

Interpretation of Uranium Bioassay Results with the ICRP Respiratory Track and Biokinetic Model

H. K. Kim and J. K. Lee

Dept. of Nuclear Engineering Hanyang University

ICRP 호흡기 및 생체역동학적 모델을 이용한 우라늄 생물분석 결과의 해석

김현기 · 이재기

한양대학교 원자력공학과

(2002년 12월 6일 접수, 2003년 3월 6일 채택)

Abstract - This study describes a practical method for interpretation of bioassay results of inhaled uranium to assess the committed effective doses both for chronic and acute intake situations. Organs in the body were represented by a series of mathematical compartments for analysis of the behavior of uranium in the body according to the gastrointestinal track model, respiratory track model and biokinetic model recommended by the ICRP. An analytical solutions of the system of balance equations among the compartments were obtained using the Birchall's algorithm, and the urinary excretion function and the lung retention function of uranium were obtained. An initial or total intakes by intake modes were calculated by applying excretion and retention functions to the urinary uranium concentration and the lung burden measured with a lung counter. The dose coefficients given in ICRP 78 are used to estimate the committed effective doses from the calculated intakes.

Key words: compartment models, uranium, excretion function, retention function, internal exposure, bioassay, intake

요약 - 본 연구는 호흡을 통해 우라늄을 만성 또는 급성섭취한 경우 생물분석 결과의 해석을 통해 예탁유효선량을 평가하는 실질적인 방법을 기술하고 있다. 인체에서의 우라늄 거동의 해석을 위해 인체의 장기를 ICRP에서 권고하는 소화기 모델, 호흡기 모델 그리고 생체역동학적 모델에 따라 일련의 수학적 격실로 구성하였다. Birchall의 알고리즘을 이용하여 각 격실에서의 균형 방정식의 해석적인 해를 얻었으며 우라늄의 소변 배설함수와 폐 잔류함수를 획득하였다. 소변 중 우라늄 농도와 폐 계수기로 측정된 폐부하량에 각각 배설 및 잔류함수를 적용하여 섭취모드에 따른 초기 섭취량 또는 총 섭취량을 계산하였다. 예탁유효선량은 ICRP 78에서 제공하는 선량 환산계수를 계산된 섭취량에 적용함으로써 평가된다.

중심어 : 격실모델, 우라늄, 배설함수, 잔류함수, 내부피폭, 생물분석, 섭취

서 론

핵연료 가공공장을 비롯하여 천연, 농축 또는 열화 우라늄을 취급하는 시설에서는 여러 형태의 우라늄에 의한 오염이 발생하게 된다. 이러한 오

염은 결국 작업공간의 공기오염을 유발하고 따라서 시설 내 종사자들의 내부피폭의 원인이 된다. 내부피폭은 물리적 반감기, 방출되는 방사선의 종류와 에너지 등의 물리적 특성과 화학형, 입자 크기, 용해도 등의 화학적 특성, 그리고 흡수율, 체

내 거동 등의 생체역동학적인 특성에 의존한다. 따라서 우라늄에 의한 내부피폭 선량평가를 위해서는 시설에 존재하는 우라늄의 물리·화학적 형태를 파악하고 인체에서 거동을 이해하는 것이 선차적인 과제이다.

1990년을 전후한 시기부터 내부피폭에 관한 과학적 근거에도 상당한 변화가 있었다. 과거에는 ICRP Pub. 30[1]의 모델과 데이터를 중심으로 한 체계였으나 방사성핵종의 체내 거동에 대한 자료가 집적되면서 새로운 모델과 데이터가 도입되었다. 특히 흡입에 의한 내부피폭에 대해서는 호흡기 모델이 전면 개편되어 ICRP Pub. 66[2]에 제공되었고, 체내의 생리학적 거동에 대해서도 수정된 데이터들이 여러 보고서에 의해 제공[3-6]되었다. ICRP Pub. 67과 69는 인체에서 물질의 순환 과정을 포함하고 있다. 우라늄의 신진대사 모델은 생물분석(*in vitro* 분석과 *in vivo* 분석을 포함) 결과와 조직의 침적량 또는 선량평가를 관계짓는 수단이 되므로 모델 및 데이터의 변경은 기존의 내부피폭 선량평가 알고리즘의 수정을 초래한다 [7-12].

이 논문에서는 새로운 대사모델과 자료를 이

용하여 우라늄 생물분석 결과의 해석에 사용할 체계를 구축하였다. 섭취는 흡입을 통해서 발생하는 것으로 가정하였는데 이것은 일반적인 중사자의 실질적인 우라늄 내부피폭 경로이다. *In vivo* 생물분석 결과는 폐 잔류함수와 연계하며 소변의 *in vitro* 생물분석 결과는 소변 배설함수와 연계하여 섭취량을 평가하는 알고리즘을 수립하였다. 본 논문에는 언급되어 있지 않지만 유의한 양의 섭취량이 감지되었을 때는 후속 감시결과를 이용해 섭취모드(급성 또는 만성)와 섭취시점을 평가하고 이에 따른 예탁유효선량을 평가할 수 있도록 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 격실모델

체내에서의 우라늄의 거동을 모사하는 일반적인 방법은 인체를 일련의 수학적 격실 (*mathematical compartment*)로 분리하고 이들 격실 간에 우라늄의 교환이 일어난다고 가정하는 것이다. 즉, 체내로 흡입된 우라늄은 호흡기에 침

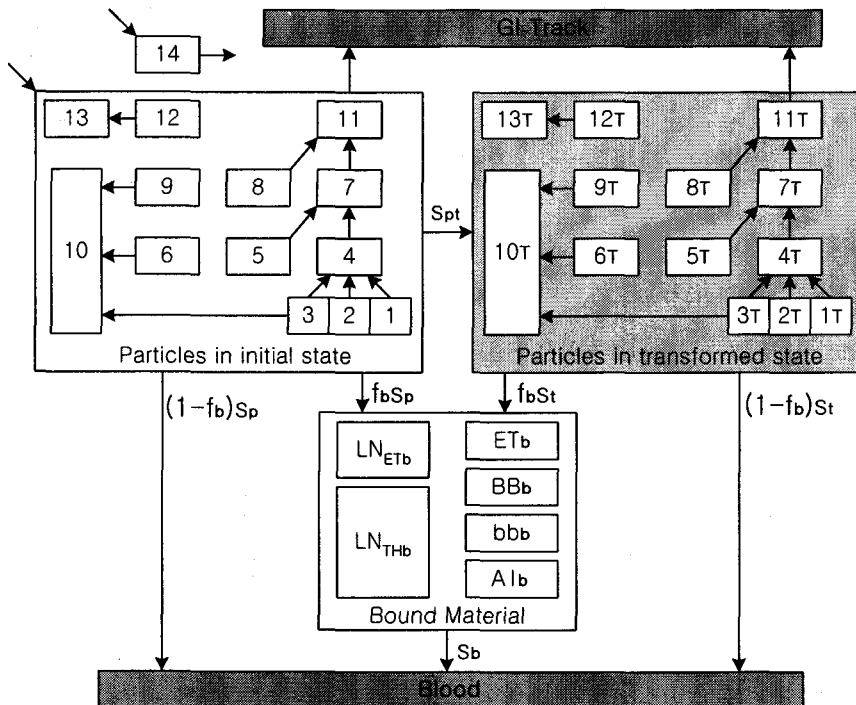


Fig. 1. Compartment model for respiratory track clearance including both time-dependent particle transport and absorption into blood.

적된 후 물리·화학적 성질에 특징적인 전이율을 지니고 체액 또는 소화기로의 전이가 일어난다. 소화기로 전이된 우라늄은 다시 체액으로 흡수되거나 대변을 통해 배설되며 체액으로 전이된 우라늄(폐, 소화기, 또는 순환을 통해 체액으로 전이)은 다양한 장기로 전이되거나 소변을 통해 배설된다. 이를 모사하기 위해 ICRP Pub. 30[1]의 소화기 모델, ICRP Pub. 66[2]의 호흡기 모델 그리고 ICRP Pub. 69[5]와 78[6]의 생체역동학적 모델에 따라 인체를 구성하고 격실 간에는 일정한 전이율을 지니고 우라늄의 전이가 일어남을 가정하였다. 구성된 격실모델의 해석에는 각각의 ICRP 보고서에서 제공하는 인자값을 사용하였다. 그림1과 2에 호흡기에 침적된 우라늄의 제거를 모사하는 격실모델과 소화기를 포함하는 생체역동학적 모델을 1차 전이과정으로 연결된 격실형태로 도시하였다.

나. 계산

순환계를 포함하는 1차 격실모델을 해석하는 Birchall의 알고리즘[13]을 프로그래밍하여 우라늄의 체내 거동을 해석하였다. 알고리즘에서 격실모델에 대한 정보는 각 격실에서의 초기양과 전이율로 구성되는 rate matrix 형태로 표현되며 행렬

대수를 이용하여 해석적 방법으로 모델의 해를 구하기 때문에 모델의 복잡성 여부와 관계없이 빠른 시간 내에 작업을 수행할 수 있다. 즉, 시간 $t=0$ 에서 각 격실에 대한 물질의 초기양과 붕괴상수가 주어지면 알고리즘을 통해 일정한 시간이 경과한 후 각 격실에 잔존하는 물질의 양과 그동안 붕괴한 원자핵의 수를 계산할 수 있다. 계산은 $5\mu\text{m}$ 의 AMAD를 지닌 입자에 대하여 수행되었다.

다. 섭취모드에 따른 섭취량과 예탁유효선량의 평가

급성섭취

- 뇨시료 중에 함유된 우라늄 농도 측정을 통한 섭취량 계산

$$I = \frac{M(t)}{IEF_a(t)} \tag{식1}$$

여기서,
 I = 초기 섭취량 [μg]
 $M(t)$ = 섭취 후 시간 t 에서 하루동안 채집된 뇨시료에서 측정된 우라늄의 양 [$\mu\text{g}/\text{d}$]

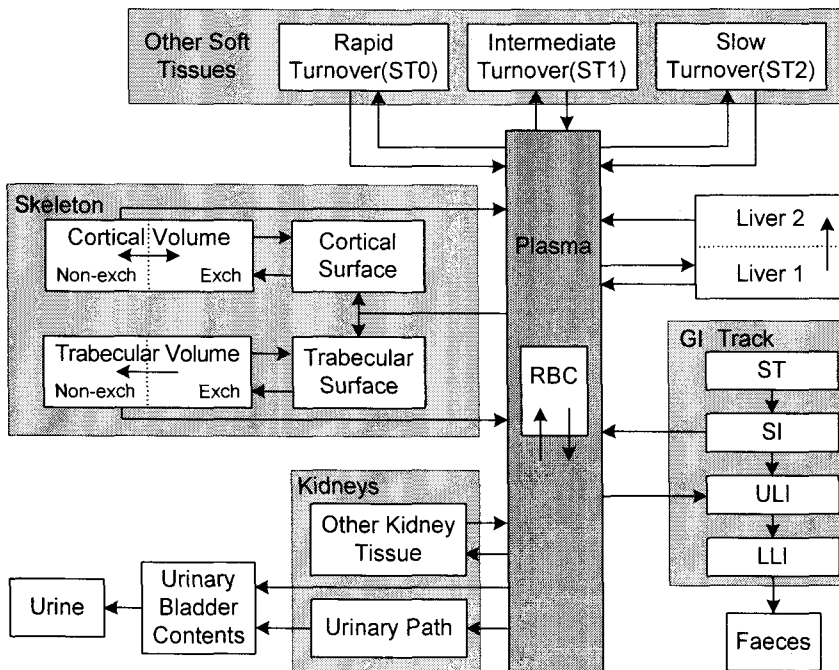


Fig. 2. Diagram of the biokinetic model for uranium and affected gastrointestinal compartments.

IEF_a(t) = 급성섭취 후 시간 t에서 예상되는 일일
 배설분률[μg/d per μg]
 1.4 = 표준인의 소변 배설률[L/day]

- 우라늄의 폐부하량 측정을 통한 섭취량 계산

$$I = \frac{M(t)}{IRF_a(t)} \quad \text{식(2)}$$

여기서,
 M(t) = 섭취 후 시간 t에서의 우라늄 폐부하량
 [μg]
 IRF_a(t) = 급성섭취 후 시간 t에서 예상되는 잔류
 분률[μg per μg]

만성섭취

- 뇨시료 중에 함유된 우라늄 농도 측정을 통
 한 총 섭취량 계산

$$I = T \times \frac{M(t)}{IEF_c(t)} \quad \text{식(3)}$$

여기서,
 I = 총 섭취량[μg]
 T = 만성섭취 기간[days]
 IEF_c(t) = 만성섭취 후 시간 t에서 예상되는 배설
 분률[μg/day per μg/day]

- 우라늄의 폐부하량 측정을 통한 총 섭취량
 계산

$$I = T \times \frac{M(t)}{IRF_c(t)} \quad \text{식(4)}$$

여기서,
 IRF_c(t) = 만성섭취 후 시간 t에서 예상되는 잔류
 분률[μg per μg/day]
 급성섭취와 만성섭취의 경우 식(1)~(4)를 통
 해 산출된 ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁴U의 초기 섭취량 및 총

섭취량은 각각의 우라늄에 해당하는 예탁유효선
 량 환산계수를 적용함으로써 예탁유효선량으로
 환산할 수 있다. 농축도가 4.2%인 우라늄의 화학
 형별 예탁유효선량 환산계수는 표1과 같다.

3. 결과 및 분석

격실모델의 해석 프로그램을 통해 5μm AMAD
 를 지닌 우라늄의 소변으로의 배설함수와 폐에서
 의 잔류함수를 획득하였으며 NRPB-M824[14]와
 ICRP Pub. 78[6]에서 제공하는 값과 비교함으로
 새롭게 개발된 프로그램의 신뢰성을 확인하였
 다. 결과를 그림3~5에 도시하였다.

우라늄의 소변으로의 배설과 관련한 모든 그
 립에서 소변 격실에서의 값은 1μg의 급성섭취 후
 또는 1μg/d의 섭취율로 만성섭취할 경우 누적 배
 설량을 나타내므로 관심있는 날짜에서 일간 소변
 배설함수는 전날까지의 누적 배설량을 차감하여
 줌으로써 획득한 것이다. 급성섭취의 경우 그림
 3~4와 같이 소변 배설함수와 폐 잔류함수는
 NRPB-M824와 일치하는 결과를 보였다. 그림5는
 년평균 20mSv에 해당하는 Type S ²³⁴U을 호흡을
 통해 만성적으로 섭취할 경우 시간경과에 따른
 소변 배설함수 및 폐 잔류함수를 ICRP Pub.
 78[6]의 자료와 비교한 것으로 본 연구의 결과와
 의 일치성을 보인 것이다. 그리고 그림6~7에서
 Type F와 M 우라늄의 경우 만성섭취를 시작한
 후 일정시간이 경과하면 소변 배설함수와 폐 잔
 류함수가 평형에 도달하는 반면 Type S 우라늄
 은 관심있는 기간동안 배설함수와 잔류함수가 평
 형에 도달하지 않고 꾸준히 증가함을 알 수 있다.
 이는 Type S 우라늄의 경우 호흡기에서 체액으
 로 흡수되는 반감기가 7000일로 긴 반감기를 지
 니므로 관심있는 기간동안 인체에 지속적으로 누
 적되기 때문이다.

Table 1. Dose conversion coefficients for 4.2% enriched uranium, [mSv/μg].

Uranium type	F			M			S		
	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U
e(50) [Sv/Bq]	5.8×10 ⁻⁷	6.0×10 ⁻⁷	6.4×10 ⁻⁷	1.6×10 ⁻⁶	1.8×10 ⁻⁶	2.1×10 ⁻⁶	5.7×10 ⁻⁶	6.1×10 ⁻⁶	6.8×10 ⁻⁶
Dose coefficient [mSv/μg]	5.91×10 ⁻⁵			1.90×10 ⁻⁴			6.22×10 ⁻⁴		

Specific activity of 4.2% enriched uranium by nuclide

²³⁸U: 1.19×10⁻² Bq/μg, ²³⁵U: 3.36×10⁻³ Bq/μg, ²³⁴U: 7.85×10⁻² Bq/μg

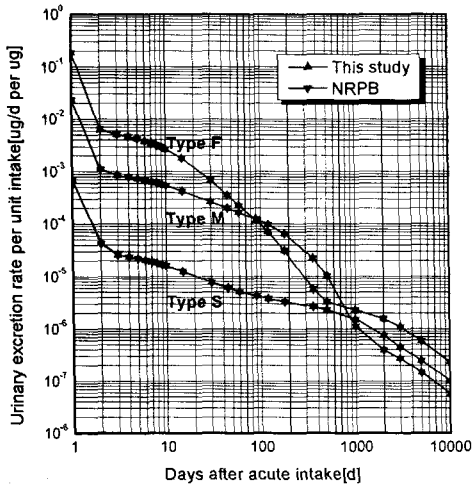


Fig. 3. Urinary excretion function following acute inhalation of uranium.

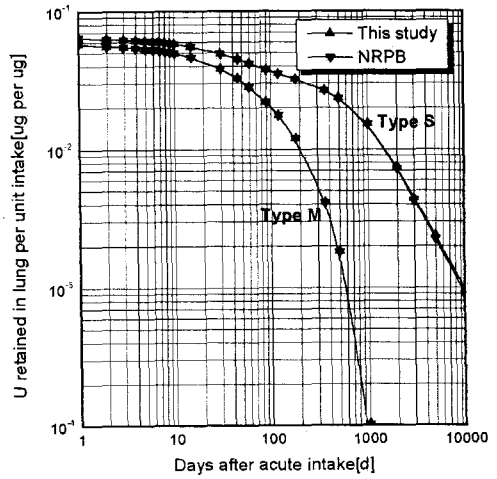
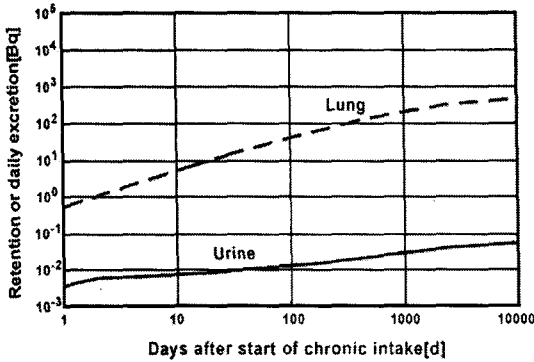
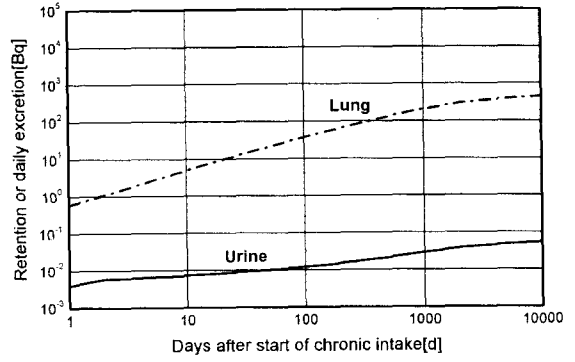


Fig. 4. Lung retention function following acute inhalation of uranium.



(a)



(b)

Fig. 5. Urinary excretion function and lung retention function following continuous chronic inhalation at a rate which would result in exposure at the average annual dose limit. (a) ICRP Pub. 78 (b) This study.

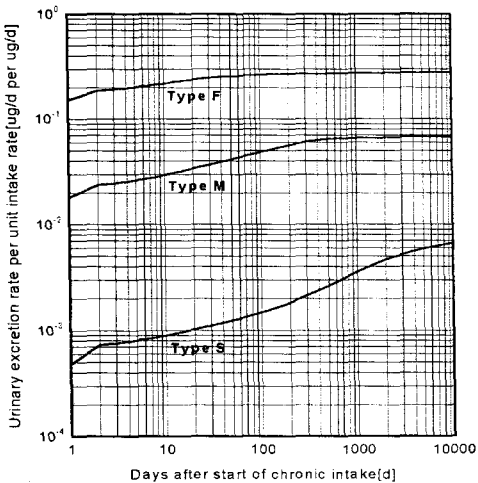


Fig. 6. Urinary excretion function following continuous chronic inhalation of uranium.

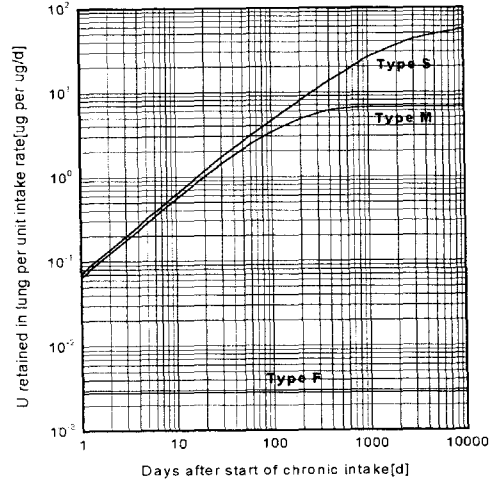


Fig. 7. Lung retention function following continuous chronic inhalation of uranium.

급성섭취와 만성섭취의 경우 시간경과에 따라 소변으로 배설되는 우라늄의 농도 또는 폐부하량으로부터 예탁유효선량으로의 환산에 필요한 수단을 그림8~11에 제시하였다. 즉 그림은 우라늄을 섭취한 후 경과시간에 따라 소변분석 및 폐계수기를 통해 측정될 것으로 예상되는 결과에

우라늄의 소변 배설함수와 폐 잔류함수를 식(1)~(4)에 적용하여 급성섭취의 경우 초기 섭취량을, 만성섭취의 경우 총섭취량을 계산한 다음 표1에서 제시한 4.2% 농축우라늄의 흡입에 대한 예탁유효선량 환산계수를 적용하여 얻어진 것이다.

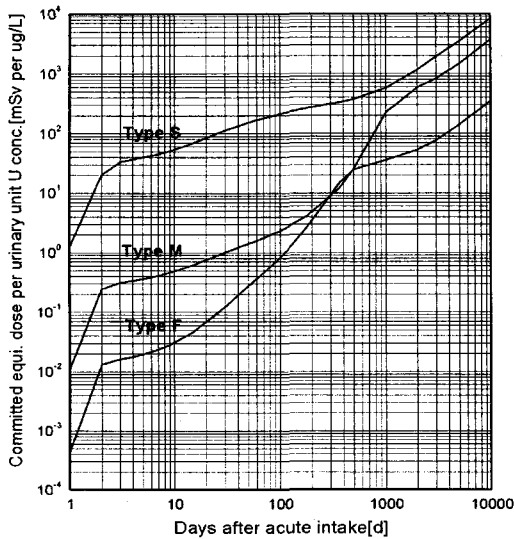


Fig. 8. Estimation of committed equivalent dose from uranium concentration excreted in the urine as a function of time following acute inhalation.

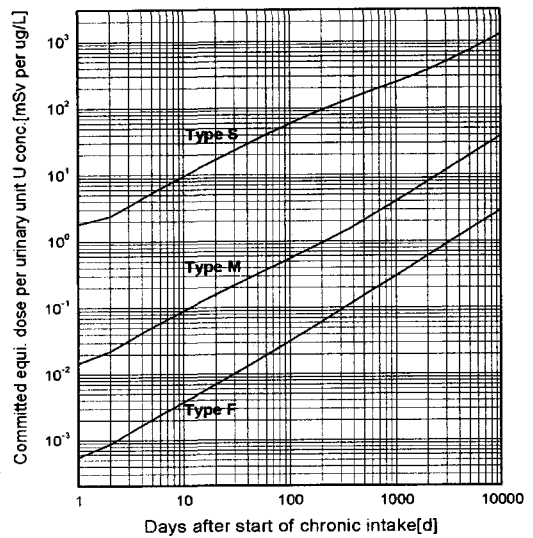


Fig. 10. Estimation of committed equivalent dose from uranium concentration excreted in the urine as a function of time for continuous chronic inhalation.

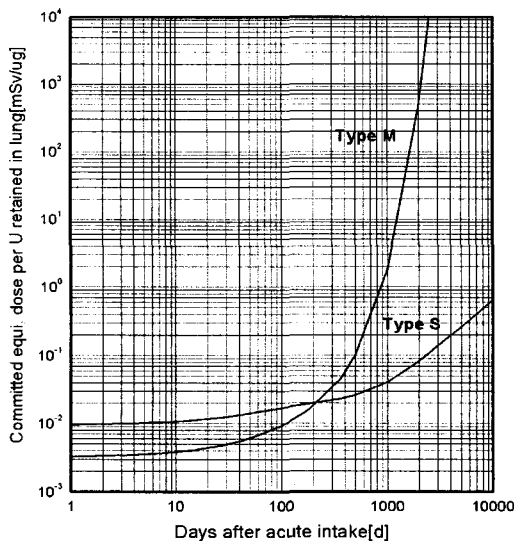


Fig. 9. Estimation of committed equivalent dose from uranium retained in the lung as a function of time following acute inhalation.

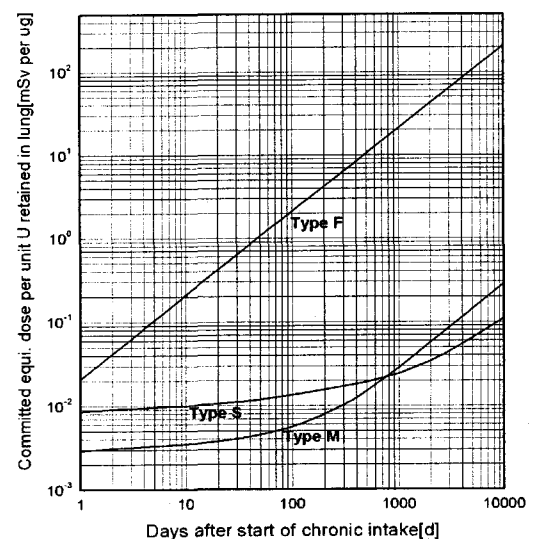


Fig. 11. Estimation of committed equivalent dose from uranium retained in the lung as a function of time for continuous chronic inhalation.

4. 결론 및 논의

본 연구는 사고 또는 일상 작업환경에서 호흡에 의한 우라늄 섭취에 따른 섭취량 및 선량평가를 위해 수행되었다. 이를 위해 ICRP에서 권고하는 최근의 대사모델 자료를 이용하여 인체를 격실형태로 구성하고 우라늄의 급성섭취와 만성섭취에 대한 소변으로의 배설함수 및 폐 잔류함수를 계산하는 프로그램을 작성한 후 계산된 결과를 NRPB 및 ICRP 보고서와 비교함으로써 완성된 프로그램의 건전성을 확보하였다. 또한 우라늄 내부피폭 감시 프로그램의 핵심이라 할 수 있는 생물분석 결과에 섭취모드에 따른 배설함수 및 잔류함수를 적용하여 예탁유효선량을 평가하는 알고리즘을 수립하였다.

ICRP Pub. 60[15]의 새로운 방사선방호 체계를 국내 법규에 반영하는 과정에서 내부피폭선량을 평가하여 외부피폭과 합산하도록 하는 방침을 명시함에 따라 내부피폭에 대한 규제의 입장이 강화되고 있는 시점에서 본 연구는 우라늄을 취급하는 종사자들의 내부피폭 감시 프로그램에 직접 활용될 수 있을 것이다. 아울러 일반적 가정에 의한 명목상의 모델보다는 시설 고유의 모델을 이용할 것을 ICRP[3,6]와 기타 여러 문헌[10-12,16-18]에서 권고하고 있듯이 일차적으로 작업환경 분석을 통해 우라늄의 물리·화학적 특성(입자크기 분포, 공기중 농도, 화학형 등)을 파악하고 작업현장에서의 우라늄의 생물학적 반감기 등과 같은 인체자료를 획득한 후 이를 본 선량평가 모델의 변수로써 적용하는 것이 보다 효과적인 섭취량 및 선량평가의 방법이다.

참고문헌

1. ICRP, *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 30(1978).
2. ICRP, *Human Respiratory Track Model for Radiological Protection*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 66(1993).
3. ICRP, *Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers: Design and Interpretation*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 54(1987).
4. ICRP, *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Ingestion Dose Coefficients*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 67(1993).
5. ICRP, *Age-dependent doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Ingestion Dose Coefficients*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 69(1994).
6. ICRP, *Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP Publication 54*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 78(1997).
7. R. W. Leggett, K. F. Eckerman and L. R. Williams, "An Elementary Method for implementing Complex Biokinetic Models", *Health Phys.*, 64, 3, 260-271(1993).
8. J. L. Malarbet, "Calculations of Radionuclide Organ Retentions from ICRP Biokinetic Recycling Models", *Radiat. Protect. Dosim.*, 79, 1-4, 379-381(1998).
9. A. Luciani, H. Doerfel and E. Polig, "Sensitivity Analysis of the Urinary Excretion of Plutonium," *Radiat. Protect. Dosim.*, 93, 2, 179-183(2001).
10. M. D. Hoover, G. J. Newton, R. A. Guilmette, R. J. Howard, R. N. Ortiz, J. M. Thomas, s. M. Trotter and E. Ansoborlo, "Characterization of Enriched Uranium Dioxide Particles from a Uranium Handling Facility", *Radiat. Protect. Dosim.*, 79, 1-4, 57-62(1998).
11. L. Bertelli, A. Puerta, M. E. Wrenn and J. L. Lipsztein, "Bioassay interpretation and dosimetry using specific absorption parameters for UO₂ and U₃O₈," *Radiat. Protect. Dosim.*, 79, 1-4, 111-113(1998).

12. E. Ansoberlo, A. Hodgson, G. N. Stradling, S. Hodgson, H. Metivier, M. H. Henge-Napoli, N. S. Jarvis and A. Birchall, "Exposure Implications for Uranium Aerosols Formed at a New Laser Enrichment Facility: Application of the ICRP Respiratory Track and Systemic Model," *Radiat. Protect. Dosim.*, 79, 1-4, 23-27(1998).
13. A. Birchall and A. C. James, "A Microcomputer Algorithm for Solving First-order Compartment Models Involving Recycling," *Health Phys.*, 56, 6, 857-868(1989).
14. NRPB, *Time-dependent Functions to Represent the Bioassay Quantities Given in ICRP Publication 78*, National Radiological Protection Board, NRPB-M824(1998).
15. ICRP, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60(1991).
16. Brice L. R., Stuart L. H., Clayton R. L., W. G. Mansfield, L. H. Munson, E. R. Wagner and E. J. Vallario, *Health physics manual of good practices for uranium facilities*, Idaho National Engineering Laboratory, DE88-013620(1988).
17. H. Schieferdecker, H. Horst, H. Doerfel, W. Rudolph and R. Anton, "Inhalation of U aerosols from UO₂ fuel element fabrication," *Health Phys.*, 48(1), 29-47(1985).
18. J. M. Barber and R. Forrest, *A model for uranium lung clearance at the Y-12 plant*, Oak Ridge Y-12 Plant, Y/DQ-39(1992).