

우라늄의 입자크기, 흡수형태 및 섭취형태가
만성 흡입섭취에 의한 내부피폭선량 평가에 미치는 영향

The Effect of AMAD, Absorption Type, and Intake Type on the
Internal Dose Evaluation for the Chronic Inhalation Intake of Uranium

이종일, 이태영, 장시영
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

우라늄의 입자크기(0.1 ~ 10 μm), 흡수형태(Type M, Type S) 및 섭취형태(급성, 연속)가 우라늄을 만성 흡입 섭취하는 방사선작업종사자의 내부피폭선량 평가 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 분석자료로는 작업자의 5년간 분기별 폐 방사능 계측자료를 사용하였고, 여러 조건에 따른 예탁유효선량 평가는 IMIE 코드를 이용하였다. 분석결과 우라늄 흡입섭취에 의한 예탁유효선량은 흡수형태 및 섭취형태에 관계없이 입자크기가 1 μm 일 때 가장 낮았다. 분기별 측정자료에 근거한 예탁유효선량 평가 결과에 가장 큰 영향을 미치는 것은 입자크기였으며, 섭취형태는 평가 결과에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. ICRP 권고(입자크기 5 μm , 흡수형태 Type S)에 따라 평가된 예탁유효선량에 대해서 여러 입자크기(0.1 ~ 10 μm) 따라 평가한 예탁유효선량의 상대오차는 섭취형태에 관계없이 -36 ~ 34%의 분포를 보였다.

Abstract

The effects of AMAD, absorption type, and intake type were compared and analysed for the internal dose evaluation of workers who chronically inhaled uranium. The committed effective doses(E_{50}) based on AMAD, absorption type, and intake type were evaluated using the IMIE(Individual Monitoring of the Internal Exposure) Computer code with 3 monthly lung detection datum during 5 years. As a result, it was shown that the lowest E_{50} at AMAD 1 μm regardless of absorption type or intake type. AMAD affected the greatly results of E_{50} , and intake type didn't really affect the result of E_{50} . The relative error ranges of E_{50} evaluated with each AMAD(0.1 ~ 10 μm) for E_{50} evaluated by ICRP's recommendation(5 μm , Type S) were -36 ~ 34%.

1. 서 론

2003년부터 국내 원자력법으로 내부피폭선량과 관련한 고시가 발효되어 그 어느 때보다 방사선작업종사자의 내부피폭선량 평가에 대한 관심이 높아지고 있다.

방사선작업종사자의 내부피폭선량을 평가하기 위해 작업자의 체내방사능 또는 배설물 중 방사능을 주기적으로 측정 감시하고, 그 측정결과로부터 특정 방사성핵종의 섭취량 및 예탁유효선량을 평가한다. 방사성핵종의 섭취량 및 예탁유효선량을 평가하기 위해서는 여러 환경자료가 필요하며, 이러한 환경자료로는 방사성핵종의 측정대상격실(진신, 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 μm 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 예탁유효선량 평가 결과도 달라진다. 따라서 본 연구에서는 AMAD, 흡수형태, 섭취형태가 우라늄(U_3O_8)을 만성 흡입 섭취하는 방사선작업종사자의 내부피폭선량 평가에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 섭취량 평가에 필요한 기초 자료^{1,2)}

가. 섭취경로 및 측정대상격실

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

나. 입자크기

방사능 입자크기는 작업공정마다 차이가 있을 수 있고, 한 공정을 대상으로 하여 이를 측정한다 할 지라도 입자크기는 하나의 값을 갖는 것이 아니고 분포를 하므로 측정 평균값을 입자크기로 한다. 그러나 일반적으로 방사선 작업장내의 정확한 입자크기 측정값이 없을 경우에는 5 μm 를 기본값으로 본다는 ICRP의 권고에 따라 입자크기를 5 μm 로 가정한다. 본 연구에서 예탁유효선량 평가에 사용한 입자크기는 핵연료 제조 공장에서 일반적으로 관측 가능한 0.1 ~ 10 μm 를 고려하였다.

다. 흡수형태

ICRP 30³⁾에서 정의된 우라늄 화합물에 대한 흡입등급에 따르면, UF₆, UO₂F₂ 및 UO₂(NO₃)₂는 D등급(폐에서의 잔류반감기가 10일 미만), UO₃, UF₄ 및 UCl₄는 W등급(폐에서의 잔류반감기가 10일에서 100일 미만), UO₂와 U₃O₈는 Y등급(폐에서의 잔류반감기가 100일 이상)으로 분류하고 있다. 이러한 D, W, Y 흡입등급은 새로 발표된 ICRP 66 호흡기모델⁴⁾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 10분의 용해 반감기를 가지는 물질이 100%, M은 10분의 용해 반감기를 가지는 물질이 10%, 140일의 용해 반감기를 가지는 물질이 90%로 혼합된 물질, S는 10분의 용해 반감기를 가지는 물질이 0.1%, 7000일의 용해 반감기를 가지는 물질이 99.9%로 혼합된 물질을 말한다. 작업자에 대한 일상 감시에서 흡수형태가 F인 경우에는 폐 계측이 거의 불가능하므로 본 연구에 고려하지 않았다.

라. 섭취형태

방사성핵종의 섭취형태는 크게 급성섭취 및 연속섭취로 나눌 수 있고, 급성섭취는 단일섭취와 반복섭취로 나누어진다. 연속섭취를 가정하여 섭취량을 평가할 경우에는 측정일과 측정일 사이의 기간에서 동일한 섭취율로 연속 섭취하는 것으로 하였다. 그러나 엄격히 말하자면 연속섭취가 아닌 급성 반복섭취로 보아야 할 것이다. 급성 반복섭취로 가정하여 섭취량을 평가할 경우에는 섭취 가능 기간의 중간시점을 섭취시점으로 하였다.

마. 측정 자료

우라늄을 취급하는 방사선작업종사자의 5년간 분기별 폐 방사능 측정자료를 섭취량 및 예탁유효선량 평가에 사용하였다.

3. 입자크기, 흡수형태, 섭취형태에 따른 섭취량 및 예탁유효선량 평가

섭취량 및 예탁유효선량 평가에는 내부피폭선량 계산 코드 IMIE(Individual Monitoring of the Internal Exposure)⁵⁾를 이용하였다. 대상핵종은 ²³⁵U, 섭취경로는 흡입섭취, 측정대상격실은 폐로 하였다. 입자크기, 흡수형태, 섭취형태를 변화시키며 섭취량 및 예탁유효선량을 평가하였다. 급성섭취로 평가할 경우에는 섭취시점을 측정일과 바로 전 측정일의 중간시점으로 가정하였고, 연속섭취로 평가할 경우에는 측정일과 측정일 사이를 섭취기간으로 가정하였다. 분기별 측정에서 폐 방사능이 검출되지 않았거나 검출되었더라도 이전 섭취량에 의한 잔류량 이하일 경우에는 측정 대상분기에 섭취가 없는 것으로 간주하였고, 이때의 측정시점을 다음 분기 평가에서 섭취 시작시점으로 간주하였다.

흡입섭취되는 우라늄은 ²³⁴U, ²³⁵U, ²³⁸U으로 혼합되어 있다. 그러나 폐 계측 값은 ²³⁵U 방사능이므로, 이 값으로부터 ²³⁵U에 대한 섭취량을 구한 후 ²³⁵U 존재비 대 우라늄의 전 방사능에 대한 ²³⁴U, ²³⁵U 및 ²³⁸U의 방사능 비율을 이용하여 ²³⁴U, ²³⁸U의 섭취량을 구하였다. 총 우라늄에 대한 예탁유효선량은 ²³⁴U, ²³⁵U, ²³⁸U의 섭취량에 각 핵종과 입자

크기 및 흡수형태에 따른 예탁유효선량 환산계수⁶⁾를 각각 곱한 값을 모두 더하여 구하였다.

4. 결과 및 고찰

우라늄을 만성 흡입섭취한 방사선작업종사자의 예탁유효선량을 5년간의 분기별 폐 방사능 측정자료에 근거하여 입자크기(0.1, 0.3, 1, 3, 5, 10 μm), 흡수형태(Type S, Type M) 및 섭취형태(급성, 연속)에 따라 평가한 결과는 표 1과 같다. 평가 결과 예탁유효선량은 흡수형태 및 섭취형태에 관계없이 입자크기가 1 μm 일 때가 가장 낮았고, 10 μm 일 때가 가장 높았다. 이것은 우라늄의 단위방사능 섭취당 예탁유효선량 및 섭취 후 시간에 따른 우라늄의 폐잔류율 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다.

표 1. 우라늄을 만성 흡입섭취한 방사선작업종사자의 분기별 폐 방사능 측정자료에 근거하여 우라늄의 입자크기, 흡수형태 및 섭취형태에 따라 평가된 예탁유효선량(mSv)

AMAD(μm)	Type S		Type M	
	급성섭취	연속섭취	급성섭취	연속섭취
0.1	58.5	57.0	60.9	57.6
0.3	56.8	55.2	54.3	51.2
1	56.2	54.8	54.0	50.9
3	76.5	74.4	64.0	60.1
5	88.2	85.7	71.0	66.5
10	119	115	106	98.8

표 1은 우라늄 흡입 섭취로 인한 예탁유효선량이 우라늄의 입자크기, 흡수형태, 섭취형태에 따라 얼마나 달라지는가를 보여준다. 동일한 흡수형태 및 섭취형태 조건 하에서 여러 입자크기에 따른 예탁유효선량의 최대값은 최소값의 1.9 ~ 2.1배에 달한다. 또한 동일한 입자크기 및 섭취형태 조건 하에서 흡수형태에 따라 예탁유효선량을 평가한 결과 Type M 조건에서의 결과가 Type S 조건에서의 결과의 0.78 ~ 1.04배로 나타났다. 그러나 동일한 입자크기 및 흡수형태 조건 하에서 섭취형태에 따라 예탁유효선량을 평가한 결과 급성섭취를 가정하여 구한 결과가 연속섭취를 가정하여 구한 결과의 1.03 ~ 1.07배로 거의 차이가 없었다.

ICRP는 방사선작업종사자에 대한 내부피폭선량 평가시 정확한 자료가 없을 경우 입자크기를 5 μm 로, U_3O_8 화합물에 대한 흡수형태를 Type S로 간주하도록 권고하고 있다. 따라서 예탁유효선량은 이러한 기본 조건(5 μm , Type S) 하에서 작업자의 적합한 섭취형태를 적용하여 평가하여야 한다. 그러나 입자크기 5 μm , 흡수형태 Type S 조건 하에서 섭취형태에 따른 예탁유효선량을 평가한 결과 급성피폭 결과에 대한 연속피폭 결과의

상대오차는 -3%로서 섭취형태는 예탁유효선량에 거의 영향을 주지 않았다. 또한 ICRP 권고(입자크기 5 μm , 흡수형태 Type S)에 따라 평가된 예탁유효선량에 대해서 여러 입자크기(0.1 ~ 10 μm)따라 평가한 예탁유효선량의 상대오차는 섭취형태에 관계없이 -36 ~ 34%의 분포를 보였다.

결과적으로 분기별 폐 계측에 의해 우라늄 방사능이 측정·감시되는 방사선작업종사자의 예탁유효선량 평가에 있어서 섭취형태(급성, 연속)는 평가결과에 거의 영향을 주지 않고, 흡수형태는 평가결과에 어느 정도 영향을 미치며, 입자크기는 평가결과에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러므로 분기별 폐 계측 결과에 근거하여 예탁유효선량을 평가할 경우 정확한 입자크기를 측정하여 적용하는 것이 중요하다.

5. 결론

우라늄(U_3O_8)을 만성 흡입 섭취하는 방사선작업종사자에 대해서 우라늄의 입자크기, 흡수형태 및 섭취형태가 내부피폭선량 평가 결과에 미치는 영향을 작업자의 5년간 분기별 폐 계측 자료에 근거하여 분석하였다. 분석 결과 예탁유효선량은 흡수형태 및 섭취형태에 관계없이 입자크기가 1 μm 일 때 가장 낮았고, 10 μm 일 때 가장 높았다.

우라늄을 흡입 섭취하는 방사선작업자의 내부피폭선량을 분기별 측정·감시 자료에 근거하여 평가할 경우, 평가 결과에 가장 큰 영향을 미치는 것은 입자크기이며, 섭취형태는 평가 결과에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. ICRP 권고(입자크기 5 μm , 흡수형태 Type S)에 따라 평가된 예탁유효선량에 대해서 여러 입자크기(0.1 ~ 10 μm)따라 평가한 예탁유효선량의 상대오차는 섭취형태에 관계없이 -36 ~ 34%의 분포를 보였다. 따라서 분기별 폐 계측 결과에 근거하여 예탁유효선량을 평가할 경우 정확한 입자크기를 측정하여 적용하면 평가 결과의 오차를 크게 줄일 수 있을 것이다.

감사의 말씀

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. International Commission on Radiological Protection, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP Publication 54, Publication No. 78, Elsevier Science, Oxford and New York(1997).
2. International Commission on Radiological Protection, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers: Design and Interpretation, ICRP Publication No. 54(1987).
3. International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclide by Workers, Publication No. 30, part 1, Pergamon Press, Oxford and New York(1979).
4. International Commission on Radiological Protection, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66(1993).
5. V. Berkovski, IMIE(Individual Monitoring of the Internal Exposure) computer code 7.1.10(2002).
6. 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).