Journal of Radiation Industry 14(4) : 305~319(2020)

^{60}Co 에어로졸의 내부피폭 선량평가를 위한 ICRP 생체역동학 모델 비교분석

이 상 경[1,*] · 김 정 민[2]

[1]고려대학교 보건과학연구소, [2]고려대학교 보건환경융합과학부

Comparative Analysis of ICRP Bio-kinetic Models for Internal Dosimetry of ^{60}Co Aerosol

Sang-Kyung Lee[1,*] and Jung-Min Kim[2]

[1]*Health Science Research Center, Korea University, Hana Science Hall B, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea*

[2]*School of Health and Environmental Science, Korea University, Hana Science Hall B, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea*

Abstract - Radioactive aerosols generated during the decommissioning or decontamination in nuclear power plants can be deposited in the body due to workers' inhalation, and become a major contribution in the internal exposure. Therefore, the internal dosimetry is an important procedure for probably preventing the over-exposure of workers. The bio-kinetic models recommended by the ICRP are applied to calculate the committed effective dose and bio-assay functions of workers, and used in codes for the internal dosimetry. Organs in the body can be represented as a series of mathematical compartments according to the bio-kinetic models (the respiratory tract model, alimentary tract model and systemic model). Recently, the ICRP has issued publications on the new bio-kinetic models. In this study, we investigated the differences between the previous bio-kinetic models and the revised bio-kinetic models of ^{60}Co, which is one of radioactive aerosols and an important activation product generated during the operation of nuclear power plants. Comparative analysse of the retention fraction and daily excreta fraction of inhaled ^{60}Co aerosol have shown that the difference between two bio-kinetic models is clear, so the revised bio-kinetic models must be used in the internal exposure calculation codes.

Key words : ^{60}Co, Bio-kinetic model, Respiratory tract model, Alimentary tract model, Internal exposure

서 론

원자력발전소 운영 및 해체과정에서 작업자에 대한 피폭선량평가의 주된 관심 사항은 hot spot[1)] 또는 방사화에 의한 노심계통에서의 외부피폭 중심이었고, 내부피폭은 작업자의 피폭선량 증가에 주요 요인이 아니었다. 그러나 금속절단 등의 작업이 특히 중요시되는 원자력발전소 해체 실무에서는 방사성 에어로졸의 발생으로 인해 작업자의 흡입

* Corresponding author: Sang-Kyung Lee, Tel. +82-2-3290-5685, Fax. +82-2-916-5943, E-mail. sk_lee@korea.ac.kr

[1)]고선량 지점, 연간 20 mSv 이상의 방사능 오염지역

(inhalation)에 의한 내부피폭 문제가 있으므로 해체 작업자들의 내부피폭 선량평가를 수행할 필요가 있다. 내부피폭 선량평가를 위해서는 체내에 흡수된 방사성핵종의 거동 예측이 필요하고, 이를 위한 전산모사에는 생체역동학 모델이 사용된다. 생체역동학 모델은 인체를 일련의 수학적 격실(compartment)로 분리하고 이들 격실 간에 방사성핵종의 교환이 일어난다고 가정하여 체내 거동을 모사하는 방법이다. 국제방사선방호위원회(ICRP, International Commission on Radiological Protection)는 핵종별로 개발된 생체역동학 모델(Bio-kinetic model)을 간행물 형태로 발간하고 있으며, 새로운 연구결과를 바탕으로 최신의 개선된 모델을 제공하고 있다.

방사성핵종의 흡입에 따른 인체 전체의 거동을 모사하기 위한 ICRP 생체역동학 모델은 호흡기 모델(HRTM, Human Respiratory Tract Model), 전신생리 모델(systemic model), 소화기 모델(HATM, Human Alimentary Tract Model)의 조합으로 격실 시스템을 구성한다. 현재 IMBA (HPA 2005) 또는 BiDAS (Lee *et al*. 2004)와 같이 내부피폭 선량평가를 위해 사용되는 전산프로그램들은 최신의 ICRP 생체역동학 모델이 적용되지 않았다. 호흡기 모델은 ICRP 간행물 66 (ICRP 1994), 소화기 모델은 ICRP 간행물 30 (ICRP 1979), 전신생리 모델은 핵종에 따라 ICRP 간행물 30, 56 (ICRP 1990), 67 (ICRP 1993), 69 (ICRP 1995), 78 (ICRP 1997)에서 제시한 자료를 사용하고 있다. 그러나 최근 ICRP에서 OIR (Occupational Intakes of Radionuclides) 간행물들을 발간하면서 새로운 생체역동학 모델을 권고하였다. 호흡기 모델은 ICRP 간행물 130 (ICRP 2015), 소화기 모델은 ICRP 간행물 100 (ICRP 2006), 전신생리 모델은 핵종에 따라 ICRP 간행물 134 (ICRP 2016), 137 (ICRP 2017), 141 (ICRP 2019a)에 제시된 자료를 사용하였다.

개선된 모델들의 주요 특징을 살펴보면, 소화기 모델은 기존의 단순한 모델에 비해 정교하게 변경되었다. ICRP 간행물 30에서는 위부터 모델을 구성하였으나 새로운 모델에서는 구강 및 식도가 포함되었고, 대장을 상부와 하부 2개 영역으로 구분한 것을 3개 영역(우측 결장, 좌측 결장, 직장 S상 결장)으로 구분하였다. 호흡기 모델은 흡입 후 입자의 침착분율과 입자수송에 따른 제거 변수가 일부 수정되었다. 또한, 호흡을 통해 들어온 핵종이 용해 후 흡수되는 과정을 물질의 상태관점에서 용해되는 속도에 따른 관점으로 호흡기 모델에 반영하였다. ICRP 간행물 130에서 용해속도 관점의 모델로 변경한 이유로 간편하고 직관적이며 흔히 사용한다는 점을 제시하였으나, 물질상태 관점의 모델을 적용하여도 계산 결과의 차이는 없다. 전신생리 모델은 기본적으로 기존 모델을 유지하지만, 핵종에 따라 관심이 있는 특정 장기와 배설경로를 구체화한 격실을 추가로 적용하였다.

Table 1. Set of programs to assess the effect of change of ICRP bio-kinetic models

	Systemic model	HATM	HRTM
Program A (Previous model)	ICRP 67	ICRP 30	ICRP 66
Program B (Revised model)	ICRP 134	ICRP 100	ICRP 130

본 논문에서는 원자력발전소 해체과정에서 작업자의 내부피폭이 우려되는 주요 방사성핵종들(^{3}H, ^{14}C, ^{54}Mn, ^{55}Fe, ^{59}Ni, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{65}Zn, ^{90}Sr, ^{93}Mo, ^{94}Nb, ^{99}Tc, ^{137}Cs) 중에 ^{60}Co를 선택하여 ICRP 생체역동학 모델들을 서로 비교 평가하였다(Chae *et al*. 2019; Christophe *et al*. 2019). 원전 주요 기기들의 방사화에 의해 생성되는 ^{60}Co는 발전소 전체의 해체과정에서 상당량이 방출되고 붕괴과정에서 고에너지의 감마선을 방출하므로 작업자에게 위험한 핵종이다(U.S. NRC 1982; Herman *et al*. 2005). 비교평가를 위해서 ^{60}Co를 대상으로 전신생리 모델, 소화기 모델, 호흡기 모델을 Table 1과 같이 조합한 생체역동학 모델을 각각 구성하여 프로그래밍한 후, 기존 모델과 개선 모델에서의 흡입에 의한 잔류·배설 방사능 계산 결과를 산출하였다. 비교평가를 위한 전산모사 조건은 ^{60}Co의 흡수형태가 M (moderate)과 S (slow)일 때 참고작업자(reference worker)의 직업상 피폭에 적용하는 입자크기인 5 μm (ICRP 1994)에 대해 단일 급성흡입으로 가정하였다.

재료 및 방법

방사성핵종에 의한 내부피폭 선량평가에서 섭취량 또는 예탁유효선량으로 측정결과를 해석하기 위해서는 인체 내에서의 방사성핵종에 대한 생체역동학적 모델 및 거동분석이 필요하다. Fig. 1은 방사성핵종의 섭취경로, 인체 내에서의 전이 및 배설경로를 나타낸 것이다. 호흡기, 소화기, 피부 및 상처를 통해 인체 내부로 유입된 방사성핵종은 체액흡수, 전이, 순환과 붕괴 등이 이뤄진다. ICRP 간행물에서는 방사성핵종의 특성에 따라 1차 생체대사에 기반한 세부 모델의 격실 구성 및 자료를 제시하고 있다.

1. 호흡기 모델(HRTM)

ICRP 호흡기 모델은 호흡을 통해 들어온 입자의 침착과 제거과정을 반영한다. 침착 입자의 제거는 입자수송과 혈액으로의 흡수에 의해 이뤄진다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 ICRP 간행물 66에서 호흡기의 해부학적 영역을 비흉부 영역

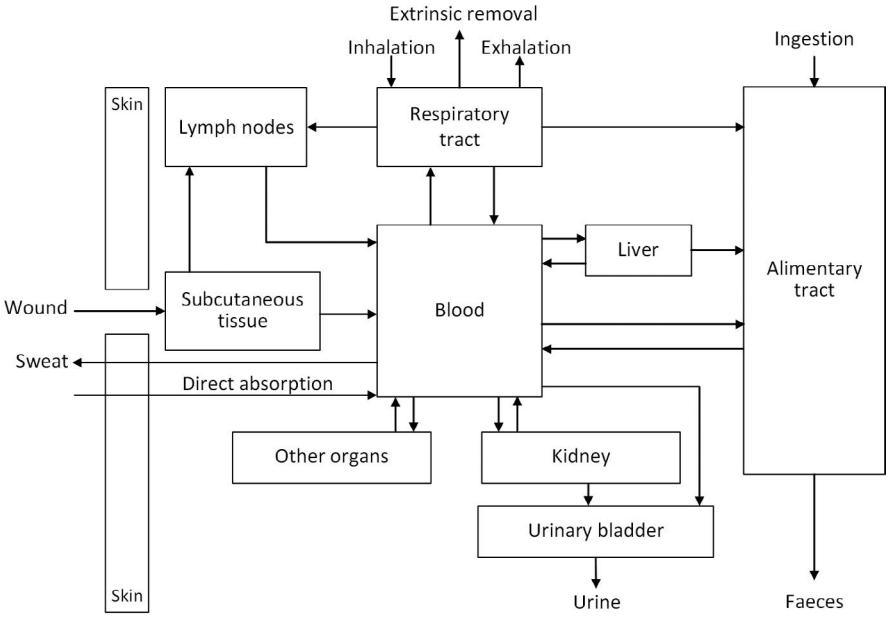

Fig. 1. Summary of the main routes of intake, transfer, and excretion of radionuclides in the body.

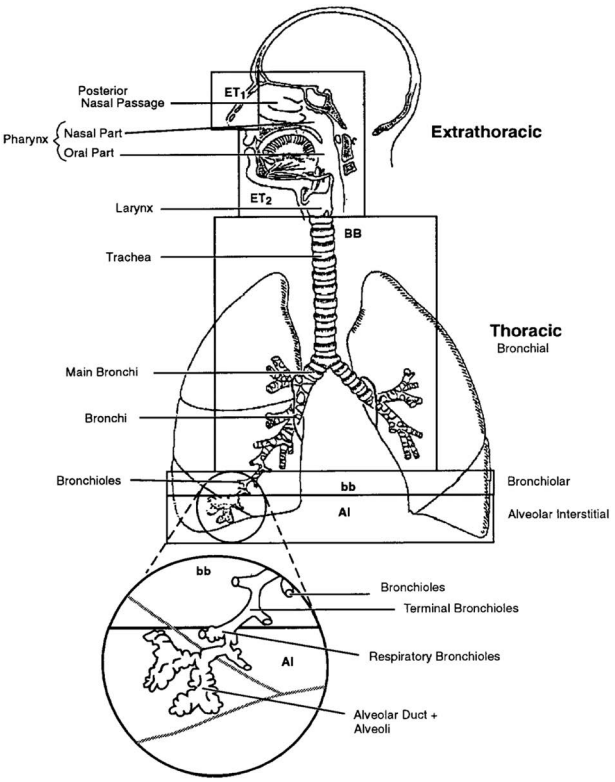

Fig. 2. Respiratory tract regions defined in the Human Respiratory Tract Model. This image is taken from the ICRP publication 66.

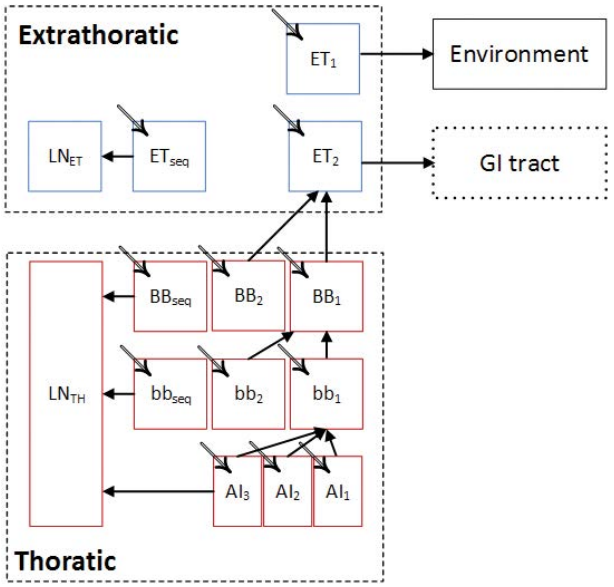

Fig. 3. The previous compartment model representing time-dependent particle transport form each respiratory tract region in the ICRP publication 66.

(ET)과 흉부 영역(TH)으로 구분하였고, 흉부 영역은 BB, bb, AI 영역으로 세분하였다. ET 영역과 TH 영역에는 각각의 림프절(LN_{ET}, LN_{TH})이 포함되어 있다. ICRP 간행물 66의 기존 호흡기에 대한 격실 모델은 Fig. 3에 나타냈고, ICRP 간행물 130의 개선 모델은 Fig. 4에 나타냈다. 개선 모델에서는 BB, bb 영역에서 느린 생체대사가 반영되는 격실을 통합하였고, 3개의 격실로 구성된 AI 영역을 Kuempel 등(Kuempel *et al*. 2001)이 개발한 모델로 대체하였다. 호흡을 통해 들어온 입자의 영역별 침착분율은 입자의 크기에 따라 침착 모델을

Table 2. Fraction of deposit in each region of the human respiratory tract model. The slow-cleared fractions (f_s) in BB and bb are 0.33341 and 0.39748

Region	Previous HRTM (ICRP 66)		Revised HRTM (ICRP 130)	
	Compartment	% of inhaled activity	Compartment	% of inhaled activity
ET_1	ET_1	33.85	ET_1	47.95
ET_2	ET_2 ET_{seq}	39.91×0.9995 39.91×0.0005	ET'_2 ET_{seq}	25.82×0.998 25.82×0.002
BB	BB_1 BB_2 BB_{seq}	$1.78 \times (0.993\text{-}f_s)$ $1.78 \times f_s$ 1.78×0.007	BB' BB_{seq}	1.777×0.998 1.777×0.002
bb	bb_1 bb_2 bb_{seq}	$1.10 \times (0.993\text{-}f_s)$ $1.10 \times f_s$ 1.10×0.007	bb' bb_{seq}	1.103×0.998 1.103×0.002
AI	AI_1 AI_2 AI_3	5.32×0.3 5.32×0.6 5.32×0.1	ALV	5.319
Total		81.96		81.97

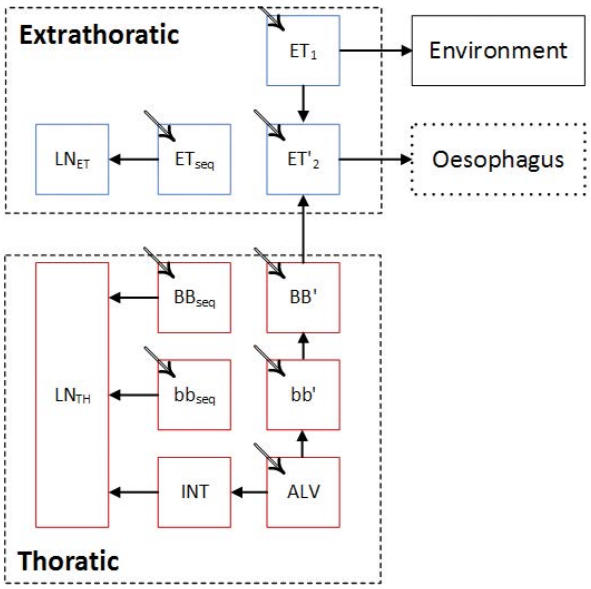

Fig. 4. The revised compartment model representing time-dependent particle transport form each respiratory tract region in the ICRP publication 130.

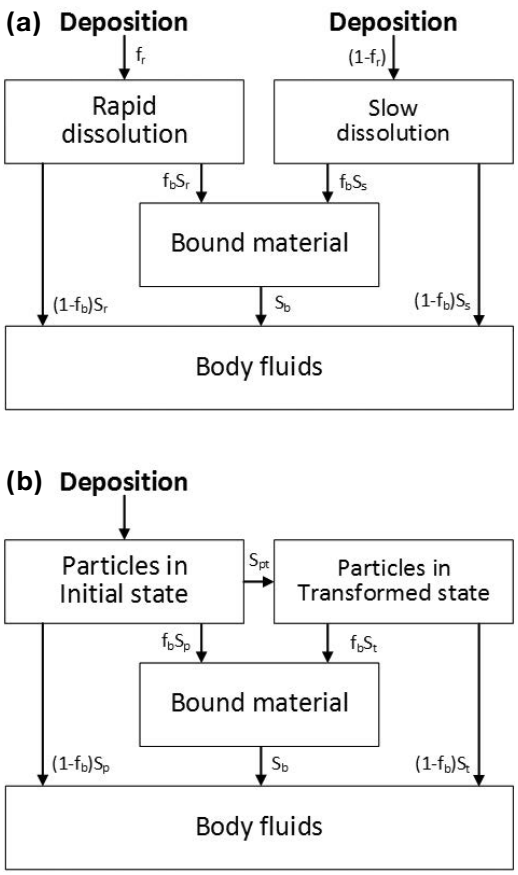

Fig. 5. Simple compartment models for time-dependent dissolution and uptake.

통해 계산되고, 본 논문에서 생체역동학 모델 계산을 위해 적용할 값은 Table 2에 정리하였다. 혈액흡수에 의한 입자의 제거과정은 물질의 상태에 따른 관점이나 용해되는 속도에 따른 관점으로 호흡기 모델에 반영한다. 기존 모델에서는 Fig. 5(a)와 같이 물질의 상태에 따른 관점을 적용하였고, 개선 모델에서는 Fig. 5(b)와 같이 용해되는 속도에 따른 관점

Table 3. Clearance rates for the compartment model of the human respiratory tract

Previous HRTM (ICRP 66)			Revised HRTM (ICRP 130)		
From	To	Rate (d^{-1})	From	To	Rate (d^{-1})
AI_1	bb_1	0.02	ALV	bb’	0.002
AI_2	bb_1	0.001	ALV	INT	0.001
AI_3	bb_1	0.0001	INT	LN_{TH}	0.00003
AI_3	LN_{TH}	0.00002			
bb_1	BB_1	2	bb’	BB’	0.2
bb_2	BB_1	0.03	bb_{seq}	LN_{TH}	0.001
bb_{seq}	LN_{TH}	0.01			
BB_1	ET_2	10	BB’	ET'_2	10
BB_2	ET_2	0.03	BB_{seq}	LN_{TH}	0.001
BB_{seq}	LN_{TH}	0.01			
ET_2	GI tract	100	ET'_2	Oesophagus	100
ET_{seq}	LN_{ET}	0.001	ET_{seq}	LN_{ET}	0.001
ET_1	Environment	1	ET_1	Environment	0.6
			ET_1	ET'_2	1.5

Table 4. Absorption parameter values for inhaled cobalt

Model parameters		Previous HRTM (ICRP 66)			Revised HRTM (ICRP 130)		
		F	M	S	F	M	S
Initial dissolution rate (d^{-1})	s_p	100	10	0.1	–	–	–
Transformation rate (d^{-1})	s_{pt}	0	90	100	–	–	–
Final dissolution rate (d^{-1})	s_t	–	0.005	0.0001	–	–	–
Fraction dissolved rapidly	f_r	1	0.1	0.001	1	0.2	0.01
Approximate dissolution rates							
Rapid (d^{-1})	s_r	100	100	100	1	1	1
Slow (d^{-1})	s_s	–	0.005	0.0001	–	0.005	0.0001
Fraction to bound state	f_b	0	0	0	0.03	0.03	0.03
Uptake rate from bound state (d^{-1})	s_b	–	–	–	0.002	0.002	0.002

을 호흡기 모델에 적용하였다. 또한, 기존 모델에서는 입자의 결합물질[2] (bound material) 상태를 반영하지 않았으나, 개선 모델에서는 이를 반영했다. 기존 모델과 개선 모델에서 격실 간의 전이율(transfer rate)은 Table 3에 정리하였고, 혈액으로의 흡수과정에 적용되는 인자들은 Table 4에 정리하였다. 호흡기 모델에서 침착분율과 격실 간 전이율은 방사성핵종에 따른 차이가 없으나, 흡수 인자는 방사성핵종의 물리화학적 특성이 반영되므로 ^{60}Co에 해당하는 값으로 정리하였다.

Table 5. Transfer coefficients (d^{-1}) for the movement of alimentary tract contents of the previous model (ICRP publication 30)

From	To	Transfer coefficient
Stomach	Small intestine	24
Small intestine	Blood	(calculation)
Small intestine	Upper large intestine	6
Upper large intestine	Lower large intestine	1.8
Lower large intestine	Faeces	1

2. 소화기 모델(HATM)

ICRP 간행물 30의 소화기 모델은 Fig. 6과 같이 소화기를 4개의 구획(위, 소장, 대장 상부, 대장 하부)으로 나누고 각 구획을 하나의 격실로 구성하였다. 각 격실에서의 전이계수(transfer coefficient)는 Table 5에 정리하였다. 전신생리 모델에서 소화기 모델로의 전이는 Liver와 Other tissue 격실에서 이뤄진다. 소화기 모델의 소장으로부터 전신생리 모델

[2]호흡기 모델의 결합물질은 호흡기 조직에서 화학적 결합이 이루어진 물질을 의미하는 것이 아니고, 호흡기에서 혈액으로 느린 제거가 이루어지는 것을 반영하기 위해 만들어진 것임.

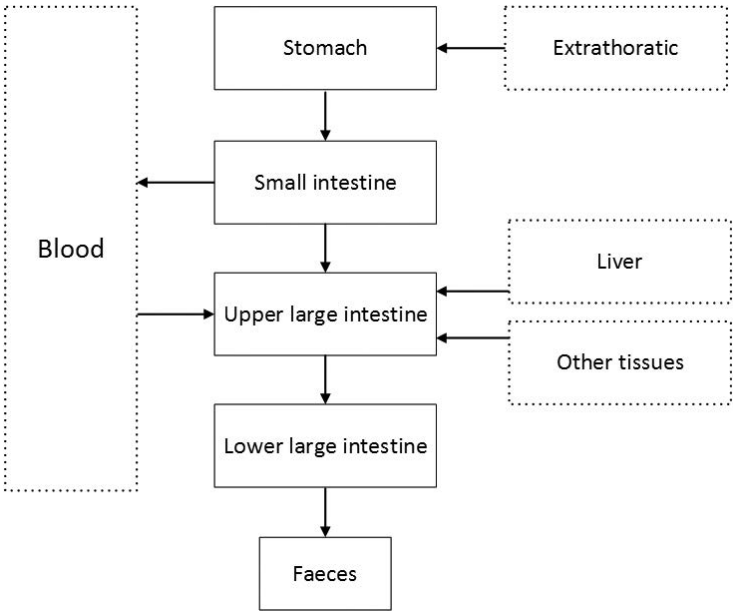

Fig. 6. Structure of the previous human alimentary tract model (HATM) of the ICRP publication 30.

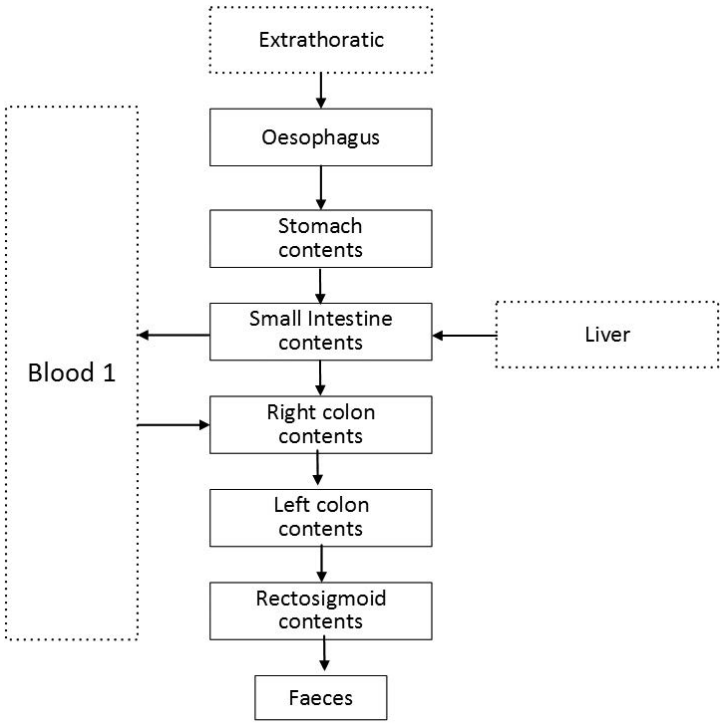

Fig. 7. Structure of the revised human alimentary tract model (HATM) of the ICRP publication 100. Fig. 6. Structure of the previous human alimentary tract model (HATM) of the ICRP publication 30.

의 혈액으로 전이되는 계수($\lambda_{SI \rightarrow BL}$)는 식 (1)로 계산된다. $\lambda_{SI \rightarrow ULI}$은 소장에서 대장 상부로의 전이계수이고, f는 혈액에 도달하는 분율이다. f는 핵종별 흡수형태마다 다른 값을 가지고 있으며, ^{60}Co의 f 값은 흡입에 대해 흡수형태가 M과 S일 때 각각 0.1과 0.05를 적용한다.

$$\lambda_{SI \rightarrow BL} = \frac{f}{1-f} \times \lambda_{SI \rightarrow ULI} \quad (1)$$

Fig. 7은 ICRP 간행물 100의 개선 모델에서 ^{60}Co의 흡입에 의한 입자수송을 반영하는 소화기 모델의 격실 구성을 나타낸

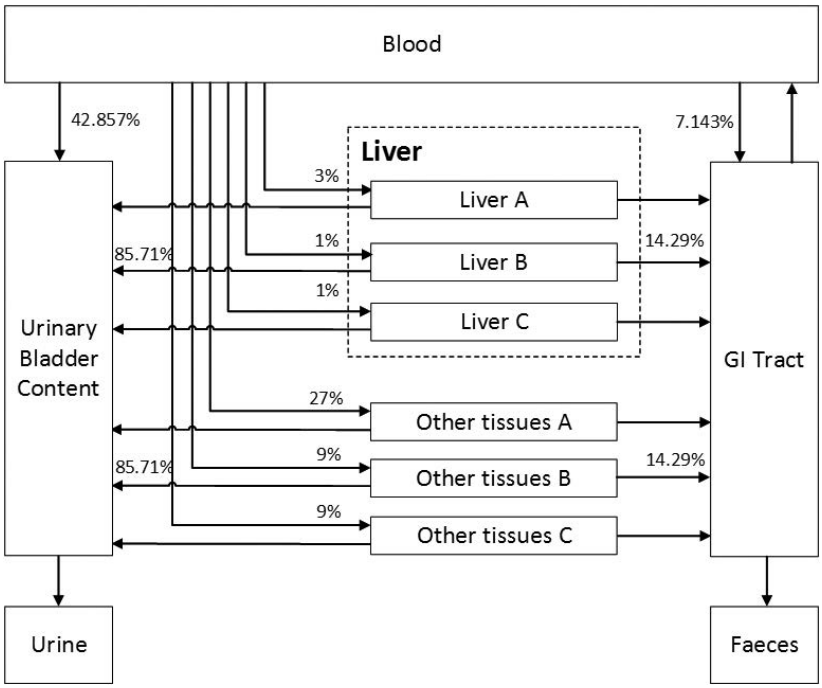

Fig. 8. Structure of the previous systemic model for cobalt in the ICRP publication 67.

Table 6. Transfer coefficients (d^{-1}) for the movement of alimentary tract contents of the revised model (ICRP publication 100)

From	To	Transfer coefficient
Oesophagus slow	Stomach contents	2160
Stomach contents	Small intestine contents	20.57
Small intestine contents	Blood 1	(calculation)
Small intestine contents	Right colon contents	6
Right colon contents	Left colon contents	2
Left colon contents	Rectosigmoid contents	2
Rectosigmoid contents	Faeces	2

Table 7. Transfer coefficients (d^{-1}) for systemic cobalt of the previous model (ICRP publication 67)

From	To	Transfer coefficient
Blood	Liver A	0.0416
Blood	Liver B	0.0139
Blood	Liver C	0.0139
Blood	Other tissues A	0.3743
Blood	Other tissues B	0.1248
Blood	Other tissues C	0.1248
Blood	UBC	0.5941
Blood	ULI	0.0990
Liver A	UBC	0.0990
Liver A	ULI	0.0165
Liver B	UBC	0.0099
Liver B	ULI	0.00165
Liver C	UBC	0.000743
Liver C	ULI	0.000124
Other tissues A	UBC	0.0990
Other tissues A	ULI	0.0165
Other tissues B	UBC	0.0099
Other tissues B	ULI	0.00165
Other tissues C	UBC	0.000743
Other tissues C	ULI	0.000124
UBC	Urine	12

것이다. 기존 모델과는 다르게 식도가 포함되어 있고, 대장영역도 3개 영역(우측 결장, 좌측 결장, 직장S상 결장)으로 구분하고 있다. 기존 모델과 동일하게 소화기 모델의 소장에서 전신생리 모델의 혈액으로 전이가 이뤄지고, 이때의 전이계수는 식 (1)에 소장에서 우측 결장으로의 전이계수와 새로운 ^{60}Co의 혈액에 도달하는 분율(흡수형태가 M과 S일 때 각각 0.02와 0.001)을 적용하여 계산한다. 전신생리 모델에서 소화기 모델로의 전이는 혈액과 간에서 우측 결장과 소장으로 이뤄진다. 개선 모델의 격실 간 전이계수는 Table 6에 정리하였다.

3. 전신생리 모델(Systemic Model)

호흡기와 소화기를 통해 혈액으로 흡수된 방사성핵종은 그 특성에 따라 혈액으로부터 장기 또는 조직으로, 장기 또는 조직에서 혈액으로 전이되며 체외로 배설된다. ^{60}Co에 대한 기존의 전신생리 모델은 ICRP 간행물 67에 제시되어 있고, 이를 격실로 구성한 모델을 Fig. 8에 나타냈다. Blood 격실에서 Liver, Other tissues 격실로는 각각 5%와 45%가 이동하고, 배설되는 소변과 대변으로 배설되는 방사성핵종의 비는 6대 1이

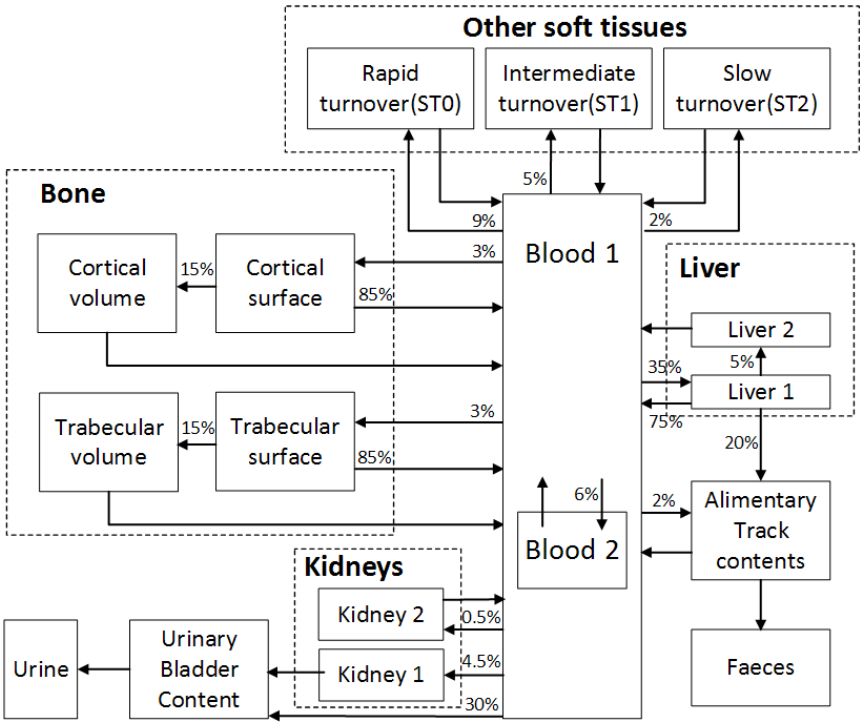

Fig. 9. Structure of the revised systemic model for cobalt in the ICRP publication 134.

다. 또한, Urinary Bladder 격실에서 소변으로 배설되는 반감기는 1.4 h이고, 이 반감기를 사용해서 전이계수는 12 d^{-1}를 유도할 수 있다. 각 격실에서의 전이계수는 Table 7에 정리하였다.

ICRP 간행물 134는 ^{60}Co에 대한 개선된 전신생리 모델로서 Leggett (Leggett 2008)의 모델을 적용하였다(Fig. 9). 혈액, 간, 신장은 각각 2개의 격실로 구성하였고 Other tissues는 전환되는 속도에 따라 3개의 격실로 구성하였다. 개선 모델에서는 뼈로의 흡수가 반영되었으며, 뼈에서 혈액으로의 이동하는 비율은 ICRP 간행물 89 (ICRP 2002)의 기준값이 사용되었다. 소변으로 배설되는 전이계수는 기존 모델과 동일하고, 각 격실에서의 전이계수는 Table 8에 정리하였다.

4. 잔류·배설 방사능 계산

흡입된 ^{60}Co에 의한 각 격실 i에서의 방사능 변화율은 격실 간 전이과정이 1차 생체대사에 따른다는 조건으로 다음과 같은 연립 1차 미분방정식의 형태로 전체 격실 시스템에 대한 지배방정식을 구성한 후 수치해석으로 해를 구하였다.

$$\frac{dA_i(t)}{dt} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{M} A_k(t)\lambda_{k,i} - A_i(t)\left[\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{M} \lambda_{i,k} + \lambda^p\right] \quad (2)$$

여기서 M은 호흡기 모델, 소화기 모델, 전신생리 모델을 조합시켜 구성한 격실 시스템에서의 총 격실 수, $A_i(t)$와 $A_k(t)$는 시

Table 8. Transfer coefficients (d^{-1}) for systemic cobalt of the revised model (ICRP publication 134)

From	To	Transfer coefficient
Blood 1	Liver 1	70
Blood 1	UBC	60
Blood 1	Right colon contents	4.0
Blood 1	ST0	18
Blood 1	ST1	10
Blood 1	ST2	4.0
Blood 1	Cortical bone surface	6.0
Blood 1	Trabecular bone surface	6.0
Blood 1	Kidneys 1	9.0
Blood 1	Kidneys 2	1.0
Blood 1	Blood 2	12
Blood 2	Blood 1	0.693
Liver 1	Small Intestine contents	0.0924
Liver 1	Blood 1	0.347
Liver 1	Liver 2	0.0231
Liver 2	Blood 1	0.0019
ST0	Blood 1	0.099
ST1	Blood 1	0.0139
ST2	Blood 1	0.00095
Cortical bone surface	Blood 1	0.0842
Cortical bone surface	Cortical bone volume	0.0149
Trabecular bone surface	Blood 1	0.0842
Trabecular bone surface	Trabecular bone volume	0.0149
Cortical bone volume	Blood 1	0.0000821
Trabecular bone volume	Blood 1	0.000493
Kidneys 1	UBC	0.462
Kidneys 2	Blood 1	0.0019
UBC	Urine	12

간 t에서의 격실 i와 격실 k에 존재하는 방사능, $\lambda_{k,i}$는 격실 k에서 격실 i로의 전이계수, $\lambda_{i,k}$는 격실 i에서 격실 k로의 전이계수를 나타낸다. 식 (2)의 해를 구하고, 흡입된 방사능(I)을 안다면, 각 격실에서의 잔류방사능은 식 (3), 대변과 소변으로 배설되는 방사능은 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$m_i(t) = \frac{A_i(t)}{I} \quad (3)$$

$$m_i(t) = \frac{A_i(t) - A_i(t-\Delta t)e^{-\lambda^p \Delta t}}{I} \quad (4)$$

결 과

^{60}Co에 대해 기존의 ICRP 생체역동학 모델과 개선된 모델을 적용한 프로그램 A와 B를 Matlab으로 각각 구현하였다. 만들어진 프로그램들의 검증을 위해 입자크기 5 μm, 단일 급성흡입, 흡수형태 M과 S의 조건으로 1 Bq의 ^{60}Co를 흡입한 경우의 전신에 대한 잔류방사능 변화를 타 자료와 비교하였다. 기존 모델을 적용하고 있는 IMBA 코드의 설명서(HPA 2005)에 있는 값과 프로그램 A의 계산 결과를 비교하였고, 개선 모델을 적용한 OIR (Occupational Intakes of Radionuclides) 데이터베이스(ICRP 2019b) 값과 프로그램 B의 계산 결과를 비교하여 Table 9에 정리하였다. Table 9에서 확인할 수 있듯이 프로그램 A와 B는 각각 비교된 자료들과 반올림 오차(round-off error)에 의한 차이만 있으므로, 프로그램 A와 B는 기존 모델과 개선 모델을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

앞서 검증한 프로그램 A와 B를 사용해 ^{60}Co의 전신, 폐, 간에서의 잔류방사능과 소변과 대변으로의 배설 방사능을 계산하였다. Figs. 10부터 12는 흡수형태 M에 대해 전신, 폐, 간에서의 시간에 따른 잔류방사능, Figs. 13과 14는 1일 간격으

Table 9. Comparison of whole body retention predicted by developed programs and different data sets for single intake of ^{60}Co by acute inhalation

Time (d)	Type M			
	IMBA	Program A	OIR Database	Program B
1	4.851×10^{-01}	4.851×10^{-01}	6.1×10^{-01}	6.087×10^{-01}
2	2.569×10^{-01}	2.569×10^{-01}	3.3×10^{-01}	3.283×10^{-01}
5	9.071×10^{-02}	9.071×10^{-02}	6.5×10^{-02}	6.457×10^{-02}
10	7.195×10^{-02}	7.196×10^{-02}	5.2×10^{-02}	5.159×10^{-02}
20	6.009×10^{-02}	6.011×10^{-02}	4.6×10^{-02}	4.566×10^{-02}
50	4.365×10^{-02}	4.366×10^{-02}	3.7×10^{-02}	3.706×10^{-02}
100	3.085×10^{-02}	3.086×10^{-02}	2.8×10^{-02}	2.765×10^{-02}
200	1.892×10^{-02}	1.892×10^{-02}	1.6×10^{-02}	1.639×10^{-02}
500	7.446×10^{-03}	7.447×10^{-03}	5.5×10^{-03}	5.461×10^{-03}
1000	3.263×10^{-03}	3.263×10^{-03}	2.2×10^{-03}	2.154×10^{-03}
2000	9.360×10^{-04}	9.354×10^{-04}	7.1×10^{-04}	6.960×10^{-04}
Time (d)	Type S			
	IMBA	Program A	OIR Database	Program B
1	4.898×10^{-01}	4.898×10^{-01}	6.1×10^{-01}	6.138×10^{-01}
2	2.528×10^{-01}	2.528×10^{-01}	3.3×10^{-01}	3.309×10^{-01}
5	8.007×10^{-02}	8.008×10^{-02}	6.5×10^{-02}	6.532×10^{-02}
10	6.531×10^{-02}	6.531×10^{-02}	5.5×10^{-02}	5.515×10^{-02}
20	5.837×10^{-02}	5.838×10^{-02}	5.2×10^{-02}	5.202×10^{-02}
50	4.709×10^{-02}	4.710×10^{-02}	4.8×10^{-02}	4.814×10^{-02}
100	3.850×10^{-02}	3.851×10^{-02}	4.3×10^{-02}	4.293×10^{-02}
200	3.141×10^{-02}	3.141×10^{-02}	3.5×10^{-02}	3.473×10^{-02}
500	2.114×10^{-02}	2.115×10^{-02}	2.1×10^{-02}	2.100×10^{-02}
1000	1.154×10^{-02}	1.154×10^{-02}	1.3×10^{-02}	1.276×10^{-02}
2000	3.911×10^{-03}	3.911×10^{-03}	7.4×10^{-03}	7.374×10^{-03}

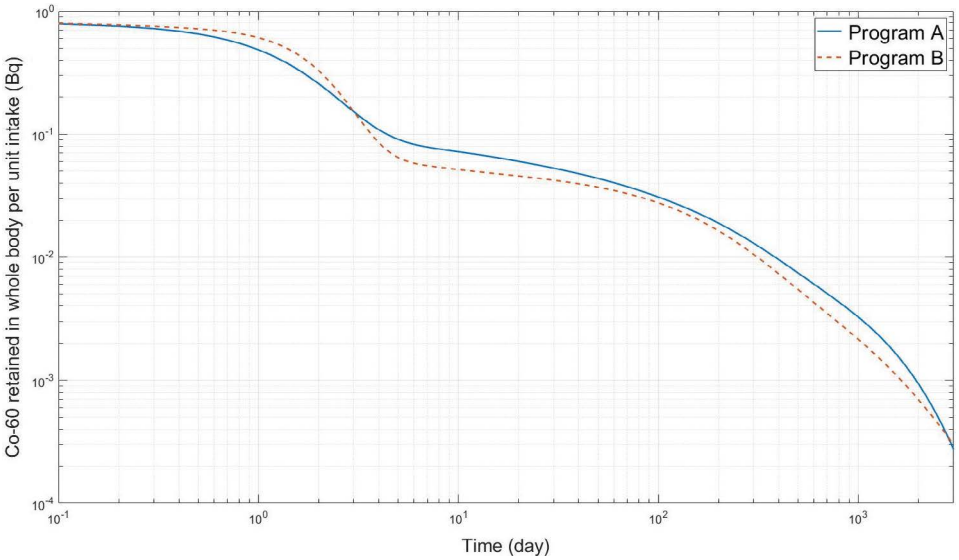

Fig. 10. Retained activity of ^{60}Co in the whole body following unit acute inhalation (Type M).

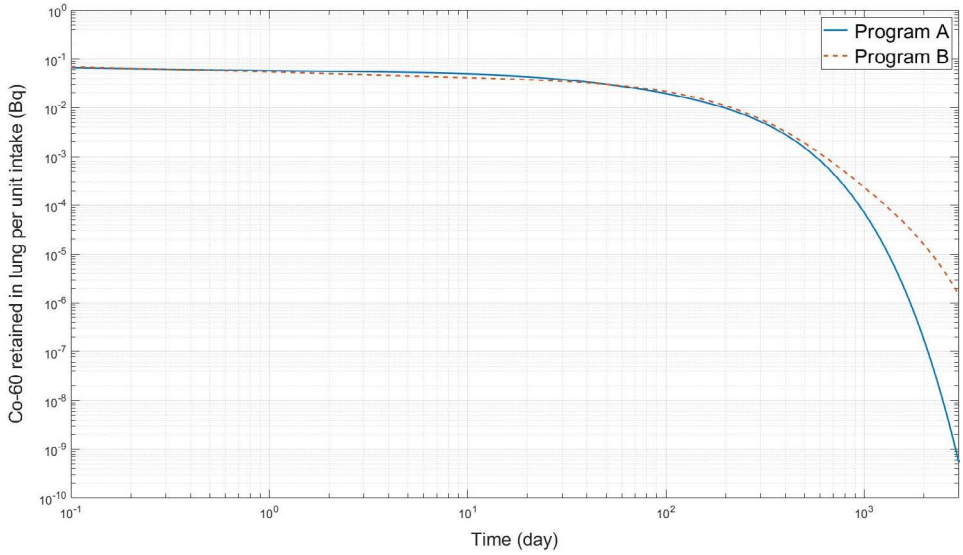

Fig. 11. Retained activity of ^{60}Co in the lung following unit acute inhalation (Type M).

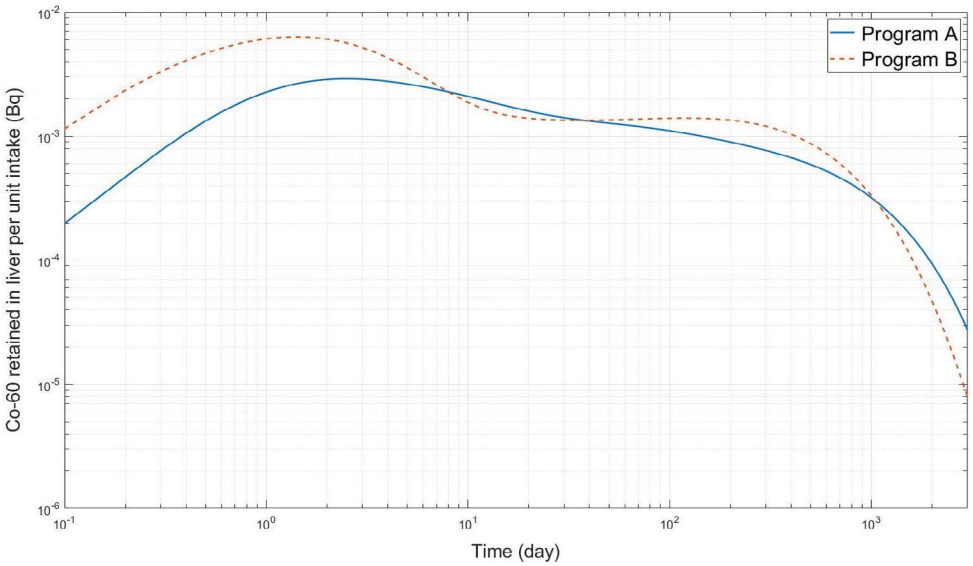

Fig. 12. Retained activity of ^{60}Co in the liver following unit acute inhalation (Type M).

로 배설한 소변과 대변의 방사능을 log-log scale로 비교 도시한 것이다. 흡입 후 전신에 대한 잔류방사능은 처음 3일까지는 개선 모델이 기존 모델 대비 최대 32.4% 높았으나 이후부터는 더 낮은 수치를 보였으며 1150일에서 최대 34.4%의 차이를 보였다. 폐에서의 잔류방사능은 50일 이후부터 기존 모델의 감소율이 더 증가하였고, 간에서의 잔류방사능은 전반적으로 개선 모델이 높은 수치를 보이다가 1050일 이후부터 감소폭이 증가하였다. 소변으로의 배설 방사능은 전산모사를 진행한 3000일까지 개선 모델이 기존 모델보다 낮았고, 최소 16.4%에서 최대 69.5%의 차이를 나타냈다. 대변으로의 배설 방사능은 처음 6일간은 개선 모델이 최대 139%의 차이로 높은 수치를 보였으나 이후 100일까지는 최대 60%의 차이를 보이며 낮게 나타났다. 이와 같이 개선된 모델이 기존 모델에 비해 방사능 변화가 더 큰 것을 알 수 있었다.

Figs. 15부터 17은 흡수형태 S에 대해 전신, 폐, 간에서의 시간에 따른 잔류방사능, Figs. 18과 19는 1일 간격으로 배설한 소변과 대변의 배설 방사능을 log-log scale로 비교 도시한 것이다. 전신에 대한 잔류방사능은 흡수형태 M일 때와 같이 처음 4일 전까지는 개선 모델이 최대 33.9%가 높았으나 기존 모델보다 완만한 변화를 보이면서 695일 이후부터는 기존 모델과의 차이가 증가하였다. 폐에서의 잔류방사능은 1070일 이후부터 개선 모델의 감소가 작아지면서 기존 모델과 차이

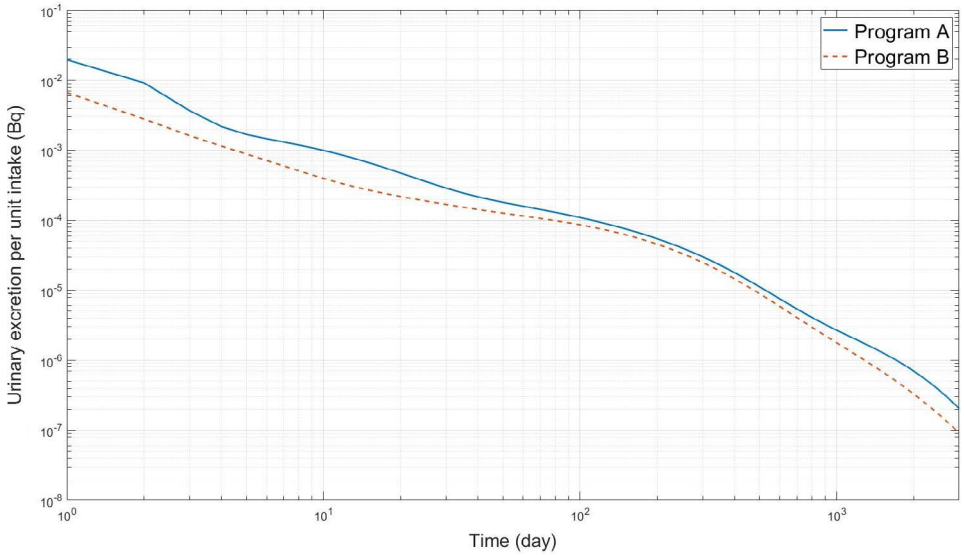

Fig. 13. Activity of ^{60}Co in daily excretion of urine following unit acute inhalation (Type M).

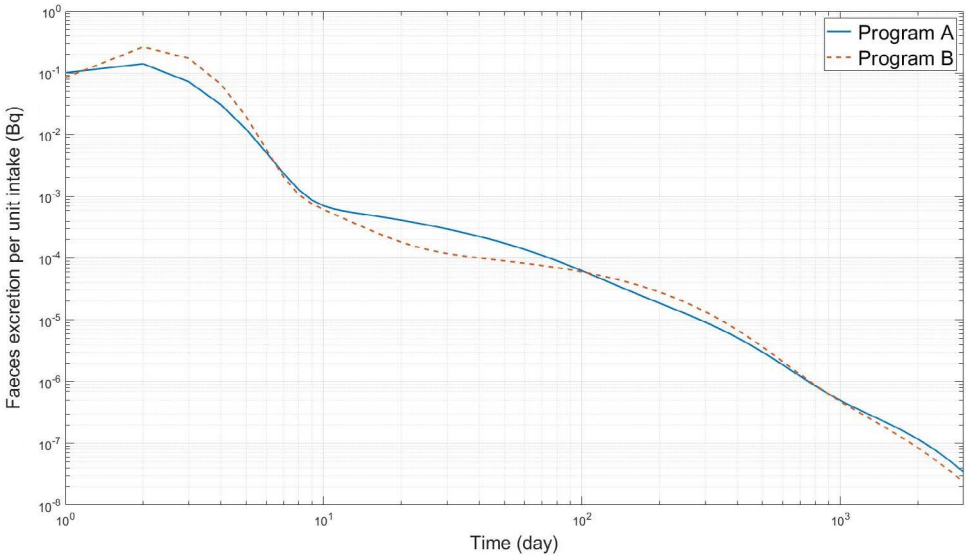

Fig. 14. Activity of ^{60}Co in daily excretion of faeces following unit acute inhalation (Type M).

는 20%를 초과하였다. 간에서의 잔류방사능은 1일부터 1000일까지 기존 모델이 50% 이상으로 높게 계산되었다. 소변으로의 배설 방사능은 개선 모델이 기존 모델보다 최소 75%에서 최대 95%까지 낮게 계산되었다. 대변으로의 배설 방사능은 흡수형태 M과 유사하게 개선 모델이 기존 모델보다 방사능 변화가 큰 형태를 보였다.

고 찰

원자력발전소 해체 작업자의 내부피폭을 평가할 수 있는 국내·외의 프로그램은 방사성핵종의 섭취에 따른 체내 방사능 변화추이를 모사할 수 있는 생체역동학 모델을 사용한다. ICRP는 최근 발간된 간행물들에서 생체역동학 모델을 구성하는 호흡기 모델, 소화기 모델, 전신생리 모델의 개선된 모델을 제시하고 있으므로 기존 모델들을 사용하고 있는 내부피폭 선량평가 프로그램들을 새롭게 개발할 필요성이 있다. 본 논문에서는 원자력발전소 해체과정에서 발생하는 방사성 에어로졸의 주요 핵종인 ^{60}Co를 대상으로 기존 모델과 최근 개선된 모델의 차이를 비교 분석하였다.

호흡기 모델에서 개선 모델의 급속용해율(rapid dissolution rate)는 기존 모델의 100 d^{-1}에서 1 d^{-1}로 감소했으므로 기존 모델이 용해에 의한 혈액으로의 흡수가 더 빨리 이뤄져야 했

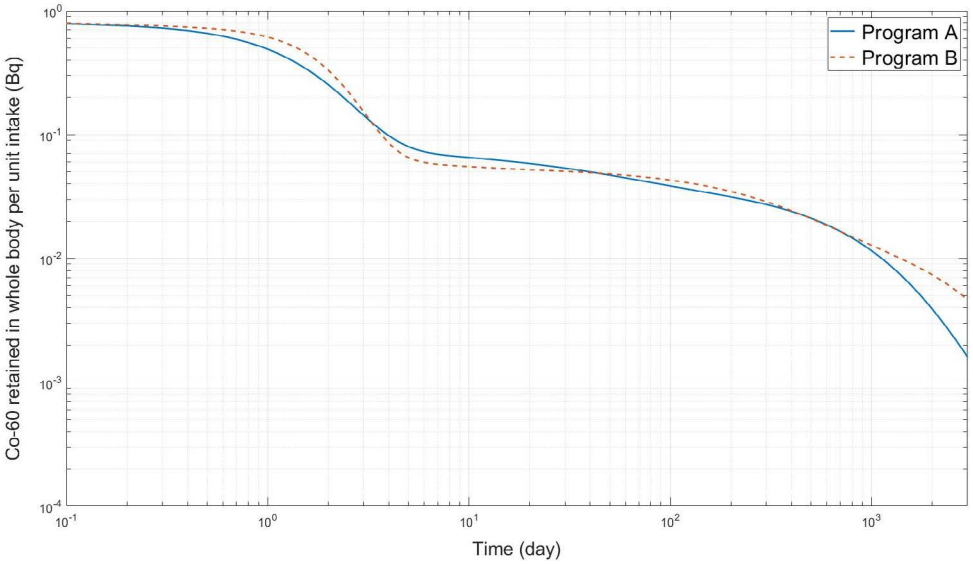

Fig. 15. Retained activity of ^{60}Co in the whole body following unit acute inhalation (Type S).

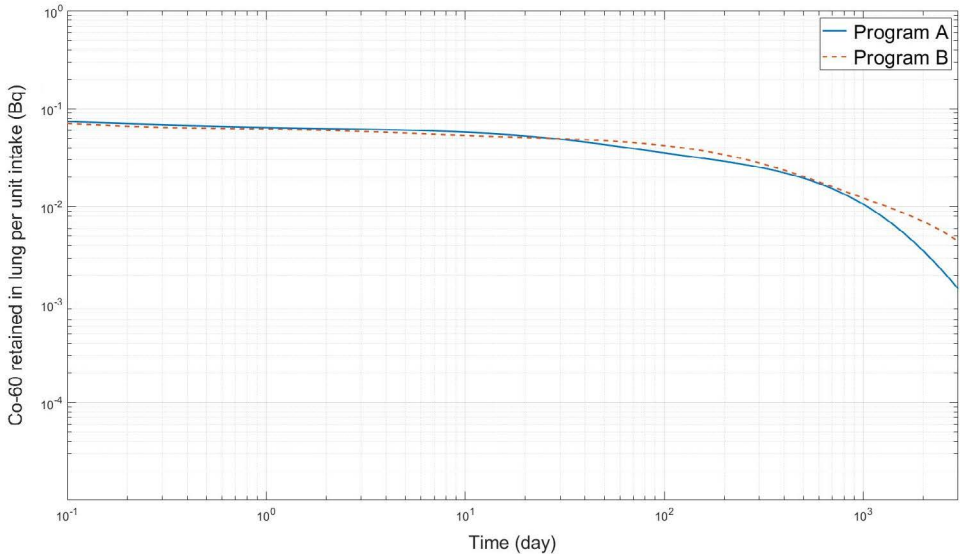

Fig. 16. Retained activity of ^{60}Co in the lung following unit acute inhalation (Type S).

지만, 개선 모델은 기존 모델의 BB, bb 영역에서 느린 신체 대사를 보이는 격실과 3개로 나뉘었던 AI의 격실을 통합하여 감소된 급속용해율의 영향을 상쇄하였다. 또한, 개선 모델은 결합물질 상태를 거치므로 폐의 잔류방사능은 500일 이후부터 기존 모델의 감소량이 많았다. 전신생리 모델은 개선 모델에서 간과 신장을 2개의 격실로 세분화했고 뼈의 격실도 추가되었으며 혈액에서 방광으로 전이되는 비율이 85.7%에서 34.5%로 감소하였다. 이로 인해 개선 모델에서는 방광을 통해 소변으로 배설되는 방사능이 기존 모델보다 더 많이 감소하게 되었다. 소화기 모델에서는 대변으로 배설되는 전이계수가 기존 모델보다 개선 모델이 2배 더 크므로 초기에 대변으로 배설되는 방사능은 개선 모델이 더 높게 나타나지만, 식도를 포함하고 대장을 3개로 세분하여 여러 개의 격실을 구성한 개선 모델이 기존 모델보다 대변으로 배설되는 방사능 변화의 폭이 더 크게 나타났다.

흡수형태 S와 M을 비교했을 때 호흡기에서 용해되는 속도의 차이로 인해 시간에 따른 폐에서의 잔류방사능 감소가 S에서 더 작은 것을 확인할 수 있었고, 이것은 예탁유효선량 환산계수에도 영향을 미친다. ICRP 간행물에 나타난 ^{60}Co의 흡입에 따른 예탁유효선량 환산계수를 확인해 보면, 기존 모델을 적용한 경우는 7.1×10^{-9} Sv·Bq^{-1} (흡수형태 M), 1.7×10^{-8} Sv·Bq^{-1} (흡수형태 S)로 제시되어 있는 반면(ICRP

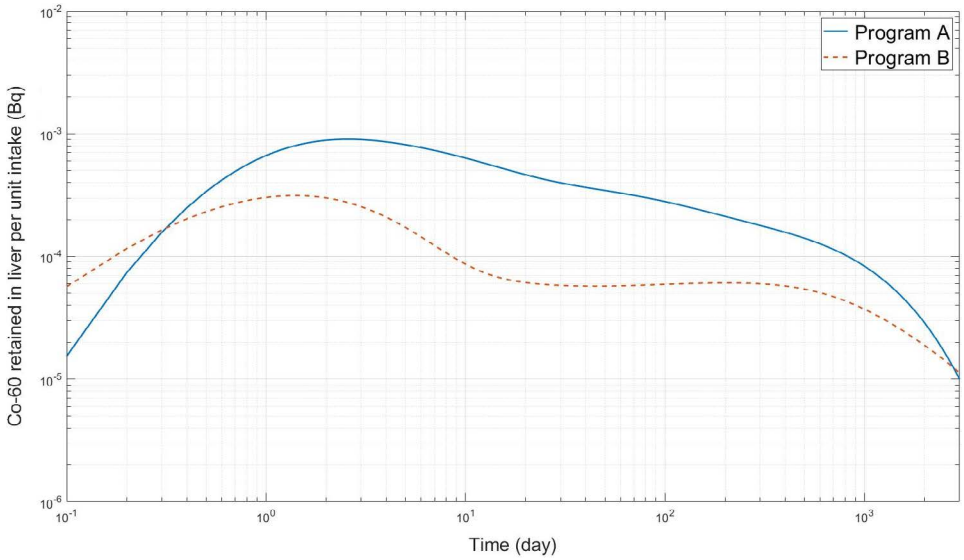

Fig. 17. Retained activity of ^{60}Co in the liver following unit acute inhalation (Type S).

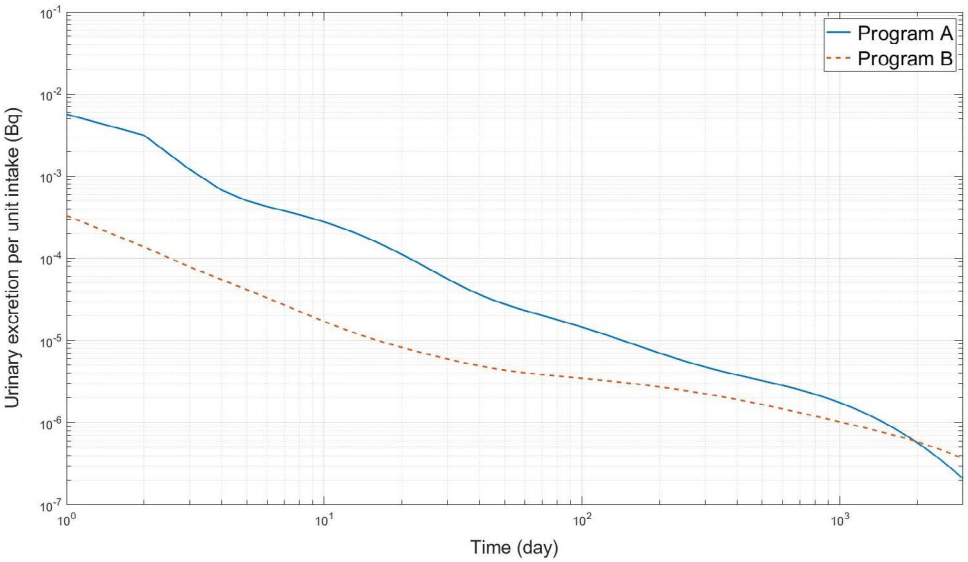

Fig. 18. Activity of ^{60}Co in daily excretion of urine following unit acute inhalation (Type S).

1997), 개선 모델을 적용한 경우는 6.2×10^{-9} Sv·Bq^{-1} (흡수형태 M), 3.1×10^{-8} Sv·Bq^{-1} (흡수형태 S)로 제시되어 있다 (ICRP 2016).

호흡기 모델에서 호흡기 영역의 침착분율은 입자 크기마다 차이가 있고, 기존 모델과 개선 모델에서도 제시하는 값의 차이가 있다. 또한, 개선 모델은 ET_1에서 ET_2로의 전이가 반영되었기 때문에 소화기 영역과 전신생리 영역으로의 흡수가 증가하여 선량을 증가시키게 하고, 흡입과정에서 코에 침착된 물질은 소화기 영역으로 약 50%가 제거되므로 (ICRP 2015) 대변 시료 측정을 이용한 분석에도 영향을 끼친다. 본 논문에서 입자크기 5 μm인 ^{60}Co를 대상으로 기존 모델과 개선 모델을 비교했을 때 전신에 대한 잔류방사능 차이가 30% 이상 발생하는 경우가 있었고 소변과 대변으로의 배설 방사능 차이가 60% 이상 발생하는 경우가 있었다.

결 론

원자력발전소 해체과정에서 발생하는 방사성 에어로졸의 흡입에 의한 작업자의 내부피폭 선량평가는 작업자의 방사선 안전을 위해 필요한 사항이다. 현재 국내·외의 내부피폭 선량평가용 전산프로그램은 최근 새롭게 개선된 ICRP 생

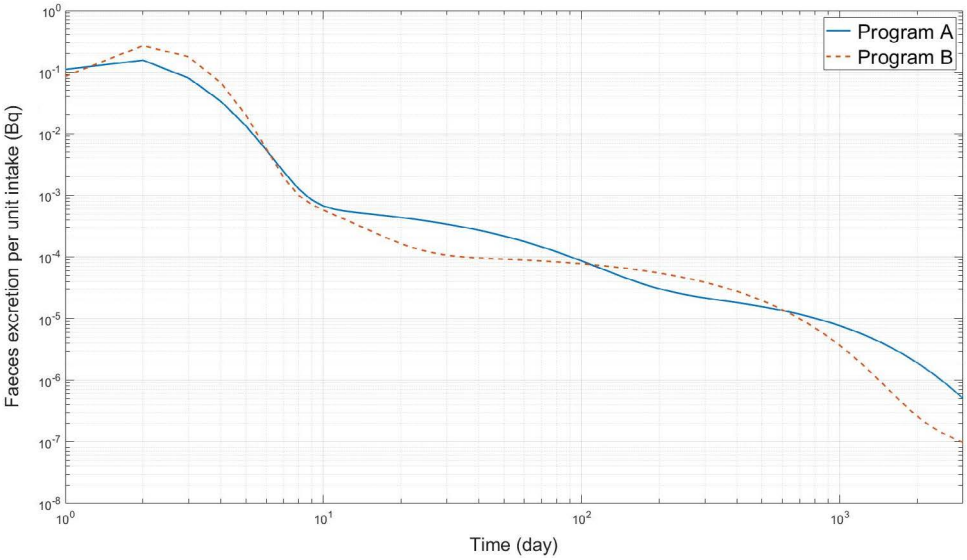

Fig. 19. Activity of ^{60}Co in daily excretion of faeces following unit acute inhalation (Type S).

체역동학 모델을 적용하지 않고 있으므로, 기존 모델과 개선 모델에 대한 체내 잔류 및 배설 방사능을 비교하여 새로운 내부피폭평가용 전산프로그램 개발의 필요성을 검토하였다. 이를 위해 기존 모델과 개선 모델로 각각 구성한 생체역동학 모델에 대해 Matlab으로 계산 프로그램들을 만들어 검증하였고, 입자크기 5 μm의 ^{60}Co 에어로졸을 대상으로 모사 결과를 비교 분석하였다. 흡수형태 M과 S에 대해 기존 모델과 개선 모델에서의 체내 잔류 및 배설 방사능을 비교한 결과, 초기 시간대에서 모두 유의한 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 일상적인 감시환경이 아니라 원전 해체 작업자의 내부피폭평가를 위한 경우는 작업 후 초기 시간대에 대한 잔류·배설함수가 중요하므로 특히 개선 모델을 적용한 평가가 필요할 것이다. 내부피폭선량평가는 잔류·배설함수와 예탁유효선량 환산계수를 종합적으로 고려해야 하므로 최종적인 선량평가 결과에 대한 영향을 확인하기 위해서는 추가 연구가 진행해야 할 것이다. 본 연구를 통해 검증한 ^{60}Co의 개선된 생체역동학 모델과 함께 다른 방사성핵종을 대상으로 한 생체역동학 모델을 구현한 연구와 에어로졸 입자크기에 따라 평가가 가능한 모듈에 관한 연구를 추가한다면 최신 생체역동학 모델이 적용된 내부피폭 선량평가용 프로그램 개발에 적절한 참고가 될 것이다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1803017).

참 고 문 헌

Chae N, Lee M, Choi S, Park BG and Song JS. 2019. Aerodynamic diameter and radioactivity distributions of radioactive aerosols from activated metals cutting for nuclear power plant decommissioning. *J. Hazard. Mater.* **369**:727-745.

Christophe J, Justine Z, Emmanuel E, Véronique T, Emmanuelle B, Christophe C, Ioanna D, Emmanuel P and Damien R. Aerosols released during the laser cutting of a Fukushima Daiichi debris simulant. The 9th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR 2019), Mar 2019, Prague, Czech Republic.

Health Protection Agency (HPA). 2005. User manual for IMBA Professional Plus (version 4.0). Available online at http://https://www.phe-protectionservices.org.uk/imba/

Herman M and Paver N. 2005. ICTP Lecture Notes: Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors. Trieste: The ICTP Publications & Printing Section.

ICRP. 1979. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP publication 30 Part 1. Oxford: Pergamon Press.

ICRP. 1990. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides Part 1. ICRP publication 56. Oxford: Pergamon Press.

ICRP. 1993. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP publication 67. Oxford: Pergamon Press.

ICRP. 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP publication 66. Oxford: Pergamon Press.

ICRP. 1994. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP publication 68. Oxford: Pergamon Press.

ICRP. 1995. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides Part 3 Ingestion Dose Coefficients. ICRP publication 69. Oxford: Pergamon Press.

ICRP. 1997. Individual monitoring for internal exposure of workers. ICRP publication 78. Oxford:Pergamon Press.

ICRP. 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. ICRP publication 89. Oxford: Pergamon Press.

ICRP. 2006. Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. ICRP publication 100. Orlando: Elsevier Ltd.

ICRP. 2015. Occupational Intakes of Radionuclides Part 1. ICRP publication 130. London: SAGE Publications Ltd.

ICRP. 2016. Occupational Intakes of Radionuclides Part 2. ICRP publication 134. London: SAGE Publications Ltd.

ICRP. 2017. Occupational Intakes of Radionuclides Part 3. ICRP publication 137. London: SAGE Publications Ltd.

ICRP. 2019a. Occupational Intakes of Radionuclides Part 4. ICRP publication 141. London: SAGE Publications Ltd.

ICRP. OIR (Occupational Intakes of Radionuclides) 2019b. Data Viewer for P134, P137 and P141. Available online at https://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB_48_2-3

Kuempel ED, O'Flaherty EJ, Stayner LT, Smith RJ, Green F and Vallyathan V. 2001. A biomathematical model of particle clearance and retention in the lungs of coal miners. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* **34**:69-87.

Leggett RW. 2008. The biokinetics of inorganic cobalt in the human body. *Sci. Total. Environ.* **22**:451-459.

Lee TY, Kim JK, Lee JI and Chang SY. 2004. The BiDAS program: bioassay data analysis software for evaluating radionuclide intake and dose. *J. Korean Radioactive Waste Soc.* **2**(2):113-124.

U.S. Nuclear Regulatory Commission. 1982. Technology, safety and costs of decommissioning nuclear reactors at multiple-reactor stations. NUREG/CR-1755. Springfield: National Technical Information Service.

Received: 5 October 2020
Revised: 18 October 2020
Revision accepted: 26 October 2020