

방사능 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가 오차를
최소화하기 위한 특별감시기간 결정

Decision of Special Monitoring Time to Minimize the Difference of the
Committed Effective Dose Evaluated from the Different AMAD

이종일, 이태영, 장시영, 이재기*

한국원자력연구소, 한양대학교*

대전광역시 유성구 덕진동 150, 서울시 성동구 행당동 산 17*

요 약

방사성핵종 ^{131}I , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{238}U 의 흡입섭취 후 경과 시간에 따른 전신, 장기 또는 배설물에서의 단위 방사능 측정값에 대한 예탁유효선량을 여러 방사능 입자크기(AMAD) 별로 계산한 결과, AMAD에 따른 예탁유효선량 평가 결과의 오차는 핵종 및 측정대상격실(전신, 장기 또는 배설물) 그리고 섭취 후 경과시간에 따라 다르게 나타났다. 따라서 각 방사성핵종의 흡입섭취에 따른 예탁유효선량 평가 결과에 AMAD의 영향을 배제하기 위한 특별감시기간을 결정하고 제시하였다. 각 핵종 및 측정대상격실에 따라 방사성핵종 흡입섭취 후 특정기간에 감시를 할 경우 AMAD에 따른 예탁유효선량 평가 결과의 오차를 최소화 할 수 있다.

Abstract

The committed effective doses (CEDs) per measured unit of activity in the bioassay compartments at any time (t) after an acute intake by the inhalation of a radionuclide with a different particle size (AMAD) were calculated and compared. As a result, the relative difference between the CEDs evaluated from the different AMAD is affected by the radionuclide, bioassay compartment, and the time (t) after intake. Therefore a special monitoring time to exclude or reduce the effect of AMAD was decided and presented in the evaluation for the CEDs following an acute intake by the inhalation of a radionuclide. If special monitoring is performed during this presented special time after intake, the relative difference of the evaluated CEDs resulted from AMAD can be excluded or reduced.

1. 서 론

방사선작업자가 방사성물질을 취급하는 방사선작업을 할 경우 방사성물질이 호흡을 통해 인체 내로 흡입될 수 있다. 이렇게 흡입된 방사성물질은 체내 거동을 통해 체외로 빠져 나가거나 물리적으로 붕괴되어 소멸되기 전까지 체내에 머무르면서 방사선을 방출하며, 결국 작업자는 방사선에 피폭된다.

방사성핵종의 흡입섭취로 인한 내부피폭선량은 측정대상격실 즉 전신, 장기 또는 일일 배설물에 대한 방사능 측정값과 섭취 후 측정까지의 경과시간에 따른 측정대상격실에서의 섭취량분율 그리고 단위 방사능 섭취당 예탁유효선량 환산계수를 고려하여 평가할 수 있다. 여기서 측정대상격실에서의 섭취량분율이란 방사성핵종의 단위 방사능 섭취 후 경과시간에 따른 측정대상격실에서의 방사능 양을 뜻한다.

그러나 방사성핵종의 흡입섭취 후 경과 시간에 따른 전신, 장기 또는 일일 배설물에서의 섭취량분율과 단위 방사능 섭취당 예탁유효선량 환산계수는 흡입된 방사성핵종의 방사능 입자크기(AMAD, Activity Median Aerodynamic Diameter)에 따라 다르다. 그러므로 입자크기를 정확히 알지 못하면 방사성핵종의 흡입섭취로 인한 예탁유효선량 평가 결과 또한 부정확해질 수밖에 없다.

작업장마다 흡입된 방사성핵종의 입자크기를 정확히 측정하고, 측정된 입자크기에 대한 전신, 장기 또는 일일 배설물에서의 섭취량분율과 예탁유효선량 환산계수를 적용하여 예탁유효선량을 평가하는 것은 매우 번거롭고 어려운 일이다. 따라서 국제방사선방호위원회(ICRP, International Commission on Radiological Protection)는 방사선작업자의 방사성핵종 흡입섭취로 인한 예탁유효선량을 평가할 때 방사능 입자크기를 모를 경우 5 μm 의 입자크기를 사용하도록 권고하고 있다.¹⁾

그러나 여전히 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가 결과의 오차가 존재하며, 심할 경우 수백에서 수천 퍼센트 이상의 오차를 보인다. 그런데 흡입섭취 후 경과 시간에 따라 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가 결과의 오차가 5% 또는 10% 이하인 곳이 있으며, 이러한 현상은 핵종마다 그리고 측정대상격실마다 다르게 나타난다. 다시 말해서 방사성핵종 흡입섭취 후 특정한 기간이 경과했을 때 전신, 장기 또는 일일 배설물에서의 방사능 측정값을 얻으면 예탁유효선량 평가 결과에 입자크기의 영향을 배제시킬 수 있으며, 그 특정한 기간은 핵종 및 측정대상격실에 따라 다르다. 따라서 본 연구에서는 방사성핵종 단일 급성 흡입섭취에 따른 예탁유효선량 평가 결과에 입자크기의 영향을 배제하기 위한 특별 감시기간을 핵종별 그리고 측정대상격실별로 구하였다.

2. 방법 및 재료

가. 평가에 고려된 조건

본 연구에서 예탁유효선량 평가에 고려한 핵종은 일반적으로 체내오염원으로 주로 발견되는 ¹³¹I(Type F), ¹³⁷Cs(Type F), ⁶⁰Co(Type M, Type S), 그리고 ²³⁸U(Type F, Type M, Type S)이다. 측정대상격실은 전신, 폐, 갑상선, 소변 그리고 대변 중에서 ICRP-78¹⁾에서 핵종에 따라 고려한 격실로 하였다. 방사능 입자크기는 0.1, 1, 5, 10 μm 를 고려하였

다. 단일 급성 흡입섭취 후 경과시간은 1일부터 1000일까지를 적용하였다.

각 핵종의 단일 급성 흡입섭취 후 경과시간에 따른 각 측정대상격실에서의 섭취량분율은 ICRP-66²⁾의 호흡기모델과 ICRP-30³⁾의 소화기모델 그리고 ICRP-78의 생체동역학적 모델에 근거하여 각 입자크기별로 계산하였다.^{4,5)} 또한 방사성핵종 및 여러 입자크기에 따른 단위 방사능 흡입섭취당 예탁유효선량 환산계수는 ICRP Dose Coefficient CD-Rom⁶⁾을 이용하여 구하였으며 표 1과 같다.

표 1. 방사성핵종 및 여러 AMAD에 따른 단위 방사능 흡입섭취당 예탁유효선량 환산계수 (mSv/Bq)

| 핵종 | 흡수형태 | 0.1 μm | 1 μm | 5 μm | 10 μm |
|-------------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| ¹³¹ I | F | 8.8×10^{-6} | 7.6×10^{-6} | 1.1×10^{-5} | 9.3×10^{-6} |
| ¹³⁷ Cs | F | 5.4×10^{-6} | 4.8×10^{-6} | 6.7×10^{-6} | 5.9×10^{-6} |
| ⁶⁰ Co | M | 2.1×10^{-5} | 9.6×10^{-6} | 7.1×10^{-6} | 5.0×10^{-6} |
| | S | 7.3×10^{-5} | 2.9×10^{-5} | 1.7×10^{-5} | 9.9×10^{-6} |
| ²³⁸ U | F | 7.8×10^{-4} | 4.9×10^{-4} | 5.8×10^{-4} | 4.8×10^{-4} |
| | M | 7.7×10^{-3} | 2.6×10^{-3} | 1.6×10^{-3} | 1.1×10^{-3} |
| | S | 2.1×10^{-2} | 7.3×10^{-3} | 5.7×10^{-3} | 3.5×10^{-3} |

나. 예탁유효선량 및 상대오차 평가

방사성핵종 단일 급성 흡입섭취로 인한 예탁유효선량은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$CED = M(t) \times \frac{e_{inh}}{m(t)} \quad (1)$$

여기서 CED는 방사성핵종 단일 급성 흡입섭취로 인한 예탁유효선량, M(t)는 방사성핵종 섭취 후 경과시간 t에서의 측정대상격실에 대한 방사능 측정값, e_{inh} 은 단위 방사능 흡입섭취당 예탁유효선량 환산계수, 그리고 m(t)는 방사성핵종 섭취 후 경과시간 t에서 측정대상격실에 대한 섭취량분율을 뜻한다.

e_{inh} 은 핵종 및 폐에서의 흡수형태 그리고 방사능 입자크기에 따라 다르고, m(t)는 핵종 및 폐에서의 흡수형태, 측정대상격실, 흡입섭취 후 경과시간 그리고 방사능 입자크기에 따라 다르다. 따라서 예탁유효선량 평가 결과는 방사능 입자크기의 영향을 받는다.

방사능 입자크기를 알지 못할 경우에는 ICRP 권고에 따라 입자크기를 5 μm로 가정하여 방사선작업종사자에 대한 예탁유효선량을 평가하고 있다. 따라서 입자크기를 5 μm로 가정하므로써 발생할 수 있는 예탁유효선량 평가 결과의 오차를 계산하였다. 즉, 입자크기가 5 μm인 경우의 예탁유효선량에 대한 입자크기가 x μm인 경우의 예탁유효선량의 상대오차(Relative Error)를 다음 식과 같이 구하였다.

$$Relative\ Error = \left(\frac{m(5\ \mu m, t) \square e_{inh}(x\ \mu m)}{m(x\ \mu m, t) \square e_{inh}(5\ \mu m)} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

여기서 m(5 μm, t)는 흡입된 방사성핵종의 방사능 입자크기가 5 μm인 경우 흡입 후 시간

t에서 전신, 장기 또는 일일 배설물에서의 섭취량분율이고, $m(x \mu\text{m}, t)$ 는 흡입된 방사성핵종의 방사능 입자크기가 $x \mu\text{m}$ 인 경우 흡입 후 시간 t에서 전신, 장기 또는 일일 배설물에서의 섭취량분율이다. 또한 $e_{\text{inh}}(5 \mu\text{m})$ 는 입자크기 $5 \mu\text{m}$ 에 대한 단위 방사능 흡입섭취당 예탁유효선량 환산계수(mSv/Bq)이고, $e_{\text{inh}}(x \mu\text{m})$ 는 입자크기 $x \mu\text{m}$ 에 대한 단위 방사능 흡입섭취당 예탁유효선량 환산계수(mSv/Bq)이다.

각 핵종 및 대상격실에 대해 식 (2)로부터 구한 예탁유효선량 상대오차가 5% 또는 10% 이하가 되는 섭취 후 경과시간을 방사성핵종의 흡입섭취에 따른 예탁유효선량 평가 결과에 방사능 입자크기의 영향을 배제하기 위한 특별감시기간으로 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

각 핵종의 단일 급성 흡입섭취 후 경과시간에 따른 각 측정대상격실에서의 방사능 측정값이 1 Bq인 경우에 대한 예탁유효선량을 식 (1)에 의해 구하였으며, 대표로 ^{60}Co (Type M)에 대해서 각 측정대상격실별로 입자크기에 따라 그림 1에 나타내었다.

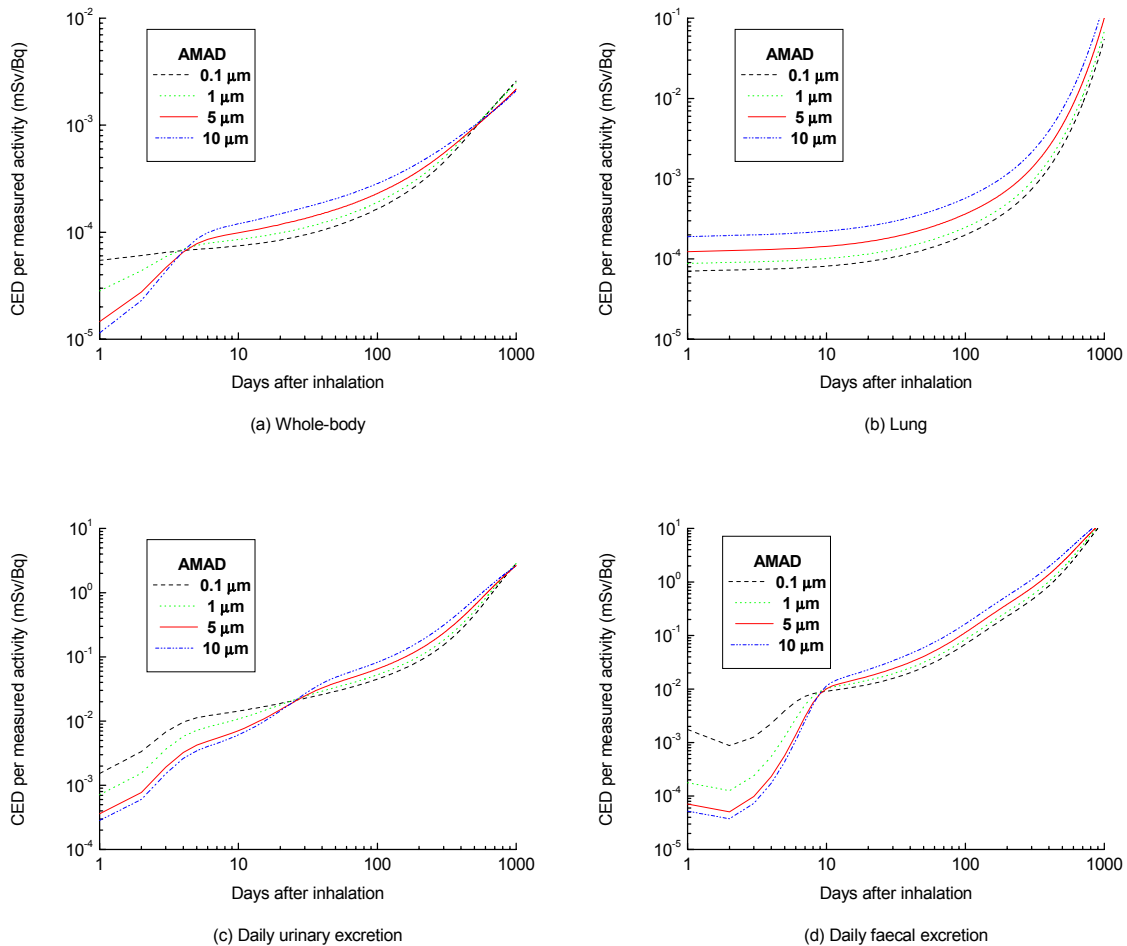


그림 1. 여러 방사능 입자크기의 ^{60}Co (Type M) 급성 흡입섭취 후 경과시간에 따른 각 측정대상격실에서의 측정 방사능당 예탁유효선량 평가 결과.

그림에서 볼 수 있듯이 섭취 후 특정 경과 시간에서는 예탁유효선량이 입자크기와 관계없이 거의 같다. 이러한 특정 경과 시간은 핵종마다 다를 뿐만 아니라 측정대상격실에 따라 다르다. 따라서 식 (2)에 의해 구한 입자크기에 따른 예탁유효선량 상대오차가 5% 이하인 기간과 10% 이하인 기간을 핵종별, 측정대상격실별로 정리하여 표 2와 표 3에 나타내었다.

표 2. 측정대상격실의 방사능 측정값으로부터 예탁유효선량을 평가할 경우 AMAD에 따른 예탁유효선량 평가 오차^{a)}를 5% 이하로 줄일 수 있는 방사성핵종 급성 흡입섭취 후 특별감시기간

| 핵종 | 흡수형태 | 측정대상격실별 특별감시기간 (days) | | | | |
|-------------------|---------|-----------------------|--------|--------|----------------|----------|
| | | 전신 | 폐 | 갑상선 | 소변 | 대변 |
| ¹³¹ I | F | - ^{b)} | - | 1~1000 | 1~1000 | - |
| ¹³⁷ Cs | F | 3~1000 | - | - | 1~1000 | - |
| ⁶⁰ Co | M | 481~564 | 해당기간없음 | - | 27, 842~925 | 979~1000 |
| | S | 해당기간없음 | 해당기간없음 | - | 해당기간없음 | 해당기간없음 |
| ²³⁸ U | F, M, S | - | 해당기간없음 | - | 해당기간없음 | 해당기간없음 |

- a) AMAD 5 μm 인 경우에 대한 AMAD 0.1, 1, 10 μm 인 경우의 각 예탁유효선량 평가결과의 오차
b) - : 관련 핵종에 대한 측정대상격실로 고려하지 않음

표 3. 측정대상격실의 방사능 측정값으로부터 예탁유효선량을 평가할 경우 AMAD에 따른 예탁유효선량 평가 오차^{a)}를 10% 이하로 줄일 수 있는 방사성핵종 급성 흡입섭취 후 특별감시기간

| 핵종 | 흡수형태 | 측정대상격실별 특별감시기간 (days) | | | | |
|-------------------|------|-----------------------|--------|--------|--------------------|----------|
| | | 전신 | 폐 | 갑상선 | 소변 | 대변 |
| ¹³¹ I | F | - ^{b)} | - | 1~1000 | 1~1000 | - |
| ¹³⁷ Cs | F | 3~1000 | - | - | 1~1000 | - |
| ⁶⁰ Co | M | 4, 401~691 | 해당기간없음 | - | 24~31, 763~1000 | 902~1000 |
| | S | 5~6 | 해당기간없음 | - | 469~1000 | 11 |
| ²³⁸ U | F, M | - | 해당기간없음 | - | 해당기간없음 | 해당기간없음 |
| | S | - | 해당기간없음 | - | 27 | 해당기간없음 |

- a) AMAD 5 μm 인 경우에 대한 AMAD 0.1, 1, 10 μm 인 경우의 각 예탁유효선량 평가결과의 오차
b) - : 관련 핵종에 대한 측정대상격실로 고려하지 않음

방사성핵종의 급성 흡입섭취로 인한 예탁유효선량 평가에 있어서 방사능 입자크기를 5 μm 로 가정할 경우, ^{131}I (Type F) 및 ^{137}Cs (Type F)은 섭취 후 거의 모든 시점에서 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가결과의 오차가 5% 이하로 나타났다. 반면에 ^{238}U (Type M)은 섭취 후 모든 시점에서 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가결과의 오차가 10%를 초과하였고, 심지어 섭취 후 1일째에는 소변의 경우 327%, 대변의 경우 4,070%의 오차까지 보였다. 따라서 이러한 경우에는 섭취 후 2주 이상 경과한 시점에서 특별감시를 수행하면 오차를 50% 이하로 줄일 수 있다. ^{238}U (Type S)의 경우에는 오직 측정대상격실이 소변인 경우에 대해서 섭취 후 27일째에만 10% 이하의 오차를 만족하였다. 또한 ^{60}Co 은 섭취 후 특정 경과시간에서 감시를 할 경우 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가결과의 오차가 5% 또는 10% 이하로 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 각 핵종 및 측정대상격실에 따라 방사능 섭취 후 특정 경과 시간에 특별감시를 할 경우 방사능 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가 결과의 오차를 배제하거나 줄일 수 있을 것이다.

4. 결론

주요 체내오염 핵종인 ^{131}I , ^{137}Cs , ^{60}Co 그리고 ^{238}U 의 급성 흡입섭취 후 경과시간에 따른 각 측정대상격실(전신, 폐, 갑상선, 소변, 대변)에서의 측정 단위 방사능당 예탁유효선량을 0.1, 1, 5, 10 μm 의 방사능 입자크기별로 계산하여 비교하였다. 그 결과 방사능 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가 결과의 오차는 핵종 및 측정대상격실 그리고 섭취 후 경과시간에 따라 다르게 나타나고, 특정 기간에 오차가 작아지는 것을 알 수 있었다.

따라서 ^{131}I , ^{137}Cs , ^{60}Co 그리고 ^{238}U 에 대해서 각 측정대상격실별로 방사능 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가 결과의 오차를 5% 또는 10% 이하로 낮출 수 있는 섭취 후 특별감시기간을 제시하였다. 이와 같이 각 핵종 및 측정대상격실에 따라 방사성핵종 흡입섭취 후 특정기간에 감시를 할 경우 방사능 입자크기에 따른 예탁유효선량 평가 결과의 오차를 배제하거나 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, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66(1993).
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. 이종일, 이태영, 장시영, "방사성핵종의 흡입섭취 후 전신, 장기 및 배설물에서의 섭취량 분을 계산", 한국원자력학회 2002 추계학술발표회 논문집(2002).
5. 이종일, 이태영, 장시영, "내부피폭선량 계산 전산코드 개발", 방사선방어학회 2003 춘계학술발표회 논문집(2003).
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).