

# 측정기 에너지반응도 확인

무엇(방사선종류, 에너지, 심부/표층선량률 등)을 측정하고자 하는가?

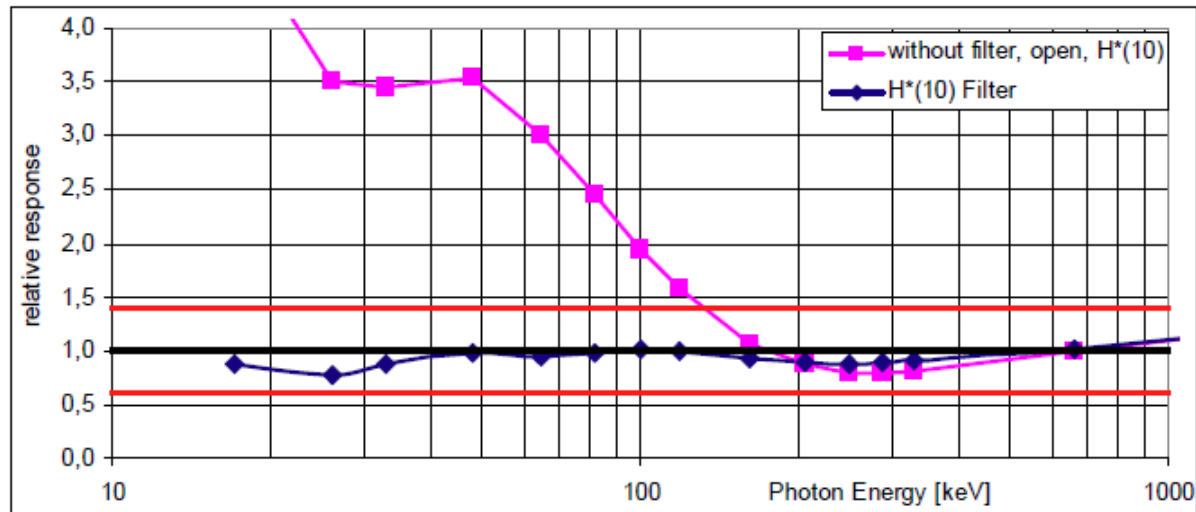


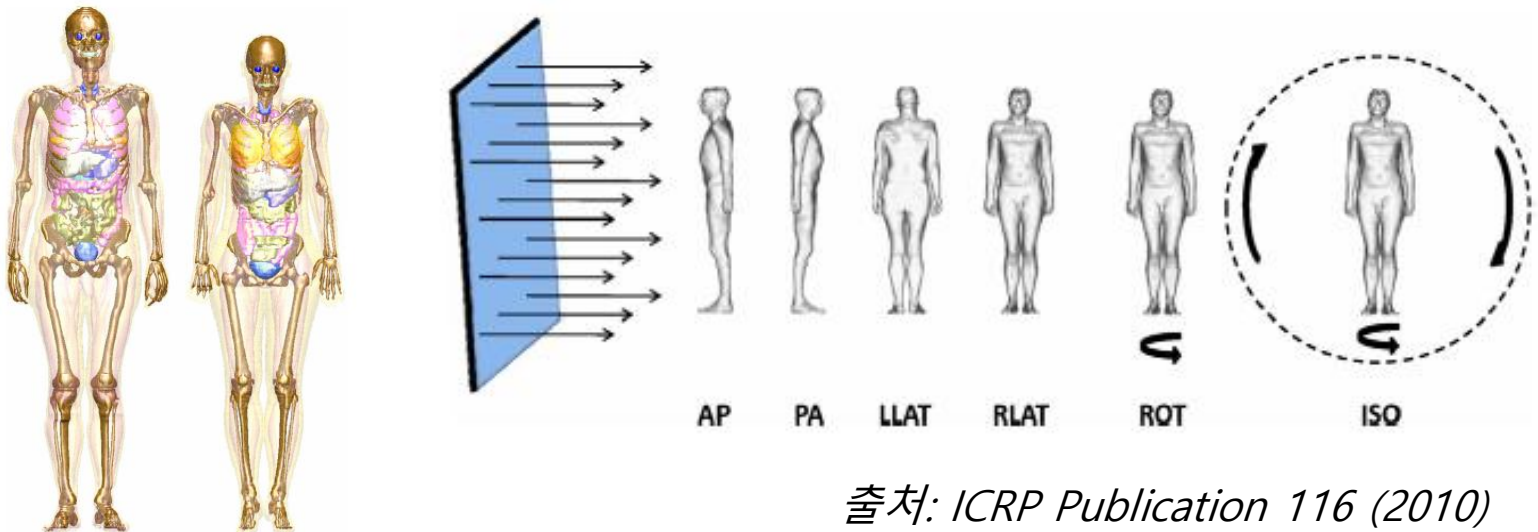
Diagram 9-1: Energy dependence for ambient dose equivalent  $H^*(10)$

Thermo, Radeye-B20

# 선량환산계수

## ❖ 선량환산계수

- 기준 방사선장: 넓고 평행한 방사선장
- 방향: AP, PA, LLAT, RLAT, ROT, ISO
- 피폭모델: 인형모의체 내 다양한 조직 및 장기
- 다양한 방사선(광자, 중성자, 전자 등) 및 넓은 에너지 영역
- 몬테칼로 방사선 수송 계산(예, MCNP, Geant4, EGSnrc, Fluka 등)
- “플루언스-선량률 환산계수” 또는 “커마-실용량 환산계수”

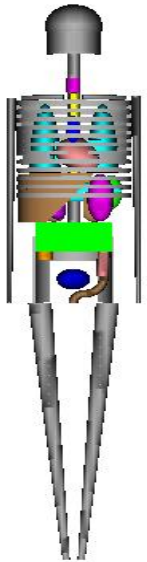


출처: ICRP Publication 116 (2010)

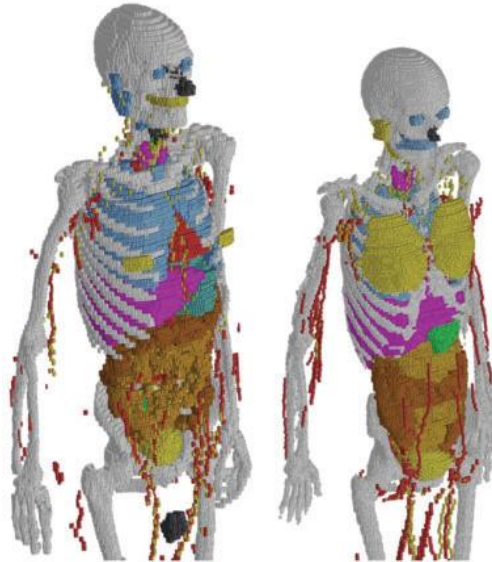
# 인체 전산 팬텀

## ❖ 인체 전산 팬텀의 변천

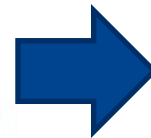
- MIRD 팬텀(ICRP 23/60, 1975): 해석기하학적 체적으로 표현
- Voxel 팬텀(ICRP 110/103, 2009): 미소 체적소(voxel)로 표현 (수정체, 얇은 조직 모사의 한계)
- Mesh 팬텀: 사면체 메쉬로 표현



MIRD 팬텀



Voxel 팬텀

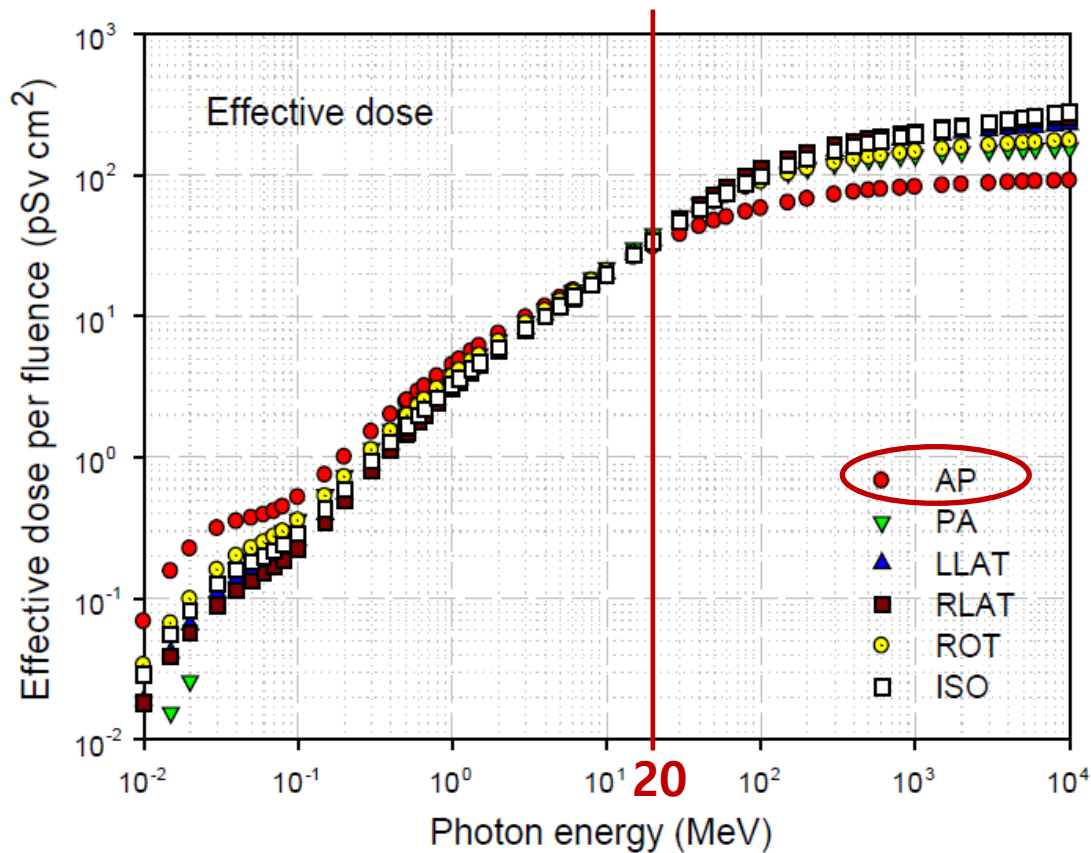


Mesh 팬텀

# 선량환산계수

## ❖ 선량환산계수

- 광자 에너지 및 조사방향에 따른 선량환산계수 ( $E/\Phi$ )
- 플루언스( $\#/cm^2$ )  $\rightarrow$  유효선량(Sv)



출처: ICRP Publication 116 (2010)

# 선량환산계수 예시

표7.1. 광자의 선량환산계수(ICRP 2010)

출처: 이재기 (2016)

광자 에너지 keV	$K_a/\Phi$ pGy cm <sup>2</sup>	$H^*(10)/\Phi$ pSv cm <sup>2</sup>	$H^*(10)/K_a$ Sv/Gy	$H^*(10)/X$ cSv/R	$H'(0.07,0^\circ)/\Phi$ pSv cm <sup>2</sup>	$H'(0.07,0^\circ)/K_a$ Sv/Gy	$E/\Phi(AP)^a$ pSv cm <sup>2</sup>
10	7.60	0.061	0.008	0.0091	7.20	0.95	0.0685
15	3.12	0.83	0.26	0.237	3.19	0.99	0.156
20	1.73	1.05	0.61	0.521	1.81	1.05	0.225
30	0.739	0.81	1.10	0.96	0.90	1.22	0.313
40	0.438	0.6	1.47	1.29	0.62	1.41	0.351
50	0.328	0.54	1.67	1.46	0.50	1.53	0.370
60	0.292	0.50	1.74	1.52	0.47	1.59	0.390
80	0.308	0.53	1.72	1.51	0.49	1.61	0.444
100	0.372	0.61	1.65	1.44	0.58	1.55	0.519
150	0.600	0.89	1.49	1.31	0.85	1.42	0.748

환산인자:  $K_a/\phi$ ,  $H^*(10)/\phi$ ,  $H^*(10)/K_a$ ,  $H^*(10)/X$ ,  $H'(0.07)/\phi$ ,  $H'(0.07)/K_a$ ,  $E/\phi(AP)$

# 내부피폭 선량평가

## ❖ 내부피폭

- 방사성핵종을 섭취함으로써 인체내 오염된 조직이나 장기에서 방출되는 방사선에너지를 자신의 조직이나 장기가 피폭

## ❖ 주요 섭취경로

- 호흡기를 통한 흡입
- 소화기를 통한 취식
- 피부(특히 상처)를 통한 침투

## ❖ 특징

- 비정이 짧은 **하전입자**가 비하전입자보다 위해도가 큼
- 핵종에 따라 **특정 장기에 침착**하는 경향이 있음(I: 갑상선, U: 신장 등)
- 유효반감기(또는 **유효제거계수**) 사용
- 핵종의 물리화학적 특성뿐만 아니라 섭취하는 개인의 신체특성, 호흡량, 대사량에 차이가 있어서, 특정개인의 정확한 선량평가가 어려움 → '표준인' 도입(3개 연령대 - 성인, 아동, 유아)

# 내부피폭 선량평가 관련 용어

- AMAD : 입자의 모양을 구로 가정했을 대의 통계적 입자의 크기 정의(median, 50 percentile) **A**ctivity **M**edian **A**erodynamic **D**iameter
  - 작업종사자 : 5um, 일반인 : 1um 가정
  - 물리적 특성
- Type F, M, S (**F**ast, **M**oderate, **S**low)
  - 호흡기 또는 소화기에서 체액으로 흡수되는 속도
  - 화학적 특성
- $f_1(=f_A)$ 
  - 소장에서 체액으로 흡수되는 비율(Type과 유사한 개념)
- 호흡(inhalation)+취식(injection)=섭취(intake)
- Intake → Uptake : 호흡기, 소화기 또는 피부를 통해 체내로 들어온 방사능이 체액으로 유입되는 현상

# 내부피폭 선량평가

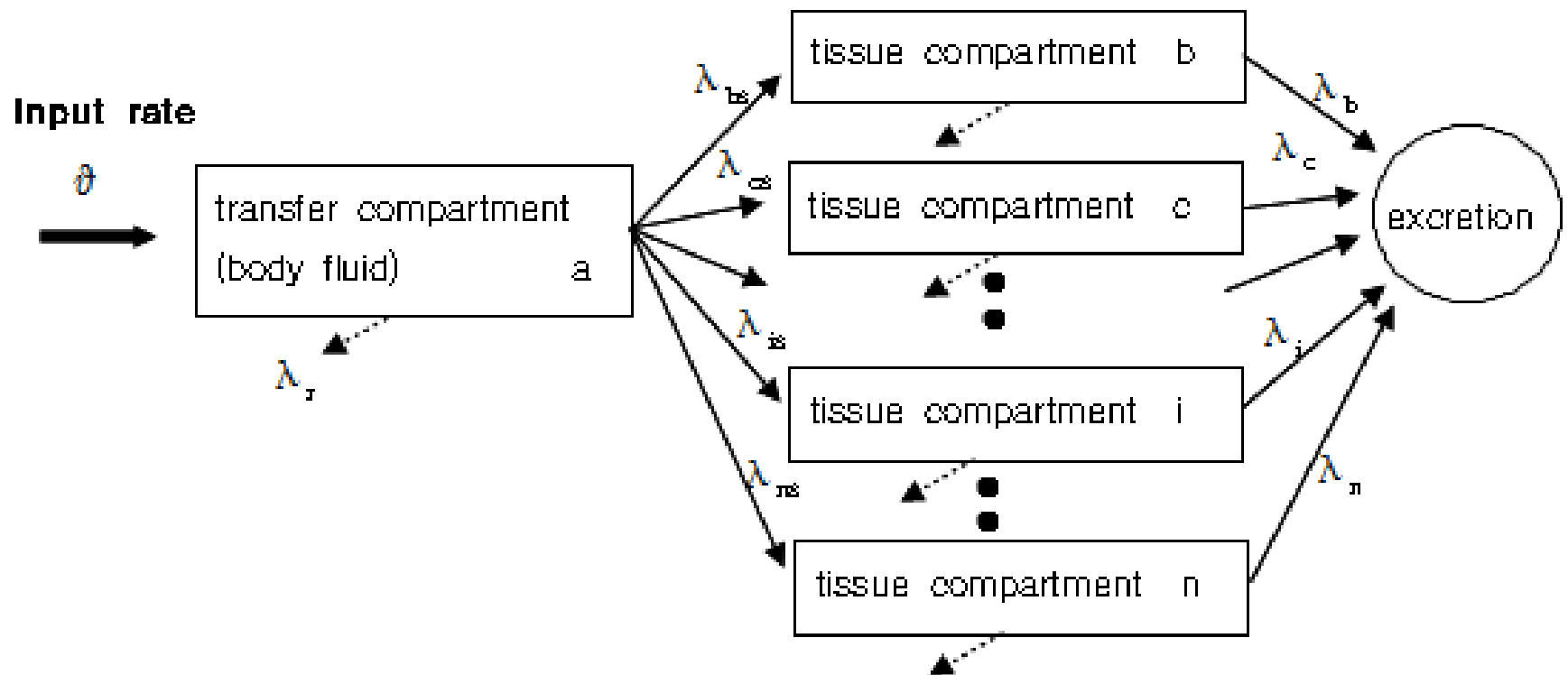
TABLE III.2A. WORKERS: COMMITTED EFFECTIVE DOSE PER UNIT INTAKE  $e(g)$  VIA INHALATION AND INGESTION (Sv/Bq) (cont.)

Radionuclide <sup>a</sup>	Physical half-life	Inhalation				Ingestion	
		Type	$f_1$	$e(g)_{1\mu m}$	$e(g)_{5\mu m}$	$f_1$	$e(g)$
Nb-97	1.20 h	M	0.010	$4.4 \times 10^{-11}$	$6.9 \times 10^{-11}$	0.010	$6.8 \times 10^{-11}$
		S	0.010	$4.7 \times 10^{-11}$	$7.2 \times 10^{-11}$		
Nb-98	0.858 h	M	0.010	$5.9 \times 10^{-11}$	$9.6 \times 10^{-11}$	0.010	$1.1 \times 10^{-10}$
		S	0.010	$6.1 \times 10^{-11}$	$9.9 \times 10^{-11}$		

# 격실모델

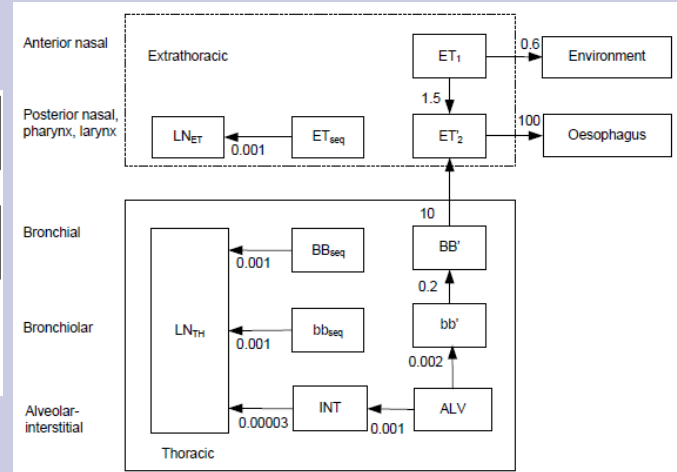
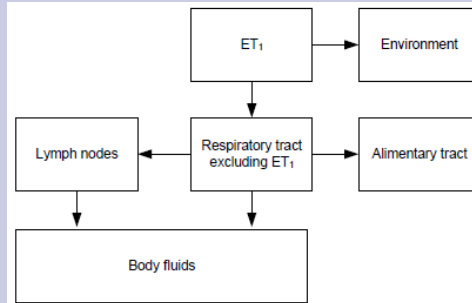
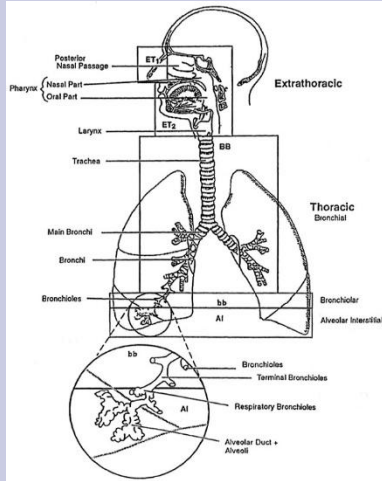
## ❖ 격실모델

- 방사성핵종 섭취(intake) → 체액 흡수(uptake) → 여러 조직/장기에 분포 → 붕괴( $T_p$ )/배설( $T_b$ )을 통해 소멸
- $T_p$ : 물리적 반감기,  $T_b$ : 생물학적 반감기



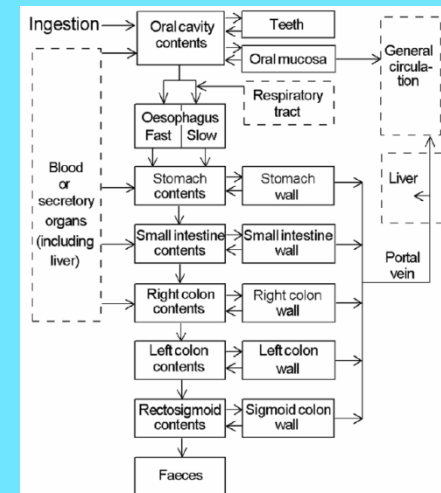
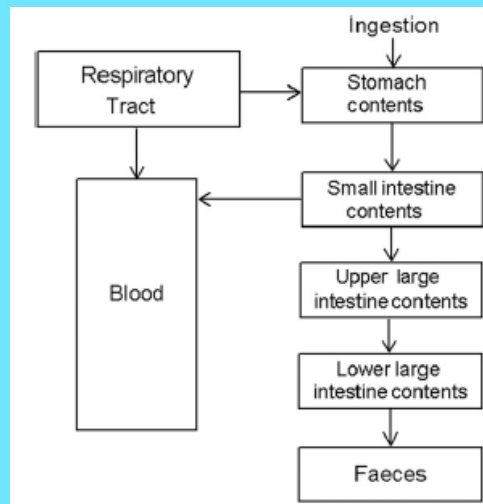
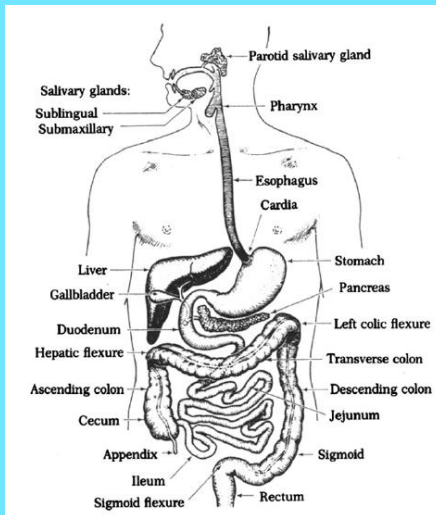
# 격실모델(cont'd)

## 호흡기 모델



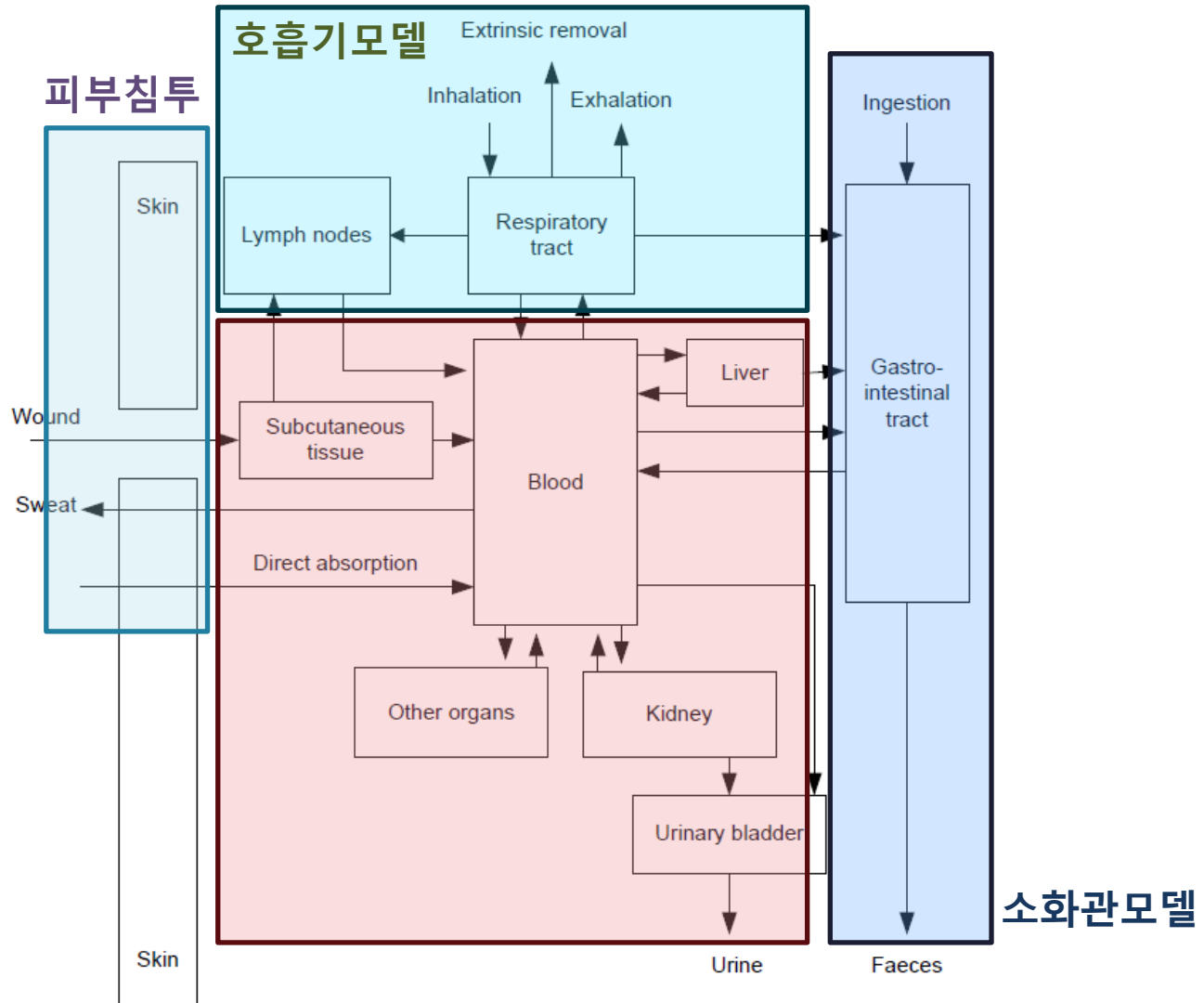
출처: ICRP Publication 130 (2015)

## 소화관 모델

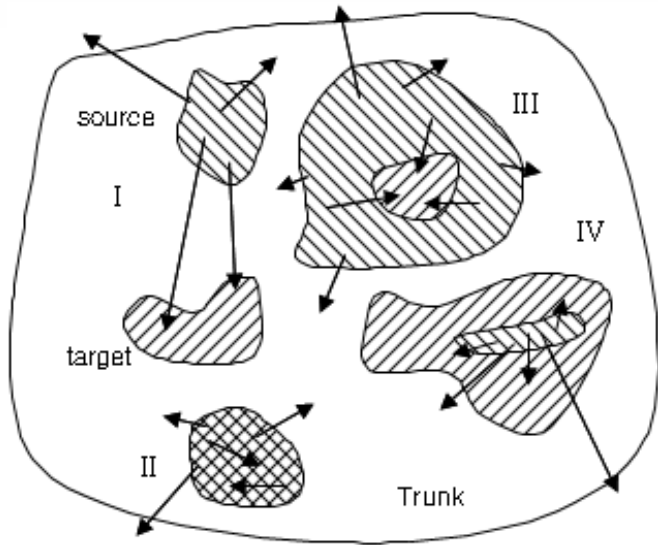


출처: ICRP Publication 100 (2006)

# 전신생리모델(Systemic Model)



# 흡수분율



[내부피폭에서 선원장기와 표적장기의 위치에 따른 피폭 형식의 예]

I: 선원장치에서 방출된 방사선이 다른 표적장치에 피폭을 주는 경우

II: 선원장치와 표적장기가 같은 경우

III: 선원장기가 표적장기를 감싸는 경우

IV: 표적장기가 선원장기를 감싸는 경우

## ☀ 흡수분율(Absorbed Fraction, AF)

- $AF(T \leftarrow S)$ : 선원장치(S)에서 방출된 방사선 에너지가 특정 표적장치(T)에 흡수되는 비율

## ☀ 비흡수분율(Specific Absorbed Fraction, SAF)

- 흡수분율을 표적장기의 질량으로 나눈 값
- 표적장기의 단위질량 당 흡수분율

# 고유유효에너지

## ❖ 고유유효에너지(Specific Effective Energy, SEE)

- 선원장치에서 일어나는 하나의 방사성붕괴 당 표적조직의 단위 질량당 흡수되는 에너지량에 그 방사선의 방사선가중치를 곱한 값

$$SEE(T \leftarrow S)_R = \frac{AF(T \leftarrow S)_R}{M_T} \times y_R \times E_R \times w_R \quad [\text{MeV/g}]$$

단위질량당 흡수분율                      붕괴당 에너지방출량

- $y$ : 붕괴당 방사선 방출률,  $E$ : 방사선 에너지,  $w$ : 방사선가중치

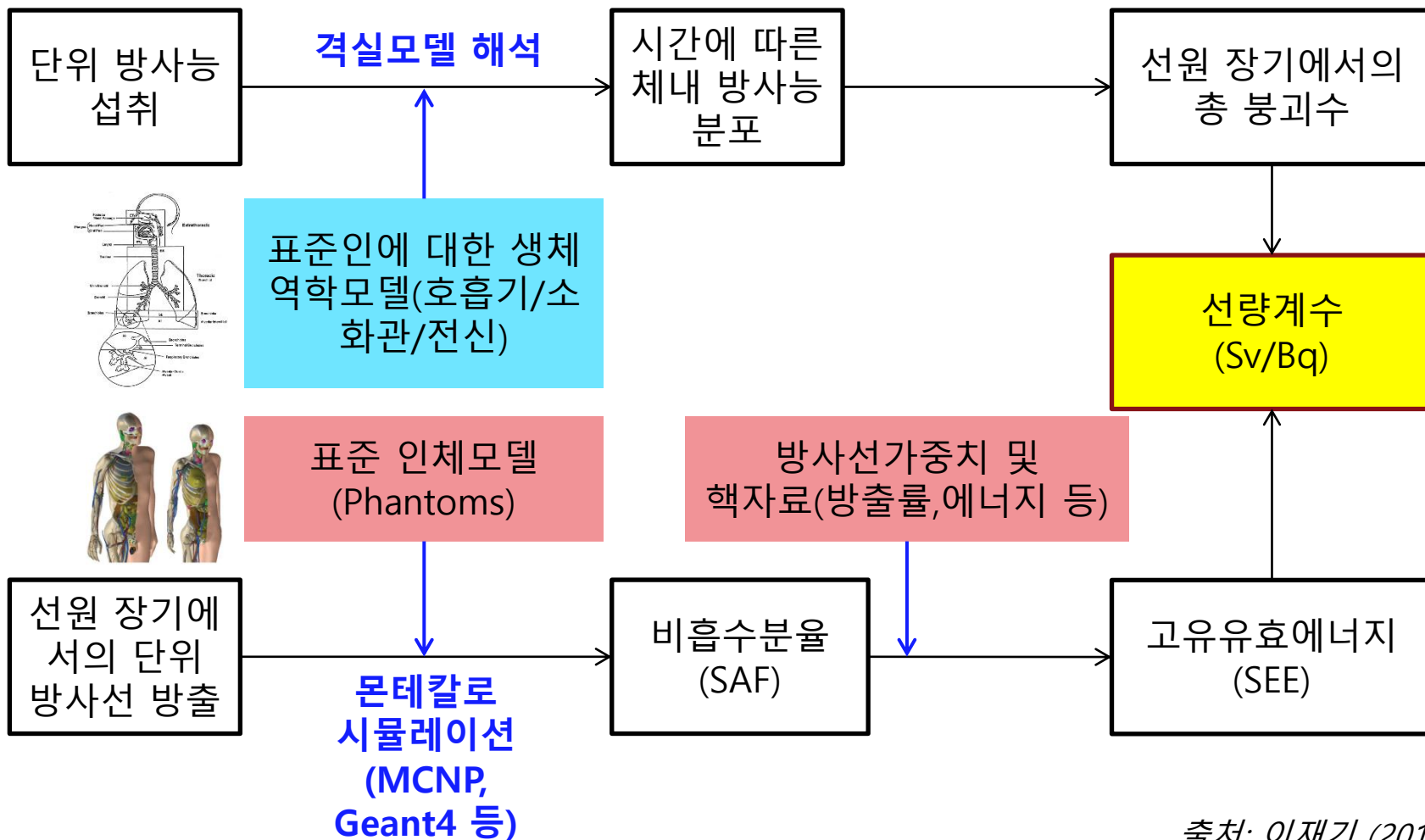
예탁등가선량 = 총 붕괴수  $\times$  SEE

예탁유효선량 = 총 붕괴수  $\times$  SEE  $\times$  조직가중치

# 내부피폭 선량계수

## ❖ 내부피폭 선량계수

➤ 섭취한 방사능(Bq) → 예탁유효선량(Sv)



# 내부피폭 선량계수(cont'd)

❖ 섭취 방사능량(intake)을 알고 있을 경우(상대적으로 simple)

Table 10.7. Committed effective dose coefficients ( $\text{Sv Bq}^{-1}$ ) for the inhalation or ingestion of  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ , and  $^{90}\text{Sr}$  compounds.

Inhaled particulate materials ( $5 \mu\text{m}$ AMAD aerosols)	Effective dose coefficients ( $\text{Sv Bq}^{-1}$ )		
	$^{85}\text{Sr}$	$^{89}\text{Sr}$	$^{90}\text{Sr}$
Type F, strontium chloride, sulphate and carbonate	3.8E-10	9.6E-10	3.2E-08
Type M, fuel fragments, all unspecified forms	5.0E-10	2.2E-09	1.8E-08
Type S, FAP, PSL, strontium titanate	6.7E-10	3.2E-09	2.0E-07
Ingested materials			
$f_A = 0.01$ , strontium titanate	2.1E-10	4.0E-10	1.1E-09
$f_A = 0.25$ , all other chemical forms	3.8E-10	8.9E-10	2.4E-08

AMAD, activity median aerodynamic diameter; FAP, fused aluminosilicate particles; PSL, polystyrene.

$f_A$  :  $f_1$ 과 유사한 개념  
(소장에서만 흡수  $\rightarrow$  모든 소화장에서 흡수)

$\text{SrCl}_2$ : strontium chloride  
 $\text{SrSO}_4$ : strontium sulphate  
 $\text{SrCO}_3$ : strontium carbonate  
 $\text{SrTiO}_3$ : strontium titanate

# 내부피폭 선량평가(규제 심사)

- NUREG-1400 (Air Sampling in the Workplace) 평가 방법 준용
  - 연간 흡입/섭취 방사능량을 바탕으로 예탁유효선량 평가
    - 기본 흡입분율 :  $10^{-6}$
    - 유출분율 :  $10^{-2}$  (예 : 액체)
    - 후드 내 취급 시 격리계수 :  $10^{-1}$
  - 선량계수 적용(ICRP 68, IAEA GSR Part 3 Table III.2A)

TABLE III.2A. WORKERS: COMMITTED EFFECTIVE DOSE PER UNIT INTAKE  $e(g)$  VIA INHALATION AND INGESTION (Sv/Bq) (cont.)

Radionuclide <sup>a</sup>	Physical half-life	Inhalation			Ingestion		
		Type	$f_1$	$e(g)_{1\ \mu\text{m}}$	$e(g)_{5\ \mu\text{m}}$	$f_1$	$e(g)$
Ga-68	1.13 h	F	0.001	$2.8 \times 10^{-11}$	$4.9 \times 10^{-11}$	0.001	$1.0 \times 10^{-10}$
		M	0.001	$5.1 \times 10^{-11}$	$8.1 \times 10^{-11}$		

# 섭취량 평가

## ❖ 섭취량 평가 (섭취량을 모를 경우)

→ 평가인자: 섭취시점, 섭취 핵종, 화학형, 입자크기, 방사능

→ 필요정보 : 잔류함수, 배설함수 등

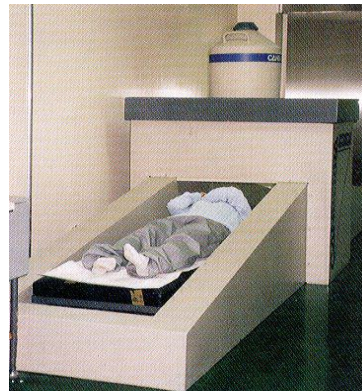
➤ 평가방법: **직접 생물정량, 간접 생물정량, 공기 샘플링**

### ➤ 직접 생물정량(in vivo)

➤ 전신계수법: 인체 내에서 발생된 방사선을 외부에서 측정

➤ 백그라운드가 낮아야 함

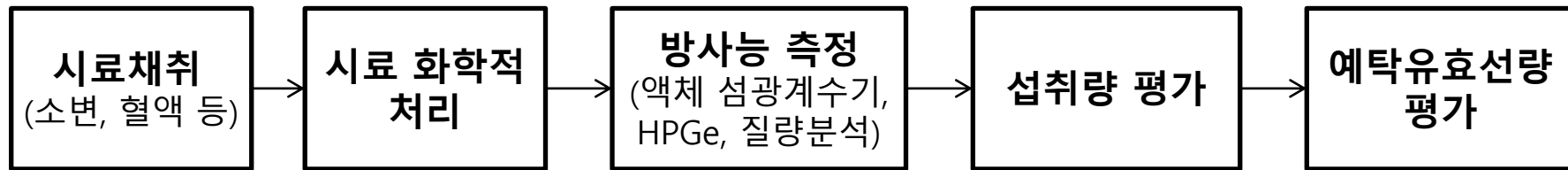
➤ 오차원인: 계측 배열 변화, 신체특성 차이, 체내 방사능 분포의 변화, 계측오차, 섭취 후 시간의 불확실성



# 섭취량 평가(cont'd)

## ➤ 간접 생물정량(in vitro)

- 생체시료(배설물, 혈액)를 채취한 후 방사능 측정
- 오차원인: 시료의 대표성, 화학적 수율, 계측오차, 섭취 후 시간의 불확실성



## ➤ 공기 샘플링

- 작업환경 감시를 위해 공기 중 방사능 측정 → 흡입량 평가
- 입자의 화학형과 입자크기 분포도 측정
- 샘플링의 포집효율을 정확히 알아야 함
- 오차원인: 샘플링 대표성, 공기중 농도의 시간변화, 시료처리 변수, 포집효율, 계측오차

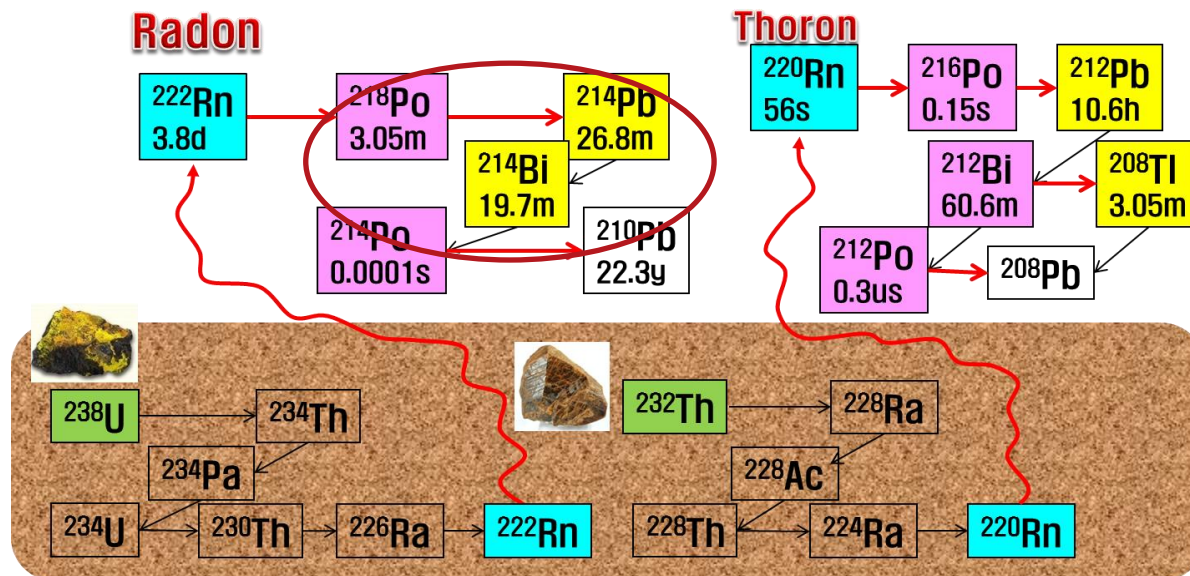
# 라돈 피폭

## ❖ 생성원

- U-238 계열: Rn-222 ( $T_h$ : 3.8일)
- Th-232 계열: Rn-220 ( $T_h$ : 56초) “토론”

## ❖ 피폭 과정

- Rn-222, Rn-220은 불활성 기체 → 대기로 스며나옴 → 라돈 자손이 생성되어 공기중에 부유  
→ 라돈 자손의 알파붕괴에 의해 알파선 방출 → 폐 피폭
- 라돈 자체는 불활성 기체로서 대부분 날숨을 통해 배출



# 라돈 피폭 선량 평가 과정

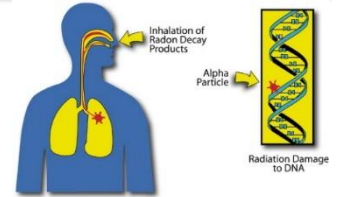
Q) 우리가 알고자 하는 것은 무엇인가?

A) 라돈/토론에 의한 유효선량



Q) 유효선량을 평가하기 위해 필요한 정보는?

A) 라돈 및 토론의 체내 흡입량(방사능농도, 흡입율, 노출시간 등)



참고) 라돈/토론의 결정장기가 폐인 이유? 방사선피폭을 주는 자손핵종들이 단수명(30분이내)이므로 폐의 호흡기에 침착된 입자들이 혈액 또는 소화기로 흡수되기 전에 선량의 대부분을 폐조직에 전달하기 때문임

Q) 체내 흡입량 외에 고려할 사항은?

A) 1. 라돈 및 토론의 특성 : 라돈 및 토론의 경우 모핵종(불활성기체라서 날숨으로 즉시 배출됨)보다 딸핵종에 의한 피폭이 절대적이므로 평형상태에 따라 평가결과가 달라짐  
2. 선량환산계수(e) : 라돈 및 토론의 선량환산계수는 평형 상태에서 모핵종 및 딸핵종에 의한 단위 방사능당 피폭선량을 의미함  
3. 평형인자(F) : 평형 상태에 따라 피폭선량이 달라지므로 어느 정도 평형이 이루어진 상태인가를 고려하여야 함.

# 라돈 피폭 선량 평가 과정(cont'd)

Q) 평형인자가 1이라면?

A) 라돈의 농도가 100Bq/L라고 가정할 경우 평형인자가 1이라면 모든 딸핵종의 농도도 100Bq/L가 됨을 의미함.  
그러므로 평형인자가 클수록 피폭선량 평가 결과도 크게 나옴. 따라서 평형상태가 곧 딸핵종의 양을 의미하며, 이는 선량의 증가/감소로 연결됨.



Q) 라돈과 토론의 평형인자는 어떻게 가정할 수 있을까?

A) 평형인자는 주거공간을 기준으로 라돈의 경우 0.4(자연 환기를 가정함(ICRP 65, 115), 토론의 경우 Harley등(2010)이 실험을 통해 도출한 0.04를 일반 평가 목적으로 사용함



Q) 실무적으로 이 과정이 어떻게 적용되는가?

A) 알파입자에 대한 에너지분해능이 있는 측정기를 이용하여 라돈 또는 토론의 농도(C)를 알아냄. F, e는 제공되는 값이며, B, t는 실제 노출환경을 고려하여 값을 산정  
침대 표면 2cm 위치에서의 선량을 평가했다면 농도 측정시 측정기의 포집 위치가 2cm였음을 의미함



Q) 해당 정보를 반영한 예탁유효선량 평가식은?

A) 유효선량 =  $C \times F \times e \times B \times t$   
C : 라돈 또는 토론의 농도 [Bq/m<sup>3</sup>]  
F : 평형인자 [단위 없음]  
(C x F = 평형등가농도)  
e : 선량환산계수(ICRP제공) [mSv/Bq/m<sup>3</sup>]  
B : 시간당 호흡률 [m<sup>3</sup>/hr]  
t : 노출시간 [hr] (B x t = 호흡량)

# 라돈 피폭 선량 평가 방법

## ❖ 선량평가 방법

- 공기 중 라돈 농도(C) 측정 → 평형인자(F)를 반영하여 평형등가라돈농도(EEC) 결정 → 선량환산계수를 곱함 → 피폭 선량
- **평형등가라돈농도(EEC; Equilibrium Equivalent Concentration)**
  - 라돈과 자손핵종 사이의 평형인자
  - EEC = 평형인자(F) x 측정된 라돈농도(C)
  - 평형인자(F): 기본값 0.4
- **선량환산계수**

$$DCF = 7.5 \times 10^{-6} \frac{mSv}{Bq \cdot h/m^3}$$

- 여기서,  $Bq \cdot h/m^3 = \text{측정된 라돈농도} \times \text{평형상수} \times \text{흡입시간}$

# 라돈 피폭 선량 평가 방법(cont'd)

## ❖ 유효선량의 계산(라돈 및 자손핵종에 의한 내부피폭)

➤ 공기 중 라돈 농도(C) 측정 → 평형인자(F)를 반영하여 평형등가라돈농도(EEC) 결정 → 선량환산계수를 곱함 → 피폭 선량

➤ 평형등가라돈농도(EEC; Equilibrium Equivalent Concentration) [Bq/cm<sup>3</sup>]

$$\text{➤ } EEC_{Rn} = \frac{5.79C_{Po218} + 28.6C_{Pb214} + 21.2C_{Bi214}}{55.6}$$

➤ 평형인자(F) : 실내 0.4, 실외 0.7, 광산 0.2 (UNSCEAR 2000)

$$\frac{\text{실제 라돈자핵종 알파에너지 농도}}{\text{방사평형 상태의 라돈자핵종 알파에너지 농도}}$$

➤ 선량환산계수 (updating)

$$DCF = 10 \sim 20 \times 10^{-6} \frac{mSv}{Bq \cdot h/m^3}$$

➤ 여기서, Bq-h/m<sup>3</sup> = 측정된 라돈농도 x 평형상수 x 흡입시간

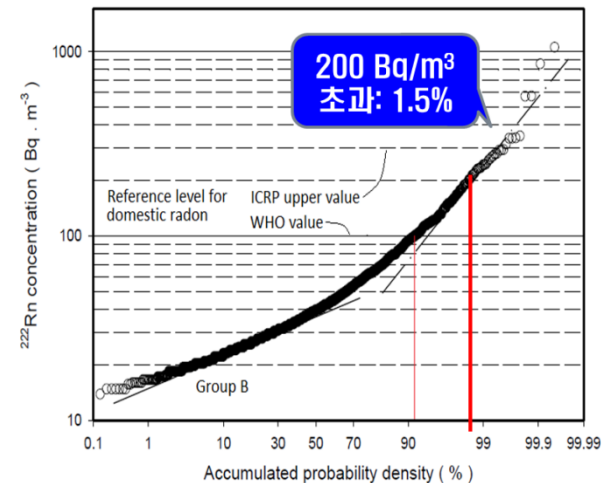
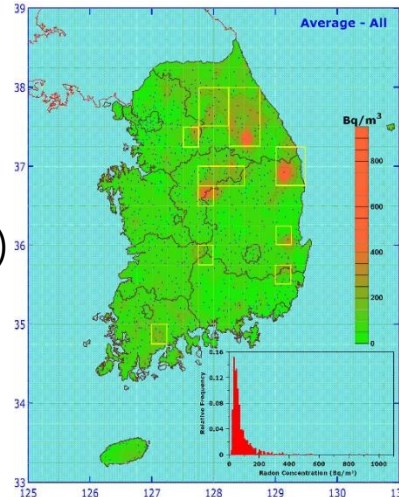
# 라돈 농도 기준

## ❖ 라돈 농도 기준

- 환경부 기준(실내공기질관리법)
  - 공동주택: 200 Bq/m<sup>3</sup>
  - 다중이용시설(지하철 역, 터미널, 대형병원, 목욕탕 등): 148 Bq/m<sup>3</sup> (4 pCi/L)
- ICRP 라돈농도 참조준위
  - 주택/직장: 100~300 Bq/m<sup>3</sup>
  - 이러한 농도는 3~10 mSv/y에 해당

## ❖ 국내 라돈 농도

- 평균: ~60 Bq/m<sup>3</sup>
- <100 Bq/m<sup>3</sup> (국내 가정 90%)
- 겨울에 높아짐(환기X)



# 라돈 농도 측정

## ❖ 라돈 농도 측정방법

### (1) 순간측정방식

- 공기를 용기에 샘플링한 후 ZnS 섬광계수기 or 액체섬광계수기로 측정

### (2) 연속측정방식

- 공기를 장치 내로 강제순환시켜 액체섬광검출기 or Si 표면장벽 검출기로 측정

### (3) 시간적분형방식

- 일정 시간동안 검출기를 놓아두어 평균 라돈 농도를 측정(활성탄흡수기, 플라스틱검출기 등)

# 요약: 방사선량의 평가

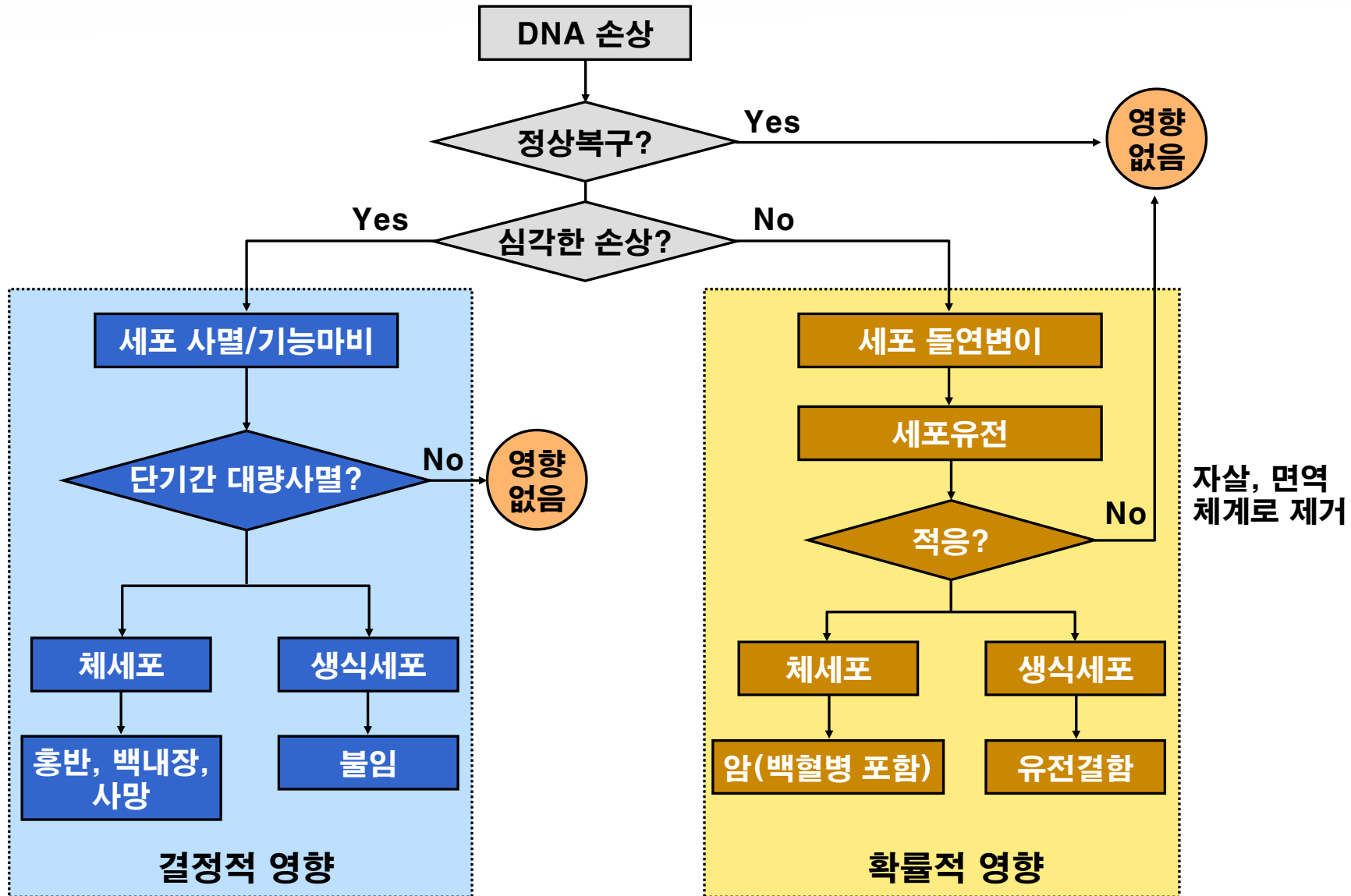
- ❖ **흡수선량:** 플루언스 x 에너지 x 질량에너지흡수계수

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

- ❖ **실용량:** 유효선량에 근사한 값을 가지면서 실측 가능한 물리량으로서 방사선방호 실무 목적의 실용량
  - 주위선량당량, 방향성선량당량, 개인선량당량
- ❖ **외부피폭 선량환산계수:** 플루언스(또는 선속밀도) → 유효선량
  - 인형모의체(phantom) + 몬테칼로 시뮬레이션
- ❖ **내부피폭 선량계수:** 섭취량 → 예탁유효선량
  - 인형모의체(phantom) + 몬테칼로 시뮬레이션 + 격실모델 해석
  - (비)흡수분율, 고유유효에너지

### III.방사선의 인체 영향

# 방사선의 인체영향



자살, 면역 체계로 제거

# 결정론적 영향

## ❖ 결정론적 영향(Deterministic effect)

- **급성 고선량 피폭**으로 인해 세포가 대량으로 마비/사멸한 경우
- 피폭과 영향발현의 인과관계가 분명
- 효과의 심각성이 선량에 비례하며 **발단치(대체로 ~0.5Gy)**가 존재
- 대체로 급성적인 특성
- **증상의 특이성** 있음(방사선 피폭에 기인한 것임을 추론할 수 있는 임상적 특성을 지님. 예, 방사선 화상, 백내장)
- 고선량이므로 방사선사고 또는 치료방사선 분야에서 관심영향
- 수정체 혼탁, 백내장(지발성, 6개월 이상의 잠복기), 골수세포 감소, 피부 홍반, 치사, 불임
- **방호개념**: 선량한도를 발단선량 이하에 설정함으로써 방지

# 결정론적 영향: 증상

## 전구증상

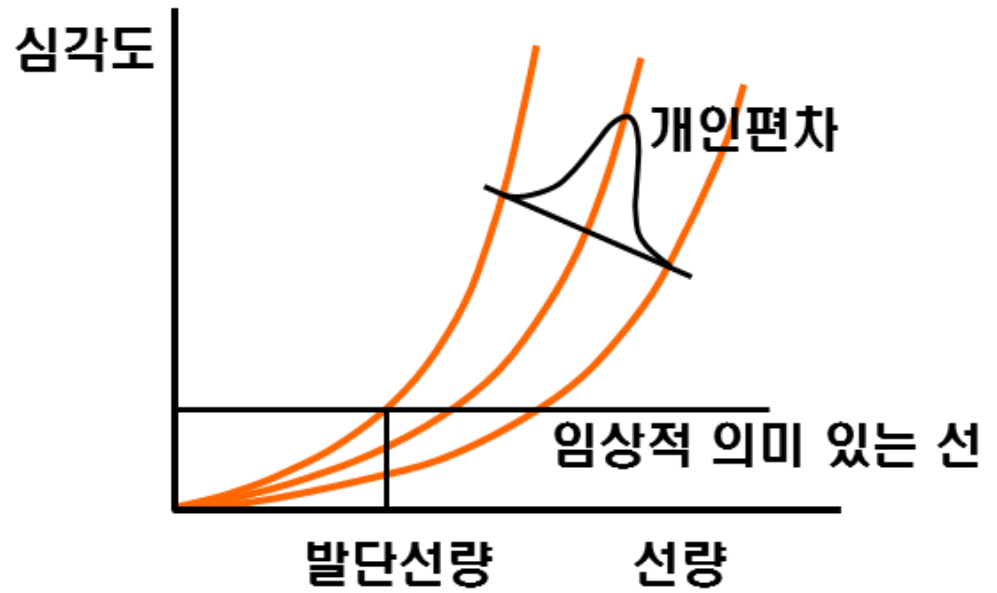
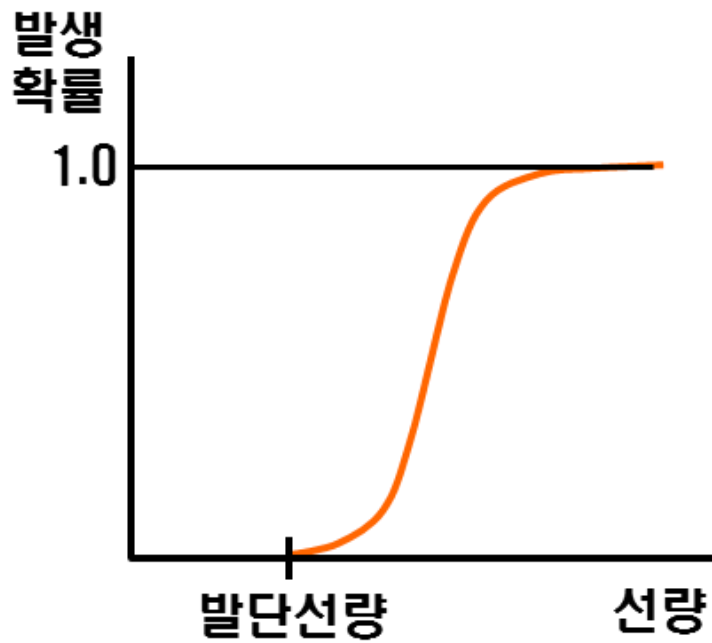
식욕부진	감정둔화	발열
메스꺼움	허탈	호흡곤란
구토	발한	과도의 흥분
설사	홍반	운동의욕 상실
피로감	결막염	



## 주증상

발열	감염	쇼크
식욕부진	출혈	운동의욕 상실
권태감	홍반	흥분
피로감	피부 갈색화	방향성 장애
쇠약	탈모	경련
체중감소	무정증	혼수
설사	장폐색	

# 결정론적 영향: 발생확률 및 심각도

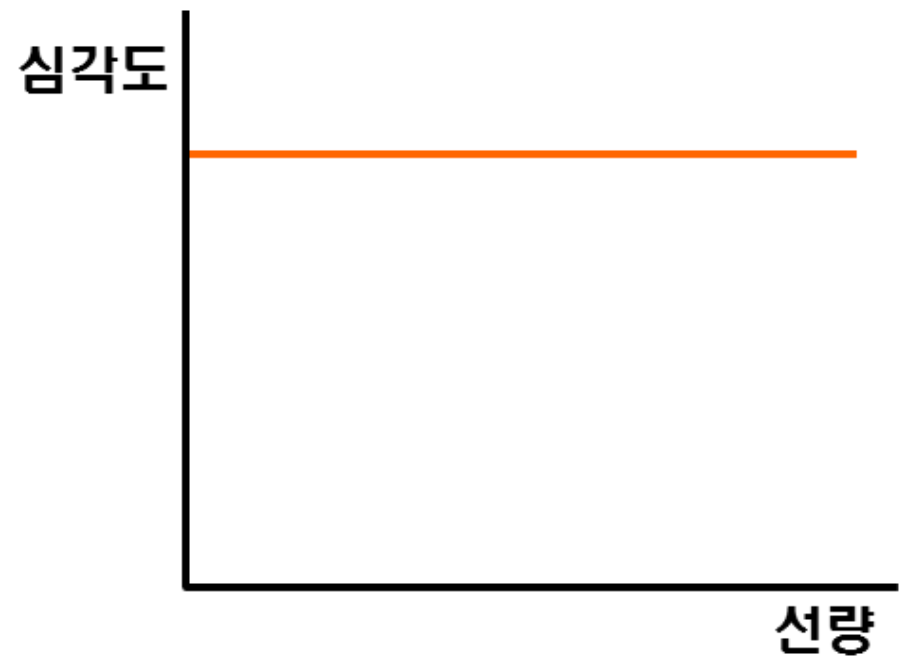
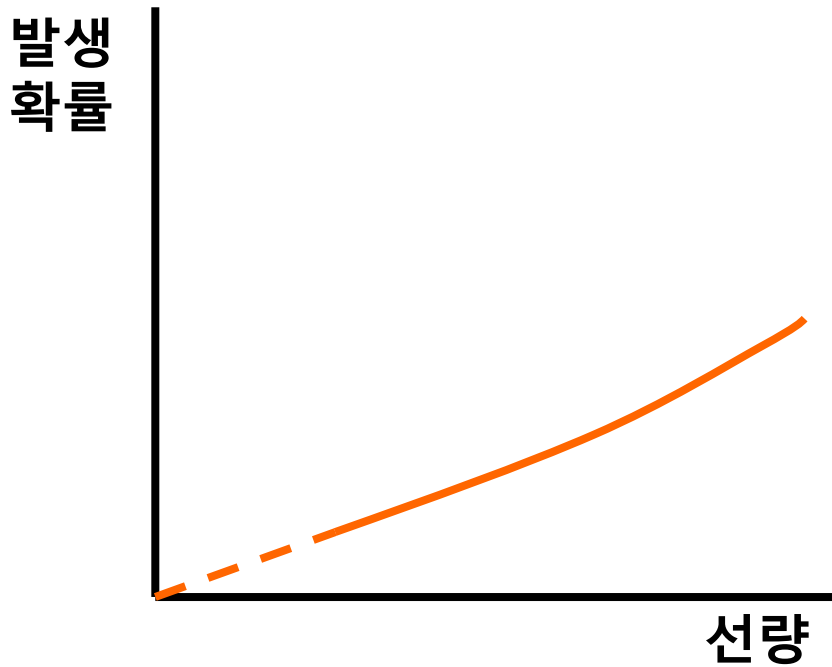


# 확률론적 영향

## ❖ 확률론적 영향(Stochastic effect)

- 세포의 돌연변이와 세포유전의 결과로 발생 가능한 영향
- 영향의 발현을 우연성이 지배
- 영향의 발생확률이 선량에 비례하고 효과의 심각성은 선량에 무관
- 저선량에서도 발단선량 없이 장해 발생확률 존재(LNT)
- 지발성이라 잠복기가 있음(백혈병: 최소 2년, 일반 고형암: ~10년)
- 타원인의 영향과 구분 불가(임상적 특이성이 없음)
- 만성 저선량 피폭에서 관심 영향
- 암, 백혈병, 유전적 영향(돌연변이 등)
- 방호개념: 발생확률(위험)을 합리적 범위에서 최소화 → ALARA

# 확률론적 영향: 발생확률 및 심각도



# 확률론적 영향의 이해

## ❖ 확률적 영향의 데이터원(역학연구 결과)

- 일본 원폭피해 생존자와 그 자손
- 방사선치료를 받은 환자(엑스선을 이용한 강직성 척수염 치료)
- 우라늄 광산의 광부( $^{222}\text{Rn}$  피폭)

## ❖ 확률적 영향의 이해

- 인과관계 규명이 불가하여 통계적인 상관관계로 위험 평가
- A: 100 mSv 피폭, B: 10 mSv 피폭
  - 암 위험의 기대치: A가 B의 10배
  - 하지만 실제 암으로 사망하는 것은 누구일지 모름

영향	피폭집단	피폭모드	확률
암	종사자	생애, 저선량(률)	4%/Sv
	일반인	생애, 저선량(률)	5%/Sv
유전결함 (다인자성 포함)	전집단	전세대, 저선량(률)	1%/Sv
비고: 정상 암위험 (20%), 심각한 유전결함 (3%)			

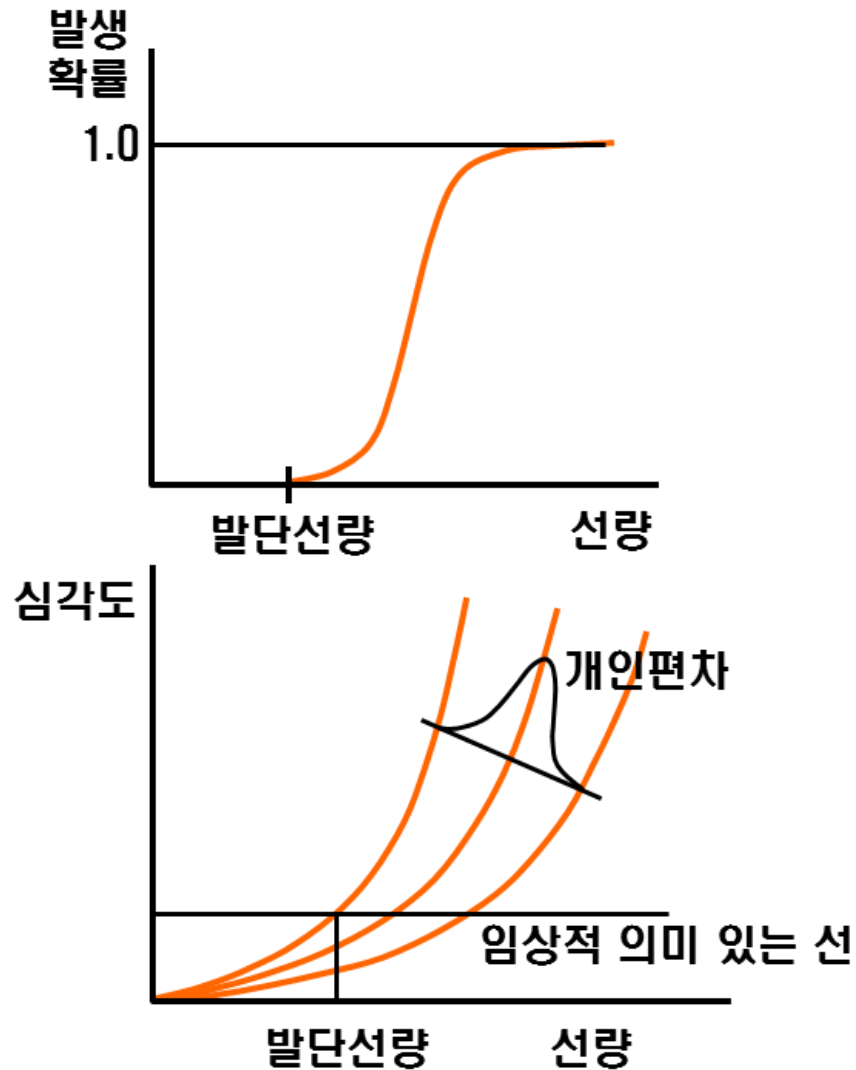
# 결정론적 영향과 확률론적 영향

표9.1. 결정론적 영향과 확률론적 영향의 특성비교

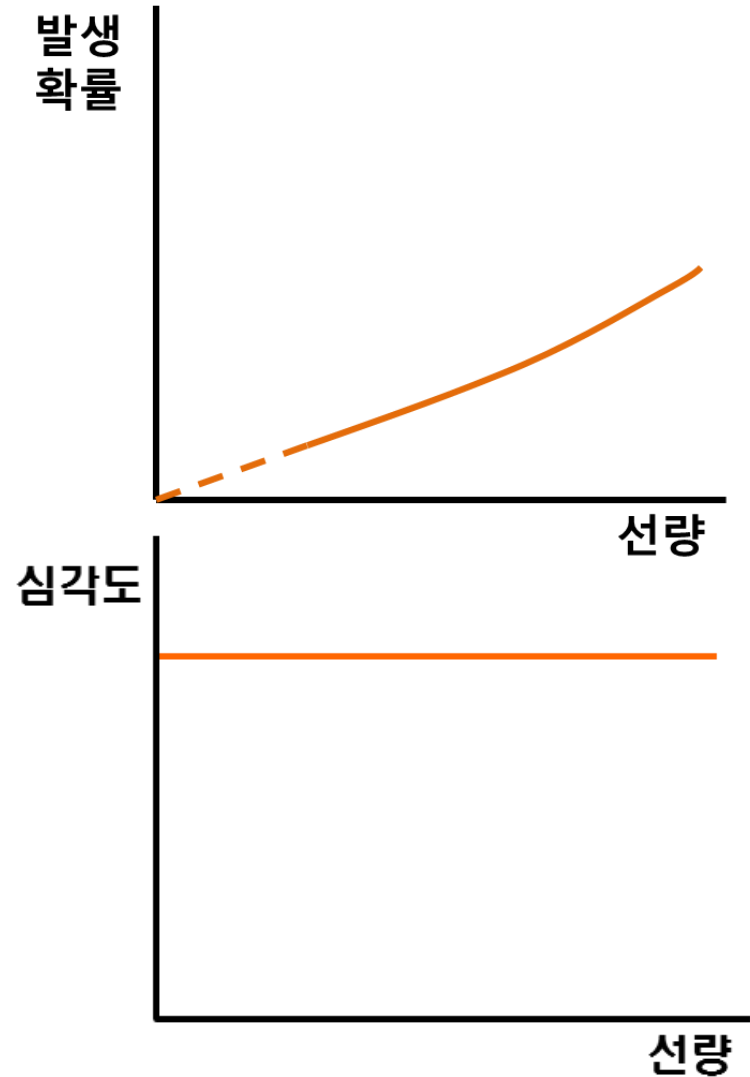
영향	결정론적 영향deterministic effect	확률론적 영향stochastic effect
발생기전	급성 고선량 피폭으로 인한 세포사 또는 급성반응에서 기인하는 영향	세포의 돌연변이와 세포유전의 결과로 발생가능한 영향
인과관계	피폭과 영향 발현의 인과관계가 필연적임	영향의 발현을 우연성이 지배함
영향 세포	큰 무리의 세포	개별 세포
선량효과	증상의 심각도가 선량에 비례	영향의 발생확률이 선량에 비례
문턱선량 존재	영향의 정도가 임상학적으로 중요하지 않은 문턱선량 존재	문턱선량이 없이 선량에 비례하는 위험이 있는 것으로 가정
발현시기	대체로 급성	지발성
임상적 특성	증상의 특이성 있음	타원인 영향과 구분 불가
방호개념	선량을 문턱치 이하로 유지하면 방지 가능	위험을 합리적 범위에서 최소화
관심 영역	사고 피폭이나 치료방사선 분야에서 관심영향	일상 저선량 피폭에서 관심 영향
영향의 예	홍반, 백내장, 혈액상 변화, 사망, 불임	암, 백혈병, 유전결함

# 결정론적 영향과 확률론적 영향: 발생확률 및 심각도

## 결정론적 영향



## 확률론적 영향



# 결정론적 영향: 조직반응

## ❖ 조혈조직(적색골수), 임파선 및 혈액

- **혈액과 림프계통:** 방사선 피폭에 민감하게 영향이 발현하는 조직  
→ 수명이 짧기 때문에 지속적으로 새로 생성됨(방사선에 민감)
- **적색골수:** 골반뼈(~60% 존재), 두개골, 늑골, 상완골 등
- **영향:** 혈구 밀도의 변동 → 면역기능 장애(고선량 피폭 시)
- **반치사선량(LD<sub>50</sub>):** 골수선량 3~4 Gy

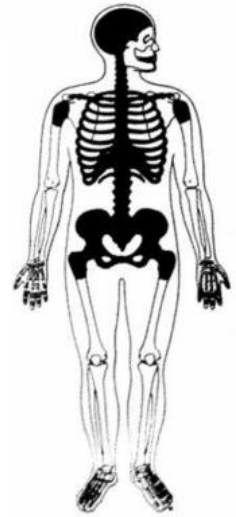
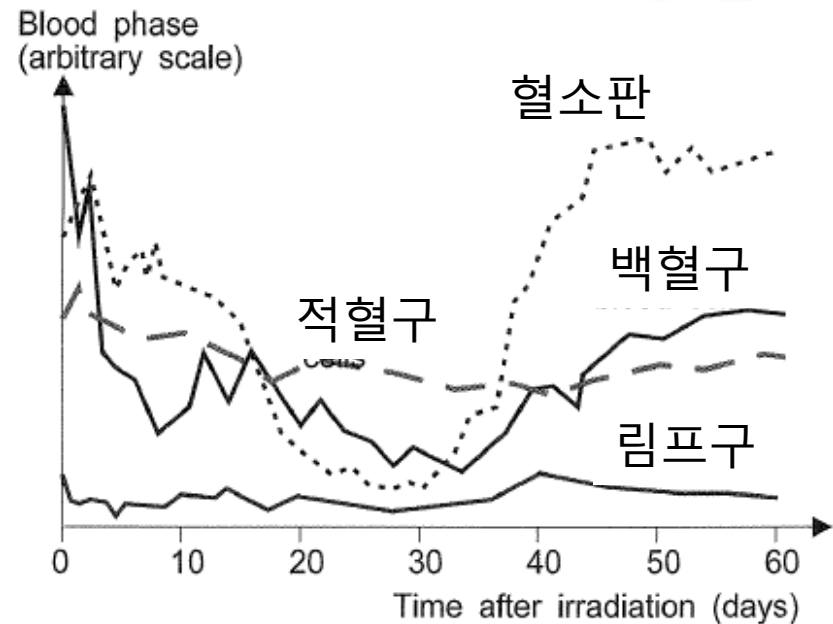


표9.3. 조혈조직 피폭에 의한 혈액상의 변화

혈액소*	문턱선량 (Gy)	명목 정상치
백혈구	0.5	3500-10000 $\mu\text{L}^{-1}$
적혈구	1.0	400-500 $\times 10^4 \mu\text{L}^{-1}$
혈소판	1.0	$2 \times 10^5 \mu\text{L}^{-1}$
혈색소	-	12-17 g dL <sup>-1</sup>

\* 공통 증상: 불안정하며 대체로 감소 경향



2.4~3.6 Gy 전신피폭

## 결정론적 영향: 조직반응 – 생식선(불임)

- 생식선 세포는 성숙되는 단계에서 가장 민감
- 감수분열 후 저항성이 증대

표9.4. 생식선 피폭으로 인한 불임의 문턱선량

성별	영향	문턱선량 (Gy)	
		1 회 급성피폭	만성피폭
남성	일시적 불임	~0.1	매년 0.4
	영구 불임	~6	매년 2
여성*	일시적 불임	0.6 ~ 1.5	
	영구 불임	~3	매년 0.2 이상

\* 연령에 따라 상당한 차이 있음.

# 결정론적 영향: 조직반응 - 피부



- 표피는 방사선 손상에 문제 없음(이미 죽어 있는 각질)
- **기저세포층(Basal Layer):** 끊임없이 분열하여 상층의 세포를 보충  
→ 약 0.07 mm 깊이 → 손상 시 세포 보충이 안되므로 피부 궤양 발현
- 기저세포층 아래 모낭이 손상되면 탈모

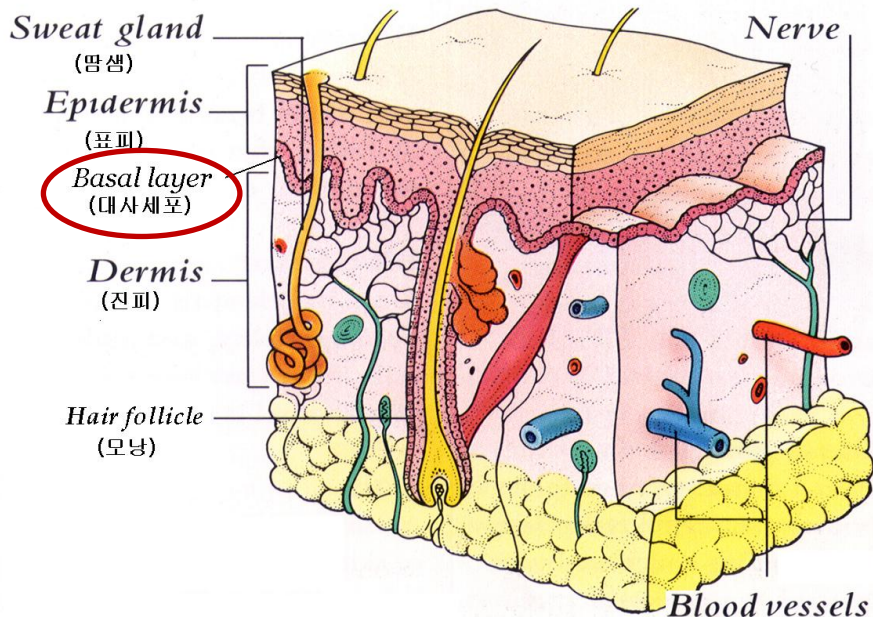


표9.5. 선량준위에 따른 피부의 증상

선량*(Gy)	초기 증상	만성 증상
0.5	염색체 변화	없음
2	일시적 홍반	변화 인지되지 않음
3	일시적 탈모	
6~7	본격 홍반, 영구탈모	
10	일시적 피부염, 수종	위축, 혈관확장, 색소침착
14	건성 표피탈락	지발 홍반
17	습성 표피탈락	
20	만성 궤사	궤양, 궤사

\* 상당히 넓은 면적의 피부가 피폭한 경우이다. 선량 범위는 전형적인 것일 뿐이며 신체의 부위와 개인에 따라 상당한 차이가 있을 수 있음.

# 결정론적 영향: 조직반응 – 수정체

- 중앙부 세포는 분열X
- 원주상 영역에 있는 세포가 분열
- 방사선에 의해 손상된 세포는 피질의 이동을 따라 서서히 **안쪽 중심부에** 모여 수정체 혼탁 또는 백내장 유발
- 일반 백내장은 외곽부터 발현

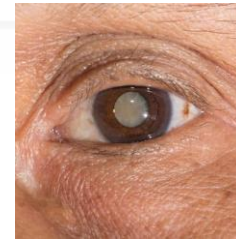
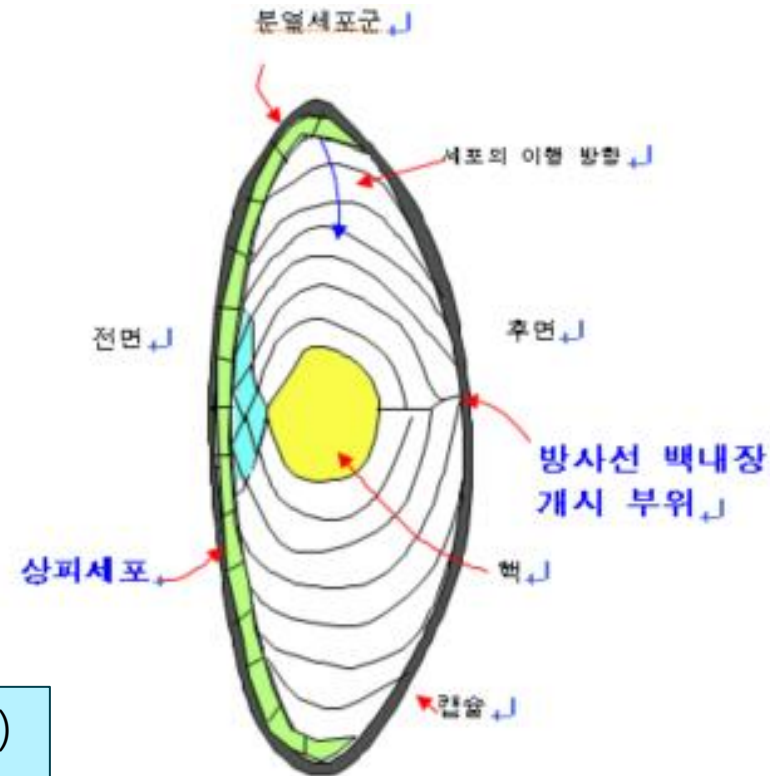


표9.6. LET 낮은 방사선에 의한 수정체의 문턱선량\*

증상	문턱선량(Gy)	
	1회 급성 피폭	여러번 분할 피폭
수정체 혼탁	0.5 ~ 1	1
백내장	0.5	2

\*중성자, 양성자 등의 경우는 위 값의 1/2 내지 1/3로 예상됨.



종사자 수정체 등가선량한도 변화 권고(2011)  
150 mSv/y → 20 mSv/y

# 결정론적 영향: 선량한도

## ❖ 원자력안전법 시행령 별표1

제2조 제4호 "선량한도"(線量限度)란 외부에 피폭하는 방사선량과 내부에 피폭하는 방사선량을 합한 피폭방사선량(被曝放射線量)의 상한값으로서 그 값은 별표 1과 같다.

선량한도(제2조제4호 관련)

(단위: 밀리시버트)

구 분	유효선량한도	등가선량한도	
		수정체	손·발 및 피부
1. 방사선작업종사자	연간 50을 넘지 않는 범위에서 5년간 100	연간 150	연간 500
2. 수시출입자, 운반종사자 및 법 제96조 단서에 따라 교육훈련 등의 목적으로 위원회가 인정한 18세 미 만인 사람	연간 6	연간 15	연간 50
3. 제1호 및 제2호 외의 사 람	연간 1	연간 15	연간 50

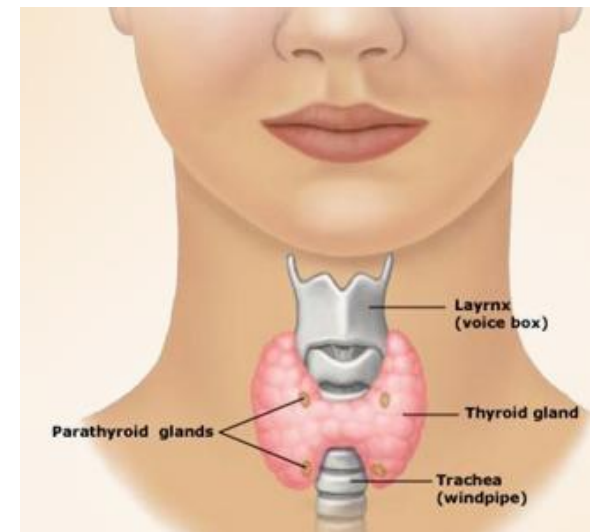
# 결정론적 영향: 조직반응 – 갑상선

## ❖ 갑상선

- 내분비선 조직: ~20 g, 호르몬 생성/분비
- 인체에 섭취된 옥소(요오드, Iodine)의 20~30% 이상이 갑상선에 축적  
→ 방사성 옥소를 흡입하게 되면 갑상선에 많은 피폭이 발생
- 방사선 민감도: 성인 < 아동

표9.7. 갑상선의 방사선 영향

증 상	문턱선량(Gy)	비 고
기능 저하	성인: 25 ~ 30 아동: 1 ~ 10	
급성 갑상선염	200	수 주 이내 발생
지발성 갑상선염	10	수 년 후까지 발생 가능



# 결정론적 영향: 조직반응 – 전신피폭

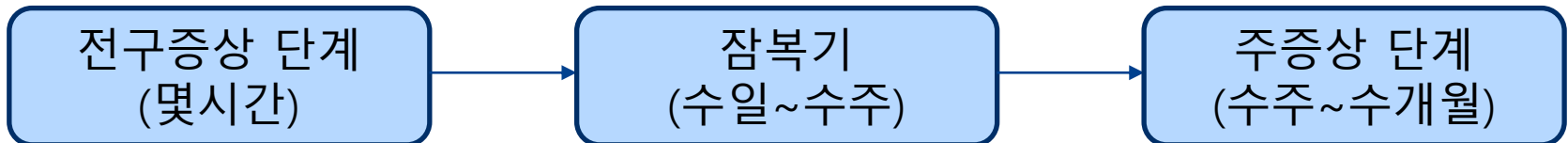
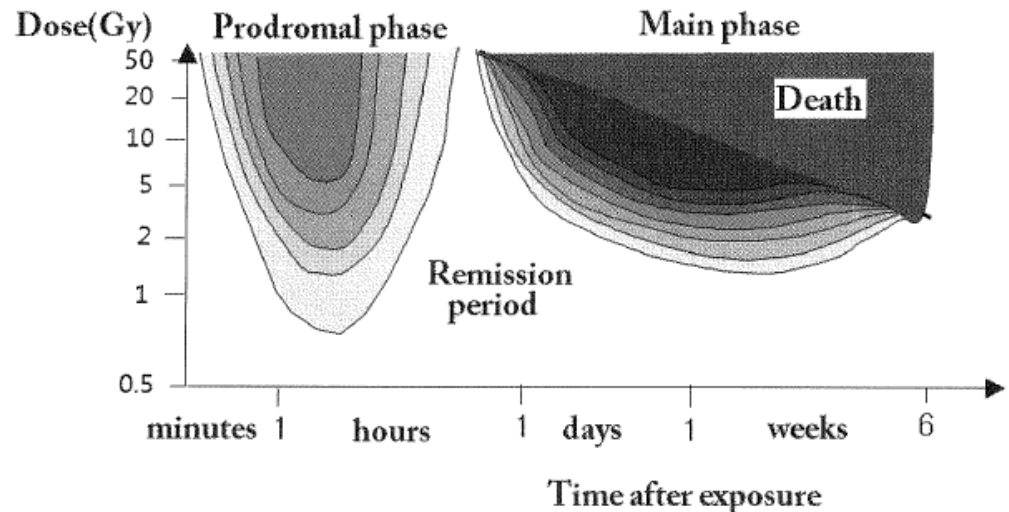
표9.8. 전신 피폭(체내 중요 장기의 동시 피폭)시 선량에 따른 증상

선 량(Gy)	증 상
0.05 ~ 0.25	염색체 이상이 발견되는 최소 선량
0.25 ~ 0.5	백혈구, 임파구 변화(집단 대조로 판별 가능)
0.5 ~ 0.75	혈액 변화를 개별적으로 확인 가능
0.75 ~ 1.25	피폭자 10 % 오심, 구토
1 ~ 2	20 ~ 70 % 구토; 30 ~ 60 % 무력증; 20 ~ 35 % 혈구생산 감소, 합병증으로 사망자 발생가능(~5 %)
3 ~ 5	조혈 기능 장애로 수 개월내 50 % 사망(LD <sub>50/60</sub> )
6 ~ 8	위장계 증후군으로 수 주~수 개월내 100 % 사망 (LD <sub>100/60</sub> )
8 ~ 10	객혈, 폐수종 등 발현 수주내 사망
15 이상	중추신경계 증후군 장애(코마 등)로 수 일~수 주에 사망

**LD<sub>50/60</sub>** : 60일 이내에 피폭자의 50%가 사망하는 치사선량 (Lethal Dose)  
상대적으로 민감한 조직의 영향이 먼저 발현

# 결정론적 영향: 조직반응 – 전신피폭(cont'd)

- 높은 선량일수록 잠복기가 줄어들음
- 치사선량을 받은 경우
  - 전구증상: 위장계(식욕부진, 현기증, 구토, 설사 등) 및 신경계(피로, 고열, 두통 등)
- 낮은 선량을 받은 경우
  - 아무런 특징적 감각이 없음



# 결정론적 영향: 조직반응 – 지발성 심혈관 질환

- 심장병이나 발작(뇌졸중)은 비교적 낮은 문턱선량(0.5 Gy)
  - 선량에 비례하여 위험이 증가하는 경향
  - 확률론적 영향이 아님에도 발생확률이 선량에 비례하여 증가하는 경향
- 다인자성 질환으로 분류

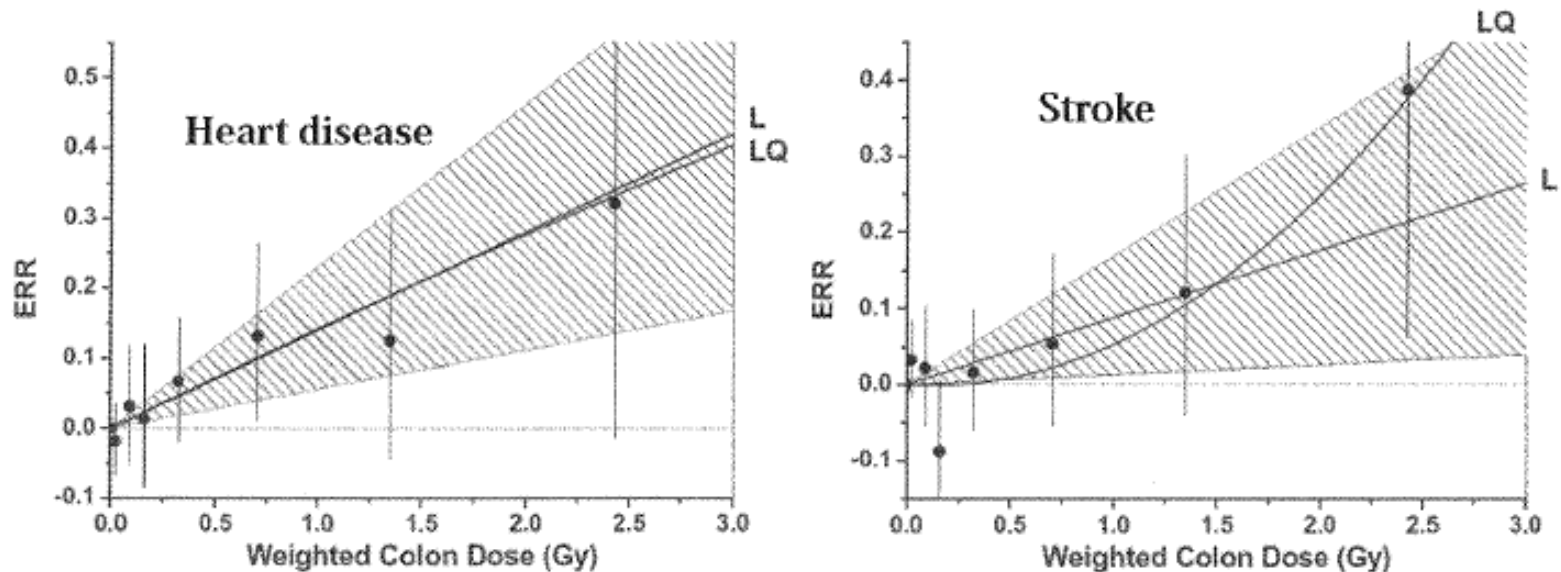


그림9.10. 지발성 심혈관질환 위험의 증가. (좌) 심장병, (우) 뇌졸중. 방사선량은 가중된 결장선량으로 표현했으며 위험은 초과상대위험(excess relative risk(ERR))이다.(자료: ICRP, 2012, 호의: ICRP)

# 결정론적 영향: 조직반응 – 종합

표9.9. 결정론적 영향 요약(ICRP 2005a)

영 향	조직/장기	발현시기	문턱선량(Gy)
<b>불구 증상</b>			
일시적 불임	정소	3~9 주	~0.1
영구 불임	정소	3주	<6
영구 불임	난소	<1주	3
조혈기능 저하	골수	3~7일	0.5
본격적 홍반	피부(넓은 면적)	1~4주	3~6
피부화상	피부(넓은 면적)	2~3주	5~10
일시적 탈모	피부	2~3주	<4
백내장(시각장애) <sup>a</sup>	눈	수년	0.5
<b>치명 증상</b>			
<b>골수 증후군</b>			
방치	골수	30~60일	1
양호한 가료	골수	30~60일	2~3
<b>소화계 증후군</b>			
방치	소장	6~9일	6
일반적 가료	소장	6~9일	>6
폐렴	폐	1~7개월	7-8
심장질환 <sup>b</sup>	심혈관	장기	0.5
뇌졸중 <sup>b</sup>	심혈관	장기	0.5

a: 수정체 혼탁은 더 낮은 선량에서도 발현가능하나 증례가 다름.

b: ICRP 118(2012)에서 가져옴.

# 확률론적 영향

## ❖ 특징

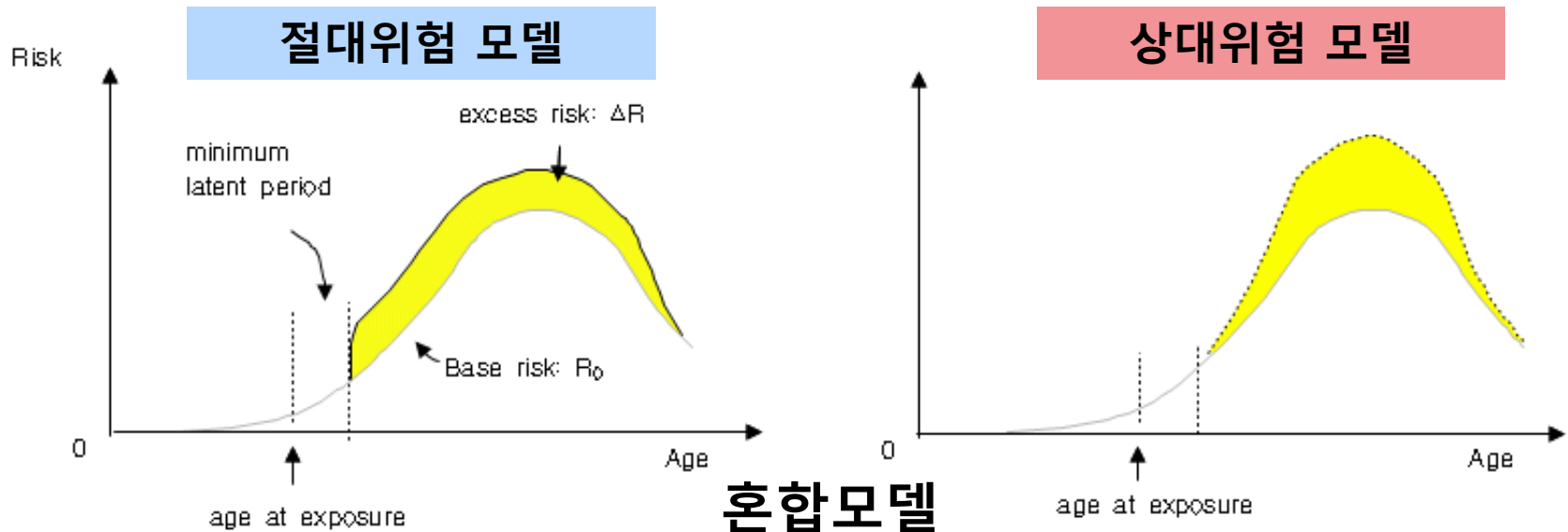
- 발생확률  $\propto$  선량 (cf., 결정론적 영향: 증상의 심각도  $\propto$  선량)
- 문턱선량이 존재하지 않음(**LNT 가정**)
- 지발성
- 영향의 특이성이 없음
- **주요 영향:** 암(백혈병 포함), 유전결함

확률론적 영향의 발생확률은 통계적 기대치일 뿐이며,  
실제적 장애의 발생은 무작위적임

# 위험의 투사(Projection)

## ❖ 위험투사 모델

- 위험의 투사: 데이터 경향 분석을 통해 미래의 암 증가를 예측
- **절대위험 모델**: 방사선 피폭에 의한 암 초과위험( $\Delta R$ )이 선량에 따라 일정량이 되고, 이것이 자연 암 위험( $R_0$ )에 더해짐("더하기 모델")
- **상대위험 모델**: 방사선 피폭에 의한 암 초과위험이 자연 암 위험에 비례("곱하기 모델")



### 혼합모델

ICRP

유방암, 백혈병

폐암, 기타

갑상선, 피부

# 확률론적 영향의 명목 위험계수

## 확률론적 영향의 명목 위험계수(%/Sv)

피폭집단	암		유전결함		총 위험	
	ICRP103	ICRP60	ICRP103	ICRP60	ICRP103	ICRP60
총인구집단	5.5	6.0	0.2	1.3	<b>5.7</b>	7.3
종사자	4.1	4.8	0.1	0.8	<b>4.2</b>	5.6

ICRP60(1990), ICRP103(2007)

즉, 1 Sv의 선량을 받으면, 암 또는 유전결함 발생 위험이 4~6% 증가  
 (총인구집단에는 방사선에 상대적으로 취약한 유아 및 아동이 포함되어 있  
 어서 위험계수가 종사자에 비해 높음. 종사자는 18세 이상)  
 → 전체 치명적 위험계수 근사치: **5%/Sv**

## 확률론적 영향의 명목 위험계수: 주의 사항

### <주의>

명목 위험계수( $\sim 5\%/Sv$ )는 다양한 인종, 성별, 연령에 대해 평균적으로 평가된 값으로서 명목상의 위해계수 값이다.

개인의 암 감수성은 문화(인종), 성별, 연령, 특정 유전소인에 따라 큰 차이가 있으므로 명목 위험계수를 적용하여 **개인의 위험을 평가하는 것은 부적절**하다.

## 조직가중치 (IRCP 103)

표9.19. ICRP 103의 새로운 조직가중치

조직	$w_T$	$\sum_T w_T$
골수, 유방, 결장, 폐, 위, 기타조직*(6개 조직)	0.12	0.72
생식선	0.08	0.08
방광, 식도, 간, 갑상선(4개 조직)	0.04	0.16
뼈표면, 뇌, 침샘, 피부(4개 조직)	0.01	0.04
계		1.00

\* 부신, 흉외기도, 담낭, 심장, 신장, 림프선, 근육, 구강점막, 위장, 소장, 비장, 흉선, 자궁/경부(여)/전립선(남)의 13개 조직에 대한 평균선량에 적용

동일한 등가선량에서도 피폭되는 조직에 따라 암 위험이 다른 것을 고려

## 조직가중치 (ICRP 60)

조직 또는 장기	조직가중치( $W_T$ )	조직 또는 장기	조직가중치( $W_T$ )
생식선	0.20	간	0.05
골수(적색)	0.12	식도	0.05
대장	0.12	갑상선	0.05
폐	0.12	피부	0.01
위	0.12	뼈표면	0.01
방광	0.05	기타 조직	0.05*
유방	0.05		

\*기타 조직: 부신, 뇌, 대장 상부, 소장, 콩팥, 근육, 척장, 비장, 흉선 및 자궁

우리나라는 아직 ICRP60(1990) 기준이 적용되고 있음

# 조직가중치 비교

표9.19. ICRP 103의 새로운 조직가중치 <ICRP103>

조직	$w_T$	$\sum_T w_T$
골수, 유방, 결장, 폐, 위, 기타조직*(6개 조직)	0.12	0.72
생식선	0.08	0.08
방광, 식도, 간, 갑상선(4개 조직)	0.04	0.16
뼈표면, 뇌, 침샘, 피부(4개 조직)	0.01	0.04
계		1.00

\* 부신, 용외기도, 담낭, 심장, 신장, 림프선, 근육, 구강점막, 췌장, 소장, 비장, 흉선, 자궁/경부(여)/전립선(남)의 13개 조직에 대한 평균선량에 적용

조직 또는 장기	조직가중치( $w_T$ )	조직 또는 장기	조직가중치( $w_T$ )
생식선	0.20	간	0.05
골수(적색)	0.12	식도	0.05
대장	0.12	갑상선	0.05
폐	0.12	피부	0.01
위	0.12	뼈표면	0.01
방광	0.05	기타 조직	0.05 <sup>2,3</sup>
유방	0.05		

<ICRP60>

# 방사선 위험 평가: 결정론적 영향

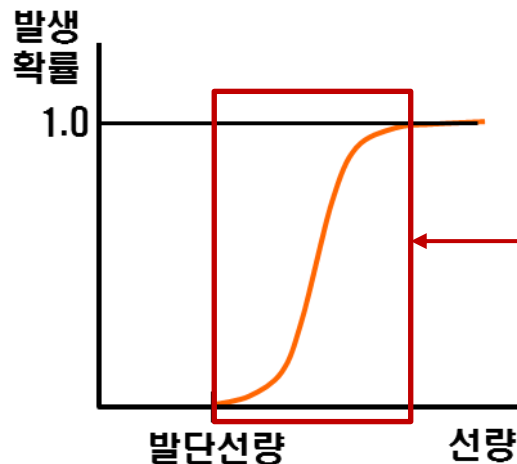
## ❖ 위험(R)

- 선량 D를 받았을 경우, 해당 결정론적 영향이 발현할 확률
- 위해함수(H)를 활용하여 계산

$$\text{위험 } R = 1 - e^{-H}$$

$$\text{위해함수 } H = \left(\frac{D}{D_{50}}\right)^v \ln 2$$

- D: 피폭선량,  $D_{50}$ : 피폭자 50%에서 해당 영향이 발현하는 선량, v: 형태인자



선량에 따라 발생확률이  
다름.  
이 곡선은 조직 및 영향  
의 종류에 따라 기울기  
가 다름

# 결정론적 영향의 위험 평가 예제

## ❖ 예제

- X선에 의해 소화기관에 1.8 Gy 급성피폭을 받은 사람이 구토 증상을 보일 확률은?

(ans)  $D_{50} = 2.0 \pm 0.5$  Gy,  $v=3 \pm 1$ 이므로,

$$\text{위해함수 } H = \left(\frac{D}{D_{50}}\right)^v \ln 2$$

$$H = \left(\frac{1.8}{2.0}\right)^3 \ln 2 = 0.505 \rightarrow R = 1 - e^{-0.505} = 0.396$$

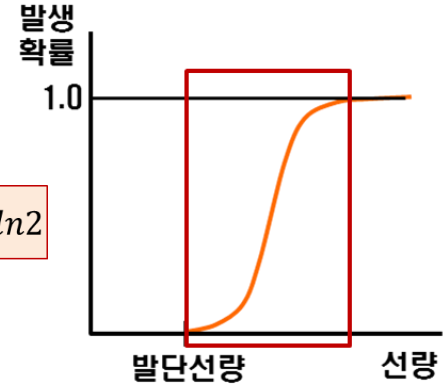


표9.20. 결정론적 영향의 50% 선량, 형태인자 및 문턱선량(Dth)

장기/조직	결과	조건	$D_{50}$	$v$	$D_{th}$
피부	홍반	급성피폭 <sup>a</sup>	6±1	5±1	3±1
		분할피폭 <sup>b</sup>	20±10	5±1	6±2
	수종	급성피폭	30±6	5±1	10±2
		분할피폭	80±20	5±1	40±10
난소	영구불임	-	3±1	3±1	0.6±0.4
정소	2년 불임	-	0.6±0.1	10±1	0.3±0.1
수정체	백내장	-	3.1±0.9	2±1	0.5±0.5
소화기관	구토	급성피폭	2±0.5	3±1	0.5
		분할피폭	5±1.2	3±1	1.5
	설사	급성피폭	3±0.8	2.5±1	1
		분할피폭	6±1.3	2.5±1	2.5
	사망	급성피폭	10±5	10±1	8
		분할피폭	35±20	10±1	18

장기/조직	결과	조건	$D_{50}$	$v$	$D_{th}$
폐	사망	100 Gy/h 이상	10±2	12±3	5±2
		10 Gy/h	15±5	12±3	7±2
		1 Gy/h	40±20	12±3	20±10
		0.5 Gy/h	70±30	12±3	40±20
		0.1 Gy/h	310±150	12±3 <sup>c</sup>	160±80
		0.06 Gy/h 이하	610±300	12±3 <sup>c</sup>	310±150
골수	사망(최소가료)	10 Gy/h 이상	3±0.5	6±2	1.5±0.3
		1 Gy/h	3.1±0.6	6±2	1.6±0.3
		0.1 Gy/h	3.7±0.6	6±2	1.9±0.3
		0.05 Gy/h	4.4±0.8	6±2	2.2±0.4
		0.01 Gy/h	10±4	6±2	5.0±2.0
	사망(집중가료)	10 Gy/h 이상	4.5±0.8	6±2	2.3±0.4
		1 Gy/h	4.7±0.9	6±2	2.4±0.5
		0.1 Gy/h	5.6±0.9	6±2	2.8±0.5
		0.05 Gy/h	6.6±1.2	6±2	3.3±0.6
		0.01 Gy/h	15±3	6±2	7.5±1.5

a. 흡수선량률 > 0.06 Gy/h 이상  
 b. 흡수선량률 < 0.06 Gy/h 이하  
 c. 내부피폭의 경우에는 5±1 적용.

# 방사선 위험 평가: 확률론적 영향

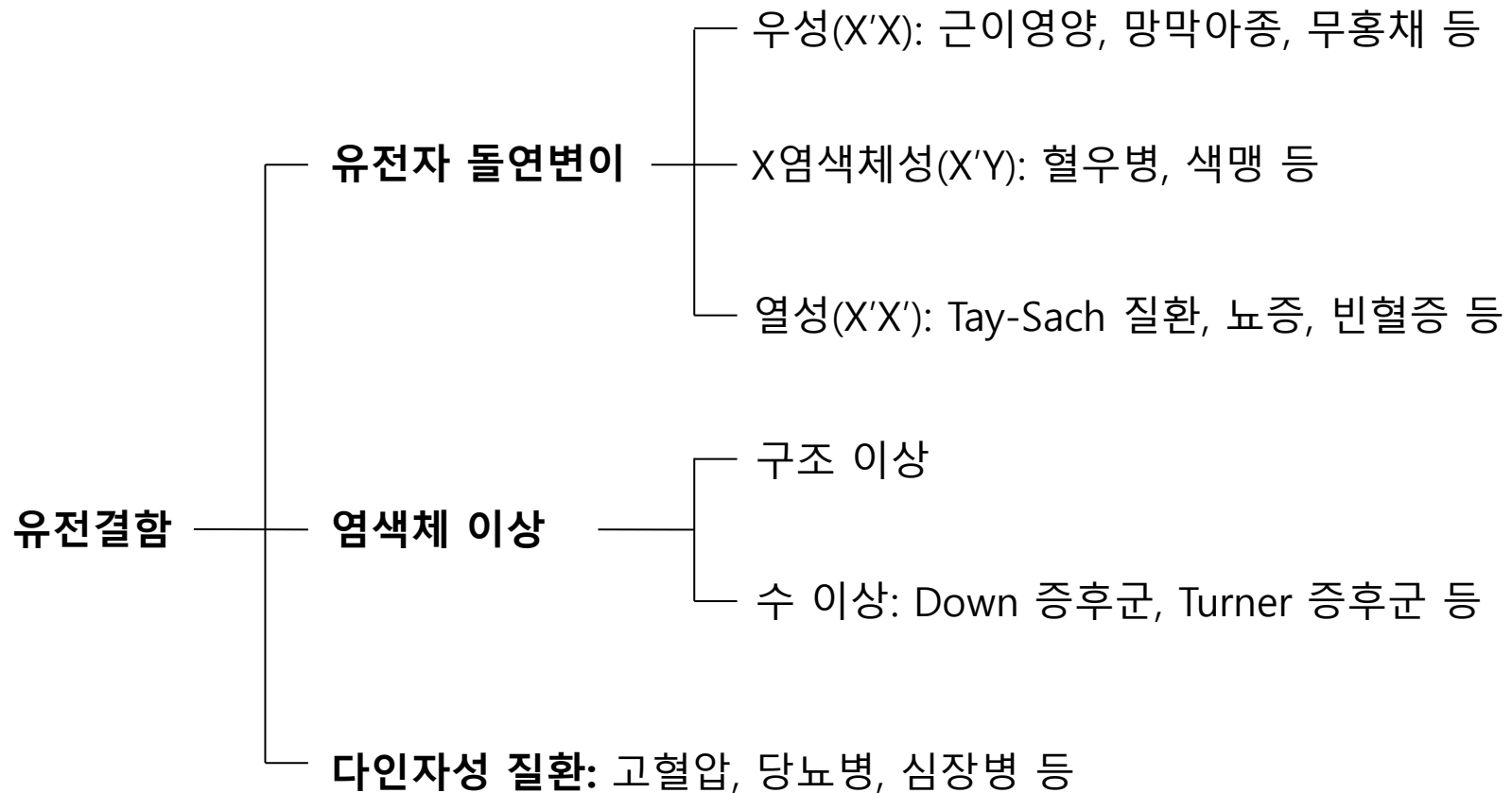
## ❖ 암 위험

- 암 위험계수(일반인의 경우, 5.5%/Sv)는 총 인구집단의 남녀노소에 대한 평균한 명목상의 위험
- 규모가 큰 집단에 대해 평균적 위험을 평가할 때에만 의미가 있음
- 특정 개인의 위험을 평가하는 근거X

## ❖ (Reminder) 유효선량

- 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

# 방사선 위험 평가: 확률론적 영향



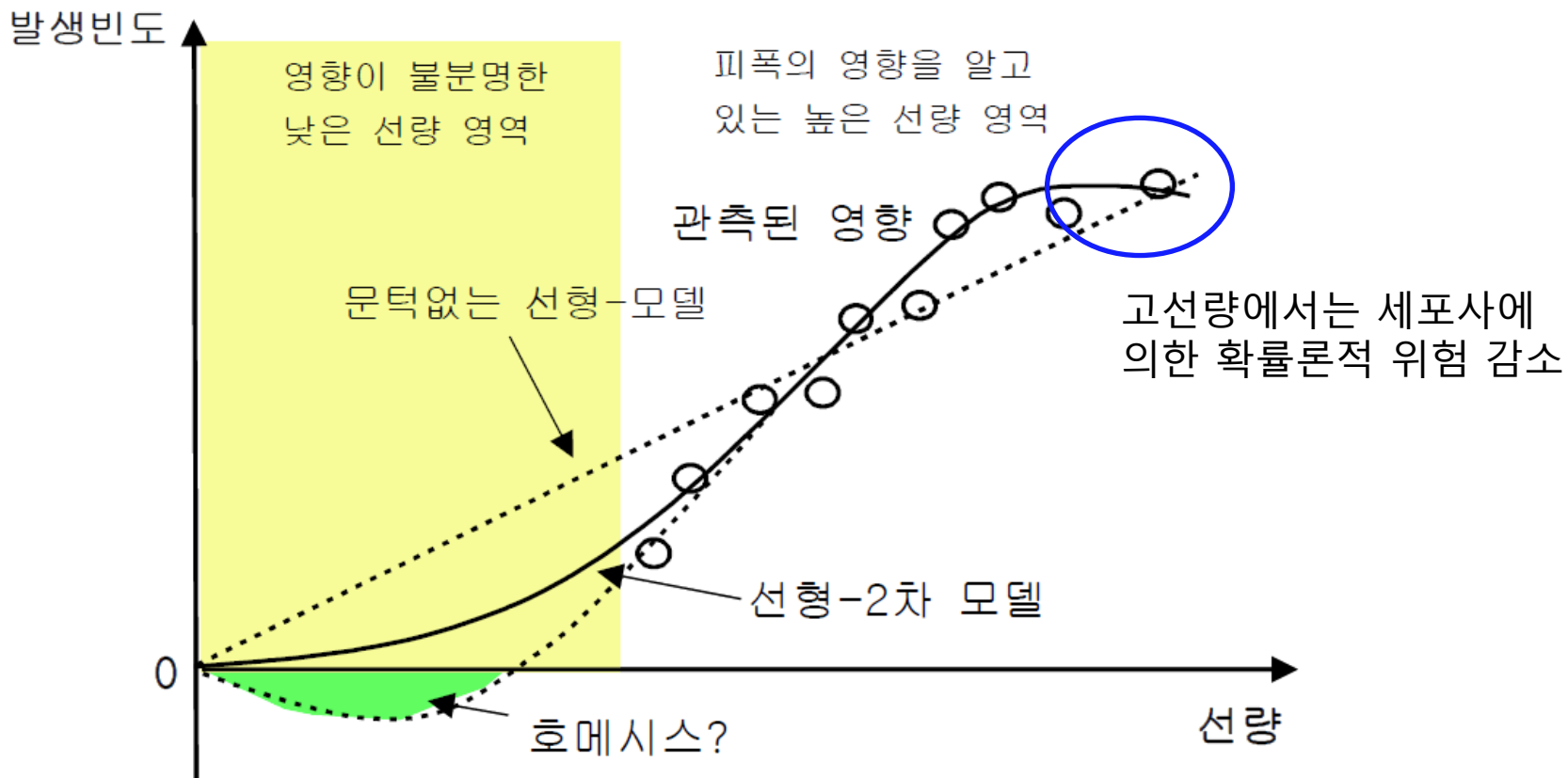
# 방사선 위험 평가: 확률론적 영향

## ❖ 유전결함 위험

- 유전결함은 방사선에 의한 추가 발현율이 암 보다 낮아서 역학적으로 확인이 어려움
- **원폭 피해자 후손에서도 유전질환의 통계적 증가는 확인된 바 없음**
- 0.1 Gy를 피폭한 경우에도 유전결함 빈도는 자연발생률의 1% 이하임  
→ 종사자 평균 연간선량이 수 mSv 정도임 (5 mSv라 하더라도 20년은 피폭해야 0.1 Gy가 됨)
- 최근 연구결과 근거로 유전결함의 위험계수는 1.3 → 0.2로 크게 감소되었음(생식선의 조직가중치도 0.2 → 0.08로 감소)
- 통계를 보면, 자연적인 중증 유전결함 빈도는 2%임(서울시민 1천만명 → 대략 20만명의 신생아 유전결함 vs 2천명의 방사선유발 유전결함)

# 확률론적 영향의 위험 평가: LNT 모델

## ❖ 문턱없는 선형비례(Linear No Threshold, LNT) 모델



낮은 선량의 유해성에 대한 불확실성을 보여주는 그래프임.  
LNT는 방사선방호 목적으로 "가정"

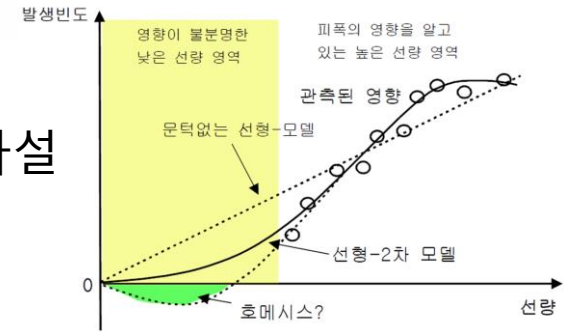
# LNT 모델 채택의 정당성

- ❖ 낮은 선량에서 암 위험이 선량에 비례할 것으로 보는 논리적 근거는?
  - 암 발생의 기전이 방사선 피폭에 따른 DNA 손상으로부터 기인되는 유전자 돌연변이의 결과 → DNA 손상빈도는 선량에 비례할 것임 → 따라서 암위험도 선량에 비례할 것임
  - 분자작용 모델은 선형-2차관계를 가지고 있음. 즉, 작은 선량에서는 1차항이 지배하게 되어 선량과 영향이 선형비례하게 됨
- ❖ 방호 목적으로 문턱없는 선형비례 모델 채택 이유?
  - 특별히 반대되는 증거가 없다면, 원인과 결과가 비례할 것으로 가정하는 것이 가장 무난함
  - 선량과 위험이 선형비례하지 않는 모델을 적용하면 피폭관리가 대단히 복잡해짐

# 호메시스

## ❖ 방사선 호메시스(Hormesis)

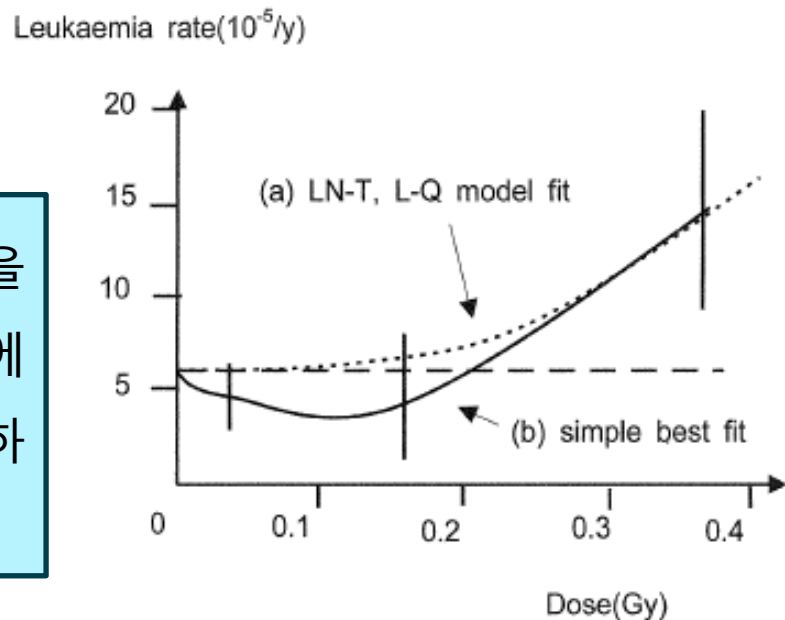
- ▶ 작은 양의 방사선 피폭은 몸에 좋을수도 있다는 가설
- ▶ 희랍어에서 유래. 자극 또는 촉진의 의미
- ▶ ICRP의 입장
  - ▶ 아직 호메시스를 고려하고 있지 않음. 낮은 선량이 암을 증가시킨다는 추론이 불확실하듯 암을 감소시킨다는 추론도 불확실
  - ▶ 따라서 보수적으로 LNT 모델을 수용
  - ▶ 호메시스를 고려하지 않는 이유
    - (1) 실험결과가 연구자마다 다르고, 객관적 입증이 어려움
    - (2) 표본의 크기가 작고, 통계적인 검증력에 문제가 있음
    - (3) 적절한 통제방법의 부재와 실험결과가 하등동물 실험에 한정되어 있음
    - (4) 방사선 방어에 문제가 되고 있는 암, 유전적 영향 이외의 생물학적 현상에 주목하여 이루어진 것으로 인체에 대한 입증자료가 거의 없음
    - (5) 방사선 외의 다른 외부요인이 내재할 가능성을 배제할 수 없음



# 호메시스의 예

- (1) 백혈병 발생빈도 데이터를 최선의 피팅을 하게 되면 아래 (b) 그래프 처럼 U자형의 모습을 갖게 됨
- (2) 자연방사선량이 높은 지역에 거주하는 집단에서 암 증가가 확인되지 않고 있음
- (3) 100 mGy 이하 선량을 받은 원폭피해 생존자의 자손에서 표현형 이상빈도가 대조군에 비해 유의하게 낮음
- (4) 적응반응: 방어능력의 향상

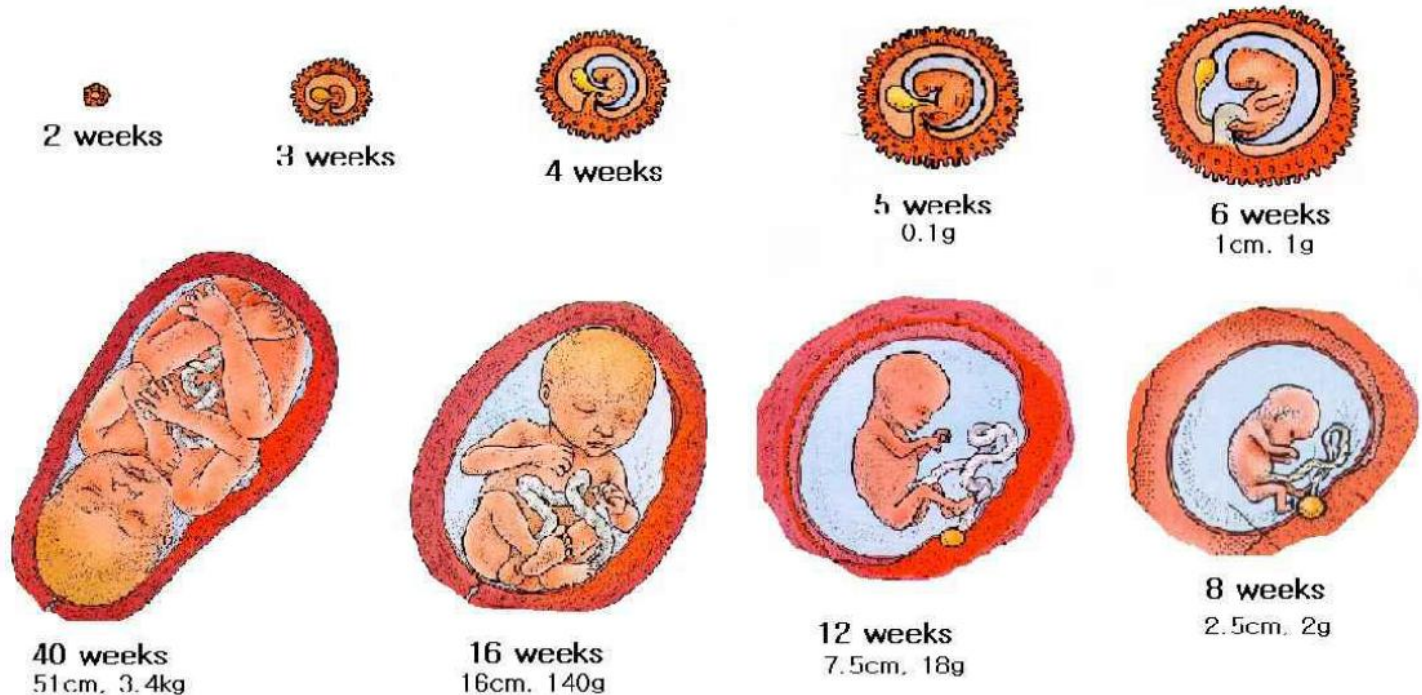
하지만, 이러한 예가 LNT가 성립하지 않음을 입증하는 것은 아니며, 아직까지 낮은 선량에서 선량-영향의 관계가 불확실하다고 이해하는 것이 바람직함



# 배태아 영향

## ❖ 용어

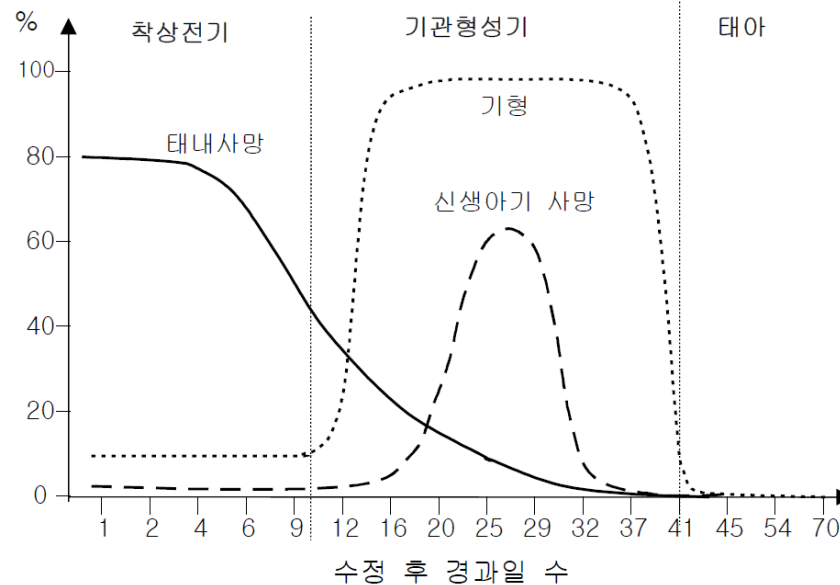
- 수정란: 난자와 정자가 합쳐진 것
- 배아: 수정 후 2~8주
- 태아: 수정란이 자궁에 착상하여 성장하기 시작한 것(8주 이후)
- 휴벳: 수정란 vs 태아 경계가 모호해서 이 둘을 합쳐서 부르는 것



# 수정란 및 태아 영향

## ❖ 방사선 영향

- 상대적으로 방사선 감수성이 큼(성인의 약 2~3배)
- 결정론적 영향: 배의 사망, 기형 또는 발육이상, 정신발달 지체
  - 배의 사망: 수정란에 약 0.1 Gy(문턱선량)
  - 기형 유발: 기관형성기(2~8주)에 약 0.1 Gy(문턱선량)
  - 발육 이상: 기관형성기 이후의 피폭



2 Gy 피폭 시 사망위험

# 수정란 및 태아 영향(cont'd)

## ❖ 지능저하

- 8주 이후 피폭 시
- 8~25주: 뇌를 포함한 중추신경계 형성기 → 정신발달지체 또는 지능저하
- **전반 8주(8~15주):** 1 Sv에서 정신지체의 발생확률이 40%정도로 높은 시기
- **후반 8주(16~25주):** 정신지체 위험도가 10%정도로 낮아짐
- 문턱선량: ~0.3 Gy
- 발생빈도: 0.4~0.1/Sv
- IQ 저하: 25점/Gy

# 수정란 및 태아 영향: 요약

표9.22. 배태아의 방사선 피폭으로 인한 영향

영향의 구분	발생확률/문턱선량	해당 피폭시기
<b>확률론적 영향</b>		
아동암 유발	Sv당 ~ 10%	전 임신 기간
유전결함	소아와 같은 정도	전 임신 기간
<b>결정론적 영향</b>		
배 사망	~0.1 Gy	착상전 ~ 착상직후
기형·발육이상	0.1 Gy	기형: 2~8주 발육이상: 전기간
지능저하	문턱선량 : ~0.3 Gy 발생빈도 : Sv당 0.4~0.1	수정후 8~25주

# 요약

표9.1. 결정론적 영향과 확률론적 영향의 특성비교

영향	결정론적 영향deterministic effect	확률론적 영향stochastic effect
발생기전	급성 고선량 피폭으로 인한 세포사 또는 급성반응에서 기인하는 영향	세포의 돌연변이와 세포유전의 결과로 발생가능한 영향
인과관계	피폭과 영향 발현의 인과관계가 필연적임	영향의 발현을 우연성이 지배함
영향 세포	큰 무리의 세포	개별 세포
선량효과	증상의 심각도가 선량에 비례	영향의 발생확률이 선량에 비례
문턱선량 존재	영향의 정도가 임상학적으로 중요하지 않은 문턱선량 존재	문턱선량이 없이 선량에 비례하는 위험이 있는 것으로 가정
발현시기	대체로 급성	지발성
임상적 특성	증상의 특이성 있음	타원인 영향과 구분 불가
방호개념	선량을 문턱치 이하로 유지하면 방지 가능	위험을 합리적 범위에서 최소화
관심 영역	사고 피폭이나 치료방사선 분야에서 관심영향	일상 저선량 피폭에서 관심 영향
영향의 예	홍반, 백내장, 혈액상 변화, 사망, 불임	암, 백혈병, 유전결함

## IV.방사선 방호 체계 및 원칙