

한국인 성인남성에 대한 ^{131}I 의 흡입선량계수 계산

Calculation of ^{131}I Inhalation Dose Coefficients for a Korean Adult Male

이태영, 이종일, 장시영
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국인 성인남성에 대한 형태계량학적, 호흡생리학적, 생체동역학적 및 선량계산학적 특성을 고려하여 ^{131}I 에 대한 흡입선량계수를 계산하였다. 그 결과, 한국인 성인남성에 대한 흡입선량계수가 코카서스인 성인남성의 값에 비해 5.01 ~ 7.12 % 높게 나타났다. 이 차에 가장 큰 영향을 주는 것은 비유효에너지 이었다.

Abstract

Dose coefficients for inhalation of ^{131}I have been calculated taking into account morphometric, respiratory physiological, biokinetic, and dosimetric characteristics of Korean adult male. The results show that dose coefficients for Korean adult male are 5.01 ~ 7.12 % higher than those of Caucasian adult male. The parameter which has the largest effect on the value of the dose coefficients is the SEE values.

1. 서 론

방사성핵종의 직업상접취로 인한 피폭은 원자력의 연구·개발·생산·이용 등을 통해 국민생활 향상과 복지증진에 기여하기 위한 행위에서 비롯된다. 그러나 이 행위로 인하여 개인에게 위해가 발생하지 않도록 하기 위해서는 개인의 피폭을 정량화하고 선량한도이하로 관리하여야 한다. 그러자면 내부피폭에 대한 개인감시 계획을 수립하고 이를 철저히 이행하는데 주안점을 둬야한다. 일반적으로 내부피폭에 대한 개인감시는 방사능의 측정과 측정결과의 해석을 통해 이루어진다. 측정에서 소변, 대변, 전신 또는 인체내부의 장기가 측정대상이 되며, 여기에서 측정된 결과는 생체동역학적 모델과 선량계산학적 모델을 사용하여 섭취량과 예탁유효선량으로 해석된다.

방사선작업종사자에 대한 선량계수가 ICRP 68¹⁾에 제시되어 있다. 그러나 여기에서 수록된 자료는 코카서스인의 호흡특성인자, 생체동역학적 모델 및 선량계산학적 자료를 토대로 계산된 값임에도 불구하고, 우리나라에서는 한국인 방사선작업종사자에 그것이 적합한지를 모르는 상태에서 ICRP에서 주어진 값을 예탁유효선량 계산에서 사용하고 있다. 이에 따라 한국인 방사선작업종사자에 대한 선량계수의 계산과 코카서스인에 대한 값과의 비교가 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 한국 성인남성에 대한 형태계량학적, 호흡생리학적, 생체동역학적 및 선량계산학적 특성을 고려하여 ^{131}I 에 대한 흡입선량계수를 계산하는데 있다. 이를 위해 흡입선량계수에 영향을 주는 인체 특성인자의 분석, 한국 성인남성에 대한 각종 인자 값의 산출 및 선량계수의 계산 등에 관한 내용이 수행되었다.

2. 계산방법

가. 한국인 성인남성에 대한 인체특성인자

선량계수를 구하기 위해서는 한국인 성인남성에 대한 호흡인자, 동역학적 인자 및 비유효에너지가 필요하다. 본 연구에서 이에 대한 자료는 코카서스인의 값으로부터 산출하였으며, 여기서는 각종 특성자료에 대한 산출방법을 요약·제시한다. 호흡인자는 호흡기의 형태계량인자와 호흡생리인자로 나누어진다. 흡입입자의 호흡기 침적에 영향을 주는 형태계량인자는 비흉부(ET) 영역의 사각용적[V_D(ET)], 기관·기관지(BB) 영역의 사각용적[V_D(BB)], 세기관지·종말 세기관지(bb) 영역의 사각용적[V_D(bb)], ET 영역 및 BB 영역 축적인자[SF_t], bb 영역 축적인자[SF_b], 호흡세기관지·폐포관·폐포(AI) 영역 축적인자[SF_a] 등이 있다.²⁾ V_D(ET), V_D(BB), SF_t 및 SF_b의 값은 국민인체측정조사³⁾로부터 얻어진 한국인 성인남성의 평균 키(170.26 m)를 그림 1에서 주어진 각 계산식에 대입하여 구하였다. 그리고 V_D(bb) 및 SF_A의 값은 한국인 성인남성의 평균 몸무게(66.29 kg)를 그림 2에서 주어진 각 계산식에 대입하여 구하였다.

흡입입자의 호흡기 침적에 영향을 주는 호흡생리인자는 기능적 잔기량[FRC], 환기율[B], 분당 호흡수[f_R], 1회 환기량 [V_T], 호흡 유량률[V] 등이 있다.²⁾ 호흡생리인자중 FRC는 성과 연령에만 의존하지만, 그 이외의 모든 인자들은 성, 연령, 인간이 일상생활에서 행하는 신체활동수준(수면, 휴식, 가벼운 운동, 심한 운동)에 따라 차이가 있다. FRC의 값은 ICRP 66²⁾ 부록 B의 표 B.1에 주어진 FRC 계산식에 한국인 성인남성의 평균 키와 연령을 대입하여 구하였다. 그리고 V_T 값은 ICRP 66 부록 B의 표 B.1에 주어진 폐활량(V_C) 계산식에 한국인 성인남성의 평균 키와 연령을 대입하여 V_C를 구한 다음, 이 값을 그림 3에서 주어진 신체활동수준별 V_T와 V_C와의 관계식에 대입하여 구하였다. 그러나 분당 환기량은 모든 인종 집단에 대해 거의 동일하므로 한국인 성인남성에 대한 호흡 유량률과 환기율은 계산하지 않았으나, 각 신체활동수준에 따른 한국인 성인남성에 대한 분당 호흡수는 분당 환기량(L/min)과 신체활동수준에 따른 한국인 성인남성의 V_T 값을 사용하여 구하였다.

호흡기에 침적된 ¹³¹I은 그림 4.a에서 보여주는 바와 같이 혈액에 흡수되고, 한 격실에서 다른 격실로 이동하고, 인두를 통해 소화기로 림프채널을 통해 호흡기의 ET 영역과 흉부(TH) 영역에 있는 각각의 림프절로 제거된다. 이 메커니즘에서 혈액흡수율은 화합물의 형태에만 의존한다. 격실간 이동과 제거는 입자수송에 의한 것이므로 인체특성과는 상관이 없다. 따라서 호흡기에서의 혈액흡수율과 입자수송에 의한 제거율은 ICRP 66에서 주어진 값을 사용하였다. 혈액에 흡수된 ¹³¹I의 생체동역학은 ICRP 67⁴⁾에 주어진 모델을 사용하였으며 그림 4.b와 같이 주어진다. 이 모델에서 위장흡수율(f_i), 혈액에서 갑상선으로 들어가는 비율, 대변으로 배설되는 비율 및 혈액에서의 생물학적 반감기는 연령에 무관한 것으로 나타나 있다. 그러나 갑상선과 연조직에서의 생물학적 반감기는 연령에 따라 서로 다르다. 따라서 한국인 성인남성에 대한 갑상선에서의 생물학적 반감기(T_b)와 연조직에서의 생물학적 반감기(T_c)는 한국인 성인남성의 평균 몸무게를 그림 5에서 주어진 각 관계식에 대입하여 구하였다. 소화기에서 ¹³¹I의 거동에 대해서는 ICRP 30 소화기 모델과 관련 인자를 사용하였다. 이 모델은 연령 의존성이 아니기 때문이다.

비유효에너지는 몸무게에 역 비례한다고 가정하여 다음 식을 사용하여 구하였다.⁵⁾

$$SEE = \frac{\text{Body mass of Caucasian adult male}}{\text{Body mass of Korean adult male}} \times SEE \text{ value of Caucasian adult male} \quad (1)$$

코카서스인에 대한 SEE 값은 SEECAL 2.0코드⁶⁾에 의한 계산결과가 본 계산에서 사용되었으나, 갑상선에서 단위 핵변환당 갑상선에서의 비유효에너지만이 본 계산에서 고려되었다. 그 이외의 경우에서의 선량은 선량계수에 기여하는 몫이 아주 작기 때문이다.

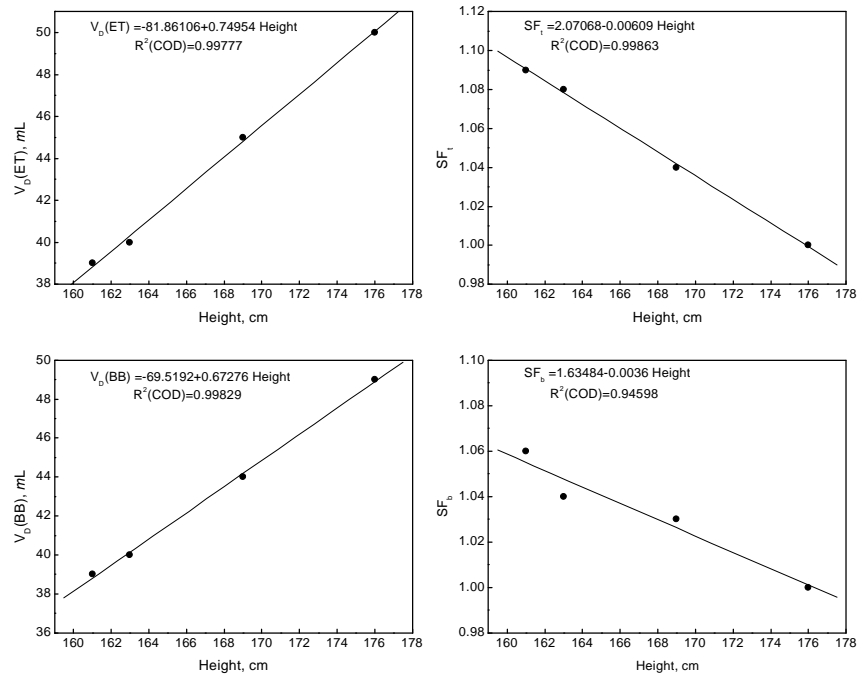


그림 1. 키와 형태계량인자[$V_D(\text{ET})$, $V_D(\text{BB})$, SF_t , SF_b]와의 상관관계. • 은 코카서스인의 성인남성, 성인여성, 15세 남성, 15세 여성에 대한 자료임.

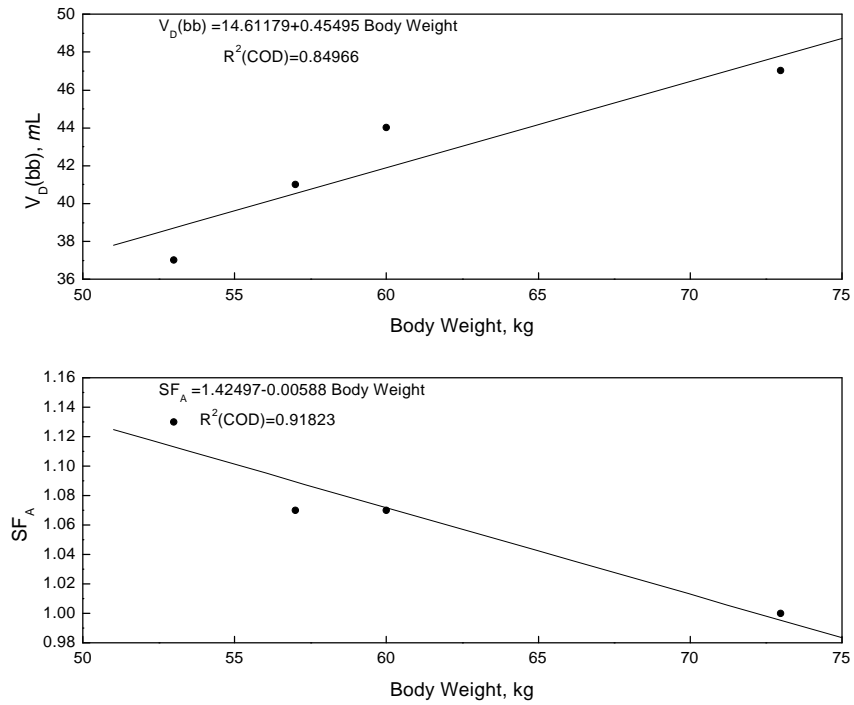


그림 2. 몸무게와 형태계량인자[$V_D(\text{bb})$, SF_A]와의 상관관계. • 은 코카서스인의 성인남성, 성인여성, 15세 남성, 15세 여성에 대한 자료임.

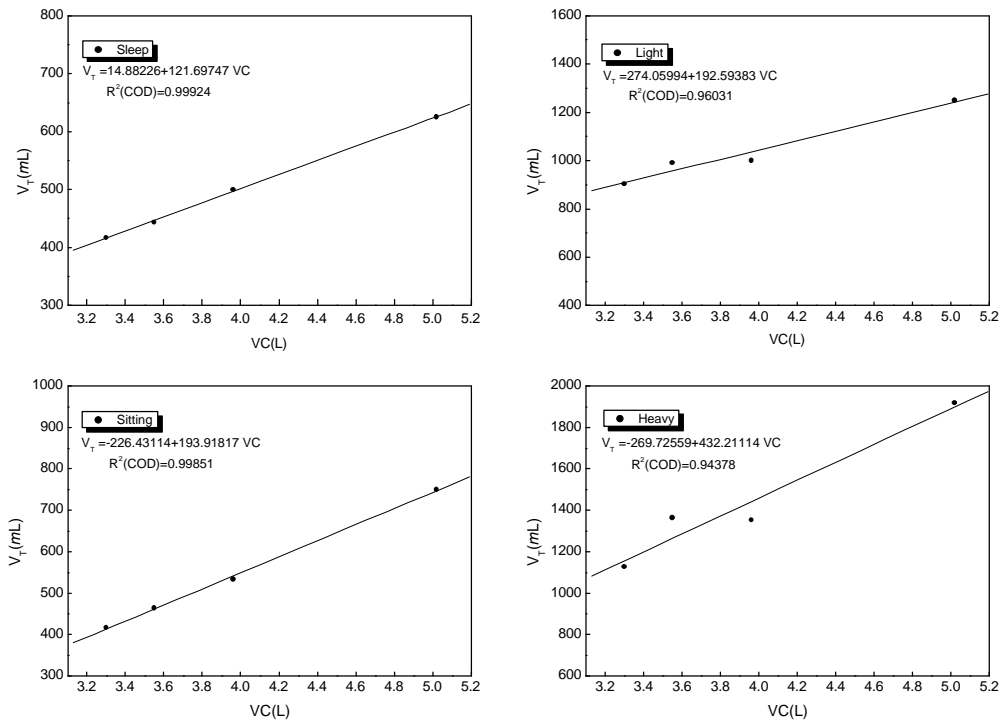


그림 3. 신체활동수준별 폐활량(V_C)과 1회 환기량(V_T)와의 상관관계. • 은 코카서스인의 성인남성, 성인여성, 15세 남성, 15세 여성에 대한 자료임.

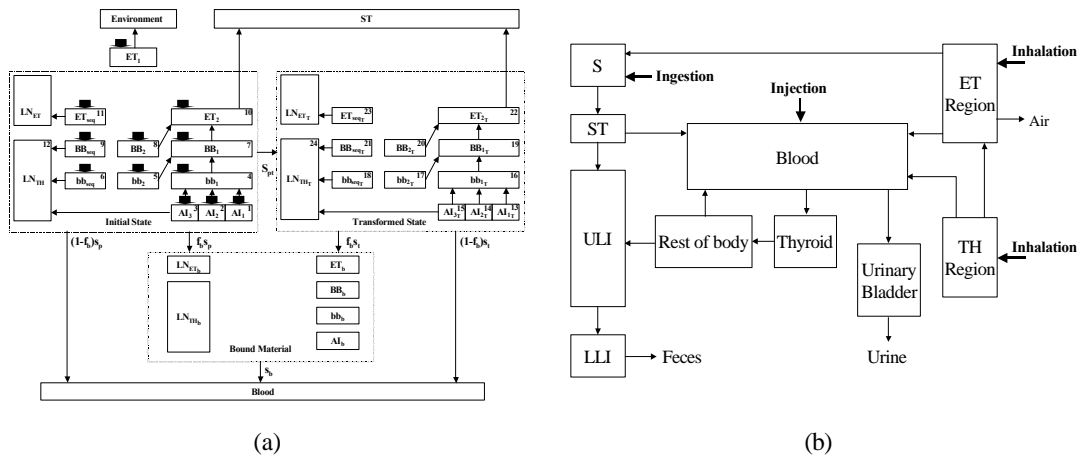


그림 4.a. 호흡기에서 방사성물질의 침착과 제거를 묘사하기 위한 격실모델(굵은 화살표는 흡입입자의 침적격실을 나타낸 것임). b. 방사성 요오드의 생체동역학을 묘사하기 위한 격실모델.

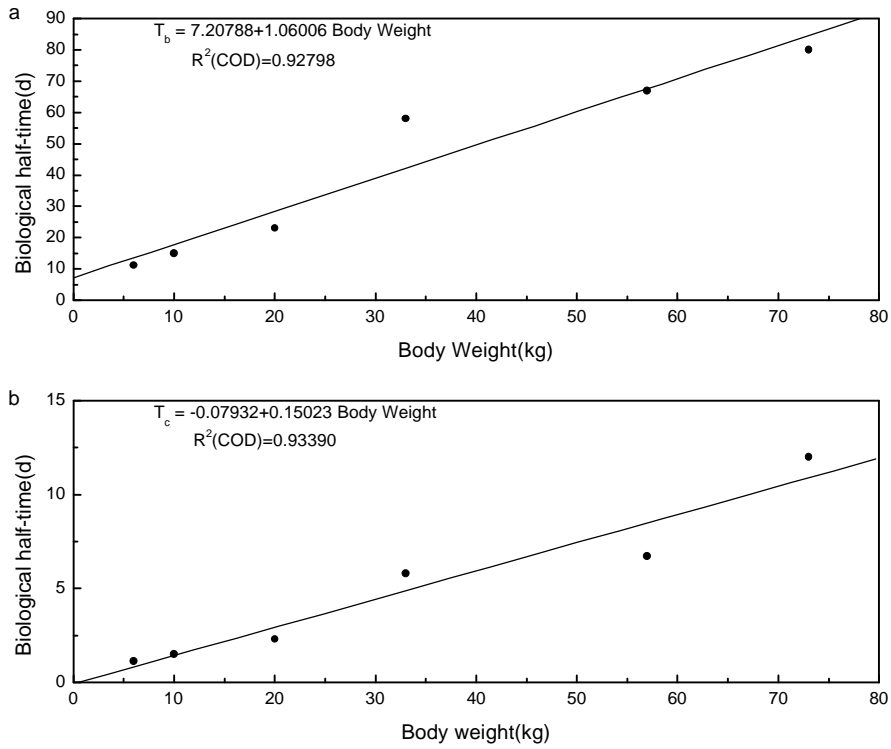


그림 5.a. 몸무게와 갑상선에서의 생물학적 반감기와의 상관관계. b. 몸무게와 연조직에서의 생물학적 반감기와의 상관관계.

나. 선량계수

그림 4에서 주어진 각 격실에서 ¹³¹I의 제거 및 전이는 1차 동역학의 지배를 받는다. 따라서 섭취 후 격실 i에서의 방사능 변화율은 다음 식과 같이 상수계수를 갖는 1차 선형 미분방정식의 형태로 주어진다.

$$\frac{dq_i(t)}{dt} = -\lambda q_i(t) + \sum_{j=1(j \neq i)}^N r_{ji} q_j(t) - \sum_{j=1(j \neq i)}^N r_{ij} q_i(t) \quad i=1, \dots, N \quad (2)$$

여기서 N은 총 격실수이며, q_i(t)와 q_j(t)는 섭취 후 임의의 시간 t에서 각각 격실 i와 격실 j에서의 방사능의 양, r_{ji}는 격실 j로부터 격실 i로의 전이계수, r_{ij}는 격실 i로부터 격실 j로의 전이계수, λ는 방사성붕괴상수를 나타낸다.

1 Bq 섭취로 인해 표적(장기 또는 조직) T가 50년 동안 받는 예탁등가선량 H_T(50)은 다음 식과 같이 주어진다.

$$H_T(50) = \sum_S U_S(50) \text{SEE}(T \leftarrow S) \quad (3)$$

여기서 U_S는 선원장기 S에서 50년 동안의 총 핵변환수(Bq s), SEE(T←S)는 선원장기 S에서 단위 핵변환당 표적 T에서의 예탁등가선량(Sv/Bq s)이다. U_S와 SEE(T←S)는 각각 다음 식과 같이 주어진다.

$$U_S(50) = \int_0^{50y} q_S(t) dt \quad (4)$$

$$\text{SEE}(T \leftarrow S) = \sum_R \frac{Y_R E_R W_R A F(T \leftarrow S)_R}{m_T} \quad (5)$$

식 (4)에서 q_S 는 선원장기에서의 방사능의 양을 나타내며, 이 값은 식 (2)의 해를 뜻한다. 식 (5)에서 Y_R 는 핵변환당 방사선 R의 방출분율($Bq\ s$)⁻¹, E_R 는 방사선 R의 에너지(J), w_R 는 방사선 R의 방사선가중치, $AF(T\leftarrow S)_R$ 는 선원장기 S에서 단위 핵변환으로부터 방출된 방사선 R이 표적 T에 흡수되는 에너지 분율, m_T 는 표적 T의 질량(kg)이다.

1 Bq 섭취로 인한 선량계수 $E(50)$ 은 다음 식과 같이 주어진다.

$$E(50) = \sum_{T=1}^{T=12} w_T H_T(50) + w_{rem} H_{rem}(50) \quad (6)$$

여기서 w_T 는 12개 표적(생식선, 적색골수, 결장, 폐, 위, 방광, 가슴, 간, 식도, 갑상선, 피부, 뼈 표면)에 대한 각각의 조직가중치, $H_T(50)$ 은 12개 표적에 대한 각각의 예탁등가선량을 나타낸다. 12개 표적중에서 결장에 대한 예탁등가선량은 대장상부 및 대장하부에 대한 예탁등가선량을 사용하여 구하며, 식도에 대한 예탁등가선량은 흉선에 대한 예탁등가선량과 동일한 것으로 간주한다. 그리고 폐에 대한 예탁등가선량 H_{lungs} 는 다음 식과 같이 흉부 영역을 구성하고 있는 소 영역에 대한 위해가중 예탁등가선량의 합으로 주어진다.

$$H_{lungs} = H_{BB} \times A_{BB} + H_{bb} \times A_{bb} + H_{AI} \times A_{AI} + H_{LN,TH} \times A_{LN,TH} \quad (7)$$

여기서 H_{BB} , H_{bb} , H_{AI} , $H_{LN,TH}$ 는 각각 BB 영역, bb 영역, AI 영역, 흉부 영역 림프질에 대한 예탁등가선량이며, A_{BB} , A_{bb} , A_{AI} , $A_{LN,TH}$ 는 각각 BB 영역, bb 영역, AI 영역, 흉부 영역 림프질에 대한 위해가중계수이다. 식 (6)에서 w_{rem} 는 앞서 정의한 12개 표적을 제외한 나머지 표적(부신, 뇌, 소장, 콩팥, 근육, 췌장, 비장, 흉선, 자궁, 비흉부 기도)에 대한 조직가중치이다. 그리고 $H_{rem}(50)$ 은 나머지 표적에 대한 예탁등가선량이며, 다음 식과 같이 주어진다.

$$H_{rem}(50) = \frac{\sum_{T=1}^{T=10} m_T H_T}{\sum_{T=1}^{T=10} m_T}, \quad \text{if } H_T \leq H_{max} \quad (8)$$

$$H_{rem}(50) = 0.5 \left[\frac{\sum_{T=1(T \neq T')}^{T=10} m_T H_T}{\sum_{T=1(T \neq T')}^{T=10} m_T} + H_{T'} \right], \quad \text{if } H_{T'} > H_{max} \quad (9)$$

식 (8) ~ 식 (9)에서 H_T 는 나머지 표적 T에 대한 예탁등가선량, m_T 는 나머지 표적 T의 질량, $H_{T'}$ 는 나머지 표적중에서 최고 예탁등가선량, H_{max} 는 12개 표적중에서 최고 예탁등가선량을 나타낸다. 나머지 표적중에서 비흉부 기도에 대한 예탁등가선량 H_{ET} 는 다음 식과 같이 비흉부 영역을 구성하고 있는 소 영역에 대한 위해가중 예탁등가선량의 합으로 주어진다.

$$H_{ET} = H_{ET1} \times A_{ET1} + H_{ET2} \times A_{ET2} + H_{LN,ET} \times A_{LN,ET} \quad (10)$$

여기서 H_{ET1} , H_{ET2} , $H_{LN,ET}$ 는 각각 ET1 영역, ET2 영역, 비흉부 영역 림프질에 대한 예탁등가선량이며, A_{ET1} , A_{ET2} , $A_{LN,TH}$ 는 각각 ET1 영역, ET2 영역, 비흉부 영역 림프질에 대한 위해가중계수이다. 나머지 표적중에서의 최고선량($H_{T'}$)이 12개 표적중에서의 최고선량(H_{max})보다 큰 경우에는 최고선량을 받은 기타 표적 T에 0.025의 가중치를 적용하고, 그 이외의 기타 표적에 대한 평균선량에 0.025의 가중치를 적용한다.

3. 계산결과 및 고찰

한국인 성인남성에 대한 호흡기 형태계량인자와 호흡생리인자의 값은 표 1과 같이 나타났다. 형태계량인자에서 $V_D(ET)$, $V_D(BB)$ 및 $V_D(bb)$ 의 값은 코카서스인 성인남성에 비해 각각 8.5 %, 8.1 % 및 4.7 % 작게 나타났고, SF_b , SF_b 및 SF_A 의 값은 각각 3.4 %, 2.2 % 및 3.5 % 크게 나타났다. 그리고 호흡생리인자에서 FRC의 값은 코카서스인 성인남성에 비해 4.0 % 작게 나타났으며, 또한 수면, 안정, 가벼운 운동 및 심한 운동에 따른 V_T 값에서도 각각 6.7 %, 9.4 %, 6.1 % 및 8.9 % 작게 나타났다. 그러나 f_R 값은 각 신체활동수준에 따라 코카서스인 성인남성에 비해 1회 내지 3회 많은 것으로 나타났다. 그리고 갑상선과 연조직에서의 생물학적 반감기는 각각 77.48 일,

9.88 일로 나타났으며, 이 값은 코카서스인 성인남성에 비해 각각 3.15 %, 17.67 % 짧았다. 갑상선에서 단위 핵변환당 갑상선에서의 비유효에너지는 1.732×10^{-12} Sv 이었으며, 이 값은 코카서스인 성인남성의 값에 비해 5.61 % 크게 나타났다.

한국인 성인남성에 대한 인체특성인자를 사용하여 계산한 ^{131}I 의 흡입선량계수는 표 2와 같이 나타났다. 또한, 비교를 위해 코카서스인 성인남성에 대한 값도 표 2에 주어졌다. 호흡인자만을 고려한 결과는 코카서스인 성인남성의 값보다 입자크기가 0.1, 5, 10 μm 일 때 각각 0.43 %, 0.10 %, 0.29 % 낮게 나타났고, 0.3, 1, 3 μm 일 때 각각 0.78 %, 1.57 %, 0.38 % 높게 나타났다. 또한 호흡인자와 생체동역학적 모델인자를 고려한 결과에서도 입자크기가 0.1, 5, 10 μm 일 때 각각 0.54 %, 0.19 %, 0.40 % 낮게 나타났고, 0.3, 1, 3 μm 일 때 각각 0.69 %, 1.46 %, 0.29 % 높게 나타났다. 그러나 호흡인자, 생체동역학적 모델인자 및 비유효에너지를 모두 고려한 계산결과는 입자크기에 따라 5.01 ~ 7.12 % 모두 높게 나타났다. 이 사실로 비추어 볼 때 ^{131}I 의 흡입 선량계수는 호흡인자 및 생체동역학적 모델인자 보다도 비유효에너지에 따라 크게 좌우됨을 알 수가 있다.

표 1. 한국인 성인남성에 대한 형태계량인자 및 호흡생리인자 값에 대한 계산결과

인자		코카서스인 성인남성	한국인 성인남성	비 ¹
V _D (ET), mL		50	45.8	0.915
V _D (BB), mL		49	45.0	0.919
V _D (bb), mL		47	44.8	0.953
SF _t		1	1.034	1.034
SF _b		1	1.022	1.022
SF _A		1	1.035	1.035
FRC(mL)		3300	3169	0.960
수면	B(m ³ /h) ²	0.45	0.45	1.000
	f _R (min ⁻¹)	12	13	1.071
	V _T (mL)	625	583	0.933
	V(mL/s) ²	250	250	1.000
휴식	B(m ³ /h) ²	0.54	0.54	1.000
	f _R (min ⁻¹)	12	13	1.104
	V _T (mL)	750	679	0.906
	V(mL/s) ²	300	300	1.000
가벼운 운동	B(m ³ /h) ²	1.5	1.5	1.000
	f _R (min ⁻¹)	20	21	1.065
	V _T (mL)	1250	1174	0.939
	V(mL/s) ²	833	833	1.000
심한 운동	B(m ³ /h) ²	3	3	1.000
	f _R (min ⁻¹)	26	29	1.098
	V _T (mL)	1920	1749	0.911
	V(mL/s) ²	1670	1670	1.000

¹비=한국인 성인남성/코카서스인 성인남성

²한국인 성인남성과 코카서스인 성인남성에 대해 동일한 값을 적용함

표 2. 한국인 성인남성과 코카서스인 성인남성에 대한 ¹³¹I 흡입 선량계수 계산결과

입자크기(μm)	코카서스인 성인남성(Sv/Bq)	한국인 성인남성(Sv/Bq)		
		호흡인자	호흡인자 + 생체동역학적 모델인자	호흡인자 + 생체동역학적 모델인자 + SEE
0.1	8.769x10 ⁻⁹	8.731x10 ⁻⁹ (-0.43%)	8.722x10 ⁻⁹ (-0.54%)	9.208x10 ⁻⁹ (+5.01%)
0.3	5.365x10 ⁻⁹	5.407x10 ⁻⁹ (+0.78%)	5.402x10 ⁻⁹ (+0.69%)	5.703x10 ⁻⁹ (+6.30%)
1.0	7.600x10 ⁻⁹	7.719x10 ⁻⁹ (+1.57%)	7.711x10 ⁻⁹ (+1.46%)	8.141x10 ⁻⁹ (+7.12%)
3.0	1.049x10 ⁻⁸	1.053x10 ⁻⁸ (+0.38%)	1.052x10 ⁻⁸ (+0.29%)	1.111x10 ⁻⁸ (+5.91%)
5.0	1.053x10 ⁻⁸	1.052x10 ⁻⁸ (-0.10%)	1.051x10 ⁻⁸ (-0.19%)	1.110x10 ⁻⁸ (+5.41%)
10	9.331x10 ⁻⁹	9.304x10 ⁻⁹ (-0.29%)	9.294x10 ⁻⁹ (-0.40%)	9.812x10 ⁻⁹ (+5.15%)

괄호안의 값은 코카서스인 성인남성에 대한 선량계수 대비임.

4. 결 론

한국인 성인남성에 대한 ¹³¹I의 흡입선량계수를 계산하여, 그 결과를 코카서스인 성인남성에 대한 결과와 비교한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 호흡인자는 흡입 입자의 침착량에 주요한 영향을 주는 인자이나, 흡입선량계수에는 거의 영향을 주지 않았다.
- ② 생체동역학적 모델인자는 섭취후 임의의 시간 t에서 갑상선에서의 방사능의 양에 주요한 영향을 주는 인자이나, 흡입선량계수에는 거의 영향을 주지 않는다.
- ③ 비유효에너지는 선량계산학적 모델에서 갑상선 예탁등가선량에 주요한 영향을 주는 인자이다. 비유효에너지를 고려하여 계산한 흡입선량계수는 코카서스인 성인남성의 값에 비해 5.01 ~ 7.12 % 높게 나타났다. 따라서 비유효에너지는 ¹³¹I에 대한 흡입선량계수에 가장 큰 영향을 주는 인자로 판단된다.

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, Publication No. 68, Elsevier Science, Oxford and New York(1994).
2. International Commission on Radiological Protection, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, Publication No. 66, Elsevier Science, Oxford and New York(1994).
3. 한국표준과학연구원, 산업제품의 표준화 설정을 위한 국민표준체위조사보고서, 471.6-국239, 국립기술품질원(1997).
4. International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2, Ingestion Dose Coefficients, Publication No. 67, Elsevier Science, Oxford and New York(1993).
5. International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 1, Publication No. 56, Elsevier Science, Oxford and New York(1989).
6. SEECAL 2.0 : Program to Calculate Age-Dependent Specific Effective Energies, CCC-620, ORNL(1995).