

ICRU 보고서 39의 배경과 전망

한국에너지연구소 원자력안전센터 방사선관리전문위원실

이 재 기

=요 약=

ICRU 보고서 39에서 새로이 정의된 외부방사선피폭에 의한 선량당량평가 목적의 네 가지 실용량에 대하여 그 도입의 배경과 기존량과의 관계, 그리고 방사선 방어 및 측정에서의 전망에 대하여 기술하였다.

서 론

ICRU(International Commission on Radiation Units and Measurements)는 지난 2월 1일 발행한 동 위원회의 39번째 보고서¹⁾에서 외부방사선방어에 중요한 의미를 갖는 네 가지 새로운 방사선 관계 양(quantity)을 제시하였다. 즉, Ambient Dose Equivalent, Directional Dose Equivalent, Individual Dose Equivalent-Penetrating 그리고 Individual Dose Equivalent-Superficial의 선량당량에 관계된 양이다²⁾. 처음의 두 양은 주변감시(environmental monitoring)의 목적으로, 그리고 뒤의 두 양은 개인감시(individual monitoring)의 목적으로 정의된 것이다. 또한 이들 새로운 양을 정의하는 과정에서 방사선장의 두가지 특수한 형태를 도입하는데 곧 “확장된 방사선장(expanded field)”과 “정렬된 방사선장(expanded and aligned field)”이다³⁾.

- a) 이들 새로운 양에 대해서는 아직 국내에 통용되는 용어가 없으므로 원어를 적었다. 필자의 의견은 “주위선량당량”, “방향성선량당량”, “실부개인선량당량”, “표면개인선량당량”이 어떨까하고 생각한다.
- b) Expanded and aligned field를 “확장 및 정렬된 방사선장”이라 하지 않고 단순히 “정렬된 방사선장”이라고 한 것은 “aligned”가 “expanded”를 수반하기 때문이다. ICRU의 용어에 충실하자면 “확장 및 정렬된 방사선장”이 옳겠다.
- c) 여기서 정의된 항목은 ICRU의 원정의를 지적한 것은 아니며 필자가 적절히 재정리한 것이다.

이들 새로운 양은 방사선량 평가 및 감시에 상당한 영향을 파급할 것으로 예상되는 바, 여기서 이들 양의 의미, 이들을 정의하게된 배경 그리고 기존 양들과의 관계 및 전망을 기술하여 이에 대한 이해를 돕고자 하였다.

정 의

ICRU 39에서 정의된 선량당량 양과 이에 수반되는 항의 정의는 다음과 같다⁴⁾. 방사선장과 기하학적 용어의 이해를 돕기위해 그림 1에 이를 2차원적으로 예시하였다.

● 주방향(principal direction)

방사선장내에서 임의로 설정한 방향으로서 Ω_p 로 표기한다. 만약 방사선장이 단일 방향이라면 주방향을 방사선의 진행방향과 일치시키는 것이 편리할 것이다.

● 피사체(被射體, body)

방사선장에 놓인 물체로서 인체에 버금가는 크기를 가진 것을 말한다.

● 연조직물질(軟組織物質, soft tissue)²⁾

ICRU가 정한 가상적인 조직등가물질로서 그 밀도는 1 g/cm^3 이며 질량구성비는 산소 76.2%, 탄소 11.1%, 수소 10.1%, 질소 2.6%이다.

● ICRU 구(球)(ICRU sphere)²⁾

ICRU에서 표준피사체로 규정한 직경 30 cm의 구로 연조직물질로 구성된다. ICRU는 방사선량 평가목적상 이 구를 외각(外殼), 내각(內殼), 구심(球心)의

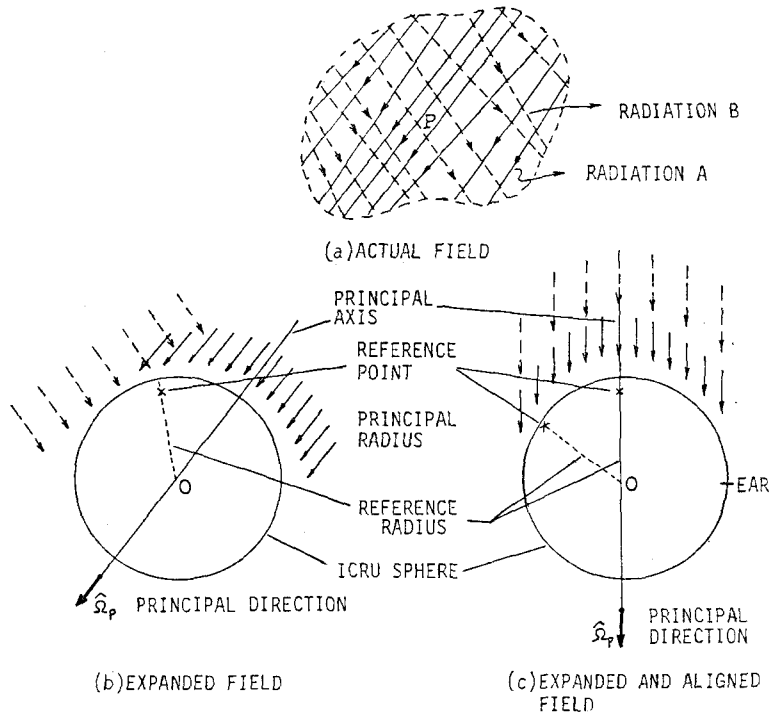


그림 1. 방사선장 및 기하학적 항의 2차원적 예시

세 영역으로 구분한다. 외각은 두께 0.007 cm의 표피층이며 인체 피부의 죽은 조직층에 해당한다. 내각은 외각 안쪽으로부터 깊이 1 cm까지의 층을 말하며 인체의 평균 피부 두께에 해당하며, 구심은 나머지인 반경 14 cm의 구로 인체의 심부에 위치한 조직에 상당한다.

- 주 축(principal axis)
방사선장내에 ICRU 구를 놓았을 때 주방향에 평행한 ICRU 구의 축이다.
- 주반경(principal radius)
주축상에 있고 중심으로부터 주방향과 반대쪽의 반경을 말한다.
- 기준점(reference point)
ICRU 구내에서 선량이 평가되는 지점을 말한다.
- 기준반경(reference radius)
기준점을 포함하고 있는 ICRU 구의 한 반경을 말한다.
- 기준방향(reference direction)
ICRU 구의 중심에서부터 기준점으로 향하는 방향으로 $\hat{\Omega}_0$ 로 표기한다.

● 평가점(point of interest)

방사선장내의 특정한 한 지점으로 그 위치에서의 방사선 양을 평가하고자 하는 점을 말한다.

◎ 확장된 방사선장(expanded field)

평가점에서의 방사선장 특성을 전공간에 확장한 가상적인 방사선장으로 모든 공간에서 방사선의 선속, 에너지 스펙트럼, 방향분포가 동일한 방사선장이다.

◎ 정렬된 방사선장(expanded and aligned field)

확장된 방사선장을 다시 모든 방사선의 방향이 일치하도록 정렬시킨 가상적인 방사선장을 말한다⁴⁾.

◎ Ambient Dose Equivalent, $H^*(d)$

정렬된 방사선장에 위치한 ICRU 구 주반경상의 깊이 d인 기준점에서의 선량당량을 말한다. 현재 ICRU에서 권고한 깊이 d는 10 mm로서 이 경우 $H^*(d)$ 는 $H^*(10)$ 으로 쓸 수 있다.

◎ Directional Dose Equivalent, $H'(d)$

확장된 방사선장에 위치한 ICRU 구 기준반경상의 깊이 d) 이 경우 주반경과 기준반경이 일치하게 된다.

이 d인 기준점에서의 선량당량을 말한다. 현재 ICRU는 d값으로 0.07 mm를 권고하고 있으며 $H'(d)$ 는 $H'(0.07)$ 로 쓸 수 있다.

◎Individual Dose Equivalent, Penetrating, $H_p(d)$

투과력이 강한 방사선에 대하여 적절한 연조직내의 깊이 d에서의 선량당량을 말하며 ICRU가 권고한 d값 10 mm에 따라 $H_p(d)$ 는 $H_p(10)$ 으로 쓸 수 있다.

◎Individual Dose Equivalent, Superficial, $H_s(d)$

투과력이 약한 방사선에 대하여 적절한 연조직내의 깊이 d에서의 선량당량으로서 ICRU가 권고하고 있는 d값 0.07 mm에 따라 $H_s(d)$ 는 $H_s(0.07)$ 로 쓸 수 있다.

배 경

ICRP(International Commission on Radiological Protection)의 선량제한체제는 1977년 동위원회의 발간물 26호(ICRP Pub. 26)⁸²⁾가 나오기 전까지는 결정장기 개념에 근거를 둔 각 장기별 선량한도를 기초로 하고 있었다. 이 체제는 ICRP Pub. 26에서 장기별 가중치를 도입한 실효선량당량(effective dose equivalent, H_E)⁴²⁾의 개념으로 바뀌었다. 그러나 어느 경우이건 방사선장에 위치한 인체 내부의 선량당량을 “측정”하는 것은 거의 불가능하기 때문에 ICRU의 관점에서는 “측정가능”한 방사선 양의 정의가 요구되어 왔다.

이러한 측정가능한 양으로 방사선방어 초기에는 조사선량(exposure)이나 단순한 선속밀도(flux density)와 같이 공기중 또는 진공중에서 정의되는 양들을 사용해왔다. 그러나 인체의 피폭에 관한 인체가 방사선장에 개재함으로써 무시할수 없을 정도의 방사선장 간섭이 야기되므로 방사선방어를 위한 선량평가(dosimetry)에는 피사체를 도입하게 되었다.

피사체의 형태도 여러가지가 고려될 수 있다. 처음으로 도입된 것은 Snyder와 Neufeld⁸³⁾의 30 cm 두께

의 인체등가조직⁸⁴⁾ 평판이었다. 이후 1968년 Auxier 등⁸⁵⁾이 직경 30 cm, 높이 60 cm의 원통형 피사체⁸⁶⁾를 사용하였으며, 1971년 ICRU에서는 피사체의 방향성을 고려하여 직경 30 cm인 연조직구를 표준피사체로 선정하였다⁸⁷⁾.

어떠한 피사체를 개입시키는 피사체 내부의 선량분포와 실제 ICRP의 선량제한 체제를 연관시키기 위해서는 하나의 기본 가정이 필요하다. 이 가정이란 주어진 방사선장에 대하여 그 장내에 있는 피사체 내부의 최대선량당량(MADE, Maximum Dose Equivalent)을 선량제한체제에 적용시킨다면 방사선 피폭으로 인한 위험을 과소평가하지는 않을 것이라는 관점이다. 이러한 관점에서 ICRU는 표준피사체내에서의 MADE를 “선량당량지수”(dose equivalent index)라 정의하고, 이를 측정가능양과 ICRP의 제한적 양과의 교량 역할을 하도록 하였다. 반면 ICRP에서도 선량당량지수를 받아들여 외부방사선 피폭의 2차한도로 적용토록 하였다⁸⁸⁾.

그러나 불행하게도 선량당량지수 그 자체는 엄밀한 의미에서는 측정가능한 양이 아니다. 왜냐하면 지수값은 표준피사체내에서 최대값이며, 이 최대값이 일어나는 위치가 방사선의 선질, 방사선장의 방향특성에 따라 달라지기 때문에 측정자가 어느 위치에 선량계를 설치하여야 할 지 알 수 없기 때문이다. 또한 방사선방어 측면에서 볼 때 선량당량 관계량은 가산성(additive)이 있어야 하나 그 위치가 변함으로 인해 지수량은 가산성이 뒷받침되지 않는다. 다시 말해서 어떤 방사선에 의해서는 최대 피폭을 받았던 인체내의 특정 조직이 선질이나 방향이 다른 방사선에 의해서는 반드시 최대의 선량을 받는다고 볼 수 없기 때문이다. 따라서 선량당량지수는 개념적으로는 그 보수성이 인정되지만 실용적 측면에서 다소의 문제점을 내포하고 있는 것이다.

이 문제의 개선책을 모색하기 위해서 ICRU는 1979년 선량당량을 실용적으로 구하는 법에 관한 분과위원회(ICRU Committee on the practical determination of dose equivalent)를 구성하여 선량당량과 이와 관

e) 중량구성비 : 수소 10.1%, 탄소 12.1%, 질소 4.0%, 산소 73.6%

f) 물질구성(중량비) : 수소 10.5%, 탄소 18.8%, 질소 3.1%, 산소 67.6%

런된 양들을 면밀히 검토하기 시작하였다⁸⁾. 이 분과위원회
 의 주요 임무는 “직접측정가능한 양”으로서 이의
 적용이 ICRP의 선량한도를 준수할 수 있는 양, 즉 실
 용량⁹⁾(operational quantity)을 찾아내는 것이었다.
 다시 말해 실용량은 교정절차에 의하여 측정가능하고
 유도한도의 형식으로 기본한도를 뒷받침할 수 있는 양
 이어야 하였다. ICRU 분과위원회는 이 목적을 위해 선
 량당량지수를 포함한 6종류의 양들을 평가하였다. 즉,

- 비선량당량(非線量當量)
- 조직내 한 점에서의 선량당량
- 실효선량당량
- 지정점선량당량(指定點線量當量, specified-point dose equivalent)
- 지정가내 최대선량당량(指定殼內最大線量當量, maximum dose equivalent in a shell)
- 각평균선량당량(殼平均線量當量, shell dose equivalent)

여기서 마지막 세 양은 표준피사체에서 정의되는 양
 이다. 이때 선량당량 지수는 다섯번 껍의 지정가내 최
 대선량당량에 포함됨에 유의하기 바란다.

이들 후보량들에 대한 평가 기준으로는 다음의 11가
 지 요건들이 채택되었다.

- 통일성(unified)
- 기본한도와 유관성(relatable to primary limits)
- 기존 장비와 부합성(compatible with existing instruments)
- 내구성(durable)
- 측정성(measurable)
- 계산성(calculable)
- 위치지정성(point specific)
- 표준피사체에 근거(based on ICRU sphere)
- 물리적 실제성(physically realizable)
- 단일치(single valued)
- 가산성(additive)

이와 같은 기준에 의거 ICRU 분과위원회에서 앞서
 언급한 6가지 양을 개별 평가한 결과가 표 1에 요약되

g) 다른 적합한 용어가 있을지 모른다.

어있다. 단, 비선량당량은 필수요건인 기본한도와외의 적
 결성을 만족하지 못하므로 제외시켰다.

이 표에서 보듯이 실효선량당량은 그것이 방사선피
 폭의 위험도를 평가하는 데에는 합리적인 양이기는 하
 나 ICRU의 관점에서는 실용량으로 사용하기 어렵다
 는 것을 알 수 있다. 더우기 이 양의 정의에 관계된
 복잡한 인자들은 가까운 장래에 변경될 가능성이 크
 다. 또한 현재 ICRP에서 “기타조직”(remainder)으
 로 분류하고 있는 것은 체내에서 “최대”피폭장기로 유
 보되어 있으므로 가산성이 충분하지 못하다. 각평균선
 량당량은 물리적 실제성이 빈약하고 기본한도에 연계
 가 어려우며 기존 측정장비와 부합하지 않는다. 또한
 지난 10여년간 ICRP 양과 ICRU 양의 교량역할을 해
 온 선량당량지수의 개념을 포함하는 지정가내 최대선
 량당량은 앞서서 언급한 바와 같이 가산성이 박약하다.
 나아가 여기서 열거한 세 양 모두가 계산성이 뒤지고
 측정이 어려우며 점지정값이 아니다. 특히 선량당량지
 수는 본질적으로 위치지정성을 만족할 수 없는 양이다.
 따라서 표 1의 마지막 세 양은 실용량 후보에서 제외
 되었다.

이제 나머지 두 양(일반조직 또는 표준피사체에서
 지정점선량당량)을 방사선장의 형태에 따라 구분하여
 살펴보자. 두 양 모두에 대하여 에너지 합(energy
 summation)은 의미가 없으므로 방사선장은 원천방사
 선장(unmodified), 확장된 방사선장 그리고 정열된 방
 사선장의 세 가지가 고려될 수 있다. 이들 중에서의
 선택을 위해서는 실용량이 사용될 목적을 살펴보아야
 한다.

방사선방어의 실제에서 우리는 이 실용량을 두 가지
 형태의 방사선 감시에 적용하여 선량당량을 평가하게
 될 것이다. 이 두 가지의 방사선 감시란 능동적인 주
 변감시와 수동적인 개인감시이다. 또한 방사선감시대
 상은 심부선량당량과 표층선량당량으로 구분된다. 이
 들 감시형태에 바람직한 실용량은 어떤 것이되는가를
 살펴보자.

인체의 심부에 위치한 장기와 관련된 주변감시는 주
 어진 방사선장에서 개인이 받을 수 있는 선량당량의

표 1. 선량량관계량의 특성평가 결과

Quantity	Status of field	Unified	Relatable to primary limits	Compatible with existing instruments	Durable	Measurable	Calculable	Point Specific	Based on ICRU sphere	Physically Realisable	Single Valued	Additive
Specified-point dose equivalent (body, site)	Unmodified	+	+a	+c	-	+c	-	+	-	+	-	+
	Expanded	+	+a	+b	-	+b	-	+	-	+	+	+
	Exp. & aligned	+	+a	+a,d	-	+d	+d	+	-	+	d	+
	Exp, align., en. sum. ¹⁾	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+0	0
Specified-point dose equivalent (sphere)	Unmodified	+	+a	+c	+	+c	-	+	+	+	-	+
	Expanded	+	+a	+b	+	+b	-	+	+	+	-	+
	Exp. & aligned	+	+a	+a	+	+	-	+	+	+	+	+
	Exp, aligned., en. sum.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum dose equivalent in a shell	Unmodified	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
	Expanded	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-
	Exp. & aligned	+	+	+	+	+e	-	+	+	+	+	-
	Exp, align., en. sum.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Shell dose equivalent	Unmodified	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	+
	Expanded	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+
	Exp. & aligned	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+
	Exp, aligned, en. sum.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Effective dose equivalent	Unmodified	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Expanded	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	Exp. & aligned	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	Expd, align., en. sum.	0	0	0	0	0	+d	+	0	0	+	0

1) energy summation
 + satisfies property
 - does not satisfy property
 0 not relevant
 +a satisfies property for the depths in the range ~0.1mm - ~10mm
 +b satisfies property in the case of area monitoring if low penetrating radiation only is present and shallow organs are considered
 +c satisfies property in the case of individual monitoring, if only tissues adjacent to the dosimeter are considered
 +d satisfies property, provided an incident direction is defined
 +e satisfies property to acceptable accuracy in common monitoring situations

상한선을 추정하는 것으로도 대개는 충분할 것이다(물론 정확한 위험도를 평가할 수만 있다면 이를 받아들이지 않을 이유가 없지만 실제에서는 이런 경우는 흔하지 않다). 인체나 기타 조직내에서 지정점선량당량은, 지속성이 없고 표준피사체를 바탕으로 하지 않으므로 이 목적에 적절하지 못하다. 표준피사체내에서 지정점선량당량도 그 방사선장이 정열되지 않은 경우에는 계산성과 단일치 요건을 만족하지 못하므로, 결국 심부선량당량에 대한 주변감시 목적으로는 정열된 방사선장내의 표준피사체 내부에 있는 한 지정된 점에서의 선량당량이 실용량으로서 가장 적절한 것이다.

정열된 방사선장에서는 표준피사체내 선량분포중 가장 관심있는 위치는 주축 또는 주반경상의 점들이다. 따라서 우리의 관심을 주축상에 집중시키면 지정된 한 점은 표면으로부터의 길이로 표시할 수 있게 된다. 즉 이점에서의 선량당량은 $H^*(d)$ 로 표기할 수 있으며 이것이 곧 Ambient Dose Equivalent이다. 여기서 *는 주축을 나타내는 기호이다. 또한 d 는 mm 단위의 깊이이며 이에 대해서는 다음 절에서 자세히 논의할 것이다.

표층선량당량의 감시에 관해서도 원천방사선장에서 지정점선량당량은 점고유성의 문제로 제외된다. 이 경우에는 정열된 방사선장이 기존 측정기기예의 적응성을 증진시키지 못하고 계산성이나 단일치 조건이 큰 비중을 차지하지 않으므로 단순한 확장된 방사선장에서의 표준피사체내 지정점선량당량이 실용량으로 채택되었다. 이때 지정점은 반드시 주반경상에 있는 것이 아니라 임의로 정의된 기준반경상의 한 점이 된다. 따라서 기준반경의 방향 즉, 기준방향을 설정하는데 따라서 이 점의 위치는 달라지므로 이 실용량은 방향종속이다. 따라서 이 실용량을 Directional Dose Equivalent라 부르며 $H'(d)$ 로 표기한다^{b)}.

개인감시를 목적으로 할 경우에는 선량계를 작업자

의 신체에 착용하기 때문에 인체가 위치하는 곳에서의 선량당량이 기본한도에 직결될 수 있다. 이런 관점에서는 인체팬텀이 그 지속성의 결함에도 불구하고 당연한 실용량 유도 수단이 된다. 특히 인체의 사지(四肢)와 같이 그 크기가 표준피사체의 규격과 큰 차이를 낼 때에는 표준피사체에 근거를 둔 양은 실용량으로 채택하기 어렵다. 따라서 개인감시 목적의 실용량은 인체의 형태에 준하는 적절한 피사체를 바탕으로 하여, 심부선량은 투과력이 강한 방사선에 적절한 깊이에서의 선량당량을 Individual Dose Equivalent(Penetrating)이라 하고 $H_p(d)$ 로 쓰며, 표층선량은 투과력이 약한 방사선에 적절한 깊이에서의 선량당량을 Individual Dose Equivalent(Superficial)라 하고 $H_s(d)$ 라 나타내어 실용량으로 삼는다.

이상에서 살펴본 것이 ICRU 39에서 새로이 주어지게 된 양을 정의하게 된 배경이다. 그러나 아직 이틀 양의 정의에서 도입된 평가점(評價點)의 깊이(d)를 어떻게 결정하느냐 하는 문제가 남아있다. 이 깊이의 값을 결정하기 위해서는 이들 네 양과 기존 양과의 관계를 고찰해 볼 필요가 있다. 왜냐하면 이들 새로운 양이 기존 양과 이로부터 파생된 모든 방사선량평가의 질서를 파괴할 수는 없기 때문이다.

다른 양과의 비교

이 절에서는 새로이 정의된 실용량과 지금까지 의부방사선피폭과 관련하여 선량평가 분야에 도입되었던 다른 양들을 비교함으로써 앞절에서 보류했던 지정된 깊이 d 의 값을 결정하는 과정을 살펴본다. 비교해 볼 양으로는 선량당량지수($H_I : H_{I,d}$ 및 $H_{I,s}$), 실효선량당량(H_E), 인체팬텀내 최대선량당량(MADE)을 대표적으로 들 수가 있겠다.

앞서도 언급한 바와 같이 선량당량지수는 선량당량의 평가를 가능하게 해주는 핵심적인 양으로서 지난 10여년간 우리에게 널리 알려져 온 양이다. 또한 이양은 ICRP에서 2차한도(외부피폭에 대한)로 도입되기도 하였다. 나아가 이 양은 표준피사체가 사지를 제외한 인체를 충분히 잘 근사시킬 수 있다는 가정 아래 개념적

h) ICRU의 이 표기에는 다소 문제가 있는 것으로 생각한다. 즉 directional dose equivalent가 방향종속이면 그 표기에는 방향(기준방향)을 나타내는 변수가 나타나야 원칙이다. 그래서 필자는 이 표기로 $H'd(Q_0)$ 의 사용을 제안한 바 있다(9). 이 경우 다른 세양의 기호도 일관성 있게 변경되어야 할 것이다(예를 들면 H^*d , $H'pd$, $H'sd$)

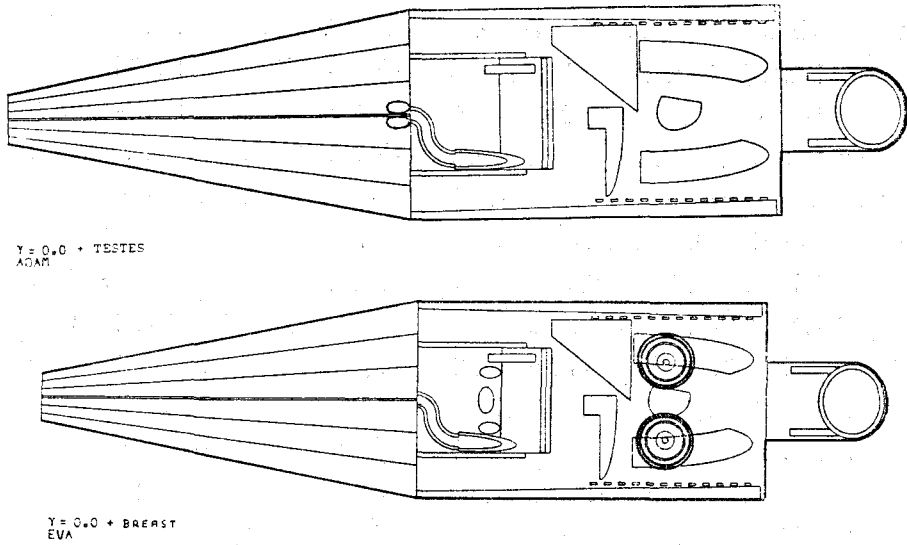


그림 2. MIRD형 인체팬텀 ADAM 및 EVA의 외형 (Ref. 11)

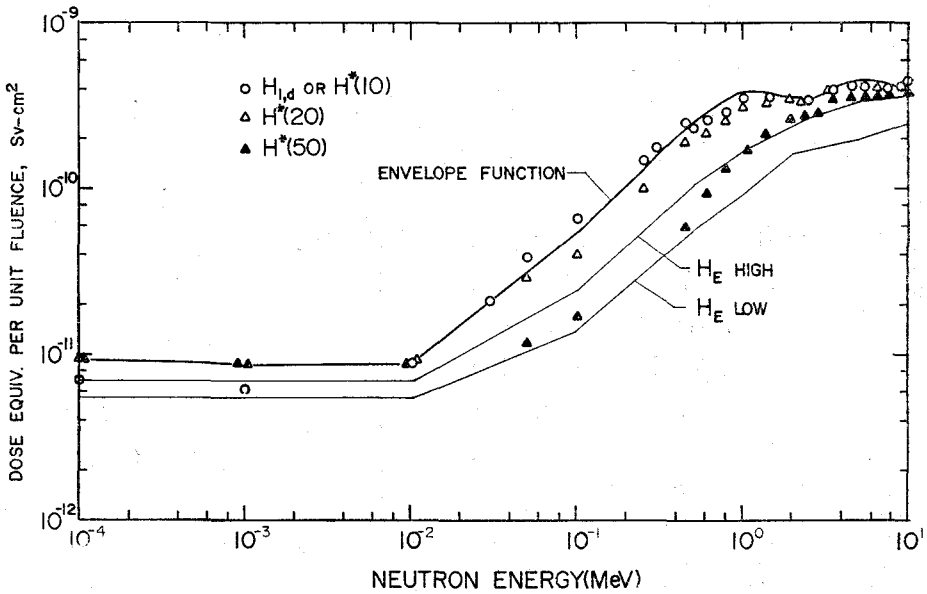


그림 3. 심부선량당량에 관한 중성자 감응함수. $H_{1,4}$ 와 $H^*(10)$ 은 매우 근사한 값을 가지므로 같이 표시하였다(자료 : ○ Refs. 9, 14, 15, 16; △ Refs. 9, 14, 15; Envelope function Ref. 12; H_E Refs. 12, 17)

으로 보수적인 특성을 가지고 있어 방사선방어의 측면에서 수긍이 가는 양이다. 그러므로 새로운 양인 실용량이 어떻게 이 선량당량지수를 대변할 수 있는가하는 점이 중요하다.

실효선량당량은 MIRD형¹⁰⁾ 인체팬텀인 ADAM과 EVA(그림 2 참조)를 이용하여 방사선장(정렬된)에서

의 인체내 각 장기가 받는 선량당량에 ICRP에서 권고한 가중치를 곱하여 계산한 것이다. 중성자에 대해서는 Burger 등¹²⁾이, 광자(光子, photon)에 대해서는 Kramer 등¹¹⁾이, 그리고 고에너지 전자에 대해서는 Müller 등¹³⁾이 실효선량당량의 계산에 많은 노력을 하였다.

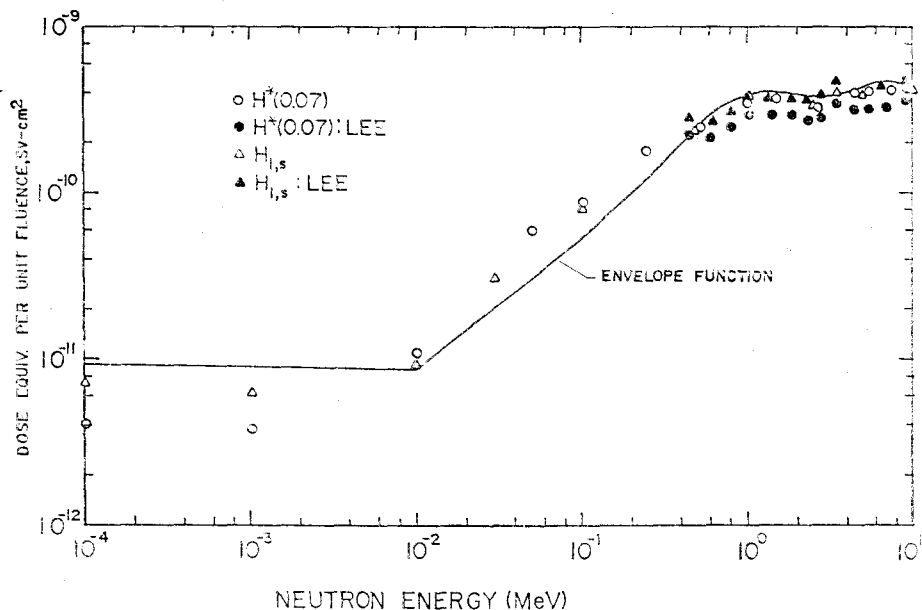


그림 4. 표충선량당량에 관한 중성자 감응함수(자료 : ○ Refs. 14, 15, 16; △ Refs. 16, 18)

먼저 중성자에 대해서 비교해 보자. 그림 3은 피사체의 비교적 깊은 위치에서의 선량당량에 관계되는 양들을 보이고 있다. 여기서 봉입함수(envelope function)는 인체펜텀내에서의 각 장기가 받는 선량당량의 최대값을 연결한 선으로서 표충의 선량당량(눈의 피폭시)도 포함하고 있다. 또한 실효선량당량의 변역은 인체펜텀(비등방)의 피폭 방향에 따라 변하는 폭을 나타낸다. 여기서 알 수 있듯이 선량당량지수 $H_{1,d}$, $H^*(10)$ 및 $H^*(20)$ 은 실효선량당량에 비해 피폭의 위험도를 다소 보수적으로 과대평가하고 있으며 봉입함수와 비슷한 값들을 가진다. 다만 $H^*(50)$ 은 기준점을 너무 과다하게 깊이 옮겼음을 시사하고 있다. 따라서 깊이 10 mm 내외의 어떠한 값도 Ambient dose equivalent $H^*(d)$ 를 결정하는 깊이의 값으로 채택될 수 있다. 그러나 10 mm 라는 값이 인체의 보편적인 피부층 두께에 해당

하며 표준피사체의 내각(內殼)과 구심(球心)의 경계면에 해당하므로 $H^*(d)$ 의 값으로 10 mm 를 우선적으로 채택함이 타당하다. $H_p(d)$ 의 d 값에 대하여도 또한 같다.

한편 표충선량당량을 비교한 것은 그림 4와 같다. ICRU 에서는 심부선량당량에서와 같은 논리에 따라 0.07 mm 를 $H'(d)$ 및 $H_s(d)$ 의 깊이 d 값으로 채택하였다. 그러나 여기에는 다소 재고의 여지가 없지 않다. 즉 표충에서의 선량당량분포는 소위 빗비침효과(ear effect, pole effect)¹⁾로 인해 주축이 아닌 곳에서 최고치가 나타나므로 $H^*(0.07)$ 과 $H_{1,5}$ 또는 봉입함수와는 상당한 격차가 있다. 따라서 투과력이 있는 방사선에 대해서는 $H^*(0.07)$ 보다 $H^*(10)$ 이 더욱 $H_{1,5}$ 에 가깝다. 그러므로 $H'(d)$ 의 지정 깊이를 정할 때에는 투과력이 강한 방사선장에 대해서는 $d=10$ mm 로, 베타입자와 같이 약한 투과력을 가진 방사선에 대해서는 $d=0.07$ mm 로 구분함이 낫지 않을까 생각한다. ($H_s(d)$ 는 그 방사선질이 규정되어 있으므로 문제되지 않음).

광자나 전자 방사선에 대해서도 대동소이한 결론을

i) Ear effect 또는 pole effect 는 선량당량분포에서 주축부근보다 ear(그림 1참조) 또는 pole 이라 불리는 축방에서 높은 값을 보이는 경우를 말한다. 여기서 이 효과를 빗비침 효과로 번역한 것은 달리 적절한 용어가 떠오르지 않아서이며 적역보다 그 원인(표면에 방사선이 경사지게 입사하는 것)에 중점을 두고 선택한 어휘이다. 원어를 살린다면 “극지효과(極地效果)”도 무방하다고 본다.

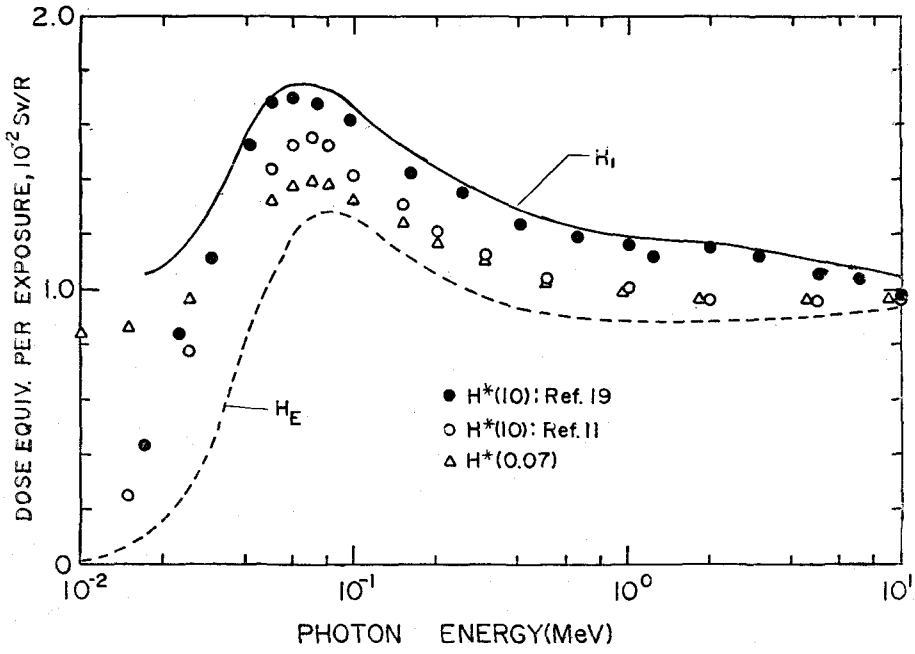


그림 5. 감마선 감응함수(자료 : H_I Ref. 19; H_E Ref. 11; $H^*(0.07)$ Ref. 11)

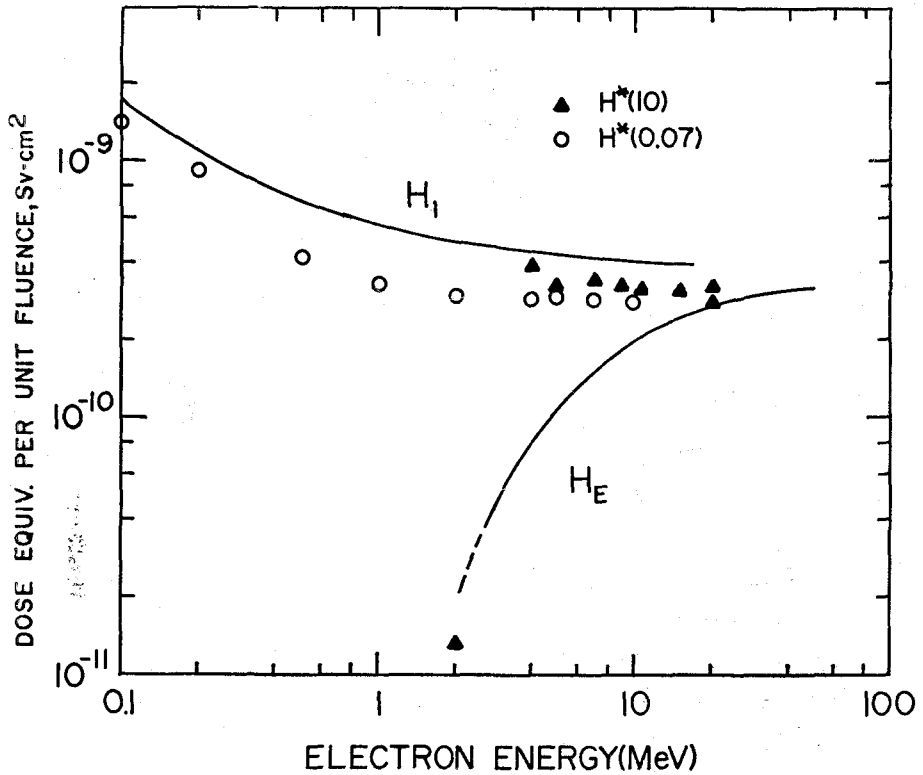


그림 6. 고에너지 전자의 감응함수(자료 : Ref. 13)

		Measurable quantities:	
		Calibration quantity (for primary standard)	
		Calibration quantity (for secondary standard)	
Limiting quantities:	Primary limit	Secondary limit	Operational quantity/ derived limit

그림 7. 실용량과 다른 양과의 관계(ICRU 분과위원회)

도출할 수 있으나 여기서 구체적인 설명은 반복하지 않고 해당 자료들만 보이겠다(그림 5 및 6 참조).

앞으로의 전망

위에서 살펴본 바와 같이 지금까지의 선량당량평가 수단이었던 선량당량지수를 근거로 하여 새로운 실용량들이 정의되었다. 즉 이들 신규 양의 개념적 근거는 그 값이 선량당량지수의 좋은 근사치가 된다는 것이다. 그렇더라도 실제에서 선량당량지수와 실용량이 공존하면서 어떠한 관계를 지속할 것인가 하는 점이 다소 궁금하다.

ICRU의 현재 개념을 도시한 것이 그림 7이다. 즉, 실용량은 ICRP 계열의 양인 한도량(횡축)과 ICRU 계열인 측정량(종축)의 교차점에 위치하여 방사선방어와 방사선측정을 연결시키는 역할을 한다. 돌이켜보면 과거에는 선량당량지수에게 이 역할을 맡기고자 했던 것이나 앞서 밝힌 바와 같이 당량지수 그 자체가 엄밀한 의미에서 측정가능한 양이 아니었다. 그림의 체계를 다시 한번 살펴보면 현재 ICRP에서 외부피폭에 관한 2차 한도로 정하고 있는 선량당량지수는 본래 ICRU 계열의 양임에도 이제는 ICRU 계열에서의 기능은 지양된 상태에서 ICRP 계열로 넘어와 있는 것을 알 수 있다.

ICRP 계열에서는 선량당량지수가 꼭 필요한가? 물론 실용량을 도출하는 과정에서 근간이 되는 개념은 그 실용량이 선량당량지수(이 양은 방사선방어 측면에서 강한 개념적 뒷받침이 있다)에 충분히 근사하다는

것이였다. 그러나 이미 실용량이 정의된 시점에서는 선량당량지수의 의미는 중요하지 않는 것 같다. ICRP의 입장에서 실용량을 “선량당량지수에 근거를 둔량”이라는 개념을 벗어나 가령 “피사체내에서 방사선피폭의 위험도를 대표할 수 있는 양”으로 그 의미를 부여한다면 선량당량지수는 굳이 존재할 필요가 없는 양이 될 것이다. 방사선방어의 실제에서도 앞으로 실용량이 보편화되면 그 모체인 선량당량지수는 점차 잊혀져 갈 것으로 보인다¹⁾. 노병은 죽지 않고 사라지게 마련인가?

참 고 문 헌

- 1) International Commission on radiation Units and Measurements, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, ICRU Report 39, Bethesda, Maryland (1985).
- 2) International Commission on Radiation Units and Measurements, Radiation Quantities and Units, ICRU Report 33, Bethesda, Maryland (1980).
- 3) International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, Annals of the ICRP, 1, No. 3, Pergamon Press, New York (1977).
- 4) International Commission on Radiological Protection, “Statement from the 1978 Stockholm meeting of the ICRP”, Annals of the ICRP, 2, No. 1, Pergamon Press, New York (1978).
- 5) W.S. Snyder and J. Neufeld, “Calculated depth

j) 전술한 ICRU 분과위원인 Dr. A.B. Chilton의 말을 빌리면 선량당량지수는 Dr. H.O. Wyckoff가 ICRU 위원장으로 있는 한은 생존한다. 왜냐하면 그가 선량당량지수 개념의 주장자였기 때문에.

- dose curves in tissue for broad beams of fast neutrons”, *Brit. J. Radiol.*, **28**, 342-350(1955).
- 6) J.A. Auxier, W.S. Snyder, and T.D. Jones, “Neutron Interaction and Penetration in Tissue”, In: *Radiation Dosimetry*, Vol. 1, pp.275-316, Academic Press (1968).
 - 7) International Commission on Radiation Units and Measurements, *Radiation Quantities and Units*, ICRP Report 19, Washington D.C. (1971).
 - 8) Private Communication, A.B. Chilton, University of Illinois at Urbana-Champaign.
 - 9) J.K. Lee, Assessment of quantities for radiation protection in the ICRU sphere for intermediate energy neutrons, Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign (1985).
 - 10) W.S. Snyder, M.R. Ford, G.G. Warner and H. L. Fisher, “Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources of a heterogeneous phantom”, MIRD Pamphlet No. 5, revised, *J. Nucl. Med.*, Supplement No. 3, Vol. **10**(1978).
 - 11) R. Kramer and G. Drexler, “On the Calculation of the Effective Dose Equivalent”, *Radiat. Protection Dosimetry*, **3**, No. 1, pp.13-24 (1982).
 - 12) G. Burger and G. Williams, “Organ doses and risks from neutron exposure, Proceedings, Seminar on Neutron Cancer Risk, Delft 1982.
 - 13) U. Müller, D. Harder and U. Rosenow “Berechnung von effektiven Äquivalentdosen und Organdosen für äußere Exposition durch Elektronenstrahlung”, *Medizinische Physik*, pp.715-718, Huthig-Verlag, Heidelberg (1981).
 - 14) S-Y. Chen and A.B. Chilton, “Calculation of fast neutron depthdose in the ICRU standard tissue phantom and the derivation of neutron fluence-to-dose-index conversion factors”. *Radiat. Res.*, **78**, 335-370(1979).
 - 15) Y-L. Shiue and A.B. Chilton, “Calculation of low energy neutron dose indices and depth doses in the ICRU tissue sphere”, *Radiat. Res.*, **93**, 421-443(1983).
 - 16) A Morhart, G. Hanofner, D. Combecher and G. Burger, “The calculation of index quantities for fast neutrons”, In: Proceedings of the fourth symposium on neutron dosimetry, Munich-Neuherberg, Germany, June. 1-5, 1981, EUR-7748EN, Vol. 1, pp.81-92, Commission of the European Community, Luxembourg (1981).
 - 17) G. Burger, A. Morhart, P.S. Nagrajan and A. Wittmann, “Conversion functions for primary and operational quantities in neutron radiation protection”, op. sit. Ref. 16, pp.33-48(1981).
 - 18) A. Morhart and G. Burger, “Axial kerma and dose equivalent for neutrons in the ICRU-sphere”, Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung mbH München, Report GSF-Rericht S-1072 (1984).
 - 19) P.J, Dimbylow and T.M. Francis, A Calculation of the photon depth-dose distributions in the ICRU sphere for a broad parallel beam, a point sources and isotropic field, National Radiological Protection Board Report, NRPB-R 92, Oxon, England (1979).

The Underlying Concept of the ICRU Report 39

Jai Ki Lee,

*Radiation Protection Department, Nuclear Safety Center
Korea Advanced Energy Research Institute*

= Abstract =

The four new operational quantities for the practical determination of dose equivalents from external radiation [sources, defined in the ICRU report 39, are reviewed from the viewpoint of the underlying concept, the relationship to the existing quantities, and the expected role in the radiation protection practice and in the radiation measurements.