 유념해야 한다. 집단선량 또한 최적화 과정의 입력으로 또는 아래에 논의하는 것처럼 비교 목적으로 평가된다.

(75) 기존피폭상황은 다음과 같이 발생한다.

- 과거 원자력시설 운영, 원자력 또는 방사선 비상에서 기원한 잔류 방사성물질에 의한 지역 오염
- 현행 요건이 아닌 과거에 규제관리 대상이었던 활동에서 잔류 오염
- 천연 또는 잔류 인공 방사성핵종을 함유한 음식물, 음용수, 건축자재 등 소비재의 사용
- 라돈을 포함한 실내 천연 선원에 의한 피폭.

56) <역주> 통념상 ‘방사성물질’은 규제대상이 될 정도의 방사능 농도와 총 방사능을 갖는 물질이다. 배출하는 유출물은 이 정도 수준이 아니므로 방사성물질 배출로 표현하는 것은 적절하지 않다. ‘방사성핵종 배출’ 또는 ‘방사능 배출’이 무방하다.

57) <역주> 일반인 선량제약치는 선량한도의 작은 분율 수준이므로 선량제약치를 겨누면 선량한도는 자연히 충족된다. 그래서 일반인피폭에서는 선량한도보다 선량제약치가 실질적인 제한 수단이 된다.

58) <역주> 보통 ‘환경감시’는 환경 중 방사능을 감시하는 활동인데 실제에서 거의 유의한 증가를 검출할 수준이 아니다. 따라서 일반인 선량평가는 ‘배출’을 감시하고 모델을 통해 평가한다. 이런 맥락에서 여기서 말하는 ‘환경감시’는 배출감시로 이해하는 것이 적절하다. 외부피폭에 대해서는 설계에서 시나리오와 모델로 계산하여 선량제약치(또는 규제기관이 선량제약치를 근거로 보수적으로 계산하여 구체적으로 제시하는 선량률) 이내로 맞추고 운영 중에는 선량률을 실측해 설계 값 이내에 있음을 확인하여 규제 준수를 보장한다.

(76) 관심 대상 상황에 대한 참조준위를 사용하는 최적화의 입력으로서, 기존피폭상황에서 대표인(제79항 참조)에 대한 연간유효선량을 결정하기 위하여 전망적 평가가 수행된다. 기존피폭상황은 수년간 지속될 수 있고, 방사선 조건은 느리게 변할 수 있기에, 과거의 감시 결과를 미래의 유효선량 평가에 적용할 수 있다. 환경 중 방사성핵종 농도의 측정과 일반인의 선량평가는, 가용하다면, 해당 유효선량 참조준위와 비교하기 위한 유효선량의 소급적 평가에 사용될 수 있다.

(77) 계획한 선원의 운영 중, 악의적 행위, 또는 기타 예상하지 못한 상황에서 비상피폭 상황이 발생할 수 있고, 방사선피폭을 피하거나 축소하기 위하여 예방적 또는 긴급 방호 조치가 요구될 수 있다. 일반인은 자연환경 또는 거주환경으로 확산된 방사성핵종으로부터 여러 경로를 통해서 외부 또는 내부 피폭을 받을 수 있다. 전망적 평가는 미래에 가능한 사고 시나리오에 대한 비상계획의 일부로, 또는 발생한 사고에서 어떤 조치가 요구되는지 결정하기 위하여 수행될 수 있다. 유효선량은 최적화 과정의 입력으로 또한 참조준위와 비교하기 위하여 평가된다. 방출 특성에 따라서 특정 장치나 조직의 선량평가를 고려하는 것이 중요할 수 있다. 예를 들어, ^{131}I 방출이 있는 사고에 대하여 갑상선선량을 특별히 고려하는 것이 중요하다. 비상피폭은 보통 짧은 기간에 발생하기 때문에 연령에 따른 선량 차이를 고려하는 것도 중요하다. 임신 또는 모유수유 여성의 피폭과 아동의 피폭은 피폭자 선별이나 소통과 관련하여 특히 중요하다.

(78) 의료 추적 필요성을 평가하기 위하여, 비상피폭에 의한 유효선량의 소급적 평가가 요구될 수 있다. 이 경우 여러 환경 매체의 방사성핵종 농도 측정과 함께 개인감시 데이터(외부피폭 및 내부피폭)나 생물학적 선량평가가 요구될 수 있다. 비상피폭상황에 대하여, 인구집단 및 환경 측정뿐만 아니라 모델링 결과를 포함하여 선량평가와 관련한 불확도를 인지하는 것이 중요하다. 그런 상황에서는 대중의 안심 목적으로 측정이 수행될 수 있고, 상대적으로 높은 검출한계를 가지며 선량 환산에도 큰 불확도가 있어, 유효선량 평가치의 신중한 해석의 중요성을 강조한다. 또한 전망적 평가에 있는 불확실성을 줄이고 최적화 과정을 개선하기 위하여 소급 평가가 사용될 수 있다.

(79) 유효선량은 보통 인구집단 중에서 가장 많이 피폭하는 사람들을 대표하는 개인 또는 그룹 즉 '대표인'에 대하여 평가한다. 이 개념은 정량성이 미진하게 정의된 '결정집단' 개념을 대체하기 위하여 ICRP 101(2006)에서 도입되었다. 상이한 직업, 습관, 식품 소비율과 함께 상이한 연령대의 여러 인구집단이 대표인의 정의에 검토될 수 있다.

(80) 선량평가 과정에서 상이한 연령군의 여러 대표인이 고려될 수 있다. ICRP는 3개월 된 신생아, 1세, 5세, 10세 및 15세의 아동, 그리고 일반 성인(제3.6절 참조)에 대한 선

량계수를 제공한다. 나아가 ICRP는 어머니의 방사성핵종 섭취에 따른 배태아와 모유수유 유아의 선량도 고려한다. ICRP 103(2007a)에서 대부분 경우 배태아와 모유수유 유아의 선량은 성인이 받는 선량에 비해 적다고 적시하였다. 그러나 항상 그렇지는 않고, 어떤 피폭상황에서 ^{32}P , ^{33}P , ^{45}Ca , 및 ^{89}Sr 의 네 핵종에서는 배태아/유아가 다른 연령군보다 훨씬 높은 선량을 받을 수 있으므로 대표인으로 지정할 수 있다. 선량기준과 비교하기 위해 1년 선량이 요구되지만, 어머니의 연간 섭취량을 적용하고 임신기간 중 배태아의 만성피폭 선량계수를 적용하여 단순하게 선량평가를 수행하는 것이 적절할 수 있다 (HPA 2008). 더 상세한 평가가 요구되면, 어머니의 연간 섭취량을 9개월 임신기간과 3개월 수유기간으로 가정할 수 있다. 배태아의 외부피폭 선량은 어머니 자궁의 선량과 같은 것으로 한다. 현재 아동의 외부피폭 선량계수 또한 이용 가능하다(ICRP 2020b의 제 3.6절). ICRP 101(2006)은 3개 연령군(1세, 10세 아동 및 성인)이 대부분의 선량평가, 특히 코호트 개인이 자연적으로 연령대를 거치는 장기피폭에서는 충분하다고 결론을 내렸다. 일반적으로 선량평가에서 불확도는 상이한 연령그룹의 선량계수 차이에 비해 더 크다. 이해당사자가 추가 연령군의 선량평가를 요구할 수 있고, 그러한 계산이 대화를 편하게 하는 데 적합하다고 알려져 있다.⁵⁹⁾

(81) 유효선량 계산에 있어서 배태아⁶⁰⁾ 및 유아를 포함하여 전 연령군에 단 하나의 조직가중치 세트를 사용하는 것에 관해 우려도 있었다(Streffer 2004). 조직가중치는 낮은 방사선피폭의 위험에 대하여 과대 해석하지 않으면서 총 확률론적 위험에 개별 장기나 조직의 기여를 반영하기 위하여 사용된다. 조직가중치가 어떤 특정 연령군에 대하여 과학적으로 최선의 판단을 보여주는 것은 아니다. 위에서 논의한 것처럼 배태아에 적용은 유아 적용의 연장선상으로, 태내피폭에 따른 전체 암 위험이 유아기 초기에 피폭하여 나타나는 위험보다 크지 않을 것으로 판단한다(ICRP 2003a). 선량관리 기준(선량제약치 및 참조준위)은 Sv 당 위험에서 연령군 사이 잠재적 차이의 관한 지식 위에서 수립된다. 개인을 구분하지 않고 모든 일반인(또는 모든 종사자)에게 적용하는 선량제약치와 참조준위는, 최적화와 함께, 실용적이고 공평하고 작동 가능한 방호체계를 제공한다. 딸림정리로 실제적인 방사선방호 목적에서 단 하나의 조직가중치 세트를 사용하는 것이 적절하다고 판단해 왔다.

(82) 환경에서 방사성핵종의 전이와 일반인이 받는 내부 선량을 모델링하는 데 있어서

59) <역주> 사람들은 특히 자녀의 방사선 영향에 민감하기 때문에 5세 아동에게 1세나 10세 선량계수를 적용하다면 이의를 제기할 소지가 있다. 이런 맥락에서 비록 일반적 목적에서는 3개 연령군 대표인 평가로 충분하지만 6개군 선량계수를 계속 제공하고 있다.

60) <역주> 배태아는 조직/장기 구분이 애매할 수 있고 크기가 작아 거의 균질피폭을 받는다고 보면 조직가중치가 의미가 없다. 실제로 배태아 선량은 등가선량이나 흡수선량으로 표현한다.

방사성핵종에 대해 가장 적절한 물리화학적 특성을 찾는 것이 중요하다. 이는 운영 전 단계에서 또한 비상에서 관련 시설의 전망적 평가에 특히 중요하다. 유사한 상황의 이전 경험은 감시 결과와 방사성핵종 특성에 대한 정보가 가용할 때 유용할 것이다. ICRP는 방사성핵종의 특정 화학적 형태에 관한 정보가 가용하고 평가가 이를 정당화한다면 이와 관련된 선량계수를 사용할 것을 조언한다. 감시데이터를 이용할 수 없을 때는 선량평가에 신중한 접근은 방사성핵종의 특성이나 선량계수 선택을 높은 평가 결과를 내는 쪽을 선택하는 것이다. 이에 대한 약간의 지침은 ICRP 72에 있다(ICRP 1996a).

(83) 대부분 상황에서 일반인의 외부피폭과 내부피폭의 직접 측정은 이용할 수 없고, 유효선량 평가는 주위선량률과 환경의 방사성핵종 농도의 측정을 활용한 모델링 기법으로 수행된다.⁶¹⁾ 드물게는 개인선량계 측정 정보와 전신계수 같은 기법을 통한 개인의 체내 방사성핵종 측정 정보도 이용할 수 있다. 일반인 선량 평가 방법은 종종 신중하게 변수를 채택하여 선량이 과소평가되지 않도록 하고, 관련 선량한도 준수와 선량제약치나 참조준위와 비교를 보장한다. 신중의 정도를 인식하는 것이 중요한데, 그러한 방법론은 평가가 편중될 수 있으므로 최적화 목적으로 적용하는 데는 주의가 필요하다. 이는 비상 피폭상황에서 소개와 같은 조치가 요구되는지 결정할 때 특히 중요하다. 선량 감측과 그러한 조치의 해로운 영향 사이 균형을 유지하는 것이 중요한데, 선량의 신중한 평가가 피해 집단에게 부정적 결과를 주는 불필요한 조치를 이끌 수도 있기 때문이다.

4.3. 잠재피폭

(84) 계획피폭상황은 종사자와 일반인에게 일정 수준 피폭의 감수 및 그 관리와 관련된 다. 나아가 계획운영 절차로부터 예상치 못한 이탈, 방사선원의 관리 이탈을 포함하는 사고, 및 악의적 사건으로 높은 준위의 선량이 발생할 수 있다. 이를 ‘잠재피폭’이라 부른다(ICRP 2007a).⁶²⁾ 계획운영 절차의 이탈과 사고는 드물지만, 예견할 수 있고 발생확률이 평가된다. 방사선원의 관리 이탈과 악의적 사건은 예상하기 더 어려워 사안별 접근이 요구된다.

61) <역주> 측정할 수 있는 수준이 아니므로 결국 감시결과는 영향이 드러날 수준이 아님을 입증하는 정도이다.

62) <역주> ICRP 103은 ‘계획선원’ 운영 중에 심각한 사고(잠재피폭)가 발생할 수 있어 잠재피폭을 계획피폭의 일부라고 설명하지만 적절하지 않다. 잠재피폭은 확률은 매우 낮지만 발생하면 그 조건부 피해는 막대한 ‘희귀사건’의 위험관리 목적으로 정의한다. 즉, 잠재피폭은 ‘일어나지 않은’ 심각한 사건이며, 일단 그러한 사건이 일어나면 그때는 비상피폭도 기존피폭도 계획피폭도 수반될 수 있다.

(85) 잠재피폭의 평가는 일반적으로 (i) 피폭을 발생시키는 사고 시나리오의 구축, (ii) 사고의 발생확률 평가, (iii) 선량 및 관련 위해의 평가, (iv) 소정 용인기준과의 비교를 포함한다. 잠재피폭의 용인 결정은 발생확률과 이로 인한 선량과 위해의 크기에 좌우된다. 이 두 요소(확률과 영향)를 따로 고려할 수도 있지만, 사건의 결과로 나타나는 방사선피폭의 보건영향 확률을 고려하기 위하여 이 둘을 합칠 수도 있다. 이러한 관점에서 ICRP는 치명암 위험으로 Sv 당 5×10^{-2} 을 사용하도록 하였다(ICRP 2007a). 사망확률⁶³⁾은 사건 발생 확률과 사건 발생으로 받게 되는 유효선량에 기인하는 치명암 위험으로 주어진다. 사망확률 계산 결과는 용인성을 판단하는 위험제약치와 비교된다.

(86) 위험제약치는 선량제약치와 마찬가지로 선원 중심이며, 원론적으로는 같은 선원의 선량제약치가 시사하는 보건위험과 같아야 한다. 그러나, ICRP 103에서 논의한 바와 같이(ICRP 2007a), 그러한 사건의 발생확률 추정에 관련된 불확실성이 크기 때문에 위험제약치의 보편값을 사용하는 것이 적절할 것 같다. 종사자의 잠재피폭에 대해 ICRP는 평균 연간 직무피폭 5 mSv의 치명암 위험(즉, 유효선량 1 Sv 당 치명암 위험 5×10^{-4} 을 가정)을 근거로 하여 위험제약치의 보편값으로 연간 2×10^{-4} 사용을 권고한다(ICRP 2007a). 방호 최적화 후 통상적 운영에서 받는 유효선량의 높은 값은 5 mSv 정도이다. ICRP는 일반인의 잠재피폭에 대한 위험제약치로는 연간 1×10^{-5} 을 권고한다(ICRP 2007a).

(87) 치명암 위험에 근거한 보편위험 제약치를 선정하는 기본접근에 더하여, 낮은 확률의 높은 선량 사건은 조직반응의 문턱선량을 초과하는 결과로 나타날 수 있고, 이 인자도 고려할 필요가 있다.

63) <역주> 여기서 말하는 사망확률은 확률론적 사망확률 또는 장기적 암 사망확률을 의미한다. 고선량 피폭으로 인한 사망확률은 치사선량을 초과할 확률로 대신할 수 있다(제87항 참조).

제5장

의료피폭

(88) 방사선이 의료 진단 및 치료에 광범하게 적용되고 있다. 진단 및 중재절차에서 환자가 받는 방사선량은 각 요법에서 측정할 수 있는 양으로 기록된다.⁶⁴⁾ 측정량은 선량 순위 평가에 쉽게 적용될 수 있고, 전 세계 여러 병원의 특정 검사의 비교에 사용될 수 있다. 이들 측정 가능한 양으로 진단참조준위를 설정하기 위한 연구도 있었다(Martin 2008,2011, ICRP 2017a).⁶⁵⁾

(89) 확률론적 위험은 여러 의료절차에서 피폭하는 장기와 조직에 따라 달라지기 때문에, 측정가능 선량 양은 체내 흡수선량 분포를 달리하는 대안 기법의 상대적 보건 위해의 의미 있는 지표가 되지 못한다. 다른 신체 부위가 피폭하는 의료절차의 선량을 비교하는 데 유효선량이 이용될 수 있다. 유효선량은 진단절차에서 선량 순위에 관심을 높이고 피폭에 따른 방사선위험에 대한 폭넓은 이해를 도모하는 주된 역할을 한다. 유효선량은 의료전문인의 방사선방호 교육에도 이용된다. 또한 의료절차의 정당화와 환자 간병인과 의생명연구 자원자의 선량제약치 수립에서 유익한 판단에 이용된다. 유효선량은 의료행위에서 방사선방호 개선에 유용한 참조가 되고, 임상 의사나 방사선방호 비전문가도 이해할 수 있는 가능한 건강 위험과 관련된 방사선량의 지시를 수반하는 수단을 제공한다.

(90) 이 장은 건강 위험의 지표가 필요한 경우 유효선량을 사용할 수 있는 적용과, 측정 가능한 다른 선량 양이 필요한 정보를 제공하는 데 충분해 유효선량이 권고되지 않는 적용을 정연하게 제시한다. 다양한 진단X선 절차에 대해 위험과 유효선량의 관계를 남성과 여성의 검사 연령에 따른 위험의 변화를 예시하여, 위험의 근사적 지표로서 유효선량의 사용을 지지하는 증거를 제시한다.

64) <역주> 국내 법규가 요구하는 것은 아니지만, 방사선 의료기기 국제표준이 입사면 공기 커마나 커마면적곱과 같은 측정량을 환자 영상정보에 표기하도록 기기를 제작하게 요구하고 있어 신형 촬영기기는 모두 이런 정보가 가용하다.

65) <역주> 진단참조준위는 환자 개인의 피폭을 평가하기 위한 것이 아니라 동일 목적 방사선 의료절차가 의료기관이나 부서에 따라 차이가 있는 환자선량에 대해 불합리하게 높은 (또는 낮은) 관행을 식별하여 개선하는 것이 목적이므로 굳이 환자의 유효선량으로 변환해 비교할 필요가 없다. 따라서 실측이 용이한 양이나 기기가 기본으로 제시하는 노출 지표(예: 선량면적곱, 선량길이곱)를 참조지표(즉, 진단참조준위)로 해도 충분하다.

5.1. 의료절차에서 유효선량

(91) 의료절차에서 유효선량은 측정 가능한 양을 방호량에 연계하는 선량계수를 사용하여 계산한다. ICRP는 핵의학 진단절차에 대한 선량계수를 발행했으나(제3.6절 참조), 아직 X선 영상절차에 연계된 선량계수를 제공하지는 않았다. 그러나 진단방사선학 절차에 대해 장기/조직 선량과 유효선량 계산에 사용할 수 있는 계수를 여러 기관이 발표해 왔다. 이런 계수는 방사선투과검사 및 형광투시검사에서 입사면 공기커마 또는 커마면적곱(Jones와 Wall 1985, Hart 등 1994, Rannikko 등 1997, Kramer 등 2004), 또는 CT에서 선량길이곱(ImpACT 2011, Wall 등 2011, Lee 등 2011,2012, Ding 등 2015, Shrimpton 등 2016)에 적용할 수 있다. 개별 환자의 촬영피폭 정당화나, 최적 기술을 선택하는 방호최적화에 대한 일상적 판단은 추정 건강 위험을 연계하는 선량의 개략적인 평가를 요구한다. 유효선량의 보편 값은 위해에 연계된 일반적 방사선평폭 준위에 대한 충분한 정보와 함께 이러한 일상적 판단 목적에 직접 이용되는 간단한 수단을 제공하는 것이다. 이상적으로는 보편 유효선량은 고려대상 국가와 시설의 데이터에 기초하여야 한다. 표5.1에 보인 선정된 검사에 대한 몇몇 국가의 조사에서 얻은 값에 차이가 나는 예에서 보듯이, 장비, 기술 및 환자선정(체중, 촬영부위)의 차이로 인해 편차가 나타난다. 표에서 드러난 차이 중 일부는 검사 정의가 다양하기 때문이고, 조사가 수행된 시점의 기술과 장비에 따른 선량을 반영하는데 이는 시간에 따라 변한다. 그러나 상이한 모의체와 선량환산계수의 사용으로도 25% 정도의 차이가 있다. 선량계산의 표준화 필요성을 인지하여 ICRP는 장치 특정 방사선투과검사 및 CT 절차에 대한 기준 선량계수를 제시하려고 한다. 표5.1의 수치나 다음 절의 사용에 대한 수치는 개별 환자 노출에 대해 계산했지만, 선량은 기준인에 대한 것일 뿐 특정 개인에 대한 양은 아니다.

5.2. 유효선량을 사용한 응용

5.2.1. 처방 지침과 절차의 정당화

(92) ICRP는 의료피폭의 정당화를 세 단계로 권고하였다(ICRP 1996b,2007b,2008). (i) 의료에 방사선 사용은 해로움보다 이로우미 커야 한다. (ii) 주어진 유형의 절차가 환자의 진단이나 치료를 증진시켜 특정 임상지시에 대해 정당화된다. (iii) 개인 환자의 의료 검사는 그 환자의 의학적 조건의 관리에 기여하여 해로움보다 이로우미 커야 한다.

(93) 첫 단계의 정당화는 병원이나 의료시설에서 방사선 기기와 기술의 구매 및 사용이

승인될 때 국가 수준에서 일어난다. 두 번째 단계는 전문학회와 보건당국에 의해 수립되는 진단절차에 대한 처방지침에 반영되는데,⁶⁶⁾ 여기서 여러 검사에서 오는 선량의 상대

표5.1. 몇몇 통상적 검사에서 3개국 성인의 유효선량(mSv) 예시

절차	영국*	미국†	러시아 연방‡
방사선투과검사			
흉부 PA	0.01	0.03	0.1
흉부 Lat	0.04	0.07	0.18
요추 AP	0.39	2.0	0.6
요추 Lat	0.21	-	0.6
복부 AP	0.4	0.6	1.0
골반 AP	0.28	0.4	0.7
중재방사선			
관상동맥 촬영	3.9	15	15
대퇴부 혈관촬영	2.3	7	3-10
전산화단층촬영			
CT 두부	1.8	1.6	1.8
CT 흉부	14	6.1	6.3
CT 복부	16	-	9
CT 복부 + 골반	13	7.7	-
CT 흉부+복부+골반	19	12	25
핵의학			
뼈 단층촬영: ^{99m} Tc	3	4	3
PET 전신 종양 검사(¹⁸ F FDG) [§]	7.6	13	5

PA: 뒤-앞, AP: 앞-뒤, Lat: 측방, CT: 전산화단층촬영, PET: 양전자방출 단층촬영, FDG: 플루오로데옥시글루코오스(포도당 운반체).

* Wall 등(2011), Shrimpton 등(2016) 및 ARSAC(2020).

† Mettler 등(2008).

Alessio 등(2015), Smith-Bindman 등(2015), Becker 등(2016), Kanal 등(2017) 및 NCRP (2019).

‡ Zvonova 등(2015), Chipiga와 Bernhardsson(2016), Vodovatov 등(2016) 및 Balanov 등(2018).

§ 선량은 CT를 포함하지 않고 ¹⁸F PET으로 종양 촬영에서만 받는 양임.

66) <역주> 처방지침(우리 질병관리처는 ‘정당성 지침’으로 부른다)은 정당화된 절차에 대해 셋째 단계(개별 환자에 적용 정당화)에 참조할 수 있게 집대성한 것이다. 즉, 처방지침이 둘째 단계 정당화는 아니다. 둘째 단계 정당화는 새로운 방사선 의료절차에 대한 아이디어가 있으면 의료법에 따른 임상시험 등을 거쳐 학술지에 발표하면 의료 전문분야의 동료 평가(집단지성)가 그 절차의 효용을 인정하면 의료기관에 수용되는 과정이다.

적 크기에 관한 정보를 제공하는데 유효선량이 사용된다(EU 2000, ACR 2020, EANM 2020).

(94) 셋째 단계의 정당화는 임상 의사(예, 주치의 및 방사선의학 전문의)가 개별 환자에 대하여 이행 책임을 진다. 이 과정은 진단 정보의 필요성으로 판단되나, 환자의 이익에 더하여, 방사선피폭에서 오는 잠재위험이 검토되어야 한다. 유효선량은 이 평가에 충분한 정보를 제공할 수 있지만, 환자의 성별, 연령별(제5.4절 참조), 확인되었거나 의심되는 질병의 위험, 그리고 환자의 기대수명도 고려할 수 있다(Loose 등 2010).

5.2.2. 촬영기술의 선택

(95) 환자 촬영절차는 주로 방사선기인 암위험의 감수성이 상이한 신체 일부 및 조직의 피폭과 연관된다(제2.6절 및 제5.4절 참조). 유효선량은 발생장치 X선과 핵의학절차에서 선량분포가 크게 차이가 있는 여러 절차에서 오는 선량을 직접 비교할 수 있게 한다.

(96) 상이한 X선 촬영법 둘을 검토할 때, 선택의 주 인자는 환자에게 주는 잠재적 이득일 것이나, 유효선량의 비교가 처방 검사의 선택에서 두 번째 고려가 될 것이다. 예를 들어, 흉부CT 검사와 전통적인 흉부X선 검사 모두 폐에 방사선을 조사하나, 체내 방사선의 공간적 분포는 다르고 CT의 유효선량은 흉부X선 촬영의 수백 배에 이를 것이다. 만약에 특정 임상 질문에 대하여 필요한 정보를 흉부CT와 흉부X선 검사 모두 제공될 수 있다면, 유효선량의 차이가(비록 조악하게 평가되었을지라도) 흉부X선 투과검사를 지지할 것이다. 그러나 어느 방법이 환자에게 더 큰 이익을 제공하는 것인가가 주 고려사항이 되어야 한다.

5.2.3. 기술 최적화

(97) 영상절차가 결정되면, 다음 단계는 그 절차의 최적화 보장이다. 유효선량은 여러 병원이나 여러 전문과에서 적용하는 동일 또는 유사한 기술에 대해 선량 비교에 최선의 양은 아니다. 이 목적에는 기법고유 선량 양(예: 커마면적곱, 체적평균 CT선량지수)을 사용하는 것이 좋다(제5.3절 참조). 그러나 체내 선량분포가 상당히 다른 상황과 몸통 안에 있는 여러 장기/조직의 선량을 고려해야 하는 상황에서는 유효선량 사용이 적합하다. 한 예로 상이한 방사선투과촬영[(예: 앞에서 뒤로(AP)와 뒤에서 앞으로(PA)]을 흉부 방사선투과검사에 사용한 경우, 유방, 폐 및 식도 등이 AP에서 PA보다 더 높은 선량을 받고 유효선량에 더 많이 기여한다(Martin 등 1999, Martin과 Sutton 2014). 또 다른 예는 상이한 관전압(kV)(Martin 등 1993) 또는 아주 다른 X관 필터(예: 소아과 방사선 투시 또는 중재절차)의 사용이다. 여기서 kV가 증가할수록 방사선 투과가 많아지므로

피폭 수준을 줄일 수 있고, 조직 표면의 선량을 낮출 수 있다(Martin 등 1993, Martin 2007b, 2008, Martin과 Sutton 2014).

5.2.4. 연구대상 자원자의 선량

(98) 의생명연구 프로그램의 자원자 피폭은 의료피폭으로 본다(ICRP 1991b, 2007b, IAEA 1995, 2011). 연구 제안이 승인되기 전에 관련 개인에 대하여 가능한 위해를 평가하고 기록해야 한다. 연구대상자 체내에서 상이한 선량분포를 보일 수 있는, 연구 목적을 지원하는 여러 절차에서, 발생 가능한 방사선 보건위해를 종합하는 데 유효선량이 적합한 양이다(IAEA 2011). 그러나, 유효선량은 기준인에 대해 평가됨에 유의하여야 한다. 연구대상자에게 잠재적인 방사선 관련 위험을 검토할 때는 연령, 성별 및 건강상태에 대해 유의해야 한다(제5.4절 참조).

5.2.5 의도하지 않은 피폭의 보고

(99) 진단 절차에서 환자에게 의도하지 않았던 피폭이나⁶⁷⁾ 과피폭에 대해 처음에는 유효선량으로 평가로 시작할 수 있다. 유효선량은 사건의 조사와 보고를 위하여 충분한 정보를 제공하고, 상세한 평가를 위한 요건의 판단에 정보를 제공한다. 의도하지 않은 피폭은 처방 과정에 실수가 있거나, 환자 신체의 잘못된 부위를 노출시킨 경우와 같이 여러 상황에서 발생할 수 있다. 과피폭은 절차에 실수가 있거나, 장비의 고장으로 발생할 수 있다(Martin 2005, Martin 등 2017). 선량 준위가 낮은 의도하지 않은 피폭 상황에서는 유효선량 단위의 포괄적 평가로 대개 충분할 것이다. 의도하지 않은 피폭이 해당 표준검사에 대한 선량과 유사한 것으로 나타나면, 해당 절차의 유효선량 보편 값이 수 mSv 이하인 범위에서 이 값을 사용할 수 있다. 유효선량이 크거나 피폭조건이 표준검사와 같지 않으면, 가용한 피폭 데이터로 유효선량을 계산하는 것이 더 적절하다. 유효선량이 수십 mSv를 넘으면, 그 사람의 위험과 관련한 심층평가 필요성을 이해해야 할 것이다. 이러한 상황에서는 방사선에 민감한 모든 장기와 조직의 선량과, 나이, 성별 및 장기별 위험계수를 적용하여 평가하는 것이 적절할 것이다(제2.6절 및 제5.4절 참조).

5.2.6. 건강검진이나 비의료 적용에 대한 촬영 효용 평가

(100) 유효선량은 몸통 내 많은 장기/조직의 피폭(유방이 선량의 대부분을 받는 유방촬영은 제외)과 관련되는 건강검진 절차의 평가에 이용될 수 있다. 신체 전체 또는 일부에 조사하는 이중X선흡수와 같은 기술에서 건강 위해에 연계된 양이 요구되는 선량의 평가

67) <역주> 발생한 사건에 대한 자위 심리로 인해 의료계에서는 ‘의도하지 않은 피폭’으로 에둘러 표현하는 경향이지만 유의할 정도로 의도하지 않은 피폭이라면 사실은 ‘사고피폭’에 가깝다.

에는, 선량이 극히 낮더라도 받은 선량을 맥락에 놓기 위해서는, 기준인의 유효선량이 유용하다. 이는 선량 준위가 확률론적 영향이 입증되는 수준보다 매우 낮더라도 유효선량이 방사선에 민감한 장기/조직 선량의 정량화에 가능한 척도이기 때문에 적절한 것으로 본다(제5.4절 참조).

5.2.7. 간병인의 선량

(101) 진료 중인 환자를 보조하고 간병하는 사람(직업 간병인이 아닌)이 알면서 자발적으로 받는 피폭은 의료피폭으로 간주한다. 전형적 예는 비밀봉 ¹³¹I 처치 후 퇴원한 환자, 또는 밀봉선원을 체내 삽입한 환자의 가족 일원이 받는 피폭이다. 피폭 잠재성⁶⁸과 실제 받는 선량을 때때로 평가할 필요가 있는데, 직무피폭이나 일반인피폭에서와 같이 유효선량이 적절하다. 선량의 용인성은 개별 상황에 따라 것이다(ICRP 2007a).

5.2.8. 임상 의사와 보건전문인의 교육 훈련

(102) 방사선 의료절차를 수행하는 처방의사와 기타 의료전문인은 잠재적인 방사선피폭의 보건 위해가 의료절차에서 오는 이익과 비교할 때 매우 작다는 인식 때문에 그 위해에 대해 이해가 낮을 수 있다(ICRP 2009b, Loose 등 2010, Zanzonica와 Stabin 2014). 그래서 이들이 환자의 진단이나 중재절차를 의뢰하고 정당화할 때, 또는 환자에게 가능한 위험을 설명할 때, 그 잠재적 위험을 고려하는 것이 어려울 수 있다. 유효선량은 여러 피폭 시나리오를 비교할 수 있는 단일 값이다. 따라서, 통상 절차에서 오는 전형적인 유효선량에 대한 지식이 의사의 교육훈련에 포함되어야 한다. 여러 나라에서 의료절차로 받는 집단유효선량과 이로부터 유도한 1인 당 평균선량은 시간이 지나면서 피폭에 대한 인식을 증진하고 변화시키는 데 사용되었다(UNSCEAR 2008, NCRP 2009,2019. Wall 등 2011).

(103) 또한 의사는 방사선피폭 사건이나 대중의 잠재적인 방사선피폭과 관련되는 사고가 있는 때 일반인이 자문하고 재확인을 위해 접근하는 첫째 그룹에 속한다. 단지 확률론적 영향 가능성만 관련된다면(대부분 경우), 직선적 소통이나 피폭에 따른 가능한 보건위험과 다른 피폭 시나리오에 따른 위험과 비교를 수월하게 하는 양으로 유효선량이 적절하다.⁶⁹)

68) <역주> 원문은 잠재피폭potential exposure으로 적고 있지만, 현행 방호체계에서 ‘잠재피폭’은 확률은 극히 낮지만 조건부 피폭은 매우 큰 사상을 의미한다. 간병인은 이러한 사건과 거리가 멀기에 여기서 의도는 potential exposure가 아니라 exposure potential일 것으로 보아 수정했다.

69) <역주> CT촬영으로 인한 피폭을 두려워하는 환자가 증가하고 있다. 머리 CT 1회 촬영은 보통 가정에서 개약치 않고 받아온 라돈 피폭 선량 1년 치에 미치지 못하는 유효선량

5.3. 유효선량이 권고되지 않는 적용

(104) 유효선량은 보건 위해와 관련하여 비교가 필요할 때 유용한 도구다. 그러나 실제 측정에 사용되는 선량 양이 충분한 정보를 제공하는 상황이 많이 있다. 이때는 기록 절차를 단순화하고 불필요한 근사나 조정인자의 사용을 피하기 위해 기기에 기록되고 표시되는 측정 가능한 양이 사용되어야 한다. 시간이 지나면 조직가중치가 달라질 수가 있고 장기/조직 선량 계산방법도 향상될 수 있으므로, 향후 필요할 때 미가공 데이터가 더욱 정밀한 계산을 가능하게 할 수 있다. 이러한 양과 다른 양이 더 나은 선택을 제공하거나 유효선량이 권고되지 않는 적용을 아래 소절들에 열거한다.

5.3.1. 유사한 기술에 대한 선량의 비교 및 진단참조준위 설정

(105) 방사선투과촬영 및 형광투시에서 입사면공기커마나 커마면적곱, CT에서 체적평균 CT선량지수나 선량길이곱과 같은 측정 가능한 선량 양이 체내 흡수선량의 상대분포와 비슷한 피폭을 주는 시설, 기기, 기술 사이 비교에 적합하다. 이런 값들이 환자선량 조사나 진단참조준위 설정에 사용되어야 한다.

5.3.2. 의료절차 보고서에 환자선량 정보의 기록

(106) 유럽연합 회원국을 위한 EURATOM 59/2013⁷⁰⁾에 따라, 또한 미국의 의료기관 인증 공동위원회(JCAHO/USA, Joint Commission on Accreditation for Healthcare Organization in the USA)의 인증을 위하여, 방사선 의료절차에 대한 보고서의 일부를 구성하는 데는 환자 피폭과 관련된 선량 정보에 측정 가능한 양을 사용해야 한다.

5.3.3. 환자선량 추적

(107) 의료영상에 방사선 사용이 증가함에 따라, 촬영절차를 반복하여 받는 환자 수가 증가하고 있다(Sodickson 등 2009). 이러한 선량을 정량화하는 정식 방법을 제공하기 위해 시간에 따라 누적되는 촬영 환자의 방사선피폭 기록을 위해 선량 추적 방법이 개발되어왔다(Rehani 등 2014, Rehani 2015). 이런 데이터는 측정한 선량 양을 기록하는 것이 가장 좋지만, 더 많은 정보가 요구될 때는, 장기/조직 선량이나 유효선량, 그리고 누적선량으로서 그들의 합을 계산하는 것이 개별 환자의 잠재적 위험을 이해하는 데 도움이 된다(Brambilla 등 2020, Rehani 등 2020).

1.8 mSv 수준이라 설명할 수 있다.

70) <역주> 유럽연합 기본안전표준(EU BSS)을 말한다. 그 번역본이 학회 홈페이지 자료실에 'EU 방사선방호령'으로 게시되어 있다.

5.3.4. 단일 장기만 피폭한 선량의 평가

(108) 가슴의 유방촬영이나 머리의 뇌 CT와 같이, 방사선촬영이 주로 하나의 해부학적 조직에 제한되는 경우, 조직/장기별 위험의 평가와 함께 유효선량 대신 장기 또는 조직 선량을 사용해야 한다. 마찬가지로, 갑상선의 옥소 흡취와 관련된 촬영절차의 선량평가는 지배적 피폭 장기/조직인 갑상선의 흡수선량으로 표현해야 한다. 유효선량 계산은 남성과 여성에 대해 평균함을 주목할 때, 생식기 선량이 대부분 선량을 차지하는 검사에서는 생식선 선량⁷¹⁾을 사용해야 한다(제2.4절 및 제2.5절 참조).

5.4. 유효선량과 위험의 소통

5.4.1. 선량과 관련 보건위험의 소통

(109) 검사의 정당화 및 최적화와 관련한 토론과 환자와 소통을 위해, 임상 의사에게는 위험을 넓게 조망하는 방사선량을 설명하도록 특별한 훈련과 여회가 필요하다. 위험 소통의 복잡성은 이 출판물의 범주를 넘지만, 표5.2는 의료촬영에서 오는 위험과 이득의 맥락에서 유효선량과 연계된 척도를 제시하는데, 암위험 가능 준위와 연계된 선량을 설명하기 위한 일반 용어와 선량 범위별 절차 예도 함께 보인다. 유효선량 1 mSv 이상에서 사용되는 용어는 UNSCEAR(2012a)가 동일 범위의 전신 흡수선량(mGy)에 적용하는 것과 같다. 따라서 이 특별한 맥락에서는, 10-100 mSv 유효선량을 주는 피폭에 의한 추론 위험은 '낮은' 것으로 고려되고, 1-10 mSv 범위의 유효선량은 사람이 단순히 지구에 살면서 자연방사선에 의해서 매년 받는 피폭과 동등하게 '매우 낮은' 것으로 본다. 흉부X선 촬영과 같은 검사를 포함하는, <0.1 mSv의 유효선량에 의한 초과위험은 이 요강에서 '무시할 수준'으로 구분하며 대체 용어는 '극히 낮은'이다. 이들 용어는 의료 연구에 대한 간행물 ICRP 62(1991b)에서 사용된 것과 약간 차이가 있으나, 인구집단과 피폭의 목적이 다른 차이가 있다.

(110) 임상 의사와 환자는 방사선피폭과 가능한 위험에 의미를 부여하기 위해 종종 더 많은 정보를 요구한다. 이런 목적에서, 익숙한 상황에서 오는 방사선 선량으로 비교하면 도움이 되고, 또한 위험을 수용하는 데도 도움이 된다. 자연 백그라운드 방사선으로 매일 피폭하는 선량과 비행기 여행 중에 받는 우주방사선 선량의 예가 그러하다. 특히 방사선에 대한 지식이 거의 없으면서 방사선피폭에서 오는 잠재적 위해에 대하여 비현실적으로 두려워하는 환자가 촬영절차를 거치는 상황에서 이를 우려할 때 이런 비교가 도

71) <역주> 남녀를 구분한 생식선 선량을 의미한다.

표5.2. 영국 데이터*에 기초한 평균연령 30-39 세 성인 환자가 여러 의료 진단절차에서 받는 유효선량 범위와 그 위험을 설명하는 용어

유효선량 (mSv)	암 위험	선량준위에 대한 제안 용어	선량 범주에 있는 방사선 의료절차의 예 [‡]
<0.1	LNT 모델에서 추론 < 10 ⁻⁵	무시할 negligible	흉부, 대퇴부, 어깨, 팔다리, 목, 치아의 방사선촬영; ^{99m} Tc 전초림프절 촬영; ¹⁴ C 및 ⁵⁷ Co 체외 계측을 위한 표지
0.1 - 1	LNT 모델에서 추론 10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴	최소의 minimal	척추, 복부, 골반, 두부, 경추 방사선촬영, ⁵¹ Cr 체외 계측을 위한 방사성핵종 표지; 폐 환기 및 신장 촬영을 위한 ^{99m} Tc
1 - 10	LNT 모델에서 추론 10 ⁻⁴ - 10 ⁻³	매우 낮은	바륨 취식: 두부 및 흉부 복합, 복부, 골반의 CT 스캔; 바륨 관장; 심장혈관 촬영; 중재방사선 촬영; ^{99m} Tc 심근 촬영; ^{99m} Tc 폐관류 촬영; ^{99m} Tc 뼈 병변 촬영; 심장 스트레스 검사; ^{99m} Tc SPECT 촬영; ¹⁸ F, ¹²³ I, ¹¹¹ In 촬영
10- 100	LNT 모델 및 역학* 10 ⁻³ - 10 ⁻²	낮은	흉부, 복부 및 골반 CT 스캔; 조영증강을 위한 이중 CT 스캔; 중재 방사선 촬영; ⁶⁷ Ga 종양 및 ²⁰¹ Tl 심근 영상; 수십 mSv 선량의 다중절차; 혈관 동맥류 수선(10-35 mSv). 신장/내장 혈관 형성; 장골 혈관 형성; 혈관 동맥류 수선 추적(35-100 mSv).
100s	역학에 근거* > 10 ⁻²	보통의	다중절차 및 추적 연구

LNT, 문턱없는 선형; CT, 전산화단층촬영; SPECT, 단일광자방출단층촬영

* Martin(2007a), Wall 등(2011), Martin과 Sutton(2014).

* 위험범위는 생애 위해조정 암 발생

[‡] 유효선량의 근거는 진단절차는 영국 데이터, 중재방사선촬영은 ICRP(2010b)에 근거

움이 된다. 유효선량으로 하는 비교는, 방사선피폭의 가능한 위험에 넓은 시각을 제공함으로써, 의사, 환자 및 일반인의 교육에 도구가 된다. 소아 집단은 예외로 하지만, 참조 집단에 비해 환자가 평균 나이가 많고⁷²⁾ 경쟁하는 질병 관련 위험에서 오는 기대수명 손실 때문에 의료피폭에서 오는 잠재적 위험은 일반적으로 더 낮다. 나아가 중재방사선에서 방사선피폭 위험은 대안적 수술요법의 더 높은 위험을 많은 경우에서 대체한다.

72) <역주> 노년에 질환이 증가하므로 가령 환자로 내원하는 집단의 평균연령은 그 사회 인구집단의 평균연령보다 높다.

5.4.2 연령별, 성별 암 위험과 유효선량

(111) 제2.6절에서 본 바와 같이, 방사선 유발암에 대한 위험평가에 사용된 역학데이터는 남성과 여성 사이 차이를 보이고, 또한 피폭연령의 함수로서 차이를 보인다. 사용한 위험투사모델에 따라 인구집단별로 차이도 있다. 생애 암발생 평가치는 위암, 방광암, 간암, 및 백혈병을 포함해 일부 암은 남녀 간에 비슷하지만, 여성의 위험이 남성보다 큰 경우가 특히 유방암은 물론 폐암 및 갑상선암이다(제2.6절 참조). 모든 암 사이트를 종합하여 고려할 때, 생애 초과암 발생 위험이 피폭연령 30-39세 그룹에서 0-9세 아동 피폭보다 대략 2-3 배 높고, 60-69세 연령군에서는 2-3배 낮다. 특히 갑상선암처럼 어떤 암은 피폭연령에 따라 크게 차이를 보이는 반면, 폐암을 포함한 다른 암들은 연령 의존성이 크지 않다[UNSCEAR(2013) 참조].

(112) 제2.6절에서 설명한 장기/조직의 단위 흡수선량 당 생애 암위험 발생을 계산하는 방법론에 근거하고, 영국의 의료절차에서 장기/조직 선량 평가치를 사용하여, Wall 등(2011)은 ICRP 구미 조합인구에 대하여 유효선량 당 연령별 및 성별 위험을 도출했다. 이 비교는 장기/조직 흡수선량과 성별 피폭연령의 함수로서 장기/조직 고유위험에 관한 정보를 이용하여 명시된 의료절차에 대해 계산하고, 그 절차로부터 단위 유효선량 당 평가된 위험을 나타낸다. 실례로 ICRP 구미 조합인구에 대하여 그들 결과를 발췌해 보면 이 권고 표2.4의 위험 데이터를 사용하여 재계산하였고 그 결과가 표5.3에 제시되어 있다. 마찬가지로 표2.5의 아시아 조합인구 위험 데이터를 사용하여 연령별 성별 Sv 당 생애위험 계산값을 표5.4에 보인다. 각 인구집단에 대해 남성과 여성의 Sv 당 생애 초과위험의 변화는 각 절차와 관련된 장기/조직 선량의 조합을 반영한다. 예를 들어 흉부 X선 검사는 폐뿐만 아니라 간과 위를 포함하는 여러 장기/조직의 선량까지 조합한 결과이다. 그림5.1은 표5.4의 데이터를 균일 전신피폭에 대한 Sv 당 생애위험을 나타내는 표2.5 데이터를 함께 표시하고 있다. 대부분 절차에서 특정 피폭연령 및 성별 생애 초과암 발생위험은 균일 전신피폭 위험의 약 $\pm 50\%$ 범위에 있다. 이들 데이터를 고려하고 비교할 때, 여러 절차가 전달하는 선량의 큰 차이를 명심하는 것이 중요하다(표5.1 참조). 그 결과는 위험계수이고 매 경우에서 Sv 당 위험 평가치의 편차를 나타낸다.

(113) 표5.3 및 표5.4에서 제시하고 있는 값에서 추론할 수 있는 정밀도가 낮은 선량의 방사선피폭에서 오는 암위험 평가치의 신뢰도에 그릇된 영향을 주지 않아야 함은 중요하다. 두 조합 인구집단에 대하여 평가된 위험에서 피폭연령과 성별에 따른 차이를 보이기 위해 상세 데이터를 여기 포함했다. 이들 데이터에 근거하여 대부분의 X선검사를 고려할 때, Sv 당 생애 암발생위험은 0-9세 연령군이 30-39세 연령군보다 약 2배 높을 것이라고 결론을 내릴 수 있다. 60대에 피폭한 환자의 생애위험은 30대에 피폭한 환자

표5.3. ICRP 구미 조함인구에 대한 위험 데이터로 계산한 여러 X선검사의 피폭연령 및 성별 유효선량 Sv 당(100명 당) 생애 암발생위험(Wall 등 2011에 근거)

검사	성별	피폭 연령(세)									
		0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99
경추 (AP+Lat)	남	13	8	5	3	2	1	0.6	0.3	0.1	0
	녀	38	18	8	4	2	1	0.9	0.5	0.2	0
흉부 (PA)	남	10	8	7	5	5	4	3	2	0.7	0.1
	녀	16	13	11	9	9	8	6	4	2	0.3
흉곽 척추 (AP+Lat)	남	9	7	6	5	4	3	2	1	0.6	0.1
	녀	23	16	12	9	8	7	5	3	2	0.2
복부 (AP)	남	14	11	9	6	5	3	2	1	0.4	0.1
	녀	13	10	8	6	5	4	2	2	0.7	0.1
골반 (AP)	남	12	9	8	6	4	3	2	1	0.4	0.1
	녀	10	8	6	5	4	3	2	1	0.6	0.1
요추 (AP+Lat)	남	13	10	8	6	4	3	2	0.8	0.3	0.1
	녀	13	10	7	6	4	3	2	1	0.6	0.1
IVU	남	14	10	8	6	4	3	2	0.9	0.3	0.1
	녀	13	10	8	6	5	3	2	1	0.6	0.1
바륨식	남	10	7	5	4	3	2	1	0.8	0.3	0.1
	녀	27	17	11	7	5	4	3	2	0.9	0.1
바륨 추적	남	15	11	9	6	5	3	2	0.9	0.3	0.1
	녀	13	10	8	6	5	3	2	1	0.6	0.1
바륨 관장	남	13	10	8	6	5	3	2	1	0.4	0.1
	녀	11	8	7	5	4	3	2	1	0.6	0.1
관상동맥 조영술	남	10	8	7	6	5	4	3	2	0.9	0.2
	녀	13	11	10	10	10	9	7	5	3	0.3
대퇴 혈관촬영	남	14	11	8	6	5	3	2	0.9	0.4	0.1
	녀	11	8	7	5	4	3	2	1	0.5	0.1
두부 CT	남	22	15	11	7	5	3	2	0.8	0.3	0.1
	녀	17	12	8	6	4	3	2	0.9	0.4	0.1
흉부 CT	남	9	7	6	5	4	3	2	1	0.5	0.1
	녀	22	15	11	9	7	6	5	3	2	0.2
복부 CT	남	13	10	8	6	4	3	2	0.8	0.3	0
	녀	13	10	6	6	4	3	2	1	0.5	0.1
복부+골반 CT	남	14	11	9	6	5	3	2	0.9	0.3	0.1
	녀	13	10	8	6	5	4	2	1	0.6	0.1
흉부+복부+골반 CT	남	11	9	7	5	4	3	2	1	0.5	0.1
	녀	18	13	10	8	6	5	4	2	1	0.1

PA, 뒤-앞; AP, 앞-뒤; Lat, 측면; IVU, 경정맥 요조영술 intravenous urography; CT, 전산화단층촬영
 여기 계산에 사용된 방법은 ICRP(2007a)에 근거하고 있으나 야간 다른 점에 주의(제2.6절 참조). 표의 수치는
 (Sv 당) 위험계수이며 여러 절차에서 유도된 절대 선량은 고려하지 않았음

표5.4. ICRP 아시아 조합인구에 대한 위험 데이터로 계산한 여러 X선검사의 피폭연령 및 성별 유효선량 Sv 당(100명 당) 생애 암발생위험(Wall 등 2011에 근거)

검사	성별	피폭 연령(세)									
		0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99
경추 (AP+Lat)	남	10	6	3	2	1	0.9	0.5	0.3	0.1	0
	녀	47	21	10	5	3	1	0.8	0.4	0.2	0
흉부 (PA)	남	10	8	7	6	5	4	3	2	0.9	0.2
	녀	16	12	10	9	8	7	6	4	2	0.4
흉곽 척추 (AP+Lat)	남	9	7	6	5	4	4	3	2	0.7	0.1
	녀	24	16	12	9	8	6	5	3	2	0.3
복부 (AP)	남	14	11	9	7	5	4	2	1	0.4	0.1
	녀	13	10	8	6	5	3	2	1	0.6	0.1
골반 (AP)	남	10	8	6	5	4	3	2	0.8	0.3	0.1
	녀	8	6	5	4	3	2	2	0.9	0.4	0.1
요추 (AP+Lat)	남	13	10	8	6	4	3	2	0.8	0.3	0.1
	녀	13	10	7	6	4	3	2	1	0.6	0.1
IVU	남	14	11	9	7	5	3	2	0.9	0.4	0.1
	녀	13	10	8	6	5	3	2	1	0.5	0.1
바륨식	남	15	11	9	7	5	4	2	1	0.4	0.1
	녀	14	11	9	6	5	3	2	1	0.5	0.1
바륨 추적	남	14	11	8	6	5	3	2	0.9	0.4	0.1
	녀	12	10	8	5	5	3	2	1	0.5	0.1
바륨 관장	남	11	9	7	5	4	3	2	0.9	0.4	0.1
	녀	9	7	6	4	4	3	2	0.9	0.4	0.1
관상동맥 조영술	남	10	8	7	6	6	5	4	2	1	0.2
	녀	13	11	10	9	9	8	7	4	2	0.5
대퇴 혈관촬영	남	12	10	7	6	5	3	2	0.9	0.4	0.1
	녀	10	8	6	4	4	3	2	0.9	0.4	0.1
두부 CT	남	14	11	7	5	4	3	2	0.7	0.3	0.1
	녀	15	10	7	4	4	3	2	0.7	0.3	0.1
흉부 CT	남	9	8	6	5	4	4	3	1	0.6	0.1
	녀	22	16	12	9	7	6	4	3	1	0.3
복부 CT	남	14	11	9	7	5	3	2	0.9	0.3	0.1
	녀	14	10	8	6	5	3	2	1	0.5	0.1
복부+골반 CT	남	14	11	9	7	5	3	2	1	0.4	0.1
	녀	13	10	8	6	5	3	2	1	0.5	0.1
흉부+복부+골반 CT	남	11	9	7	6	5	3	2	1	0.5	0.1
	녀	19	13	10	7	6	5	4	2	1	0.2

PA,뒤-앞; AP,앞-뒤; Lat,측면; IVU, 경정맥 조영술intravenous urography; CT, 전산화단층촬영
여기 계산에 사용된 방법은 ICRP(2007a)에 근거하고 있으나 야간 다른 점에 주의(제2.6절 참조). 표의 수치는
(Sv 당) 위험계수이며 여러 절차에서 유도된 절대 선량은 고려하지 않았음

의 위험에 비해 반 정도로 떨어지고, 70대 환자는 1/3 미만, 그리고 80대에서는 1/10 미만으로 떨어진다. 낮은 선량으로 위험 외삽과 관련해 존재하는 큰 불확실성을 명심할 때, 임상 의사와 환자에게 정보를 전할 때 유효선량 Sv 당 가능한 위험의 그런 차이는 합리적이라고 생각된다. 장기/조직 흡수선량과 사이트별 위험 모델을 사용하는 보건 위험 평가가 대부분 상황에서 과학적 지식의 최선 활용이지만, 표5.2에 보이는 것처럼 단순한 위험 용어를 사용하는 것으로 충분할 것이다. 그런 정보를 고려하는 데 있어서, 임상 의사는 절차의 잠재적 이익과 환자 질환에 대한 예후를 포함해 여러 인자들을 감안하고 싶을 것이다.

(114) 의료절차와 관련하여 생애 암발생위험의 개략적 지표를 제공하기 위해 유효선량을 사용한다고 이것이 개인이나 특정 인구집단에 대한 상세한 평가를 대체하는 것은 아니다. Brenner(2008,2012)는 ICRP가 사용하는 연령 평균 조직가중치를 생애 암발생 데이터에 근거하는 연령별 조직가중치로 대체하는, '유효위험 effective risk'이란 이름의 중간 양을 사용할 것을 제안했다. 유효위험의 사용 예는 Andrade 등(2012)이 CT검사의 평가에 대하여 제시한 바 있다. 이러한 접근은 상이한 암 종류의 연령 고유성에 대해 가용한 데이터를 직접 고려하지만, 관련된 불확도를 고려하지 않으면 정밀도에 거짓 인식을 줄 수 있다.

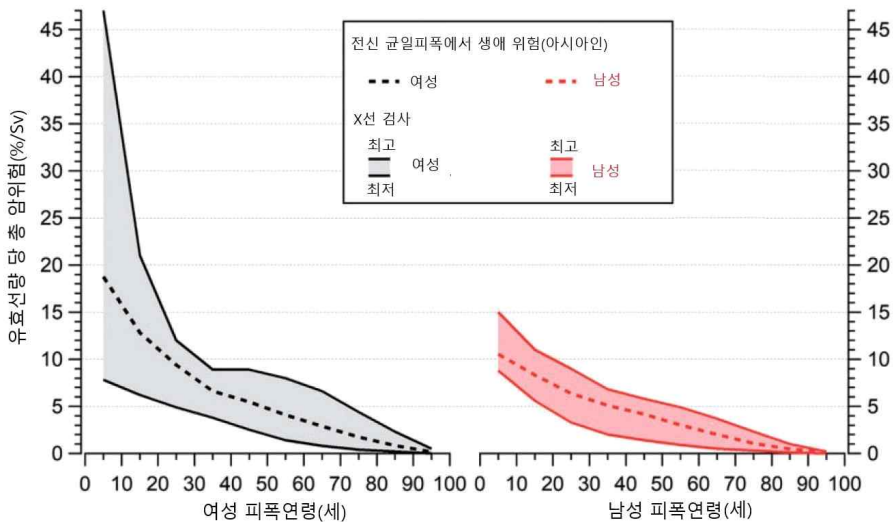


그림5.1. 조합 아시아인에서 다양한 X선 검사(표5.4)와 전신 균일 피폭(표2.5)일 때 성별과 피폭연령 함수로서 단위 유효선량 당 생애 총 암발생 위험(100명 당 Sv 당: %/Sv). 상단과 하단 곡선은 여러 절차에서 장기/조직 흡수선량의 다양한 조합에 대해 장기/조직 고유 위험모델을 적용해 얻은 Sv 당 총 생애위험의 최대 변동을 보임에 유의하라. 점선은 전신 균일 피폭에 해당한다.

(115) 최선의 위험평가는 측정이나 평가한 개별 장기/조직의 평균 흡수선량에 근거하여야 하고, 가장 적합한 인구집단의 피폭연령 및 성별 위험계수를 사용하여야 한다. 상세 분석을 위하여 흡수선량 평가는 환자의 크기와 환자 장기/조직의 선량분포에 영향을 미치는 다른 인자들을 고려하여야 한다. CT스캔의 경우(Li 등 2011), 큰 조직과 스캔하는 부분의 중앙에 위치한 조직의 단위 선량길이곱 당 선량은 몸통 직경의 지수함수로 감소한다. 신체 노출영역 경계에 인접한 장기나 조직은 피폭 조건에서 적은 변화가 선량에 큰 변화를 내기 때문에 선량을 도출할 때는 특별히 주의하여야 한다. CT에서 환자별 장기/조직 선량은 검사의 단층영상 데이터로 계산할 수 있고(Li 등 2011), 장기/조직 선량을 환자의 치수와 몸무게에 따라 조정할 수도 있다(Huda와 He 2012). 선량과 위험 평가치 모두의 불확도를 고려하여야 한다.

제6장 결론

(116) 이 간행물은 방사선방호체계에서 선량 양의 사용에 대한 검토와 접근법에 대한 과학적 근거를 제공한다. 주목적은 혼란과 논란을 일으켜왔던 이슈들에 대해 명료성을 제공하는 것이다.

(117) 중심 이슈는 유효선량과 주로 암 위험인 확률론적 위험의 관계이다. 유효선량이 '가능한 위험의 개략적 지표'로 사용될 수 있다고 결론 내렸다. 이 문구는 위험평가에 내재하는 본질적 불확실성을 강조하고, 많은 경우 고려하는 선량이 초과암 사례의 직접적 역학적 관찰되는 수준보다 아래에 있음을 강조하기 위하여 선택되었다.⁷³⁾ 이러한 단서 아래, 방사선방호 목적에서 가용한 과학적 근거의 가장 직선적 해석은 생애 치사암 명목위험 약 $5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ (즉, $<10^{-4}/\text{mSv}$)를 낮은 선량을 낮은 선량에 적용한다는 것이다. 증거는 또한 남성과 여성 사이, 특히 피폭연령에 따라 위험에 차이를 보인다. 이러한 차이는 개별 위험을 검토할 때 고려할 수 있다. 최선의 위험평가를 요구하는 상황은, 장기/조직의 흡수선량, RBE 평가치, 연령별, 성별, 인구집단별 고유 위험평가치를 포함한 최선의 과학적 데이터를 이용하고 불확실까지 고려하는 것임을 강조한다.

(118) 조직반응은 영향이 나타나는 문턱선량 아래에 한도를 정하여 관리한다. 향후에는 이 한도가 유효선량 계산의 중간 단계인 등가선량을 사용하는 현행 접근법 대신 흡수선량으로 설정될 것이다. 등가선량을 방호량으로 사용하는 것은 중단하면, 방호체계를 단순화할 것이다. 조직반응에 대한 방사선가중을 둘 것인지는 검토가 필요하다.⁷⁴⁾

(119) 유효선량의 계산에 사용되는 조직가중치는 남성과 여성 및 모든 연령에 평균한 상대위해 값에 근거한다. 이 간행물에서 제시된 데이터는 피폭연령에 따른 암발생이나 상응하는 위해평가치에서 관찰된 큰 차이와, 개별 암 사이트에서 암위험의 연령의존성에서 남녀에 따른 상당한 차이를 예시한다. 이러한 차이는 연령, 성별 및 인구집단 평균 위해 값과 한 세트 조직가중치 사용에 감추어져 있다. 이로써 현재의 접근법이 실용적이

73) <역주> '개략적'으로 불확실성을, '가능한'으로 역학적 증거로부터 '추론'을 암시한다.

74) <역주> 이 검토 결론 없이 방호량에서 등가선량을 없애겠다는 선언은 성급한 느낌이다. 선질이 다른 혼합 방사선장에서 높은 흡수선량을 받은 경우 문턱선량을 어떻게 표현하고 선량한도를 어떻게 정형화할 것인지 궁금하다.

고 공평하고 작동 가능한 체계를 제공하고, 이 체계 안에서 선량기준이 설정되고 최적화가 모든 종사자와 일반인 모두에게 적용되는 논거가 되어 왔다.

(120) 이제 장기 및 조직의 흡수선량이 성인뿐만 아니라 여러 연령대의 남녀 아동에 대한 인형모의체를 사용하여 계산된다. 또한 일관된 접근으로 상응하는 위해와 상대위해 값을 계산하고, 이들 값을 사용하여 유효선량계수를 산출한다. 마지막 단계로 모든 종사자와 모든 일반인에 대하여 각각 평균하고, 제공되는 다양한 유효선량계수와 위해 값을 참조하여 선량기준이 설정될 수 있다. 이러한 접근은 일반적으로는 방사선방호체계의 현실적 적용에 영향을 미치지 않는 것이나, 인구집단 소그룹에 적절한 방호의 고려(예: 아동 피폭에 고유한 고려)를 용이하게 한다. 이 주제에 대해서는 추가 검토가 있을 것이고, 위해의 계산에 관해 발간할 보고서에서 더 많은 분석과 논의가 있을 것이다.

참고문헌

- ACR, 2020. ACR Appropriateness Criteria. American College of Radiology, Philadelphia, PA. Available at: <https://www.acr.org/Clinical-Resources/ACR-Appropriateness-Criteria> (accessed 1 April 2020).
- AGIR, 2013. Human Radiosensitivity. Report of the Independent Advisory Group on Ionising Radiation. Doc. HPA, RCE-21. pp. 1-152. Health Protection Agency, London. Available at: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/333058/RCE-21_v2_for_website.pdf (accessed 1 April 2020).
- Ainsbury, E.A., Bouffler, S., Dorr, W., et al., 2009. Radiation carcinogenesis: a review of recent studies. *Radiat. Res.* 172, 1-9.
- Alessio, A.M., Farrell, M.B., Fahey, F.H., 2015. Role of reference levels in nuclear medicine: a report of the SNMMI Dose Optimization Task Force. *J. Nucl. Med.* 56, 1960-1964.
- Andrade, M.E., Borrás, C., Khoury, H.J., et al., 2012. Organ doses and risks of computed tomography examinations in Recife, Brazil. *J. Radiol. Prot.* 32, 251-260.
- ARSAC, 2020. Notes for Guidance on the Clinical Administration of Radiopharmaceuticals and Use of Sealed Radioactive Sources. Administration of Radioactive Substances Advisory Committee, Public Health England, Chilton.
- Balonov, M., Golikov, V., Zvonova, I., et al., 2018. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009-2015. *J. Radiol. Prot.* 38, 121-139.
- Becker, M.D., Butler, P.F., Bhargavan-Chatfield, M., et al., 2016. Adult gamma camera myocardial perfusion imaging: Diagnostic Reference Levels and Achievable Administered Activities derived from ACR accreditation data. *J. Am. Coll. Radiol.* 13, 688-695.
- Berrington de Gonzalez, A., Salotti, J.A., McHugh, K., et al., 2016. Relationship between paediatric CT scans and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: assessment of the impact of underlying conditions. *Br. J. Cancer* 114, 388-394.
- Boice, J.D., 2015. Radiation epidemiology and recent paediatric computed tomography studies. *Ann. ICRP* 44(1S), 249-258.

- Bolch, W.E., Dietze, G., Petoussi-Henss, N., et al., 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.
- Bouffler, S.D., Peters, S., Gilvin, P., et al., 2015. The lens of the eye: exposures in the UK medical sector and mechanistic studies of radiation effects. *Ann. ICRP* 44(1S), 84-90.
- Bouffler, S.D., 2016. Evidence for variation in human radiosensitivity and its potential impact on radiological protection. *Ann. ICRP* 45(1S), 280-289.
- Brambilla, M., Vassileva, J., Kuchcinska, A., et al., 2020. Multinational data on cumulative radiation exposure of patients from recurrent radiological procedures: call for action. *Eur. Radiology* 30, 2493-2501.
- Brenner, D.J., 2008. Effective dose: a flawed concept that could and should be replaced. *Br. J. Radiol.* 81, 521-523.
- Brenner, D.J., 2012. We can do better than effective dose for estimating or comparing low dose radiation risks. *Ann. ICRP* 41(3/4), 124-128.
- Chipiga, L., Bernhardsson, C., 2010. Patient doses in computed tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Radiat. Prot. Dosim.* 169, 240-244.
- Cristy, M., 1980. Mathematical Phantoms Representing Children of Various Ages for Use in Estimates of Internal Dose. ORNL Report TM-367. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. Cristy, M., Eckerman, K.F., 1987. Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. ORNL/TM-8381/V1-7. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Ding, A., Gao, Y., Liu, H., et al., 2015. VirtualDose: a software for reporting organ doses from CT for adult and pediatric patients. *Phys. Med. Biol.* 60, 5601-5625.
- EANM, 2020. Guidelines. European Association of Nuclear Medicine, Vienna. Available at: <https://www.eanm.org/publications/guidelines/> (accessed 1 April 2020).
- EU, 2000. Referral Guidelines for Imaging. Radiation Protection 118. European Commission, Directorate-General for the Environment. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. Available at: <http://europa.eu.int>.
- Fisher, H.L.J., Snyder, W.S., 1967. Distribution of Dose in the Body from a Source of Gamma Rays Distributed Uniformly in an Organ. ORNL-4168. Oak Ridge National Laboratory, TN.

- Gonzalez, A.J., Akashi, M., Boice, J.D., et al., 2013. Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident. *J. Radiol. Prot.* 33, 497-571.
- Hamada, N., Sato, T., 2016. Caractogenesis following high-LET radiation exposure. *Mutat. Res.* 770, 262-291.
- Harrison, J.D., Muirhead, C.R., 2003. Quantitative comparisons of cancer induction in humans by internally deposited radionuclides and external radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 79, 1-13.
- Hart, D., Jones, D.G., Wall, B.F., 1994. Estimation of Effective Dose in Diagnostic Radiology from Entrance Dose and Dose-Area Product Measurement. NRPB R262. National Radiological Protection Board, Chilton.
- Haylock, R., Gillies, M., Hunter, N., et al., 2018. Cancer mortality and incidence following external occupational radiation exposure: an update of the 3rd analysis of the UK national registry of radiation workers. *Br. J. Cancer* 119, 631-637.
- Hendry, J.H., 2015. Threshold doses and circulatory disease risks. *Ann. ICRP* 44(1S), 69-75.
- HPA, 2008. Guidance on the Application of Dose Coefficients for the Embryo, Fetus and Breastfed Infant in Dose Assessments fro Members of the Public. Documents of the Health Protection Agency, Radiation, Chemical and Environmental Hazards, RCE-5. HPA CRCE, Oxfordshire, UK.
- Huang, W.Y., Muo, C.H., Lin, C.Y., et al., 2014. Paediatric head CT scan and subsequent risk of malignancy and benign brain tumour: a nation-wide population-based cohort study. *Br. J. Cancer* 110, 2354-2360.
- Huda, W., He, W., 2012. Estimating cancer risks to adults undergoing body CT examinations. *Radiat. Prot. Dosimetry* 150, 168-179.
- ImPACT, 2011. CT Dosimetry Tool: Scanner Matching Data to be Used with NRPB SR250 Dose Distribution Data. Version 1.0.4, ImPACT, St. George's Hospital, London. Available at: <http://www.impactscan.org/ctdosimetry.htm> (last accessed April 2020).
- IAEA, 1995. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, Interim Edition. General Safety Requirements Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological

- Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).
- ICRP, 1979. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1. Ann. ICRP 2(3/4).
- ICRP, 1980. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 2. Ann. ICRP 4(3/4).
- ICRP, 1981. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 3. Ann. ICRP 6(2/3).
- ICRP, 1987. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53. Ann. ICRP 18(1-4).
- ICRP, 1989. Age-dependent doses to members of the public from intakes of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP 20(2).
- ICRP, 1990. RBE for deterministic effects. ICRP Publication 58. Ann. ICRP 20(4).
- ICRP, 1991a. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1991b. Radiological protection in biomedical research. ICRP Publication 62. Ann. ICRP 22(3).
- ICRP, 1993. Age-dependent dose to members of the public from intake of radionuclides. Part 2: Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23(3/4).
- ICRP, 1994a. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24(1-3).
- ICRP, 1994b. Dose coefficients for intake of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24(4).
- ICRP, 1995a. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 3: Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 69. Ann. ICRP 25(1).
- ICRP, 1995b. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 4: Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Ann. ICRP 25(3/4).
- ICRP, 1996a. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 5: Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26(1).
- ICRP, 1996b. Radiological protection and safety in medicine. ICRP Publication 73. Ann. ICRP 26(2).

- ICRP, 1996c. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3/4).
- ICRP, 1998. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: Addendum to ICRP 53. ICRP Publication 80. Ann. ICRP 28(3).
- ICRP, 2001. Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother. ICRP Publication 88. Ann. ICRP 31(1-3).
- ICRP, 2002a. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3/4).
- ICRP, 2002b. Guide on the practical application of the ICRP human respiratory tract model. ICRP Supporting Guidance No. 3. Ann. ICRP 32(1/2).
- ICRP, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33(1/2).
- ICRP, 2003b. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (wR). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33(4).
- ICRP, 2004. Doses to infants from ingestion of radionuclides in mothers' milk. ICRP Publication 95. Ann. ICRP 34(3/4).
- ICRP, 2006. Assessing dose to the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimisation of radiological protection: broadening the process. ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36(3).
- 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(2).
- ICRP, 2008. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: a third addendum to ICRP 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. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposure. ICRP Publication 116. Ann. ICRP 40(2-5).
- ICRP, 2010b. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department. ICRP Publication 117. Ann. ICRP 40(6).
- ICRP, 2012a. Part 1, ICRP statement on tissue reactions; Part 2, 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, 2012b. Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(S).
- ICRP, 2013. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. Ann. ICRP 42(4).
- ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).
- ICRP, 2015a. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: a compendium of current information related to frequently used substances. ICRP Publication 128. Ann. ICRP 44(2S).
- ICRP, 2015b. Occupational intakes of radionuclides, Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2).
- ICRP, 2015c. Stem cell biology with respect to carcinogenesis aspects of radiological protection. ICRP Publication 131. Ann. ICRP 44(3/4).
- ICRP, 2016. Occupational intakes of radionuclides, Part 2. ICRP Publication 134. Ann. ICRP 45(3/4).
- ICRP, 2017. Occupational intakes of radionuclides, Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).
- ICRP, 2018. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP Publication 139. Ann. ICRP 47(2).
- ICRP, 2019a. Occupational intakes of radionuclides, Part 4. ICRP Publication 141. Ann. ICRP 48(2/3).
- ICRP, 2019b. Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industrial Processes. ICRP Publication 142. Ann. ICRP 48(4).
- ICRP, 2020a. Paediatric reference computational phantoms. ICRP Publication 143. Ann. ICRP 49(1).
- ICRP, 2020b. Dose coefficients for external exposures to environmental sources. ICRP Publication 144. Ann. ICRP 49(2).
- ICRU, 1985. Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources. ICRU Report 39. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- ICRU, 1988. Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources - Part II. ICRU Report 43. International Commission on Radiation

- Units and Measurements, Bethesda, MD.
- ICRU, 1993. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- ICRU, 2007. Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection. ICRU Report 56. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- ICRU, 2020. Operational Quantities for External Radiation Exposure. ICRU Report 95. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- Jones, D.G., Wall, B.F., 1985. Organ Doses from Medical X-ray Examinations Calculated Using Monte Carlo Techniques. NRPB-R186. National Radiological Protection Board, Chilton.
- Journy, N., Rehel, J.L., Ducou le Pointe, H., et al., 2015. Are the studies on cancer risk from CT biased by indication? Elements of answer from a large-scale cohort study in France. *Br. J. Cancer* 112, 185-193.
- Kanal, K.M., Butler, P.F., Sengupta, D., et al., 2017. U.S. diagnostic reference levels and achievable doses for 10 adult CT examinations. *Radiology* 284, 120-133.
- Kramer, R., Vieira, J.W., Khoury, H.J., et al., 2004. MAX meets ADAM: a dosimetric comparison between a voxel based and a mathematical model for external exposure to photons. *Phys. Med. Biol.* 49, 1239-1252.
- Kuznetsova, I.S., Labutina, E.V., Hunter, N., 2016. Radiation risks from leukaemia, lymphoma and multiple myeloma incidence in the Mayak cohort: 1948-2004. *PLoS One* 11, e016271.
- Lee, C., Kim, K.P., Long, D., et al., 2011. Organ doses for reference adult male and female undergoing computed tomography estimated by Monte Carlo simulations. *Med. Phys.* 38, 1196-1206.
- Lee, C., Kim, K.P., Long, D.J., et al., 2012. Organ doses for reference pediatric and adolescent patients undergoing computed tomography estimated by Monte Carlo simulation. *Med. Phys.* 39, 2129-2146.
- Leuraud, K., Richardson, D.B., Cardis, E., et al., 2015. Ionizing radiation and leukaemia and lymphoma: findings from an international cohort study of radiation-monitored workers (INWORKS). *Lancet Haematol.* 2, e276-e281.
- Li, X., Samei, E., Segars, W.P., et al., 2011. Patient-specific radiation dose and cancer risk for pediatric chest CT. *Radiology* 259, 862-874.

- Little, M.P., 2016. Radiation and circulatory disease. *Mutat. Res.* 770, 299-318.
- Little, M.P., Hill, P., Charles, M.W., 2007. Are cancer risks associated with exposure to ionising radiation from internal emitters greater than those in the Japanese A-bomb survivors. *Radiat. Environ. Biophys.* 46, 299-310.
- Little, M.P., Azizova, T.V., Bazyka, D., et al., 2012. Systematic review and meta-analysis of circulatory disease from exposure to low-level ionizing radiation and estimates of potential population mortality risks. *Environ. Health Perspect.* 120, 1503-1511.
- Loose, K.W., Popp, U., Wucherer, M., et al., 2010. Medical radiation exposure and justification at a large teaching hospital: comparison of radiation-related and disease-related risks. *RoFo* 182, 66-70.
- Marsh, J.W., Harrison, J.D., Laurier, D., et al., 2014. Doses and lung cancer risks from exposure to radon and plutonium. *Int. J. Radiat. Biol.* 90, 1080-1087.
- Martin, C.J., 2005. A survey of incidents in radiology and nuclear medicine in the West of Scotland. *Br. J. Radiol.* 78, 913-921.
- Martin, C.J., 2007a. Effective dose: how should it be applied to medical exposure? *Br. J. Radiol.* 80, 639-647.
- Martin, C.J., 2007b. The importance of radiation quality for optimisation in radiology. *Biomed. Imag. Interv. J.* 3, e38.
- Martin, C.J., 2008. Radiation dosimetry for diagnostic medical exposures. *Radiat. Prot. Dosimetry* 128, 389-412.
- Martin, C.J., 2011. Management of patient dose in radiology in the UK. *Radiat. Prot. Dosimetry* 147, 355-372.
- Martin, C.J., Darragh, C.L., McKenzie, G., et al., 1993. Implementation of a programme for reduction of radiographic doses and results achieved through increases in tube potential. *Br. J. Radiol.* 66, 228-233.
- Martin, C.J., Sutton, D.G., Sharp, P.F., 1999. Balancing patient dose and image quality. *Appl. Radiat. Isot.* 50, 1-19.
- 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, C.J., Sutton, D.G., 2014. *Practical Radiation Protection in Healthcare*, second ed. Oxford University Press, Oxford.
- Martin, C.J., Vassileva, J., Vano, E., et al., 2017. Unintended and accidental medical exposures in radiology: guidelines on investigation and

- prevention. *J. Radiol. Prot.* 37, 883-906.
- Mathews, J.D., Forsythe, A.V., Brady, Z., et al., 2013. Cancer risk in 680000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ* 346, f2360.
- McCullough, C.H., Christner, J.A., Kofler, J.K., 2010. How effective is effective dose as a predictor of radiation risk? *Am. J. Roentgenol.* 194, 890-896.
- Menzel, H.G., Harrison, J.D., 2012. Effective dose: a radiation protection quantity. *Ann. ICRP* 41(3/4), 117-123.
- Mettler, F.A., Huda, W., Yoshizumi, T.T., et al., 2008. Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: a catalog. *Radiology* 248, 254-263.
- Meulepas, J.M., Ronckers, C.M., Smets, A.M.J.B., et al., 2019. Radiation Exposure From Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands. *J. Natl. Cancer Inst.* 111, 256-263.
- Muirhead, C.R., O'Hagan, J.A., Haylock, R.G.E., et al., 2009. Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: 3rd analysis of the National Registry for Radiation Workers. *Br. J. Cancer* 100, 206-212.
- NCRP, 2007. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-contaminated Wounds and Procedure for their Assessment, Dosimetry and Treatment. NCRP Report 156. National Council on Radiation Protection and Measurement, Bethesda, MD.
- NCRP, 2009. Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States, 2009. NCRP Report 160. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2012. Uncertainties in the Estimation of Radiation Risks and Probability of Disease Causation. NCRP Report 171. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2018. Implications of Recent Epidemiologic Studies for the Linear-nonthreshold Model and Radiation Protection. Commentary No. 27. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2019. Medical Radiation Exposure of Patients in the United States. Report No. 184. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Neriishi, K., Nakashima, E., Minamoto, A., et al., 2007. Postoperative cataract cases among atomic bomb survivors: radiation dose response and threshold. *Radiat. Res.* 168, 404-408.
- Ogino, H., Fujimichi, Y., Sasaki, M., et al., 2016. Quantitative assessment of provability of radiation-related cancers considering unavoidable existence

- of unadjusted risk factors. *J. Radiol. Prot.* 36, 865-884.
- Pearce, M.S., Salotti, J.A., Little, M.P., et al., 2012. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet* 380, 499-505.
- Preston, D.L., Mattsson, A., Holmberg, E., et al., 2002. Radiation effects on breast cancer risk: a pooled analysis of eight cohorts. *Radiat. Res.* 158, 220-235.
- Preston, D.L., Shimizu, Y., Pierce, D.A., et al., 2003. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13. Solid cancer and non-cancer disease mortality 1950-1997. *Radiat. Res.* 160, 381-407.
- Preston, D.L., Ron, E., Tokuoka, S., et al., 2007. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat. Res.* 168, 1-64.
- Rage, E., Vacquier, B., Blanchardon, E., et al., 2012. Risk of lung cancer mortality in relation to lung doses among French uranium miners. *Radiat. Res.* 177, 288-297.
- Rannikko, S., Ermakov, I., Lampinen, J.S., et al., 1997. Computing patient doses of X-ray examinations using a patient size- and sex-adjustable phantom. *Br. J. Radiol.* 70, 708-718.
- Rehani, M., 2015. Tracking of examination and dose: overview. *Radiat. Prot. Dosimetry* 165, 50-52.
- Rehani, M., Berris, T., Frush, D.P., 2014. Templates and existing elements and models for implementation of patient exposure tracking. *Radiat. Prot. Dosimetry* 158, 36-42.
- Rehani, M.M., Yang, K., Melick, E.R. et al., 2020. Patients undergoing recurrent CT scans: assessing the magnitude. *Eur. Radiology* 30, 1828-1836.
- Richardson, D.B., Cardis, E., Daniels, R.D., et al., 2015. Solid cancer risk among nuclear workers in France, the United Kingdom and the United States. The INWORKS Project. *BMJ* 351, h5359.
- Richardson, D.B., Cardis, E., Daniels, R.D., et al., 2018. Site-specific solid cancer mortality after exposure to ionizing radiation: a cohort study of workers (INWORKS). *Epidemiology* 29, 31-40.
- Rühm, W., Azizova, T.V., Bouffler, S.D., et al., 2016. Dose rate effects in radiation biology and radiation protection. *Ann. ICRP* 45(1S), 262-279.
- Shore, R., Walsh, L., Azizova, T., et al., 2017. Risk of solid cancer in low dose-rate radiation epidemiologic studies and the dose-rate effectiveness factor. *Int. J. Radiat. Biol.* 93, 1064-1078.

- Shrimpton, P.C., Jansen, J.T.M., Harrison, J.D., 2016. Updated estimates of typical effective doses for common CT examinations in the UK following the 2011 national review. *Br. J. Radiol.* 89, 20150346.
- Smith-Bindman, R., Lipson, J., Marcus, R., et al., 2009. Radiation dose associated with common computed tomography examinations and the associated lifetime attributable risk of cancer. *Arch. Intern. Med.* 169, 2078-2086.
- Smith-Bindman, R., Moghadassi, M., Griffey, R.T., et al., 2015. Computed tomography radiation dose in patients with suspected urolithiasis. *JAMA Intern. Med.* 175, 1413-1416.
- Sodickson, A., Baeyens, P.F., Andriole, K.P., et al., 2009. Recurrent CT, cumulative radiation exposure, and associated radiation-induced cancer risks from CT of adults. *Radiology* 251, 175-184.
- Sokolnikov, M., Preston, D., Gilbert, E., et al., 2015. Radiation effects on mortality from solid cancers other than lung, liver and bone cancer in the Mayak worker cohort: 1948-2008. *PLoS One* 10, e0117784.
- Stabin, M.G., Watson, E.E., Cristy, M., et al., 1995. Mathematical Models and Specific Absorbed Fractions of Photon Energy in the Nonpregnant Adult Female and at the End of Each Trimester of Pregnancy. ORNL/TM-12907. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Streffer, C., 2004. Can tissue weighting factors be established for the embryo and fetus? *Radiat. Prot. Dosimetry* 112, 519-523.
- Thomas, R.H., Edwards, A.A., 2003. Topics for debate: the present ICRP protection quantities are seriously flawed. *Radiat. Prot. Dosim.* 104, 79-87.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume II. 2000 Report to the General Assembly. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2001. Hereditary Effects of Radiation. 2001 Report to the General Assembly. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources. Annex B. Exposures of the Public and Workers from Various Sources of Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2012a. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Annex A: Attributing Health Effects to Ionizing Radiation Exposures and Inferring Risks. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic

Radiation, New York.

- UNSCEAR, 2012b. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Annex B: Uncertainties in Risk Estimates for Radiation-induced Cancer. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2013. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Volume II, Annex B: Effects of Radiation Exposure in Children. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- Vodovatov, A.V., Balonov, M.I., Yu, V., et al., 2016. Proposals for the establishment of national diagnostic reference levels for radiography for adult patients based on regional dose surveys in Russian Federation. *Radiat. Prot. Dosimetry* 173, 223-232.
- Wall, B.F., Haylock, R., Jansen, J.T.M., et al., 2011. Radiation Risks from Medical X-ray Examinations as a Function of Age and Sex of Patient. HPA Report HPA-CRCE-028. Health Protection Agency, Chiltern.
- Walsh, L., Shore, R., Auvinen, A., et al., 2013. Cancer risk in 680000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ* 346, f2360/rr/648506.
- Walsh, L., Shore, R., Auvinen, A., et al., 2014. Risks from CT scans - what do recent studies tell us? *J. Radiol. Prot.* 34, E1-E5.
- Worgul, B.V., Kundiyeu, Y.I., Sergiyenko, N.M., et al., 2007. Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposure. *Radiat. Res.* 167, 233-243.
- WHO, 2001. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 78. Ionizing Radiation, Part 2: Some Internally Deposited Radionuclides. IARC Press, Lyon.
- Zanzonica, P., Stabin, M.G., 2014. Quantitative benefit-risk analysis of medical radiation exposures. *Semin. Nucl. Med.* 44, 210-214.
- Zvonova, I., Chipiga, L., Balonov, M., et al., 2015. Nuclear medicine examinations of children in Russia. *Radiat. Prot. Dosimetry* 165, 216-219.

사 사

방사선량 관계량의 사용에 관한 상세한 지침은 2007년 ICRP 권고(2007a)에 주었지만, ICRP는 그 지침을 특히 의료피폭이나 위험과 관계에 대해 더 확장할 필요를 인식했다. 2010년에 ICRP는 이 일을 완료하도록 ‘위험관련 방사선방호량으로서 유효선량의 적용’에 관한 작업그룹 79를 설치했다. 작업그룹 위원에는 제1~4분과위원회 위원들이 참여했다.

ICRP는 이 간행물 개발에 참여한 모든 사람에게 여러 해에 걸친 그들의 노력과 헌신에 감사하며, 선량과 위험 계산을 지원한 영국 공중보건부의 Jan Jansen과 Wei Zhang에게 감사한다.

작업그룹 79 위원(2010-현재)

J.D. Harrison(그룹장)	J.R. Cooper	J.R. Simmonds
M. Balonov	C.J. Martin	R. Smith-Bindman
F. Bochud	H-G. Menzel	C. Streffer
W.E. Bolch	P. Oritz-Lopez	R. Wakeford

ICRP 본위원회 주검토자는 다음과 같다.

K. Applegate	D. Cool	C-M. Larsson
--------------	---------	--------------

편집인

C.H. Clement(과학서기 겸 ICRP 연보 편집장)

H. Fujita(과학서기보 겸 ICRP 연보 부편집장)

이 보고서를 준비하는 기간 동안 제2분과 위원은 다음과 같다.

(2010-2013)		
H-G. Menzel(위원장)	V. Berkovski	R. Leggett
J.D. Harrison(부위원장)	R. Cox	J. Lipsztein
W. Bolch	G. Dietze	J. Ma
M. Bailey	K. Eckerman	F. Paquet
M. Balonov	A. Endo	N. Petoussi-Henss

D. Bartlett

N. Ishigure

A. Pradhan

(2013-2017)

J.D. Harrison (Chair)

D. Chambers

J. Ma

F. Paquet (Vice-Chair)

M. Degteva

D. Nosske

W.E. Bolch (Secretary)

A. Endo

N. Petoussi-Hens

M.R. Bailey

J.G.S. Hunt

F. Wissmann

V. Berkovski

C.H. Kim

L. Bertelli

R. Leggett

(2013-2017)

J.D. Harrison (Chair)

D. Jokisch

T. Sato

F. Paquet (Vice-Chair)

C.H. Kim

T. Smith

W.E. Bolch (Secretary)

R. Leggett

A. Ulanowski

V. Berkovski

J. Li

F. Wissmann

E. Blanchardon

M.A. Lopez

A. Giussani

N. Petoussi-Hens

이 간행물을 승인한 본위원회 위원은 다음과 같다.

위원장: C. Cousins, 영국

부위원장: J. Lochard, 프랑스

과학서기: C.H. Clement, 캐나다, sci.sec@icrp.org (정규 위원은 아니나 필수 요인)

K.E. Applegate, 미국

S. Liu, 중국

명예위원

S. Bouffler, 미국

S. Romanov, 러시아

R.H. Clark, 영국

K.W. Cho, 한국

W. Rühm, 독일

F.A. Mettler Jr., 미국

D.A. Cool, 미국

R.J. Pentreath, 영국

J.D. Harrison, 영국

R.J. Preston, 미국

M. Kai, 일본

C. Streffer, 독일

C-M. Larsson, 호주

E. Vañó, 스페인

D. Laurier, 프랑스

끝으로 이 간행물 초안 공개자문 과정에서 시간을 내 의견을 보내준 많은 개인과 기관에 깊이 감사한다.