

## 갑상선 암의 방사성요오드 치료 시 의료진은 방사선 피폭으로부터 안전한가?

원광대학교 의과대학병원 핵의학과  
김창근 · 김대응

### Are Medical Personnel Safe from Radiation Exposure from Patient Receiving Radioiodine Ablation Therapy?

Chang Guhn Kim, M.D. and Dae-Weung Kim, M.D.

Department of Nuclear Medicine, Wonkwang University School of Medicine, Iksan, Jeonbuk, Korea

Radioiodine ablation therapy has been considered to be a standard treatment for patient with differentiated thyroid cancer after total thyroidectomy. Patients may need to be hospitalized to reduce radiation exposure of other people and relatives from radioactive patients receiving radioiodine therapy. Medical staffs, nursing staffs and technologists sometimes hesitate to contact patients in radioiodine therapy ward. The purpose of this paper is to introduce radiation dosimetry, estimate radiation dose from patients and emphasize the safety of radiation exposure from patients treated with high dose radioiodine in therapy ward.

The major component of radiation dose from patient is external exposure. However external radiation dose from these patients treated with typical therapeutic dose of 4 to 8 GBq have a very low risk of cancer induction compared with other various risks occurring in daily life.

The typical annual radiation dose without shielding received by patient is estimated to be 5 to 10 mSv, which is comparable with 100 to 200 times effective dose received by chest PA examination.

Therefore, when we should keep in mind the general principle of radiation protection, the risks of radiation exposure from patients are low and the medical personnel are considered to be safe from radiation exposure. (Nucl Med Mol Imaging 2009;43(4):259-279)

**Key Words:** Radioiodine ablation therapy, thyroid neoplasm, radiation protection, radiation dosimetry, internal dosimetry

## 서 론

방사성요오드 갑상선 제거술(Radioiodine ablation therapy)은 갑상선 전절제술을 받은 환자를 대상으로 후속 치료로 시행하는 표준 치료법으로서 그 효과가 널리 인정되어 50여 년 동안 보편적으로(널리) 시행되어온 매우 효과적인 치료법이다. 방사성요오드를 경구 섭취한 환자 몸으로부터 투과력이 강한 감마선이 방출되어 주변사람(공중)이나 가족에게 방사선 피폭을 초래할 수 있다. 주변사람이나 가족

에게 어떤 수준이상의 방사선 피폭의 우려가 예상될 때, 즉, 일정 수준 이상의 고용량의 방사성요오드를 치료 목적으로 투여할 경우에는 환자를 입원 치료하게 된다. 입원치료 과정에서 의사, 간호사, 보건기사 등 여러 직종의 사람들(방사선 작업종사자 또는 수시 출입자)이 환자와 대면 접촉하거나 병실을 출입해야 하므로 방사선 피폭을 받을 가능성이 항상 존재한다. 입원 치료 과정에서 이들 의료진들의 적극적인 참여가 필수적인데, 방사선 피폭의 위험에 대한 우려 또는 막연한 정서적 불안감 때문에 치료에 소극적으로 참여하는 태도를 종종 경험하게 된다. 이에 방사성요오드 치료 시 의료진은 방사선 피폭으로부터 안전한지에 대해서 논의 하고, 아울러 이들 의료진들이 치료에 적극적으로 참여하도록 유도하기 위해서는 그 안전성에 대한 교육 홍보가 필요함을 강조하고자 한다. 이 주제에 대한 이해를 돕기 위해 우선 방사선 선량 평가에 대한 개념들을 기술하고 방

- Received: 2009. 7. 12. • Revised: 2009. 7. 17.
- Accepted: 2009. 7. 21.
- Address for reprints: Chang Guhn, Kim, M.D., Department of Nuclear Medicine, Wonkwang University School of Medicine, 344-2 Shinyong-dong, Iksan 570-711, Korea  
Tel: 82-63-859-1821, Fax: 82-63-852-1310  
E-mail: leokim@wonkwang.ac.kr

사성요오드 치료 시 의료진이 받을 수 있는 피폭 선량에 대해서 알아본 뒤 그 방사선 피폭으로 인한 위험(risk)의 정도가 얼마나 되는지에 대해서 논의 하고자 한다.

## 방사선량 평가(Radiation dosimetry)

방사성핵종 또는 방사성 물질(방사선원)이 몸 밖에 존재할 때 받는 방사선 피폭(체외피폭)의 정도를 평가하는 것을 외부 선량 평가라고 하고 몸 안에 섭취, 흡입 된 방사선 원으로부터 받는 방사선 피폭(체내 피폭)의 정도를 평가하는 것을 내부 선량 평가라고 한다.

방사선의 세기(강도)를 평가하는 양을 Radiometric quantity 라 하고 그 방사선 피폭으로 인한 영향(잠재적 위험)을 평가하는 양을 Dosimetric quantity 라고 한다.

### 1. Radiometric Quantity

방사선장(Radiation field) 또는 방사선의 세기(강도)를 규정, 정의하는 양이다. (자외선의 세기 또는 강우량의 세기를 평가하는 것에 비유)

1.1 플루언스(입자 플루언스)(Fluence or particle fluence)( $\Phi$ ) 단위면적( $m^2$ )에 수직으로 입사 또는 통과하는 광자 또는 입자의 수를 말한다. 단위는 개수/ $m^2$  또는 개수/ $cm^2$  이다.

플루언스율 (Fluence rate or particle flux density)( $\Phi^*$ ) 단위시간당 단위면적당 입사 또는 통과하는 입자 또는 광자수를 말한다. 단위는 개수/ $cm^2 \cdot sec$  이다. 플루언스율은 입자속밀도, 방사선속밀도라고도 한다.

에너지 플루언스(Energy fluence)( $\Psi$ ) 단위면적에 입사하는 방사선 에너지의 총합을 말하며 단위는  $MeV/cm^2$ ,  $erg/cm^2$  이다.

에너지 플루언스율(Energy fluence rate, energy flux density)( $\Psi^*$ )

단위시간당 단위면적에 입사하는 방사선 에너지 총합을 의미한다.

단위는  $erg/cm^2 \cdot sec$ ,  $MeV/cm^2 \cdot sec$  등이 사용된다. 에너지속밀도라고도 한다.

### 1.2 조사선량(Exposure)(X)

방사선장 또는 방사선의 세기(강도)(Radiation intensity)를 규정, 정의 하는 양으로서 방사선과 공기분자가 상호

호 작용하여 공기 중에 생성된 전하량을 측정한 것(값)이다.

조사선량의 심볼은 X, 종전 단위의 이름은 roentgen이라 부르고, R로 표기하며 단위는  $esu/cm^3$  at STP(Standard Temperature, Pressure)이다.

즉, 1 R은  $\gamma$ 선이 표준상태( $0^\circ C$ , 1기압)의 건조한 공기  $1 cm^3$  에 조사 되었을 때 공기 중에 생성되는 이온 중 어느 한쪽 부호 이온의 전하량의 합이 1 esu(정전단위)일 때의 선량으로 정의된다. 조사선량의 SI 단위는 C/kg이고 단위 이름은 없다. 즉, 공기 단위질량당(kg) 방사선(X선 또는  $\gamma$  선)에 의해 공기 중에 생성되는 총 전하량이 1쿨롱(Coulomb)일 때의 선량으로 정의된다.

표준 상태의 공기  $1 cm^3$ 는  $0.001293 g$  이고 1 쿨롱은  $3 \times 10^9 esu$  이므로 R의 단위를 SI 단위로 환산하면 아래와 같다.

환산에 자주 이용되는 단위들

$$1 eV = 1.602 \times 10^{-19} J$$

$$1 e(ip) = 1.602 \times 10^{-19} C = 4.80 \times 10^{-10} esu$$

$$1 C = 3 \times 10^9 esu, 1 esu = 3.3 \times 10^{-10} C$$

$$1 J = 10^7 erg$$

$$\begin{aligned} 1(R) &= \frac{1(esu)}{0.001293(g)} \\ &= \frac{1(esu)}{0.001293(g)} \times \frac{1(C)}{3 \times 10^9(esu)} \times \frac{1000(g)}{1(kg)} \\ &= 2.58 \times 10^{-4} (C/kg) \end{aligned}$$

즉, 조사선량 1 R은 공기 1 Kg 당  $2.58 \times 10^{-4} C$ 의 전하량을 발생시킨다.

$$1 C/kg \approx 3876 R$$

조사선량 단위를 재정할 때 공기를 매질로 사용한 이유는 쉽게 구할 수 있고 지구상 어느 지역에서나 균일한 조성을 가지며, 공기의 실효 원자번호( $Z=7.710$ )가 인체의 연부 조직( $Z=7.64$ )과 비슷하기 때문이다. 방사선 에너지의 흡수는 물질의 원자번호에 의존하므로 실효 원자번호가 비슷하다는 것은 방사선의 흡수 에너지가 비슷하다는 것을 의미한다.

조사선량률은 시간 개념이 포함된 것으로 단위시간당 조사선량을 말하며 단위는 R/hr, C/kg·hr 등이 있다.

### 에너지 플루언스와 조사선량과의 관계

단위면적에 수직으로 입사하는 방사선의 플루언스를  $\Phi$ , 그 방사선 에너지를 E (Mev), 공기의 질량 에너지 흡수계수를  $(\mu_{en}/\rho)_{air}$  ( $cm^2/g$ ) (단위면적, 단위질량의 흡수체에 입사 통과하는 방사선 에너지 중 흡수체에 흡수되는 에너지의 비율(상호작용확률)을 말하며 흡수체의 원자번호와 방사선의 에너지에 의존한다)라고 하면 공기중에서 단위질량당

흡수되는 에너지 즉, 흡수선량은 다음과 같이 주어진다.

$$E_{\text{abs}} = \Phi \text{ (개/cm}^2\text{)} \times E \text{ (MeV)} \times (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

$$= \Phi \cdot E \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} \text{ (MeV/g)} \quad (1.2-1)$$

위 식에서 공기의 W값(공기분자 한 개를 이온화 시키는 데 필요한 평균 전리 에너지로서 약 34 eV이고 조사선량의 정의에 따라 흡수된 에너지를 전하량으로 환산하기 위한 환산인자임)으로 나누면 생성된 이온쌍의 수가 산출되고, 이온 하나당 전하량을 곱하면 생성된 총 전하량을 산출할 수 있다.

$$X = \Phi \cdot E \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} \text{ (MeV/g)} \times \frac{1}{W \text{ (eV/ip)}} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ (C/ip)}$$

$$= 1.602 \times 10^{-13} \times \frac{\Phi \cdot E \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} \text{ (MeV/g)}}{W} \text{ (C/g)}$$

$$= 1.602 \times 10^{-10} \times \frac{\Phi \cdot E \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} \text{ (MeV/g)}}{W} \text{ (C/kg)}$$

조사선량률 상(정)수(Exposure rate constant)( $\Gamma$ )

비감마(선) 상수(Specific gamma (ray) constant, Specific dose rate constant)라고도 한다.

이 조사선량률 상수는 감마선을 방출하는 방사성핵종 점선원으로부터의 조사선량률을 손쉽게 구할 수 있는 상수이다.

감마선을 방출하는 방사성핵종 1 Ci의 점선원으로부터 1 m 거리에서의 조사선량률(R/hr) 로 정의된 값이다.

에너지 E MeV의 감마선을 매 붕괴당 n개 방출하는 방사성핵종 A (Ci) (점등방선원 모든 방향의 성질이 같다. 즉 모든 방향으로 감마선이 균일하게 방출된다는 뜻, isotropical)가 있을 때 거리 r (cm) 떨어진 곳에서의 조사선량률은 다음과 같이 유도된다.

점선원으로부터 r (cm) 떨어진 구의 표면적에서 단위 면적 (cm<sup>2</sup>)을 통과하는 광자수 ( $\Phi$ )를 구하기 위해서 구의 표면적,  $4\pi r^2$ 으로 나눈다.

$$X^* = \frac{A \text{ (Ci)} \times 3.7 \times 10^{10} \text{ (dps/Ci)} \times n \text{ (r/decay)} \times E \text{ (MeV)} \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} \text{ (cm}^2\text{/g)}}{4\pi r^2}$$

$$\times 1.6 \times 10^{-13} \text{ (J/MeV)} \times 3600 \text{ (sec/hr)} \times 1000 \text{ (g/kg)}$$

$$\times 100 \text{ (rad/Gy)} \times \frac{1}{0.87} \text{ (R/rad)}$$

$$= 1.95 \times 10^5 \frac{nAE}{r^2} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} \text{ (R/hr)}$$

위 식에서 비감마 상수의 정의에 따라 A = 1 Ci, r = 100 cm를 대입하면 비감마 상수가 구해진다.

$$\Gamma = 19.5 n E (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} \text{ (R}\cdot\text{m}^2\text{/hr}\cdot\text{Ci)}$$

비감마 상수  $\Gamma$ 는 방사성핵종 마다 고유의 값을 가지며  $\Gamma$ 를 알면 조사선량률은 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$X^* = \frac{\Gamma A}{d^2} \text{ d: 점선원으로부터의 거리 (m), A: 방사능 (Ci)}$$

조사선량률 정수와 비감마 상수는 엄밀한 의미에서는 약간 다르지만 감마선 에너지가 낮고(0.1~1 MeV) 원자 번호가 낮은 흡수체에 대해서는 거의 비슷하므로 방사선 방호 차원에서는 구분하지 않고 사용한다.

### 1.3 커마(Kerma, K)

커마(Kerma, Kinetic Energy Released per unit Mass of Absorber)란 간접 전리 방사선(비하전 방사선, 광자와 중성자)에 의해 생성된 하전 입자(광전자, 반도전자 등)의 단위 질량당 모든 초기 운동 에너지를 측정된 값이다.

단위는 J/kg이고 흡수선량(D)과 마찬가지로 gray라 부르고 Gy로 표기한다. 커마는 어떤 방사선 효과를 일으킬 수 있는 잠재적 능력을 의미한다고 할 수 있다.

흡수체가 공기일 때 공기커마(Air kerma)라 한다.

X선 또는  $\gamma$ 선의 에너지가 1 MeV 이하이고 연부조직과 같이 원자 번호가 낮은 흡수체에서는 조사선량값(X)과 거의 비슷하다.

$$1 \text{ R} = 9.87 \text{ rad} = 0.0087 \text{ Gy (Air kerma)} \quad (1.3-1)$$

조사선량으로 측정하나, 공기커마로 측정하나 측정된 상호작용의 크기는 거의 비슷하지만 표현 단위가 달라서 측정값의 차이가 있을 수 있다. 이는 고기 한 근을 kg과 lb.로 표현하는 것에 비유할 수 있다.

$$\text{Air kerma rate} = \frac{\Gamma_s \cdot A}{d^2}$$

$\Gamma_s$ : 공기커마율 상수 ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\text{/hr}\cdot\text{GBq}$ ), A: 방사능 (GBq), d: 점선원으로부터의 거리 (m)

## 2. Dosimetric Quantity

선량 또는 방사선량은 방사선에 의해 흡수된 에너지의 크기를 표현하는 일반적인 용어이다. 이 용어는 앞뒤 상황에 따라 흡수선량, 등가선량, 유효선량, 조사선량 또는 커마 중 어느 하나를 지칭하는 의미로 느슨하게 흔히 사용되곤 한다.

방사선 피폭으로 인한 영향(위험), 즉 생물학적 영향 또는 손상의 정도를 평가하기 위한 양을 Dosimetric quantity 라 한다. 생물학적 영향 또는 손상은 조직에 흡수된 에너지 (흡수선량), 선량률, 방사선의 종류 및 에너지, 조직의 방사선 감수성, 조사된 조직의 종류와 양, 세포분열 속도 등에 따라 달라질 수 있다. 이상의 요인들 중, 흡수선량, 방사선의 종류와 에너지, 조직의 방사선 감수성이 선량평가에 특히 중요하며, 이들 요인에 의한 효과를 고려하여 평가된 것이 흡수선량, 등가선량, 유효선량, 예탁선량이다.

**Table 1.** F-factor for Fat, Muscle, Water and Bone

Photon(keV)	Fat	Muscle	Water	Bone
30	0.518	0.922	0.888	4.259
50 (Chest PA)	0.648	0.932	0.903	3.535
80 (Body CT)	0.859	0.953	0.946	1.945
100	0.920	0.960	0.960	1.452
150 (Tc-99m)	0.965	0.964	0.971	1.066
300 (I-131)	0.979	0.966	0.974	0.945
500 (F-18)	0.981	0.966	0.975	0.934

Imaging procedures or radionuclides within parenthesis in each photon energy level either use or emit photon of that energy. Tabulation is based on mass energy absorption coefficient data from reference 2.

**Table 2.** Photon Mass Attenuation Coefficients,  $\mu/p$ , and Mass Energy - Absorption Coefficients  $\mu_{en}$ , in  $m^2/kg$  for Energies 1 keV to 20 MeV (Multiply Mass Energy  $m^2/kg$  by 10 to Convert to  $cm^2/g$ )

Photon energy (keV)	Air, dry Z=7.78 $\rho=1.205 \text{ kg/m}^3(20^\circ\text{C})$ $3.006 \times 10^{26} \text{ e/kg}$		Muscle Z=7.64 $\rho=1040 \text{ kg/m}^3$ $3.312 \times 10^{26} \text{ e/kg}$		Bone Z=12.31 $\rho=1850 \text{ kg/m}^3$ $3.192 \times 10^{26} \text{ e/kg}$		Lead Z=82 $\rho=1135 \text{ kg/m}^3$ $2.383 \times 10^{26} \text{ e/kg}$	
	$\mu/p$	$\mu_{en}/p$	$\mu/p$	$\mu_{en}/p$	$\mu/p$	$\mu_{en}/p$	$\mu/p$	$\mu_{en}/p$
30	3.501-02	1.501-02	3.754-02	1.579-02	9.724-02	7.290-02	3.032-00	9.724-02
50 (chest PA)	2.073-02	4.031-03	2.257-02	4.288-03	3.504-02	1.625-02	8.041-01	3.504-02
80 (Body CT)	1.661-02	2.393-03	1.822-02	2.601-03	2.083-02	5.309-03	2.419-01	2.083-02
100	1.541-02	2.318-03	1.693-02	2.538-03	1.800-02	3.838-03	5.550-01	2.229-01
150 (Tc-99m)	1.356-02	2.494-03	1.491-02	2.743-03	1.490-02	3.032-03	2.014-01	1.490-02
300 (I-131)	1.068-02	2.872-03	1.176-02	3.164-03	1.141-02	3.095-03	4.026-02	2.581-02
500 (F-18)	8.712-03	2.966-03	9.599-03	3.269-03	9.294-03	3.159-03	1.613-02	9.564-03

The numbers following + or - refer to the power of 10, e.g., 3.617 + 02 should be read as  $3.617 \times 10^2$ . Imaging procedures or radionuclides within parenthesis in each photon energy level either use or emit photon of that energy. Tabulation is based on mass energy absorption coefficient data from reference 2.

앞으로 기술하게 되는 이상의 Dosimetric quantity 들은 핵의학 및 영상의학 분야에서는 실제로 조직에서 직접 측정하는 것이 불가능하다.

실제 직접 측정이 가능한 조사선량을 바탕으로, 물리적 자료(방사성핵종의 붕괴 특성, 즉 방사선의 종류와 에너지, 물리적 반감기 등), 생물학적 자료(방사성핵종의 체내 분포 및 섭취 정도, 생물학적 반감기), 그리고 특별히 고안된 수식을 이용하여 이상의 양들을 이론적으로 유도산출 하여 선량을 평가하는 것이다.

2.1 흡수선량(Absorbed dose)(D)

방사선의 영향의 정도를 평가하는데 가장 중요한 요소는 조직에 흡수된 에너지의 크기이다.

흡수선량은 단위질량당 흡수된 방사선의 에너지로 정의되며 심볼은 D, 단위는 J/kg, 단위의 이름은 gray라 부르고 Gy로 표기한다. 종전의 단위 이름은rad (radiation absorbed dose) 이고 단위는 erg/g이다. 흡수선량은 모든 종류의 방사선과 공기를 포함한 모든 종류의 흡수체에 적용된다. 흡수선량을 얘기할 때는 개별 조직 또는 장기를 언급하는 것

이 바람직하다.

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}, 1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

조사선량은 공기 단위질량당(C/kg의 경우) 또는 단위 체적당(R의 경우) 방사선에 의해 공기 중에 생성된 전하량으로 정의된 반면에 흡수선량은 단위질량당 방사선에 의해 흡수된 에너지로 정의한 것이다. 방사선 에너지의 흡수정도는 인체 조직의 구성 성분과 그 분포, 방사선의 종류( $\gamma$ 선 or  $\beta$ 선)와 그 에너지에 따라 좌우된다.

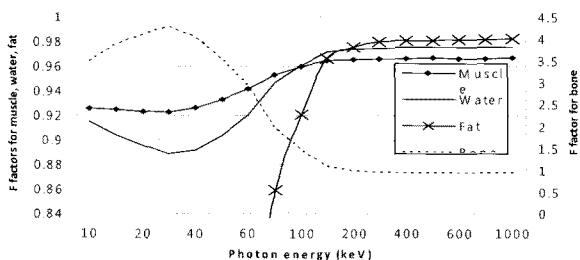
흡수선량률( $\dot{D}$ )은 시간에 따른 흡수선량의 변화로써 단위시간당 흡수선량을 말한다.

조사선량과 흡수선량과의 관계

모든 선량평가는 직접 측정이 가능한 조사선량을 바탕으로 수행되므로 조사선량의 개념을 정확히 이해하고 조사선량과 흡수선량의 관계를 잘 이해할 필요가 있다.

전리에 의해 생성된 전하량(조사선량)을, 그 전하량을 생성하는데 필요한 에너지로 환산하면 조사선량을 공기에서의 흡수선량으로 환산할 수 있다.

1 R의 SI값에서 유도하면



**Figure 1.** F-factor of muscle and bone approximates unity at photon energy of 100 keV ~ 1000 keV. Graphic illustration is based on mass energy absorption coefficients data from reference 2.

$$1(R) = 2.58 \times 10^{-4} \left( \frac{C}{kg} \right) \times \frac{1(ip)}{1.602 \times 10^{-19}(C)} \times \frac{34(eV)}{1(ip)} \\ \times \frac{1.602 \times 10^{-19}(J)}{1(eV)} \times \frac{10^7(erg)}{1(J)} \times \frac{1(kg)}{10^3(g)} \\ = 87(erg/g) = 0.87(rad)$$

1R의 정의에서 유도하면

$$1(ip) = 4.8 \times 10^{-10}(esu) \\ 1(R) = \frac{1(esu)}{air\ 1(cc)\ at\ STP} \times \frac{1(ip)}{4.8 \times 10^{-10}(esu)} \\ \times \frac{34(eV)}{1(ip)} \times \frac{1.6 \times 10^{-12}(erg)}{1(eV)} \times \frac{1(cc)}{1.293 \times 10^{-3}(g)} \\ = 87(erg/g)$$

조사선량 1R은 공기의 흡수선량 0.87 rad에 해당된다.

공기가 아닌 흡수체(조직)에서의 흡수선량을 구하기 위해서는 공기의 질량 에너지 흡수계수에 대한 흡수체(조직)의 질량 에너지 흡수계수비를 곱해주면 되고 아래와 같이 주어진다.

$$D_{matter}(rad) = 0.87 \times \frac{(\mu_{en}/\rho)_{matter}}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \times X(R) \quad (2.1-1)$$

조직의 커마 값 또한 위와 마찬가지로 아래와 같이 구해진다.

$$K_{tissue} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_{tissue}}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \times K_{air} \approx 1.1 \times K_{air} \quad (2.1-2)$$

수식 2.1-1에서  $0.87 \times \frac{(\mu_{en}/\rho)_{matter}}{(\mu_{en}/\rho)_{air}}$  를 F-factor라고 한다.

F-factor는 공기와 조직의 질량 에너지 흡수계수 또는 질량 감약계수와 방사선의 에너지에 의존한다. 방사선 에너지가 증가함에 따라 근육등 연부조직의 질량 에너지 흡수계수는 광전 효과가 상호작용의 대부분을 차지하는 영역, 즉 감마선 에너지 100 keV 수준까지는 급격하게 감소하다

가 콤퓨턴 산란이 상호작용의 대부분을 차지하는 감마선 100 keV 이상 영역에서는 완만하게 상승하다가 약 1 MeV 전후에서 다시 완만하게 감소하는 L자 모양을 취한다.<sup>1)</sup> 연부조직과 뼈에 대한 F factor와 질량 에너지 흡수계수가 핵의학 및 영상의학에서 자주 이용되는 방사선 에너지 별로 Table 1과 Table 2에 제시되어 있다.<sup>2)</sup>

Table 1과 Fig. 1에서 보듯이 X선 에너지가 100 keV 이상이면 연부 조직과 뼈의 F-factor는 거의 1에 근접하므로 연부조직의 흡수선량은 단위만 다를 뿐 조사선량 값과 거의 비슷하다.

선속밀도, 에너지속밀도와 흡수선량률, 조사선량률과의 관계

방사선의 선속밀도가  $\Phi$ , 그 에너지가 E, 공기의 질량 에너지 흡수계수가  $(\mu_{en}/\rho)_{air}$  일 때 공기의 흡수선량률  $D^*$ 는 다음과 같다.

$$D^* = \Phi(\text{개/cm}^2 \cdot \text{sec}) \times E(\text{MeV}) \times (\mu_{en}/\rho)_{air}(\text{cm}^2/\text{g}) \times 1.6 \\ \times 10^{-13}(\text{J/MeV}) \times 1000(\text{g/Kg}) \times 3600(\text{sec/hr}) \\ = \Phi \cdot E \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air} \times 5.76 \times 10^{-7}(\text{J/kg} \cdot \text{hr})(\text{Gy/hr}) \\ = \Phi \cdot E \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air} \times 5.76 \times 10^{-5}(\text{rad/hr})(1\text{Gy} = 100\text{rad})$$

위 식에서 조사선량률을 구하기 위해  $1(R) = 0.87(\text{rad})$ 를 대입하면 조사선량률  $X^*$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$X^* = \Phi \cdot E \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air} \times 5.76 \times 10^{-5}(\text{rad/hr}) \times \frac{1}{0.87}(R/\text{rad}) \\ \approx 6.6 \times 10^{-5} \times \Phi \times E \times (\mu_{en}/\rho)_{air}(R/\text{hr})$$

## 2.2 선량률 상수들

선량이란 용어를 사용할 때는 구체적인 용어(흡수선량 또는 유효선량 등)를 선택하는 것이 바람직하지만 때로는 구체적인 선량 명칭을 엄밀하게 지칭하기보다는, 보다 넓은 의미로 사용하는 것이 필요할 때가 있다. 여기서 사용하는 조사선량이라는 용어가 바로 그런 경우로써, rad 또는 C/kg 이라고 정의된 조사선량을 지칭하는 것이 아니라 조사선량의 개념을 느슨하게 지칭하는 용어로 사용되고 있다.

감마선 또는 X 선에 의한 방사선 피폭의 수준(정도)을 평가하는데 몇 가지 선량률과 선량률 상수들이 이용된다. 앞에서 언급한 조사선량률 상수, 비감마(선) 상수, 공기커마율 상수 그리고 다음에 기술할 감마(선) 선량률 상수(선량당량률 상수)와 주변 선량당량률 상수들이 각각의 해당 선량률을 결정하는데 사용되고 있다.

이 상수들은 정의와 전제 조건, 따라서 단위가 다르고 명칭이 다르고 그 값도 전제조건에 따라 다소 차이가 나지만 기본적인 개념은 동일하다.

**Table 3.** Summary of Various Constant Units Used for Determining Exposure Rates for Selected Radionuclides Commonly Used in Nuclear Medicine

Radionuclide	Exposure rate constants, $\Gamma_{20}$ (Photons $\geq 20$ keV) R/hr at 1m from 1 Ci( $R \cdot m^2/hr \cdot Ci$ )	Gamma ray dose rate constants, $\Gamma_{10}$ (Photons $\geq 10$ keV) mSv/hr at 1 m from 1 MBq( $mSv \cdot m^2/hr \cdot MBq$ )	Air kerma rate constants, $\Gamma_{20}$ (Photons $\geq 20$ keV) $\mu$ Gy/hr at 1 m from 1 GBq( $\mu$ Gy $\cdot m^2/hr \cdot GBq$ )	Ambient dose equivalent rate constants, $\chi_{20}$ (10 mm depth in soft tissue) $\mu$ Sv/hr at 1 m from 1 GBq( $\mu$ Sv $\cdot m^2/hr \cdot GBq$ )
F-18	0.573 (155)	$1.879 \times 10^{-4}$ (188)	140	171
Tc-99m	0.061 (16)	$3.317 \times 10^{-5}$ (33)	14.2	21.3
I-131	0.216 (58)	$7.647 \times 10^{-5}$ (76)	52.6	66.2
I-123	0.153	$7.478 \times 10^{-5}$	36.2	43.9
Ga-67	0.080	$3.004 \times 10^{-5}$	18.9	26.7
In-111	0.344	$1.356 \times 10^{-4}$	74.5	87.5
Tl-201	0.046	$2.372 \times 10^{-5}$	10.2	17.1
Co-57	0.058	$4.087 \times 10^{-5}$	13.0	19.1

Values converted to unit of ( $\mu$ Sv  $\cdot m^2/hr \cdot GBq$ ) appears in parenthesis to compare with each other. Sources; data from reference 3-5.

감마(선) 선량률 상수(선량당량률 상수)(gamma(ray) dose rate constant, dose equivalent rate constant)( $\Gamma$ )

1 MBq 의 방사성핵종 점선원으로부터 1 m 떨어진 곳에서의 단위 시간당(hr)의 선량률로 정의된다. 단위는  $mSv \cdot m^2/hr \cdot MBq$ 이다.

감마(선) 선량률 상수는 각 방사성핵종마다 고유의 값을 갖고 붕괴당 방출되는 방사선 수와 그 에너지, 그리고 조직의 흡수계수에 의해 결정된다. 방사선 방호 목적에서 10 keV 이하의 감마선은 주사기 또는 바이알 벽에서 흡수되므로 선량 계산시 무시된다.

공기커마율상수(Air Kerma Rate Constant,  $\Gamma_s$ )

1 GBq 의 방사성핵종 점선원으로부터 1 m 떨어진 곳에서의 단위시간당(hr)의 선량률(Air kerma rate)로 정의 되고  $\delta$  는 20 keV 이상이다. 단위는  $\mu$ Sv  $\cdot m^2/hr \cdot GBq$  이다.

연부조직 10 mm 깊이에서의 선량률을 주변 선량당량률(Ambient dose equivalent rate)이라 하고 단위는  $\mu$  Sv  $\cdot m^2/hr \cdot GBq$  이다.

$$\text{주변 선량당량률} = \frac{\chi_s \cdot A}{d^2}$$

$\chi_s$ : 주변 선량당량률 상수, A: 방사능 (GBq), d: 거리 (m)

위의 상수들 중, 조사선량률 상수임에도 불구하고 단위가 Sv로 표현된 것은 정의에서 조직의 흡수계수가 반영되었기 때문이고, 공기 커마 역시 정의에서 공기의 흡수선량과 동일하므로 Gy 단위로 표현된 것이다.

핵의학에서 흔히 사용되는 방사성 핵종에 대해서 위 상수들의 단위가 Table 3에 요약되어 있다.<sup>3-5)</sup> 비교를 위해 F-18, Tc-99m 및 I-131 핵종에 대해 조사선량률 상수 및 감

마(선) 선량률 상수 값을 공기 커마율 상수 또는 주변 선량당량률 상수의 단위( $\mu$ Sv  $\cdot m^2/hr \cdot GBq$ )로 환산한 값을 괄호 속에 덧붙여 기재하였다.

감마선과 물질이 상호 작용하여 광전효과, 콤프턴 산란 등에 의해 광전자, 반도전자, 내부전환전자, 특성 X-선, Auger 전자들이 생성되고, 이 전자들은 고 에너지의 운동 에너지를 가지고 원자들의 전기장 사이를 지그재그로 진행 하면서 수 많은 2차 전리와 여기(excitation)를 일으킨다. 인체를 구성하는 원소들(H, C, O, N)의 최내각 전자의 결합 에너지는 1 keV 미만에 불과하다. Tc-99m의 140 keV 감마선은 광전 효과의 경우 최내각 전자에 모든 에너지를 전달 하므로 발생된 광전자의 운동 에너지는 약 139 keV 이다. 조직에서의 평균 전리 에너지를 33.7 eV라고 하면, 139 keV/33.7 eV  $\approx$  4100개의 전리가 발생되고, 동시에 어떤 비율로 여기도 함께 일어날 것이다. 흡수체가 섬광(형광)물질이라면 이 여기에 의해 약 3 eV의 가시광선(형광)들이 다량 발생할 것이다.

감마선에 의해 생성된 광전자, 반도전자들의 초기 운동 에너지가 모두 조직에 전달, 흡수 되는 것은 아니다. 이들 전자들이 조직 속에서 전리와 여기를 일으키면서 초기 운동 에너지의 대부분을 상실하지만(충돌손실) 일부는 원자핵과 상호 작용하여 감속되고 굴절 되면서 그 에너지 차이만큼 제동복사선(연속 X 선)을 방출 하고 이 제동복사선은 조직 밖으로 투과하여 나가므로 조직에 흡수되지 않는다(방사손실). 공기커마는 이러한 방사손실도 포함한 값이다. 20 keV의 감마선은 투과력이 약해서 주사기 또는 바이알 벽에서 흡수되므로 공기커마는 통상적으로 20 keV 이하의 감마선은 선량 계산에 포함하지 않는다. 따라서 공기커마는 비감마 상수와 그 정의 및 전제 조건이 다르고 단위가 다르므로 그 값에 다소 차이가 있으나 기본적인 개념은 동일하다.

조사선량의 SI 단위는 C/kg 이고, 단위 이름이 없어 사용이 불편하고 조사선량은 SI 단위로 환산하는데 다소 번거로운데 비해 공기 커마는 곧바로 SI 단위로 연결 되므로 편리한 단위이다.

예전에 사용해 오던 비감마 상수는 조사선량 상수로 대체 되고 이것 또한 공기커마율 상수로 대체되고 있다. 최근에 시판되는 선량 계측기들은 공기 커마로 측정된 값을 근거로 산출된 수치를 표시해 준다.( $\mu\text{Sv/hr}$  등)

공기 커마(Gy)가 주어지면 그 위치에서의 흡수선량(Gy)을 의미하게 된다.

Tc-99m(140 keV의 단일 광자가 방출됨)의 선선원(line source)로부터 2-3m 떨어진 곳에서(점선원이 아님), 공기 커마 20 mGy의 방사선을 전신에 균일하게 피폭(Uniform irradiation) 받았을 경우, 전신의 모든 장기 또는 조직(뼈를 포함해서, 감마선 에너지가 140 keV 이므로 F-factor가 1에 근접함)의 흡수선량은 대략 20 mGy가 된다. 즉 모든 장기와 조직은 각각 20 mJ/kg 의 에너지를 받게 된다. 질량 1.8 kg인 간은  $1.8(\text{kg}) \times 20(\text{mJ/kg}) = 36(\text{mJ})$ , 질량 20g인 갑상선은  $0.02(\text{kg}) \times 20(\text{mJ/kg}) = 4(\text{mJ})$  이 된다. (시간당 10 mm의 강우량의 세기는 같아도 물받이 면적이 크면 많은 물을 받는다)

또한 감마선의 방사선 가중치는 1 이므로 각 장기 또는 조직의 등가선량 또한 대략 20 mSv가 된다. 각 조직의 등가선량 20 mSv에 그 조직의 조직 가중치를 곱하여 모두 더하면 전신 유효선량이 된다(각 조직의 가중치를 모두 더하면 1이 된다). 또한 모든 장기와 조직의 등가선량이 20 mSv 로 균일하므로 전신의 등가선량 또한 20 mSv로 간주 되고 전신을 한 장기로 간주하여 조직 가중치 1을 곱하여 전신 유효선량 20 mSv를 구할 수도 있다.

공기커마 20 mGy를 조사 받으면 수식 2.1-2에 의해 조직의 흡수선량은 22 mGy, 등가선량은 22 mSv가 된다. 공기커마 20 mGy는 수식 1.3-1과 2.1-1에 의해 2.3 R에 해당 되고, 조직의 흡수선량은 2.2 rad, 등가선량 2.2 rem이 된다. 따라서 공기커마(Gy), 흡수선량(Gy), 등가선량(Sv), 조사선량(R), 흡수선량(rad), 등가선량(rem)이 모두 근사한 값을 가지므로, 엄밀한 의미에서는 서로 다른 값들이지만, 서로 바꾸어 가면서 사용하곤 한다.

위와 같이 말할 수 있는 것은 산란선에 의해 조직에 흡수되는 에너지를 계산에 포함하지 않고, 식(2.1-2)에서와 같이 공기와 조직의 질량 에너지 흡수계수 비 또는 질량감약계수 비(ratio)만을 공기커마에 곱한 값을 적용했기 때문에 성립된다.<sup>6)</sup>

감마선이 조직과 상호 작용할 때 콤프턴 효과(산란)에

의해 생성되는 콤프턴 산란 선이 조직과 다시 상호작용하여 조직에 에너지가 흡수된다. 공기커마는 정의에서 2차 반응에 의한, 이 산란선에 의해 흡수된 에너지를 포함하지 않는다. 공기커마율 상수로부터 주변 선량당량을 상수로 환산하는 공식에서 Groenewald 등은 이 산란선에 의해 흡수된 에너지를 계산에 포함하고 있어 Table 3에 제시된 핵종들의 주변 선량당량률 상수가 공기커마율 상수에 비해 그 값이 증가되어 있고, 특히 Tc-99m 핵종은 그 증가 폭이 49%에 이른다<sup>5,6)</sup>. 그러므로 주변 선량당량률 상수를 적용했을 때는 위에서처럼 공기 커마와 조직의 흡수(등가)선량이 거의 동일한 값을 갖는다고 말할 수 없다.

Table 3에 제시된 4가지 조사선량률 상수들 중에서 어떤 값을 적용하느냐에 따라 피폭선량의 값이 다소 차이가 날 수 있다. 또한 감마선 에너지 20 keV 이상을 포함시키느냐, 10 keV 이상을 포함시키느냐에 따라서 선량률 상수에 차이가 날 수 있다. 예를 들어 Tc-99m 핵종의 경우 Table 3에서처럼 20 keV 이상을 포함시킨 값과 비교해서 10 keV 이상의 감마선을 포함시킨 경우 공기커마율 상수와 주변 선량당량률 상수가 각각 17.6 ( $\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{hr} \cdot \text{GBq}$ ), 23 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hr} \cdot \text{GBq}$ )으로 증가한다.<sup>5)</sup>

방사성 선원이 완전히 개방된 곳에 존재하거나 피부 등에 오염되었을 때는 감마선 에너지 10 keV 이상을 포함시킨 조사선량률 상수를 적용하고, 바이알 또는 주사기 속에 선원이 존재할 때는 감마선 에너지 20 keV 이상을 포함시킨 조사선량률 상수를 적용하는 것이 방사선 방호 목적에 부합할 것이다.

선량당량률로 표시되는 선량계측기를 이용해서 어떤 지점에서 선량당량률이 측정되면 곧바로 그 지점에서의 피폭선량, 즉 선량당량을 알 수 있다. 공기커마율과 주변 선량당량률 상수의 사용을 ICRU가 권고하고 있으므로 이 글에서도 이 상수들을 주로 사용하고자 한다.

#### 예시 1

I-131 4 GBq 를 함유한 캡슐에서 2 m 떨어진 곳에서 30 분간 서 있을 때 연부조직에 대한 흡수선량(등가선량, 감마선이므로)(Ambient dose equivalent)을 구해보자.

$$D = \frac{X_s \cdot A \cdot t}{d^2}$$

$d = 2\text{m}$ ,  $d^2 = 4\text{m}^2$ ,  $t = 30\text{min} = 0.5\text{hr}$ ,  $A = 4\text{GBq}$   
 $X_s = 66.2 (\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hr} \cdot \text{GBq})$  (Table 3에서)  
 그러므로

$$D = \frac{66.2(\mu Sv \cdot m^2/hr \cdot GBq) \times 4(GBq) \times 0.5(hr)}{4(m^2)}$$

$$= 33.1 \mu Sv$$

예시 2

4 GBq 의 FDG 를 함유한 바이알로부터 2 m 떨어진 곳에서 4시간 동안 작업을 하였을 경우 연부 조직에 대한 흡수(등가)선량을 구해 보자.

F-18의 반감기가 작업시간에 비해 상대적으로 짧기 때문에 4시간 동안의 누적방사능을 구해야 하므로 아래와 같이 주어진다.

$$D = \frac{\chi_{\delta} \cdot A \cdot t}{d^2}$$

$$D = \frac{\chi_{\delta}}{d^2} \int_0^4 A(t) dt, A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$= \frac{\chi_{\delta}}{d^2} \int_0^4 A_0 e^{-\lambda t} dt, \lambda = \frac{0.693}{T(phy)}$$

$$= \frac{\chi_{\delta} \cdot A_0}{d^2} \int_0^4 e^{-\frac{0.693}{T(phy)} t} dt$$

d = 2m, d<sup>2</sup> = 4 m<sup>2</sup>, t = 4 hr, A = 4 GBq, T(phy) = 2 hr  
 χ<sub>δ</sub> = 171 (μSv·m<sup>2</sup>/hr·GBq) (Table 3)이므로

$$D = \frac{171(\mu Sv \cdot m^2/hr \cdot GBq) \times 4(GBq)}{4(m^2)}$$

×(1.44 x 2 (hr)×0.76)

$$D = 369.0 \mu Sv$$

같은 조건에서 Tc-99m 의 경우는 흡수(등가)선량이 46 μSv 이다.

Table 3에서 F-18 과 Tc-99m의 4가지 조사선량률 상수들이 크게 차이가 나는 이유는 F-18 로 부터 방출되는 감마선의 에너지가 더 높고(511 keV), 매 붕괴당 두 개의 감마선이 동시에 방출된다는 점에 주로 기인한다.

### 2.3 등가선량(Equivalent dose)(H)

흡수선량이 동일할지라도 방사선의 종류(α선 or γ선)에 따라 조직에 미치는 생물학적 효과 또는 손상의 정도가 다른 점을 고려한 양으로서 각 조직의 흡수선량에 조사된 방사선의 종류에 따른 방사선 가중치 W<sub>R</sub>을 곱하여 산출한다.

등가선량의 심볼은 H, 단위는 J/kg, 단위 이름은 sievert 라 부르고 Sv로 표기한다. 종전 단위는 erg/g 이고 rem이

Table 4. Radiation Weighting Factors

Type and energy range	Radiation weighting factor (WR)
Alpha particles, all energies	20
Beta particles, all energies	1
Gamma and x-rays, all energies	1
Neutron :	
<10 keV	5
10 keV to 100 keV	10
>100 keV to 2 MeV	20
>2 MeV to 20 MeV	10
>20 MeV	5

Source; data from reference 7.

라 표기한다.

$$H_T = \sum D_{TR} \cdot W_R$$

$$1 Sv = 100 rem, 1 rem = 100 erg/g$$

방사선 피폭의 영향 중 결정적 영향(Deterministic effect)의 예방, 방지를 위한 목적으로 제정된 양이다.

선 에너지 전달(LET, Linear Energy Transfer, 선질계수 Q factor는 LET에 근거하여 제정된 값이다)또는 상대적 생물학적 효과비(RBE, Relative Biological Effectiveness, 방사선가중치 W<sub>R</sub>은 RBE에 근거하여 제정된 값이다)를 근거로 방사선 가중치를 규정하였다(Table 4)<sup>7)</sup>. 종전 이름은 (ICRP 26) 선량당량(dose equivalent)이고 지금도 문헌에서 흔히 사용되고 있다.

그러나 핵의학 및 영상의학 분야에서는 α 선 또는 중성자를 다루지 아니하고 γ선 or X선을 대상으로 함으로 방사선 가중치는 1이고 따라서 개별조직의 흡수선량과 등가선량은 단위만 다를 뿐 동일한 값을 갖는다. 즉, 연부조직에서는 조사선량과 흡수선량과 등가선량이 실제로는 거의 동일한 값을 갖는다.

등가선량은 방사선의 상대적 생물학적 효과비(RBE)를 고려한 양으로서 동일한 흡수선량 일지라도 조직의 손상은 방사선의 종류와 에너지에 의존함을 고려한 것이다. 예를 들면 α-입자는 감마선에 비해 질량이 크고, 전하량이 커서 비정미 짧고, 짧은 비정 내에 모든 에너지를 조직에 흡수시키므로 조직 손상이 크다. 반면에, X선 γ선, β선은 훨씬 긴 진행 경로에 에너지를 흡수시키므로 조직 손상의 정도가 적다. (강우량이 같아도 우박이 농작물에 미치는 피해가 큰 것에 비유)

### 2.4 유효선량(Effective dose)(E)

흡수선량 또는 등가선량이 동일할지라도 조직의 방사선 감수성(Radiosensitivity)에 따라 조직이 손상되는 정도가 다른 점을 고려한양으로 각 조직의 등가선량에 그 조직의



Table 5. Tissue Weighting Factors

Weighting factor used for calculation of effective dose equivalent (H <sub>e</sub> ) and effective dose(E)		
Organ	W(H <sub>e</sub> )	W(E)
Gonads	0.25	0.20
Red marrow	0.12	0.12
Colon	-	0.12
Lungs	0.12	0.12
Stomach	-	0.12
Bladder	-	0.05
Breasts	0.15	0.05
Liver	-	0.05
Esophagus	-	0.05
Thyroid	0.03	0.05
Skin	-	0.01
Bone surfaces	0.03	0.01
Remainder	0.03 split equally between five organs with highest dose	0.05 split equally between adrenals, brain, upper large intestine, small intestine, kidneys, muscle, pancreas, spleen, thymus, and uterus

Source; data from reference 7.

조직 가중치  $W_T$ 를 곱하여 산출한다. 유효선량의 심볼은 E, 단위는 J/kg, 단위 이름은 sievert 라 부르고 Sv로 표기한다. 종전의 단위 이름은 rem (Roentgen Equivalent Man)이고, 단위는 erg/g 으로 등가선량과 동일하다.

$$E = \sum H_T \cdot W_T$$

유효선량은 각 장기들의 흡수선량 분포의 불균일성과 각 장기의 방사선 감수성을 모두 고려하여 실제 피폭으로 인해 형성되는 각 장기들의 발암의 위험 정도를 한 가지 값으로 대표하는 전신선량을 의미한다.

유효선량의 종전 이름은 유효선량당량(effective dose equivalent)이고, 조직 가중치 대신 선질계수(Q factor)를 사용할 뿐 그 개념은 기본적으로 동일하고, 거의 차이가 없다(Table 5).<sup>7)</sup>

유효선량은 일반 대중 또는 특정 집단의 방사선피폭으로 인한 위험을 평가하는데 쓰이고, 또는 핵의학 검사로 인한 피폭의 위험을 상호 비교하는데 쓰일 수도 있다.

다양한 종류의 방사선 피폭(전신피폭 또는 부분피폭, 불균일한 피폭, 의료용 또는 자연방사능에 의한 피폭)으로 인한 총체적인 위험을 대표하는 단 한 가지 수치로 비교 할 목적으로 유효선량(또는 유효선량당량)이 사용된다.

전신선량(whole body or total body dose)은 위험도를 평가하는 또 다른 방법으로써, 인체에 흡수된 총 에너지(각 장기의 흡수선량에 그 장기의 질량을 곱한 것을 모두 합해서 구할 수 있다.)를 체중으로 나눈 것이다. 그러나 이 값은 각 장기간 흡수선량 분포가 불균일한 것을 고려하지 않은 수치이기 때문에 많은 비판이 따르고 있다. (같은 강우량의 우박일지라도 배추밭과 무우밭에 미치는 피해 정도가 다른 것에 비유 또는 호우, 우박, 가뭄으로 인한 경기도와 강원도

농가의 피해를 비교하고자 할 때, 각 도 농가의 피해를 평균적으로 대표할 수 있는 양이 필요한 것에 비유된다)

위와 같은 유효선량에 의한 위험도의 평가를 진단 또는 치료 목적으로 방사성 의약품을 투여한 환자의 위험도를 알려주는 정보로 적용해서는 안 된다. 이득-위험 분석에 의해 진단과 치료 목적으로 방사선을 이용 하는 것이 환자에게 훨씬 이득이 크다는 정당화(justification)가 이미 전제되었기 때문이고, 유효선량의 정의 또는 제정 목적이 개별환자의 위험도를 평가하고자 하는데 있지 않기 때문이다.

### 2.5 예탁선량(Committed dose, H(τ))

지금까지 논의한 선량평가 방법들은 인체 외부에 존재하는 방사선원으로부터의 방사선 피폭(체외 피폭)을 평가 측정하는 방법들이다.

방사성 의약품이 인체 내에 섭취 되어 생물학적, 생리적 특성에 따라 여러 장기에 섭취, 분포하게 되고 물리적 반감기와 생물학적 반감기에 의해 붕괴되고 체외로 배설될 때까지 여러 장기들이 방사선 피폭을 받게 된다.

예탁선량이란 체내에 섭취된 방사성핵종으로 인해 일정 기간(τ) 동안 축적된 선량을 말한다. 그런데, 물리적 반감기가 긴 핵종, 예를 들어 100년 이상 된 방사성핵종이 섭취 되어 체내에 수명 이상으로 오랫동안 존재할 경우 평균 수명 이후까지 누적된 흡수선량을 평가하는 것은 무의미하다.

따라서 이런 경우 누적선량을 계산하는 기간을 인간의 수명을 70으로 가정하여 일반 대중(공중)은 70년, 방사선 작업 종사자(18세 이상)는 50년으로 하고, 특정 개인의 경우는 방사성핵종을 섭취한 시점으로부터 계산된 기간으로 한다.

## 2.6 실용(적) 양(Operational quantity)

각각의 방사선에 의해 개개의 조직이 흡수한 에너지를 실제로 인체에서 직접 측정하는 것은 불가능 하므로 지금까지 논의한 선량 평가 방법 즉, 흡수선량, 등가선량 및 유효선량을 측정할 수는 없다. 이점을 극복하기 위해 ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) Report 47은 다음과 같은 실용(적) 양 (Operational dose quantities)을 제정하였다.

주변 환경 모니터링(Area monitoring)을 위해서 Ambient dose equivalent, Directional dose equivalent 그리고 개인 모니터링(Individual monitoring)을 위해서는 Personal dose equivalent 을 권고하였다. 이러한 양들을 제정한 목적은 과소평가 및 지나친 과대평가를 피하면서 등가선량과 유효선량의 이론 값에 합리적으로 근접한 근사값을 보여주기 위한 것이다.

ICRU는 조직 등가물질(Tissue equivalent)로 만든 직경 30 cm의 구(ICRU Sphere)를 인체를 대신하는 모델로 설정(제안) 하였다. 즉, 이 ICRU Sphere를 방사선 장에 놓았을 때 이 구에 형성되는 선량을 가정하는 것이다.

주변 선량당량(Ambient dose equivalent,  $H^*(d)$ )는 해당(상응하는) 방사선장에 의해 ICRU Sphere의 깊이 d (mm)에서 형성 되는 선량과 동등한 선량으로 정의된다. 이 양은 투과력이 강한 방사선을 평가하는데 사용되고, 그 조직 깊이는 10 mm 이다.

실제로는 대부분의 선량 측정기들이 이 양으로(에 의해서) 교정(Calibration) 된다. 이 계측기에 표시된 선량이 바로 이론 값인 유효선량의 근사값을 말해준다. 흔히 Ambient dose equivalent라는 용어를 생략한 채 선량 계측기에 표시된 값을 유효선량이라 부르고 있다.

Directional dose equivalent( $H'(d)$ ) 는 해당(상응하는) 방사선에 의해 ICRU Sphere의 깊이d(mm)에서 형성 되는 선량과 동등한 선량으로 정의된다. 이 양은 투과력이 약한 방사선에 대해 사용되고, 조직 깊이는 0.07 mm(피부) 및 3 mm(수정체)이다. 실제로는 이 양으로calibration된 선량 계측기는 피부와 같은 표층(superficial tissue)의 등가선량을 의미한다.

Personal dose equivalent(Hp) 마찬가지로 조직 특정 깊이의 연부조직에 형성될 수 있는 선량으로 정의된다. 조직의 특정 깊이는 방사선의 투과력에 따라 투과력이 강한 방사선에 대해서는 10 mm, 투과력이 약한 방사선에 대해서

는 0.07 mm(피부) 및 3 mm(수정체)이다. 실제로 Hp(10)과 Hp(0.07)의 측정은 인체 표면에 선량 계측기를 위치시키고, 적절한 두께의 조직등가 물질로 계측기를 씌워서 측정 할 수 있다. 이와 같은 개인 선량 측정은 흔히 film badge와 열형광 선량계(TLDs)를 이용하여 일상적으로 사용되고 있다.

## Internal Radiation Dosimetry

이 글의 목적은 치료 목적으로 고용량의 방사성요오드를 투여한 환자로부터 방출되는 방사선으로부터의 피폭, 즉 외부 피폭(체의 피폭)으로부터의 안정성에 대해서 논의하는 것이지만(또는 고용량의 방사성요오드를 취급하는 과정에서 의 외부 피폭), 치료 용량을 처방해야 하고 방사성요오드 섭취로 인한 선량을 측정하는 방법에 대한 기본적인 개념을 이해할 필요가 있으므로, 여기서 내부 피폭에 대한 선량 측정 방법을 간략히 기술 하고자 한다.

방사선 피폭의 영향을 평가하는데 가장 중요한 요소는 조직에 흡수된 방사선 에너지의 양이다. 체내에 섭취된 방사성핵종에 의해 전달, 흡수된 방사선 에너지를 측정, 평가하는 것을 Internal radiation dosimetry 라 한다.

## 3. 흡수분율법(Absorbed fraction method, MIRD dosimetric method)

흡수분율법은 1968년 Medical Internal Radiation Dose Committee of SNM(MIRD)가 제안한 방법으로써 가장 널리 받아들여지고 선량평가의 표준 방법으로 이용 되고 있다.

체내에 섭취된 방사성 의약품은 여러 장기(선원 장기, source organ)들에 섭취되고 선원 장기에서 방출되는 방사선에 의해 주변의 장기(표적장기, target organ)들이 피폭을 받는다. 표적장기의 선량을 측정하기 위해서는 모든 선원 장기에서 방출되는 방사선에 의한 흡수선량을 모두 합해서 구하게 된다. 선량 계산은 다음의 네 단계로 수행된다.

에너지 방출률 계산(Rate of energy emission)( $\text{erg/hr} \cdot \mu\text{Ci}$ )  
선원 장기에 섭취된 방사성핵종으로부터 단위 시간당 방출되는 방사선의 에너지를 측정한다.

에너지 흡수율 계산(Rate of energy absorption)( $\text{erg/hr} \cdot \mu\text{Ci}$ )

표적장기에 단위시간당 흡수되는 에너지를 계산한다.

평균 선량률 계산(average dose rate)( $\text{dD/dt}$ )

평균 선량 계산(average dose)(D)

첫 번째 단계는 방사성핵종의 붕괴 방식, 즉 방사선의 종류와 그 에너지, 방사선의 방출 빈도, 물리적 반감기 등과 같은 순전히 물리적 자료만을 이용하므로 정확하게 계산된다. 두 번째 및 세 번째 단계는 선원 장기 및 표적 장기의 크기, 모양, 질량, 선원 장기와 표적 장기간의 위치 관계 및 거리와 같은 정상인의 해부학적 자료에 의존하므로(참조인, reference man, 성인 남자를 대표하는 해부 및 생리학적 모델로써 1975년 ICRP 23에서 제안되었다) 비교적 정확히 구할 수 있다. 그러나 네 번째 단계는 방사성 의약품의 체내 분포, 섭취, 배설 등의 생물학적 자료가 필요하고 따라서 가장 많은 변수가 작용하고 오차가 클 수 있다.

수식 전개에 편의상 종전의 선량 및 방사능 단위를 사용하고 필요한 부분마다 SI 단위로의 환산 인자를 덧붙이고자 한다.

### 3.1 1단계 - 에너지 방출률

선원 장기에 섭취된 방사성핵종으로부터 방출되는 에너지 방출률을 구하기 위해서 앞에서 기술한 기본 수식(1.2항 수식 1.2-1)으로부터 출발한다.

$$E_{abs} = \Phi \text{ (개/cm}^2\text{·sec)} \times E \text{ (MeV)} \times (\mu_{en}/\rho)_{air} \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

$$= \Phi \cdot E \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air} \text{ (MeV/g·sec)}$$

조직에서의 흡수선량을 구하기 위해서는 조직과 공기의 질량 에너지 흡수계수비를 고려해야 하는데 다음에 기술할 2단계에서 이 부분이 계산되므로 위의 식에서 공기의 질량 에너지 흡수계수를 삭제하면 에너지 방출률이 된다.

$$E_{emi} = \Phi \text{ (개/cm}^2\text{·sec)} \times E \text{ (MeV)}$$

1 μCi의 방사성핵종으로부터 에너지 E(MeV)의 방사선이 매초 붕괴당 한 종류의 방사선 n(방출빈도=1)이 방출된다면 에너지 방출률은 다음과 같이 구할 수 있고, 에너지와 시간단위를 각각 erg와 hour 단위로 환산하면(1 MeV = 1.6 × 10<sup>-6</sup> erg, 1 hr = 3600sec) 이 방사성핵종의 에너지 방출율(에너지 플루언스율)은 아래와 같이 주어진다.

$$3.7 \times 10^4 \times 1.6 \times 10^{-6} \times 3600 E \text{ erg/(hr·μCi)} = 213 nE \text{ (erg/hr·μCi)}$$

만약 방사성핵종으로부터 여러 개의 방사선이 그 방출 빈도(n<sub>i</sub>)에 따라 각각의 에너지(E<sub>i</sub>)를 가지고 방출된다면 에너지 방출률은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{에너지 방출률} = 213 \sum_{i=1}^n n_i E_i \text{ (erg/hr·μCi)}$$

### 3.2 2단계 - 에너지 흡수율

선원장기에 섭취된 방사성핵종으로부터 방출되는 방사선 에너지 중 표적장기에 흡수되는 에너지의 비율(absorbed fraction)을 흡수분율(Φ)이라고 한다.

$$\Phi_i(T \leftarrow S) = \frac{\text{표적장기에 흡수되는 방사선 에너지}}{\text{선원장기에서 방출되는 방사선 에너지}}$$

따라서 표적장기에 흡수되는 에너지 흡수율은 다음과 같이 된다.

$$213 n_i E_i \times \Phi_i(T \leftarrow S) = 213 n_i E_i \Phi_i(T \leftarrow S) \text{ (erg/hr·μCi)}$$

만약 방사성핵종으로부터 방출되는 방사선이 한 가지 종류 이상이라면 에너지 흡수율은 각각의 방사선으로부터 흡수한 에너지를 모두 합친 것이 된다.

$$213 \sum_{i=1}^n n_i E_i \Phi_i(T \leftarrow S) \text{ (erg/hr·μCi)}$$

에너지 흡수분율을 알기 위해서는 방사성핵종의 붕괴 특성, 해부학적(생물학적) 자료 그리고 물질과 방사선과의 상호 작용에 대한 정확한 지식이 필요하다. 또한 조직의 질량 에너지 흡수계수가 고려되어 계산되어진다. 많은 선원장기-표적장기 조합에 대해, 방출되는 방사선 각각에 대해 흡수분율을 계산해야 하므로 방대한 계산이 필요하다. ICRP의 참조인의 해부학적 자료를 기준으로 다양한 방사성핵종별로 이 에너지 흡수 분율이 계산되어 관련문헌에 제시되어 있다.

만약 선원 장기에 베타입자, 내부 전환 전자, Auger입자 등이 섭취되면 선원장기에 모든 에너지가 전달 흡수되므로 표적 장기에 흡수되는 분율은 0이다. 만약 선원 장기와 표적장기가 동일하다면(많은 방사성 의약품들이 표적장기 자체에 대부분 섭취되어 표적장기와 선원장기를 동일하게 간주하는 경우가 많다.) 에너지 흡수 분율은 1이 된다. 10 keV 이하의 X선 또는 γ선 또한 하전 입자들과 마찬가지로 선원 장기 내에 모든 에너지가 흡수 되는 것으로 간주된다.

### 3.3 3단계 - 평균흡수선량률

위에서 구한 에너지 흡수율을 표적장기의 질량으로 나누어 주면 단위 질량당 에너지 흡수율 즉, 흡수선량률을 구할 수 있고 단위를 rad로 환산해 주기 위하여 100으로 나누면(1 rad=100 erg/g), 단위 방사능(1 μCi)당 흡수선량률이 된다.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{2.13}{M} \sum_{i=1}^n n_i E_i \Phi_i(T \leftarrow S) \text{ (rad/hr·μCi)}$$

위 식에서 Δ<sub>i</sub> = 2.13n<sub>i</sub>E<sub>i</sub> 라 하면 아래와 같이 요약된다.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \Delta_i \Phi_i(T \leftarrow S) \text{ (rad/hr·μCi)}$$

Δ<sub>i</sub> 는 equilibrium(absorbed) dose constant로써 단위 방사능당(μCi) 단위 시간당 선원장기에서 방출되는 방사선 에너지를 의미한다. SI 단위로의 환산인자,

$$\Delta_i = 1.6 \times 10^{-13} \times n_i E_i \text{ (Gy·kg/sec·Bq)}$$

시간(t) 에 선원장기에 A(t) μCi가 존재한다면 시간(t) 시점에서 표적장기의 흡수선량은 다음과 같다.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{A(t)}{M} \sum_{i=1}^n \Delta\Phi_i(T \leftarrow S) \text{ (rad/hr)}$$

3.4 4단계 - 평균흡수선량(D)

선원장기에 섭취된 방사능 A(t)는 초기에 투여한 방사능의 일정 분율(f)이 섭취된 것이고, 이 방사능은 시간이 지남에 따라 유효반감기, T(eff)에 의해 계속 지수 함수적으로 감소할 것이다. 즉, 아래와 같이 된다.

$$A(t) = f \cdot A_0 \cdot e^{-\frac{0.693t}{T(eff)}} \mu\text{Ci}$$

따라서 총 흡수선량을 구하기 위해서 흡수선량률 (absorbed dose rate)을, 시간 0 에서 무한대까지 적분하면 아래와 같이 주어진다.

$$D = \int_0^{\infty} \frac{dD}{dt} dt$$

따라서 표적장기의 흡수선량은 다음과 같이 다시 정리된다.

$$D(T \leftarrow S) = 1.44 \cdot T(eff) \cdot \frac{f \cdot A_0}{M} \cdot \sum \Delta\Phi_i(T \leftarrow S) \text{ (rad)} \quad (3.4-1)$$

3단계에서 구한 단위방사능당, 단위질량당 흡수선량률을 S(factor)라고 정의하면 아래와 같이 정리된다.

$$S(T \leftarrow S) = \frac{dD}{dt} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \Delta\Phi_i(T \leftarrow S) \text{ rad/(hr} \cdot \mu\text{Ci)}$$

따라서 표적장기의 흡수선량은 다음과 같이 다시 정리된다.

$$D(T \leftarrow S) = 1.44 \cdot f \cdot A_0 \cdot T(eff) \cdot S(T \leftarrow S) \text{ (rad)} \quad (3.4-2)$$

SI 단위로의 환산 인자,

$$\begin{aligned} 1 \text{ rad/hr} \cdot \mu\text{Ci} &= 7.5 \times 10^{-11} \text{ Gy/sec} \cdot \text{Bq} \\ &= 7.5 \times 10^{-2} \text{ mGy/sec} \cdot \text{MBq} \\ &= 2.7 \times 10^{-1} \text{ Gy/hr} \cdot \text{MBq} \end{aligned}$$

$$1 \text{ mGy/sec} \cdot \text{MBq} = 13.32 \text{ rad/hr} \cdot \mu\text{Ci}$$

S factor는 선량 측정을 간단하게 수행하기 위해서 도입된 값으로서 방사성핵종의 붕괴 특성 및 참조인의 해부학적 자료만으로 각 방사성핵종별로 또한 각각의 표적장기-선원장기 조합에 따라 계산된 값이고 관련 문헌에 방대한 자료가 제시되어 있으며, 편리하게 계산할 수 있도록 소프트웨어가 상용화된 바 있다.<sup>8)</sup>

위 식에서  $\tilde{A} = 1.44 \cdot f \cdot A_0 \cdot T(eff)$ 라고 하면 다음과 같이 요약된다.

$$D(T \leftarrow S) = \tilde{A} \cdot S(T \leftarrow S) \text{ rad}$$

$\tilde{A}$  는 누적 방사능(Cumulated activity)으로서 체내에 섭취된 방사성핵종이 붕괴 및 배설에 의해 완전히 제거될 때까지 선원장기에 축적된 방사능을 의미한다. 흡수선량은 기

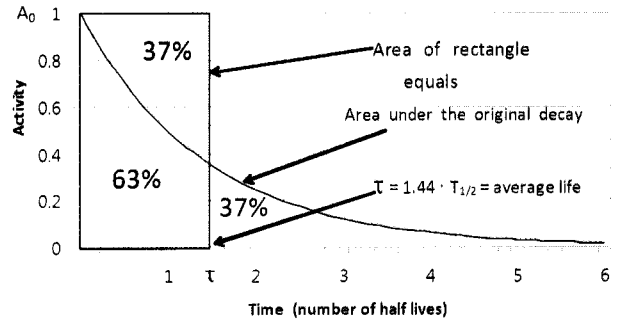


Figure 2. Cumulated activity ( $\tilde{A}$ )(Bcq·sec) approximates the area of rectangle formed by  $A_0$  multiplied by  $\tau$  and indicates the total number of radionuclide (atom) to decay from  $t(0)$  to  $t(\infty)$ .

본적으로 체내에 섭취된 방사성 원자의 붕괴 개수에 의존한다.

Fig. 1에서 보듯이 초기 방사능  $A_0$ 가 지수 함수적으로 감소하지 않고 평균 수명( $\tau$ )까지 지속되다가 시간  $\tau$ 에 일시에 0이 된다고 가정하면 Y축  $A_0$ 와 X축  $\tau$ 로 이루어지는 직사각형의 면적이 방사성 원자의 총 개수(원래의 방사성 붕괴 곡선 아래의 면적)와 동일하고 이 면적이 누적 방사능이다.  $\tau$ 는 초기 방사성 원자수가  $1/e$ 로 줄어든 시간, 즉 63%가 붕괴된 시간을 의미하고 이는 방사성핵종의 평균 수명(Average life)을 의미한다.

누적방사능( $\tilde{A}$ )의 단위는 sec·Bq 또는 hr·μCi 이다.

따라서 위 수식에서 장기별 누적 방사능과 S-factor를 알면 손쉽게 흡수선량을 구할 수 있다. 즉, 장기에 섭취된 초기 방사능( $f \cdot A_0$ ), 유효반감기와 S-factor를 대입하면 특정장기의 흡수선량을 구할 수 있다.

F-18과 방사성 붕괴 특성이동일하나 다만 물리적 반감기가 4배인(F-18과 Fs-18의 유효 반감기가 각각 물리적 반감기와 동일하다고 가정) 가상의 방사성핵종 Fs-18(Sister fluorine)이 있다고 가정하자. 원소가 동일하므로 생물학적 특성도 동일한 것으로 간주된다.

8 MBq의 F-18, 2 MBq의 Fs-18을 각각 인체에 투여했을 때, 예탁 유효선량에 어떤 차이가 있을까?

흡수선량은 체내에서 붕괴되는 방사성 원자의 수, 즉 누적 방사능에 의존한다. 투여한 방사능 용량과 그 속에 함유된 방사성 원자수와의 관계는 아래와 같이 주어진다.

$$A = -\lambda N = -\frac{0.693}{T(eff)} \times \frac{6.02 \times 10^{23} \cdot W}{M}$$

A: 방사능,  $\lambda$ : 붕괴상수, N: 최초의 방사성 원자수, Avogadro 상수:  $6.02 \times 10^{23}$ , W: 방사성 물질의 질량, M: 원자 질량수 또는 원자의 질량

Table 6. Calculation of  $\sum\Delta\phi_i$  : Example 3 (Tc-99m)

Radiation i	$n_i$	$E_i$	$\Delta_i^a$	$\phi_i$	$\Delta_i \phi_i$
Gamma 1	-	-	-	-	0
Conversion electron	0.986	0.002	0.004	1	0.004
Gamma 2	0.883	0.140	0.264	0.16	0.042
K-conversion electron	0.088	0.119	0.022	1	0.022
L-conversion electron	0.011	0.138	0.003	1	0.003
Gamma 3	-	-	-	-	-
Conversion electron	0.01	0.122	0.003	1	0.003
					$\sum\Delta\phi_i = 0.074$

Some conversion electrons of the low emission frequency and energy are omitted.  
Source: data from reference 9.

Fs-18의 물리적 반감기가 F-18의 4배이므로 붕괴 상수  $\lambda$ 는 1/4로 감소되어 방사능 A는 F-18의 1/4로 감소된다. F-18과 Fs-18의 원자질량수는 18로 동일하다. 만약 투여하는 방사성 원자수가 서로 동일하게 하려면 위 식에서 두 핵종의 질량 W가 같아야 한다. 따라서 Fs-18의 투여 용량을 F-18의 1/4로 하면 그 속에 함유된 방사성 원자 수는 서로 동일하다.

그러므로 8 MBq의 F-18과 2 MBq의 Fs-18을 각각의환자에게 투여했을 때 방사성 붕괴 곡선 아래 부분의 면적은 서로 동일하므로 예탁 유효선량도 동일하다.

새로운 방사성 의약품 개발하여, 기존에 알려진 방사성 의약품의 선량과 비슷한 수준으로 유지하기 위해 투여 용량을 결정하고자 할 때, 위와 같이 새로운 방사성 의약품의 붕괴 곡선 아래 부분의 면적을 비교, 고려하면 투여 용량 또는 흡수선량을 대략적으로 가늠하는데 도움이 될 수 있다.

흡수 분율법은 많은 가정을 전제조건으로 하고 있다. 즉, 투여한 방사성 의약품이 장기에 즉시 섭취되고 단일지수함수 곡선에 따라 행동하고 참조인의 기준에 합당한 정상인을 기준으로 S-factor가 산출되었기 때문에 개개인의 환자에게 적용할 경우에 많은 차이가 발생할 수 있음을 염두에 두어야 한다.

예시 3

Tc-99m tin colloid 5 mCi를 주사하고 간 스캔을 하고자 한다. 투여한 방사능의 90%가 간에서 즉시 섭취되고 간에서의 Tc-99m tin colloid의 유효 반감기가 6시간 일 때, 흡수 분율법을 이용하여 간의 흡수선량을 구해보자.

간의 질량이 주어지지 않았으므로 참조인의 간 질량 1.8kg을 이용한다. 간에 섭취된 초기 방사능  $A_0(\text{liver}) = 0.90 \times 5000 \mu\text{Ci} = 4500 \mu\text{Ci}$ ,  $T(\text{eff}) = 6 \text{ hr}$  흡수 분율법 계산에 필요한 변수들,  $n_i$ ,  $E_i$ ,  $\Delta_i$  및 간에서의 흡수분율( $\phi_i$ ) 그리고 이 변수들을 이용하여 계산된  $\sum\Delta\phi_i$  값이 Table 6에 제

시되어 있다.<sup>9)</sup> 이 값들을 수식 (3.4-1)에 대입하면 아래와 같이 주어진다.

$$\text{흡수선량 } D(\text{liver}) = 4500(\mu\text{Ci}) / 1800(\text{g}) \times 1.44 \times 6(\text{hr}) \times 0.074(\text{rad/hr} \cdot \mu\text{Ci}) = 1.60 \text{ rad}$$

나머지 10퍼센트의 방사능이 비장과 골수에 분포하고 여기서 방출되는 방사선에 의해 간이 피폭되지만 이들에 의한 선량 계산은 Table 6과 같은 자료들이 각각 필요하므로 생략한다.

예시 4

예시 3과 같은 조건에서 간, 뼈, 골수, 갑상선의 흡수선량을 S-factor를 이용하여 구해보자.

예시 3에서와 마찬가지로 초기 간의 방사능  $A_0(\text{liver}) = 0.90 \times 5000 \mu\text{Ci} = 4500 \mu\text{Ci}$ , 유효반감기  $T(\text{eff}) = 6 \text{ hr}$  이고 Table 7에서 주어진 S-factor는 다음과 같다.<sup>9)</sup>

$$\begin{aligned} S(\text{liver} \leftarrow \text{liver}) &= 4.6 \times 10^{-5} \\ S(\text{bone} \leftarrow \text{liver}) &= 1.1 \times 10^{-6} \\ S(\text{marrow} \leftarrow \text{liver}) &= 1.6 \times 10^{-6} \\ S(\text{thyroid} \leftarrow \text{liver}) &= 1.5 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

이상의 자료를 수식 (3.4-2)에 대입하면 다음과 같이 주어진다.

$$\text{간의 흡수선량 } D(\text{liver} \leftarrow \text{liver}) = 1.44 \times 4500 \times 6 \times 4.6 \times 10^{-5} = 1.79 \text{ rad}$$

$$\text{뼈의 흡수선량 } D(\text{bone} \leftarrow \text{liver}) = 1.44 \times 4500 \times 6 \times 1.1 \times 10^{-6} = 0.43 \text{ rad}$$

$$\text{골수의 흡수선량 } D(\text{marrow} \leftarrow \text{liver}) = 1.44 \times 4500 \times 6 \times 1.6 \times 10^{-6} = 0.62 \text{ rad}$$

$$\text{갑상선의 흡수선량 } D(\text{thyroid} \leftarrow \text{liver}) = 1.44 \times 4500 \times 6 \times 1.5 \times 10^{-7} = 0.06 \text{ rad}$$

위와 같이 Table 6과 같은 자료를 작성할 필요 없이 S-factor를 이용하여 표적 장기의 흡수선량을 쉽게 구할 수 있다.

**Table 7.** S factors for <sup>99m</sup>Tc for Various Sources and Targets (rad/hr • μCi)

Target	Source			
	Liver	Bone(Av)	Thyroid	Total body
Bone (total)	1.1x10 <sup>-6</sup>	1.1x10 <sup>-5</sup>	1.0x10 <sup>-6</sup>	2.5x10 <sup>-6</sup>
Liver	4.6x10 <sup>-5</sup>	6.6x10 <sup>-7</sup>	9.3x10 <sup>-8</sup>	2.2x10 <sup>-6</sup>
Marrows	1.6x10 <sup>-6</sup>	6.6x10 <sup>-6</sup>	1.1x10 <sup>-6</sup>	1.1x10 <sup>-6</sup>
Ovaries	4.5x10 <sup>-7</sup>	8.5x10 <sup>-7</sup>	4.9x10 <sup>-9</sup>	2.4x10 <sup>-6</sup>
Thyroid	1.5x10 <sup>-7</sup>	7.9x10 <sup>-7</sup>	2.3x10 <sup>-3</sup>	1.5x10 <sup>-6</sup>
Total body	2.2x10 <sup>-6</sup>	6.6x10 <sup>-7</sup>	1.8x10 <sup>-6</sup>	2.0x10 <sup>-6</sup>

To convert to SI unit (Gy/hr-MBq), divide the values by 3.7.  
Source: data from reference 9.

**Table 8.** Calculation of  $\sum \Delta_i \Phi_i$  : Example 5 (I-131)

Radiation i	n <sub>i</sub>	E <sub>i</sub>	Δ <sub>i</sub>	Φ <sub>i</sub>	Δ <sub>i</sub> Φ <sub>i</sub>
Beta 1	0.016	0.070	0.002	1	0.002
Beta 2	0.069	0.095	0.014	1	0.014
Beta 3	0.005	0.143	0.001	1	0.001
Beta 4	0.905	0.192	0.369	1	0.369
Beta 5	0.006	0.286	0.004	1	0.004
Gamma 5	0.833	0.364	0.646	0.03	0.019
K-Conversion electron	0.017	0.330	0.012	1	0.012
					$\sum \Delta_i \Phi_i = 0.421$

Some photons and conversion electrons of the low emission frequency and energy are omitted.  
Source: data from reference 9.

예시 5

갑상선 전절제술을 받은 갑상선암 환자에게 방사성요오드(I-131) 100 mCi를 투여하여 치료하고자 한다. 갑상선 전절제술 후 남은 갑상선 조직은 5 g이고 갑상선에서의 방사성요오드의 유효반감기 T(eff)는 2일이고 투여 방사능의 25%가 섭취된다고 가정하여 갑상선의 흡수선량을 구해보자.

S-factor는 갑상선의 질량이 20g인 정상 참조인을 근거로 계산된 값이므로 이 환자의 경우 S-factor를 바로 적용할 수 없다. 따라서 Table 8<sup>9)</sup>과 같은 자료가 필요하다.

갑상선의 질량 M=5 g, 갑상선에 섭취된 초기 방사능 A (thyroid) = 0.25x100x10<sup>3</sup> μCi = 25x10<sup>3</sup> = 25000 μCi  
갑상선에서의 I-131의 T(eff) = 2 days = 48 hr

흡수분율법에 의한 선량 계산을 위한 변수들 n<sub>i</sub>E<sub>i</sub>, Δ<sub>i</sub> 및 간에서의 흡수분율(Φ<sub>i</sub>) or 이 변수들을 이용하여 계산된  $\sum \Delta_i \Phi_i$  값이 Table 8에 제시되어 있다. 이 값들을 수식 (3.4-1)에 대입하면 아래와 같이 주어진다.

$$D (\text{thyroid}) = 0.25 \times 100 \times 10^3 (\mu\text{Ci}) / 5 (\text{g}) \times 1.44 \times 48 (\text{hr}) \times 0.421 = 1.45 \times 10^5 \text{ rad} = 145000 \text{ rad}$$

위에서 계산된 갑상선의 흡수선량은 베타선과 일부 주요 감마선만을 포함한 것이다. Table 8에 제시되지 않은 감마선과 내부 전환 전자들에 의한 선량을 모두 포함하

더라도 위에서 계산된 흡수선량이 전체 선량의 97%를 차지하고, 베타선만 선량 계산에 포함하면 90%를 차지하게 된다. 그래서 방사성요오드가 핵의학 치료에 매우 유용한 방사성핵종이다.

3.5 선량계수(Dose coefficient)

S-factor를 이용하여 선량 계산이 매우 간편해졌으나 아직도 각 선원장기의 누적 방사능을 구해야 하는 어려움이 있다. 선량계수(e(50))는 방사선 작업 종사자가 방사성핵종 (화합물 형태의 방사성 의약품이 아닌) 자체를 일시에 섭취 또는 흡입하였을 경우 50년 동안의 예탁 유효선량 (E(50)) 또는 각 개별 장기의 예탁 등가 선량을 결정하는 값으로서 섭취 또는 흡입한 방사능의 단위 방사능당 예탁 유효 선량으로 표현된다(Sv/Bq). 지금까지 제안된 새로운 바이오 카이네틱 모델과 Dosimetric model을 이용해서 약 60 개의 원소, 800개의 방사성핵종에 대하여 섭취 또는 흡입 별로 평가 된 선량계수 중 작업 종사자를 위한 선량계수가 최근 ICRP 68(1994)에 발표 되었고<sup>10)</sup> 일반 대중을 위한 선량계수 또한 ICRP 71, 72에 연령대 별로 발표 되었다. 선량계수는 ICRP 30에 제시된 흡수 분율법에 근거한 것으로 앞에서 논의한 방법과 기본적으로 동일한 개념이다. 선량계수의 계산은 아래와 같이 수행된다.

앞에서 기술한 바와 같이 유효선량은 아래와 같이 주어진다.

$$E = \sum_T W_T H_T$$

각 장기의 예탁 등가 선량은 아래와 같다.

$$H_{T(50)} = \sum_S U_{S(50)} SEE(T \leftarrow S)$$

$U_{S(50)}$ : 50년 동안 선원장기에서의 방사성붕괴 개수 (Bq·sec)

$SEE(T \leftarrow S)$ : 매 붕괴당 표적장기의 등가선량(Specific Effective Energy), (Sv/Bq·sec).

$$SEE(T \leftarrow S) = \sum_R \frac{Y_R E_R W_R AF(T \leftarrow S)_R}{m_T}$$

$Y_R$ : 매 붕괴당 방사선 방출빈도(Bq/sec),  $E_R$ : 방사선 에너지(J),  $W_R$ : 방사선 가중치,  $AF(T \leftarrow S)_R$ : 매 붕괴당 흡수분율,  $m_T$ : 표적장기의 질량(kg)

위 식에서 SEE는 바로 S-factor에 해당되고  $U_S$ 는 각 선원장기의 누적 방사능에 해당되어 흡수 분율법과 기본 개념은 동일하다. 다만 단위가 다르고 그에 따라 그 명칭이 다를 뿐이다.

따라서 예탁유효선량( $E_{(50)}$ )은 다음과 같다.

$$E_{(50)} = \sum_T W_T H_{T(50)}$$

흡수 분율법과의 큰 차이는 각 선원장기의 누적방사능의 자료가 수식 내에 이미 포함되어 있으므로 섭취 또는 흡입한 방사능만 알면 예탁 유효선량을 곧바로 알 수 있는 매우 편리한 값이다. 핵의학의 관심 핵종에 대한 선량계수가

Table 9. Effective Dose Coefficients for Ingestion and Inhalation

Nuclide	Effective dose coefficients (Sv Bq <sup>-1</sup> )	
	Inhalation, einh(50)	Ingestion
	5 μm AMAD	einh(50)
F-18	8.9 E-11(M)	4.9 E-11
Tc-99m	2.9 E-11(M)	2.2 E-11
I-131	1.1 E-08	2.2 E-08

The numbers following E+ or E- refer to the power of 10. Source; data from reference 10.

Table 9에 제시되어 있다.<sup>10)</sup>

선량계수를 이용하여 연간 섭취한도(ALIs)를 쉽게 구하는데도 사용된다. 그러나 새로운 방사성 의약품 개발하는 경우에는 각 선원 장기의 누적 방사능을 반드시 구한 후 S-factor를 이용하여 선량측정을 해야 하는 어려움이 있다.

Christy와 Eckerman이 제안한 성인 남자 해부 모형(1989), 새로 다듬어진 바이오카이네틱 모델들, 그리고 동물실험과 임상 연구를 통해 얻어진 방사성 의약품의 분포, 체류 및 배설 등의 자료를 이상에서 논의한 흡수 분율법에 적용하여 방사성의약품별로 24개 장기와 조직의 흡수선량과 유효 선량당량(전신)을 평가한 자료가 Radiation Internal Dose Information Center (RIDIC)에 공개되어 있다.<sup>11)</sup>

Table 10은 갑상선이 없는 모델(갑상선 전절제술을 받은 환자)을 대상으로 I-131 sodium iodide를 투여했을 경우 12개 주요 장기와조직의 흡수선량과 유효 선량당량을 보여준다.<sup>11)</sup>

Table 11은 핵의학의 주요 방사성의약품에 대해 유효 선량당량만을 발체 요약한 것이다.<sup>11)</sup> 갑상선 전절제술을 받은

Table 10. Radiation Dose Estimates for I-131 Sodium Iodide in the Reference Adult - Athyroid Patient

Estimated radiation dose			
Organ			
	(mGy/ MBq)	(rad/mCi)	
Gonads	ovaries	4.0E-0	1.5E-01
	testis	2.1E-02	7.9E-02
Red marrow		1.9E-02	7.1E-02
Colon		3.7E-02	1.4E-01
Lungs		1.5E-02	5.7E-02
Stomach		3.5E-01	1.3E+00
Bladder		8.1E-01	3.0E+00
Breasts		1.2E-02	4.5E-02
Liver		9.6E-02	3.6E-01
Skin		1.3E-02	4.6E-02
Bone surfaces		1.8E-02	6.6E-02
Kidney		2.3E-02	8.4E-02
Small Intestine		2.3E-01	8.6E-01
Remainder			
Effective dose equivalent	1.1E-01 (mSv/MBq)	4.0E-01 (rem/mCi)	

The numbers following E+ or E- refer to the power of 10. Source; data from reference 11.

**Table 11.** Effective Dose Equivalent for Radionuclides of Interest in Nuclear Medicine

Pharmaceuticals	Effective dose equivalent		Pharmaceuticals	Effective dose equivalent	
	mSv/MBq	rem/mCi		mSv/MBq	rem/mCi
Tc-99m MAG3	1.5E-02	5.5E-02	I-131 Sodium Iodide (Athroid)	1.1E-01	4.0E-01
Tc-99m HEDP	6.1E-03	2.2E-02	I-131 Sodium Iodide	1.1E+01	3.9E+01
Tc-99m MDP	6.1E-03	2.2E-02	I-123 Sodium Iodide	1.2E-01	4.5E-01
Tc-99m DTPA	8.2E-03	3.0E-02	Ga-67 Citrate	1.1E-01	4.1E-01
Tc-99m DISIDA	2.5E-02	9.3E-02	Tl-201 Chloride	1.6E-01	6.0E-01
Tc-99m Perchnetate	1.1E-02	3.9E-02	F-18 FDG	3.0E-02	1.1E-01
Tc-99m ECD	1.1E-02	4.2E-02	F-18 Sodium Fluoride	2.7E-02	1.0E-01
Tc-99m MIBI	1.5E-02	1.3E-02	Tc-99m Oral administrations	2.5E-02	9.3E-02
Tc-99m Sulfur Colloid*	2.5E-03	9.4E-03			

\* Intermediate-to-advanced diffuse parenchymal liver disease  
 The numbers following E+ or E- refer to the power of 10.  
 Source; data from reference 11.

**Table 12.** Dose Rates from Ablation Patients at Various Times Post Administration and at Various Distances from Patients Treated for Thyroid Cancer ( $\mu\text{Sv/hr} \cdot \text{MBc}$  Administered Activity)

Distance (m)		Day 0	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 7
0.1	Mean	0.665	0.187	0.088	0.069	0.053	0.016
0.5	Mean	0.114	0.049	0.025	0.019	0.014	0.007
1.0	Mean	0.046	0.019	0.009	0.007	0.007	0.004
	Standard deviation	0.011	0.006	0.006	0.007	0.006	0.003

Source; data from reference 16.

환자에게 4 GBq의 I-131을 투여한 경우 Table 10에서이 환자의 유효 선량당량(전신)은 440 mSv(44 rem)이 되고, 이에 비해 정상인(갑상선 섭취 25%)의 유효 선량당량은 Table 11에서 44 Sv(4400 rem)가 되어 갑상선 전절제술 환자의 100배가 된다. 또한 정상인에게 I-131 400 MBq을 투여한 경우 갑상선의 흡수선량은 136 Gy(13,600 rad)가 된다. Table 11에 제시된 12개의 주요장기와 조직의 흡수선량(흡수분률 계산시 이미 방사선의 종류가 고려되었으므로 실제로는 등가선량에 해당된다)에 각 조직의 조직가중치를 곱해서 모두 더하면 유효 선량당량에 근사한 값을 얻는다.

FDG 400 MBq를 투여한 경우 유효 선량당량은 12 mSv(1.2 rem)가 되고, Tc-99m MDP 400 MBq를 투여한 경우의 유효 선량당량은 2.4 mSv(0.24 rem)이다. Table 9에 제시된 예탁 유효선량과 다소 차이가 나는 이유는, 선량 계수는 방사성 핵종 자체를 섭취 또는 흡입한 경우이고 Table 11의 유효 선량당량은 방사성 화합물(방사성 의약품)을 대부분 경정맥으로 투여한 경우이고, 선량 평가 시 채택한 바이오 카이네틱 모델과 해부학적 모형(ICRP 참조인 또는 Christy 와 Eckerman의 성인 남자 해부 모형)이 다른 데에 기인할 수 있으며 또한 각 조직의 변수의 선택에 따라 선량 값이 2-3배 차이가 날 수 있기 때문이다.

3.4 항의 수식 3.4-1에서  $fA_0/M$ 는 조직 단위 질량 당 조직에 섭취된 방사성 의약품의 농도를 의미한다. 정상 성인

참조인과 모든 조건(생물학적 기능 포함)이 동일 하나, 다만 크기와 체중이 1/4로 줄어든 미니어처 참조인(소아가 아님)이 있다고 가정하자. 참조인과 미니어처 참조인에게 각각 400 MBq과 100 MBq의 I-131을 투여했을 때(체중당 투여용량 동일) 갑상선의 흡수선량과 전신 유효 선량에 서로 어떠한 차이가 있을까?

갑상선의 옥소 풀이 포화 수준에 이르지 않았고, 갑상선 조직의 옥소 섭취 농축 능력이 동일하다고 가정하면, 흡수분율 f 가 동일하고 체중 당 투여방사능이 동일하므로 갑상선 조직의 방사성요오드 농도가 동일할 것이므로 갑상선의 흡수선량도 동일할 것이다.

각 장기들이 비례적으로 작아지고 선원장기와 표적장기 거리가 가까워졌기 때문에 흡수 분율의 차이가 있을 수 있다. 즉, 거리가 가까워졌으므로 선량이 증가할 것이고, 반면에 크기가 작아졌기 때문에 선량이 감소할 것이나, 전체적으로는 두 요인이 서로 상쇄되어 유효선량(전신)도 큰 차이가 없을 것이라고 추론된다.

**4. 환자로 부터 방출되는 선량률은 얼마나 되는가?**

방사성요오드 치료중인 환자로 부터 받는 피폭은 체외 피폭과 체내 피폭이 있다. 체외 피폭이 모든 피폭의 거의 대부분을 차지한다. 체내 피폭은 환자로 부터 배설되는 소변, 타액, 땀에 의한 오염과 환자의 호흡으로 배출되는 방사성요오



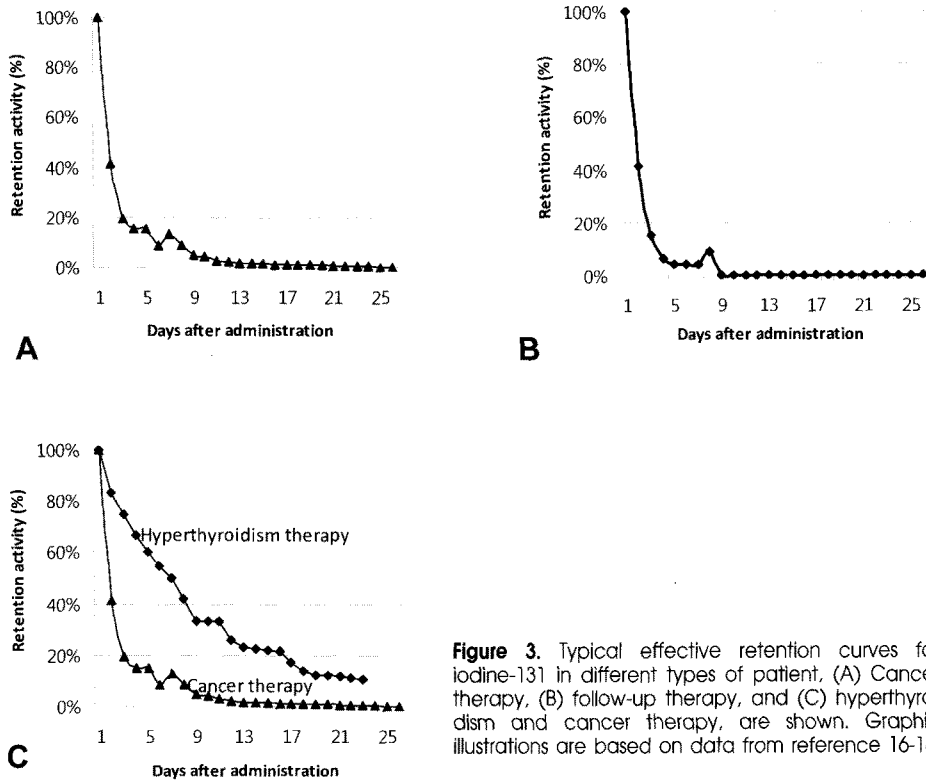


Figure 3. Typical effective retention curves for iodine-131 in different types of patient, (A) Cancer therapy, (B) follow-up therapy, and (C) hyperthyroidism and cancer therapy, are shown. Graphic illustrations are based on data from reference 16-18.

Table 13. Dose Rates from Follow-Up Patients at Various Times Post Administration and at Various Distances from Patients Treated for Thyroid Cancer ( $\mu\text{Sv/hr} \cdot \text{MBq}$  Administered Activity)

Distance(m)		Day 0	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 7
0.1	Mean	0.746	0.274	0.085	0.030	0.026	0.001
0.5	Mean	0.126	0.051	0.017	0.006	0.002	0.0003
1.0	Mean	0.046	0.019	0.007	0.003	0.002	0.004
	Standard deviation	0.014	0.02	0.006	0.002	0.001	0.003

Source; data from reference 16.

드의 흡입으로 인한 피폭을 말한다. 여러 연구들에 의하면 오염에 의한 체내 피폭은 체외 피폭의 10% 미만이라고 보고되고 있다.<sup>12)</sup> 오염에 의한 갑상선 선량이 체외 피폭의 1/100 미만이라는 보고도 있다.<sup>13)</sup>

방사성요오드의 오염에 의한 체내 피폭의 위험도는 비록 무시할 수는 없지만 매우 낮은 편이다. 따라서 여기서는 체외 피폭에 대해서만 논의한다.

조사 선량률은 환자 몸 안에 남아있는 방사능에 의존한다. 방사성요오드 치료는 통상 3-7 GBq (80-190 mCi)를 투여하는 경우가 많다. 방사성요오드는 섭취 후 위장관에서 혈액 내로 신속히 섭취되고 상피 세포막에 Sodium-iodide symporter (NIS)가 존재하는, 남아있는 갑상선 조직, 타액선, 위 등에 섭취된다. 타액선, 위, 수유중인 유방의 상피세포는 inorganic iodide를 혈장 농도의 150배를 농축한다.<sup>12)</sup>

이 방사성요오드는 주로 소변으로 배출되고 소량이 타액, 땀, 대변으로 배설된다. 또한 소량이 호흡으로 배출된다. 따라서 조사 선량률 측정 시 환자를 점 선원으로 간주하는 것보다 선 선원(line source)로 간주하는 것이 바람직하다.<sup>14,15)</sup> 거리의 제곱에 반비례하는 법칙을 적용하는 데서 오는 기하학적 영향을 최소화 하기 위해 환자로부터 2-3m 떨어진 곳에서 조사선량률 측정해야 한다는 권고도 있다. 환자 몸 안에 남아있는 방사능은 수술 후 남아있는 갑상선 조직의 양, 신장 기능, 수분 섭취 정도에 따라 좌우된다. 방사성요오드 치료를 하는 갑상선 암과 갑상선 기능 항진증 환자로부터 1m 떨어진 거리에서 복부, 허리 높이에서 측정한 첫째 날 전신 선량률을 100%로 하여(Normalization) 얻은 체내 방사성요오드의 전형적인 체류 곡선이 Fig. 3. 에 제시되어 있다.<sup>16-18)</sup>

**Table 14.** Measured Dose Rates at Various Times Post Administration and at Various Distances from Patients Treated for Hyperthyroidism ( $\mu\text{Sv/hr} \cdot \text{MBq}$  Administered Activity)

Distance (m)	0 days	2-4 days	5-7 days	8-11 days
0.6		0.059	0.034	0.024
1.0	0.046	0.022	0.014	-

Source; data from reference 20.

**Table 15.** Mean Dose Rates from Hyperthyroid Patients at Various Times Post Administration and at Various Distances from Patients Treated for Hyperthyroidism ( $\mu\text{Sv/hr} \cdot \text{MBq}$  Administered Activity)

Distance (m)	Day 0	Day 1	Day 3	Day 6	Day 8	Day 10
0.1	1.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1
0.5	0.2	0.1	0.1	0.07	0.05	0.04
1.0	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02

Source; data from reference 18.

Driver 등과 Barrington 등의 보고에 의하면 갑상선 암 환자에서 투여 방사능의 약 53-55.6%가 24시간 내에 배설되고 다음 24시간 동안 17.5-21%, 다음 24시간에 4.8-6.4%가 배설되어 72시간 내에 75-83%가 배설된다.<sup>16,19)</sup>

Barrington 등이 갑상선 암 환자와 추적 환자에서, 치료 용량 투여 후 직접 측정된 조사선량률이 Table 12와 Table 13에 제시되어 있다.<sup>16)</sup> 비교를 위해 Culver 등과 O'Doherty 등이 갑상선기능항진증 환자에서 측정된 조사 선량률이 Table 14와 Table 15에 제시되어 있다.<sup>18,20)</sup> 위 표의 자료들을 비교해 보면, 투여 후 3일부터 갑상선 암 환자의 조사 선량률이 갑상선기능항진증 환자보다 급격하게 감소함을 보여준다. 갑상선암 환자는 남아있는 갑상선 조직이 매우 적고 잘 분화된 유타암 세포 또한 육소 섭취 능력이 정상 갑상선 세포의 약 1/100이므로 갑상선 기능 항진증 환자보다 훨씬 빠른 속도로 배설되기 때문이다.

I-131 4 GBq를 함유한 캡슐로부터 1 m 떨어진 곳에서 5분 동안 환자와 대면할 경우의 흡수(등가)선량은 2.2항의 예시 1에서 보듯이 아래와 같이 주어진다.

$$D = \frac{\chi_s \cdot A \cdot t}{d^2}$$

$\chi_s$ : 주변 선량당량률 상수 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hr} \cdot \text{GBq}$ ), A: 방사능 (GBq), d: 거리 (m), t: 피폭시간 (hr)

$$\chi_s = 66.2 (\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hr} \cdot \text{GBq}) \text{ (Table 3에서)}$$

흡수등가선량  $D = 22 \mu\text{Sv} = 0.022 \text{ mSv}$  이다. 만약 방사능이 절반으로 줄어든다면 같은 조건에서 흡수등가선량  $D = 11 \mu\text{Sv} = 0.011 \text{ mSv}$ 가 된다. 위의 두 경우를 더한 총 10분 동안 환자와 대면 할 경우의 흡수(등가)선량은 0.033 mSv가 된다.

각 조직에 분포된 방사성요오드로부터 감마선이 방출될

때 평균적으로 조직 3 cm을 투과하면서 감약된다고 가정하면 흡수(등가)선량은 아래와 같이 주어진다.

$$D = \frac{\chi_s A}{d^2} \cdot e^{-\mu x} \cdot t$$

$\mu$ : 차폐체 또는 조직의 선감약계수 (/1cm),  $x$ : 차폐체 또는 조직의 두께 (cm)

I-131로부터 방출되는 감마선들의 평균 에너지가 300 keV라고 하면 Table 2에서 근육의 질량 감약계수는  $11.76 \times 10^{-2} (\text{1cm}^2/\text{g})$ 이다. 질량 감약계수에 근육의 밀도를 곱하고 단위를 cm와 g으로 통일하면 선 감약계수가 아래와 같이 주어진다.

$$11.76 \times 10^{-2} \times 1040 \times 10^3 (\text{g}) / (100\text{cm})^3 = 0.1176 (/ \text{cm})$$

(따라서 I-131의 반가층(HVL) =  $0.693/\mu = 6.2 \text{ cm}$ , Tc-99m의 반가층 = 4.6 cm)

선 감약계수와 조직의 두께 3 cm을 위 식에 대입하면 흡수(등가)선량은 아래와 같이 주어진다.

위에서 이론적으로 계산된 등가선량은 0.033 mSv이므로

$$D = 0.033 (\text{mSv}) e^{-\mu x} = 0.033 (\text{mSv}) \times 0.704 = 0.023 \text{ mSv}$$

이다. 요약하면, 방사성요오드 4 GBq를 투여한 환자로부터 1m 거리에서 투여 직후 첫째 날과 둘째 날 각각 5분 동안 차폐 없이 피폭 받았을 경우, 이론적으로 산출된 흡수(등가)선량은 0.023 mSv이다.

Barrington 등이 방사성요오드 투여 후 1 m 거리에서 실제 측정된 흡수(등가)선량은 첫째 날에 투여 방사능당 (MBq) 0.046  $\mu\text{Sv/hr} \cdot \text{MBq}$  이고 둘째 날은 0.019  $\mu\text{Sv/hr} \cdot \text{MBq}$ 이다. 이론적 흡수(등가)선량을 계산할 때와 같은 조건에서, 즉 방사성요오드 4 GBq를 투여한 직후 첫날

**Table 16.** Radiation Absorbed Doses in Radiology

X-ray examination	Absorbed dose (mGy)					Effective dose (mSv)
	Active bone marrow	Breasts	Uterus	Thyroid	Gonads	
Chest	0.04	0.09				0.04
CT head	2.7	0.03		0.02		1.8
Abdomen	0.4	0.03	2.9	1.9	2.2, 0.4	1.2
CT abdomen	5.6	0.7	8.0	0.05	8.0, 0.7	7.6
Barium enema	8.2	0.7	16	0.2	16, 3.4	8.7

When two values are given for the gonads, the first value is for the ovaries, the second value is for the testes.  
Source; data from reference 21.

**Table 17.** Risk of Death from Various Environmental Sources (Risks of 1/1,000,000)

Source	Amount of exposure	Risk
X-rays (whole body)	10 mrem	Cancer
Cigarettes	4 cigarettes	Cancer, heart disease
Living with cigarette smoker	2 months	Cancer, heart disease
Wine	0.5 liter	Cirrhosis of liver
Peanut butter	10 tablespoons	Liver cancer caused by aflatoxin
Miami drinking water	1 gallon	Cancer caused by chloroform
Diet soda	30 cans	Cancer caused by saccharin
In stone or brick building	2 months	Cancer caused by radioactivity
Visit to Denver	2 months	Cancer caused by cosmic rays
Jet flying	20,000 miles	Cancer caused by cosmic rays
Living near polyvinylchloride plant	20 years	Cancer caused by vinyl chloride
In New York or Boston	1 day	Air pollution
In coal mine	3 hours	Accident
In coal mine	1 hour	Black lung disease
Canoeing	6 minutes	Drowning
Jet flying	2500 miles	Accident
In automobile	50 miles	Accident
On motorcycle	5 miles	Accident

Source; data from reference 24.

과, 방사능이 절반으로 줄어든 둘째 날 각각 1 m 거리에서 5분씩 피폭 되었다면 흡수(등가)선량은 첫째 날에 0.015 mSv이고 둘째 날에 0.015 mSv×0.019/0.046 = 0.006 mSv 이므로 이틀간 총 10 분 동안의 흡수(등가)선량은 0.021 mSv가 된다. 따라서 이론적으로 산출한 흡수(등가)선량과 실제 측정된 흡수(등가)선량이 거의 일치함을 알 수 있다. 방사성요오드를 투여한 직후와 방사능이 약 절반으로 감소된 둘째 날, 차폐 없이 각각 5분 동안 환자와 접촉, 대면 하는 것을 가정한 선량계산은 방사선 방호의 관점에서 충분히 여유가 있는 과대평가된 선량이라고 판단된다. (물론 혼자서 거동 할 수 없는 중증 환자일 경우 진료 또는 간호 시 접촉 시간이 길어질 수도 있지만 예외적인 상황이다.)

흉부 X-선 촬영 시 피폭 선량을 0.05 mSv라고 하면 유효선량 0.021 mSv는 흉부 X-선 선량의 1/2에 해당된다. 일주일에 4명의 환자가 입 퇴원 한다면 주당 2회의 흉부 X-선 선량이 되고 연간 100회의 흉부 X-선 선량 즉, 5 mSv에 해당된다. 연간 유효선량 5 mSv는 ICRP 60 권고에 의한 작업종사자의 연간 개인 선량한도는 20 mSv의 1/4 수준이

고, 자연방사능에 의한 연간 유효선량 2.4 mSv의 2배가 된다. 연간 5 mSv의 선량이 어느 정도의 위험을 초래하는지 다음 항에서 알아보자.

### 5. 방사선 피폭 위험도의 비교

핵의학 및 영상의학에서 시행하는 진단적 검사에 대한 선량 평가는 여러 가지 요소에 의해 좌우된다.

- 1) 검사방법(protocol): Tc-99m sestamibi 심근 관류 스캔 시 휴식기, 심장부하 스캔 여부 그리고 조영 전, 후 CT (동맥기, 문맥기) 스캔 여부.
- 2) 스캔 변수 부하 전류 값(mAs), 절편 두께, 스캔 범위.
- 3) 장비의 종류 spiral CT, 다채널 CT 등.
- 4) 환자의 크기, 연령, 성별, 건강상태.
- 6) 선량 평가시 전제되는 가정 또는 조건.
- 7) 선량 계측기의 측정 조건과 특성.

예를 들어 흉부 X-선의 유효선량은 0.02-0.05 mSv로 인

**Table 18.** Comparison of Various Risks in Terms of Loss of Life Expectancy (LLE)

Risk	LLE (days)
Cigarette smoking (male, one or more packs/day)	2441
Poor social connections	1644
Heart disease	1607
Cancer (all types)	1247
15% overweight	777
Alcohol abuse	365
Motor vehicle accident	205
Air travel	64
Passive smoking	50
Medical radiation (2 mSv/year over working life)	17
Asthma	11.3
Medical radiation (single exposure of 10 mSv)	2
Lighting strike	1.1
Earthquakes and volcanoes	0.13
Airbag in car	-50
Coronary pacemaker	-180

Source; data from reference 25.

**Table 19.** Comparison of Various Occupations in Terms of Loss of Life Expectancy (LLE)

Occupation	LLE(days)
Unemployment	500
Agriculture	320
Construction	227
Mines, quarries	167
Transportation, utility	160
All	60
Government	60
Medical radiation worker (5 mSv/year over working life)	42
Manufacturing	40
Trade	27
Service	27
Medical radiation worker (2 mSv/year over working life)	17

Source; data from reference 25.

용되고 있다.<sup>21-23)</sup> National Radiation Protection Board가 1986년 영국에서 조사한 바에 의하면, 복부 CT의 선량은 흉부 X-선의 190배 이다(Table 16). Royal College of Radiologists가 1998년 영국에서 조사한 바에 의하면 복부 CT 선량은 10 mSv, 골반 CT 선량은 10 mSv 이고, 흉부 X-선 선량은 0.02 mSv이다. 따라서 복부 CT 선량은 흉부 X-선의 선량의 500배에 이른다.<sup>22)</sup> 이와 같이 선량평가 결과가 2~3배 또는 그 이상 차이가 나는 것은 흔히 있을 수 있다. 따라서 개별환자의 선량을 평가할 때는 문헌에 제시된 선량 값들을 가이드 라인 삼아 위에서 언급한 여러 가지 요소들을 고려하여야 할 것이다. 여기서는 흉부 X-선의 유효선량 0.05 mSv를 비교 기준으로 삼고자 한다.

방사선 피폭의 위험도를 비교 평가하기 위해서 흉부 X-선을 2회 촬영 시 받는 선량과 비슷한 10 mSv 피폭의 위험도와 일상생활에서 겪을 수 있는 상황의 위험도를 비교한 자료가 Table 17에 제시되어 있고,<sup>24)</sup> 또한 일상 상황의 위험도와 직업에 따른 여명의감소(수명감소)를 비교한 자료

가 Table 18과 Table 19에 제시 되어 있다.<sup>25)</sup> Table 17에서 흉부 X-선 2회 촬영 시 방사선 피폭으로 인한 위험도는 백만 명 당 한 명이 암이 발생하여 사망하는 위험도에 해당되고 담배 4개피를 피운 후 그로 인해 백만 명 당 한 명이 암이 발생하거나 심장병으로 사망하는 위험도에 해당된다. 선량-반응곡선(dose-response curve)이 직선적이라고 가정하면 흉부 X-선 100회 촬영의 위험도는 포도주 25 liter를 마신 후 그로 인해 백만 명 당 50명이 간경화가 발생하여 사망에 이르는 위험도에 해당되고 땅콩버터 500 티스푼을 먹은 후 aflatoxin에 의해 백 만명 당 50명이 간암이 발생하는 위험도에 해당된다. 흉부 X-선 200회 촬영 시(10 mSv) 방사선 피폭의 위험도는 Table 18에서 수명이 2일 감소하는 위험도에 해당 되고 이와 비교되는 흡연(남성, 하루 한 갑 이상)의 위험도는 수명감소 2400일에 해당되고 심장병의 위험도는 수명감소 1600일에 해당된다. 벼락의 위험도는 수명감소 1.1일에 해당된다. 다시 말하면 흡연이 흉부 X-선 200회 촬영보다 1200배 위험하다는 뜻이다. (더구나 일시에

10 mSv의 피폭이 1년 동안 200회에 걸쳐 10 mSv의 피폭을 받는 것 보다 훨씬 그 위험도가 크다.) 또한 직업에 따른 위험도를 비교하면 Table 19에서, 방사선 작업 종사자(2 mSv/년, 정년까지)의 위험도는 17일 수명감소에 해당되고 이에 비해 실업자의 위험도는 수명감소 500일, 농업의 위험도는 수명감소 320일, 건설업의 위험도는 수명감소 227일에 해당된다. 따라서 일반적인 방사선 방호의 원칙, 즉 체외 피폭에 대해서는 환자와의 거리의 연장, 피폭 시간의 단축, 차폐의 이용을 항시 고려하고, 체내 피폭에 대해서는 오염을 최소화 한다면 피폭 선량을 훨씬 더 줄일 수 있어 의료진의 방사선 피폭 위험도는 다른 위험도와 비교할 때 매우 낮으며 안전하다고 할 수 있다.

## 6. 결론

방사성요오드 치료시 의료진이 받는 방사선 피폭은 대부분 체외 피폭에 기인하고 그 피폭의 위험도는 크지 않다. 방사선 방호의 일반 원칙을 준수하면 피폭 선량을 훨씬 더 줄일 수 있어 안전하다. 따라서 안전성을 교육, 홍보하여 의료진이 방사성요오드 치료에 적극적으로 참여하도록 격려함으로써 핵의학 치료가 활성화 되고 핵의학 치료 병실 운영에 도움이 되기를 기대한다.

## References

1. Cember H. *Introduction to Health Physics*. 3rd ed. McGraw-Hill; 1996. p. 148.
2. Hubbell JH. Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV. *Int J Appl Radiat Isotopes* 1982;33:1289-93.
3. Cherry SR, Sorenson JA, Phelps ME. *Physics in Nuclear Medicine*. 3rd ed. Philadelphia: Saunders; 2003. p. 434.
4. Edward WW. Radiation protection in nuclear medicine In: Taveras JM, Ferrucci JT. *Radiology Diagnosis Imaging Intervention*. Philadelphia: J. B. Lippincott Company; 1986. p. 11.
5. Wasserman H, Groenewald W. Air kerma rate constants for radionuclides. *Eur J Nucl Med* 1988;14:569-71
6. Groenewald WA, Wasserman HJ. Constants for calculating ambient and directional dose equivalents from radionuclide point sources. *Health Physics* 1990;58:655-8.
7. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann ICRP* 1991;21:82-7.
8. Stabin MG: MIRDOSE: Personal computer software for internal dose assessment in nuclear medicine. *J Nucl Med* 1996; 37: 538-46.
9. Chandra R. *Nuclear Medicine Physics the basics*, 5th ed. Baltimore: Williams & Wilkins; 1998. p. 64-7.
10. International Commission on Radiological Protection. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68. *Ann ICRP* 1994;24:13-73.
11. Stabin MG, Stubbs JB, Toohey RE: *Radiation Dose Estimates for Radiopharmaceuticals* (ORNL Report NUREG/CR-6345). Oak Ridge, TN, Oak Ridge Institute for Science and Education; 1996. Also available electronically at <http://orise.orau.gov/reacts/dose-est-compendia.htm>. Accessed June 12, 2009.
12. International Commission on Radiological Protection. Release of Patients after Therapy with Unsealed Radionuclides. ICRP Publication 94. *Ann ICRP* 2004;34:13-27.
13. Jacobson AP, Plato PA, Toeroek, D. Contamination of the home environment by patients treated with iodine-131: initial results. *Am J Public Health* 1978;68:225-30.
14. Lubin, E. Definitive improvement in the approach to the treated patient as a radioactive source. *J Nucl Med* 2002;43:364-5.
15. Siegel JA, Marcus CS, Sparks RB. Calculating the absorbed does from radioactive patients : the line-source versus point-source model. *J Nucl Med* 2002;43:1241-4.
16. Barrington SF, Kettle AG, O'Doherty MJ, Wells CP, Somer EJ, Coakley, AJ. Radiation dose rates from patients receiving iodine-131 therapy for carcinoma of the thyroid. *Eur J Nucl Med* 1996;23:123-30.
17. Hilditch TE, Connell JM, Davies DL, Watson WS, Alexander WD. Radiological protection guidance for radioactive patients-new data for therapeutic 131I. *Nucl Med Commun* 1991;12:485-95.
18. O'Doherty MJ, Kettle AG, Eustance CN, Mountford PJ, Coakley AJ. Radiation dose rates from adult patients receiving 131I therapy for thyrotoxicosis. *Nucl Med Commun* 1993;14:160-8.
19. Driver I, Packer S. Radioactive waste discharge quantities for patients undergoing radioactive iodine therapy for thyroid carcinoma. *Nucl Med Commun* 2001;22:1129-32.
20. Culver CM, Dworkin HJ. Radiation safety considerations for post-iodine-131 hyperthyroid therapy. *J Nucl Med* 1991;32:169-73.
21. National Radiological Protection Board. A national Survey of Doses to Patients Undergoing a Selection of Routine X-ray Examinations in English Hospitals. NRPB-R200; 1986 and Survey of CT practice in the UK, Part 2: Dosimetric Aspects. NRPB-R249;1991. Chilton, Didcot, Oxon.
22. Royal College of Radiologists. *Making the Best Use of Department of Clinical Radiology*. 4th ed. Royal College of Radiologists. London. 1998.
23. Hall EJ. *Radiobiology for the Radiologist*. 5th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2000. p. 208-9.
24. Little JB. Biologic Effects of Low-Level Radiation Exposure. In: Taveras JM, Ferrucci JT. *Radiology Diagnosis Imaging Intervention*. Philadelphia: J. B. Lippincott Company; 1986. p. 11.
25. Cohel BL. Catalog of risks extended and updated. *Health Phys* 1991;61:317-35.