

천연방사성물질을 함유한 공기 중 부유입자 흡입 시 입자의 물리화학적 특성에 따른 호흡방사선량 민감도 평가

김시영*, 최철규*, 박일*, 김용건*, 최원철*·†, 김광표*

*경희대학교, †한국원자력안전기술원

2015년 10월 30일 접수 / 2015년 11월 24일 1차 수정 / 2015년 11월 24일 채택

천연방사성물질을 취급하는 산업시설의 종사자들은 공정에서 발생하는 공기 중 입자의 흡입에 의해 만성적인 내부피폭을 받을 수 있다. 방사성 물질을 함유한 공기 중 입자 흡입에 의한 내부피폭은 입자의 크기, 모양, 밀도, 흡수형태에 따라 달라진다. 본 연구에서는 공기 중 부유 입자의 물리화학적 특성에 따른 피폭방사선량 민감도를 평가하였다. 흡입에 의한 내부피폭선량 평가는 국제방사선방호위원회 66 인체호흡기모델을 이용하였다. 일반적으로 입자의 크기가 감소할수록 예탁유효선량은 증가하는 경향을 보였으며, 입자 크기 0.01 μm 와 100 μm 에서의 피폭방사선량은 ^{238}U 의 경우 약 100 배, ^{230}Th 의 경우 약 50 배 차이를 보였다. 모양인자가 작을수록 피폭방사선량은 높게 나타났으며, 모양인자가 1 일 때 피폭방사선량은 모양인자가 2 일 때 보다 18% 높았다. 입자의 밀도가 증가할수록 피폭방사선량은 높게 나타났으며, 입자 밀도가 11 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 인 경우 피폭방사선량은 밀도가 0.7 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 인 경우에 비해 60% 높게 나타났다. ^{238}U 의 경우 피폭방사선량은 흡수형태 S, M, F 순으로 높게 나타났으며, 흡수형태 S의 경우 F에 비해 피폭방사선량이 약 9 배 높게 나타났다. ^{230}Th 의 경우 피폭방사선량은 흡수형태 F, M, S 순으로 높게 나타났으며, 흡수형태 F의 경우 S에 비해 피폭방사선량이 약 16 배 높게 나타났다. 민감도 평가에서 나타난 것처럼 입자의 물리화학적 특성을 고려하지 않고 피폭방사선량을 평가하는 경우 평가값은 실제값에 비해 수십 혹은 수백 배 이상 왜곡될 수 있다. 천연방사성물질을 취급하는 작업장에서 종사자의 정확한 피폭방사선량 평가를 위해서는 취급하는 물질, 작업환경 등을 고려하고 입자의 물리화학적 특성값을 실측하여 실시하는 것이 바람직하다.

중심어 : 천연방사성핵종, 인체호흡기모델, 입자의 물리화학적 특성, 호흡선량, 입자특성 민감도

1. 서론

국내에서는 생활주변에서 접할 수 있는 방사선의 안전관리에 관한 사항을 규정하고 국민의 건강과 환경을 보호하기 위해 생활주변방사선 안전관리법을 2012년부터 시행하고 있다(생활주변방사선 안전관리법, 법률 제 10908호). 생활주변방사선 안전관리법의 주요 목적 중 하나는 원료물질, 공정부산물, 가공제품에 함유된 천연방사성물질(naturally occurring radioactive material, NORM)에서 방출되는 방사선으로부터 종사자의 안전성을 확보하는 것이다. 천연방사성물질을 취급하는 산업장의 종사자는 원료물질 등을 취급하는 과정에서 내부피폭 및 외부피폭이 발생할 수 있다.

천연방사성물질 함유된 원료물질 등을 취급하는 산업장에서 종사자의 피폭방사선량은 주로 공기 중 부유입자의 흡입에 의한 내부피폭에 기인한다. 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서는 입자 흡입에 의한 내부피폭선량 평가

를 위해 인체호흡기모델(human respiratory tract model, HRTM)을 개발하였다[1]. 입자 흡입에 의한 내부피폭 선량은 방사성핵종이 침착되는 장기 또는 침착율에 따라 상이하며, 침착 장기 및 침착율은 입자의 물리화학적 특성, 즉 입자의 크기, 밀도, 모양, 입자에 포함된 방사성핵종의 폐 내에서의 흡수형태에 따라 달라진다. 따라서 국제방사선방호위원회에서는 정확한 내부피폭선량 평가를 위해 실측된 입자의 물리화학적 특성값을 적용하여 피폭방사선량을 평가할 것을 권고하고 있으며, 만일 입자 물리화학적 특성값을 실측하기 어려운 경우를 대비하여 입자 물리화학적 특성에 대한 기본값을 제시하였다. 하지만 공기 중 부유 입자의 특성은 평가하고자 하는 지역에서 취급하는 물질, 작업환경 등에 따라 상이하므로 입자의 특성에 대한 기본값을 적용하여 흡입에 의한 피폭방사선량을 평가하는 경우 평가값은 실제값에 비해 과대 또는 과소평가 될 가능성이 있다[1]. 선행연구 결과에 의하면 작업장에서 발생하는 공기 중 부유입자의 방사능중량 공기역학적직경(activity median aerodynamic diameter, AMAD)은 0.12~25 μm 로 광범위하게 분포하고 있으며, 입자의 밀도 및 모양인자의 경우도 각각 0.7~11

책임저자 : 김광표, kpkim@khu.ac.kr
경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지 경희대학교 원자력공학과

$g \cdot cm^{-3}$, 1.1~1.9 으로 다양하게 나타났다[2-5]. 또한 방사성핵종의 흡수형태의 경우 방사성핵종의 화학적 형태 또한 핵종을 포함하고 있는 입자의 물리화학적 특성에 따라 크게 달라질 수 있다[1]. 따라서 공기 중 부유입자 흡입에 의한 정확한 내부피폭선량 평가를 위해서는 작업 환경에 따라 달라지는 입자의 물리화학적 특성이 작업종사자의 피폭방사선량에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위한 민감도 평가가 필요하다.

본 연구에서는 공기 중 부유입자의 물리화학적 특성에 따른 흡입에 의한 피폭방사선량 민감도를 평가하였다. 민감도 평가는 천연방사성핵종 중 가장 대표적인 ^{238}U 과 ^{230}Th 핵종에 대하여 입자의 주요 특성인 크기, 모양, 밀도, 흡수형태를 대상으로 수행하였다. 입자의 특성에 따른 영향은 입자를 흡입하였을 때 받는 예탁유효선량으로 평가하였으며, 예탁유효선량은 ICRP 66 보고서의 인체호흡기모델을 이용하여 계산하였다.

2. 재료 및 방법

입자의 물리화학적 특성에 따른 흡입에 의한 피폭방사선량의 민감도 평가는 입자의 크기, 모양, 밀도, 흡수형태를 대상으로 수행되었다. 입자 크기는 흡입에 의한 피폭방사선량에 크게 영향을 미치는 특성 중 하나이다. 흡입에 의해 체내로 들어온 방사성핵종을 포함한 입자는 그 크기에 따라 호흡기 내 침착 부위가 달라지므로 결국 입자 크기에 따라 피폭방사선량도 달라진다. 국제방사선방호위원회에서는 입자 흡입에 의한 피폭방사선량 평가 시 입자의 물리화학적 특성을 실측하여 사용할 것을 권고하고 있다. 만일 입자의 크기에 대한 실측이 어려운 경우, 그 기본값으로 작업자의 흡입에 대해서는 $5 \mu m$ 를, 일반인의 경우에는 $1 \mu m$ 를 제시하고 있다[1]. 하지만 실제 작업장에서의 공기 중 부유 입자의 크기는 매우 광범위하다. Dorrian 등의 연구에 의하면 작업환경에서 측정된 AMAD는 $0.12 \mu m$ 에서 최대 $25 \mu m$ 까지로 다양하게 분포하였다[2]. 또한 ICRP 66 보고서에서는 $0.001 \sim 100 \mu m$ 크기의 입자 범위에 대해 호흡기 영역별 입자 침착 분율을 제시하고 있다[1]. 본 연구에서는 실제 작업현장에서 존재할 수 있는 $0.01 \sim 100 \mu m$ 의 입자 크기 범위에 대해 피폭방사선량 민감도를 평가하였다.

호흡기 내 입자의 침착 및 제거는 크게 입자의 공기역학적 현상과 열역학적 현상으로 이루어지는데, 입자의 모양은 상기 두 가지 특성인자 관계를 정립하는 역할을 한다. 또한 입자의 모양은 입자표면적에 대한 입자의 체적의 비를 결정하는데, 구형태의 모양일수록 입자의 표면적은 체적에 비해 감소하게 된다. 이는 생물학적 관점에서 매우 중요하며, 특히 호흡기 내에 입자의 침착속도에 영향을 미친다. 만일 입자의 모양에 대한 실측이 어려운 경우 작업자 및 일반인에 대하여 모양 인자값 1.5를 사용할 것을 권고하고 있다[1]. 그러나 다양한 물질에서 발생하는 입자는 불규칙한 형상을 갖는다. 실제 공기 중 입자의 모양인자는 약 1.1~1.9 범위의 분포를 보이

며, 구형의 입자의 경우 모양 인자값은 1 그리고 정육면체 형태의 경우 모양 인자값은 1.08이다[3,4]. 원통형의 모양인자는 축 방향과 축 비에 따라 값이 결정되는데 평균 축방향에 대해 축비가 2와 10일 때 모양인자는 각각 1.09와 1.43이다. 따라서 본 연구에서는 1.0, 1.5, 2.0의 모양인자에 대해 피폭방사선량 민감도를 평가하였다.

입자의 밀도 또한 입자의 공기역학적 현상과 열역학적 현상의 관계를 정립하는 역할을 한다. 국제방사선방호위원회에서는 입자의 밀도에 대한 실측이 어려운 경우 밀도값 $3 g \cdot cm^{-3}$ 를 사용할 것을 권고하고 있다[1]. 그러나 공기 중 입자의 밀도는 작업환경 등에 따라 매우 다양하다. 연구에 의하면 일반적인 공기 중 부유 입자의 밀도는 $0.7 \sim 11 g \cdot cm^{-3}$ 까지 다양하였다[5]. 따라서 본 연구에서는 $0.7, 3.0, 11 g \cdot cm^{-3}$ 의 입자밀도에 대해 피폭방사선량 민감도를 평가하였다.

방사성핵종을 포함한 입자는 흡입된 후 다양한 호흡기 영역에 침착된다. 이후 각 호흡기 영역에 정체되는 시간, 다른 영역으로 이동하는 비율 등이 다르지만 최종적으로 폐 내에서 용해되어 혈액으로 흡수된다. 방사성핵종은 흡수형태에 따라 체내에서 핵종의 거동이 다르게 나타나기 때문에 결국 피폭방사선량도 달라진다. 국제방사선방호위원회의 인체호흡기모델에서는 특정 방사성핵종 화합물에 대한 정확한 흡수비율을 알지 못하는 경우 기본값으로 흡수형태 F, M, S를 사용할 것을 권고하고 있다[1]. 폐 내에서의 흡수형태는 방사성핵종의 화학적 형태 또한 핵종을 포함하고 있는 입자의 물리화학적 특성에 따라 크게 달라질 수 있다[1]. 국제방사선방호위원회에서는 방사성핵종의 흡수형태에 대한 실측이 어려운 경우 우라늄 핵종에 대해서는 흡수형태 M, 토륨 핵종에 대해서는 흡수형태 S를 사용할 것을 권고하고 있다. 방사성핵종의 폐 내에서의 용해도 연구는 까다로운 편이며, 현재까지 천연방사성핵종을 포함한 입자의 폐 내에서의 용해도 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 흡수형태 F, M, S에 대해 피폭방사선량 민감도를 평가하였다.

공기 중 부유입자의 물리화학적 특성에 따른 흡입에 의한 피폭방사선량 민감도 평가를 수행하기 위해 작업종사자가 $^{238}U, ^{230}Th$ 핵종이 함유된 입자를 흡입하였을 때 받는 단위 섭취당 50년간의 예탁유효선량을 계산하였다. 작업자의 호흡률은 $1.2 m^3 \cdot h^{-1}$ 로 가정하였다. 피폭방사선량은 ICRP 66 보고서의 인체호흡기모델을 기반으로 개발된 선량평가 프로그램인 IMBA(Integrated Modules for Bioassay Analysis)를 사용하였다. 각각의 입자의 특성에 따른 영향을 평가하기 위해 평가 대상 인자를 변수로 하고, 이외의 인자는 국제방사선방호위원회 인체호흡기모델에서 제시한 입자 특성 기본값으로 고정하였다. 입자의 특성 범위는 문헌조사 등을 통해 실제 공기 중 입자가 가질 수 있는 현실성 있는 범위를 선정하였다 [2-5]. Table 1.에 국제방사선방호위원회 인체호흡기모델에서 제시한 공기 중 부유 입자의 기본 특성값과 본 연구의 민감도 평가를 위해서 사용한 입자의 특성 범위를 요약하였다.

Table 1. Reference Parameter Values of Airborne Particulates in ICRP 66 Human Respiratory Tract Model and Parameter Values Used for Sensitivity Analysis.

Particulate property	ICRP reference value	Input parameters for sensitivity analysis
Particulate size	5 μm (Workplace) 1 μm (The public)	0.01 ~ 100 μm
Shape factor	1.5	1.0, 1.5, 2.0
Density	3 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.7, 3.0, 11 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Absorption type	Type F Type M (U) Type S (Th)	Type F, M, S

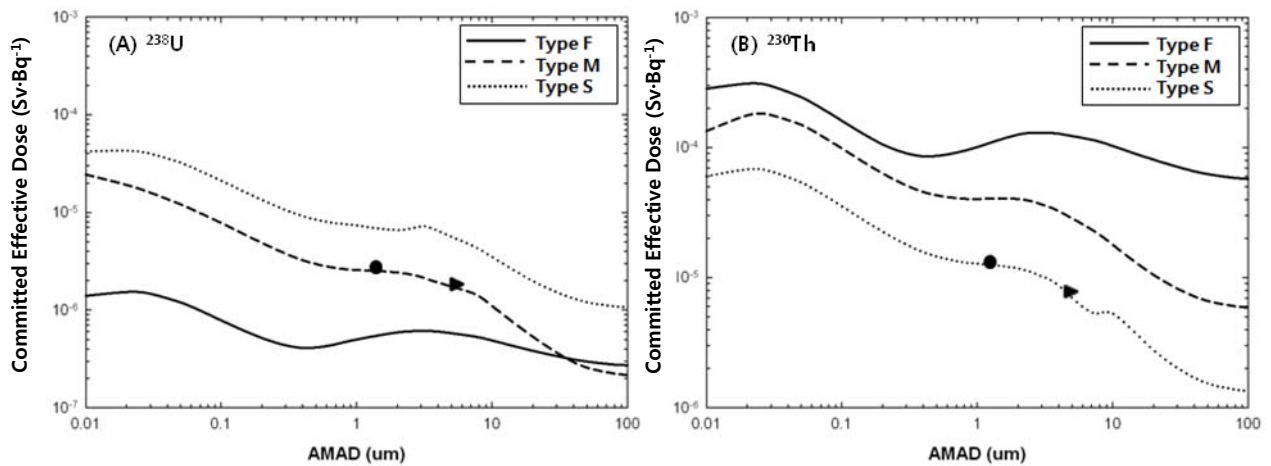


Fig. 1. Committed effective dose due to inhalation of airborne particulates by particulate size and radionuclide absorption type: (A) ^{238}U , (B) ^{230}Th . Type F, M, and S means fast (F), moderate (M), and slow (S) absorption of radionuclides in the lung to the blood. In the absence of particulate size information, ICRP-66 HRTM recommended to use 5 μm and 1 μm for workplace exposures and general public exposures, respectively (●: Workplace, ▲: The public).

3. 결과 및 논의

3.1 입자의 크기에 따른 피폭방사선량

Fig. 1에 공기 중 입자의 크기에 따른 피폭방사선량의 변화를 나타내었다. 일반적으로 공기 중 부유 입자 흡입에 의한 피폭방사선량은 0.1~1 μm 구간에서는 입자의 크기에 따라 감소하였으며, 그 이후 3 μm 까지는 증가하다가, 다시 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 국제방사선방호위원회에서는 AMAD를 작업자의 흡입에 대해서는 5 μm 를, 일반인의 경우에는 1 μm 를 사용할 것을 권고하고 있는데, 입자 크기가 1 μm 일 때 피폭방사선량은 입자 크기 5 μm 와 비교하여 ^{238}U 의 경우 약 1.5 배, ^{230}Th 의 경우 약 1.8 배 높게 나타났다. 핵종 ^{238}U (흡수형태 M)의 경우 0.01 μm 에서의 피폭방사선량은 100 μm 에서 보다 약 100 배 이상 높게 나타났으며, 핵종 ^{230}Th (흡수형태 S)의 경우 약 50 배 정도 높게 나타났다.

일반적으로 입자의 크기가 감소할수록 피폭방사선량이 증가하는 추세를 보이는 이유는 입자의 크기가 작을수록 입자가 호흡기 내의 깊은 곳까지 침착되어 폐에 머

무는 시간이 증가하기 때문이다. 입자의 흡입으로 인한 피폭방사선량은 폐 선량이 대부분을 차지한다. 호흡기는 크게 4 가지 영역인 외흉부(ET) 영역, 기관지(BB) 영역, 세기관지(bb) 영역, 폐포간질(AL) 영역으로 나누어지는데, 약 5~10 μm 크기 이상의 입자들은 외흉부 영역에 속하는 비강의 점막 물질로 이루어진 표면에 충돌을 일으킨다[5]. 비강은 코의 등 쪽에 있는 코 안의 빈 공간으로써, 이곳에서 충돌하는 비교적 큰 입자들은 인체 밖으로 내보내어 진다. 약 5~10 μm 크기 이하의 입자들은 외비공을 통하여 일부는 인후두에 도달하게 된다. 인후두는 공기의 통로 역할을 하는 곳으로써, 이곳에 도달한 입자들은 입자의 크기에 따라 호흡기 영역에 침착된다. 기관지 영역, 세기관지 영역, 폐포간질 영역은 공기의 전달을 담당하는 기도 분지로 구성되어 있으며, 분지 수가 증가할수록 분지의 직경은 감소한다. 따라서 작은 입자는 호흡기 영역 안쪽에서 침착되며, 머무르는 시간도 증가한다.

입자 크기에 따른 피폭방사선량은 호흡기의 해부학적 구조에 따른 입자의 침착뿐만 아니라 기체 분자의 충돌과 같은 열역학적 특성과 중력에 의한 침강 및 관성에

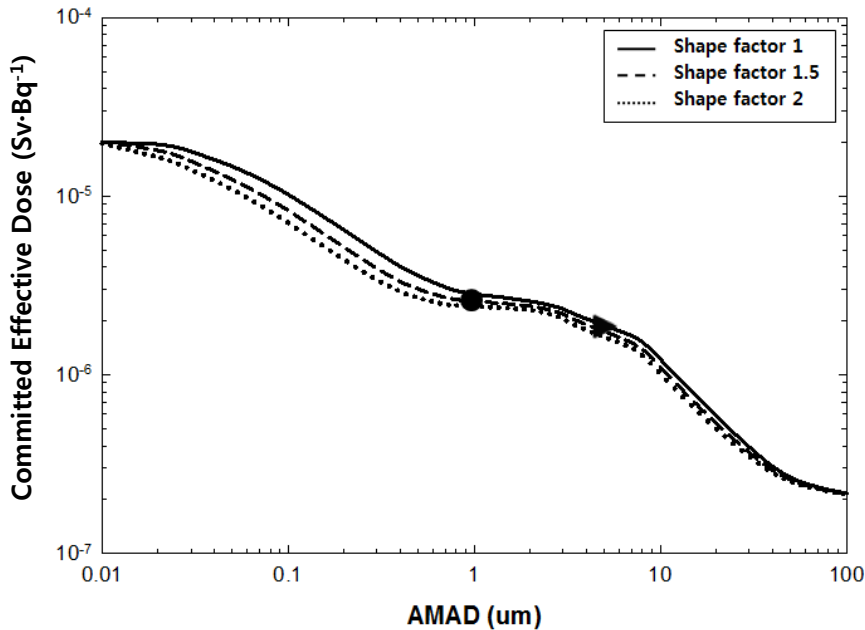


Fig. 2. Committed effective dose due to inhalation of airborne particulates by particulate shape factor. In the absence of shape factor information, ICRP-66 HRTM recommended to use the value of 1.5 (●: Workplace, ▲: The public).

의한 충돌과 같은 공기역학적 특성에 따라 달라진다. 약 0.01 μm 크기의 입자는 호흡기 내에서 확산 운동에 의해 폐포간질 영역에서 약 60%가 침착되지만, 이보다 입자의 크기가 증가할수록 호흡기 내에서 입자의 확산 운동이 감소한다[1]. 이에 따라 입자가 호흡기에 침착되는 비율도 감소한다. 약 0.1~1 μm 크기의 입자들은 호흡기 내에서의 공기역학적 영향과 열역학적 영향을 동시에 받게 되어 각각의 영향은 다소 적게 나타난다. 따라서 이 범위에 속하는 입자들의 경우 호흡기 영역 내의 침착 분율이 낮아진다. 그러나 1 μm 크기 이상의 입자들은 공기역학적 효과인 중력에 의한 침강 및 관성 충돌 효과가 우세하게 작용하여 호흡기 내의 침착 분율이 증가하게 된다. 약 5 μm 이상 크기의 입자들은 대부분 외호부 영역에 침착되어 타 호흡기 영역에서의 침착은 급격하게 감소한다. 외호부 영역에 침착되는 입자들의 대부분은 인체 외부로 제거되므로 약 5~100 μm 범위의 입자들을 흡입하였을 경우 전체적인 호흡기의 방사선량은 감소한다.

3.2 입자의 모양에 따른 피폭방사선량

Fig. 2에 공기 중 입자의 모양인자에 따른 피폭방사선량의 변화를 나타내었다. 일반적으로 공기 중 입자의 흡입에 의한 피폭방사선량은 입자의 모양인자가 감소할수록 증가하는 경향을 보였다. 입자 크기가 5 μm 인 경우, 국제방사선방호위원회 인체호흡기모델에서 제시한 입자의 기본 특성값인 1.5와 비교하여 예탁유효선량은 모양인자가 1인 경우 약 10% 높게, 모양인자가 2인 경우 약 7% 낮게 나타났다. 입자의 모양인자가 증가할수록 예탁유효선량이 감소하는 이유는 입자의 형태가 구형에서 벗어날수록 호흡기 내의 침착되는 비율이 감소하기 때문이

다. 입자의 모양인자는 호흡기 내 입자의 항력과 낙하 속도에 영향을 미친다. 호흡기 내에서 입자가 중력에 의해 낙하할 경우, 중력이 작용하는 반대 방향으로 입자에 저항력이 작용한다. 입자의 모양인자가 증가할수록 입자에 대한 저항력은 증가하며, 입자의 낙하 속도는 감소한다 [5].

피폭방사선량에 대한 모양인자의 영향은 입자의 크기에 따라서도 다르게 나타났다. 입자의 크기가 0.01 μm 인 경우 모양인자에 관계없이 예탁유효선량은 약 $2 \times 10^{-5} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ 값으로 나타났으나, 약 0.1 μm 까지 입자의 크기가 증가할수록 모양인자에 따른 피폭방사선량의 차이가 증가하였다. 이후 입자의 크기가 증가할수록 모양인자에 따른 피폭방사선량의 차이는 점차 감소하다가, 100 μm 의 입자 크기에서는 약 $2 \times 10^{-7} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ 값으로 수렴하였다. 입자의 모양인자에 따른 내부피폭선량의 차이가 입자의 크기에 따라서 다르게 나타나는 이유는 인체에 흡입된 입자의 호흡기 영역별 침착과 입자의 열역학적 그리고 공기역학적 특성과 관련된다. 동일한 공기역학적 직경의 입자에 대해서도 모양인자가 증가할수록 확산에 의해 영향을 받는 열역학적 직경은 증가한다. 약 1 μm 크기의 입자는 공기역학적 효과와 열역학적 효과를 동시에 받게 되므로, 모양인자에 따른 피폭방사선량의 차이는 점차 감소하게 된다. 약 1~100 μm 의 직경을 갖는 입자의 경우 호흡기 내에서 공기역학적 효과인 중력에 의한 침강 및 관성 충돌이 우세하게 나타난다. 공기역학적 직경은 모양인자가 다를지라도 동일한 공기역학적 효과를 나타내는 입자의 직경이다. 따라서 입자의 크기가 약 1~100 μm 인 경우에는 모양인자에 따른 예탁유효선량이 유사하게 나타났다.

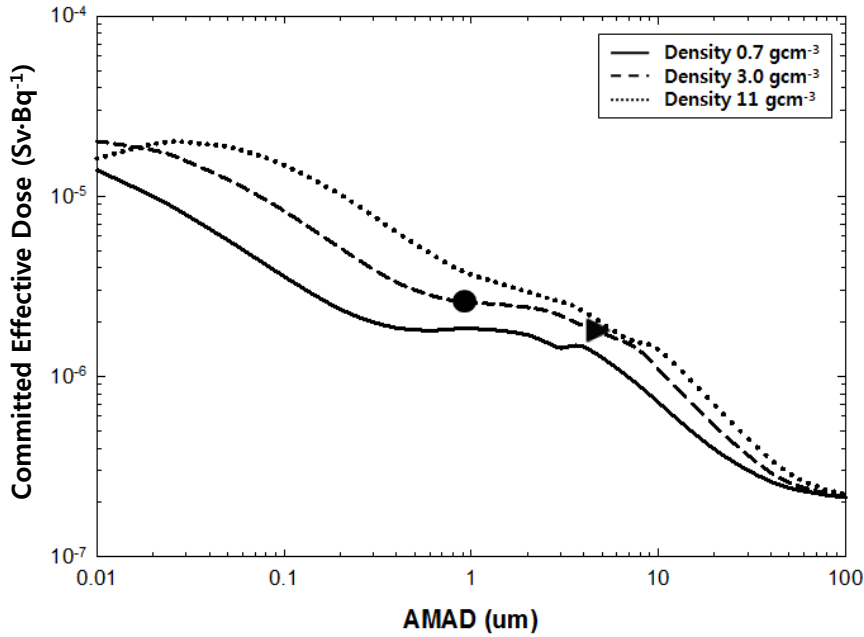


Fig. 3. Committed effective dose due to inhalation of airborne particulates by particulate mass density. In the absence of mass information, ICRP-66 HRTM recommended to use the value of $3.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (●: Workplace, ▲: the public).

3.3 입자의 밀도에 따른 피폭방사선량

Fig. 3.에 공기 중 입자의 밀도에 따른 피폭방사선량의 변화를 나타내었다. 일반적으로 입자의 밀도가 증가할수록 호흡에 의한 피폭방사선량은 증가하는 경향을 보였다. 입자 크기가 $5 \mu\text{m}$ 인 경우, 국제방사선방호위원회 인체호흡기모델에서 제시한 입자의 밀도 기본 특성값인 $3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 과 비교하여 예탁유효선량은 밀도가 $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 인 경우 약 23% 낮게, 밀도가 $11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 인 경우 약 23% 높게 나타났다. 입자의 밀도가 증가할수록 피폭방사선량이 증가하는 이유는 입자의 밀도가 증가할수록 호흡기 내에서 입자 침착 비율이 증가하기 때문이다. 입자의 침착 주요 원리 중 하나는 중력에 의한 침착이며, 입자의 중력은 입자의 밀도에 비례한다.

피폭방사선량에 대한 입자의 밀도 영향은 입자의 크기에 따라 서로 다르게 나타났다. 입자의 크기가 $0.01 \mu\text{m}$ 인 경우 밀도값에 관계없이 약 $2 \times 10^{-5} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ 으로 비슷하게 나타났으나, 약 $0.1 \mu\text{m}$ 까지 입자의 크기가 증가할수록 입자 밀도에 따른 피폭방사선량의 차이가 증가하였다. 이후 입자의 크기가 증가할수록 입자의 밀도에 따른 피폭방사선량의 차이는 점차 감소하다가, $100 \mu\text{m}$ 의 입자 크기에서는 약 $2 \times 10^{-7} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ 으로 수렴하였다. 입자의 밀도에 따른 피폭방사선량의 차이가 입자의 크기에 따라 다르게 나타나는 이유는 공기역학적 특성에 기인한다. 약 $0.01 \mu\text{m}$ 크기의 입자들은 입자의 밀도에 관계없이 호흡기 내 깊은 곳까지 침착되지만, 약 $0.01\text{-}1 \mu\text{m}$ 크기 범위의 입자들은 주로 열역학적 현상인 확산 운동의 영향을 받게 된다. 따라서 동일한 공기역학적 직경을 갖는 입자라 할지라도, 입자의 밀도가 증가할수록 동일한 확산계수를 갖는 입자의 직경을 나타낸 열역학적 직경은 감소하여 예탁유효선량이 감소한다. 입자 크기가

약 $1 \mu\text{m}$ 인 입자는 공기역학적 효과와 열역학적 효과를 동시에 받게 되므로, 입자의 밀도에 따른 피폭방사선량의 차이는 점차 감소하게 된다. $1\text{-}100 \mu\text{m}$ 범위의 직경을 갖는 입자는, 호흡기 내에서 공기역학적 효과인 중력에 의한 침강 및 관성 충돌이 우세하게 나타난다. 동일한 공기역학적 직경은 공기역학적 효과가 동일하기 때문에 실제 입자의 밀도가 다를지라도 공기역학적 효과가 우세한 $1\text{-}100 \mu\text{m}$ 범위에서는 입자의 밀도에 따른 예탁유효선량의 차이가 거의 나타나지 않았다. 또한 약 $5 \mu\text{m}$ 크기 이상의 입자들은 입자의 크기가 증가할수록 대부분이 외호부 영역에 침착되고, 호흡기의 타 영역에서의 침착은 급격하게 감소한다. 하지만 외호부 영역에 침착되는 입자들은 대부분이 몸 밖으로 제거되기 때문에 입자의 크기가 비교적 큰 $100 \mu\text{m}$ 크기의 입자를 흡입하였을 경우, 입자의 밀도에 관계없이 상당수가 몸 밖으로 제거되어 예탁유효선량의 차이는 거의 발생하지 않았다.

3.4 방사성핵종의 흡수형태에 따른 피폭방사선량

Fig. 1.에 방사성핵종의 폐 내에서의 흡수형태에 따른 피폭방사선량을 나타내었다. 입자 흡입에 의한 예탁유효선량은 ^{238}U 핵종의 경우 흡수형태 S, M, F 순으로 높게 나타났으며, ^{230}Th 핵종의 경우 피폭방사선량은 반대로 흡수형태 F, M, S 순으로 높게 나타났다. ^{238}U 의 경우 국제방사선방호위원회 호흡기모델에서 제시한 우리나라의 기본값인 흡수형태 M과 비교하여, 입자 크기가 $5 \mu\text{m}$ 일 때 피폭방사선량은 흡수형태 S인 경우 약 2.5 배 높게, 흡수형태 F인 경우 약 0.7 배 낮게 나타났다. ^{230}Th 의 경우 기본값인 흡수형태 S와 비교하여, 입자 크기가 $5 \mu\text{m}$ 일 때 피폭방사선량은 흡수형태 M인 경우 약 3 배 높게, 흡수형태 F인 경우 약 16 배 높게 나타났다. 흡수형태에

다른 피폭방사선량의 차이가 발생하는 이유는 호흡기 내에서 입자가 빠르게 용해될수록 폐 내에 머무르는 시간이 줄어들고 빠르게 혈액으로 이동하게 되는 반면, 입자가 느리게 용해될수록 폐 내에서 오래 머무르게 되어 폐의 피폭방사선량이 증가하기 때문이다. 핵종마다 흡수형태에 따른 피폭방사선량이 다르게 나타나는 이유는 호흡기 내로 흡입된 핵종들이 체내에서 각각 다른 거동을 보이기 때문이다. ICRP 67 및 ICRP 69 보고서에는 흡입 혹은 섭취에 의한 인체 내 핵종의 거동을 모사한 생체역학모델을 제시하고 있다[8,9]. 생체역학 모델에 의하면 혈액으로 흡수된 우라늄 양의 약 63%는 소변으로 배출되고, 약 15%는 골격에 침착된다. 따라서 우라늄 핵종의 경우 빠르게 혈액으로 흡수될수록 체외로 배출되는 양은 증가하고, 느리게 혈액으로 흡수될수록 폐의 방사선량은 증가하게 된다. 반면 혈액으로 도달한 토륨의 약 70%는 뼈에 침착되며, 뼈에 침착된 토륨은 피질골과 해면골에 각각 50%씩 침착된다[9]. 토륨의 반감기는 동위원소에 따라 수천에서 수억 년으로, 뼈에 침착되면 체내에 오랜 시간 머무르게 된다. 따라서 토륨 핵종의 경우, 빠르게 혈액으로 흡수될수록 골 표면에서의 침착량이 증가하게 되고, 혈액으로 느리게 흡수될수록 호흡기내에 머무르게 되어 골표면에서의 침착 비율이 감소한다.

피폭방사선량에 대한 흡수형태의 영향은 입자의 크기에 따라서도 다르게 나타났다. 흡수형태 M과 흡수형태 S의 경우 입자 크기에 따라 피폭방사선량이 급격하게 감소하는 반면, 흡수형태 F의 경우 입자 크기에 따른 피폭방사선량의 변화가 비교적 완만하게 나타났다. 호흡기 계통에 침착된 방사성핵종은 혈액으로의 흡수, 소화기 계통으로 이동, 림프절로의 이동 등의 경로를 통해 제거된다[1]. 이 중에서도 혈액으로의 흡수가 대부분이며, 호흡기 내에 침착된 방사성핵종은 흡수형태에 따라 혈액으로 흡수되는 정도가 달라진다. 혈액으로 흡수된 방사성핵종은 혈액의 순환작용으로 인하여 혈액과 함께 온 몸을 순환하면서 조직 세포, 장기 등에 침착된다. 흡수형태 F의 경우 입자 크기에 거의 관계없이 호흡기 내에 머무르지 않고 혈액으로 빠르게 흡수되어 조직 세포, 장기 등에 침착되기 때문에 피폭방사선량 변화가 완만하게 나타났다. 흡수형태 M과 S의 경우 입자의 크기에 따라 호흡기 내에 침착되는 영역이 달라지고, 혈액으로 비교적 느리게 흡수되므로 호흡기 내에 머무르는 기간이 길어져 입자 크기에 큰 영향을 받았다.

4. 결론

본 연구는 천연방사성물질 취급 산업체의 종사자에 대한 방사선학적 안전성을 평가하기 위한 기반 연구로서, 공기 중 부유입자의 물리화학적 특성에 따른 피폭방사선량 민감도를 평가하였다. 민감도 평가는 천연방사성핵종 중 가장 대표적인 ^{238}U 과 ^{230}Th 핵종에 대하여 입자의 주요 물리화학적 특성인 크기, 모양, 밀도, 흡수형태를 대상으로 수행하였다.

입자의 크기가 감소할수록 피폭방사선량은 증가하는 경향을 보였으며, 입자 크기 0.01 μm 와 100 μm 에서의 피폭방사선량은 흡수형태 M인 ^{238}U 의 경우 약 100 배, 흡수형태 S인 ^{230}Th 의 경우 약 50 배 차이를 보였다. 모양인자가 작을수록 피폭방사선량은 높게 나타났으며, 입자 크기가 5 μm 일 때 피폭방사선량은 모양인자 기본값(1.5)과 비교하여 모양인자가 1인 경우 약 10% 높게, 모양인자가 2인 경우 약 7% 낮게 나타났다. 입자의 밀도가 증가할수록 피폭방사선량은 높게 나타났으며, 피폭방사선량은 기본값($3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)과 비교하여 밀도가 0.7 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 인 경우 약 23% 낮게, 밀도가 11 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 인 경우 약 23% 높게 나타났다. 핵종의 흡수형태에 따른 피폭방사선량은 ^{238}U 의 경우 흡수형태 S, M, F 순으로 높게 나타났으며, ^{230}Th 의 경우 흡수형태 F, M, S 순으로 높게 나타났다. ^{238}U 의 경우 피폭방사선량은 흡수형태 M과 비교하여 흡수형태 S인 경우 약 2.5배 높게, 흡수형태 F인 경우 약 0.7배 낮게 나타났다. 핵종 ^{230}Th 의 경우 피폭방사선량은 흡수형태 S와 비교하여 흡수형태 M인 경우 약 3배 높게, 흡수형태 F인 경우 약 16배 높게 나타났다.

종합하면, 입자의 물리화학적 특성은 흡입에 의한 피폭방사선량에 수십 혹은 수백 배 이상 크게 영향을 미칠 수 있기 때문에 입자의 특성값을 고려하지 않고 피폭방사선량을 평가하는 경우 평가값은 실제값에 비해 크게 왜곡될 소지가 있다. 따라서 입자 흡입에 의한 피폭방사선량의 정확한 평가를 위해서는 취급하는 물질, 작업환경 등을 고려하고, 입자의 물리화학적 특성값을 실측하여 실시하는 것이 바람직하다. 본 연구의 결과는 생활주변방사선 안전관리법의 적용을 받고 있는 천연방사성물질 취급 종사자의 방사선학적 안전성 평가에 활용될 수 있으며, 또한 천연방사성물질 취급 등에 대한 안전기준 및 지침개발과 사업자의 방사선 안전관리 실무에도 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회의 방사선기술개발사업 “천연방사성핵종 함유물질 이용에 따른 피폭 최적화 기술 개발” 수행의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. ICRP, Human respiratory tract model for radiological protection, ICRP Publication 66, 1994.
2. Dorrian MD, Bailey MR, Particle size distributions of radioactive aerosols measured in work places. Radiat Prot Dosim, 1995;60(2):119-133.
3. Johnson DL, Leith D, Reist PC. Drag on non-spherical, orthotropic aerosol-particles. J Aerosol Sci, 1987;18:87-97.
4. Mercer T. Aerosol technology in hazard evaluation. New York and London; Academic Press, 1973.
5. Hinds W. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles, New York;

- John Wiley & Sons, 1998.
6. Kim KP, Wu CY, Birky BK, Bolch WE. Influence of particle size distribution on inhalation doses to workers in the Florida phosphate industry. *Health Phys.* 2006;91(1):58-67.
 7. Kim KP, Wu CY, Birky BK, Bolch WE. TENORM aerosols in the Florida phosphate industry-assessment of lung fluid solubility and annual effective dose to workers. *Radiat Prot Dosim.* 2007;123(1):41-55.
 8. ICRP. Age-dependent doses to members of the public from Intake of radionuclides: Part 2 Ingestion dose coefficients, ICRP publication 67, 1993.
 9. ICRP. Age-dependent doses to members of the public from Intake of radionuclides: Part 3 Ingestion dose coefficients, ICRP Publication 69, 1995.

Assessment of Inhalation Dose Sensitivity by Physicochemical Properties of Airborne Particulates Containing Naturally Occurring Radioactive Materials

Si Young Kim*, Cheol Kyu Choi*, Il Park*, Yong Geon Kim*, Won Chul Choi*[†], and Kwang Pyo Kim*

*Kyung Hee University, [†] Korea Institute of Nuclear Safety

Abstract - Facilities processing raw materials containing naturally occurring radioactive materials (NORM) may give rise to enhanced radiation dose to workers due to chronic inhalation of airborne particulates. Internal radiation dose due to particulate inhalation varies depending on particulate properties, including size, shape, density, and absorption type. The objective of the present study was to assess inhalation dose sensitivity to physicochemical properties of airborne particulates. Committed effective doses to workers resulting from inhalation of airborne particulates were calculated based on International Commission on Radiological Protection 66 human respiratory tract model. Inhalation dose generally increased with decreasing particulate size. Committed effective doses due to inhalation of 0.01 μm sized particulates were higher than doses due to 100 μm sized particulates by factors of about 100 and 50 for ^{238}U and ^{230}Th , respectively. Inhalation dose increased with decreasing shape factor. Shape factors of 1 and 2 resulted in dose difference by about 18 %. Inhalation dose increased with particulate mass density. Particulate mass densities of 11 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ and 0.7 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ resulted in dose difference by about 60 %. For ^{238}U , inhalation doses were higher for absorption type of S, M, and F in that sequence. Committed effective dose for absorption type S of ^{238}U was about 9 times higher than dose for absorption F. For ^{230}Th , inhalation doses were higher for absorption type of F, M, and S in that sequence. Committed effective dose for absorption type F of ^{230}Th was about 16 times higher than dose for absorption S. Consequently, use of default values for particulate properties without consideration of site specific physicochemical properties may potentially skew radiation dose estimates to unrealistic values up to 1-2 orders of magnitude. For this reason, it is highly recommended to consider site specific working materials and conditions and use the site specific particulate properties to accurately assess radiation dose to workers at NORM processing facilities.

Keywords : Naturally occurring radioactive material, Human respiratory tract model, Particulate physicochemical property, Inhalation dose, Sensitivity to particulate properties