

## Effects of AMAD, Absorption Type, and Intake Pattern on the Result of Evaluation for Internal Dose by Inhalation of Uranium

Jong Il Lee · Tae Young Lee · Si Young Chang · Jai Ki Lee\*

Korea Atomic Energy Research Institute, \*Hanyang University

### 우라늄의 입자크기, 흡수형태 및 섭취형태가 내부피폭선량 평가 결과에 미치는 영향

이종일 · 이태영 · 장시영 · 이재기\*

한국원자력연구소, \*한양대학교 원자력공학과

(2003년 9월 16일 접수, 2003년 12월 4일 채택)

**Abstract** - The effects of AMAD, absorption type, and intake pattern were compared and analysed for the internal dose evaluation of workers who chronically inhale uranium. The committed effective doses( $E_{50}$ ) based on AMAD, absorption type, and intake pattern were evaluated using 3 monthly lung predicted monitoring data due to a chronic intake of uranium for 5 years. The relative error ranges of  $E_{50}$  evaluated with each AMAD(0.1 ~ 10  $\mu\text{m}$ ) to  $E_{50}$  evaluated with 5  $\mu\text{m}$  AMAD were -37.0 ~ 49.8%, and the relative error ranges of  $E_{50}$  evaluated with Type M to  $E_{50}$  evaluated with Type S were 15.9 ~ 56.6%, and the relative error ranges of  $E_{50}$  evaluated with an acute intake to  $E_{50}$  evaluated with a chronic intake were 0.55 ~ 4.52%. Thus AMAD and the absorption type affected the results of  $E_{50}$ , but the intake pattern didn't really affect the results of  $E_{50}$ .

**Key words** : AMAD, absorption type, intake pattern, committed effective dose, uranium

**요약** - 방사선작업종사자가 우라늄을 5년간 만성 흡입섭취하는 경우, 우라늄의 입자크기(0.1 ~ 10  $\mu\text{m}$ ), 흡수형태(Type M, Type S) 및 섭취형태(급성, 만성)가 방사선작업종사자의 내부피폭선량 평가 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 우라늄을 1 Bq/day의 섭취율로 섭취할 경우 매분기 폐 방사능 값을 계산하여 실제 일상감시에서의 폐 방사능 측정값으로 간주하였고, 이 측정값으로부터 섭취량 및 예탁유효선량을 평가하였다. 5년간의 우라늄 섭취로 인한 예탁유효선량 평가 결과는 입자크기에 따라 -37.0 ~ 49.8%, 흡수형태에 따라 15.9 ~ 56.6%, 섭취형태에 따라 0.55 ~ 4.52%의 오차를 보였다. 이와 같이 입자크기 및 흡수형태는 분기별 측정값에 근거한 예탁유효선량 평가 결과에 큰 영향을 주었으나, 섭취형태는 평가 결과에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

중심어 : 입자크기(AMAD), 흡수형태, 섭취형태, 예탁유효선량, 우라늄

### 서 론

2003년부터 국내 원자력법으로 내부피폭선량과 관련한 고시가 발효되어 그 어느 때보다 방사선

작업종사자의 내부피폭선량 평가에 대한 관심이 높아지고 있다. 방사선작업종사자의 내부피폭선량을 평가하기 위해서는 작업자의 체내방사능 또는 배설물중 방사능을 주기적으로 측정 감시하고, 그

에탁유효선량을 평가해야 한다. 방사성핵종의 섭취량 및 에탁유효선량을 평가하기 위해서는 여러 환경자료가 필요하며, 이러한 환경자료로는 방사성핵종의 측정대상격실(전신, 폐, 갑상선, 소변, 대변 등), 섭취경로(흡입, 경구, 혈액), 방사능 입자크기(AMAD, Activity Median Aerodynamic Diameter), 폐에서의 흡수형태(Type F, M, S), 섭취형태(급성, 만성) 등이 있다. 일반적으로 측정대상격실 및 섭취경로는 쉽게 구분하여 적용할 수 있으나 AMAD와 흡수형태 및 섭취형태는 작업장과 작업자의 특성 및 작업형태에 따라 변하므로 정확하게 구분하여 적용하기가 어렵다. 따라서 국제방사선방호위원회(ICRP, International Commission on Radiological Protection)는 적용 가능한 기준 조건을 권고하고 있다. 즉 방사선작업종사자에 대한 선량평가에는 5  $\mu\text{m}$ 의 AMAD를 사용하도록 권고하였고, 각 방사성화합물에 대한 흡수형태를 지정하였으며, 섭취시점을 모를 경우에는 섭취 가능기간의 중간시점에서 급성섭취한 것으로 가정하도록 하였다. 그러나 AMAD, 흡수형태, 섭취형태에 따라 방사성핵종의 인체내 거동이 달라지고, 이로 인해 섭취량 및 에탁유효선량 평가 결과도 달라진다. 따라서 본 연구에서는 AMAD, 흡수형태, 섭취형태가 우라늄( $\text{U}_3\text{O}_8$ )을 만성 흡입 섭취하는 방사선작업종사자의 내부피폭 선량 평가에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

## 섭취량 평가에 고려된 조건

### 섭취경로 및 측정대상격실[1, 2]

섭취경로에는 흡입, 경구, 혈액이 있으나 일반적으로 방사선작업 중의 섭취는 흡입을 통해 발생되므로 섭취경로를 흡입으로 간주하였다. 또한 측정대상격실에는 전신, 폐, 갑상선, 소변, 대변 등이 있으나 폐 카운터를 이용하여 폐 방사능을 측정하므로 폐를 측정대상격실로 하였다.

### 입자크기[1, 2]

방사능 입자크기는 작업공정마다 차이가 있을 수 있고, 한 공정을 대상으로 하여 이를 측정한다 할지라도 입자크기는 하나의 값을 갖는 것이 아니고 분포를 이루므로 측정 중간값을 입자크기로 한다. 그러나 일반적으로 방사선 작업장내의 입자크기에 대한 측정값이 없을 경우에는 5  $\mu\text{m}$ 를 기본값으로 본다는 ICRP의 권고에 따라 입자크기

를 5  $\mu\text{m}$ 로 가정한다. 본 연구에서 에탁유효선량 평가에 사용한 입자크기는 핵연료 제조 공장에서 일반적으로 관측 가능한 0.1 ~ 10  $\mu\text{m}$ 를 고려하였다.

### 흡수형태[1, 2]

ICRP 30[3]에서 정의된 우라늄 화합물에 대한 흡입등급에 따르면,  $\text{UF}_6$ ,  $\text{UO}_2\text{F}_2$  및  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 는 D등급(폐에서의 잔류반감기가 10일 미만),  $\text{UO}_3$ ,  $\text{UF}_4$  및  $\text{UCl}_4$ 는 W등급(폐에서의 잔류반감기가 10일에서 100일 미만),  $\text{UO}_2$ 와  $\text{U}_3\text{O}_8$ 는 Y등급(폐에서의 잔류반감기가 100일 이상)으로 분류하고 있다. 이러한 D, W, Y 흡입등급은 새로 발표된 ICRP 66 호흡기모델[4]에서 사용되는 흡수형태, 다시 말해서 호흡기 각 영역에 침착된 화합물이 체액으로 흡수되는 형태를 나타내는 F(빠름), M(중간), S(느림) 형태와 각각 일치한다. 여기서 F는 용해 반감기가 10분인 물질이 100%인 경우이고, M은 용해 반감기가 10분인 물질 10%와 140일인 물질 90%가 혼합된 물질을 뜻하며, S는 용해 반감기가 10분인 물질 0.1%와 7000일인 물질 99.9%가 혼합된 물질을 말한다. 작업자에 대한 일상 감시에서 흡수형태가 F인 경우에는 폐 계측이 거의 불가능하므로 흡수형태 F는 고려하지 않았다.

### 섭취형태[1, 2]

방사성핵종의 섭취형태는 크게 급성섭취 및 만성섭취로 나눌 수 있고, 급성섭취는 단일섭취와 반복섭취로 나누어진다. 만성섭취로 가정하여 섭취량을 평가할 경우에는 측정일과 측정일 사이의 기간에서 동일한 섭취율로 만성 섭취하는 것으로 하였다. 또한 급성섭취로 가정하여 섭취량을 평가할 경우에는 섭취 가능 기간 즉 감시주기의 중간시점에서 단일섭취하는 것으로 하였다.

### 측정 자료

작업자가 5년 동안 우라늄(Type S, AMAD 5  $\mu\text{m}$ )을 1 Bq/day의 섭취율로 만성 흡입섭취할 경우, 매분기 말의 폐내  $^{235}\text{U}$  잔류량을 분기별 폐 방사능 측정값으로 간주하였다. 여기서 우라늄의 만성 흡입섭취에 따른 매분기 말의 폐내  $^{235}\text{U}$  잔류량은 내부피폭선량 계산 코드 BiDAS(Bioassay Data Analysis Software)[5]를 이용하여 구하였으며, BiDAS 계산 코드의 신뢰성은 이미 발표된 논문[5,6]에서 입증된 바 있다. 이와 같이 얻은 5년간 분기별 폐 방사능 측정값을 입자크기, 흡수

형태, 섭취형태에 따른 섭취량 및 예탁유효선량을 평가하는데 사용하였다.

**입자크기, 흡수형태, 섭취형태에 따른 섭취량 및 예탁유효선량 평가**

내부피폭선량 계산 코드 BiDAS를 이용하여 입자크기, 흡수형태, 섭취형태에 따른 섭취량 및 예탁유효선량을 평가하였다. 대상핵종은 <sup>235</sup>U, 섭취경로는 흡입섭취, 측정대상격실은 폐로 하였다. 흡입섭취되는 우라늄은 <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U로 혼합되어 있다. 그러나 폐 계측 값은 <sup>235</sup>U 방사능이므로, 이 값으로부터 <sup>235</sup>U에 대한 섭취량을 구한 후 <sup>235</sup>U 존재비 대 우라늄의 전방사능에 대한 <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U 및 <sup>238</sup>U의 방사능 분율 비를 이용하여 <sup>234</sup>U, <sup>238</sup>U의 섭취량을 구하였다[7]. 단, 본 연구에서는 <sup>235</sup>U의 농축도를 3.5%로 가정하였다. 총 우

라늄에 대한 예탁유효선량은 <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U의 각 섭취량에 각 핵종과 입자크기 및 흡수형태에 따른 예탁유효선량 환산계수[8]를 각각 곱한 값을 모두 더하여 구하였다[7].

**결과 및 고찰**

방사선작업종사자가 5년간 <sup>235</sup>U을 매일 1 Bq씩 만성 흡입섭취할 경우 5년간 매분기말 측정 가능한 폐내 <sup>235</sup>U 방사능 계산 결과는 표 1과 같다. 또한 이 값들에 근거하여 입자크기(0.1, 0.3, 1, 3, 5, 10 μm), 흡수형태(Type S, Type M) 및 섭취형태(급성, 만성)에 따라 예탁유효선량을 평가한 결과는 표 2와 같다.

Table 1. Predicted monitoring values of <sup>235</sup>U in lungs in the case of a chronic intake by the inhalation (1 Bq/day) of <sup>235</sup>U with Type S, 5 μm AMAD.

Assumed monitoring date (year-month-day)	Time after the first intake (days)	Predicted monitoring values of <sup>235</sup> U in lungs (Bq)
95-03-31	89	4.18
95-06-30	180	7.31
95-09-30	272	10.1
95-12-31	364	12.7
96-03-31	455	15.0
96-06-30	546	17.1
96-09-30	638	19.1
96-12-31	730	20.9
97-03-31	820	22.6
97-06-30	911	24.1
97-09-30	1003	25.6
97-12-31	1095	26.9
98-03-31	1185	28.1
98-06-30	1276	29.3
98-09-30	1368	30.3
98-12-31	1460	31.3
99-03-31	1550	32.3
99-06-30	1641	33.1
99-09-30	1733	33.9
99-12-31	1825	34.7

Table 2. The results of evaluation for the committed effective doses based on AMAD, absorption type and intake pattern by using 3 monthly lung monitoring data of  $^{235}\text{U}$  for 5 years.

unit: mSv

AMAD( $\mu\text{m}$ )	Absorption Type Intake Pattern	Type S		Type M	
		Acute	Chronic	Acute	Chronic
0.1		223	222	350	337
0.3		216	215	310	300
1		214	213	309	298
3		294	291	367	353
5		340	339	408	392
10		460	456	611	585

평가 결과 예탁유효선량은 흡수형태 및 섭취형태에 관계없이 입자크기가 1  $\mu\text{m}$ 일 때가 가장 낮았고, 10  $\mu\text{m}$ 일 때가 가장 높았다. 우라늄의 단위 방사능 섭취당 예탁유효선량이 10  $\mu\text{m}$ 일 때가 가장 낮고, 0.1  $\mu\text{m}$ 일 때가 가장 높은데도 불구하고 이와 같은 결과가 나온 것은 흡입섭취 후 시간에 따른 우라늄의 폐잔류를 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다.

ICRP는 방사선작업종사자에 대한 내부피폭선량 평가시 정확한 자료가 없을 경우 입자크기를 5  $\mu\text{m}$ 로,  $\text{U}_3\text{O}_8$  화합물에 대한 흡수형태를 Type S로 간주하도록 권고하고 있다. 그러나 표 2는 우라늄 흡입섭취로 인한 예탁유효선량 평가 결과가 우라늄의 입자크기, 흡수형태에 따라 얼마나 달라지는가를 보여준다. 동일한 흡수형태 및 섭취형태 조건 하에서 5  $\mu\text{m}$  입자크기에 따른 예탁유효선량에 대한 여러 입자크기에 따른 예탁유효선량의 상대오차는 -37.0 ~ 49.8%로 나타났다. 또한 동일한 입자크기 및 섭취형태 조건 하에서 흡수형태에 따라 예탁유효선량을 평가한 결과 Type S 조건에서의 예탁유효선량에 대한 Type M 조건에서의 예탁유효선량의 상대오차는 15.9 ~ 56.6%로 나타났다. 다만 동일한 입자크기 및 흡수형태 조건 하에서 섭취형태에 따라 예탁유효선량을 평가한 결과 만성섭취에 따른 예탁유효선량에 대한 급성섭취에 따른 예탁유효선량의 상대오차는 0.55 ~ 4.52%로 거의 차이가 없었다.

결과적으로 분기별 폐 계측에 의해 우라늄 방사능이 측정·감시되는 방사선작업종사자의 예탁유효선량 평가에 있어서 섭취형태(급성, 만성)는 평가결과에 거의 영향을 주지 않고, 흡수형태 및

입자크기는 평가결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 흡수형태는 화합물 형태에 따라 적합한 흡수형태를 적용할 수 있으나 입자크기는 직접 측정하지 않고서는 정확한 입자크기를 알 수 없다. 그러므로 분기별 폐 계측 결과에 근거하여 예탁유효선량을 평가할 경우 평가 결과의 오차를 줄이기 위해서는 정확한 입자크기를 측정하여 적용하는 것이 가장 중요하다.

## 결 론

방사선작업종사자가 5년간 우라늄을 만성 흡입 섭취할 경우 우라늄의 입자크기, 흡수형태 및 섭취형태가 예탁유효선량 평가 결과에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 분석 결과 예탁유효선량은 흡수형태 및 섭취형태에 관계없이 입자크기가 1  $\mu\text{m}$ 일 때 가장 낮았고, 10  $\mu\text{m}$ 일 때 가장 높았다. 또한 입자크기를 ICRP 권고값 5  $\mu\text{m}$ 로 가정하여 평가한 예탁유효선량에 대해서 여러 입자크기(0.1 ~ 10  $\mu\text{m}$ )별로 가정하여 평가한 예탁유효선량의 상대오차는 -37.0 ~ 49.8%, 흡수형태 Type S에 대한 Type M의 예탁유효선량의 상대오차는 15.9 ~ 56.6%, 만성섭취에 대한 급성섭취의 예탁유효선량 상대오차는 5% 이내로 나타났다.

결론적으로 분기별 폐 계측에 의해 우라늄 방사능이 감시되는 방사선작업종사자의 예탁유효선량 평가에 있어서 섭취형태는 평가결과에 거의 영향을 주지 않고, 흡수형태 및 입자크기는 평가결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 다만 흡수형태는 화합물 형태에 따라 적합한 흡수형태

를 적용할 수 있으나 입자크기는 직접 측정하지 않고서는 정확한 입자크기를 알 수 없으므로 분기별 폐 계측 결과에 근거한 예탁유효선량 평가 결과의 오차를 줄이기 위해서는 정확한 입자크기를 측정하여 적용하는 가장 중요하다.

#### 감사의 말씀

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구 개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

7. 이종일, 이태영, 장시영, 이재기, “방사능 입자 크기에 따른 예탁유효선량 평가 오차를 최소화 하기 위한 특별감시기간 결정”, 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, 2003.10.30- 31, 용평 리조트 (2003)
8. International Commission on Radiological Protection, The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public. Version 1.0. CD-Rom distributed by Elsevier Science Ltd., Oxford and New York (1998)

### 참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP Publication 54, ICRP Publication 78, Ann ICRP. 27(3/4), Pergamon Press, Oxford, UK (1997)
2. International Commission on Radiological Protection, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers: Design and Interpretation, ICRP Publication 54, Ann ICRP. 19(1-3), Pergamon Press, Oxford, UK (1988b)
3. International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclide by Workers, ICRP Publication 30, part 1, Ann ICRP. 2(3/4), Pergamon Press, Oxford, UK (1979a)
4. International Commission on Radiological Protection, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, Ann ICRP. 24(1-4), Pergamon Press, Oxford, UK (1994a)
5. Tae Young Lee, Jong Il Lee, Si Young Chang, “The BiDAS: Bioassay Data Analysis Software for Evaluating Radionuclide Intake and Dose”, 2003 International Symposium on Radiation Safety Management, pp. 606-613, November 5-7, Daejeon, Korea (2003)
6. 이종일, 이태영, 장시영 “방사성핵종의 흡입섭취 후 전신, 장기 및 배설물에서의 섭취량 분율 계산”, 한국원자력학회 2002년도 추계학술발표회 논문집, 10.24-25, 용평 리조트 (2002)