JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(2) : 161-172 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.2.161

국내 석탄화력발전소 내 작업종사자의 입자 흡입에 따른 내부피폭 방사선량 평가

이도연[1], 진용호[1], 곽민우[1], 김지우[1], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Assessment of Internal Radiation Dose Due to Inhalation of Particles by Workers in Coal-Fired Power Plants in Korea

Do Yeon Lee[1], Yong Ho Jin[1], Min Woo Kwak[1], Ji Woo Kim[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

Abstract Coal-fired power plants handle large quantities of coal, one of the most prominent NORM, and the coal ash produced after the coal is burned can be tens of times more radioactive than the coal. Workers in these industries may be exposed to internal exposure by inhalation of particles while handling NORM. This study evaluated the size, concentration, particle shape and density, and radioactivity concentrations of airborne suspended particles in the main processes of a coal-fired power plant. Finally, the internal radiation dose to workers from particle inhalation was evaluated. For this purpose, airborne particles were collected by size using a multi-stage particle collector to determine the size, shape, and concentration of particles. Samples of coal and coal ash were collected to measure the density and radioactivity of particles. The dose conversion factor and annual radionuclide inhalation amount were derived based on the characteristics of the particles. Finally, the internal radiation dose due to particle inhalation was evaluated. Overall, the internal radiation dose to workers in the main processes of coal-fired power plants A and B ranged from 1.47×10^{-5}~1.12×10^{-3} mSv y^{-1}. Due to the effect of dust generated during loading operations, the internal radiation dose of fly ash loading processes in both coal-fired power plants A and B was higher than that of other processes. In the case of workers in the coal storage yard at power plants A and B, the characteristic values such as particle size, airborne concentration, and working time were the same, but due to the difference in radioactivity concentration and density depending on the origin of the coal, the internal radiation dose by origin was different, and the highest was found when inhaling coal imported from Australia among the five origins. In addition, the main nuclide contributing the most to the internal radiation dose from the main processes in the coal-fired power plants was thorium due to differences in dose conversion factors. However, considering the external radiation dose of workers in coal-fired power plants presented in overseas research cases, the annual effective dose of workers in the main processes of power plants A and B does not exceed 1 mSv y^{-1}, which is the dose limit for the general public notified by the Nuclear Safety Act. The results of this study can be utilized to identify the internal exposure levels of workers in domestic coal-fired power plants and will contribute to the establishment of a data base for a differential safety management system for NORM-handling industries in the future.

Key words: NORM, Coal-fired plant, Internal radiation dose, Particle characteristic, Worker

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Kwang Pyo Kim
Tel. +82-31-201-2560 Fax. +82-31-273-3592 E-mail. kpkim@khu.ac.kr
Received 17 May 2023 **Revised** 15 June 2023 **Accepted** 15 June 2023

1. 서 론

천연방사성핵종 함유물질(Naturally Occurring Radioactive Material; NORM)은 자연으로부터 유래하는 ^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th의 방사성 붕괴계열과 ^{40}K 등의 천연방사성핵종을 함유하고 있는 물질을 의미한다. NORM은 주변 환경 어디에나 존재하며, 다양한 광물과 산업원료에 포함되어 있다. 여러 국외 기관 및 국제기구에서는 NORM 취급 산업체 내 작업종사자는 작업 과정에서 방사선학적 영향이 발생할 수 있음을 언급한 바 있다[1-3]. 이에 따라, 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA) 및 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP), 유럽연합(European Union; EU)에서는 NORM을 취급하는 산업체의 작업종사자에 대한 방사선 방호 조치의 필요성을 권고하였다[4-6]. 국제에너지기구(International Energy Agency; IEA)에 따르면 대표적인 NORM 중 하나인 석탄은 전 세계적으로 연간 약 80억 톤이 소비되며, 석탄화력발전소에서는 전력 생산을 위해 대량의 석탄이 사용되고 있음을 언급한 바 있다[7]. 국내의 전력통계정보에 의하면 석탄화력발전소의 연간 총 석탄 소비량은 약 6,800만 톤인 것으로 나타났다. 또한 이를 취급하는 공정에서는 많은 양의 분진이 발생하며, 작업종사자는 이를 흡입할 개연성이 있다. 이에 따라, 석탄화력발전소 내 작업종사자의 공기 중 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량 평가가 필요하다.

여러 국외 선행연구에서는 석탄화력발전소 내 작업종사자의 방사선학적 영향을 평가한 사례가 존재한다. Pepin 등은 벨기에의 석탄화력발전소 내 작업종사자의 분진 흡입에 의한 내부피폭 방사선량을 평가하였다[8]. Baeza 등은 스페인에서 석탄화력발전소 내 작업종사자의 석탄 및 석탄회에 의한 외부 및 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[9]. Garg 등은 인도의 Haryana에 위치한 석탄화력발전소 내 공정에서 발생되는 방사성핵종인 라돈과 토론에 의한 작업종사자의 연간 유효선량을 평가하였다[10]. 또한, 국제기구 및 국외에서는 석탄화력발전소 이외의 다양한 NORM 취급 산업체에 대해 작업종사자의 방사선학적 영향을 평가하였다. Dal-Molin 등은 영국에서 철광석 산업 내 발생하는 방사성물질에 의한 작업종사자의 내부피폭 방사선량을 평가하였다[11]. 유엔방사선영향과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; UNSCEAR)에서는 석탄 채굴 및 광물가공, 석유 및 가스 추출 등의 공정 내 작업종사자의 유효선량 평가 결과를 제시하고 있다[12]. 국내의 경우 지승우 등은 국내 인산염 취급 산업체 작업종사자의 입자 흡입으로 인한 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[13].

NORM 산업체 내 작업종사자의 방사선학적 영향은 산업체별 공정 및 취급물질 등 다양한 요인에 따라 상이하다. 또한 같은 물질이더라도 입자의 크기, 밀도 등의 입자의 특성에 따라서 내부피폭 방사선량은 상이하다. 이에 따라, 각 산업체의 특성이 반영된 방사선량 평가가 필요하다. 국외에서는 석탄화력발전소를 포함하여 다양한 NORM 산업체 내 작업종사자의 방사선학적 평가가 존재하였다. 그러나, 국내의 경우, 일부 NORM 산업체에 대한 방사선량 평가는 존재하나, 석탄화력발전소에 대한 평가는 미흡한 실정이다. 따라서, 국내 석탄화력발전소의 특성을 반영한 내부피폭 방사선량 평가가 필요하다.

본 연구의 목적은 석탄화력발전소의 주요 공정 내 작업종사자의 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량 평가를 수행하는 것이다. 먼저 국내 석탄화력발전소 2곳을 대상으로 주요 공정을 분석하였으며, 분진 흡입의 가능성이 높은 곳에서 공기 중 입자를 채집하였다. 채집된 입자를 통해 입자의 크기 분포와 입자의 농도를 측정하고, 입자의 모양을 분석하였다. 그리고 석탄 및 석탄회의 시료를 채취하여, 입자의 밀도 및 방사능 농도를 측정하였다. 이를 기반으로 연간 방사성핵종 흡입량 및 IMBA (Integrated Modules for Bioassay Assessment) 전산코드를 이용한 핵종별 선량환산인자를 도출하였다. 최종적으로 석탄화력발전소 주요 공정 내 작업종사자의 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

ICRP에서는 공기 중 입자의 흡입으로 인해 발생하는 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해 인체호흡기모델(Human Respiratory Tract Model; HRTM)을 제시하였다[14]. 인체호흡기모델은 흡입된 방사성물질의 분포를 다양한 해부학적 영역, 나이, 성별 등의 인자를 고려하여 평가하고 있다. ICRP에서는 입자의 크기, 모양 등의 입자 특성에 따라 흡착되는 장기 및 양이 달라지며, 최종적으로 방사선량이 달라질 수 있다고 언급한 바 있다. 따라서 입

자의 물리적, 화학적 특성의 구체적인 정보를 반영하여 내부피폭 방사선량 평가를 수행해야 한다.

본 연구에서는 NORM이 함유된 석탄 및 석탄회를 취급하는 석탄화력발전소 내 작업종사자의 입자 호흡에 의한 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다. 이를 위해 석탄연소 발전소 내 주요 공정을 선정하였고, 선정한 주요 공정에 다단계 입자채집기를 설치하여 입자의 크기별로 채집을 수행하였다. 채집된 입자를 이용하여 공기 중 입자의 크기 분포 및 농도를 측정하였으며, 입자의 크기별로 모양을 분석하였다. 또한 발전소 내 주요 공정에서 채취한 시료를 대상으로 입자의 밀도와 시료 내 함유된 천연방사성핵종의 방사능 농도를 측정하였다. 이를 기반으로 연간 방사성핵종 흡입량 및 IMBA 전산코드를 이용한 핵종별 선량환산인자를 도출하였다. 그리고 최종적으로 석탄화력발전소 주요 공정 내 작업종사자의 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량을 평가하였다.

2.1. 석탄연소 발전소 주요 공정 선정

본 연구에서는 석탄화력발전소 내 작업종사자의 내부피폭 방사선량을 평가하기에 앞서 국내 석탄화력발전소 2곳을 대상으로 주요 공정의 분석 및 선정을 수행하였다. 주요 공정의 분석 및 선정은 공기 중 입자의 채집 및 시료 채취를 목적으로 수행되었다. 입자의 채집 및 시료 채취 장소의 선정 시, 현장조사를 기반으로 많은 양의 분진이 발생하는 공정 및 분진으로 인해 작업종사자의 피폭이 발생할 개연성이 있는 지점, 작업시간 등을 고려하여 주요 공정으로 선정하였다.

2.2. 공기 중 입자의 크기 분포 및 농도 측정

입자의 크기는 호흡기 내에서 입자의 확산운동 및 호흡기 내 영역에서 침착되는 비율에 영향을 미친다. 선행 연구에 따르면 입자의 크기가 감소할수록 호흡기 내 깊은 곳에 침착될 가능성이 높다고 제시한 바 있다[15]. 이에 따라, 입자의 흡입에 의한 내부피폭 방사선량은 입자의 크기에 따라 크게 달라질 가능성이 있으며, 내부피폭 방사선량 평가 시 입자의 크기는 주요 인자이다.

본 연구에서는 다단계 입자채집기(Andersen 1 ACFM Non-viable Ambient Particle Sizing Sampler)를 이용하여 주요 공정 내 공기 중 입자를 채집하였다[16]. 다단계 입자채집기는 공기 중 입자를 공기역학적 직경 등급으로 분리하는 것이 가능하며, 채집기의 흡입구로 주입된 미세한 입자는 순차적으로 0부터 8까지의 적층 단계를 통해 분리된다. 각 적층 단계의 공기역학적 직경은 9 μm 이상, 5.8~9 μm, 4.7~5.8 μm, 3.3~4.7 μm, 2.1~3.3 μm, 1.1~2.1 μm, 0.65~1.1 μm, 0.4~0.65 μm, 0.03~0.4 μm으로 구성되어 있다. 또한 미세한 입자를 채집하기 위해 충돌 평판에 여과지가 사용되는데, 이때 0~7단계의 여과지는 멤브레인 여과지를 사용하였으며, 8단계는 유리섬유 여과지를 사용하였다. 본 연구에서는 단계별 채집된 공기 중 입자를 이용하여 입자의 크기 분포 및 농도를 측정하였다. 그리고 입자의 크기 분포를 대수 정규 분포로 가정하여 공기역학적 질량중간직경(Mass Median Aerodynamic Diameter; MMAD)과 기하학적 표준편차(Geometric Standard Deviation; GSD)를 산출하였다[17]. 미국환경보호청(United States Environmental Protection Agency; EPA)에서는 공기 중 입자의 분포가 균일할 경우 MMAD를 공기역학적 방사능중간직경(Activity Median Aerodynamic Diameter; AMAD)와 같다고 제시한 바 있다[18]. AMAD는 ICRP에서 제시된 입자 흡입에 따른 내부피폭 방사선량 평가 방법에 있어 주요인자이다. 따라서, 본 연구에서는 최종적으로 입자의 크기 분포를 이용하여 MMAD를 산출하였고, 이를 AMAD와 같다고 가정하였다.

2.3. 입자의 모양 및 밀도 분석

호흡기 내 입자의 침착은 관성 충돌, 중력에 의한 침강, 확산 등에 의해 결정된다. 이때, 입자의 호흡기 내 거동 원리 중 침강은 중력의 영향을 받으며, 중력은 중력 가속도 및 입자의 체적, 입자의 밀도에 의해 결정된다. 그리고 불규칙한 모양을 가진 입자가 받는 저항력은 일반적으로 같은 체적의 구형 입자가 받는 저항력보다 크다. 이에 따라, 흡입에 의해 체내로 유입된 방사성물질을 함유한 입자는 입자의 모양 및 밀도에 따라 호흡기 내 침착되는 부위가 달라진다. 따라서, 정확한 입자 흡입에 따른 내부피폭 방사선량 평가 시, 입자의 모양 및 밀도의 분석이 필요하다.

본 연구에서는 앞서 다단계 입자채집기를 통해 주요 공정에서 채집된 입자를 이용하여 입자의 모양을 분석하였다. 입자의 모양은 입자의 크기 및 물질의 종류에 따라 상이하다. 따라서, 물질의 미세구조를 고배율로 관찰하는 것이 가능한 주사전자현미경(Stereoscan 440, Leica Cambridge, England)을 이용하여 0단계, 3단계, 5단계, 7단

계에 수집된 입자를 대상으로 모양을 분석하였다.

입자의 밀도 분석은 석탄화력발전소 내 주요 공정에서 채취한 산지별 석탄 및 석탄회를 대상으로 비교분석 하였으며, 입자의 밀도를 측정하기 위해 밀도분석기(AccuPyc 1330, Micromeritics, German)를 이용하였다. 밀도분석기는 분말 형태와 같은 고체 물질의 밀도를 측정하는 장비이며, 용기 내 시료가 차지하는 부피의 정보를 이용하여 밀도의 측정을 가능하게 한다. 밀도분석기를 사용하기 전, 시료의 정확한 밀도값을 측정하기 위해 채취한 시료를 약 105°C에서 24시간 건조시켰으며, 25 cc 알루미늄 용기에 대한 보정을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 오차를 최소화하기 위해 3번에 나누어 측정을 진행하였으며, 이들의 평균값을 최종 밀도값으로 선정하였다.

2.4. 방사능 농도 측정

석탄화력발전소 내 석탄 및 석탄회는 천연방사성핵종인 우라늄 계열의 핵종과 토륨 계열의 핵종, ^{40}K 핵종을 함유하고 있다. 선행 연구에 따르면 석탄화력발전소에서 사용되는 석탄 내 천연방사성핵종의 방사능 농도는 지질특성, 종류 등에 따라 상이하며, 연소 이후 발생된 석탄회는 석탄에 비해 방사능 농도가 더 높은 것으로 나타났다[19]. 국내 석탄화력발전소에서는 러시아, 캐나다 등의 여러 국가에서 석탄을 수입하고 있으며, 산업체별 수입국은 상이한 것으로 나타났다. 이에 따라, 발전소별 석탄의 방사능 농도는 상이할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내 석탄화력발전소 내 주요 공정에서 채취한 산지별 석탄 및 석탄회를 대상으로 방사능 농도를 측정하였다.

본 연구에서는 감마분광법을 이용하여 시료 내 우라늄 및 토륨 계열의 핵종, ^{40}K의 방사능 농도를 측정하였다. ^{238}U 붕괴계열의 대표 핵종은 ^{226}Ra, ^{232}Th 붕괴계열의 대표 핵종은 ^{228}Ra 핵종으로 선정하였다. ^{226}Ra는 자핵종인 ^{214}Bi과 방사평형을 이루게 하여 방사능을 측정하였다. 이때, ^{214}Bi에서 방출되는 609, 1,120, 1,760 keV의 감마선 에너지를 이용하였다. ^{228}Ra는 자핵종인 ^{228}Ac과 방사평형을 이루게 하여 방사능을 측정하였다. 이때, ^{228}Ac에서 방출되는 338.3, 911.6, 969.1 keV의 감마선 에너지를 이용하였다. 모핵종의 반감기가 자핵종의 반감기에 비해 매우 클 경우, 일정 시간 후 자핵종과 모핵종은 영속평형을 이루게 되어 방사능이 같아지게 된다. 따라서 본 연구의 평가 대상인 석탄화력발전소의 석탄 및 석탄회에 포함된 핵종들이 영속평형을 이루고 있다고 가정하였다. 그리고 채취한 시료는 건조기를 이용하여 약 105°C에서 48시간 건조시킨 후, 직경 2 mm 이하로 분쇄하였다. 이를 1 L 마리넬리 비이커에 약 30일간 밀봉하여 시료 속의 관심 핵종의 방사능이 자핵종과 방사평형을 이루도록 하였다. 이후, 최종적으로 HPGe(GC 3020, Canberra, USA)를 이용하여 80,000초 동안 측정을 진행하였다.

2.5. 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량 평가

입자의 흡입에 의한 내부피폭 방사선량은 선량환산인자(Sv Bq^{-1}), 작업종사자의 호흡률(m^3 h^{-1}), 공기 중 입자의 농도(g m^{-3}), 방사능 농도(Bq g^{-1}) 등을 고려하여 평가할 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 앞서 도출한 석탄화력발전소 내 입자의 특성 정보를 반영하여 작업종사자의 연간 방사성핵종 흡입량(Bq y^{-1}) 및 내부피폭 선량환산인자(Sv Bq^{-1})를 도출하였으며, 최종적으로 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[20].

작업종사자의 연간 방사성핵종 흡입량은 방사성핵종의 방사능 농도, 공기 중 입자의 농도, 호흡률, 작업시간, 마스크의 여과상수 등을 고려하여 평가하였다. 방사능 농도 및 공기 중 입자의 농도, 작업시간은 앞서 도출한 결과를 적용하였다. 작업종사자의 호흡률의 경우, 주요 공정 내 작업종사자의 작업 강도를 바탕으로 ICRP에서 제시하고 있는 가벼운 작업의 호흡률인 1.2 m^3 h^{-1}를 적용하였다. 그리고 해당 발전소 내 작업종사자는 작업 시, 2급 방진마스크를 착용하는 것으로 확인되었다. 이에 따라, 주요 공정 내 공기 중 입자의 80%가 마스크 내 여과된다고 가정하였다.

$$I = \sum_i R_i \times C \times BF \times t \times FR$$

- I = 작업종사자의 연간 방사성핵종 흡입량(Bq y^{-1})
- R_i = 취급물질 내 방사성핵종 i의 방사능 농도(Bq g^{-1})
- C = 공기 중 입자의 농도(g m^{-3})
- BF = 작업종사자의 호흡률(m^3 h^{-1})
- t = 작업종사자의 연간 작업시간(h y^{-1})
- FR = 2급 방진 마스크의 여과상수

선량환산인자는 ICRP에서 제시한 인체호흡기모델, 생체역학적모델 등을 기반으로 내부피폭 방사선량을 평가 가능한 IMBA 전산코드를 이용하여 도출하였다. 선량환산인자 도출 시, 앞서 도출한 입자의 크기 및 밀도, 모양 등

Table 1. Analysis results of major processes in coal-fired power plant

Plant	Location of main process	Work type	Working time ($h\ y^{-1}$)
Plant A	Coal storage yard	On-site work in the coal storage yard	1,460
	Fly ash silo	Fly ash loading operation	1,095
Plant B	Coal storage yard	Heavy equipment operation	1,095
		Reclaimer operation	1,460
	Fly ash silo	Fly ash loading operation	730

을 적용하였다. 또한 격실 간 전이율, 흡수형태 등은 ICRP에서 제시하는 기본값을 사용하였다. 최종적으로 본 연구에서는 입자의 특성을 반영한 핵종별 선량환산인자 및 연간 방사성핵종의 흡입량을 이용하여 작업종사자의 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다.

$$D_{inh} = \sum_i I_i \times DCF_{inh,i}$$

- D_{inh} = 작업종사자의 내부피폭 방사선량($Sv\ y^{-1}$)
- I_i = 작업종사자의 연간 방사성핵종 i의 흡입량($Bq\ y^{-1}$)
- $DCF_{inh,i}$ = 방사성핵종 i의 입자 흡입에 의한 내부피폭 선량환산인자($Sv\ Bq^{-1}$)

3. 결 과

3.1. 석탄화력발전소의 주요 공정 분석

Table 1에 석탄화력발전소별 주요 공정 및 작업환경 분석 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 공기 중 입자 중 입자의 크기 분포 및 농도를 측정하기에 앞서 석탄화력발전소 내 주요 공정을 분석하였다. 최종적으로 선정된 석탄 연소 발전소의 주요 공정은 석탄 하역 공정, 저탄장, 석탄회 발생 공정, 탈황석고 발생 공정이다. 석탄 하역 및 저탄장에서는 해외에서 수입된 석탄의 하역 후 저탄장에 적치하는 작업이 이루어진다. 석탄 하역장은 야외에 위치하며, 파이프 내부에서 석탄이 이동하는 폐쇄공정으로 구성되어 있어 분진의 비산이 미미한 것으로 나타났다. 저탄장에서는 스태커를 이용하여 운반된 석탄을 적치하는 과정에서 많은 분진이 발생하였다. 또한 주기적으로 살수 작업을 수행하나, 야외에 적치된 석탄은 바람 등에 의해 비산될 가능성이 큰 것으로 나타났다. 석탄회 발생 공정에서는 석탄의 연소 후 남는 물질인 석탄회가 발생한다. 석탄회는 보일러 내에서 연소 후 모이는 장소에 따라 비회, 저회로 구분된다. 비회는 석탄 연소 후 보일러 상부에서 배출되는 배기가스 내 함유되어 있는 미세 분진으로서, 이는 전기집진기에 포집된 후 파이프라인을 통하여 사일로에 저장된다. 저회는 보일러 벽, 과열기 등에 부착되어 있다가, 자중에 의해 보일러 바닥으로 낙하되는 덩어리 모양의 석탄회를 의미한다. 그리고 저회는 보일러 하부로 배출되어 전량 매립장으로 운반된다. 본 연구에서 선정한 발전소 A, B의 경우, 비회의 발생량은 저회의 발생량보다 약 4~8배 높게 나타났다. 비회가 저장되는 사일로에서는 화물차량 운전자에 의해 비회가 차량에 적재되는 과정에서 많은 양의 비회가 누출되었으며, 많은 분진이 발생하는 것으로 나타났다. 탈황석고 발생 공정은 발전소 A에만 해당하며, 탈황설비 시설에서 석회석과 화학반응을 통하여 석탄에 함유된 황 성분을 제거하는 과정에서 발생한다. 발생된 탈황석고는 보관창고에 컨베이어 벨트를 통해 적치되며, 적치된 탈황석고를 굴삭기로 정리하는 과정에서 많은 분진이 발생하는 것으로 나타났다.

3.2. 입자의 크기 분포 및 농도

Fig. 1에 국내 석탄화력발전소의 주요 공정에 따라 채집된 공기 중 입자 크기 분포 및 농도를 나타내었다. 입자 채집기의 설치 장소는 앞서 선정한 주요 공정 중 저탄장과 비회사일로이다. 이는 주요 공정 분석을 통해 분진이 발생할 수 있는 곳과 작업종사자가 피폭될 개연성이 높은 곳으로 선정하였다. 발전소 A에서는 전체적으로 공기 중 입자의 농도가 0.003~0.201 $\mu g\ L^{-1}$의 범위로 나타났으며, 공정에 따른 공기 중 입자의 농도는 비회사일로, 저탄장 순으로 높게 나타났다. 그리고 저탄장의 경우, 기하학

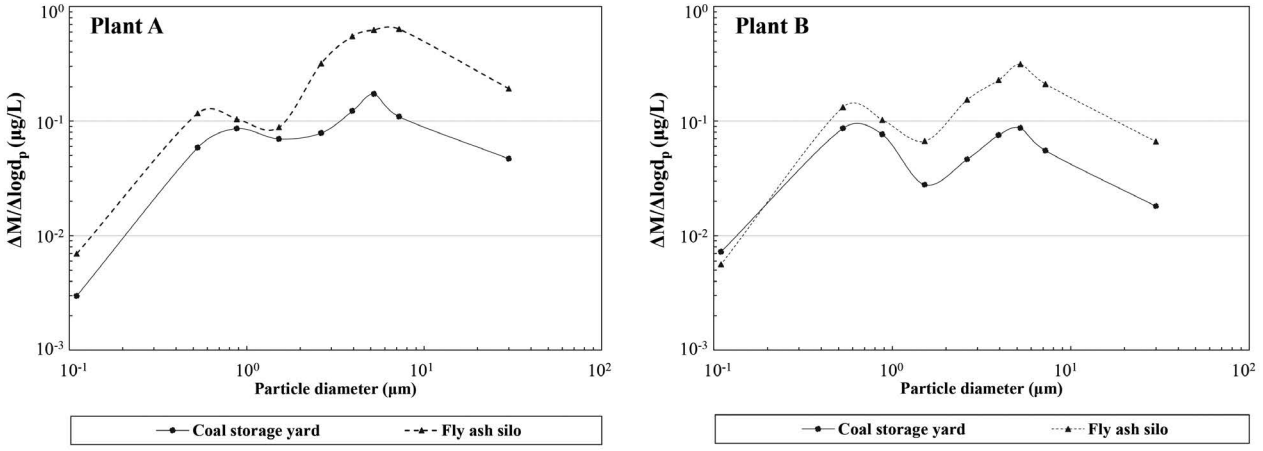

Fig. 1. Particle size distribution of process for coal-fired plant.

적 평균직경이 30 μm인 입자 크기 범위에서 0.049 μg L^{-1}로 입자의 최대농도를 나타냈다. 비회사일로의 경우, 기하학적 평균직경이 30 μm인 입자 크기 범위에서 저탄장에 비해 약 5배인 0.201 μg L^{-1}로 입자의 최대 농도를 나타냈다. 그리고 최종적으로 저탄장과 비회사일로 공정에 대해 MMAD는 4.1, 6.2 μm로 나타났으며, GSD는 2.95, 4.82로 나타났다. 발전소 B에서는 전체적으로 공기 중 입자의 농도가 0.006~0.069 μg L^{-1}의 범위로 나타났으며, 공정에 따른 공기 중 입자의 농도는 비회사일로, 저탄장 순으로 높게 나타났다. 저탄장의 경우, 기하학적 평균직경이 0.53 μm인 입자 크기 범위에서 0.021 μg L^{-1}로 입자의 최대 농도를 나타냈다. 비회사일로의 경우, 기하학적 평균직경이 30 μm인 입자 크기 범위에서 저탄장에 비해 약 3배인 0.069 μg L^{-1}로 입자의 최대 농도를 나타냈다. 그리고 최종적으로 저탄장과 비회사일로 공정에 대해 MMAD는 2.5, 4.6 μm로 나타났으며, GSD는 5.33, 7.04로 나타났다.

3.3. 입자의 모양 및 밀도

Fig. 2에 국내 석탄 발전소 A의 비회사일로 내 입자채집기 단계별 입자 모양을 나타내었다. 본 연구에서는 발전소별 주요 공정에서 입자 채집기의 단계별 입자 모양을 파악하였다. 발전소별 주요 공정에서 채집된 입자의 모양은 공정과 입자의 크기에 상관없이 모두 구형에 가까운 형태로 나타났으며, 기다란 모양의 입자는 존재하지 않았다. 이에 따라, 본 연구에서는 모양인자의 값을 1로 설정하였다.

Table 2에 국내 석탄 발전소별 측정된 입자의 밀도를 나타내었다. 발전소 A의 경우, 유연탄의 밀도는 5개의 수입국에 따라 1.39~1.47 g cm^{-3}으로 나타났다. 석탄 연소 후 발생하는 석탄회인 비회 및 저회, 탈황석고의 밀도는 각각 2.43, 1.52, 2.41 g cm^{-3}으로 나타났다. 발전소 B의 경우, 유연탄의 밀도는 4개의 수입국에 따라 1.39~1.42 g cm^{-3}으로 나타났다. 비회, 저회의 밀도는 각각 2.33, 2.58 g cm^{-3}으로 나타났다.

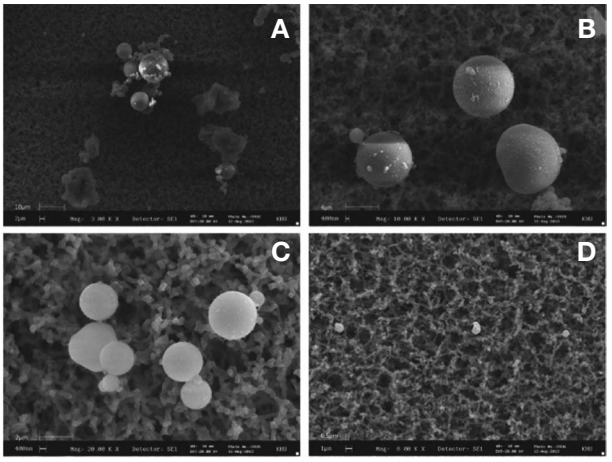

Fig. 2. Shape of airborne particulates by stage collected at fly ash silo in coal-fired plant A (A : 0th stage, B: 3th stage, C: 5th stage, D: 7th stage).

3.4. 방사능 농도

Fig. 3에 석탄화력발전소에서 취급하는 석탄 및 석탄회 내에 함유된 ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{40}K 핵종의 방사능 농도를 나타내었다. 석탄화력발전소에서 취급하는 석탄인 유연탄의

^{226}Ra 및 ^{228}Ra의 방사능 농도는 2~18 Bq kg^{-1}의 분포로 나타났으며, 두 핵종의 방사능 농도는 유사한 수준으로 나타났다. ^{40}K의 방사능 농도는 14~80 Bq kg^{-1}의 분포로 나타났으며, ^{226}Ra 핵종의 방사능 농도보다 평균적으로 약 5배 정도 높게 나타났다.

석탄화력발전소에서 발생하는 석탄회 중 비회의 방사능 농도는 ^{226}Ra의 경우, 약 100~133 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra의 경우, 77~105 Bq kg^{-1}, ^{40}K의 경우, 292~372 Bq kg^{-1}의 분포로 나타났다. 저회의 방사능 농도는 ^{226}Ra의 경우, 약 89~91 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra의 경우, 75~80 Bq kg^{-1}, ^{40}K의 경우, 388~389 Bq kg^{-1}의 분포로 나타났다. 석탄회에 함유된 ^{40}K 핵종의 방사능 농도는 석탄보다 평균적으로 약 7배 높게 나타났다. 또한 발전소 A에서 발생하는 탈황석고의 방사능 농도는 ^{226}Ra의 경우, 5 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra의 경우, 2 Bq kg^{-1}, ^{40}K의 경우, 22 Bq kg^{-1}로 나타났다.

Table 2. Density of material handled in coal-fired plant

Industry	Sample	Density (g cm^{-3})
Plant A	Bituminous coal (AUS)	1.44±0.01
	Bituminous coal (CAN)	1.39±0.01
	Bituminous coal (RUS)	1.42±0.03
	Bituminous coal (USA)	1.47±0.01
	Bituminous coal (IND)	1.39±0.01
	Fly ash	2.43±0.02
	Bottom ash	1.52±0.04
	Desulfurization	2.41±0.02
Plant B	Bituminous coal (AUS 1)	1.42±0.01
	Bituminous coal (AUS 2)	1.42±0.01
	Bituminous coal (RUS)	1.42±0.01
	Bituminous coal (IND)	1.39±0.01
	Fly ash	2.33±0.04
	Bottom ash	2.58 ±0.03

3.5. 작업종사자 내부피폭 방사선량 평가

석탄화력발전소 A, B 내 주요 공정 작업종사자의 연간 총 방사성핵종 흡입량은 전체적으로 1.16×10^{-3}~2.41×10^{-1} Bq y^{-1}인 것으로 확인되었으며, 발전소 A, B 모두 비회 적재 작업 공정에서 가장 높은 것으로 확인되었다. 그리고 비회 적재 작업 공정에서 핵종별 연간 방사성핵종 흡입량은 발전소 A의 경우 ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K, 발전소 B의 경우 ^{238}U, ^{40}K, ^{232}Th 순서로 높게 나타났다. 발전소에 따라 핵종별 연간 방사성핵종 흡입량의 순서 차이는 방사능 농도에 의한 것으로 확인되었다. 해당 공정에서 ^{238}U 계열의 연간 방사성핵종 흡입량은 발전소 A의 경우, 1.27×10^{-1} Bq y^{-1}, 발전소 B의 경우, 2.95×10^{-2} Bq y^{-1}로 나타났다.

Table 3에 석탄화력발전소 내 주요 공정 작업종사자의 내부피폭 방사선량을 나타내었다. 발전소 A에서 주요 공정 작업종사자의 내부피폭 방사선량은 전체적으로

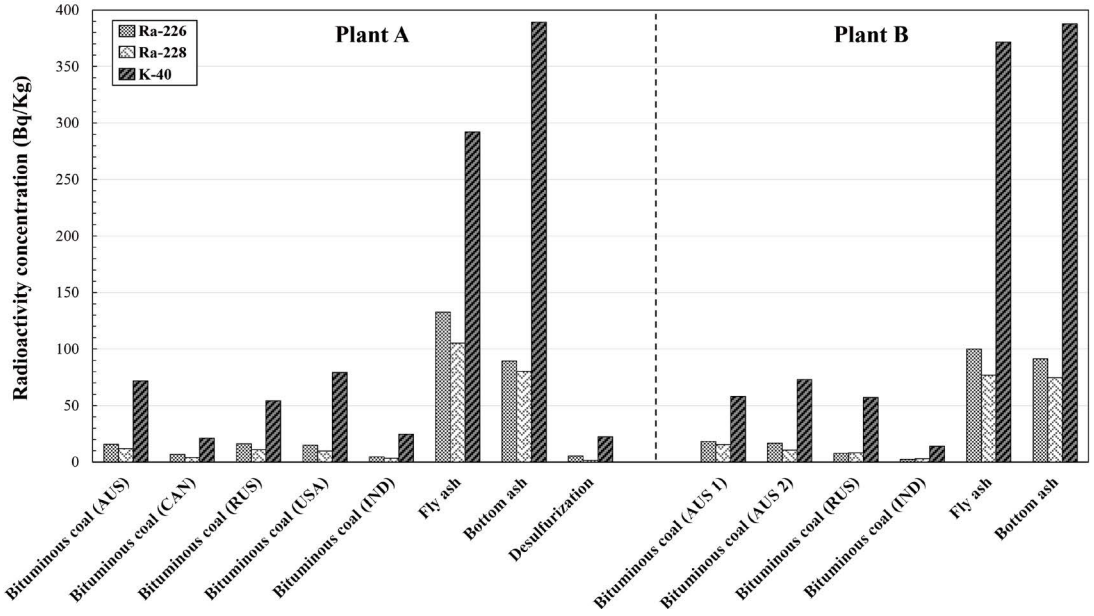

Fig. 3. Radioactivity concentration of handled material for coal-fired plant.

Table 3. Internal radiation dose rate due to handling material in main process

Industry	Main process		Material	Internal radiation dose ($mSv\ y^{-1}$)
	Location of main process	Work type		
Plant A	Coal storage yard	On-site work in the coal storage yard	Bituminous coal (AUS)	5.26×10^{-5}
			Bituminous coal (CAN)	1.89×10^{-5}
			Bituminous coal (RUS)	4.98×10^{-5}
			Bituminous coal (USA)	4.51×10^{-5}
			Bituminous coal (IND)	1.47×10^{-5}
	Fly ash silo	Fly ash loading operation	Fly ash	1.12×10^{-3}
Plant B	Coal storage yard	Reclaimer operation	Bituminous coal (AUS 1)	4.03×10^{-5}
			Bituminous coal (AUS 2)	5.48×10^{-5}
			Bituminous coal (RUS)	2.74×10^{-5}
			Bituminous coal (IND)	9.46×10^{-6}
		Heavy equipment operation	Bituminous coal (AUS 1)	3.03×10^{-5}
			Bituminous coal (AUS 2)	4.11×10^{-5}
			Bituminous coal (RUS)	2.06×10^{-5}
			Bituminous coal (IND)	7.09×10^{-6}
	Fly ash silo	Fly ash loading operation	Fly ash	3.06×10^{-4}

1.47×10^{-5}~1.12×10^{-3} $mSv\ y^{-1}$로 나타났으며, 비회 적재작업, 저탄장 현장 근무 작업의 순서로 높게 나타났다. 저탄장 현장 근무 작업은 취급물질의 방사능 농도 및 공기 중 입자의 농도의 영향으로 인해 비회 적재작업보다 약 1.32×10^{-2}~4.72×10^{-2}배 낮은 것으로 나타났다. 발전소 B에서 주요 공정 작업종사자의 내부피폭 방사선량은 전체적으로 7.09×10^{-6}~3.06×10^{-4} $mSv\ y^{-1}$로 나타났으며, 비회 적재작업, 저탄장 내 리클레이머 운전작업, 저탄장 내 중장비 운전작업의 순서로 높게 나타났다. 저탄장 내 중장비 운전작업은 발전소 A와 동일하게 취급물질의 방사능 농도 및 공기 중 입자의 농도의 영향으로 인해 비회 적재작업보다 약 2.32×10^{-2}~1.34×10^{-1}배 낮은 것으로 나타났다. 발전소 A, B에서 저탄장 내 작업종사자의 경우, 석탄의 산지에 따른 내부피폭 방사선량은 입자의 크기, 농도 등의 특성 값들은 동일하였으나, 석탄의 산지에 따라 방사능 농도 및 밀도의 차이로 인해 내부피폭 방사선량이 상이하게 나타났다. 그리고 저탄장 현장 근무 작업종사자의 내부피폭 방사선량은 5가지 산지 중 호주에서 수입된 석탄을 흡입하였을 경우 가장 높은 것으로 확인되었다.

4. 고 찰

본 연구에서는 석탄화력발전소 내 주요 공정 작업종사자의 입자 흡입 시 내부피폭 방사선량을 평가하였다. 발전소 내에서 발생하는 분진의 정도는 공정의 형태 및 위치에 따라 상이하게 나타났다. 입자의 특성은 동일한 발전소 내에서 공정에 따른 입자의 크기 및 농도 등이 상이하였으며, 공정에 따른 방사능 농도 또한 상이하게 나타났다. 이에 따라, 최종적으로 주요 공정 작업종사자의 내부피폭 방사선량은 상이하였다. 따라서 본 연구에서는 앞서 도출한 내부피폭 방사선량을 기반으로 공정별 비교 분석을 수행하였다. 이때, 저탄장 내 공정에 대해서는 내부피폭 방사선량이 최대로 나타난 석탄을 적용하였다. 그리고 주요 공정에서 내부피폭 방사선량에 대해 핵종별 선량기여분율을 분석하였다. 마지막으로, ICRP에서 제시하는 입자 특성의 기본값을 적용하여 작업종사자의 내부피폭 방사선량을 평가하였으며, 이를 실측값을 적용한 결과와 비교 분석하였다[14]. 기본값 적용 평가 시, ICRP에서 제시된 입자 특성의 기본값을 제외한 다른 값들은 공정별 실측값과 동일하게 적용하여 평가 및 비교를 진행하였다.

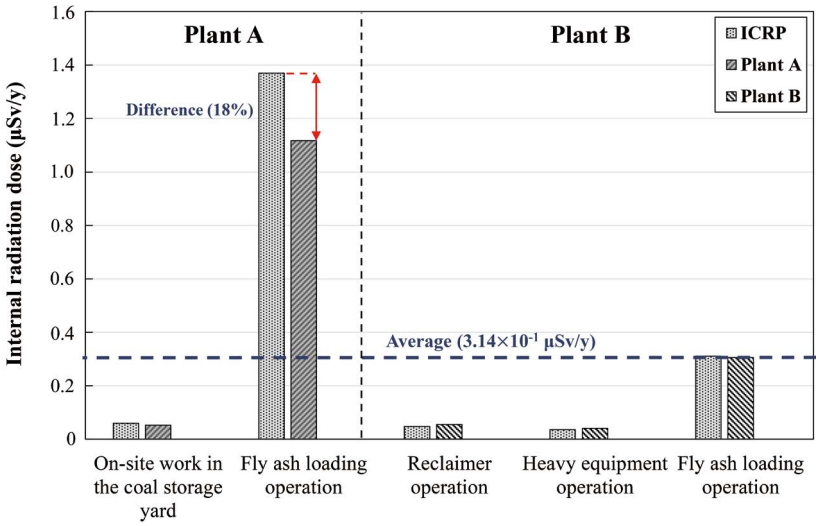

Fig. 4. Internal radiation dose of worker by coal-fired plant.

4.1. 석탄화력발전소 내 공정별 내부피폭 방사선량 비교 분석

Fig. 4에 석탄화력발전소 내 공정별 내부피폭 방사선량을 나타내었다. 발전소 A에서 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량은 비회 적재작업, 저탄장 내 현장 근무 순서로 높게 나타났으며, 비회 적재작업이 저탄장 내 현장 근무에 비해 약 21배 높은 것으로 확인되었다. 저탄장 현장 근무자의 근무 시간은 비회 적재작업 종사자의 근무시간보다 약 1.3배 더 긴 것으로 확인되었다. 그리고, 두 공정에서의 입자의 모양은 유사하였으나, AMAD는 저탄장이 비회사일로에 비해 약 0.7배 낮은 것으로 나타났다. 이에 따라, 저탄장에서 ^{238}U 계열과 ^{232}Th 계열의 핵종에 대한 선량환산인자는 비회사일로에 비해 최대 2.1배 높은 것으로 나타났다. 이는 AMAD가 작을수록 입자 흡입 시, 호흡기 내 깊은 곳에 침착 되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 비회사일로 내 공기 중 입자 농도가 저탄장에 비해 약 3.5배 높은 것으로 확인되었다. 비회 적재작업에서 취급하는 물질의 방사능 농도는 저탄장에 비해 ^{238}U계열의 핵종의 경우 약 8~59배, ^{232}Th 계열의 핵종의 경우 약 9배, ^{40}K의 경우 약 4배 높은 것으로 나타났다. 따라서, 연간 방사성핵종의 흡입량의 차이가 크게 발생하였고, 최종적으로 비회 적재작업종사자의 내부피폭 방사선량이 높게 나타난 것으로 판단된다. 발전소 B에서 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량은 비회 적재작업, 저탄장 내 리클레이머 운전작업, 저탄장 내 중장비 운전작업 순서로 높게 나타났다. 비회 적재작업의 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량은 저탄장 내 중장비 운전작업에 비해 약 13배 높은 것으로 나타났다. 근무 시간은 비회 적재작업에 비해 저탄장 내 중장비 운전작업이 1.5배 더 긴 것으로 확인되었다. 그리고, 두 공정에서의 입자의 모양은 유사하였으나, AMAD는 저탄장이 비회사일로에 비해 약 0.5배 낮은 것으로 나타났다. 이에 따라, 저탄장에서 ^{238}U 계열의 핵종과 ^{228}Ra을 제외한 ^{232}Th 계열의 핵종에 대한 선량환산인자는 비회사일로에 비해 최대 1.3배 높은 것으로 나타났다. 그러나, 비회사일로 내 공기 중 입자 농도는 저탄장에 비해 약 2.6배 높은 것으로 나타났다. 비회 적재작업에서 취급하는 물질의 방사능 농도는 저탄장에 비해 ^{238}U 계열의 핵종의 경우 약 8배, ^{232}Th 계열의 핵종의 경우 약 9배, ^{40}K의 경우 약 4배 높은 것으로 나타났다. 이에 따라, 연간 방사성핵종의 흡입량의 차이가 크게 발생하였고, 최종적으로 내부피폭 방사선량의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 해외 연구 사례에서 제시한 석탄화력발전소 내 작업종사자의 외부피폭 방사선량은 1.00×10^{-2}~2.92×10^{-1} mSv y^{-1} 것으로 나타났다[9,21,22]. 이를 고려하였을 때, 발전소 A, B의 주요 공정 내 작업종사자의 연간 유효선량은 원자력안전법에서 고시하고 있는 일반인 선량한도인 1 mSv y^{-1}를 넘지 않는 것으로 나타났다. 따라서 석탄화력발전소 내 작업종사자의 방사선학적 영향은 미미한 것으로 판단된다.

발전소 A, B의 평가 결과와 ICRP에서 제시된 입자 특성의 기본값을 적용하여 평가한 결과를 비교하였다. 평가 결

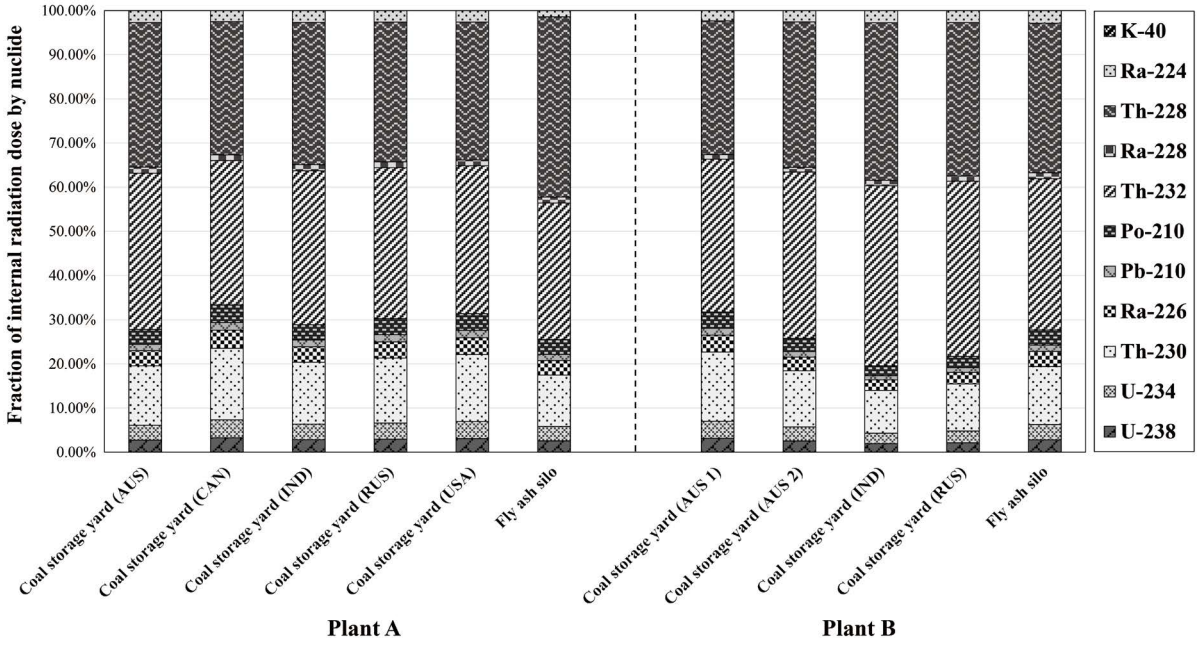

Fig. 5. Fraction of internal radiation dose by radionuclide in coal-fired plant.

과는 전체적으로 1~18% 정도 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 가장 오차가 크게 나타난 공정은 발전소 A의 비회 사일로 적재작업이며, ICRP 입자 특성 기본값을 적용한 방사선량은 1.37×10^{-3} mSv y^{-1}로 실측값에 비해 약 1.2배 더 높게 나타났다. 이는 기본값의 AMAD는 실측값에 비해 약 0.7배 낮으며, 입자의 밀도는 약 1.3배 높게 나타났기 때문에 선량환산인자의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 두 번째로 오차가 가장 크게 나타난 공정은 발전소 B의 저탄장 중장비 운전작업이며, ICRP 입자 특성 기본값을 적용한 방사선량은 3.59×10^{-5} mSv y^{-1}로 실측값에 비해 약 0.9배 더 낮게 나타났다. 이는 기본값의 입자의 밀도는 실측값에 비해 약 2.1배 높았지만 모양인자는 1.5배, AMAD가 약 2.1배 높아 선량환산인자의 차이로 발생하여 방사선량이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 입자 특성의 기본값을 적용할 경우 실측값을 적용한 결과와 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 작업종사자의 선량평가 시 과대 및 과소평가 될 수 있다. 따라서, 정확한 작업종사자의 내부피폭 방사선량 평가 시, 입자 특성 평가가 필요할 것으로 판단된다.

4.2. 석탄화력발전소 내 주요 공정의 핵종별 선량기여도 분석

Fig. 5에 석탄화력발전소 내 주요 공정의 핵종별 선량기여분율을 나타내었다. 석탄화력발전소의 저탄장 내 석탄은 원산지에 따라 핵종별 선량기여분율이 상이한 것으로 나타났다. 그러나, 석탄의 선량기여도가 지배적인 핵종들은 ^{232}Th (33~35%), ^{228}Th (30~33%), ^{230}Th (13~15%)로 동일하게 나타났다. 발전소 A에서 비회 적재 작업의 선량기여도가 지배적인 핵종은 ^{228}Th (40.8%), ^{232}Th (30.9%), ^{230}Th (11.6%)인 것으로 나타났다. 발전소 B에서 비회 적재 작업의 선량기여도가 지배적인 핵종은 ^{232}Th (34.2%), ^{228}Th (33.8%), ^{230}Th (13.1%)인 것으로 나타났다. 비회 적재 작업의 선량기여도가 지배적인 핵종은 석탄의 지배적인 핵종과 차이가 나타났다. 이는 핵종별 방사능 농도의 차이 및 공기 중 입자 농도의 차이로 인해 발생한 것으로 판단된다. 또한 모든 공정에서 ^{40}K의 방사능 농도는 대부분의 다른 핵종에 비해 높은 것으로 나타났으나, 핵종별 선량 분율은 0.01~0.02%으로 가장 낮게 나타났다. 이는 ^{40}K의 선량환산인자가 다른 핵종의 선량환산인자에 비해 최대 6.96×10^{-5}배 낮게 나타났기 때문인 것으로 판단된다. 또한 최종적으로 석탄화력발전소 내 주요공정에서 내부피폭 방사선량에 가장 크게 기여하는 주요 핵종은 토륨인 것으로 확인되었다. 이는 토륨의 선량환산인자는 같은 계열의 핵종들에 비해 최대 34배 높게 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 석탄화력발전소 내 주요 공정의 공기 중 입자의 특성을 반영한 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량을 평가하였다. 이를 위해, 먼저 국내 석탄화력발전소 2곳을 대상으로 주요 공정을 분석하였으며, 이를 기반으로 분진 및 흡입의 가능성이 높은 곳에서 공기 중 입자를 채집하였다. 채집된 입자를 통해 입자의 크기 분포와 입자의 농도를 측정하였고, 입자의 모양을 분석하였다. 그리고 석탄 및 석탄회의 시료를 채취하여, 입자의 밀도 및 방사능 농도를 측정하였다. 마지막으로 입자의 특성을 반영하여 선량환산인자 및 연간 방사성핵종 흡입량을 도출하였고, 최종적으로 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량을 평가하였다.

석탄화력발전소 A, B의 주요 공정 내 작업종사자의 내부피폭 방사선량은 전체적으로 1.47×10^{-5}~1.12×10^{-3} mSv y^{-1}로 나타났다. 적재 작업 시 발생하는 분진의 영향으로 인해 석탄화력발전소 A, B 모두 비회 적재작업의 내부피폭 방사선량이 다른 공정보다 높은 것으로 나타났다. 그리고 발전소 A에서 비회 적재작업의 내부피폭 방사선량은 작업시간 및 취급물질의 방사능 농도에 의한 영향으로 발전소 B의 비회 적재작업보다 약 3.7배 높게 나타났다. 발전소 A, B에서 저탄장 내 작업종사자의 경우 석탄의 산지에 따른 내부피폭 방사선량은 입자의 크기, 농도 등의 특성 값들은 동일하였으나, 석탄의 산지에 따라 방사능 농도 및 밀도의 차이로 인해 내부피폭 방사선량이 상이하게 나타났으며, 5가지 산지 중 호주에서 수입된 석탄을 흡입하였을 경우 가장 높은 것으로 확인되었다. 그리고 석탄화력발전소 내 주요공정에서 내부피폭 방사선량에 가장 크게 기여하는 주요 핵종은 선량환산인자의 차이로 인해 토륨인 것으로 확인되었다. 최종적으로 석탄화력발전소 내 입자의 특성은 공정 및 발전소별로 상이한 것으로 나타났다. 그리고 방사능 농도는 석탄의 원산지 및 석탄회의 종류에 따라 상이한 것으로 나타났다. 이에 따라, 흡입에 의한 내부피폭 방사선량 평가 결과는 공정 및 발전소별로 상이한 것으로 나타났다. 해외 연구 사례에서 제시한 석탄화력발전소 내 작업종사자의 외부피폭 방사선량을 고려하였을 때, 발전소 A, B의 주요 공정 내 작업종사자의 연간 유효선량은 원자력안전법에서 고시하고 있는 일반인 선량한도인 1 mSv y^{-1}를 넘지 않는 것으로 나타났다. 따라서 석탄화력발전소 내 작업종사자의 방사선학적 영향은 미미한 것으로 판단된다.

본 연구에서 평가한 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량은 공정 및 발전소별로 상이하였으며, ICRP에서 제시된 입자 특성의 기본값을 적용한 결과와 상이하게 나타났다. 따라서, 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량 평가 시, 입자의 특성 평가 수행은 필요할 것으로 판단된다. 또한 국내 석탄화력발전소 내 주요 공정에서 입자 흡입에 의한 방사선학적 영향은 미미한 것으로 나타났다. 이에 따라, 국내 석탄화력발전소에 대해서는 국제기구에서 권고하는 차등적인 안전관리방안의 적용이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행한 결과는 국내 석탄화력발전소 내 작업종사자의 내부피폭 수준 파악을 위해 활용될 수 있을 것이며, 향후 NORM 취급 산업체의 차등적인 안전관리체계를 위한 데이터 기반 구축에 기여할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 2105035).

참고문헌

1. ARPNSA. 2008. Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). Radiation Protection Series No. 15.
2. IAEA. 2005. Naturally occurring radioactive materials (NORM IV). IAEA TECDOC 1472.
3. IAEA. 2005. Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance. Safety Reports Series No. 44.
4. ICRP. 2019. Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industrial Processes. ICRP Publication 142.
5. EURATOM. 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM. European Atomic Energy Community.
6. IAEA. 2006. Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials. IAEA Safety Report Series No. 49.
7. IEA. 2022. Coal 2022 Analysis and forecast to 2025.
8. Pepin S, Dehandschutter B, Poffijn A and Sonck M. 2013. Norm contamination and Radiation Protection of Workers in a Belgian Coal Fired Power Plant: A Case Study. Annales de l'Association belge de Radioprotection, Vol. 38, nr.3.
9. Baeza A, Cancio D, Corbacho JA, Mora JC, Robles B and Suáñez

A. 2007. "Radiological impact of a coal fired power station in Spain," The Fifth International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material (19-22 March 2007), Poster Session 3.1.

10. Garg A, Chauhan RP and Sushil K. 2014. Estimation of Annual Radiation dose Received By Some Industrial Workers. ISSN No. 0976-903X.
11. Dal-Molin F, Fisher R, Frost D, Anderson DR and Read D. 2017. Dose assessment from chronic exposure to industrial NORM in iron ore processing. *J. Radiol. Prot.* **37**(2):402-421.
12. UNSCEAR. 2022. Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Volume IV13. Dorrian MD, Bailey MR. 1995. Particle size distributions of radioactive aerosols measured in work places. *Radiat. Prot. Dosim*. **60**(2):119-133.
13. Ji SW, Jang JH, Do TG and Kim KP. 2018. Radiation Dose Assessment to Workers Due to NORM Inhalation in the Korean Phosphate Industry. *J. Korean Phys. Soc.* **73**(7):1007-1011.
14. ICRP. 1994. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66.
15. Kim KP, Wu C-Y, Birky BK and Bolch WE. 2007. TENORM aerosols in the Florida Phosphate Industry-assessment of lung fluid solubility and annual effective dose to workers. *Radiat. Prot. Dosim*. **123**(1):41-55.
16. Marple V. 2004. History of impactors-The first 110 years. *Aerosol Sci. Technol.* **38**:247-292.
17. Department of Mines and Petroleum. 2010. Managing Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Mining and Mineral Processing. NORM 3.5.
18. EPA. 1994. Methods for Derivation of Inhalation Reference Concentrations and Application of Inhalation Dosimetry. EPA/600.8-90/066F.
19. Flues M, Camargo IMC, Figueiredo Filho PM, Silva PSC and Mazzilli BP. 2007. Evaluation of radionuclides concentration in Brazilian coals. *M. Flues. Fuel* **86**:807-812.
20. U.S. Department of Energy. 2009. Methods and Models of the Hanford Internal Dosimetry Program. PNNL-MA-860. PNNL15614, Rev.1.
21. Smith K, Crockett G, Oatway W, Harvey M and Mobbs S. 2018. The Radiological Impact of Coal-Fired Electricity Generation in the UK. ENA-NORM III Brussels. Session III: 3.5.
22. Robles B, Mora JC, Cancio D, Baeza A and Corbacho JA. 2008. Radiological investigation in the boiler's maintenance operations in a Coal Fired Power Plant. 12th International congress of the International Radiation Protection Association (IRPA).