

방사선 장해방어

한국원자력안전기술원
구영모 선임연구원



Contents

I

방사선량 단위

II

방사선량 평가

III

방사선의 인체 영향

IV

방사선 방호 체계 및 원칙

I. 방사선량 단위

흡수선량(D)



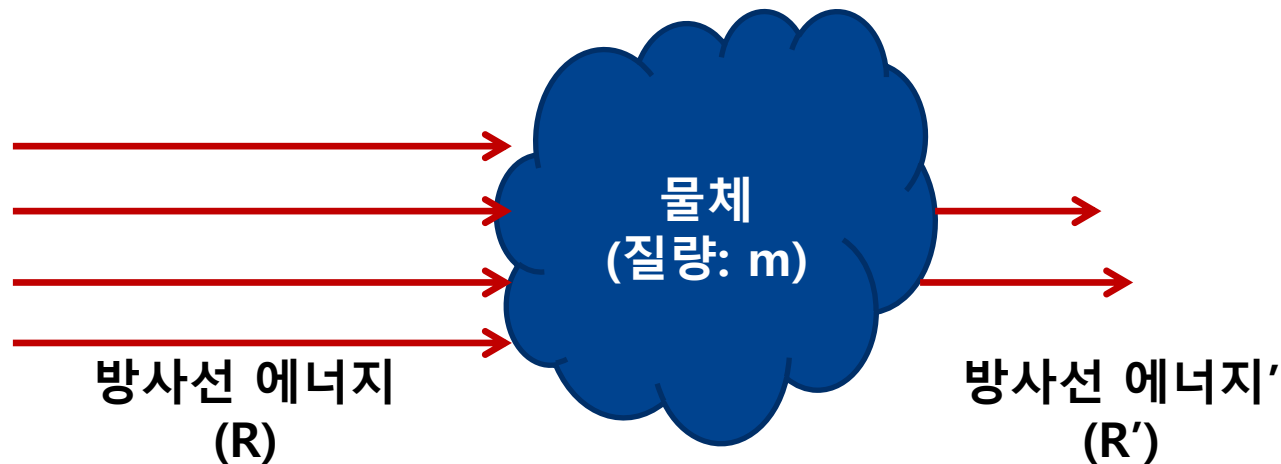
Louis Harold
Gray
(1905-1965)

☀ 흡수선량(Absorbed Dose)이란?

- 정의: 물체 단위질량 당 흡수된 방사선 에너지량
- 단위: J/kg (Gy), $1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

*rad: radiation absorbed dose

- 특징: 가장 기본적인 방사선량으로서 **모든 방사선, 모든 피폭 물질**에 대해서 정의됨



중요

흡수선량(D)

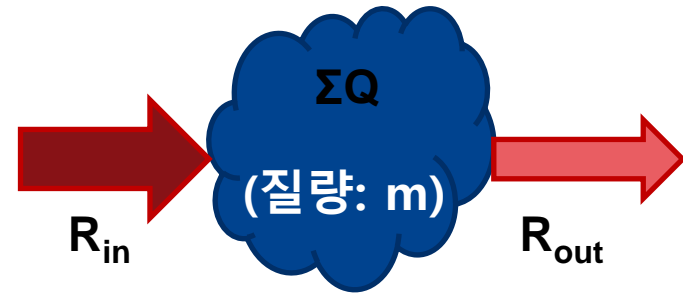
☀ 흡수선량(Absorbed Dose) 수식

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

➤ $\bar{\epsilon}$: 평균 부여에너지, m: 질량

➤ 부여에너지(ϵ) = $R_{in} - R_{out} + \Sigma Q$

- R_{in} : 입사에너지, R_{out} : 빠져 나오는 에너지, ΣQ : 정지질량 변화



국제기구	흡수선량 정의 체적
ICRU	한 점에서의 흡수선량 ($m \rightarrow 0$)
ICRP	실용 목적으로 어느정도 큰 체적까지 확장 → 해당 체적의 평균 흡수선량

흡수선량률

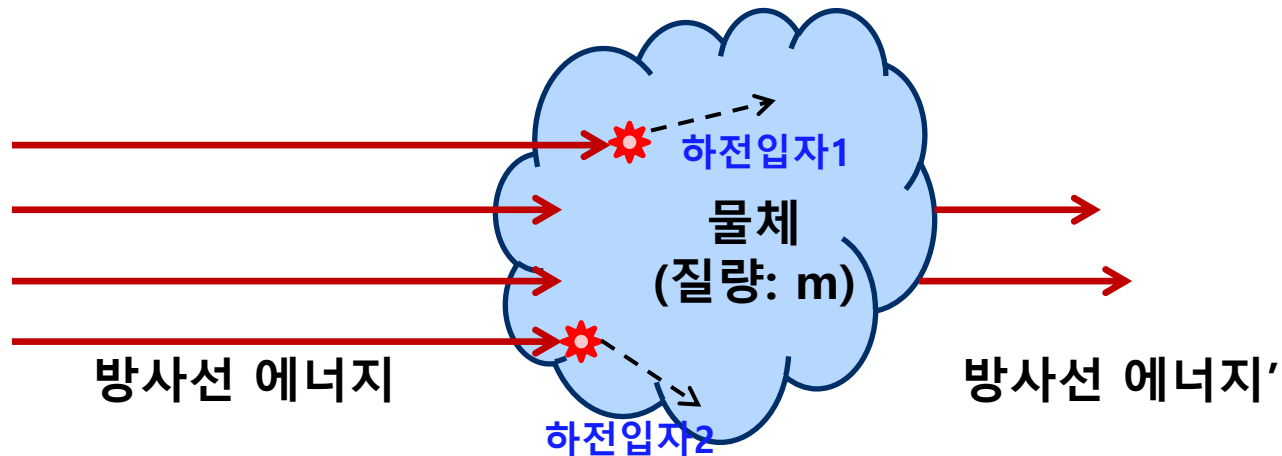
☀ 흡수선량률(Absorbed Dose Rate)이란?

$$\dot{D} \equiv \frac{dD}{dt}$$

- 정의: 단위 시간당 흡수선량
- 단위: Gy/h

커마 (K)

- 정의: 단위 질량당 방출된 운동에너지
KERMA: Kinetic Energy Relaxed per unit MAss
- 단위: J/kg (Gy)
- 특징: "비하전 방사선"에 의해 만들어진 하전입자의 초기 운동에너지의 합을 질량으로 나누어 준 값



$$\text{커마} = \frac{(\text{하전입자1 초기 운동에너지} + \text{하전입자2 초기 운동에너지})}{\text{질량}}$$

흡수선량과 커마의 차이

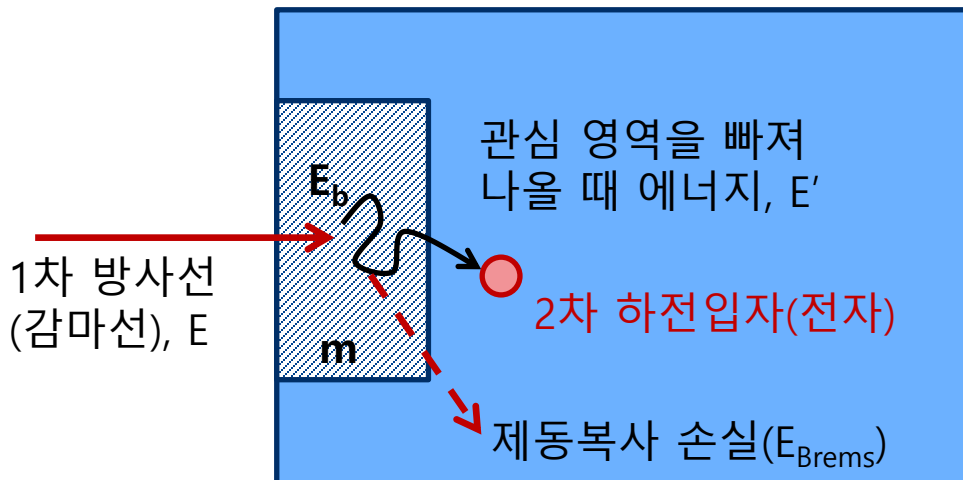
흡수선량

- 모든 방사선
- 관심영역을 벗어나는 하전입자 에너지 고려
- 제동복사 손실 고려

VS.

커마

- 비하전방사선
- 관심영역을 벗어나는 하전입자 에너지 고려하지 않음
- 제동복사 손실 고려하지 않음

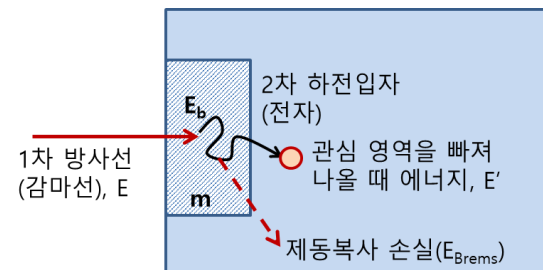
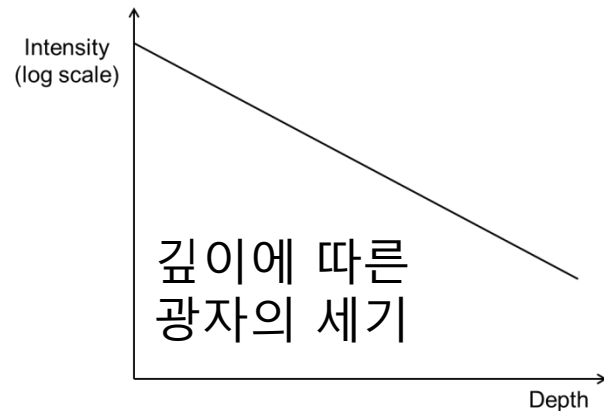
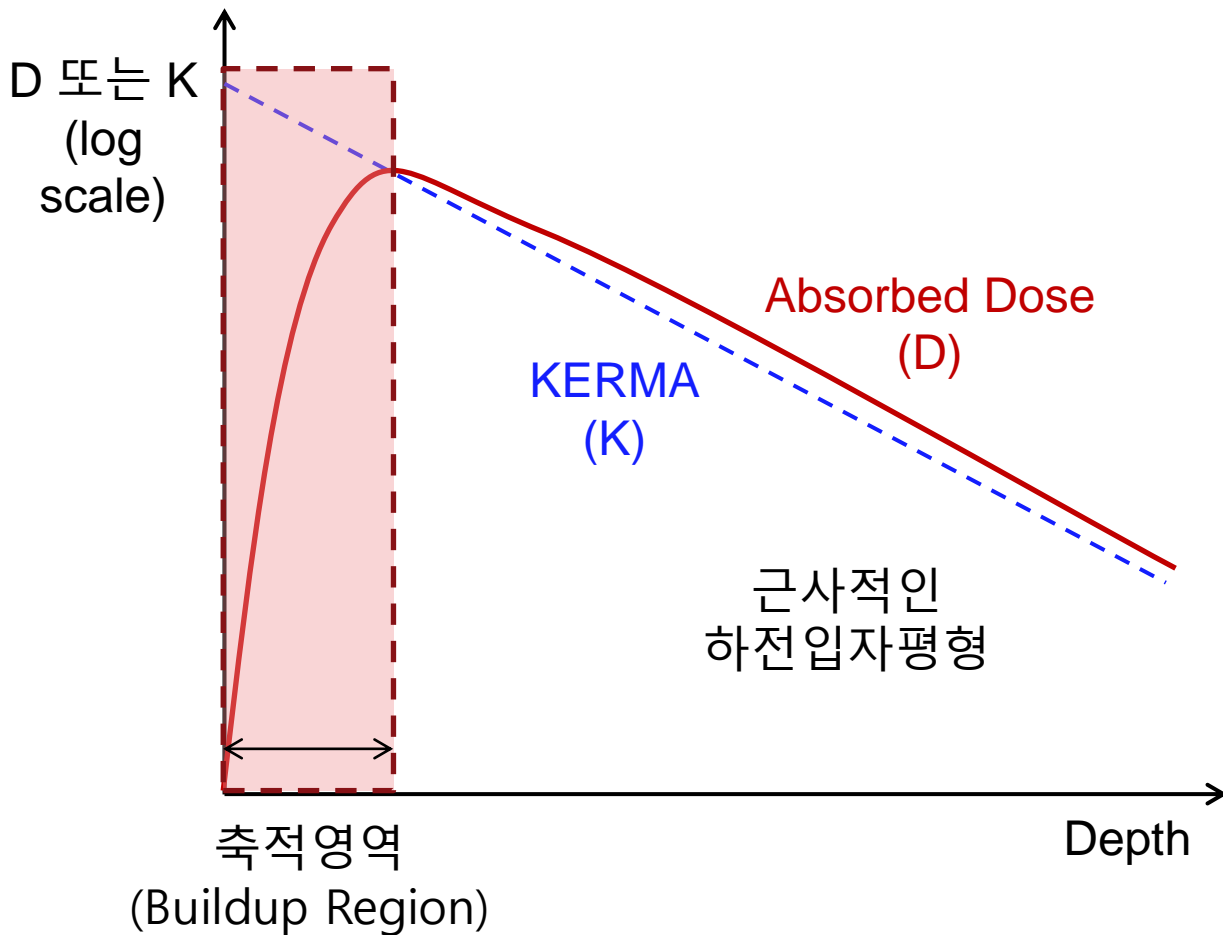


$$D \equiv \frac{E - E_b - E' - E_{Brems}}{m}$$

$$K \equiv \frac{E - E_b}{m}$$

*최초 생성 당시 전자의 운동에너지 = $E - E_b$ (여기서, E_b 는 전자 결합에너지)

흡수선량과 커마의 선량분포 차이



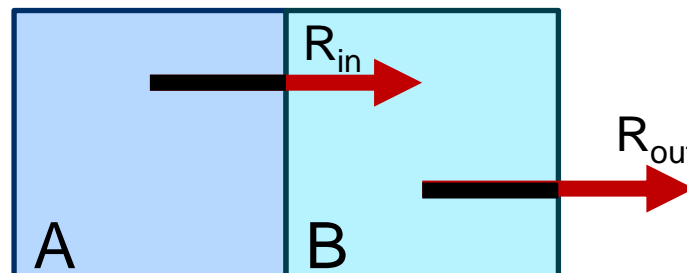
하전입자 평형(CPE, Charge Particle Equilibrium)

관심체적 밖에서 생성된 하전입자가
관심체적 내에서 잃은 에너지 양

=

관심체적 내에서 생성된 하전입자가
관심체적 밖에서 잃은 에너지 양

$$(R_{in})_c = (R_{out})_c$$



➤ 하전입자평형의 필요성

- 검출기 설계 시 기본 고려사항(2차 전자 비정보다 크게 제작)
- 흡수선량을 커마(K_c)로 연결 짓기 위한 조건 ($D = K_c$)
CPE

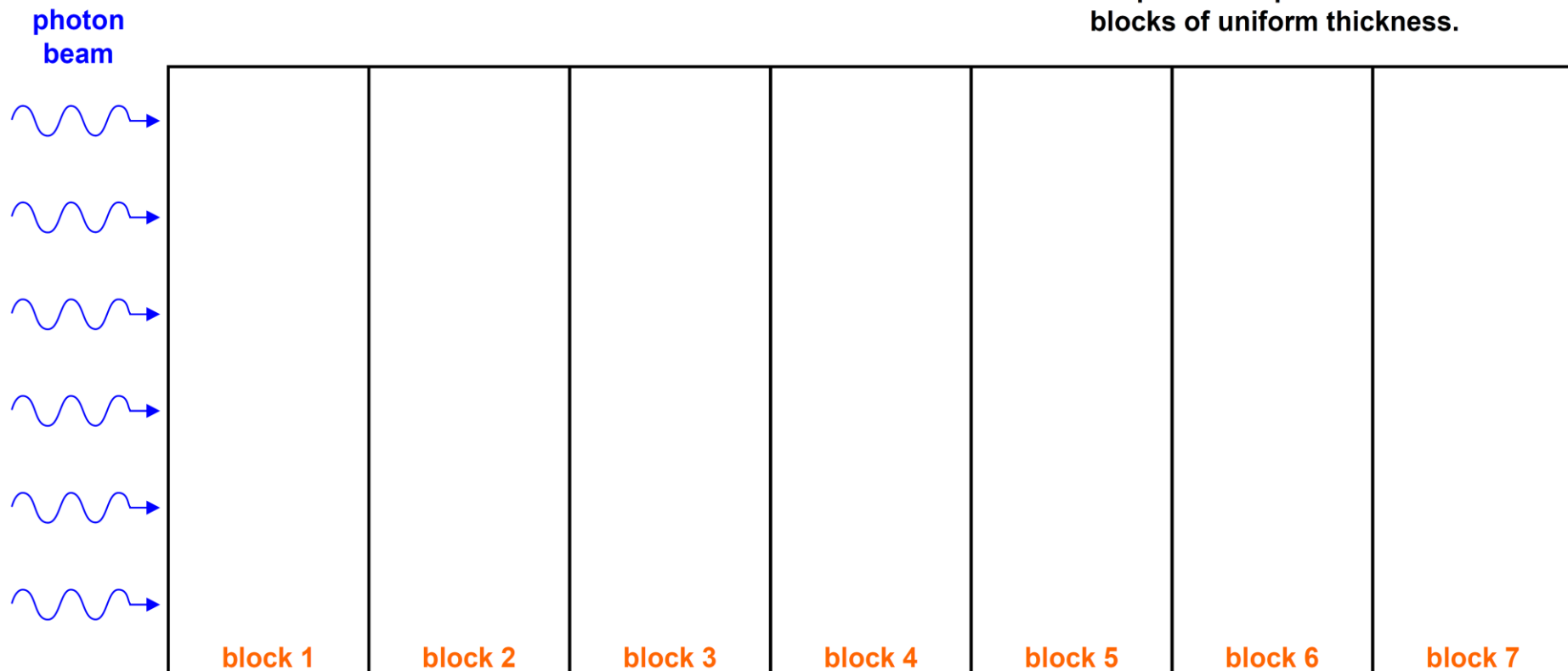
➤ 하전입자평형 형성 조건

- 일차 방사선장이 균질해야 한다
- 관심체적의 두께가 생성된 전자의 최대 비정보다 커야 한다
- 통상 광자 에너지가 3 MeV 이하이어야 한다

전자평형: 커마와 흡수선량의 관계(1)

Phantom

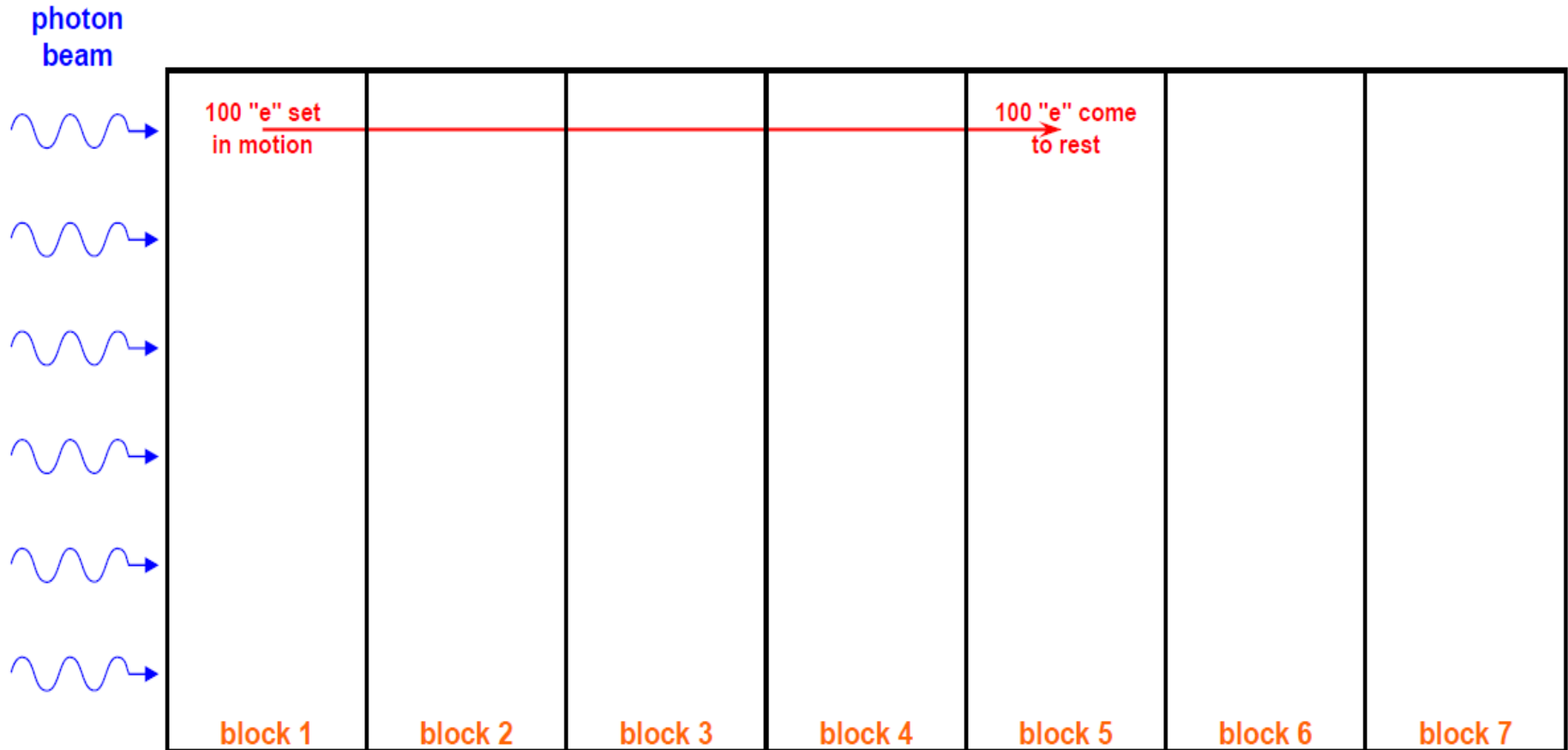
Separate the phantom into blocks of uniform thickness.



광자가 블록1로 입사하여 평균 100개의 전자를 만들어내는 것으로 가정
전자의 평균에너지는 모두 동일하며, 에너지를 받은 전자는 4개의 블록을 이동하게 됨

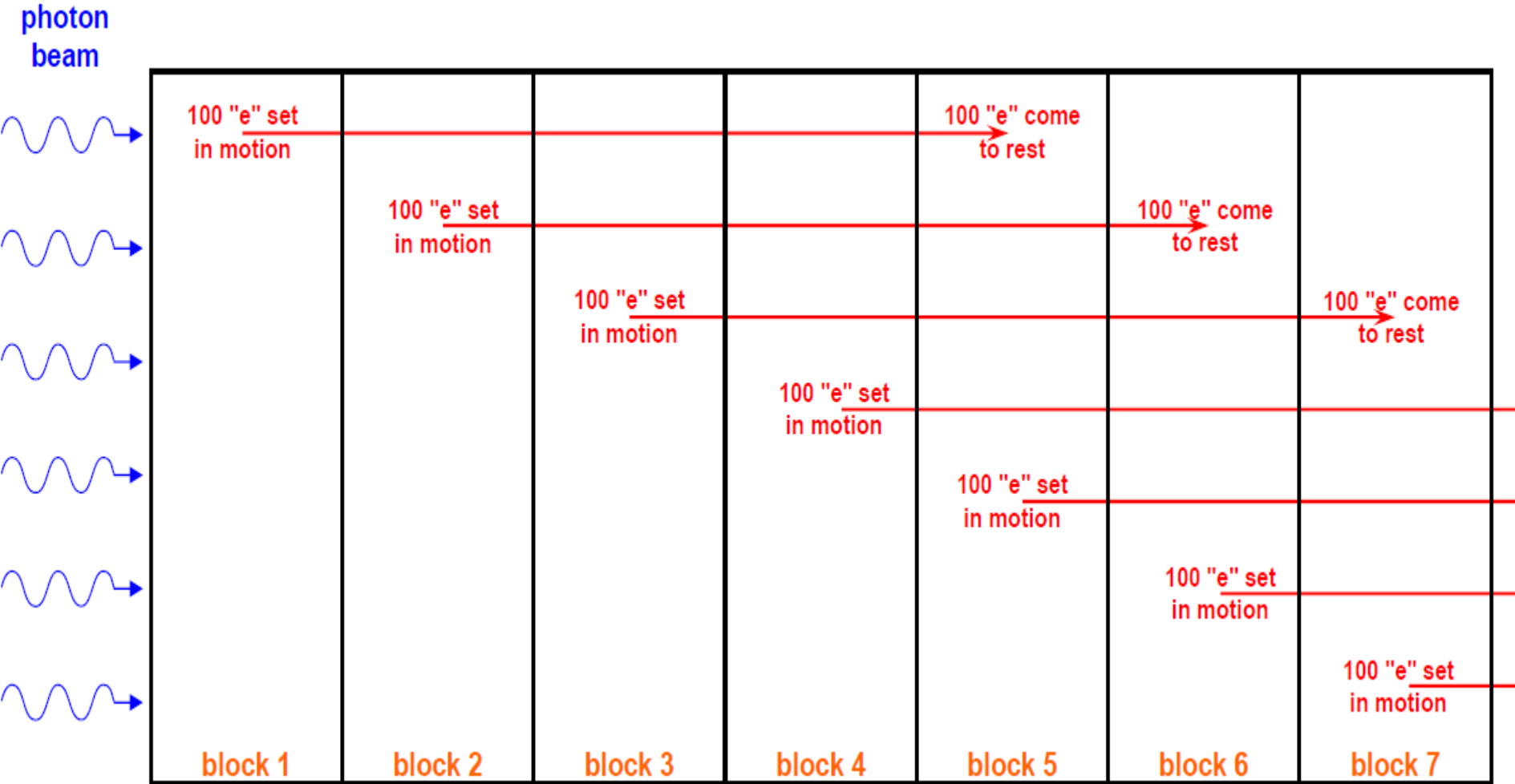
전자평형: 커마와 흡수선량의 관계(2)

Phantom



블럭1에서 생성된 전자가 4개의 블럭을 이동하여 블럭 5에서 멈춤

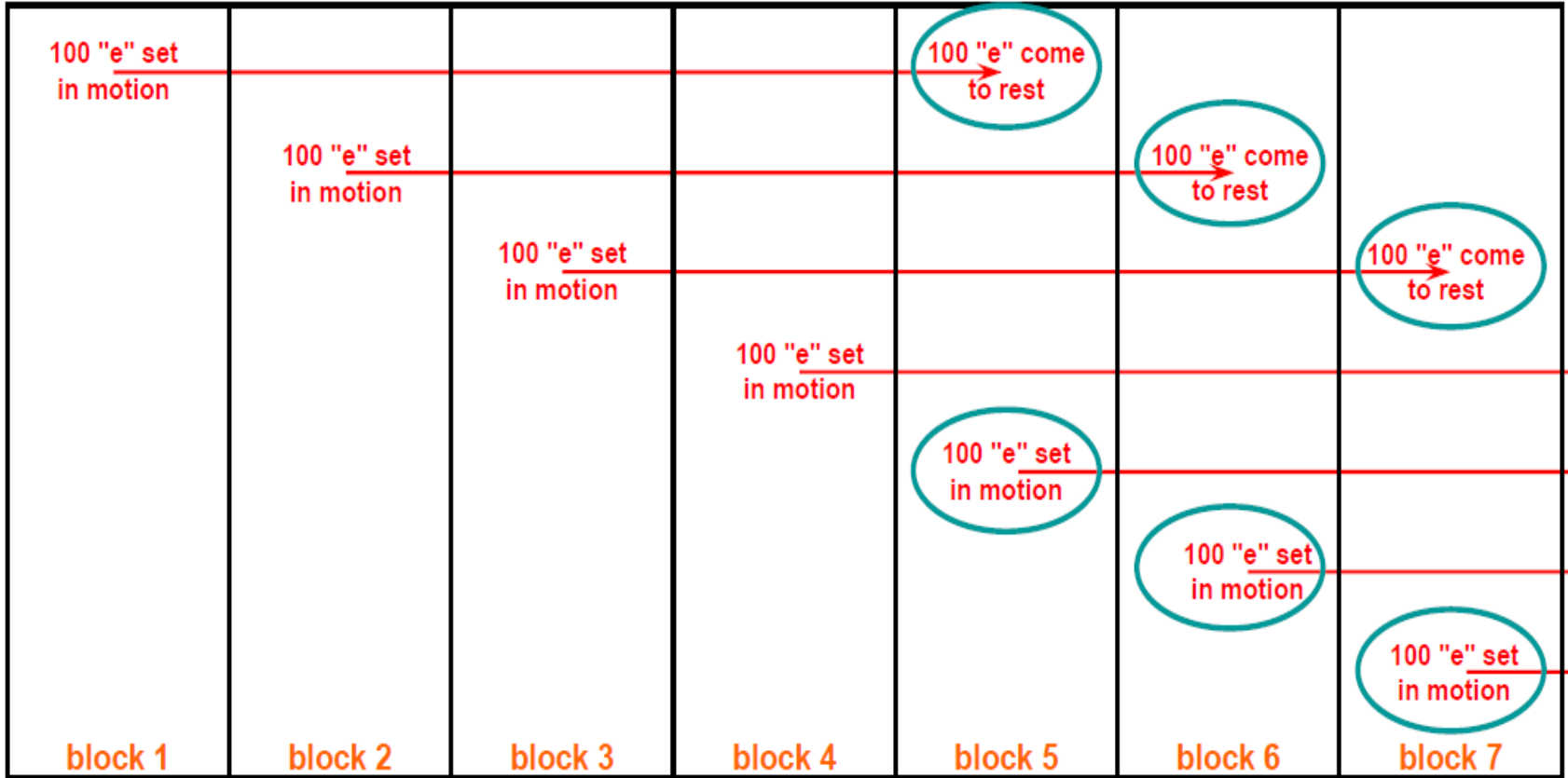
전자평형: 커마와 흡수선량의 관계(3)



광자의 경우 블럭을 통과하는 과정에서 에너지 감쇠는 없는 것으로 가정

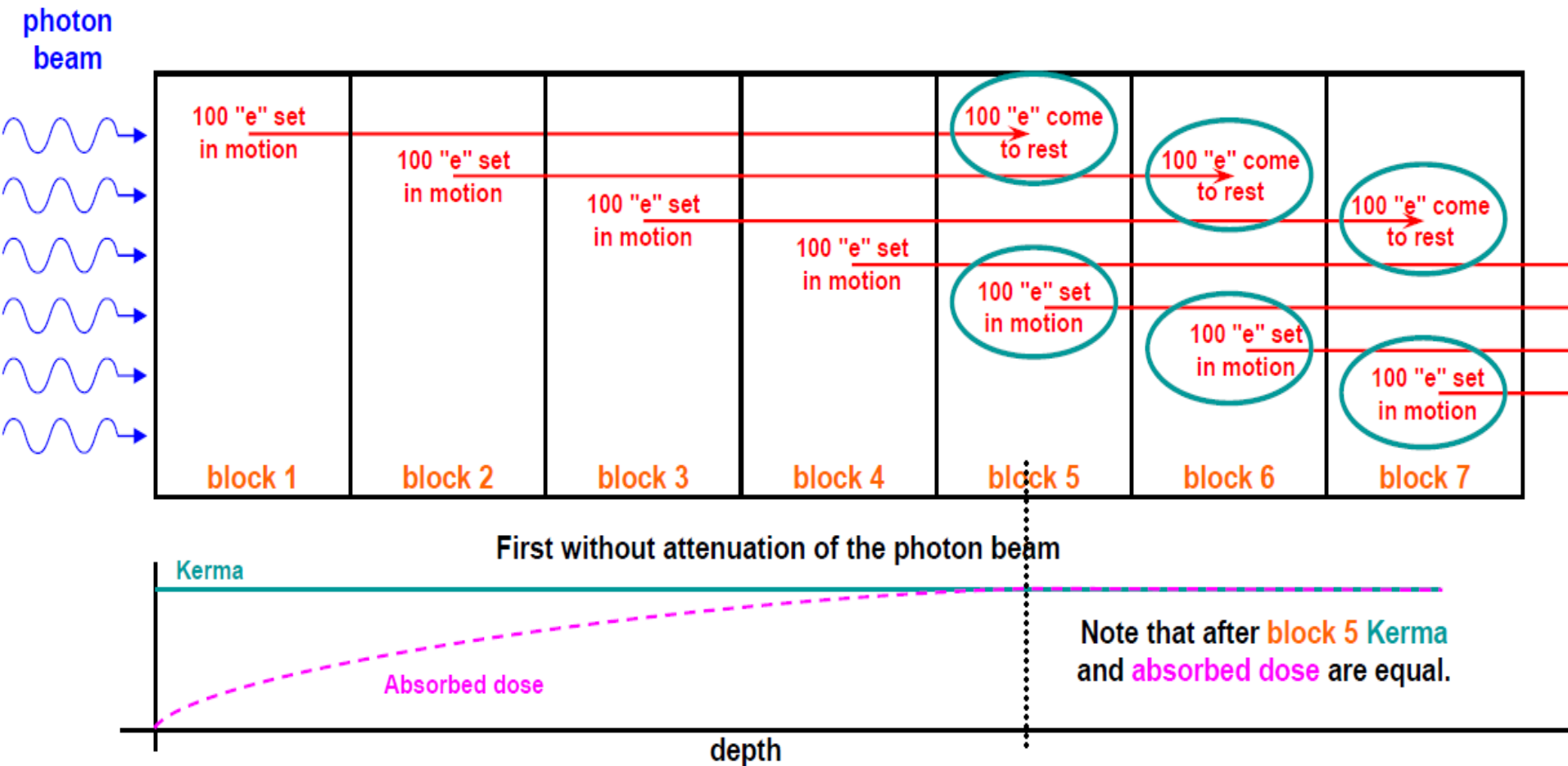
전자평형: 커마와 흡수선량의 관계(4)

photon beam

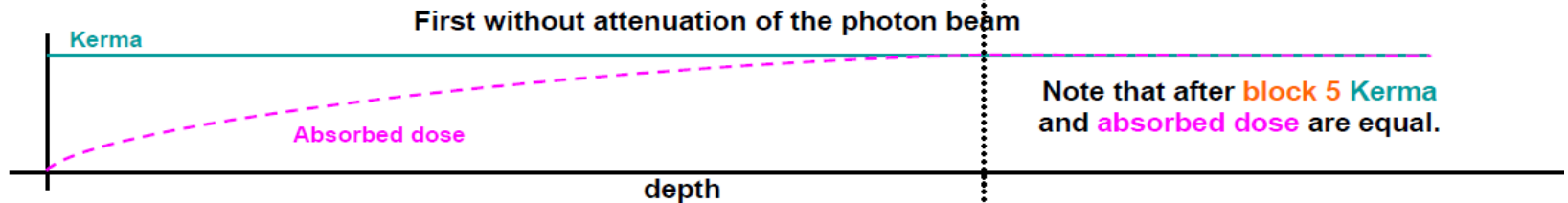
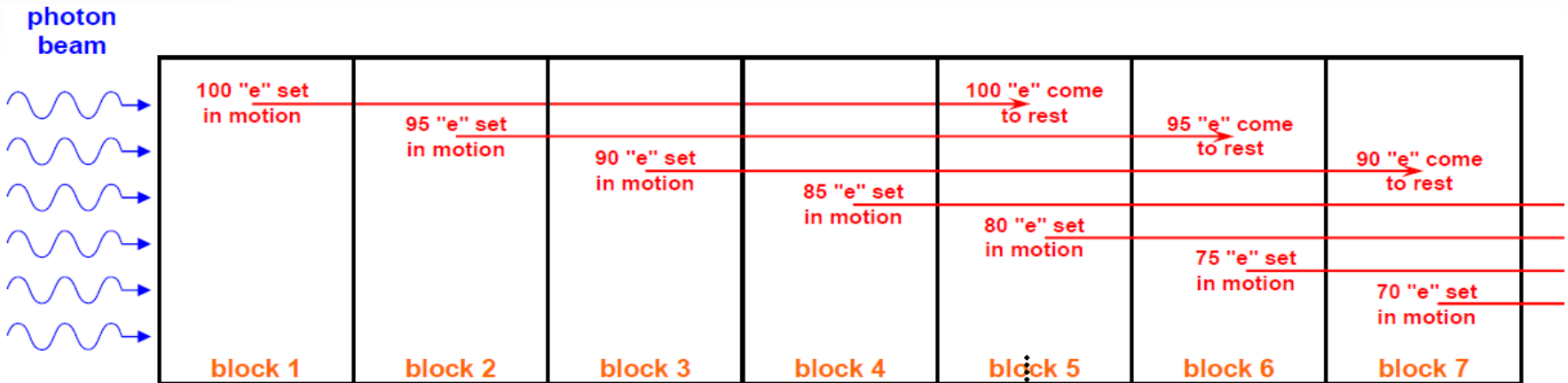


블럭5에서 전자평형의 성립이 시작되며, 광자의 감쇄가 없는 한 이후의 블럭에서도 전자평형이 성립함. (블럭5에서는 100개의 전자가 멈추고, 100의 전자가 출발함)
 제동복사에 의한 손실이 발생하지 않는 한 커마=흡수선량 성립

전자평형: 커마와 흡수선량의 관계(5)



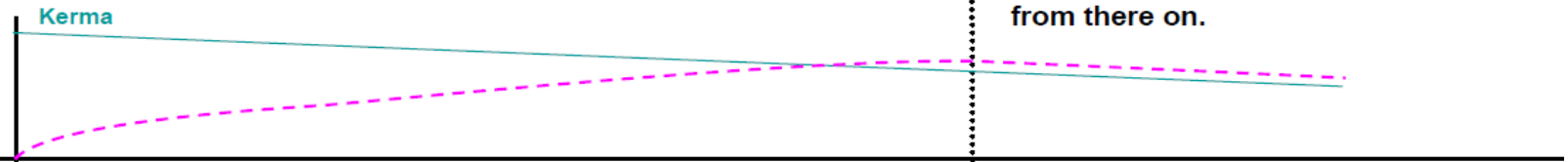
전자평형: 커마와 흡수선량의 관계(6)



Kerma will now decrease by 5% for each block of tissue.

With attenuation of the photon beam.

Absorbed dose will start low in block 1 and build up to a maximum level in block 5, which will be at a higher level than Kerma, and then decrease from there on.



MENU

흡수선량의 최대값 지점 이후 흡수선량 \geq KERMA인 이유 = 에너지 감쇠

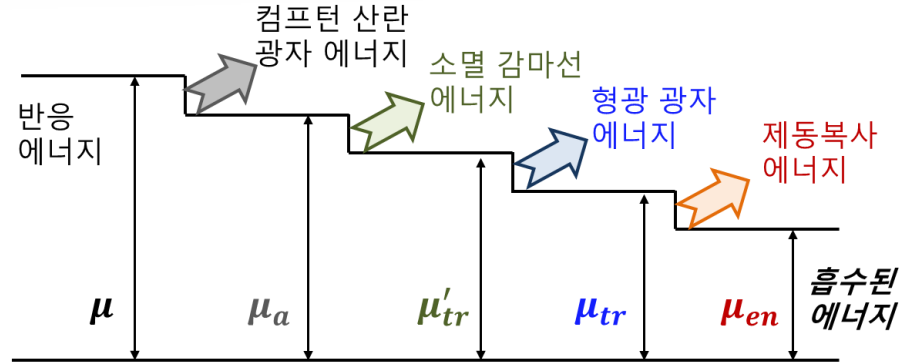
KERMA 단위의 활용 이유

- 흡수선량과 커마의 개념은 유사하면서도 다른 데,
커마(일반적으로 공기 Kerma)라는 단위를 측정에서 굳이 사용하는 이유는?
 - Kerma는 빔의 관점에서 빔의 특성을 정의하기에 용이함(공기라는 매질을 기준으로 광자가 매질에 전달하는 에너지는 고정값임)
 - 커마의 경우 dm (질량소)에서 일어나는 상호작용에 의해서만 결정되지만, 흡수선량은 dm (질량소)주변에서 발생하여 질량소로 들어오는 2차 하전입자에도 의존하는 값임(ICRP 116)
 - 국내외 모든 기술(표준 관련)이 공기 Kerma를 기준으로 구축되어 있음
 - Known Air Kerma → 선량환산계수 → 흡수선량 또는 실용량

흡수선량 vs 커마 vs 조사선량

$$K_{air} = \Psi \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{air}, \quad K_{tissue} = \Psi \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{tissue}$$

$$\frac{K_{tissue}}{K_{air}} = \frac{(\mu_{tr}/\rho)_{tissue}}{(\mu_{tr}/\rho)_{air}}$$



$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \cdot (1-g) \quad \leftarrow g: \text{제동복사를 통한 에너지 손실분률}$$

*1 e=1.6x10⁻¹⁹ C

생물학적 매질에 입사하는 수 MeV 이하의 광자에 대하여, $g \approx 0$

*1 W=34 eV (air)

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} \approx \frac{\mu_{tr}}{\rho} \Rightarrow D_{tissue} = K_{tissue}$$

$$\frac{D_{tissue}}{K_{air}} = \frac{(\mu_{tr}/\rho)_{tissue}}{(\mu_{tr}/\rho)_{air}}$$

$$D_{tissue} = \frac{(\mu_{tr}/\rho)_{tissue}}{(\mu_{tr}/\rho)_{air}} K_{air} \approx \frac{(\mu_{en}/\rho)_{tissue}}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} K_{air} = \frac{W}{e} \cdot \frac{(\mu_{en}/\rho)_{tissue}}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \cdot X$$

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad \leftarrow dQ = dN \cdot e = \frac{dE_{tr}}{W_{air}} \cdot e$$

$$= \frac{dE_{tr}}{dm} \cdot \frac{e}{W_{air}}$$

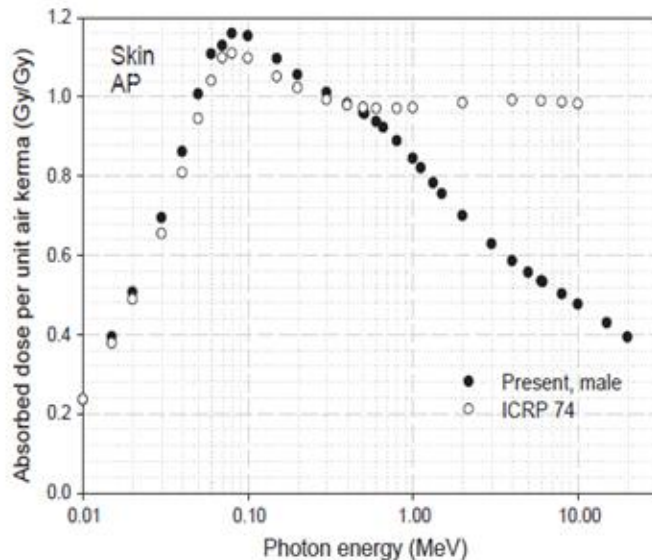
$$X = K_{air} \cdot \left(\frac{e}{W} \right)_{air}$$

KERMA 근사법

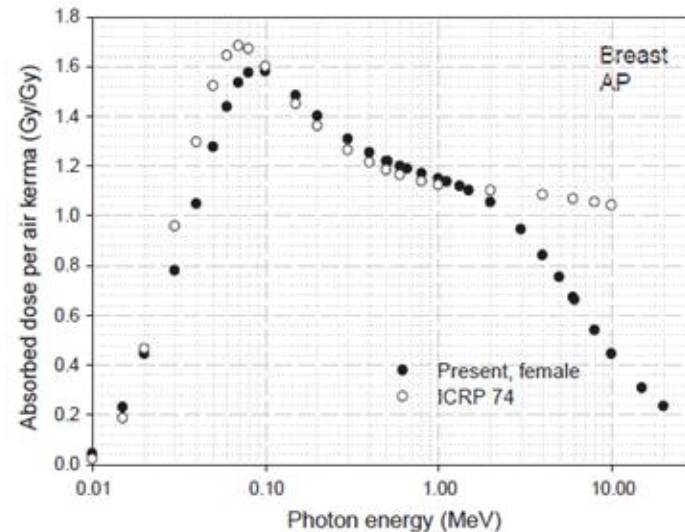
❖ ‘흡수선량 = 커마’를 가정하여 평가하는 방법

- 비하전방사선(광자, 중성자)이 매질과 상호작용을 해서 만들어지는 하전입자의 모든 운동에너지가 손실없이 매질이 흡수된다는 가정
- 2차 생성전자의 수송을 고려하지 않음(계산속도 향상)
- (주의점) 고에너지에서의 피부, 유방 등의 선량평가 시 과대평가 우려

ICRP 74(커마근사)



ICRP 116(2차 전자 수송)



세마(C)

❖ 세마(CEMA)란?

- 정의: 단위 질량당 전환된 에너지

CEMA: Converted Energy per unit MAss

- 단위: J/kg (Gy)
- 특징: “일차 하전입자”가 이차 하전입자에게 전달한 에너지

조사선량



W. Roentgen
(1845-1923)

☀ 조사선량(Exposure)이란?

- 정의: 공기 단위 질량당 생성된 전하량
- 단위: C/kg (또는 R), $1 R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$

1 R ≡ 표준상태(0°C, 1기압) 공기 1 cm³ (m=0.001293 g) 당 1 esu (3.34x10⁻¹⁰ C)의 전하를 만드는 엑스선 또는 감마선의 세기

➤ 특징

- "광자(X선/감마선) 및 공기"에 대해서만 정의
- 통상적으로, 하전입자평형이 유지되는 3 MeV 이하에서만 활용 가능
- 공간상의 어느 위치에서 방사선장의 강도를 표현
- 사람이 피폭하는 선량이 아님

*esu: electrostatic unit

조사선량 → 흡수선량 변환

❖ 조사선량 → 흡수선량 변환 (in air)

$$\begin{aligned}
 1 R &= \frac{1 \text{ esu}}{0.001293 \text{ g}} \times \frac{3.34 \times 10^{-10} \text{ C}}{1 \text{ esu}} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} && *ip = \text{ion pair} \\
 &= 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \\
 &= 2.58 \times 10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ ip}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \times \frac{34 \text{ eV}}{1 \text{ ip}} \times \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \\
 &= 0.00877 \text{ J/kg (Gy)} = 8.77 \text{ mGy}
 \end{aligned}$$

❖ 조사선량 → 흡수선량 변환 (in tissue)

$$1 R = 8.77 \text{ mGy(in air)} \times \frac{3.28 \text{ (in tissue)}}{3.01 \text{ (in air)}} = 9.56 \text{ mGy(in tissue)} \approx 10 \text{ mGy(in tissue)}$$

$\frac{\mu_t/\rho_t}{\mu_a/\rho_a}$

계산문제를 풀 때에는 항상 단위도 포함해서 풀어나갈 것!

감마상수

❖ 감마상수(Specific gamma-ray constant)란?

- 정의: 점선원 형태의 단위 방사능이 1 m 거리에 있을 때 감마 선량률

$$\Gamma = k \sum_i f_i E_i \mu_i \quad [\text{Sv/h for 1 MBq at 1 m}]$$

k: 단위 변환 상수, *f*: 붕괴당 감마선 방출률, *E*: 해당 감마선 에너지,

μ: 해당 에너지에서의 선형에너지흡수계수

→ 선형에너지흡수계수는 0.1 MeV 이상에서는

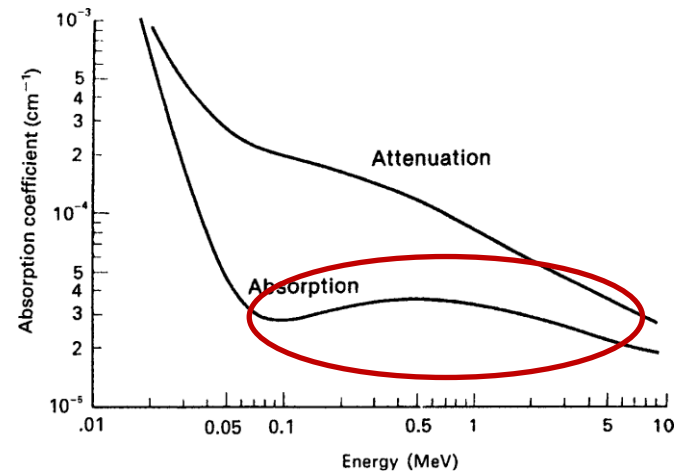
에너지에 따라 크게 변하지 않음

$$\Gamma = 0.5 \sum_i f_i E_i \quad [\text{R-m}^2 / \text{Ci-h}]$$

(상대적으로 낮은 에너지 구간에서는 0.6이 적절)

- 특징

- 감마상수는 에너지(E)에 비례, 붕괴당 감마선 방출률(f)에 비례



감마상수

❖ 감마상수(Specific gamma-ray constant) 예시 [R·m²/Ci·h]

- ▶ 감마상수 값 → **Co-60: 1.32**, Cs-137: 0.33, I-131: 0.22, Ir-192: 0.48
- ▶ 주요 감마선 에너지(MeV)
 - ▶ Co-60: 1.17, 1.33

▶ Cs-137: 0.662

▶ I-131: 0.365

▶ Ir-192: 0.316

	Energy (keV)	Photons (per 100 disint.)
$\gamma_{1,0}$ (Xe)	80,185 (2)	2,607 (35)
$\gamma_{8,6}$ (Xe)	85,9 (2)	0,0051 (7)
$\gamma_{2,0}$ (Xe)	163,930 (8)	0,0211 (3)
$\gamma_{3,2}$ (Xe)	177,214 (20)	0,277 (7)
$\gamma_{6,5}$ (Xe)	232,18 (15)	0,0023 (9)
$\gamma_{6,4}$ (Xe)	272,498 (17)	0,0581 (15)
$\gamma_{4,1}$ (Xe)	284,305 (5)	6,14 (6)
$\gamma_{6,3}$ (Xe)	295,8 (2)	0,0012 (6)
$\gamma_{7,4}$ (Xe)	302,4 (2)	0,0046 (7)
$\gamma_{8,5}$ (Xe)	318,088 (16)	0,0807 (20)
$\gamma_{5,1}$ (Xe)	324,651 (25)	0,0244 (25)
$\gamma_{7,3}$ (Xe)	325,789 (4)	0,274 (8)
$\gamma_{8,4}$ (Xe)	358,4 (2)	0,017 (8)
$\gamma_{4,0}$ (Xe)	364,489 (5)	81,2 (5)
$\gamma_{5,0}$ (Xe)	404,814 (4)	0,0552 (17)

<I-131>

	Energy keV	Photons per 100 disint.
$\gamma_{4,3}$ (Os)	110,4 (3)	0,0122 (11)
$\gamma_{4,3}$ (Pt)	136,3426 (3)	0,199 (25)
$\gamma_{6,5}$ (Pt)	176,98 (4)	0,0043 (12)
$\gamma_{4,2}$ (Os)	201,3112 (7)	0,473 (8)
$\gamma_{1,0}$ (Os)	205,79430 (9)	3,34 (4)
$\gamma_{5,4}$ (Pt)	280,27 (24)	0,009 (5)
$\gamma_{2,1}$ (Os)	283,2668 (8)	0,266 (3)
$\gamma_{2,1}$ (Pt)	295,95650 (15)	28,72 (14)
$\gamma_{4,2}$ (Pt)	308,45507 (17)	29,68 (15)
$\gamma_{1,0}$ (Pt)	316,50618 (17)	82,75 (21)
$\gamma_{5,3}$ (Os)	329,17 (15)	0,0174 (17)
$\gamma_{3,1}$ (Os)	374,4852 (8)	0,726 (6)
$\gamma_{5,3}$ (Pt)	416,4688 (7)	0,669 (21)
$\gamma_{5,2}$ (Os)	420,52 (6)	0,069 (7)

<Ir-192>

	Energy keV	Photons per 100 disint.
$\gamma_{3,1}$ (Pt)	468,0688 (3)	47,81 (24)
$\gamma_{4,1}$ (Os)	484,5751 (4)	3,189 (24)
$\gamma_{2,0}$ (Os)	489,06 (3)	0,438 (14)
$\gamma_{5,2}$ (Pt)	588,5810 (7)	4,517 (22)
$\gamma_{6,3}$ (Pt)	593,49 (13)	0,0421 (17)
$\gamma_{7,3}$ (Pt)	599,41 (15)	0,0039 (17)
$\gamma_{4,1}$ (Pt)	604,41105 (25)	8,20 (4)
$\gamma_{2,0}$ (Pt)	612,4621 (3)	5,34 (8)
$\gamma_{6,2}$ (Pt)	765,8 (3)	0,0013 (6)
$\gamma_{5,1}$ (Pt)	884,5365 (7)	0,291 (7)
$\gamma_{6,1}$ (Pt)	1061,48 (4)	0,053 (1)
$\gamma_{8,1}$ (Pt)	1089,9 (3)	0,0012 (2)
$\gamma_{6,0}$ (Pt)	1378,20 (15)	0,0012 (3)

감마상수 → 에너지 및 붕괴당 방사선 방출률에 비례

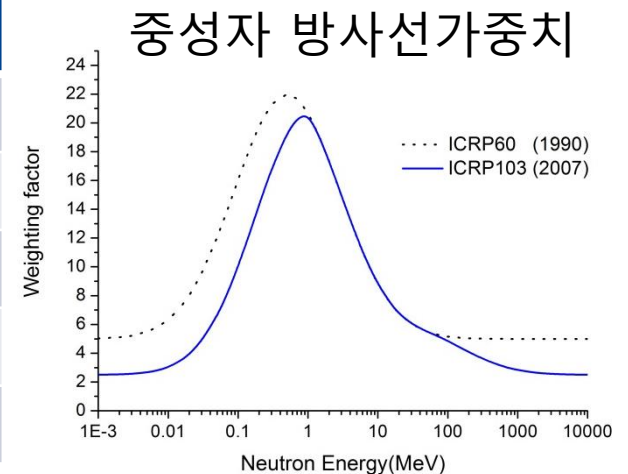
http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Ir-192_tables.pdf

등가선량

❖ 등가선량(Equivalent Dose)이란?

- 정의: 방사선 종류에 따른 인체 영향을 고려하여 흡수선량을 보정한 방사선량
($H = D_R \times w_R$, w_R : 방사선가중치)
- 단위: J/kg (Sv)
- 특징
 - 인체에 입사되는 방사선 종류별로 ICRP의 판단에 따라 설정된 값
 - 실제 물리량이 아니며, 측정이 불가능
 - 손, 발, 피부에 결정적 영향 방지를 목적으로 등가선량한도 별도 설정

방사선의 종류	방사선가중치(w_R)
광자	1
전자 및 뮤온	1
양성자	2
중성자	에너지의 함수
알파, 핵분열파편, 무거운 이온	20



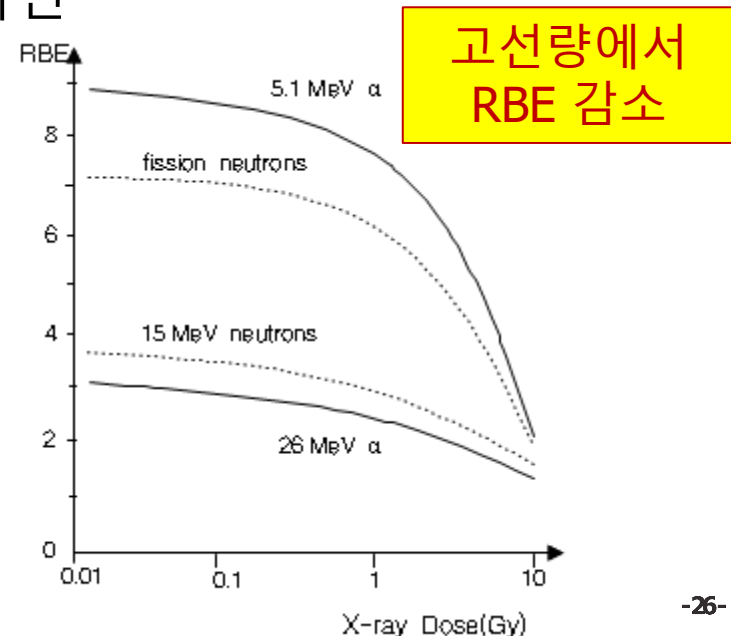
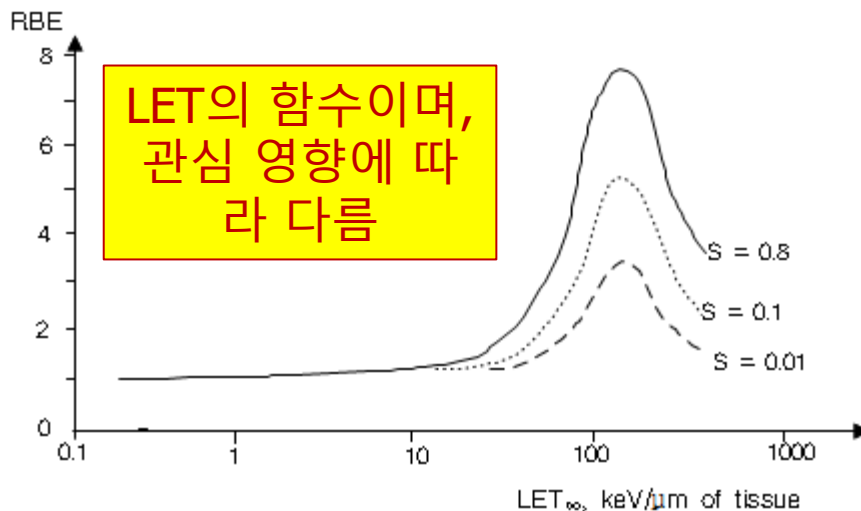
생물학적효과비: 방사선가중치의 설정 배경

❖ 생물학적효과비(Relative Biological Effectiveness, RBE)

- 기준 방사선(a)이 주어진 생물학적효과를 일으키는 선량에 대한 동등한 효과를 일으키는 비교방사선(b)의 선량의 비의 역수

$$RBE_{\frac{b}{a}, S=0.1} = \left(\frac{D_b}{D_a}\right)^{-1} = \left(\frac{D_a}{D_b}\right)$$

- 기준 방사선: 250 kVp X선 또는 ^{60}Co 감마선



생물학적효과비: 방사선가중치의 설정 배경

❖ 생물학적효과비(Relative Biological Effectiveness, RBE)

- RBE_M : 확률론적 영향, RBE_m : 결정론적 영향
- 방사선가중치(확률론적 영향)를 결정하는 등 방사선방호 목적으로 사용할 때는 최대의 RBE값을 기준으로 하고 일반적으로 RBE_M 이 사용됨.
- 방사선가중치는 여러 방사선 영향 중, 발암 및 유전결함에 대한 것을 근거로 함.
- 백내장이나 피부 홍반의 발생 위험을 평가하고자 할 때는 등가선량 사용 불가 → RBE가중 흡수선량 사용

등가선량 vs 선량당량

	등가선량	선량당량
흡수선량 평가	장기나 조직의 평균	관심 위치의 미소 체적
가중치	방사선가중치	선질계수
가중치 평가위치	(외부피폭) 인체 입사점 (내부피폭) 체내 발생점	흡수선량 발생지점
측정성	측정불가	측정가능
정의주체	ICRP	ICRU

등가선량의 한계

- 피폭하는 조직에 따른 암 발생 및 유전결함 민감도 차이
(예, 근육 선량 1 Sv vs 폐 선량 1 Sv)
- 장기별 피폭선량의 차이
 - 피폭하는 방사선장의 불균일
 - 인체의 자기차폐 효과
 - 조직의 구성성분 및 밀도 차이로 인한 흡수계수 차이
 - 내부피폭의 경우, 섭취한 방사성동위원소의 조직 내 분포 불균형

ICRP에서는 방사선 피폭자의 종합적인 위험에 대한 대표 값으로서 '조직가중치(w_T)'를 적용한 **유효선량**을 도입함

유효선량

❖ 유효선량(Effective Dose)이란?

- 정의: 인체 조직별 위해도 차이를 고려하여 등가선량을 보정한 방사선량 ($E = H \times w_T$, w_T : 조직가중치)

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \frac{H_T^M + H_T^F}{2}$$

- 단위: J/kg (Sv)
- 특징
 - 인체에 대해서 정의
 - 각 조직의 상대적인 발암 위험 및 심각한 유전결함 고려
 - 남녀노소의 평균
 - 실제 물리량이 아니며, 측정이 불가능(28개 장기 평균선량 필요)

조직가중치

❖ 조직가중치(w_T) – ICRP 103 기준

조직가중치	0.12	0.08	0.04	0.01
해당 조직	적색골수 유방 결장 위 폐 잔여조직	생식선	방광 간 식도 갑상선	뼈 표면 뇌 침샘 피부
소계	0.72	0.08	0.16	0.04

잔여조직(13개): 부신, 흉외기도, 담낭, 심장, 신장, 림프샘, 근육, 구강점막, 비장, 소장, 췌장, 흉선, 전립선/자궁

조직가중치(cont'd)

❖ 조직가중치(w_T) – ICRP 60 기준

<원안위 고시 제2017-36호>
방사선방호 등에 관한 기준

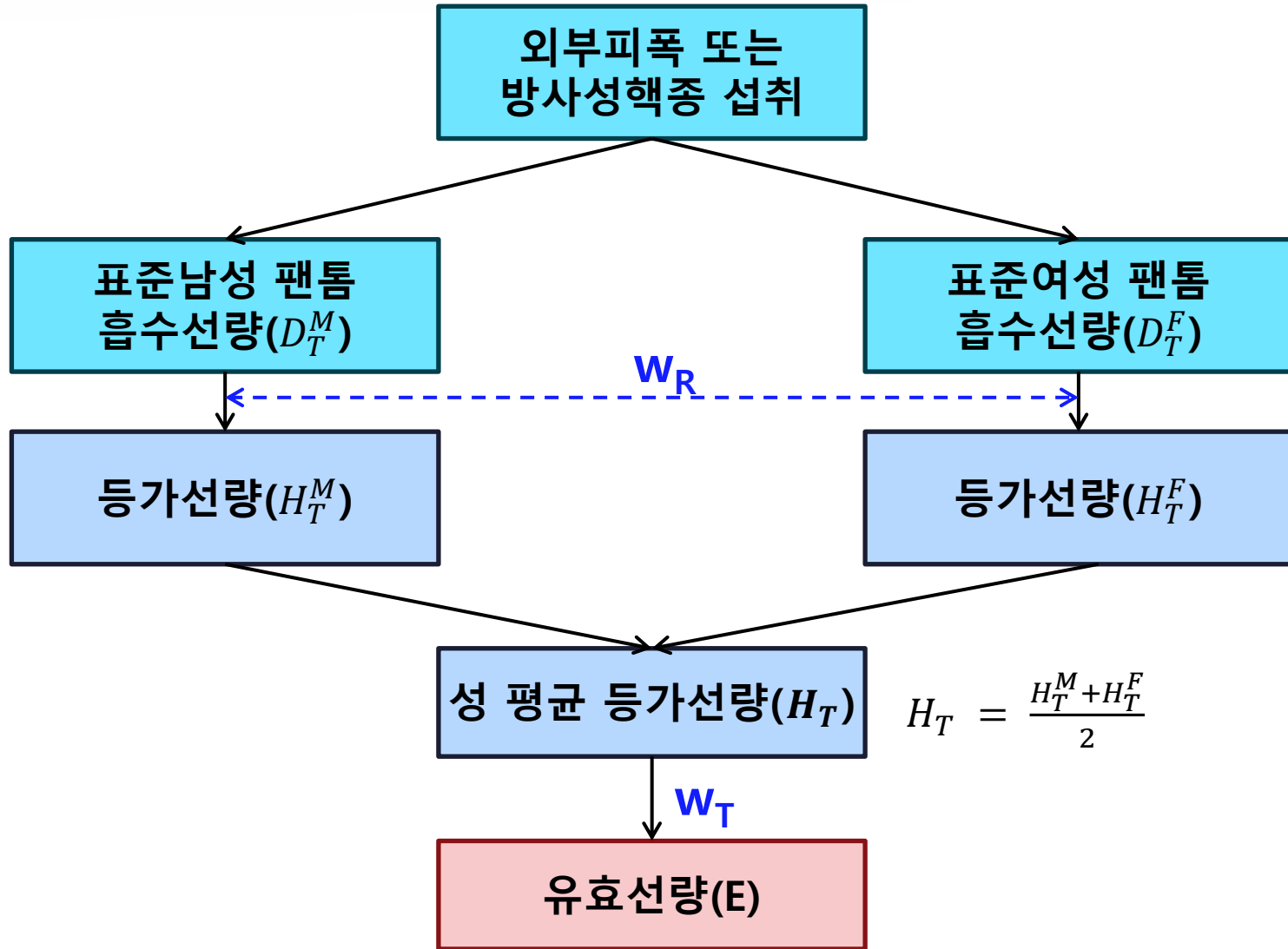
조직가중치	0.20	0.12	0.05	0.01
해당 조직	생식선	골수(적색) 대장 폐 위	방광 유방 간 식도 갑상선 기타 조직*	피부 뼈표면
소계	0.20	0.48	0.30	0.02

잔여조직(10개): 부신, 뇌, 대장 상부, 소장, 콩팥, 근육, 췌장, 비장, 흉선, 자궁

유효선량의 의미

- 방사선을 피폭한 특정 개인의 실질적인 선량/위험을 나타내는 것이 아니고, **평균적인 지표의 기능**
- **낮은 선량을 피폭한 사람의 명목적이고 근사적인 종합위험(확률론적 영향)을 나타내는 척도**
- 근사적인 방사선 위해를 **전망적으로 평가하거나, 방호 계획을 수립하기 위한 최적화의 도구로 활용**
- **소급사용이 가능한 경우 : 선량한도 준수 입증, 선량제약치 또는 참조준위와의 비교를 위한 선량평가**

유효선량의 산출



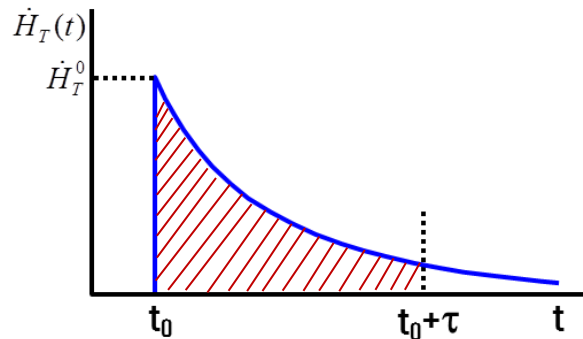
예탁선량

❖ 예탁선량(Committed Dose)이란?

- 정의: 방사능을 1회 섭취(섭취시점: t_0)한 후 특정 장기나 조직이 평생동안 받게 되는 선량 → 내부피폭에 의한 평생 선량
- 방호목적에서 **성인은 50년간**, **소아 및 아동은 70세까지** 적분

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

$$\text{예탁유효선량 } E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau)$$



$$\dot{H}_T(t) = \dot{H}_T^0 e^{-\lambda_{eff} t}$$

$$H_T(\tau) = \dot{H}_T^0 \int_0^{\tau} e^{-\lambda_{eff} t} dt = \frac{\dot{H}_T^0}{\lambda_{eff}} (1 - e^{-\lambda_{eff} \tau})$$

- 단위: J/kg (Sv)

실무에서는 단일 해에 모든 피폭이 발생하는 것으로 적용

예탁선량: 유효제거계수

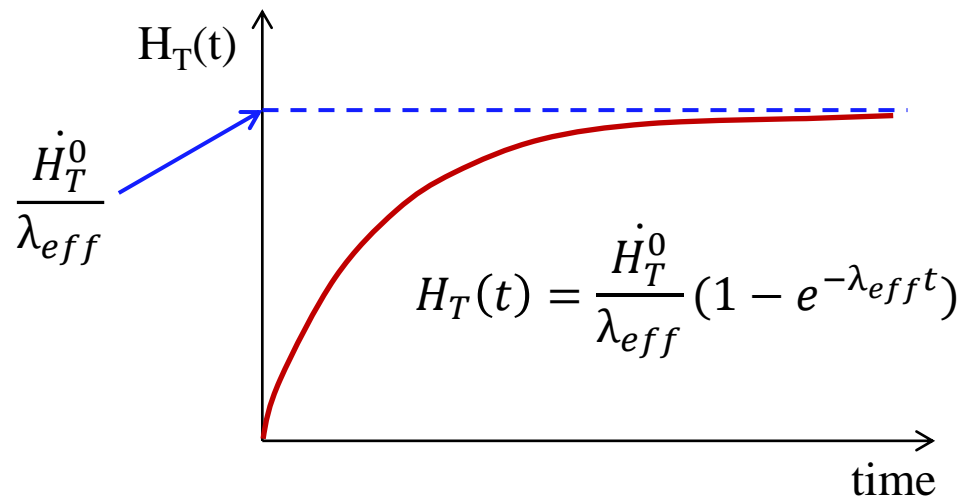
❖ 유효제거계수(λ_{eff})

- 체내 섭취된 방사능은 물리적 반감기에 따라 붕괴되어 제거(λ_p)되며, 생물학적 제거계수(λ_b)에 따라 배설됨

$$\lambda_{eff} = \lambda_p + \lambda_b$$

$$\lambda_{eff} = \frac{\ln 2}{T_{eff}}, \quad \lambda_p = \frac{\ln 2}{T_p}, \quad \lambda_b = \frac{\ln 2}{T_b}$$

$$\text{유효반감기}(T_{eff}) \quad \frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$$



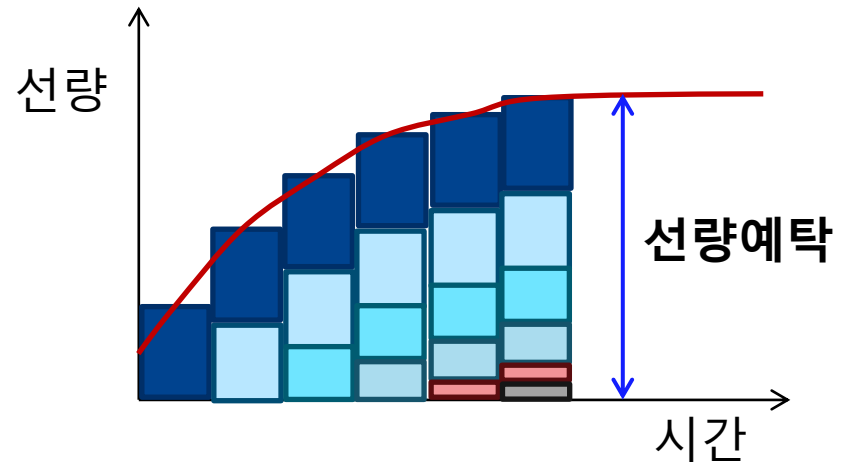
선량예탁

❖ 선량예탁(Dose Commitment)이란?

- 정의: 한 단위의 특정 행위나 사상(event)으로 인한 개인 당 선량률의 무한 시간 적분치

$$H_{C,T} \equiv \int_0^{\infty} \dot{H}_T(t) dt, \quad E_T \equiv \int_0^{\infty} \dot{E}_T(t) dt$$

- 단위: J/kg (Sv)



- 특징

- 단위 행위의 누적으로 인한 영향을 평가하는 수단

예) 가동중인 원전 인근 주민이 매년 받게 되는 선량의 총합

집단선량

❖ 집단선량(Collective Dose)이란?

- 정의: 어떤 행위로 인해 발생하는 특정 사람들 집단의 총 선량

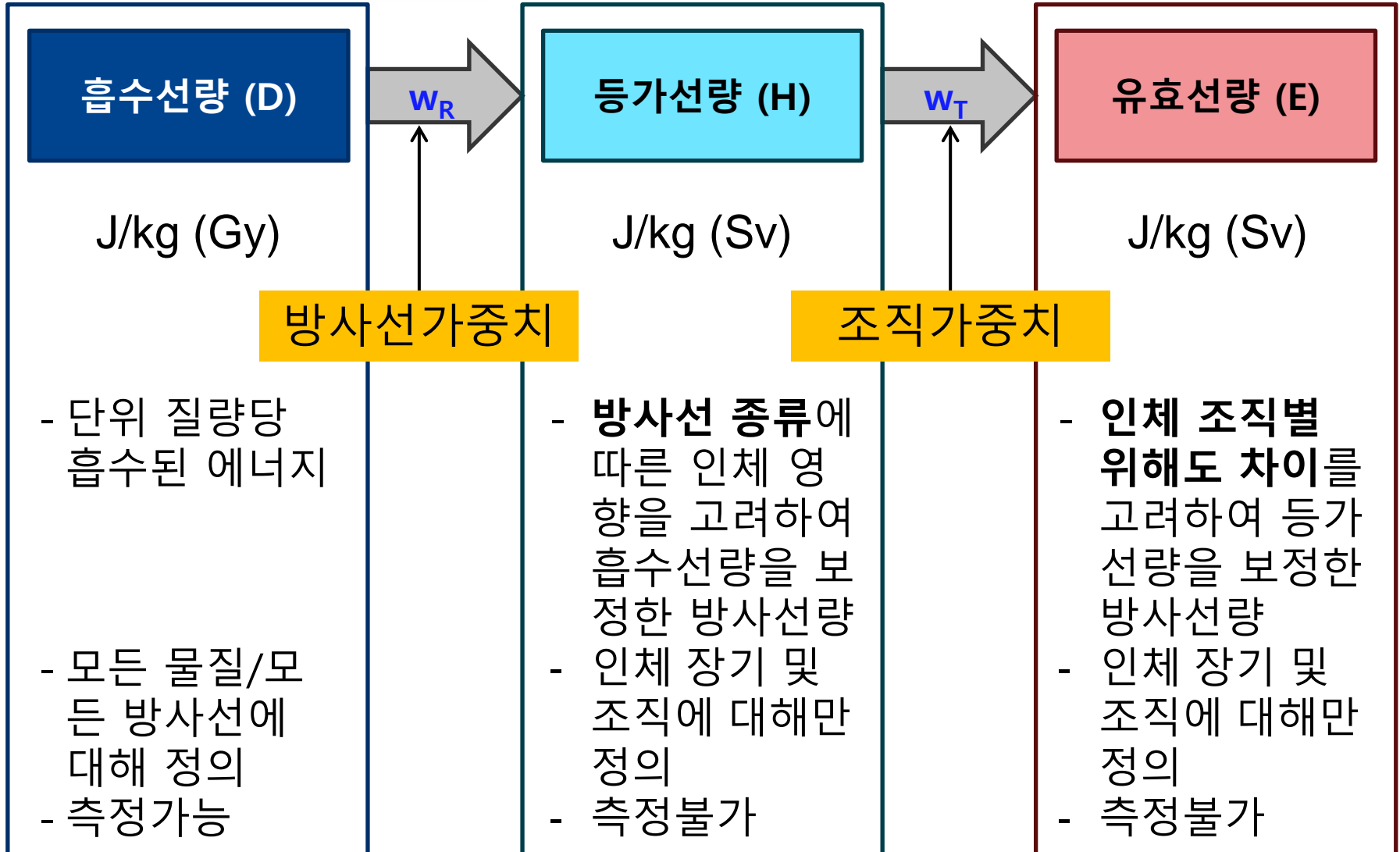
$$S = \int_0^{\infty} E \left(\frac{dN}{dE} \right) dE \text{ 또는 } S = \sum_i E_i$$

- 단위: man-Sv

➤ 특징

- 유효선량으로만 표현됨
- **계획 목적 및 방호 최적화 목적으로 활용**
- 종합적인 확률적 위험의 평가량
- 평가 대상 집단 내 구성원의 속성이 비슷해야 집단선량이 의미 있음
- **절삭선량 및 절삭시간 개념**의 도입 필요

흡수선량, 등가선량, 유효선량

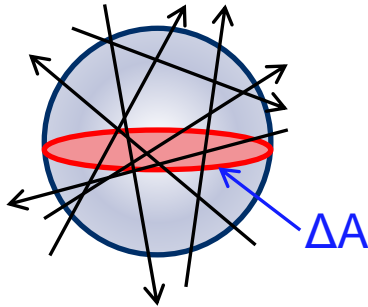


II. 방사선량의 평가

플루언스 및 선속밀도

❖ 플루언스(Φ)

- 방사선량을 결정하는 기본적인 물리량
- 관심 위치에 도달하는 단위 면적당 방사선 입자의 수(단위: /cm²)



$$\Phi \equiv \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} = \frac{dN}{dA}$$

❖ 선속밀도(φ): 플루언스의 시간률(플루언스율, 단위: /cm²·s)

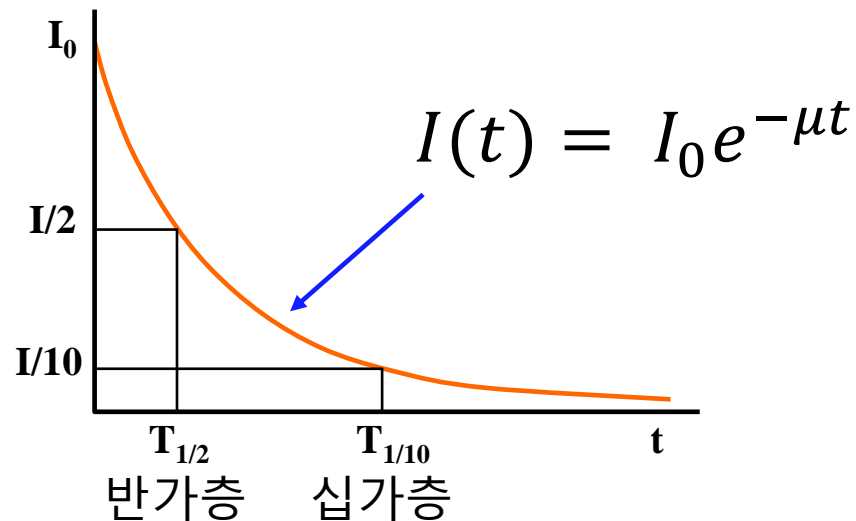
$$\varphi = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2 N}{dt dA}$$

❖ 에너지플루언스(Ψ): 플루언스 x 에너지 ($\Psi = \Phi \times E$)

감쇠계수

❖ 지수감쇠

- ▶ 비대전 방사선의 세기는 물질 내에서 지수함수 형태로 감소함



- ❖ 선형감쇠계수(μ): 단위 거리를 이동하는 동안 물질과 상호작용할 확률 (단위: /cm)
- ❖ 질량감쇠계수(μ/ρ): 선형감쇠계수를 밀도로 나눈 값 (단위: cm^2/g)

흡수선량과 커마의 계산

❖ 광자 흡수선량(Gy) 계산

- Φ : 플루언스(/cm²)
- E: 에너지(MeV or J)
- μ_{en}/ρ : 질량에너지**흡수**계수(cm²/g)

$$D = \Phi \times E \times \frac{\mu_{en}}{\rho}$$

❖ 광자 커마(Gy) 계산

- Φ : 플루언스(/cm²)
- E: 에너지(MeV or J)
- μ_{tr}/ρ : 질량에너지**전달**계수(cm²/g)

$$K = \Phi \times E \times \frac{\mu_{tr}}{\rho}$$

중성자 및 전자 흡수선량 계산

❖ 중성자/전자 흡수선량(Gy) 계산

- 반응의 종류가 다양하고, 물질 내 거동이 복잡함
- 광자의 경우와 같이 단순한 식으로 계산하기 어려움
- 일반적으로, 몬테칼로 시뮬레이션과 같은 전산기법을 통해 계산

❖ 근사적인 계산 목적의 전자 흡수선량(Gy) 계산

- 광자의 경우와 동일한 식을 활용할 수 있음

$$D = \Phi \times E \times \frac{\mu_{en}}{\rho}$$

- 이때 흡수계수는 다음의 식을 이용하여 근사적으로 계산

$$\begin{aligned} \frac{\mu_{en}}{\rho} &= 16 \times (E_m - 0.036)^{-1.4} && \text{(for air)} \\ \frac{\mu_{en}}{\rho} &= 18.6 \times (E_m - 0.036)^{-1.37} && \text{(for tissue)} \end{aligned}$$

여기서, E_m 은 MeV 단위의 전자 최대 에너지

실용량

❖ 도입 배경

- 유효선량은 남녀 평균된 가상의 물리량으로 실측할 수 없음
- 만약, 실측이 가능하더라도 체내 각 장기나 조직의 위치에 선량계를 설치하여 선량을 측정한다는 것은 비현실적임
- 이에, 유효선량에 근사한 값을 가지면서 실측 가능한 물리량으로서 방사선방호 실무 목적의 실용량(Operational Quantity)을 도입
- 측정 가능한 물리량인 선량당량을 기본으로 함(등가선량X)
- 내부피폭에 대한 등가선량이나 유효선량 평가용 실용량은 없음

실용량 → 대표적인 방호량인 유효선량의 간접적인 평가

ICRU 기준모의체

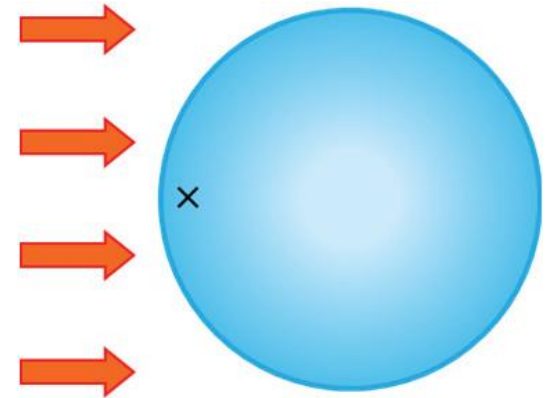
❖ ICRU 기준모의체(또는 ICRU 구)

- 실용량 측정을 위한 조직등가 물질로 된 구형 피폭체
- 직경: 30 cm
- 밀도: 1 g/cm³
- 물질조성(Mass Composition)
 - O: 76.2%, C: 11.1%, H: 10.1%, N: 2.6%

❖ 실용량 측정깊이

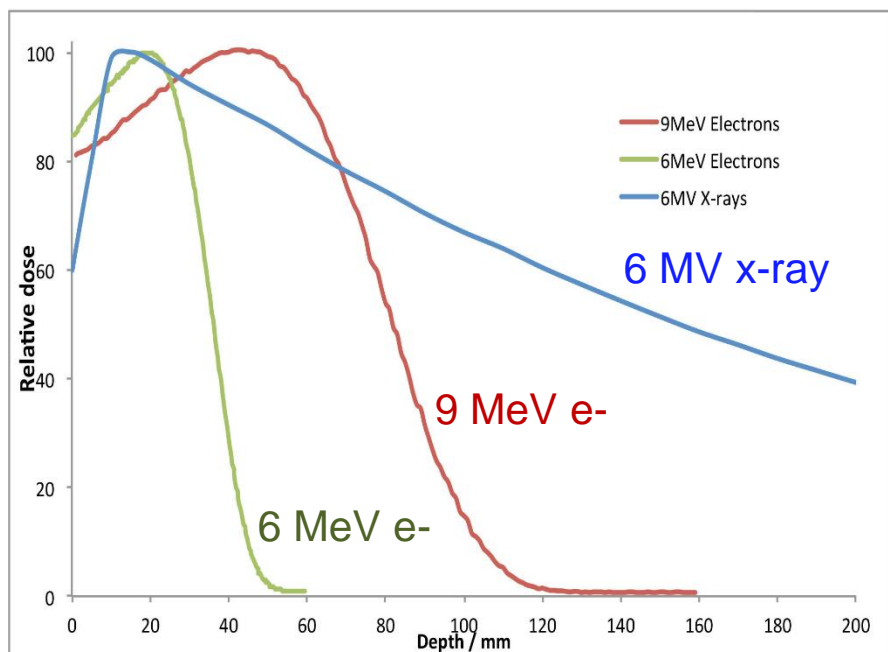
- 10 mm: 심부선량(유효선량의 대표치)
- 3 mm: 수정체 선량
- 0.07 mm: 피부 선량

수정체 선량은 피부선량으로 대체 하여 감시

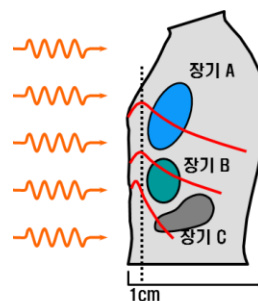


심부선량

❖ 10 mm 깊이 선량(심부선량)의 의미



<치료용 고에너지 광자 및 전자선 선량분포>

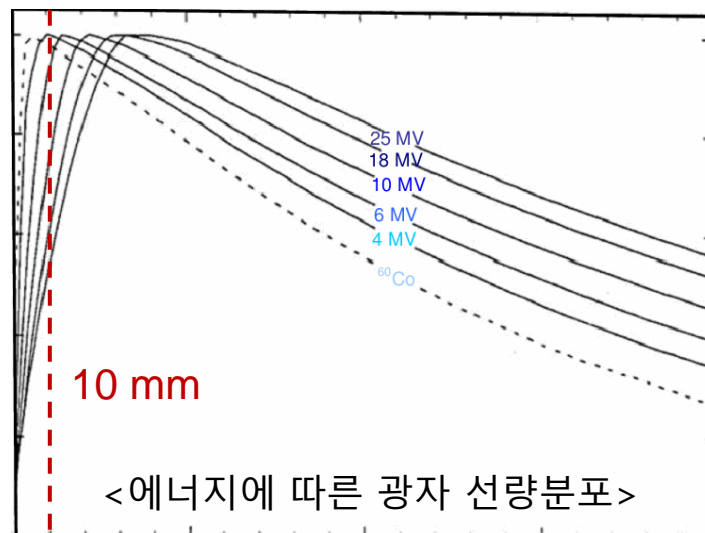


최대선량이 나타나는 지점이 대략 1cm 이다

$H^*(10) >$ 장기 A, 장기 B 또는 장기 C

$H'(10) >$ 장기 A, 장기 B 또는 장기 C

$H_p(10) >$ 장기 A, 장기 B 또는 장기 C

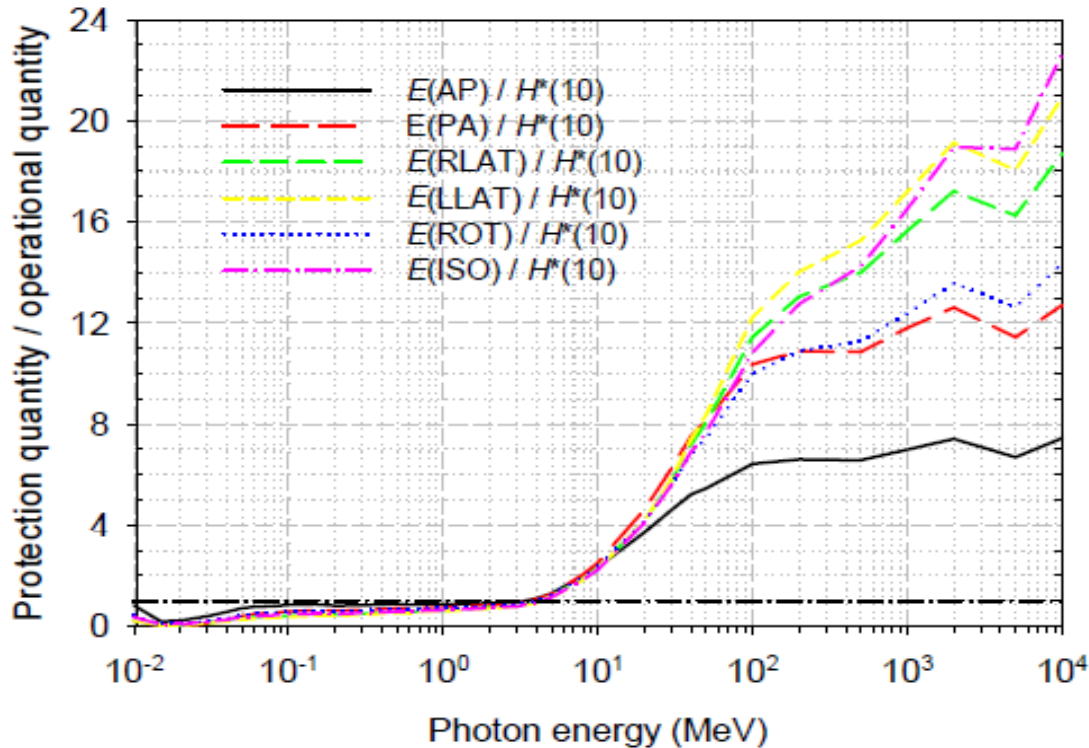


<에너지에 따른 광자 선량분포>

균질 방사선장에서 전신피폭할 경우
실용량은 등가선량 및 유효선량의 보수적 평가치가 된다

고에너지 광자의 방사선량

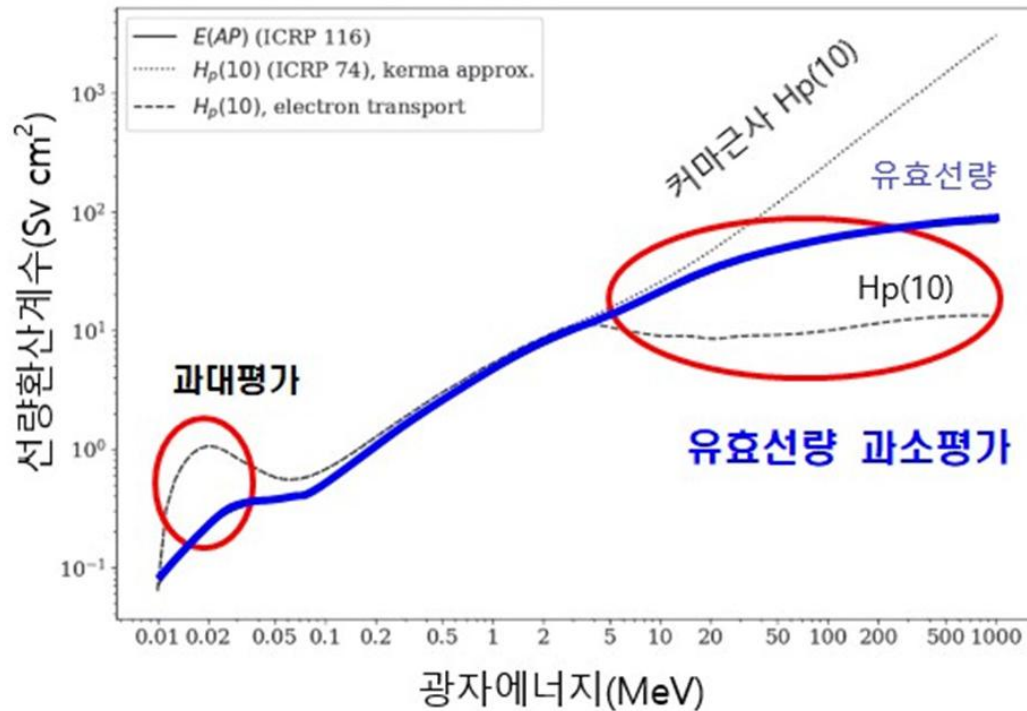
ICRP 116



기존 실용량의 한계를 보완하기 위한 내용으로
 ICRU Report no. 95 발간
 ICRP 74 → ICRU 57
 ICRP 116 → ICRU 95

Fig. 5.2. Ratios of protection quantity to operational quantity for monoenergetic photons (from Ferrari and Pelliccioni, 1994a; Pelliccioni, 2000) for monoenergetic photons (the secondary particles were tracked (i.e. there is no kerma approximation). To facilitate comparison with Fig. 5.1, the upper figure shows values up to energies of 10 MeV. AP, antero-posterior; PA, postero-anterior; LLA, lateral; ROT, rotational; ISO, isotropic.

고에너지 광자의 방사선량 (cont'd)



$$h^* = \frac{H^*(10)}{\Phi}$$



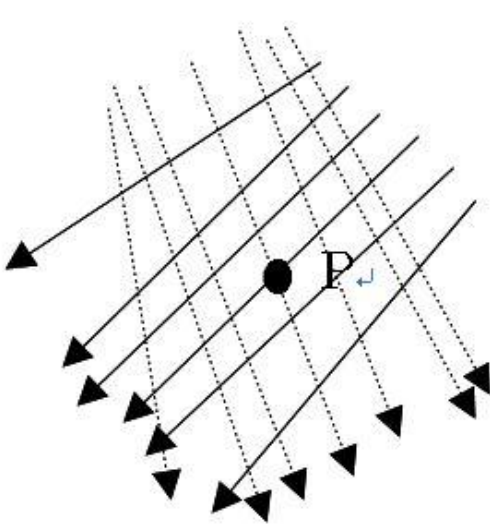
$$h^* = \frac{E_{max}}{\Phi}$$

대한방사선방어학회 뉴스레터(2021년12월호, 이재기)

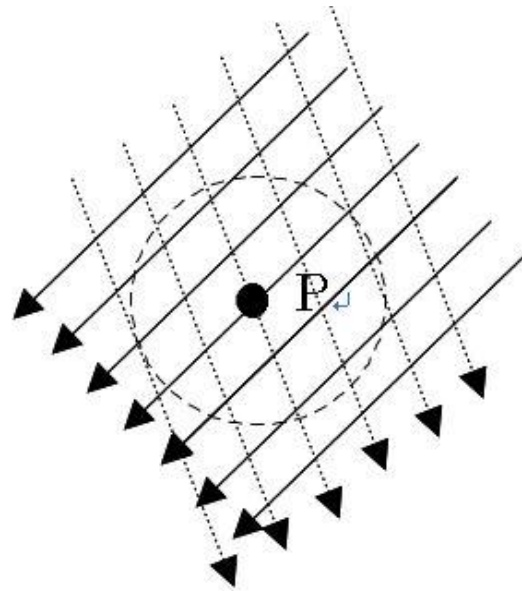
방사선장의 종류

❖ 방사선장

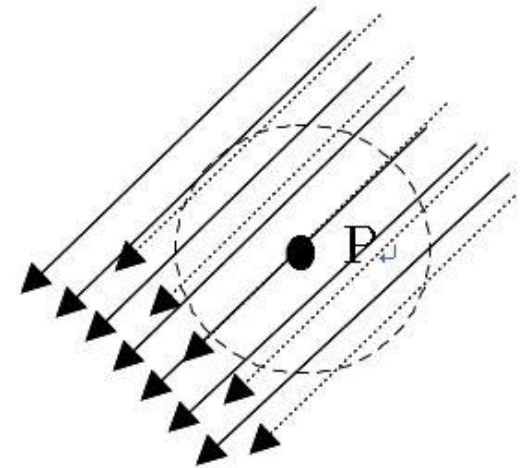
- 확장된 방사선장: P점을 지나는 두 방사선을 주변까지 확장
- 정렬확장된 방사선장: 확장된 방사선장의 방향을 정렬시킴



실제 방사선장



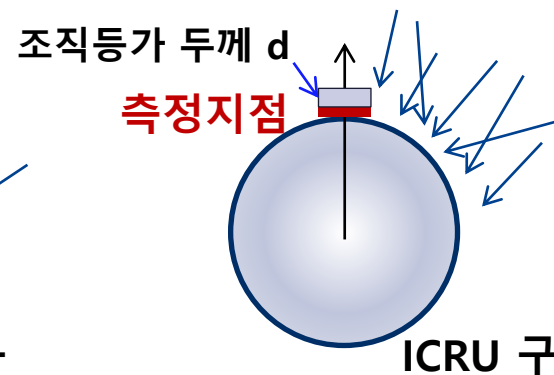
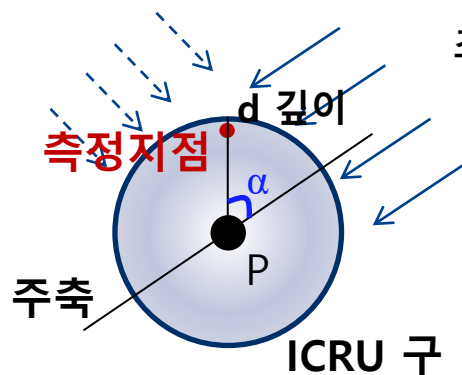
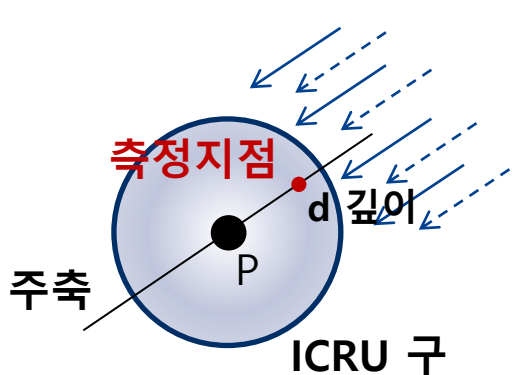
확장된 방사선장



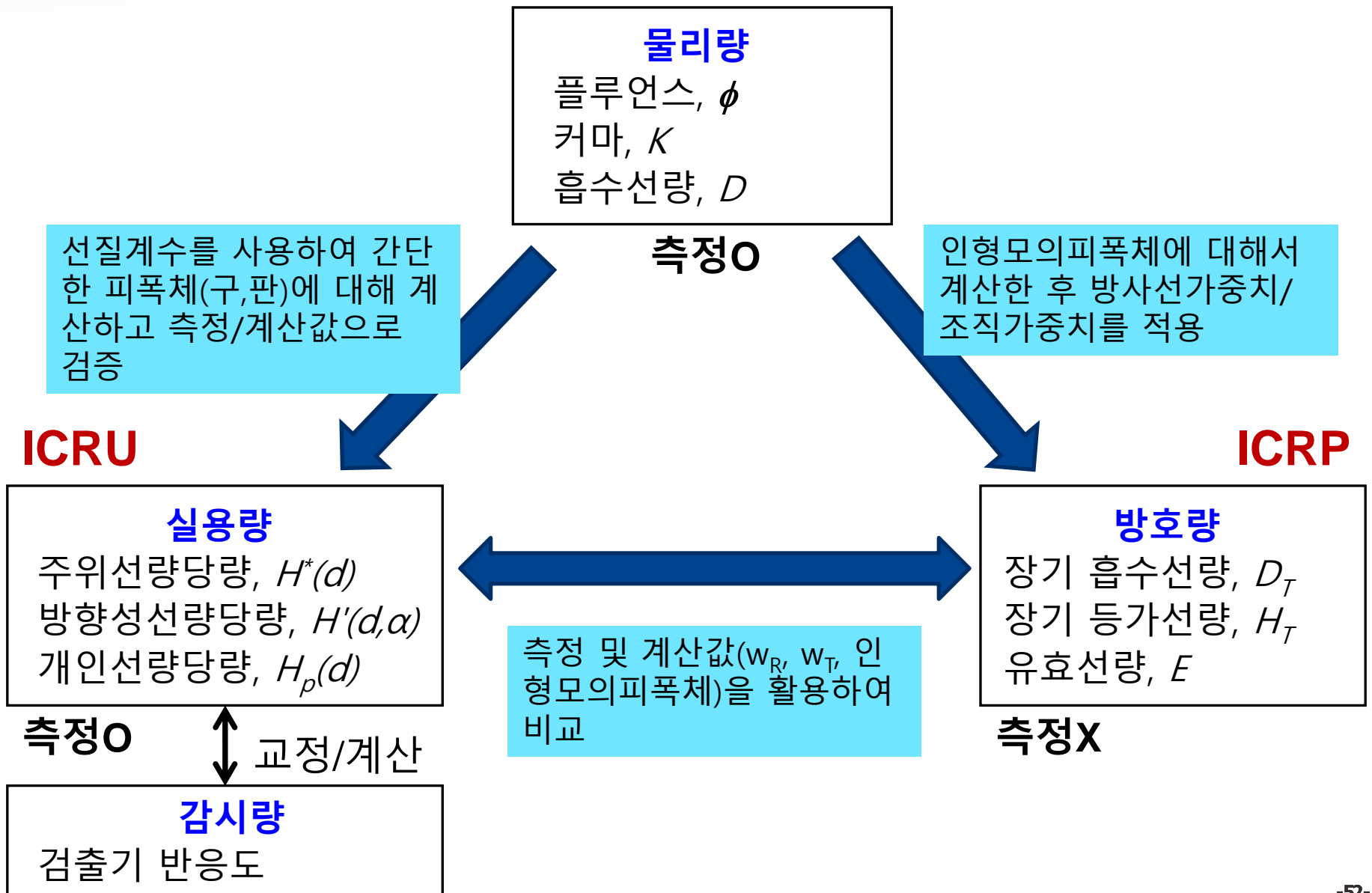
정렬확장된 방사선장

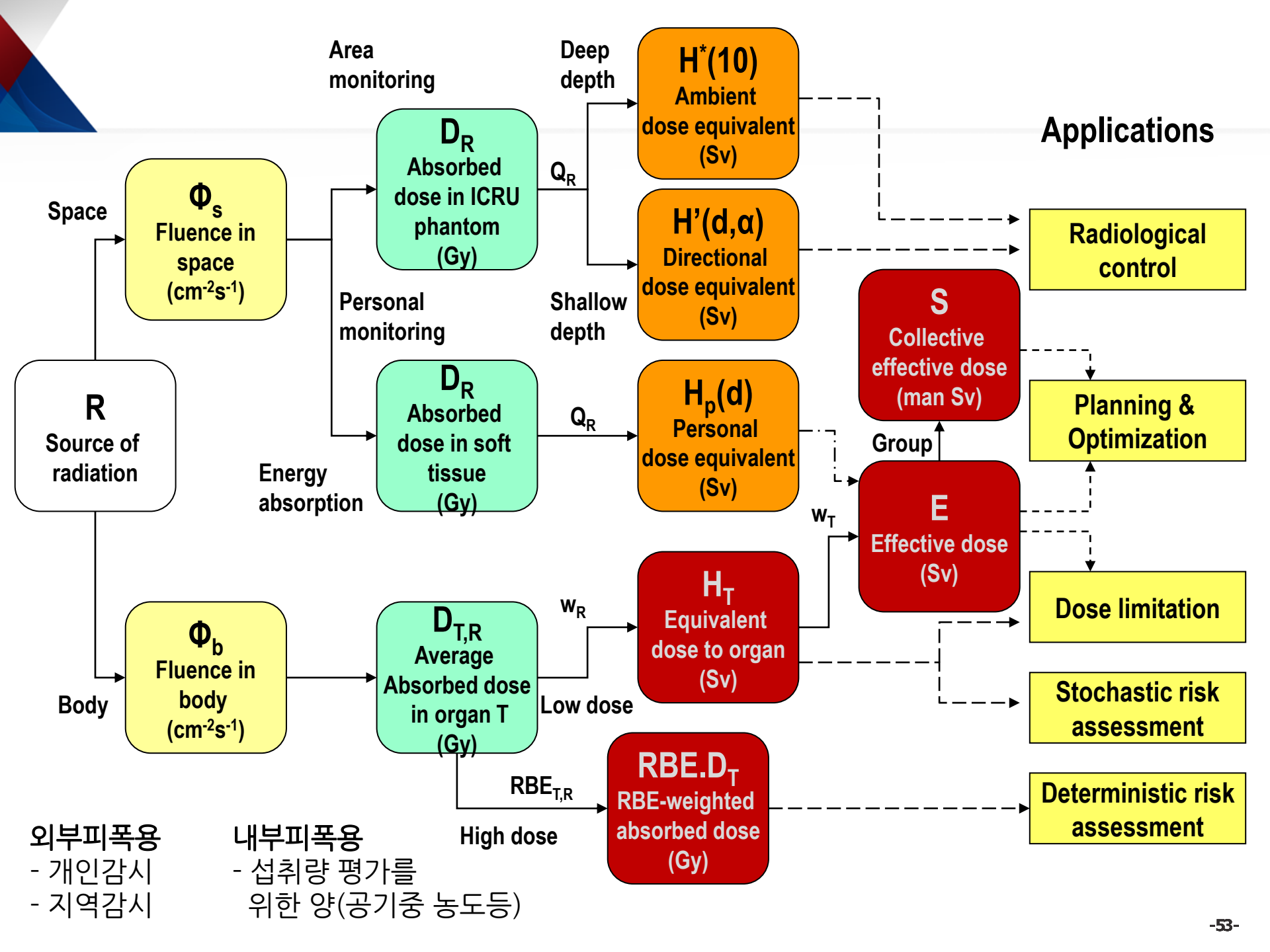
실용량의 종류

목적	지역감시		개인감시
명칭	주위선량당량	방향성선량당량	개인선량당량
기호	$H^*(d)$	$H'(d, \alpha)$	$H_p(d)$
방사선장	정렬확장 방사선장	확장 방사선장	실제 방사선장
위치	ICRU 구 주축 위 d mm 깊이	ICRU 구 주축과 각도 α 인 반경 위 d mm 깊이	인체에 준하는 물체 위 연조직 d mm 깊이
주목적	심부선량당량률 $\dot{H}^*(10)$ 로 유효선량률 대체	표층선량당량률 $\dot{H}'(3)$ 및 $\dot{H}'(0.07)$ 로 수정체 등가선량률 및 피부 등가선량률로 대체	$H_p(10)$, $H_p(3)$, $H_p(0.07)$ 로 각각 유효선량, 수정체 등가선량, 피부 등가선량으로 대체
장비	선량률 측정기, 서베이미터		개인선량계



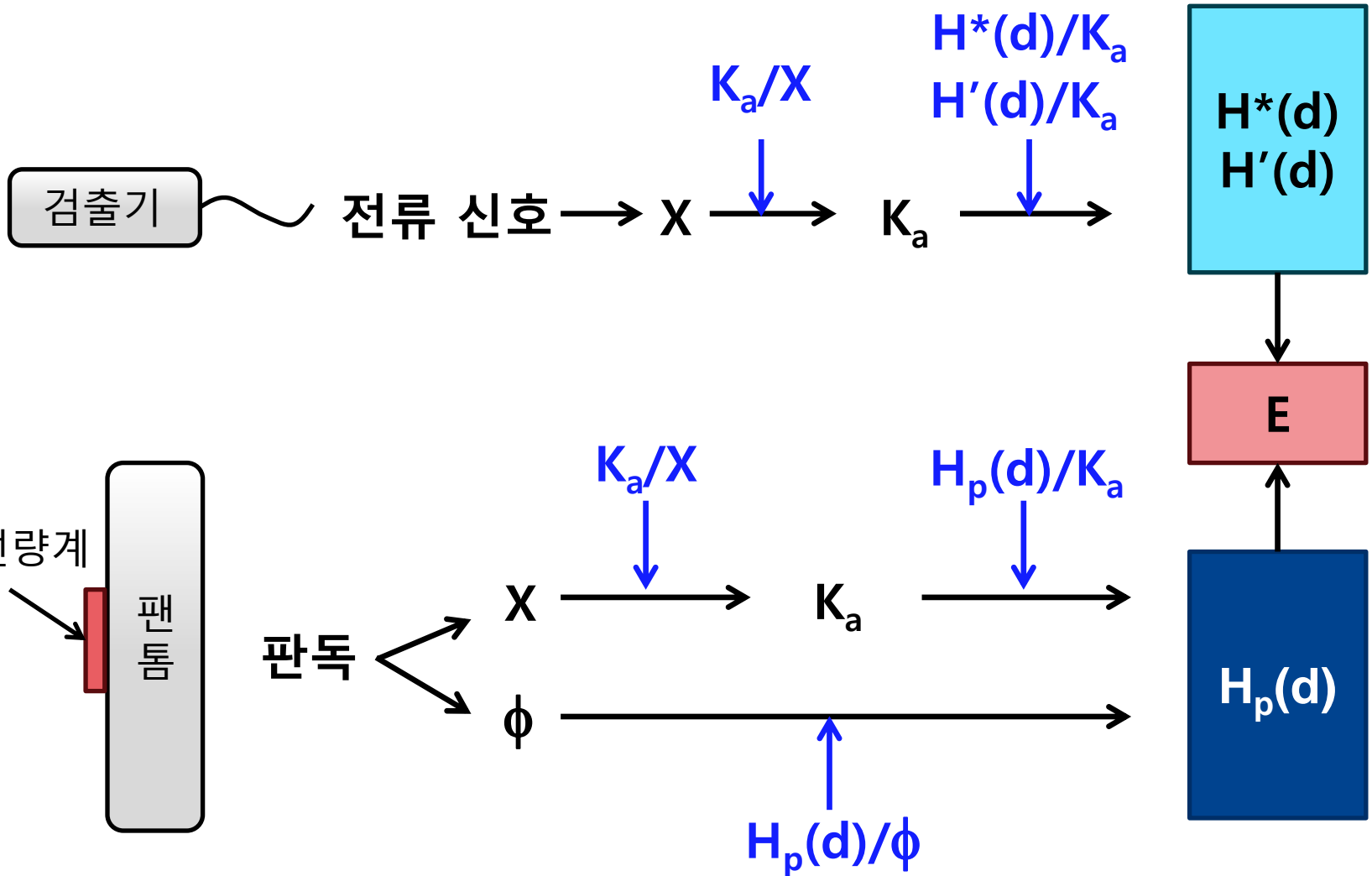
물리량 - 실용량 - 방호량 관계





측정량 → 실용량 → 유효선량

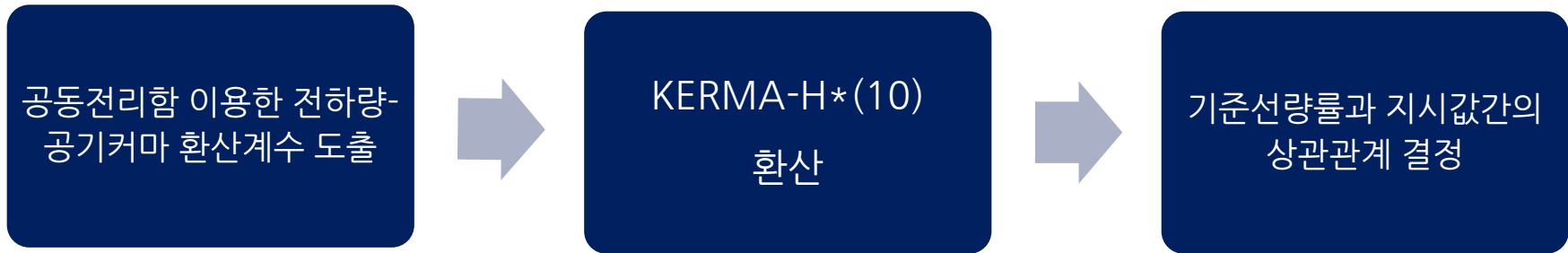
❖ 실용량을 이용한 유효선량 평가 방법



서베이미터의 교정

선 질 (Beam code)	범 위 (Range)	기준선량률 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	지시값 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	교정인자
Cs-137	Auto	700	616.3	1.14
		300	293.5	1.02
		70	74.0	0.95
		30	31.3	0.96

기준선량률, 지시값 = $H^*(10)$



[Gy/C]

[Sv/Gy]
ISO 4037 (환산계수)

교정인자

Bragg-Gray cavity theory

$$Q \rightarrow D_{\text{gas}} \rightarrow D_{\text{wall}} \xrightarrow{D_{\text{wall}} / (1-g_{\text{wall}})} K_{\text{wall}} \xrightarrow{\left(\frac{\bar{\mu}_{\text{tr}}}{\rho}\right)_{\text{air, wall}}} K_{\text{air}}$$

Air-kerma cavity standards(2009, BIPM)

KERMA → 선량당량

$$N_r = \frac{\dot{K} \cdot h}{M \cdot k_d \cdot k_{tp}} = \frac{H^*(10)}{M \cdot k_d \cdot k_{tp}} \quad \text{or} \quad \frac{H'(0.07)}{M \cdot k_d \cdot k_{tp}}$$

여기서 N_r : 피교정 측정기의 교정인자

\dot{K} : 공기 커마(율)

h : 공기 커마 - 선량당량(율) 환산인자

$H^*(10)$: 주변선량당량(율)

$H'(0.07)$: 방향성선량당량(율)

M : 피교정 측정기의 지시값

k_d : 피교정기의 위치 재현성 보정인자

k_{tp} : 환경 보정인자(필요시)

KASTO 19-80109-034 감마선 서베이미터의 표준교정절차서