

Internal Dose Assessment of Worker by Radioactive Aerosol Generated During Mechanical Cutting of Radioactive Concrete

원전 방사성 콘크리트 기계적 절단의 방사성 에어로졸에 대한 작업자 내부피폭선량 평가

Jihye Park, Wonseok Yang, Nakkyu Chae, Minho Lee*, and Sungyeol Choi*

Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

박지혜, 양원석, 채낙규, 이민호*, 최성열*

한국과학기술원, 대전광역시 유성구 대학로 291

(Received March 17, 2020 / Revised June 1, 2020 / Approved June 10, 2020)

Removing radioactive concrete is crucial in the decommissioning of nuclear power plants. However, this process generates radioactive aerosols, exposing workers to radiation. Although large amounts of radioactive concrete are generated during decommissioning, studies on the internal exposure of workers to radioactive aerosols generated from the cutting of radioactive concrete are very limited. In this study, therefore, we calculate the internal radiation doses of workers exposed to radioactive aerosols during activities such as drilling and cutting of radioactive concrete, using previous research data. The electrical-mobility-equivalent diameter measured in a previous study was converted to aerodynamic diameter using the Newton–Raphson method. Furthermore, the specific activity of each nuclide in radioactive concrete 10 years after nuclear power plants are shut down was calculated using the ORIGEN code. Eventually, we calculated the committed effective dose for each nuclide using the IMBA software. The maximum effective dose of ^{152}Eu constituted 83.09% of the total dose; moreover, the five highest-ranked elements (^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co , ^{239}Pu , ^{55}Fe) constituted 99.63%. Therefore, we postulate that these major elements could be measured first for rapid radiation exposure management of workers involved in decommissioning of nuclear power plants, even if all radioactive elements in concrete are not considered.

Keywords: Radioactive aerosol, Concrete, Internal exposure, AMAD, IMBA

* Corresponding Author.

Sungyeol Choi, Korea Advanced Institute of Science and Technology, E-mail: sungyeolchoi@kaist.ac.kr, Tel: +82-42-350-3814

Minho Lee, Korea Advanced Institute of Science and Technology, E-mail: minholea@kaist.ac.kr, Tel: +82-42-350-3854

ORCID

Jihye Park

<http://orcid.org/0000-0002-6055-086X>

Wonseok Yang

<http://orcid.org/0000-0001-9716-9459>

Nakkyu Chae

<http://orcid.org/0000-0002-3503-3027>

Minho Lee

<http://orcid.org/0000-0001-6343-7646>

Sungyeol Choi

<http://orcid.org/0000-0002-7164-8491>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

원전 해체 공정 중 다량의 콘크리트 방사성 폐기물의 절단 과정에서 불가피하게 방사성 에어로졸이 생성된다. 방사성 에어로졸은 인체 호흡기 흡착에 의한 내부피폭을 유발하기 때문에 작업자의 방사선 방호를 위한 내부피폭평가가 필수적으로 시행되어야 한다. 그러나 실제 작업환경의 에어로졸 특성값을 사용하기에는 선행 연구가 미비하며 콘크리트에 포함된 방사성 핵종의 수가 많기 때문에 정확한 작업자 내부피폭평가를 위해서는 상당한 시간과 인력이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 사전 연구된 콘크리트 에어로졸 특성값을 활용하여 원전 해체 전 절단 작업자의 내부 피폭량을 빠르게 예측할 수 있는 새로운 방법론을 제시하고자 한다. 본 연구팀은 콘크리트 절단 시 발생하는 사전 연구에서 발표된 에어로졸의 수농도 크기 분포데이터를 뉴턴-랩슨법을 이용하여 피폭평가 계산에 필요한 방사능중앙 공기중역학직경(Activity Median Aerodynamic Diameter)값으로 변환하였다. 또한 원전 정지 10년 후 비방사능 값을 ORIGEN code로 계산하였으며, 최종적으로 핵종별 예탁유효선량을 IMBA 프로그램을 이용하여 계산하였다. 핵종별 예탁유효선량값을 비교한 결과 ^{152}Eu 에 의한 최대 예탁유효선량은 전체 선량값의 83.09%를 차지하고, ^{152}Eu 를 포함한 상위 5개 원소(^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co , ^{239}Pu , ^{55}Fe)의 경우 최대 99.63%를 차지함을 확인하였다. 따라서 원전 해체 전 콘크리트의 구성 원소 중 상위 5개 주요 원소 측정을 먼저 시행한다면 더 빠르고 원활한 방사능 피폭관리 및 해체 작업 안전성 평가가 가능할 것으로 판단된다.

중심단어: 방사성 에어로졸, 콘크리트, 내부 피폭, 방사능중앙 공기중역학직경, IMBA 소프트웨어

1. 서론

전 세계적으로 노후 원전의 수가 증가하고 최근 국내에서도 고리 1호기와 월성 1호기 원전의 영구정지 및 해체가 결정되면서 안전한 원전 해체 작업의 중요성은 더욱 커지고 있다. 일반 건물 해체와 달리 원전 해체 작업에서는 다량의 방사성 폐기물이 발생하게 된다. 한국에서는 원자력발전소 해체 과정에서 발생한 방사성폐기물을 안전성 확보와 처분 효율성 증대를 위하여 200 L 혹은 320 L 철제 드럼에 보관하도록 규정하고 있다[1]. 원자력 발전소 특성상 거대 단일 구조물로 이루어진 부품이 많기 때문에 폐기물 처리 규정을 충족하기 위해서는 구조물의 절단 과정은 필수적이다. 그러나 절단 과정에서 발생하는 방사성 에어로졸은 작업자와 주변 환경의 방사선 노출을 야기할 수 있다.

에어로졸은 대기 중에 떠도는 고체 또는 액체의 미세한 입자로 2 nm에서 100 μm 이상까지 다양한 크기를 가진다[2]. 에어로졸은 크기에 따라 인체 호흡기 내부에 침적되는 부위에 차이가 발생하며 11 μm 이상의 에어로졸은 호흡기에 흡입되지 않는다. 그러나 일반적으로 에어로졸의 크기가 작아 질주목 입이나 코, 인두, 1차 기관지, 2차 기관지, 말단 기관지, 세 기관지, 폐포관 및 폐포의 순으로 점차 호흡기 깊은 곳에 침적되는 경향성을 보인다[3]. 호흡기 내부에 침적된

에어로졸은 기관지염, 폐렴 등 다양한 호흡기질환을 일으킨다. 방사성 에어로졸은 호흡기질환뿐만 아니라 절단 작업자의 내부 피폭을 발생시키는 주요 선원 항이다. 따라서 작업자의 방사선학적 안전을 위하여 절단 작업자의 내부피폭을 사전에 평가하고 이를 바탕으로 방사성 에어로졸로 인한 작업자의 과 피폭을 방지하는 적절한 작업환경 및 작업 시간도를 도출하는 것은 매우 중요하다.

해체 시 발생하는 방사성 콘크리트 폐기물의 양은 전체 폐기물량의 큰 부분을 차지한다. 과거 국내에서 수행된 연구로 1, 2호기 해체의 경우 전체 방사성 폐기물의 약 68%를 콘크리트 폐기물이 차지하였고[4], 미국의 Main Yankee 원전(860 MWe, PWR) 해체의 경우 전체 방사성 폐기물의 64.4%를 콘크리트 폐기물이 차지하였다[5]. 방사성 콘크리트의 방대한 발생량에도 불구하고 원전 해체 시 발생 가능한 방사성 에어로졸의 정량적 분석과 내부 피폭 연구는 급속 절단의 경우 몇몇 선행연구가 진행되었으나[6-12], 방사성 콘크리트 폐기물 처리 과정에서 발생하는 방사성 에어로졸 특성분석 연구의 경우 미비한 경향이 있다. 본 연구는 원전 해체 시 방사성 콘크리트 드릴링, 절단 과정에서 발생하는 방사성 에어로졸을 작업자가 흡입하였을 때의 원소별 내부 피폭의 정도를 평가하고, 이를 기반으로 하여 작업자의 피폭량을 사전에 예측할 수 있는 기준을 제시하고자 하였다.

Table 1. The calculated specific activity of each nuclide in radioactive concrete at 10 years after the NPP shutdown using the ORIGEN code

Isotope	Inner edge (Ci/g)	10 cm (Ci/g)	24 cm (Ci/g)	55 cm (Ci/g)
³ H	2.848×10 ⁻⁶	4.728×10 ⁻⁶	2.507×10 ⁻⁶	1.424×10 ⁻⁷
¹⁴ C	1.698×10 ⁻⁹	2.797×10 ⁻⁹	1.498×10 ⁻⁹	8.290×10 ⁻¹¹
³⁶ Cl	9.800×10 ⁻¹¹	1.500×10 ⁻¹⁰	7.900×10 ⁻¹¹	4.400×10 ⁻¹²
³⁹ Al	2.631×10 ⁻⁸	1.169×10 ⁻⁸	3.021×10 ⁻⁹	1.559×10 ⁻¹⁰
⁴¹ Ca	1.200×10 ⁻⁸	1.900×10 ⁻⁸	9.999×10 ⁻⁹	5.600×10 ⁻¹⁰
⁵³ Mn	1.700×10 ⁻¹⁴	7.400×10 ⁻¹⁵	1.900×10 ⁻¹⁵	1.000×10 ⁻¹⁶
⁵⁴ Mn	8.397×10 ⁻¹²	3.599×10 ⁻¹²	9.297×10 ⁻¹³	5.098×10 ⁻¹⁴
⁵⁵ Fe	2.304×10 ⁻⁷	3.734×10 ⁻⁷	1.986×10 ⁻⁷	1.112×10 ⁻⁸
⁵⁹ Ni	1.600×10 ⁻¹¹	2.600×10 ⁻¹¹	1.400×10 ⁻¹¹	7.899×10 ⁻¹³
⁶⁰ Co	5.906×10 ⁻⁸	9.664×10 ⁻⁸	4.563×10 ⁻⁸	2.470×10 ⁻⁹
⁶³ Ni	1.866×10 ⁻⁹	3.079×10 ⁻⁹	1.586×10 ⁻⁹	9.144×10 ⁻¹¹
⁶⁵ Zn	6.870×10 ⁻¹³	7.807×10 ⁻¹⁴	3.747×10 ⁻¹³	1.999×10 ⁻¹⁴
⁷⁹ Se	2.300×10 ⁻¹⁵	2.800×10 ⁻¹⁵	1.400×10 ⁻¹⁵	7.900×10 ⁻¹⁷
⁸⁵ Kr	2.257×10 ⁻¹¹	2.205×10 ⁻¹¹	8.924×10 ⁻¹²	4.934×10 ⁻¹³
⁹⁰ Y	3.538×10 ⁻¹¹	5.739×10 ⁻¹¹	2.988×10 ⁻¹¹	1.651×10 ⁻¹²
⁹⁰ Sr	3.537×10 ⁻¹¹	5.738×10 ⁻¹¹	2.987×10 ⁻¹¹	1.651×10 ⁻¹²
⁹³ Mo	1.198×10 ⁻¹²	5.590×10 ⁻¹³	1.398×10 ⁻¹³	4.392×10 ⁻¹⁵
^{93m} Nb	3.788×10 ⁻¹³	1.819×10 ⁻¹³	4.743×10 ⁻¹⁴	7.000×10 ⁻¹⁶
⁹³ Zr	3.000×10 ⁻¹⁴	2.900×10 ⁻¹⁴	1.300×10 ⁻¹⁴	1.590×10 ⁻¹⁵
⁹⁴ Nb	7.497×10 ⁻¹²	5.298×10 ⁻¹²	1.999×10 ⁻¹²	9.397×10 ⁻¹⁴
⁹⁹ Tc	2.800×10 ⁻¹³	1.400×10 ⁻¹³	3.700×10 ⁻¹⁴	1.300×10 ⁻¹⁵
^{108m} Ag	3.541×10 ⁻¹²	3.147×10 ⁻¹²	1.377×10 ⁻¹²	7.180×10 ⁻¹⁴
¹⁰⁸ Ag	3.080×10 ⁻¹³	2.738×10 ⁻¹³	1.198×10 ⁻¹³	6.247×10 ⁻¹⁵
^{121m} Sn	5.730×10 ⁻¹³	4.584×10 ⁻¹³	1.587×10 ⁻¹³	1.058×10 ⁻¹⁴
¹²¹ Sn	4.447×10 ⁻¹³	3.558×10 ⁻¹³	1.231×10 ⁻¹³	8.210×10 ⁻¹⁵
¹³³ Ba	6.722×10 ⁻¹⁰	1.034×10 ⁻⁹	5.171×10 ⁻¹⁰	2.947×10 ⁻¹¹
¹³⁴ Cs	2.893×10 ⁻¹⁰	5.576×10 ⁻¹⁰	3.032×10 ⁻¹⁰	1.708×10 ⁻¹¹
¹³⁵ Cs	9.500×10 ⁻¹⁶	1.400×10 ⁻¹⁵	7.500×10 ⁻¹⁶	4.200×10 ⁻¹⁷
¹³⁷ Cs	4.050×10 ⁻¹¹	6.035×10 ⁻¹¹	3.176×10 ⁻¹¹	1.747×10 ⁻¹²
^{137m} Ba	3.823×10 ⁻¹¹	5.697×10 ⁻¹¹	2.999×10 ⁻¹¹	1.649×10 ⁻¹²
¹⁴⁵ Pm	3.988×10 ⁻¹²	6.624×10 ⁻¹²	3.515×10 ⁻¹²	1.960×10 ⁻¹³

Isotope	Inner edge (Ci/g)	10 cm (Ci/g)	24 cm (Ci/g)	55 cm (Ci/g)
¹⁵¹ Sm	1.296×10 ⁻⁹	1.296×10 ⁻⁹	5.648×10 ⁻¹⁰	2.870×10 ⁻¹¹
¹⁵² Eu	1.438×10 ⁻⁷	2.337×10 ⁻⁷	1.258×10 ⁻⁷	7.191×10 ⁻⁹
¹⁵⁴ Eu	2.499×10 ⁻⁸	2.142×10 ⁻⁸	8.926×10 ⁻⁹	4.463×10 ⁻¹⁰
¹⁵⁵ Eu	3.954×10 ⁻¹⁰	3.024×10 ⁻⁹	1.163×10 ⁻¹⁰	5.582×10 ⁻¹²
^{166m} Ho	3.281×10 ⁻¹¹	3.878×10 ⁻¹¹	1.293×10 ⁻¹¹	5.568×10 ⁻¹³
²⁰⁵ Pb	2.800×10 ⁻¹⁶	-	1.200×10 ⁻¹⁶	6.600×10 ⁻¹⁸
²²⁷ Ac	-	3.660×10 ⁻¹⁶	-	-
²³¹ Th	2.800×10 ⁻¹²	1.200×10 ⁻¹¹	5.700×10 ⁻¹³	2.500×10 ⁻¹⁴
²³¹ Pa	5.939×10 ⁻¹⁶	2.545×10 ⁻¹⁵	1.209×10 ⁻¹⁶	5.303×10 ⁻¹⁸
²³⁵ U	2.800×10 ⁻¹²	1.200×10 ⁻¹¹	5.700×10 ⁻¹³	2.500×10 ⁻¹⁴
²³⁹ Pu	3.999×10 ⁻¹¹	1.700×10 ⁻¹¹	3.699×10 ⁻¹²	9.297×10 ⁻¹⁴

콘크리트 드릴링과 절단 시 발생하는 에어로졸의 분포는 Azarmi 연구팀의 이동도 직경(Mobility diameter)에 따른 에어로졸 수분포 연구 결과[13]를 바탕으로 MATLAB을 통해 구현한 수치해석 방법을 이용하여 이동도 직경을 공기역학적 직경(Aerodynamic diameter)으로 변환하였다. 변환된 결과를 이용하여 공기역학적 직경에 따른 에어로졸 질량 분포도 및 방사능중량 공기중역학직경(AMAD, Activity Median Aerodynamic Diameter)값을 도출하였고, 도출된 AMAD값과 국제방사선방호위원회(ICRP, International Commission on Radiological Protection)의 권고값을 사용하여(ICRP 119[14], ICRP 60[15], ICRP 134[16]) IMBA 프로그램을 통해 방사성 에어로졸의 선량계수(Dose coefficient factor)를 도출하였다. 또한 Evans 연구팀에서 수행된 원전 영구정지 직후 각 구성 원소별 비방사능(Specific activity) 계산 값[17]을 기반으로 ORIGEN을 활용하여 원전 영구정지 10년 후 비방사능 값을 계산하였다. 이를 이용하여 원전 즉시 해체를 가정하였을 때 발생하는 원소별 작업자의 연간 내부피폭량을 계산하였다. 연간 내부피폭량을 기반으로 원자력 발전소 해체 전 절단 작업자의 내부 피폭량을 사전에 예측하기 위하여 평가대상 방사성 원소들을 선별하고, 이를 활용하여 해체 작업 중 작업자의 안전 측면에서 중요한 방사능 피폭관리 및 해체 작업 안전성 평가에서의 새로운 방법론을 제시하였다.

2. 해체 콘크리트 절단 시 방사성 에어로졸

2.1 콘크리트 절단 시 에어로졸 발생 원리

콘크리트 절단 방법에는 크게 기계적 절단, 열적 절단, Abrasive waterjet, Explosive demolition 등 다양한 방법이 있다. 건설 및 해체 현장에서 주로 쓰이는 콘크리트의 절단 방법은 기계적 절단으로, 기계적 절단은 열적 절단보다 독성 가스 발생량이 적고, Abrasive waterjet 방식보다 발생하는 방사성 폐기물의 양이 적으며 Explosive demolition 방식보다 훨씬 적은 분진을 방출하는 장점이 있다[18].

기계적 절단은 기계를 이용하여 자르고자 하는 물질에 힘을 가해 마찰을 발생시켜 물질을 절단한다. 이때 기계의 물리적인 힘으로 절단하고자 하는 물질의 표면에서 작은 입자들, 즉 에어로졸이 생성되게 된다. 만약 절단 물질이 취성 재료(Brittle material)이면, 극한 응력(Ultimate stress) 도달해서 절단 물질로부터 입자들을 분리시키며, 연성 재료(Ductile material) 이라면 국부적 경화가 일어난 후 국부적으로 균열이 생기며 분리된다[19]. 따라서 기계적 절단 방법에서는 기계적 힘에 의해 떨어진 작은 크기의 물질들이 에어로졸 형태로 분산된다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 기계적 절단에서 발생하는 에어로졸의 조성과 콘크리트의 조성이 동일할 것이라고 가정하였다.

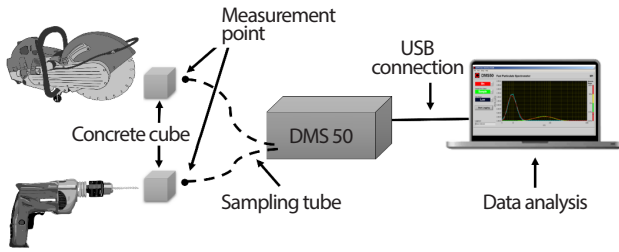


Fig. 1. Experimental schematic of aerosol measurement during concrete drilling and cutting.

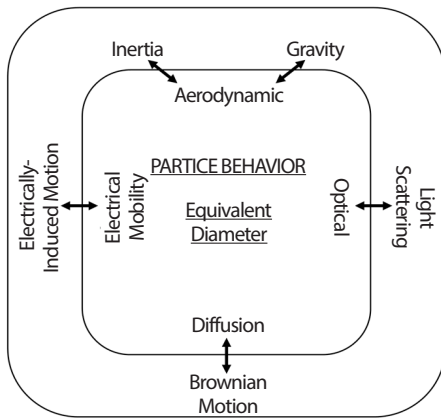


Fig. 2. Relationship of various types of equivalent aerosol diameters.

2.2 해체 콘크리트 핵종별 방사능 평가

미국 Pacific Northwest 연구소에서 조사한 바에 따르면 해체 콘크리트에서 약 40여 종의 방사성 핵종을 확인했으며[17], 각 핵종의 비방사능(Specific activity)을 제시한 바 본 연구에서는 이를 사용하여 해체 콘크리트의 핵종별 방사능을 도출하였다. 기 수행된 원전 영구 정지 직후 콘크리트 바이오실드(Bioshield)의 중심에서부터 깊이 별(inner edge, 10 cm, 24 cm, 55 cm) 각 구성 원소의 비방사능 값을 기반으로 ORIGEN 프로그램을 활용하여 원전 정지 10년 후 비방사능 값을 계산하였다. 이는 고리 1호기의 해체 전략(Decommissioning strategy)이 즉시 해체(Immediate dismantling)를 가정하였기 때문이다. 이때 즉시 해체시 평균 원전 정지 10년 후 해체를 진행한다는 점을 고려하여 본 연구진은 원전 정지 10년 후 비방사능 값을 계산하여 이용하였다[20].

3. 해체 콘크리트 에어로졸의 방사능중앙 공기중역학직경(AMAD)

3.1 콘크리트 절단 시 에어로졸 크기 분포

본 연구에서는 과거 Azarmi 연구팀이 수행한 콘크리트의 드릴링(Drilling)과 절단(Cutting)에 따른 에어로졸 크기 분포 데이터를 분석하였다. 에어로졸을 측정하기 위하여 Azarmi 연구팀은 고속 반응 차동 이동성 분광계(Fast response differential mobility spectrometer)를 사용하였다[13].

실험에 사용된 이동성 분광계(DMS50, CAMBUSTION)는 전기적 이동도 등가 직경(Electrical mobility equivalent diameter)에 의거하여 입자의 크기를 계산하며, 주로 5~560 nm 정도의 크기를 가진 입자 범위에서 주로 사용한다. 그러나, 작업자의 내부피폭 계산을 위해서는 전기적 이동도 직경을 호흡기 내부의 침적과 연관된 공기중역학적 직경으로 변화시켜야 하며 수농도가 아닌 질량 농도 분포분석을 통해 방사능 AMAD을 도출해야 한다.

3.2 에어로졸 직경의 상관관계

에어로졸의 등가 지름이란, 불규칙 형상 에어로졸 입자(Irregular aerosol particle)와 동일한 특정 물리적 성질을 갖는 구형 입자의 지름을 뜻한다[21]. 전기적 이동도 직경(Electrical mobility diameter)이란 특정 불규칙 형상 입자(Irregular particle)들과 전기적 유도 움직임(Electrically-induced motion)이 같은 구형의 입자의 지름을 뜻한다. 공기역학적 직경이란 특정 불규칙 형상 입자와 작용 받는 중력과 관성이 같은 입자의 지름을 이야기한다. 서로 다른 등가 지름들은 특정식을 통하여 서로 변환이 가능하며, 식 각각은 에어로졸 입자의 특성들을 설명할 수 있다[22].

스토크스 직경(Stokes diameter)이란, 특정 입자와 침강 속도(Settling velocity)와 밀도가 같은 가상의 구형 입자의 반지름을 뜻한다. 공기중역학적 직경은 특정 입자와 침강 속도가 같고, 밀도가 1000 kg/m³인 가상의 구형 입자의 반지름을 뜻한다[21].

이동도 직경과 스토크스 직경은 식 (1)과 같은 상관관계식을 통하여 변환이 가능하다[23].

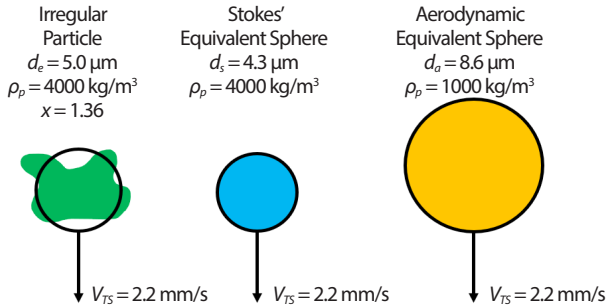


Fig. 3. Correlation with irregular particle, stokes' equivalent sphere, and aerodynamic equivalent sphere.

$$\frac{d_m}{C_c(d_m)} = \frac{d_s \times \chi_t}{C_c(d_s)} \quad (1)$$

(d_m = 이동도 직경(Mobility diameter), d_s = 스토크스 직경(Stokes diameter), C_c = 커닝햄 보정계수(Cunningham correction factor), χ_t = 형상 계수(Shape factor))

커닝햄 보정계수(C_c)는 에어로졸과 같이 입자의 크기가 유체의 평균 자유 행정도(λ , Mean free path) 보다 작을 때, 연속체 영역과 자유 분자 흐름 사이의 유체를 이동시키는 입자의 항력을 예측할 수 있게 한다. 식 (2)를 이용하면 모든 고체 입자에 대하여 오차범위 2.1% 안으로 커닝햄 보정계수를 구할 수 있다.

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d} [2.34 + 1.05 \exp(-0.39 \frac{d}{\lambda})] \quad (2)$$

(C_c = 커닝햄 보정 계수, λ = 평균 자유 행정도(공기의 평균 자유 행정도 = 0.666 μm), d = 에어로졸의 지름)

불규칙 형상 입자 사이의 공기중역학적 직경과 스토크스 직경은 식 (3)과 같은 상관관계식을 통해 변환이 가능하다[23].

$$d_a = d_s \left(\frac{C_c(d_s)}{C_c(d_a)} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_s}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (3)$$

(d_s = 입자의 스토크스 직경, d_a = 입자의 공기역학적 직경, ρ_s = 스토크스 입자의 밀도, ρ_0 = 표준 입자 밀도(Standard particle density), C_c = 커닝햄 보정계수)

3.3 에어로졸의 질량 농도 분포 및 AMAD 도출

이동도 직경(d_p)값에 해당하는 공기역학적 직경(d_a) 값은

식 (2),(3)의 해를 수치계산법의 일종인 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 활용하여 계산하였다[24].

콘크리트 절단 시 발생하는 에어로졸의 형태가 완벽한 구형이라고 가정하고 식 (4)를 이용하여 콘크리트 에어로졸의 수농도를 질량 농도 분포로 변환하여 도출하였다.

$$\text{Mass} = \frac{\pi D^3 \rho}{6} \quad (4)$$

(D = 입자의 지름, 이 경우 스토크스 직경, ρ = 입자의 밀도(콘크리트의 밀도 = 3.15 g/cm^3 [25]))

위의 $dM/d\log D_p$ 값과 변환한 $d\log D_p$ 값을 이용하여 각 공기중역학적직경 별 누적 질량 분포를 확인하였다. 전체 누적 질량의 절반에 해당하는 반지름값을 선행 근사를 이용하여 계산하여 질량중양공기중역학적 직경(MMAD, Mass Median Aerodynamic Diameter) 값을 구하였다. 입자가 전체적으로 균일하게 분포할 경우 MMAD가 AMAD와 같다고 가정하여 AMAD 값을 도출하였다[26]. 이때 도출된 AMAD 값은 절단과 정시 554.1 nm, 드릴링 과정 시 576.1 nm로 확인되었다.

4. 방사성 콘크리트 절단 작업자의 내부피폭 선량 평가

4.1 내부피폭선량 평가코드

인체의 방사선량 내부 피폭 평가 코드에는 IMIE (Individual Monitoring of the Internal Exposure), LUDEP (Lung Dose Evaluation Program), BiDAS (Integrated Modules for Bioassay Analysis), IMBA (Integrated Modules for Bioassay Analysis) 등 다양한 종류가 있다. 본 연구에서는 ICRP의 인체 호흡기 모델을 적용하였을 때 PLEIADES에 의해 계산된 배설율 및 전신/장기 보유율과 오차 1% 이하 기준을 충족하는 IMBA 프로그램을 사용하였다[27].

IMBA 프로그램은 방사성 핵종의 섭취, 이동, 배설과 관련된 메커니즘을 계산할 수 있도록 제작된 프로그램으로 ICRP 권고안의 방사선 가중치, 조직 가중치 등을 반영하여 선량평가를 수행한다[28]. 내부피폭선량을 계산하기 위해서는 입자 침착 모델(Deposition), 입자 수송 모델(Particle transport), 흡수 모델(Absorption), 소화기 흡수 모델(GI

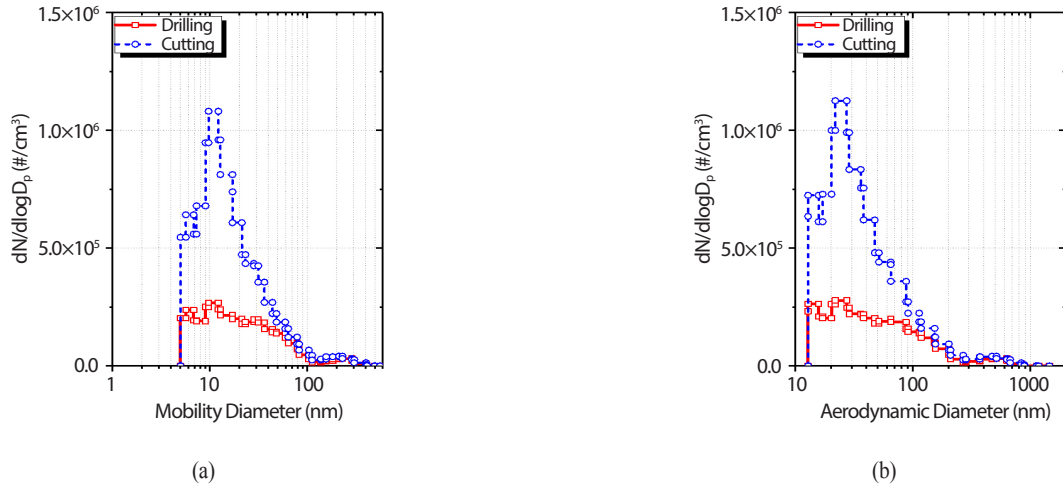


Fig. 4. Particle size distribution of number concentration of aerosol during the concrete cutting and drilling operation according to aerosol diameter. ((a): Mobility diameter, (b): Aerodynamic diameter).

tract) 등을 설정해야 한다. 에어로졸의 물리적 특성인 방사성 에어로졸의 핵종별 흡입량(Bq), 밀도(g/cm³), AMAD의 경우 실측된 값을 대입하는 것이 바람직하며 실측값이 없는 경우에는 ICRP 권고값을 대입할 수 있다.

본 연구에서는 ICRP 68[29]의 조직 가중치 값을 사용하였으며 기타 입자 침착 모델, 입자 수송 모델, 흡수 모델, 소화기 흡수 모델 등에서는 IMBA 프로그램에 내장된 ICRP 기준 값을 사용하여 계산하였다. AMAD의 경우 앞절에서 수행된 계산 값을 대입하여 내부피폭 계산을 수행하였다.

4.2 방사성 에어로졸 섭취량 산정

각 핵종의 비방사능 값에 콘크리트 드릴링과 절단 과정에서 발생한 단위 부피당 총 에어로졸의 질량을 곱해 원소별로 공기 중 방사성 농도를 구하였다. 최종 섭취량(Bq)은 식 (5)와 같이 공기 중 방사성 농도에 작업자의 호흡률 (m³/hr), 작업시간(hr)을 곱하고 방호 마스크 방호 계수를 나누어 계산하였다[30].

$$\text{섭취량(Bq)} = \frac{\text{공기 중 방사성 농도(Bq/m}^3\text{)} \times \text{호흡률(m}^3\text{/hr)} \times \text{작업 시간(hr)}}{\text{방호 마스크 방호계수}} \quad (5)$$

발생한 에어로졸을 작업자가 전부 흡입하였다고 가정하였고, 호흡률은 일반 작업자 호흡률(1.2 m³/hr), 작업 시간은 방사선 작업종사자 기준 연간 2000시간을 가정하여 적용하였다.

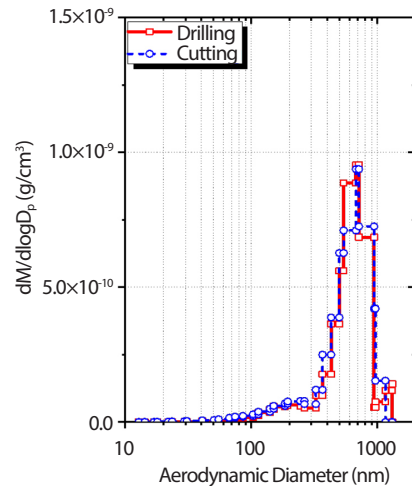


Fig. 5. Mass distribution of generated aerosols during concrete cutting and drilling according to aerodynamic diameter.

4.3 방사성 에어로졸 핵종별 흡수 형태에 따른 선량 계수 결정

핵종별 섭취량을 산정했다면 작업자의 내부피폭선량은 식 (6)과 같이 핵종별 선량 계수를 사용하여 간단히 계산할 수 있다[30].

$$\text{내부피폭선량(Sv)} = \sum \text{선량계수(Sv/Bq)} \times \text{섭취량(Bq)} \quad (6)$$

Table 2. IMBA Input values for absorption type (F,M,S) and absorption ratio (f_i) of isotopes

Isotope	Type	f_i	Isotope	Type	f_i
³ H	F	1.0	^{108m} Ag	F	0.05
¹⁴ C	F	1.0	¹⁰⁸ Ag	F	0.05
³⁶ Cl	M	0.1	^{121m} Sn	F	0.02
⁴¹ Ca	M	0.3	¹²¹ Sn	F	0.02
⁵³ Mn	F	0.1	¹³³ Ba	F	0.1
⁵⁴ Mn	F	0.1	¹³⁴ Cs	M	5.0×10^{-4}
⁵⁵ Fe	F	0.1	¹³⁵ Cs	M	5.0×10^{-4}
⁵⁹ Ni	F	0.05	¹³⁷ Cs	M	5.0×10^{-4}
⁶⁰ Co	M	0.1	^{137m} Ba	F	0.1
⁶³ Ni	F	0.05	¹⁴⁵ Pm	M	5.0×10^{-4}
⁶⁵ Zn	S	0.5	¹⁵¹ Sm	M	5.0×10^{-4}
⁷⁹ Se	F	0.8	¹⁵² Eu	M	5.0×10^{-4}
⁹⁰ Y	M	1.0×10^{-4}	¹⁵⁴ Eu	M	5.0×10^{-4}
⁹⁰ Sr	F	0.3	¹⁵⁵ Eu	M	5.0×10^{-4}
⁹³ Mo	F	0.8	^{166m} Ho	M	5.0×10^{-4}
^{93m} Nb	M	0.01	²²⁷ Ac	F	5.0×10^{-4}
⁹³ Zr	F	0.002	²³¹ Th	M	5.0×10^{-4}
⁹⁴ Nb	M	0.01	²³¹ Pa	M	5.0×10^{-4}
⁹⁹ Tc	F	0.8	²³⁵ U	M	0.02
			²³⁹ Pu	M	5.0×10^{-4}

Table 3. Total committed effective dose and the comprisal of element chosen by priority of generation of committed effective dose during the concrete drilling

Drilling	Inner Edge	10 cm	24 cm	55 cm
Total Dose (Sv/y)	2.94×10^{-4}	3.78×10^{-4}	1.89×10^{-4}	1.05×10^{-5}
Percentage of ¹⁵² Eu (%)	58.91	74.46	80.38	82.85
Percentage of the five elements (¹⁵² Eu, ¹⁵⁴ Eu, ⁶⁰ Co, ²³⁹ Pu, and ⁵⁵ Fe) (%)	99.58	98.97	99.38	99.38

Table 4. Total committed effective dose and the comprisal of element chosen by priority of generation of committed effective dose during the concrete cutting

Cutting	Inner Edge	10 cm	24 cm	55 cm
Total Dose (Sv/y)	3.10×10^{-4}	3.97×10^{-4}	1.98×10^{-4}	1.10×10^{-5}
Percentage of ¹⁵² Eu (%)	58.94	74.65	80.60	83.09
Percentage of the five elements (¹⁵² Eu, ¹⁵⁴ Eu, ⁶⁰ Co, ²³⁹ Pu, and ⁵⁵ Fe) (%)	99.59	99.19	99.62	99.63

그러나 선량 계수는 에어로졸의 특성에 따라 값이 크게 달라진다. 에어로졸 크기와 밀도에 따라 호흡기 내부에 침착되는 위치가 달라지며, 흡수 유형에 따라 에어로졸이 호흡기 조직을 벗어나 혈관, 림프관 등을 통해 다른 장기 조직으로 이동할 수 있다. 흡수 형태(Absorption type)는 에어로졸의 화학적 성질에 따라 용해도가 높으면 흡수 유형 F (Fast), 용해도가 낮으면 S (slow), 중간인 경우 M (Moderate)을 사용한다. 흡수 속도가 느릴수록 호흡기에 머무는 시간이 길어지므로 국부적인 피폭선량이 증가한다. 반대로 흡수 속도가 빠를수록 호흡기를 제외한 기타 장기에 가해지는 선량이 증가할 수 있다.

흡수 형태의 입력값의 경우 절단 시 발생하는 방사성 에어로졸에 대해서는 콘크리트 내부에 존재하는 원소의 형태를 특정하기 어렵기 때문에 ICRP 119[14], ICRP 60[15]을 참고하여 원소가 규정할 수 없는 상태일 때 권장하는 흡수 형태(F,M,S)와 흡수분율(f_1)값을 사용하였다. ^{36}Cl , ^{235}U 과 같이 권장값이 두 개 이상일 경우 방사선 방호 측면에서의 보수적 접근을 위하여 각각의 경우에 대하여 피폭 선량을 계산한 후 높은 경우의 흡수 형태를 채택하여 사용하였다. ICRP 119에 기술되어 있지 않은 원소인 ^3H 와 ^{14}C 의 경우 ICRP 134[16]를 참고하여 기술하였다. 또한 각 핵종의 콘크리트 내 결합 상태의 경우 18족 비활성 기체는 주위 원소와 결합을 하지 않고 내부에서 기체 형태로 존재하여 인체에 흡입되더라도 내부에서 반응하지 않는다고 가정하였고, ^{14}C 의 경우 콘크리트 속 탄소가 1중 결합의 형태로 존재한다고 가정하였다.

4.4 작업자 예탁유효선량 계산

작업자의 내부피폭량 계산을 통하여 콘크리트 드릴링의 경우 깊이 10 cm에서 3.78×10^{-4} Sv/y, 절단의 경우 깊이 10 cm에서 3.97×10^{-4} Sv/y로 최대값을 확인했다. 이때 5개 핵종(^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co , ^{239}Pu , ^{55}Fe)의 선량값이 전체 선량값의 99% 이상을 차지함을 확인하였다. 콘크리트 절단작업시 발생하는 최대 내부피폭량은 연평균 작업자 개인 피폭 선량 한도인 20 mSv/y와 비교해 보았을 때 각각 1.89%, 1.98%에 해당하며 작업자의 과피폭 위험은 미미하다고 판단되지만, ALARA 원칙에 따라 피폭관리가 필요하다. 또한, 본 연구에 사용된 에어로졸 수농도 분포의 측정데이터가 1 μm 이하 에어로졸의 분포만 포함하여 내부피폭평가 결과가 저평가되었을

가능성이 있으며, 콘크리트 내 방사성 동위원소 비율은 원전 운전 기록에 따른 중성자 조사량에 따라 크게 변화하기 때문에 실제 샘플링 분석이 필요하다. 따라서 추후에 원전 모사 콘크리트 절단시 고해상도 에어로졸 측정장비를 이용하여 인체 흡입 가능한 에어로졸 범위인 수 nm에서 10 μm 에 해당하는 실측 데이터를 확보하고자 한다.

5. 결론

본 논문에서는 원전 콘크리트 절단 과정 시 발생하는 방사성 콘크리트 에어로졸에 의한 내부피폭평가를 ORIGEN 전산 코드와 IMBA 프로그램을 사용하여 예탁유효선량을 계산하여 시행하였다. 방사성 콘크리트 절단 작업시 작업자에 미치는 내부피폭량은 선량 한도인 20 mSv/y에 비해 미미한 것으로 판단되었지만, ALARA 원칙에 의거 작업자의 내부피폭관리가 필요하며 이를 위해 선량값에 크게 영향을 미치는 상위 5개의 핵종을 선별하였다. ^{152}Eu 로 인해 발생하는 작업자 내부피폭량은 전체 피폭량값의 58.91~83.09%를 차지하였고, 선별된 5개 핵종(^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co , ^{239}Pu , ^{55}Fe)의 경우 99.19~99.63%를 차지하였다. 방사성 에어로졸의 계측 및 내부피폭평가를 위해서는 에어로졸에 포함된 다수의 핵종을 분석해야 함으로 많은 시간과 인력이 추가될 수 밖에 없다. 또한, 콘크리트에 포함된 다양한 핵종데이터의 일부 부재 혹은 분석의 지연이 발생할 경우 방사선학적 안전성의 문제로 발전될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서 도출한 5개 주요 핵종 분석이 우선적으로 이루어 진다면 신속한 작업자의 피폭관리 및 해체 작업 안전성 평가가 가능할 것이라 기대된다. 추후 콘크리트 절단시 발생하는 에어로졸의 실측 데이터를 반영하여 본 연구에서 제시한 신속한 내부 피폭평가 방법안의 검증이 가능할 것으로 기대한다.

Acknowledgements

This work was financially supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) by a grant funded by the Ministry of Science and ICT, Republic of Korea (Grant No. NRF-2017M2A8A4018596), and the Ministry

of Education of the, Republic of Korea (Grant No. NRF-2019S1A5A2A03046683).

REFERENCES

- [1] I.-S. Gang, Regulation on Radioactive Waste Management and Guidelines on the Collection, Packing, and Management of Radioactive Waste. Korea Atomic Energy Research Institute Technical Report, 14-19, KAERI-2902 (2005).
- [2] M. Lippmann and R.E. Albert, "The Effect of Particle Size on the Regional Deposition of Inhaled Aerosols in the Human Respiratory Tract", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 30(3), 257-275 (1969).
- [3] L.S. Ruzer and N.H. Harley, *Aerosols handbook: measurement, dosimetry, and health effects*, 625-626, CRC press, Florida (2012).
- [4] K.W. Lee, S.B. Hong, J.H. Park, and U.S. Chung, "Final Status of the Decommissioning of Research Reactors in Korea", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 47(12), 1227-1232 (2010).
- [5] K.-Y. Lee, M. Oh, J. Kim, E.-H. Lee, I.-S. Kim, K.-W. Kim, D.-Y. Chung, and B.-K. Seo, "Trends in Technology Development for the Treatment of Radioactive Concrete Waste", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 16(1), 93-105 (2018).
- [6] M.H. Lee, W. Yang, N. Chae, and S. Choi, "Performance assessment of HEPA filter against radioactive aerosols from metal cutting during nuclear decommissioning", *Nucl. Eng. Technol.*, 52(5), 1043-1050 (2020).
- [7] M.H. Lee, W. Yang, N. Chae, and S. Choi, "Aerodynamic diameter distribution of aerosols from plasma arc cutting for steels at different cutting power levels", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 323, 613-624 (2020).
- [8] T. Shimada and T. Tanaka, "Characterization on the radioactive aerosols dispersed during plasma arc cutting of radioactive metal piping", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 303(2), 1345-1349 (2015).
- [9] Y. Oki, M. Numajiri, T. Suzuki, Y. Kanda, T. Miura, K. Iijima, and K. Kondo, "Particle size and fuming rate of radioactive aerosols generated during the heat cutting of activated metals", *Appl. Radiat. Isotopes*, 45(5), 553-562 (1994).
- [10] V.J. Novick, C.-J. Brodrick, S. Crawford, J. Nasiatka, K. Pierucci, V. Reyes, J. Sambrook, S. Wrobel, and J. Yearly, Aerosol measurements from plasma torch cuts on stainless steel, carbon steel, and aluminum. Argonne National Lab., IL (United States) Report, ANL/TD/CP-88550 (1996).
- [11] N. Chae, M.H. Lee, S. Choi, B.G. Park, and J.S. Song, "Aerodynamic diameter and radioactivity distributions of radioactive aerosols from activated metals cutting for nuclear power plant decommissioning", *J. Hazard. Mater.*, 369, 727-745 (2019).
- [12] J. Bernard, G. Pilot, and J. Grandjean, "Evaluation of various cutting techniques suitable for the dismantling of nuclear components", EUR (Luxembourg) (1998).
- [13] F. Azarmi, P. Kumar, and M. Mulheron, "The exposure to coarse, fine and ultrafine particle emissions from concrete mixing, drilling and cutting activities", *J. Hazard. Mater.*, 268-279 (2014).
- [14] K. Eckerman, J. Harrison, H.G. Menzel, and C.H. Clement, ICRP publication 119: compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60, *Annals of the ICRP*, 41, 1-130 (2012).
- [15] ICRP, ICRP publication 60: 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection (1991).
- [16] F. Paquet, M.R. Bailey, R.W. Leggett, J. Lipsztein, T.P. Fell, T. Smith, D. Nosske, K.F. Eckerman, V. Berkovski, and E. Ansoborlo, ICRP Publication 134: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2, *Annals of the ICRP*, 45(3-4), 7-349 (2016).
- [17] J.C. Evans, E.L. Lepel, R.W. Sanders, C.L. Wilkerson, W. Silker, C.W. Thomas, K.H. Abel, and D.R. Robertson, Long-lived activation products in reactor materials. Pacific Northwest Laboratory Report,

- 85-89, NUREG/CR-3474 (1984).
- [18] R.D. Woodson, Concrete structures: protection, repair and rehabilitation, 1st ed., 39-50, Butterworth-Heinemann, Oxford (2009).
- [19] R. Khettabi, V. Songmene, J. Masounave, and I. Zaghbani, "Understanding the formation of nano and micro particles during metal cutting", *Int. J. Signal Syst. Control Eng. Appl.*, 1(3), 203-210 (2008).
- [20] IAEA, "Decommissioning Costs of WWER-440 Nuclear Power Plants", IAEA-TECDOC-1322, IAEA, Vienna (2002).
- [21] W.C. Hinds, Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles, 2nd ed., 44-60, John Wiley & Sons, New York (1999).
- [22] Baron, P.A. and K. Willeke, Aerosol measurement: principles, techniques, and applications, 2nd ed., 45-60, John Wiley and Sons, New York (2001).
- [23] P.F. DeCarlo, J.G. Slowik, D.R. Worsnop, P. Davidovits, and J.L. Jimenez, "Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory", *Aerosol Sci. Tech.*, 38(12), 1185-1205 (2004).
- [24] T.J. Ypma, "Historical development of the Newton-Raphson method", *SIAM review*, 37(4), 531-551 (1995).
- [25] T.A. Soylev and R. François, "Quality of steel-concrete interface and corrosion of reinforcing steel", *Cement Concrete Res.*, 33(9), 1407-1415 (2003).
- [26] U.S. EPA, Methods For Derivation Of Inhalation Reference Concentrations (RfCs) And Application Of Inhalation Dosimetry, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Health and Environmental Assessment, Washington D.C., 26-28, EPA/600/8-90/066F (1994).
- [27] J.W. Marsh, A. Birchall, and N.S. Jarvis, "Validation of IMBA and IMBA expertTM" *Proc. of the 2002 Towards harmonisation of radiation protection in Europe: European IRPA Congress*, vol. 37, 243-278, October 8-11, 2002, Italy.
- [28] R. Loesch, Guidance on the Use of IMBA Software for DOE Safety Applications, US Department of Energy Document, 1-39, DOE-HS-0002 (2006).
- [29] ICRP, ICRP Publication 68: Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, *Annals of the ICRP*, 24(4) (1994).
- [30] E.H. Carbaugh, D.E. Bihl, J.A. Maclellan, C.L. Antonio, and R.L. Hill, Methods and Models of the Hanford Internal Dosimetry Program, Pacific Northwest National Lab (PNNL) Report, PNNL-MA-860 (2009).