Journal of Radiation Industry 10(4) : 173~179(2016)

국내 석탄연소 발전소에서 취급하는 천연방사성물질의 방사능 농도 분석

김용건[1] · 김시영[1] · 지승우[1] · 박 일[1] · 김민준[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis of Radioactivity Concentration in Naturally Occurring Radioactive Materials Used in Coal-Fired Plants in Korea

Yong Geon Kim[1], Si Young Kim[1], Seung Woo Ji[1], Il Park[1], Min Jun Kim[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

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

Abstract - Coals and coal ashes, raw materials and by-products, in coal-fired power plants contain naturally occurring radioactive materials (NORM). They may give rise to internal exposure to workers due to inhalation of airborne particulates containing radioactive materials. It is necessary to characterize radioactivity concentrations of the materials for assessment of radiation dose to the workers. The objective of the present study was to analyze radioactivity concentrations of coals and by-products at four coal-fired plants in Korea. High purity germanium detector was employed for analysis of uranium series, thorium series, and potassium 40 in the materials. Radioactivity concentrations of ^{226}Ra, ^{228}Ra, and ^{40}K were 2~53 Bq kg^{-1}, 3~64 Bq kg^{-1}, and 14~431 Bq kg^{-1} respectively in coal samples. For coal ashes, the radioactivity concentrations were 77~133 Bq kg^{-1}, 77~105 Bq kg^{-1}, and 252~372 Bq kg^{-1} in fly ash samples and 54~91 Bq kg^{-1}, 46~83 Bq kg^{-1}, and 205~462 Bq kg^{-1} in bottom ash samples. For flue gas desulfurization (FGD) gypsum, the radioactivity concentrations were 3~5 Bq kg^{-1}, 2~3 Bq kg^{-1}, and 22~47 Bq kg^{-1}. Radioactivity was enhanced in coal ash compared with coal due to combustion of organic matters in the coal. Radioactivity enhancement factors for ^{226}Ra, ^{228}Ra, and ^{40}K were 2.1~11.3, 2.0~13.1, and 1.4~7.4 for fly ash and 2.0~9.2, 2.0~10.0, 1.9~7.7 for bottom ash. The database established in this study can be used as basic data for internal dose assessment of workers at coal-fired power plants. In addition, the findings can be used as a basic data for development of safety standard and guide of Natural Radiation Safety Management Act.

Keywords : Natural Radiation Safety Management Act, Naturally Occurring Radioactive Material (NORM), Coal-fired power plant, Radioactivity concentration

* Corresponding author: Kwang Pyo Kim, Tel. +82-10-4030-7067, Fax. +82-31-273-3592, E-mail. kpkim@khu.ac.kr

서 론

자연환경에는 지구의 생성과 함께 다양한 방사성핵종이 존재하고 있다. 이들 방사성핵종 중 ^{238}U 붕괴계열, ^{232}Th 붕괴계열, ^{40}K 핵종이 대표적인 천연방사성물질이다. 이러한 천연방사성물질들을 함유하고 있는 물질들을 천연방사성물질(NORM: Naturally Occurring Radioactive Materials)이라고 한다. 이러한 천연방사성물질을 취급하는 사업장의 작업자는 이로 인해 내부피폭 또는 외부피폭이 발생할 수 있다(Andrew *et al*. 2009).

국내에서는 생활주변의 방사선으로부터 국민들을 보호하기 위하여 천연방사성물질에 대한 국가적 차원의 안전관리 체계인 생활주변방사선 안전관리법을 2012년부터 시행하고 있다. 생활주변방사선 안전관리법의 주요 내용 중 하나는 원료물질, 공정부산물 및 가공제품에 함유된 천연방사성물질에서 방출되는 방사선으로부터 종사자의 방사선학적 안전성을 확보하는 것이다. 생활주변방사선 안전관리법에서는 우라늄 및 토륨 붕괴계열의 방사능 농도와 연간 취급 방사능량에 대하여 각각 1 Bq kg^{-1}, 1,000 kBq, ^{40}K의 경우 10 Bq kg^{-1}, 10,000 kBq을 규제 기준으로 설정하고 있다.

국내에는 다양한 종류의 천연방사성물질을 취급하는 시설이 있으며, 그중 석탄연소 발전소는 대표적인 취급시설 중 하나이다. 또한 최근 석탄연소 발전소에서 발생하는 미세먼지에 대한 국민들의 관심이 증대되고 있는 실정이다. 석탄연소 발전소에서는 원료물질인 석탄, 연소 후 공정부산물로 발생하는 석탄회인 비회(Fly Ash)와 저회(Bottom Ash), 탈황석고를 취급하고 있으며, 이러한 물질에는 천연방사성물질이 함유되어 있다. 따라서 석탄연소 발전소에 근무하는 작업자의 경우 공정 과정에서 발생하는 분진의 흡입으로 인한 내부피폭, 원료물질 및 공정부산물로부터 방출되는 방사선으로 인한 외부피폭이 발생할 가능성이 있다(KINS 2012). 특히, 석탄연소와 같은 공정 과정 중 발생하는 일부 공정부산물에는 방사성핵종의 농축 현상이 발생할 수 있으며, 이러한 물질의 경우 종사자에 대한 유의할 수준의 방사선피폭을 야기할 수 있다(Andrew *et al*. 2009). 석탄연소 발전소와 같은 천연방사성물질을 취급하는 사업장에서 종사자의 피폭방사선량은 주로 물질 취급 과정에서 발생하는 입자 흡입에 의한 내부피폭에 기인한다. 따라서 석탄연소 발전소에서 근무하는 종사자의 방사선학적 안전성을 확보하기 위해서는 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량 평가가 우선적으로 수행되어야 한다. 종사자의 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해서는 체내로 유입되는 방사성핵종을 함유한 입자에 대한 정보 및 방사능 농도가 필요하다(ICRP 1994).

본 연구에서는 국내 석탄연소 발전소에서 취급하는 원료물질 및 공정부산물에 함유된 천연방사성물질의 방사능 농도를 분석하였다. 석탄연소 발전소에서 발생하는 공정부산물인 석탄회에는 천연방사성물질의 농축 현상이 발생할 가능성이 있다. 따라서 석탄연소에 의한 천연방사성물질의 농도증가계수를 확인하기 위하여 도출한 방사능 농도를 이용하여 비회 및 저회에 대한 농도증가계수를 도출하였다.

재료 및 방법

국내 석탄연소 발전소에서 취급하는 원료물질 및 공정부산물 내 천연방사성물질의 방사능 농도를 분석하였다. 석탄연소 발전소의 공정분석을 통해 방사능 농도 분석 대상물질을 선정하였다. 선정된 물질을 대상으로 시료채취를 수행하였으며, 시료 내 천연방사성물질의 방사능 농도를 분석하였다. 연소에 의한 농축 현상이 발생할 가능성이 있는 석탄회의 경우 연소로 인한 농축인자를 도출하였다.

1. 석탄연소 발전소 공정분석을 통한 시료 선정

본 연구에서는 국내 4곳의 석탄연소 발전소를 선정하였다. 현장조사를 통해 공정 내 원료물질 투입으로부터 최종 공정부산물 발생까지의 공정을 분석하였다. 공정분석을 통해 석탄연소 발전소 내 종사자들의 방사선피폭이 발생할 것으로 판단되는 지점을 선정하고, 해당 공정에서 취급하는 원료물질 및 공정부산물을 방사능 농도 분석 대상물질로 선정하였다. 또한 공정분석을 통해 종사자의 방사선피폭이 발생 가능한 지역과 공정 중 방사성핵종이 농축될 것으로 판단되는 지역에서의 원료물질 및 공정부산물을 채취하였다.

2. 천연방사성물질 방사능 농도 분석

천연방사성물질 방사능 농도 분석을 위해 채취한 시료는 상온에서 약 24시간 건조시킨 후 분쇄기(IKA M20 universal grinding mill)를 이용하여 분쇄하였다. 분쇄한 시료를 1 L 마리넬리 비커에 충진하였으며, 충진된 시료의 무게를 측정하였다.

석탄연소 발전소에서 취급하는 물질에는 우라늄 및 토륨 붕괴계열 핵종과 ^{40}K 핵종이 함유되어 있다(IAEA 2003). 본 연구에서는 감마분광법을 이용하여 시료 내 방사능 농도를 분석하였으며, 우라늄 붕괴계열 핵종 중에서는 ^{226}Ra, 토륨 붕괴계열 핵종 중에서는 ^{228}Ra, 그리고 ^{40}K을 측정대상 핵종으로 선정하였다(McBride *et al*. 1997). ^{226}Ra의 경우 반감기가 약 1,600년으로 매우 긴 반면 그 자핵종인 ^{222}Rn는 반감기가 3.8일로 매우 짧다. 또한 ^{228}Ra의 경우 반감기가 5.6년인 반면 그 자핵종인 ^{228}Ac는 반감기가 6.1시간으로 매우 짧다(Faw *et al*. 1999). 이와 같이 자핵종의 반감기가 모핵종의 반감기에 비해 매우 짧을 경우, 일정 시간이 경과하면 자핵

종과 모핵종은 영속평형을 이루어 방사능이 같아진다. 우라늄 계열 핵종의 경우 ^{226}Ra과 ^{222}Rn는 약 30일 후 99.7% 가량 방사평형에 도달하며, 토륨 붕괴계열 핵종의 경우 ^{228}Ra과 ^{228}Ac은 약 2일 후 98% 가량 방사평형에 도달한다. 하지만 ^{222}Rn는 주로 5.489 MeV의 알파 입자를 방출하며 붕괴하므로 감마분광법을 통해서는 측정이 불가능하다. 따라서, ^{222}Rn의 자핵종인 ^{214}Bi에서 방출되는 감마선을 이용하였다. 또한, ^{222}Rn는 가스 형태이므로 그 자핵종인 ^{214}Bi와 방사평형을 이루기 위해서는 가스가 누출되지 않도록 시료를 밀봉시켜야 한다. 따라서, 본 연구에서는 1 L 마리넬리 비커에 시료를 충진한 후 약 30일간 밀봉하여 방사성핵종의 방사평형에 이루도록 하였다. 밀봉 및 핵종의 방사평형이 성립된 시료는 고순도게르마늄 검출기 (HPGe; GC 3020, Canberra, USA)를 이용하여 80,000초 동안 측정하였다. 최종적으로 ^{226}Ra의 방사능 농도를 분석하기 위해 ^{214}Bi에서 방출되는 609 keV, 1,120 keV, 1,760 keV 에너지의 감마선을 이용하였으며, ^{228}Ra의 방사능 농도를 측정하기 위해 ^{228}Ac의 338 keV, 911 keV, 969 keV 에너지의 감마선을 이용하였다. ^{40}K의 경우 ^{40}K에서 직접 방출되는 1,460 keV의 감마선을 이용하였다. 분석에 사용된 천연방사성물질의 비중이 효율 교정에 사용한 물질과 다를 경우에는 밀도 보정이 필요하다. 하지만 본 연구에서 사용된 시료의 밀도 범위에서는 분석 시료와 교정용 선원의 밀도 차이로 인해 발생되는 자체흡수효과 영향이 미미한 것으로 보고되었다 (서범경 등 2005). 따라서 본 연구에서는 밀도 차이로 인한 자체흡수효과는 고려하지 않았다.

결 과

1. 석탄연소 발전소 공정분석 및 채취 시료 선정

Fig. 1에 석탄 하역부터 전력 생산까지의 석탄연소 발전소의 일반적인 공정도를 나타내었다. 석탄연소 발전소의 주요 공정은 석탄 하역 및 저탄, 석탄연소 및 전력 생산, 공정부산물 폐기로 구성되어 있다.

1.1 석탄 하역 및 저탄

국내 석탄연소 발전소에서는 원료물질로 유연탄 또는 무연탄을 사용하고 있었다. 유연탄의 경우 주로 항만시설을 통해 외국으로부터 수입되어 발전소 내로 반입되었으며, 무연탄의 경우 국내산을 사용하기 때문에 철로를 통해 발전소 내로 반입되었다. 발전소 내로 반입된 석탄은 실외 및 실내 저탄장으로 하역된 후 석탄 종류 및 발열량에 따라 구분되어 저장되었다. 하역 및 저장작업은 대량의 석탄을 취급함으로 인해 주로 불도저, 포크레인과 같은 중장비를 통해 수행되었으며, 작업 시 분진이 발생하였다.

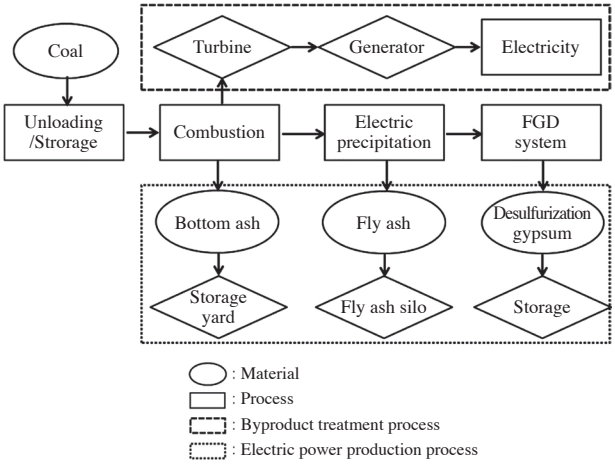

Fig. 1. General processes of coal-fired plant.

1.2 석탄연소 및 전력 생산

저탄장에 적재된 석탄은 컨베이어벨트를 통해 보일러로 운반된 후 연소되었다. 석탄연소 방식에는 미분탄 연소, 순환 유동층 연소 등이 있으며, 연소 방식에 따라 연소 석탄의 크기 및 보일러 내 온도가 상이하였다. 석탄연소로 인해 발생한 열에너지는 터빈을 통해 운동에너지, 그리고 발전기를 통해 전기에너지로 변환되어 외부로 공급되었다. 석탄연소는 고온의 보일러 내부에서 수행되므로, 주기적인 보일러 점검 외에 종사자가 직접 관여하는 작업은 드문 것으로 파악되었다.

1.3 공정부산물 폐기

보일러에서 석탄이 연소되면 공정부산물로 석탄회와 탈황석고가 발생한다. 석탄회는 보일러 내에서 연소 후 모이는 장소에 따라 비회와 저회로 구분된다. 비회의 경우 배기가스 내 함유되어 있는 미세 분진으로 전기집진기에 포집되어 비회 사일로에 저장되었다가 회차를 통해 외부로 유통되며, 비회를 회차에 적재시키는 과정에서 상당량의 분진이 발생하였다. 저회는 보일러 벽, 과열기 등에 부착되어 있다가 자중에 의해 보일러 바닥으로 낙하되는 덩어리 모양의 석탄회로서 저회 사일로에 저장된 후 재활용되지 않고 대부분 실외 야적장에 매립되었다.

석탄 내 일정량의 황 성분에 의해 연소 시 산소와의 결합으로 황산화물이 발생된다. 황산화물은 집진시설을 통과하여 배연탈황설비로 유입되며 석회석과 반응하여 황 성분이 제거된 분말 형태의 탈황석고 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)가 생성된다. 탈황석고는 탈황석고 보관창고로 이송된 후 포크레인 등의 중장비를 통해 화물차량에 적재된 후 외부로 유통된다. 탈황석고를 화물차량에 적재하는 과정에서 분진이 발생하였다.

1.4 방사능 농도 분석 대상물질 선정

국내 석탄연소 발전소의 공정 분석을 통해 종사자가 공정

Table 1. Sampling areas to collect raw materials and by-products in four coal-fired plants

Plant	Sampling area	Sample
Plant A	Coal yard	Bituminous coal (AUS)
		Bituminous coal (CAN)
		Bituminous coal (IND)
		Bituminous coal (RUS)
		Bituminous coal (USA)
	Fly ash silo	Fly ash
	Bottom ash landfill	Bottom ash
	FGD1 gypsum storage	Desulfurization gypsum
Plant B	Coal yard	Bituminous coal (AUS)
		Bituminous coal (IND)
	Fly ash silo	Fly ash
	Bottom ash landfill	Bottom ash
	FGD1 gypsum storage	Desulfurization gypsum
Plant C	Coal yard	Bituminous coal (AUS 1)
		Bituminous coal (AUS 2)
		Bituminous coal (IND)
		Bituminous coal (RUS)
	Fly ash silo	Fly ash
	Bottom ash landfill	Bottom ash
Plant D	Coal yard	Bituminous coal (RUS)
	Anthracite coal dock	Anthracite coal (KOR)
	Fly ash silo	Fly ash
	Bottom ash landfill	Bottom ash

중 입자의 흡입이 발생 가능하고 천연방사성물질의 농축의 가능성이 있는 시료 채취 지역 및 시료를 선정하였다. 국내 석탄연소 발전소의 저탄장 내 원료물질인 유연탄 및 무연탄, 비회 사일로 내 비회, 저회 사일로 내 저회, 탈황석고 보관창고 내 탈황석고를 대상으로 방사능 농도를 분석하였다 (Table 1 참조).

2. 천연방사성물질의 방사능 농도

Table 2에 국내 석탄연소 발전소 4곳에서 취급하는 원료물질 및 공정부산물에 함유된 ^{226}Ra, ^{228}Ra, 그리고 ^{40}K의 방사능 농도를 나타내었다. 국내 4곳의 석탄연소 발전소에서 원료물질로 사용되는 유연탄의 ^{226}Ra 및 ^{228}Ra의 방사능 농도는 각각 2~20 Bq kg^{-1}, 3~21 Bq kg^{-1} 수준이었으며, 전체적으로 동일한 유연탄 내 우라늄 및 토륨 계열 핵종의 방사능 농도는 유사한 수준으로 나타났다. ^{40}K의 방사능 농도는 약 14~80 Bq kg^{-1} 수준으로 ^{226}Ra 핵종의 방사능 농도보다 평균적으로 약 4배 높게 나타났다. 유연탄의 방사능 농도는 원산지에 따라 상이하게 나타났으며, 특히 호주와 러시아에서 수입한 유연탄의 방사능 농도는 타 유연탄보다 높게 나타났다. 반면 국내산 무연탄의 ^{226}Ra 방사는 농도는 53 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra의 방사능 농도는 64 Bq kg^{-1}으로 수입 유연탄에 비해 최대 약 30배 이상 높게 나타났다.

유연탄을 주 원료로 사용하는 석탄연소 발전소 A, B, C에서 발생하는 비회의 방사능 농도는 ^{226}Ra 핵종의 경우 93~133 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra 핵종의 경우 77~105 Bq kg^{-1}, ^{40}K 핵종의 경우 252~372 Bq kg^{-1} 수준으로 나타났다. 무연탄과 유연탄을 혼합하여 연료로 사용하는 석탄연소 발전소 D에서 발생되는 비회의 방사능 농도는 ^{226}Ra 핵종의 경우 77 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra 핵종의 경우 84 Bq kg^{-1}, ^{40}K핵종의 경우 341 Bq kg^{-1} 수준으로 나타났다. 석탄연소 발전소 A, B, C에서 발생하는 저회의 방사능 농도는 ^{226}Ra핵종의 경우 54~91 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra 핵종의 경우 46~80 Bq kg^{-1}, ^{40}K 핵종의 경우 205~389 Bq kg^{-1} 수준으로 나타났다. 석탄연소 발전소 D에서 발생하는 저회의 방사능 농도는 ^{226}Ra 핵종의 경우 73 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra 핵종의 경우 83 Bq kg^{-1}, ^{40}K 핵종의 경우 462 Bq kg^{-1} 수준으로 나타났다.

국내 4곳의 석탄연소 발전소에서 취급하는 석탄회에는 원료물질인 석탄에 비해 방사능 농도가 높게 나타났다. 석탄연소 발전소 A, B, C, D에서 취급하는 비회에 농축된 Ra 핵종의 농도증가계수(Enhanced factor)는 각각 11.3~13.1, 7.2~7.4, 8.1~8.9, 2.0~2.1로 나타났다. 또한, ^{40}K 핵종의 농도증가계수는 각각 5.8, 4.9, 7.4, 1.4로 나타났다(Table 3 참조).

탈황석고는 발전소 A와 B에서 공정부산물로 발생하며, 평균적인 방사능 농도는^{226}Ra 핵종의 경우 3~5 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra 핵종의 경우 2~3 Bq kg^{-1}, ^{40}K 핵종의 경우 22~47 Bq kg^{-1} 정도로 나타났다.

Table 2. Radioactivity concentrations in coal, ash, and desulfurization gypsum

Plant	Sample	Radioactivity concentration (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{228}Ra	^{40}K
Plant A	Bituminous coal (AUS)	16±6	12±4	72±9
	Bituminous coal (CAN)	7±2	4±2	21±3
	Bituminous coal (IND)	5±2	3±2	25±3
	Bituminous coal (RUS)	16±3	11±2	54±5
	Bituminous coal (USA)	15±3	10±2	80±6
	Fly ash	133±16	105±11	292±21
	Bottom ash	89±11	80±8	389±21
	Desulfurization gypsum	5±2	2±1	22±3
Plant B	Bituminous coal (AUS)	17±4	17±2	63±6
	Bituminous coal (IND)	9±3	5±2	39±5
	Fly ash	93±11	81±8	252±18
	Bottom ash	54±8	46±5	205±15
	Desulfurization gypsum	3±2	3±1	47±4
Plant C	Bituminous coal (AUS 1)	17±6	11±4	73±10
	Bituminous coal (AUS 2)	18±5	16±5	58±9
	Bituminous coal (IND)	2±2	3±2	14±2
	Bituminous coal (RUS)	8±4	8±2	57±7
	Fly ash	100±14	77±10	372±27
	Bottom ash	91±12	75±19	388±28
Plant D	Bituminous coal(RUS)	20±4	21±3	54±6
	Anthracite coal (KOR)	53±7	64±6	431±28
	Fly ash	77±10	84±9	341±22
	Bottom ash	73±11	83±11	462±32
Reference[a)]	Coal	18	11	63
	Coal ash	6~2,000	3~300	100~1,240

[a)]IAEA Tech Reprot 419, 2013

Table 3. Radioactivity enhancement factors for radionuclides in ashes from coal-fired plants

Plant	Sample	Enhancement factor		
		^{226}Ra	^{228}Ra	^{40}K
Plant A	Fly ash	11.3	13.1	5.8
	Bottom ash	7.5	10.0	7.7
Plant B	Fly ash	7.2	7.4	4.9
	Bottom ash	4.2	4.2	4.0
Plant C	Fly ash	8.9	8.1	7.4
	Bottom ash	9.2	7.9	7.7
Plant D	Fly ash	2.1	2.0	1.4
	Bottom ash	2.0	2.0	1.9

고 찰

본 연구에서는 국내 석탄연소 발전소에서 취급하는 원료물질 및 공정부산물에 함유된 천연방사성물질의 방사능 농도를 분석하였으며 공정부산물인 석탄회에 천연방사성물질의 농축 현상을 확인하기 위해 공정부산물에 대해서 도출한 방사능 농도를 이용하여 농도증가계수를 도출하였다. 국제원자력기구(IAEA: International Atom Energy Agency)에서는 석탄에 함유된 ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{40}K의 방사능 농도를 각각 18 Bq kg^{-1}, 11 Bq kg^{-1}, 63 Bq kg^{-1}으로, 석탄회의 경우 각각 6~2,000 Bq kg^{-1}, 3~300 Bq kg^{-1}, 100~1,240 Bq kg^{-1}으로 보고한 사례가 있다(IAEA 2003). 이는 본 연구에서 수행한 석탄 및 석탄회의 ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{40}K의 방사능 농도 분석 결과와 유사한 수준인 것으로 파악되었다.

석탄회에서 ^{40}K 핵종의 농도증가계수가 ^{226}Ra, ^{228}Ra 핵종의 농도증가계수에 비해 낮은 이유는 석탄이 연소하는 과정에서 석탄 내 존재하는 휘발성 성분의 칼륨(K)이 황(S) 성분과 반응하여 주로 황산칼륨(K_2SO_4) 형태로 석탄회에 다량 함유되어 ^{40}K의 방사능 농도가 증가하기 때문이다(Erich *et al*. 1985). 발전소 D의 경우 보일러 내부에서 석탄을 연소시키는 동시에 산화마그네슘을 투입하여 황 성분을 제거하고 있다. 이로 인해 황산칼륨 형태로 석탄회에 농축되는 비율이 감소하여 ^{40}K의 농도증가계수가 타 발전소에 비해 약 5배 정도 낮게 나타났다. 저회에 함유된 ^{226}Ra 및 ^{228}Ra의 방사능 농도는 전체적으로 원료물질인 석탄보다 최대 10배까지 농축된 것으로 나타났으나 비회에 비해 평균적으로 약 20% 낮은 수준으로 파악되었다.

비회 및 저회에서의 방사성핵종의 농도증가계수 차이는 연소되는 석탄의 특징, 핵종의 농축 경향에 기인한다. 일반적으로 유연탄은 약 91%가 유기물로 구성되어 있으며, 무

연탄의 경우 약 75%가 유기물로 구성되어 있다(장병욱 등 2008). 석탄을 연소할 경우 석탄을 구성하는 유기물은 모두 제거되며, 이로 인해 Ra 및 ^{40}K 핵종의 농도증가계수는 유기물의 함량이 높은 유연탄을 연소하여 생성된 석탄회에서 무연탄을 연소하여 생성된 석탄회보다 높게 나타났다. 또한, 방사능 농도는 입자의 크기가 작을수록 농축되기 쉬운 경향을 보인다(IAEA 2003). 일반적으로 비회의 직경은 10~30 μm이며, 저회의 경우 1~2.5 mm이다. 이로 인해 대부분의 석탄연소 발전소에서 취급하는 비회의 방사능 농도는 저회에 비해 높게 나타났다.

탈황석고에서의 방사성 농도가 석탄회에 비해 매우 낮은 수준으로 나타났다. 이는 석탄에 함유되어 있던 방사성핵종이 석탄회로 다량 농축되었기 때문이다. 해외 연구결과에 따르면 석탄 연소 후 발생되는 탈황석고의 평균적인 방사능 농도는 ^{238}U 핵종의 경우 9 Bq kg^{-1}, ^{232}Th 핵종의 경우 1 Bq kg^{-1}, ^{40}K 핵종의 경우 14 Bq kg^{-1}으로 조사된 바 있으며, 이는 본 연구의 측정값과 유사한 수준인 것으로 파악되었다 (Roper *et al*. 2013).

결 론

국내 천연방사성물질을 취급하는 사업장의 종사자에 대한 방사선학적 안전성을 평가하기 위한 기반 연구로써 다양한 사업장 중 석탄연소 발전소를 대상으로 원료물질 및 공정부산물의 방사능 농도를 분석하였다. 국내 석탄연소 발전소의 공정을 분석하여 입자 흡입으로 인한 내부피폭이 발생할 가능성이 있는 지점에서 취급하는 원료물질 및 공정부산물을 방사능 농도 분석의 대상으로 선정하였다. 방사능 농도 분석은 고순도게르마늄 검출기를 이용하였으며, 우라늄 붕괴계열에서는 ^{226}Ra, 토륨 붕괴계열에서는 ^{228}Ra, 그리고 ^{40}K을 대상으로 수행하였다.

석탄연소 발전소에서 원료물질로 사용되는 수입 유연탄 및 무연탄의 방사능 농도는 ^{228}Ra의 경우 2~53 Bq kg^{-1}, ^{226}Ra 핵종의 경우 3~64 Bq kg^{-1}, ^{40}K의 경우 14~431 Bq kg^{-1} 수준으로 나타났다. 이는 일반 토양에 함유된 천연방사성물질의 농도(^{238}U: 16~110 Bq kg^{-1}, ^{228}Ra: 17~60 Bq kg^{-1}, ^{232}Th: 11~64 Bq kg^{-1}, ^{40}K: 140~850 Bq kg^{-1})와 유사하거나 더 낮은 수준이다. 석탄회의 방사능 농도는 ^{228}Ra의 경우 54~133 Bq kg^{-1}, ^{226}Ra 핵종의 경우 46~105 Bq kg^{-1}, ^{40}K의 경우 205~462 Bq kg^{-1} 수준으로 나타났다. 석탄연소 발전소에서 공정부산물로 발생하는 석탄회에는 원료물질인 석탄에 비해 최대 13배까지 방사능 농도가 농축되는 것으로 나타났다. 반면 탈황석고의 방사능 농도는 연소 석탄의 방사성핵종이 석탄회로 편향됨으로 인해 원료물질인 석탄보다 낮거나 유사한 수준으로 나타났다.

본 연구의 결과는 생활주변방사선 안전관리법에 따른 생활주변방사선 안전관리의 체계를 수립하기 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 천연방사성핵종 함유물질 취급 등에 대한 안전기준 및 지침개발과 사업자의 방사선 안전관리 실무에도 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 한국원자력안전기술원(KINS)의 “생활주변방사선 안전관리 이행 기술기반 구축” 사업의 지원을 통해 수행된 연구결과물입니다.

참 고 문 헌

서범경, 이길용, 윤윤열, 정기정, 오원진, 이근우. 2005. 방사능 분석에서 밀도에 따른 HPGe 검출기의 검출효율 변화. 한국분석과학회 **18**(1):59-65.

장병욱, 김용재, 고상모, 장호완. 2008. 국내 화력발전소에서 사용하는 석탄과 부산물인 플라이애시에 대한 자연방사능 평가. 지질학회지 **44**(4):479-488.

Erich R. 1985. Mineral impurities in coal combustion: behavior, problems, and remedial measures. 1st ed. Washington; Hemisphere Publishing Corporation. 111-113.

Faw RE and Shultis JK. 1999. Radiological assessment: Sources and doses. American Nuclear Society. USA, Illinois.

IAEA. 2003. Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation. IAEA Technical Reports Series No 419. International Atomic Energy Agency Vienna.

ICRP. 1994. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. International Commission on Radiological Protection. Oxford. Pergamon Press.

Karam PA and Vetter BJ. 2009. Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) and Technologically Enhanced NORM (TENORM). Health Physics Society, Professtional development school. Minneapolis, Minnesota.

KINS. 2012. Nationwide surveillance on the environmental radiation. KINS/RR-937. Korea Institute of Nuclear Safety, Deajun.

McBride JP, Moore RE, Witherspoon JP and Blanco RE. 1997. Radiological impact of airborne effluents of coal-fired and nuclear power plants. ORNL-5315. Oak Ridge, TN.

Roper AR, Stabin MG, Delapp RC and Kosson DS. 2013. Analysis of naturally occurring radionuclides in coal combustion fly ash, gypsum, and scrubber residue samples. *HPS* **103**(3):264-269.

UNSCEAR. 1993. Sources and effects of ionizing radiation.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
UNSCEAR. 2000. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, Austria.

Received: 9 September 2016
Revised: 28 September 2016
Revision accepted: 14 October 2016