

방사선량의 측정, 평가에서 선량당량(dose equivalent) 과 등가선량(equivalent dose)의 정의 및 차이

장시영

한국원자력연구소

요 약

국제방사선방어위원회(ICRP)는 최근의 권고 60(1990)에서 이전의 권고 26(1976)에는 없었던 새로운 용어들을 도입하였다. 이 중에서도 동 위원회는 지금까지 사용되어왔던 국제방사선단위 및 측정위원회(ICRU) 개념의 “선량당량(dose equivalent)”을 대체하는 용어로 “등가선량(equivalent dose)”을 새로 정의하여 방사선방어 프로그램에의 적용을 권고하고 있다. 그러나 한편 동 위원회는 선량 당량이라는 용어도 여전히 채택하고 있기 때문에 경우에 따라 두 양의 사용시 불필요한 혼동을 불러 일으킬 수가 있다. 따라서 본 해설문에서는 방사선 방어, 관리 및 측정분야 종사자들의 이해를 돕기 위하여 두 양의 정의와 사용상의 차이점에 대하여 정리하였다.

Key words : 선량당량, 선질인자, 등가선량, 방사선가중인자, 유효선량, 조직가중인자, 실용량.

1. 선량당량 및 등가선량의 정의

지금까지 우리는 전리방사선의 인체피폭 및 흡수에 따른 생물학적 효과를 방사선 방어목적의 물리량으로 표현하기 위하여 다음과 같은 선량당량(dose equivalent)의 정의를 사용하여 왔다 [1,2].

$$H = D \cdot Q \quad \dots\dots(1)$$

이 식에서 D는 조직 또는 장기의 흡수선량(엄밀한 의미에서 D는 어떤 조직 또는 장기의 한 점 흡수선량임), Q는 방사선의 선질인자(quality factor)로 조직 또는 장기의 한 점에 흡수되는 방사선의

에너지와 종류에 따라 다르게 나타나는 생물학적 효과를 같도록 보정하는 무차원의 가중치이다[3, 4]. 이러한 관점에서 엄밀히 말하면 선량당량 H는 방사선 흡수로 인한 생물학적 효과가 방사선의 선질인자에 가중된 흡수선량(weighted absorbed dose) [4]인 셈이다.

선질인자 Q는 하전입자가 단위거리를 진행하면서 잃는 에너지(dE/dl)로 정의되는 무제한 선형에너지전달(unrestricted linear energy transfer, L, keV · μm⁻¹) 또는 동의어인 방사선의 수중충돌저지능(stopping power)의 함수로 표1과 그림1과 같이 주어진다[2]. 그림에서 보이는 바와 같이

표 1. 무제한 선형에너지(L)와 선질인자(Q)의 함수관계[2].

L in water (keV μm^{-1})	Q
<3.5	1
7	2
23	5
53	10
175	20

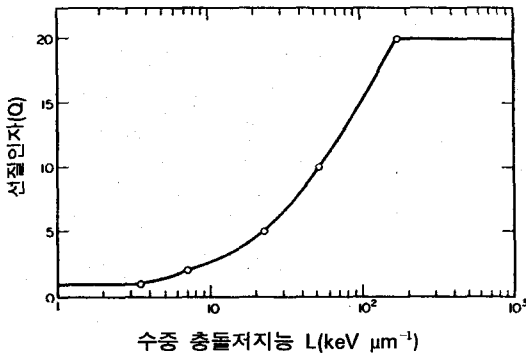


그림 1. 수중충돌저지능에 따른 선질인자의 변화 (표1 참조) [2].

방사선의 수중충돌저지능 L의 값이 클수록 선질인자의 값은 증가하며 따라서 이로 인한 조직 또는 장기의 생물학적 상해효과가 커진다.

그러나 현실적인 방사선 방어 및 관리실무에서는 선질인자나 이에 의하여 보정되는 선량당량을 구하기 위하여 인체 관심위치의 장기 또는 조직의 한 점으로 들어오는 방사선의 종류와 에너지 스펙트럼을 해석하고 물분자와 충돌, 저지되는 방사선 충돌저지능을 측정하는 것은 거의 불가능하기 때문에, ICRP는 여러 방사선에 대하여 조직 또는 장기의 한 점에 대한 선질인자 Q의 충분한 근사값으로 표 2와 같은 유효선질인자(effective quality factor) \bar{Q} 를 제안, 사용해 왔다[2].

표 2. 여러 방사선에 대한 유효선질인자[\bar{Q}] [2].

방사선	유효선질인자(\bar{Q})
· X선, 감마선, 전자	1
· 중성자, 양성자 및 정지 질량이 1 amu 이상이며 에너지를 알 수 없는 단일대전입자	10
· 열중성자	2.3
· 알파입자, 다중대전입자 및 에너지와 하전량을 알 수 없는 입자	20

그러나 ICRP는 1990년의 새로운 권고-60[4]에서 방사선 생물학분야의 최근 연구결과와 여러 다양한 피폭조건 및 선량당량의 전통적 계산결과에 대한 정보 등을 검토하여 기존의 선질인자 \bar{Q} 대신에 방사선가중인자 W_R 을 도입하여 인체의 조직 또는 장기 T에 평균적으로 흡수되는 방사선 R의 선질에 의하여 가중되는 흡수선량 D_{TR} 을 고려하여 이를 방사선 R의 조직 또는 장기 T에 대한 등가선량(equivalent dose) H_{TR} 로 다음과 같이 정의하였다.

$$H_{TR} = D_{TR} \cdot W_R \quad \dots\dots(2)$$

여기에서 W_R 은 방사선가중인자(radiation weighting factor)로 선질인자 Q의 새로운 이름이며 외부조사 방사선 또는 체내섭취된 방사선원에서 방출하는 에너지와 방사선의 종류에 따라 다르게 주어진다. 이 값은 위원회에서 새로 도입한 표3의 무제한 선형에너지전달 L과 기존선질인자 Q간의 관계식을 이용하거나 다음의 표4에 제시된 값으로 주어진다. 표4에 제시되지 않은 방사선의 종류와 에너지에 대해서는 국제방사선단위 및 측정위원회(ICRU)에서 권고하고 있는 구형 팬텀[1]의 10 mm 깊이에서의 유효선질인자 \bar{Q} 를 계산하고 이

장시영: 방사선량의 측정, 평가에서 선량당량(dose equivalent)과 등가선량(equivalent dose)의 정의 및 차이 3

값을 W_R 의 근사치로 한다[4].

$$W_R \doteq \bar{Q} = \left(\frac{1}{D}\right) \int_0^{\infty} Q(L) \cdot D(L) \cdot dL \quad \dots(3)$$

여기서 $D(L)$ dL 은 10mm 깊이에서 무제한 선형 에너지전달 $L \sim L+dL$ 사이에서의 흡수선량이며, $Q(L)$ 은 L 의 함수로 주어지는 선질인자이다(표3). 여러 종류의 방사선과 에너지로 구성된 방사선장내 인체의 총등가선량은 다음식과 같이 각 방사

표 3. ICRP 권고 60의 Q-L 함수관계[4].

L in water (keV μm^{-1})	Q(L)
<10	1
10~100	0.32 $L^{-0.2}$
>100	$300/\sqrt{L}$

표 4. 여러 방사선의 방사선가중인자(W_R) [4].

방사선 및 에너지 범위 ¹⁾	W_R
· 광자; 전에너지 범위	1
· 전자 및 뮤온; 전에너지 범위 ²⁾	1
· 중성자 ³⁾ ; 에너지 <10 keV	5
10 keV~100 keV	10
>100 keV~2 MeV	20
>2 MeV~20 MeV	10
>20 MeV	5
· 양자(반양자제외); 에너지 > 2 MeV	5
· 알파입자, 핵분열생성물, 중원자핵	20

- 방사선가중인자는 선질인자의 새로운 이름임.
- ¹⁾ 이표에 기술되지 않은 방사선과 에너지에 대한 W_R 값은 ICRU 구의 10mm 깊이에서의 유효선질인자 Q 를 계산하여 구함 (식 4 참조).
- ²⁾ DNA 결합핵에서의 방출되는 오제(Auger) 전자는 제외
- ³⁾ 에너지의 함수로 W_R 값의 이론적 근사계산식 $W_R = 5 + 17 \exp[-\{\ell \ln(2E)\} / 6]$, E [MeV]

선에 의한 등가선량의 합이다.

$$H_T = \sum_P D_{T,R} \cdot W_R \quad (4)$$

2. 두 양의 차이점

1) 등가선량

등가선량은 원칙적인 관점에서 볼 때 우리가 보통 방사선량 또는 선량이라고 부르는 용어의 뜻에 훨씬 가깝다[4]. 방사선에 피폭됐을 때 인체의 조직 및 장기에 흡수된 방사선 에너지에 의한 생물학적 상해효과가 방사선의 선질(Quality)에 따라 다르게 나타나기 때문에 선질(quality)에 따른 가중치(weighting value)를 부여하여 이를 물리적으로 등가(equivalent)인 선량으로 고려한 것이다. 그러나 방사선 생물학 연구결과와 방사선위험평가의 연구결과를 보면[4] 같은 등가선량이라 할 지라도 방사선 피폭으로 인한 확률적 영향의 발생정도(확률)는 피폭조직 및 장기에 따라 다르게 나타난다. 따라서 ICRP는 권고-60에서 이를 물리적인 동일량으로 나타내기 위하여 이전의 권고-26의 유효선량당량 H_E 를 확대발전시킨 유효선량(effective dose) E [4]를 도입하였다. 유효선량(엄밀히 말하면 유효등가선량이 되어야 할 것이다) E 는 다음의 식과 같이 정의된다.

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T$$

$$= \sum_R W_R \cdot \sum_T W_T \cdot W_{T,R} = \sum_T W_T \cdot \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad \dots\dots(5)$$

H_T 는 식(2), (3)에서 정의된 인체의 조직 및 장기 T에서의 등가선량이며, W_T 는 조직가중인자로 조직 및 장기 T의 방사선피폭으로 인한 확률적 효과의 발생확률 정도에 따라 가중치를 부여한 것이다. 이런 관점에서 유효선량 E 는 인체조직 및 장기로 흡수되는 방사선의 가중인자 W_R 과 피폭조직의 확률적 상해효과를 고려하는 조직가중인자

W_T 에 의하여 두번 가중된 흡수선량(a doubly weighted absorbed dose)이라고 할 수 있다. 표5는 인체의 각 장기 또는 조직의 흡수선량에 대한 확률적 효과의 정도를 보여주는 조직가중인자 W_T 의 값을 보여준다.

표5. 유효선량 평가를 위한 조직가중인자(W_T) [4]¹⁾

조직 또는 장기	W_T
생식기(선)	0.20
적골수(red bone marrow)	0.12
직장(colon)	0.12
허파	0.12
위	0.12
방광	0.05
유방(breast)	0.05
간	0.05
식도	0.01
골표면	0.01
기타장기	0.05 ^{2, 3)}

¹⁾ 전 연령의 동수의 표준남녀인구집단으로부터 유도, 작업자 및 일반인에게 공히 적용.

²⁾ 기타장기:신장 및 주위(kidney and adrenals), 뇌, 대장상부, 소장, 근육, 췌장, 비장, 흉선(thymus), 자궁 및 기타 분류가능한 장기.

³⁾ 예외: 열거한 기타장기중의 하나가 W_T 가 밝혀진 다른 장기의 최대허용선량이상으로 피폭될 경우에는 동 장기의 W_T 값으로 0.025, 나머지 장기에 대하여 0.025를 적용.

이러한 관점에서 등가선량 및 유효선량은 방사선생물학과 방사선위험평가의 연구결과에 근거하여 방사선방어의 목적상 방사선피폭에 의한 인체의 확률적 효과를 용인할 수 있는 수준까지 제한하기 위하여 이론적으로 유도된 개념이라 할 수 있다.

2) 선량당량

그러나 방사선방어목표를 달성하기 위하여 실제적으로 수행되는 직업환경방사선 모니터링 또는

개인방사선 모니터링의 관점에서 볼 때, 방사선의 흡수에 의한 생물학적 효과에 기초하여 이론적으로 유도되는 조직의 등가선량 H_T 나 이로부터 유도된 유효선량 E 는 물리적으로 직접측정이 불가능하다. 그 이유는 이를 측정할 적절한 선량계가 있다하더라도 인체의 각 장기 또는 조직에 선량계를 직접 삽입하여 측정하는 것은 불가능하기 때문이다.

따라서 1985년 국제방사선단위 및 측정위원회(ICRU)는 보고서 39[5]에서 방사선방어를 물리적으로 달성하기 위하여 환경(또는 지역) 모니터링 및 개인방사선 모니터링에 대한 실용량(operational quantity)을 제안하였다. 이 양은 당량은 현실적으로 특정 방사선장에서 조사되는 ICRU 구형 팬텀[1]의 한 점에서 방사선계측기나 개인방사선량계를 이용하여 물리적으로 측정가능한 량(point quantity)으로서 ICRU는 이어지는 보고서 43[6] 및 47[7]에서 이를 발전시켜 왔다.

환경(지역) 모니터링은 어떤 환경 또는 지역에서 작업하는 개인의 방사선피폭이 관련 방사선방어의 관련 (등가)선량한도를 초과하지 않도록 방사선장을 규명하거나 측정, 관리하기 위하여 수행된다. 환경의 어느 한 점에서의 방사선장은 대개 플루언스, 스펙트럼플루언스 또는 공기중 커마와 같은 량으로 나타내어지며, 특정방사선장에 대하여 적절히 교정된 방사선계측기를 이용하여 특정위치에서의 측정값으로 주어진다[6,7].

개인 모니터링은 개인의 피폭선량이 방사선방어의 (등가)선량한도 이상으로 초과되는 것을 방지하는 것으로 개인피폭선량의 평가, 관리 및 기록유지를 위하여 수행된다[6,7]. ICRU는 개인방사선 모니터링의 측정가능한 실용량으로 인체표면의 깊이 d 에 있는 조직 또는 장기의 선량당량인 개인선량당량(personal dose equivalent) $H_p(d)$ [7]의 적용을 제안하였다. 이 양은 개인선량계를 이용하여 측정이 가능하며, 개인방사선량계는 착용

위치인 신체의 한 부분으로 입사된 방사선에 의한 선량당량을 심부선량당량 $H_p(10)$, 피부선량당량 $H_p(0.07)$ 으로 수정체선량당량 $H_p(3)$ 으로 측정하며, 이 값으로부터 개인의 방사선량을 유효선량의 근사치 또는 상한치로 예측 평가한다. 이를 위해서는 개인선량계의 방사선교정 및 성능평가가 요구되며, 방사선교정은 특정방사선장에 위치한 교정용 팬텀 위치에서 방사선에 조사된 개인선량계로부터 측정된 선량당량값을 평가하므로서 수행된다. 따라서 개인방사선 모니터링 또는 피폭관리업무는 특정방사선장에 대하여 적절히 교정된 개인선량계를 이용하여 방사선방어목적의 이론적 등가선량을 방사선관리목적의 물리적 선량당량으로 평가하는 것이다.

3. 검토 및 고찰

지금까지 살펴본 바와 같이 ICRP 권고-60[4]에서 새로 제안한 등가선량개념과 이전의 권고-26[2]의 선량당량개념의 기본적인 유도배경과 물리적 의미는 원칙적으로 거의 같다고 할 수 있으나 방사선방어를 위한 방사선량(이를 ICRP는 등가선량 및 실효선량으로 제정의)의 측정, 평가의 실무적 관점에서 보면 두양의 적용방법에 있어서 약간의 개념적 차이와 괴리가 존재한다.

독자들의 이해를 돕기 위하여 지금까지 설명된 두양의 정의, 차이점 및 관련사항들을 요약하여 표로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

등가선량 Equivalent Dose (Sv, rem)	선량당량 Dose Equivalent (Sv, rem)
<ul style="list-style-type: none"> ICRP-60 제안 $H_{T,R} = D_{T,R} \cdot W_R$ $H_T = \sum_T D_{T,R} \cdot W_R$ $W_R \equiv \bar{Q}$	<ul style="list-style-type: none"> ICRU 제안, ICRP-26 채택 -ICRU-19, 25, 39, 43, 47 $H = D \cdot Q$ $\equiv D \cdot \bar{Q}$ $Q = (1/D) \int_0^\infty Q(L) D(L) dL$
<ul style="list-style-type: none"> 유효선량; ICRP $E = \sum_T H_T \cdot W_T$ $= \sum_T W_T \cdot \sum_P D_{T,R} \cdot W_R$ <p>: 같은 조직등가선량이라도 피폭조직의 확률적 영향을 고려하는 가중치 W_R을 도입</p>	<ul style="list-style-type: none"> 실용선량당량(operational dose equivalent quantity); ICRU -환경모니터링량 $H^*(d)$; 주변선량당량 $H'(d)$; 방향선량당량 -개인모니터링량 $H_p(d)$; 개인선량당량 방사선 방어의 이론적 유효선량을 실무적으로 측정하기 위하여 도입 - 물리적 검출기, 선량계의 교정후 측정가능 - (단일)점(point) 값
<ul style="list-style-type: none"> 방사선의 선질과 조직의 확률적 상해효과를 고려하여 이론적으로 유도 - 측정불가능 - 평균(volume averaged)값 	<ul style="list-style-type: none"> 방사선 방어의 이론적 유효선량을 실무적으로 측정하기 위하여 도입된 실용적 개념인 셈이나 앞으로 두 위원회의 합의에 의하여 용어가 통일이 될 수 있음.

- 주1: 조직등가선량 및 선량당량은 원칙적으로 같은 의미를 갖고 있음. 단지 ICRP는 ICRU의 선질인자(\bar{Q})를 방사선가중인자(W_R)로 개명.
- 주2: 실제로 ICRP, ICRU 두 위원회는 비록 그 기본정의의 배경이 같아도 두 용어명칭의 상이함으로 인하여 오는 불필요한 혼동과 괴리를 없애기 위한 협의를 진행하고 있음. 이러한 관점에서 볼 때 등가선량 또는 유효선량은 ICRP가 방사선방어를 위하여 사용하고 있는 이론적, 원칙적인 개념이며, 선량당량은 이를 ICRU가 방사선량 측정(dosimetry) 실무에 적용하기 위하여 도입된 실용적 개념인 셈이나 앞으로 두 위원회의 합의에 의하여 용어가 통일이 될 수 있음.

표 6. ICRP-60에 따른 방사선방어 관련용어의 변경

ICRP-26(76)	ICRP-60(90)
· 선량당량 Dose equivalent	등가선량 Equivalent dose
· 연간 선량당량한도 Annual dose equivalent limit	연간 등가선량한도 Annual equivalent dose limit
· 유효선량당량 Effective dose equivalent	유효선량 Effective dose
· 예탁선량당량 Committed dose equivalent	예탁등가선량 Committed equivalent dose
· 선량당량예탁 Dose equivalent commitment	등가선량예탁 Equivalent dose commitment
· 예탁유효선량당량 Committed effective dose equivalent	예탁유효선량 Committed effective dose
· 집단선량당량 Collective dose equivalent	집단등가선량 Collective equivalent dose
· 집단유효선량당량 Collective effective dose equivalent	집단유효선량 Collective effective dose

4. 결 론

앞에서의 설명을 종합하면 다음과 같이 정리된다.

- 1) 원칙적으로 이론적, 개념적인 방사선 방어를 달성하기 위하여 도입되는 방사선의 선량당량과 등가선량간에는 차이가 없다.
- 2) 실질적인 방사선의 측정 및 관리실무분야에서는 방사선장의 세기를 선량당량으로 측정하여 이를 등가선량으로 고려한다.
- 3) 방사선 관리는 방사선방어를 위하여 이론적

으로 유도된 측정불가능한 등가선량을 방사선계측기 또는 개인선량계를 이용하여 선량당량으로 측정, 평가하는 행위이다.

- 4) 따라서, 앞으로 국내에서는 ICRP와 ICRU간에 용어합의가 이루어질 때 까지 등가선량과 선량당량이라는 용어를 혼용할 수는 있으나 방사선측정실무에서는 선량당량을, 이론적인 방사선방어를 얘기할 경우에는 다음의 표6과 같이 선량당량이라는 용어를 등가선량으로 대체사용하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. ICRU, "Conceptual Basis for the Determination of Dose Equivalent", ICRU Report 25, Bethesda, Maryland (1976).
2. ICRP, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 26, Annals of the ICRP, Vol. 1(3), (1977).
3. ICRU, "The Quality Factor in Radiation Protection", ICRU Report 40, Bethesda, Maryland (1986).
4. ICRP, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, Vol. 21(1~3), (1990).
5. ICRU Report 39, "Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources", Bethesda, Maryland (1985).
6. ICRU Report 43, "Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources-Part 2", Bethesda, Maryland (1988).
7. ICRU Report 47, "Measurement of Dose

Equivalents from External Photon and Electron Radiations", Bethesda, Maryland (1992).

Definition and Difference between Dose Equivalent and Equivalent Dose in Radiation Dose Measurement and Evaluation

Si-Young Chang
Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

In its recent recommendation No. 60(1990), ICRP has newly introduced several terminology which had not existed in its prior recommendation No. 26(1977). Of these, a newly defined quantity "Equivalent Dose" replacing the "Dose Equivalent" of the ICRU concept has been recommended to be adopted in the radiation protection programme. However, since the committee still uses the "Dose Equivalent" and "Equivalent Dose" in its several publications, it is likely to provoke unnecessary confusions and misuses in applying these two quantities. In this paper were described the definition and difference between these two quantities to help in understanding of these two quantities among the person involved in the radiation protection activities.

Key words : dose equivalent, quality factor, equivalent dose, radiation weighting factor, effective dose, tissue weighting factor, operational quantity.