

## 인산석고 취급공정에서의 라돈농도 및 유효선량 수준 평가

정은교\* · 장재길 · 김종규 · 김준범 · 권지운

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

### Evaluation of Effective Dose and Exposure Level of Radon in Process Handling NORM

Eun Kyo Chung\* · Jae Kil Jang · Jong Kyu Kim · Joon Beom Kim · Jiwoon Kwon

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

#### ABSTRACT

**Objectives:** To monitor the radon concentration level in plants that handle phosphorus rock and produce gypsum board and cement, and evaluate the effective dose considering the effect of radon exposure on the human body.

**Methods:** Airborne radon concentrations were measured using alpha-track radon detectors ( $\alpha$ -track, Rn-tech Co., Korea) and continuous monitors (Radon Sentinel 1030, Sun Nuclear Co., USA). Radon concentrations in the air were converted to radon doses using the following equation to evaluate the human effects due to radon.

$H$  (mSv/yr) = Radon gas concentration  $\times$  Equilibrium factor  $\times$  Occupancy factor  $\times$  Dose conversion factor. The International Commission on Radiological Protection (ICRP) used 8 nSv/(Bq·hr/m<sup>3</sup>) as the dose conversion factor in 2010, but raised it by a factor of four to 33 nSv/(Bq·hr/m<sup>3</sup>) in 2017.

**Results:** Radon concentrations and effective doses in fertilizer manufacturing process averaged 14.3 (2.7) Bq/m<sup>3</sup> (2.0-551.3 Bq/m<sup>3</sup>), 0.11-0.54 mSv/yr depending on the advisory authority and recommendation year, respectively. Radon concentrations in the gypsum-board manufacturing process averaged 14.9 Bq/m<sup>3</sup> at material storage, 11.4 Bq/m<sup>3</sup> at burnability, 8.1 Bq/m<sup>3</sup> at mixing, 10.0 Bq/m<sup>3</sup> at forming, 8.9 Bq/m<sup>3</sup> at drying, 14.7 Bq/m<sup>3</sup> at cutting, and 10.5 Bq/m<sup>3</sup> at shipment. It was low because it did not use phosphate gypsum. Radon concentrations and effective doses in the cement manufacturing process were 23.2 Bq/m<sup>3</sup> in the storage area, 20.2 Bq/m<sup>3</sup> in the hopper, 16.8 Bq/m<sup>3</sup> in the feeder and 11.9 Bq/m<sup>3</sup> in the cement mill, marking 0.12-0.63 mSv/yr, respectively.

**Conclusions:** Workers handling phosphorous gypsum directly or indirectly can be assessed as exposed to an annual average radon dose of 0.16 to 2.04 mSv or 0.010 to 0.102 WLM (Working Level Month).


**Key words:** Dose conversion factor, ICRP, NORM

## I 서 론


천연방사성물질(Naturally Occurring Radioactive Material, NORM)이란 “천연으로 존재하는 광물이나 이러한 광물을 이용하는 과정에서 발생하는 부산물로서 방사능 수준이 방사성물질에 해당하는 물질을 말한다”(Gezer, 2012). 여기서 방사능 수준이 방사성물질에 해당하는 물질은 원료물질 및 공정부산물의 방사능 농도가 각각

0.1 Bq/g 및 0.5 Bq/g을 초과(<sup>40</sup>K 제외)하는 경우로써, 원료물질은 모나자이트(monazite), 인광석(phosphate rock), 일미나이트(ilmenite), 금홍석(rutile), 중광물모래(heavy mineral sand), 철반석(bauxite) 등과 같은 천연방사성핵종을 함유한 물질로 물리·화학적으로 가공하지 않은 상태를 말하며 공정부산물은 원료물질을 처리하는 과정에서 발생한 각종 배관 내부 침적물 등 천연방사성핵종을 함유한 원료물질을 처리하는 과정에서 부수적으

\*Corresponding author: Eun Kyo Chung, Tel: 052-703-0902, E-mail: jungkek60@kosha.or.kr  
Occupational Safety and Health Research Institut. KOSHA. 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44429  
Received: August 8, 2018, Revised: September 7, 2018, Accepted: September 21, 2018

 Eun Kyo Chung <https://orcid.org/0000-0001-7899-7081>

 Jong Kyu Kim <https://orcid.org/>

 Jiwoon Kwon <https://orcid.org/>

 Jae Kil Jang <https://orcid.org/>

 Joon Beom Kim <https://orcid.org/>

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.

로 발생하는 인산석고(phosphogypsum), 석탄재(fly ash & bottom ash), 적토(red mud) 등과 같은 물질을 말한다(Chang et al, 2011; ICKL, 2017).

이와 같이 천연자원을 산업에 이용하는 행위는 우연적으로 발생하는 방사성핵종, 특히 라돈농도를 증가시켜 일반근로자 뿐만 아니라 작업종사자에게 방사선 피폭을 가중시킬 수 있다. 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )은 생활공간 어디에나 존재하는 천연방사성물질로서 토양, 암석 중에 자연적으로 존재하는 우라늄( $^{238}\text{U}$ )이 몇 번의 방사성 붕괴를 거듭한 후 생성되는 무색·무취의 가스상 물질이다. 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 라돈을 흡연 다음으로 폐암을 일으키는 인체발암물질로 설정되어 있다(IARC, 2015). 라돈은 반감기가 3.8일이며 붕괴생성물인 폴로늄( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ )을 방출하는데 이들은 먼지 등에 잘 흡착되며, 폐에 흡입된 후 붕괴하면서 알파선 등을 방출한다. 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서도 라돈이 담배에 이어 폐암 발병원인 인자로 보고 있으며 폐암 발병의 3~14%를 차지하는 것으로 발표하였다(WHO, 2009). 우리나라 폐암 사망자는 2005년 1만 3천명으로 이중 4~15%가 라돈노출로 발생한 것으로 추정하고 있다. 또한, 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)는 미국에서 라돈으로 사망하는 사람이 매년 20,000명으로 폐암사망자의 10%에 이를 것으로 추산하고 있다(EPA, 2003).

비료공장에서 비료를 만들기 위해 인광석으로 부터 인을 추출하는데, 이때 공정부산물로 발생하는 것이 인산(부산)석고이다. 이와같은 인산석고는 석고보드 및 시멘트의 원료로 사용되고 있다. 과거에는 석고보드의 주원료로 인산석고가 95%이상 사용되었지만, 지금은 인산석고 대신에 화력발전소 등의 산업공정에서 발생하는 부산물인 배연탈황석고를 사용하는 것으로 조사되었다. 그러나, 아직도 시멘트에는 2~5%의 인산석고가 부원료로 사용된다. 인광석은 우라늄이 0.02% 들어있는 원석으로 인산질 비료와 사료의 원료로 사용된다. 주요 인광석 생산국은 중국, 모로코, 남아공, 미국 등이며 국내로는 주로 중국과 모로코 등으로 부터 공급되고 있다. 우리나라는 인광석을 전량 수입하고 있으며 2015년 56만톤이 수입된 것으로 보고되었다(Chung et al., 2014; 2015).

인광석과 공정부산물인 인산석고에는 라듐 등 방사성 물질이 함유되어있어 라돈이 방출되기 때문에 취

급 근로자에게 영향을 미칠 수 있다.

라돈가스가 공기중 먼지 등에 달라붙어 흡입에 의해 폐 또는 폐포에 도달하려면 입자의 특성에 따라 내부피폭량이 달라질 수 있다. 일반적으로 입자의 크기에 따라 공기중 에어로졸은 초미세입자(ultrafine particle, 1~100 nm), 미세입자(fine particle, 100~1,000 nm), 거친입자(coarse particle, >1,000 nm)로 분류한다. 호흡기내 입자의 거동은 주로 중력에 의한 침강(gravitational settling), 관성에 의한 충돌(inertial impaction), 확산운동(brownian diffusions)에 영향을 받는다. 공기중 입자의 물리적 크기를 실제로 측정하기 어렵기 때문에 흡입으로 인한 호흡기 방사선량을 평가하기 위해서 동등직경(equivalent diameter)의 개념을 사용한다(Baldauf et al., 2016). 동등직경은 불규칙한 형상의 입자와 동일한 물리적 성질을 갖는 구형입자의 직경을 공기역학적 동등직경(aerodynamic equivalent diameter)과 열역학적 동등직경(thermodynamic equivalent diameter)으로 구분되며 공기역학적 직경은 관심 입자와 동일한 낙하속도를 갖는 구형입자의 직경이며, 열역학적 직경은 관심입자와 동일한 확산계수를 갖는 구형입자의 직경이다. 중력 침강 및 관성 충돌은 공기역학적 현상에, 확산은 호흡기 폐포내 입자의 침착은 열역학적 현상을 통해 설명될 수 있다. 이와 같은 원리를 적용하여 도입된 개념이 방사능 중앙 공기역학적 직경(Activity Median Aerodynamic Diameter, AMAD)과 방사능 중앙 열역학적 직경(Activity Median Thermodynamic Diameter, AMTD)으로 ICRP는 이를 바탕으로 1994년 인체호흡기모델(Human Respiratory Tract Model, HRTM)을 개발하여 방사선 방호 목적으로 사용하고 있다(ICRP, 1994).

최근 아파트 건축자재인 석고보드와 지하철 펌프장에서 라돈 노출로 인한 폐암 발생으로 사회적 이슈가 된 적이 있다. 그래서 인광석 및 인산석고를 취급하거나 석고보드 및 시멘트를 생산하는 사업장에서 라돈농도 수준을 평가하였다. 그리고 이러한 라돈 노출로 인한 농도에서 인체에 미치는 영향을 고려하여 유효선량으로 평가하는 것이 국제적인 추세이다. 따라서, 라돈농도에 대한 선량환산값을 강화하고 있는 국제방사선 방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP) 등 권고기관들과 비교해 보았을 때 입자크기가 인체에 영향을 주는 작업상황인지를 파악하기 위해 작업중에 발생하는 공기중 입자분포를 확인하였다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 연구대상

#### 1) 비료제조업

인광석의 성분 및 결정구조를 살펴보면 6방정계(hexagonal)의 결정격자를 가진 인회석(apatite)구조이며 특히 천연에서 산출되는 인광석은 3가 인을 함유한 화학합성에 널리 사용되어진다. 그리고 인공적 합성에 의한 방법으로 제조하는 경우도 있는데, 각각 1,200°C와 700~1,000°C에서 생성시킬 수 있으며 무색(colorless), 6방정계의 결정으로 안정화되어 있고 물에는 불용이며 용융점은 1,650°C이다. 인산은 복합비료의 인산질 성분을 공급하기 위한 복비공장의 중간 제품으로서 인광석 및 황산을 원료로 사용하며 인광석 선별 및 분쇄, 반수석고 분해반응 및 여과, 이수석고 전환 및 여과 등의 공정을 거쳐 비료가 생산된다.

#### 2) 석고보드제조업

석고보드는 인산석고나 배연탈황석고를 이용하여 소성한 반수석고와 석고원지 그리고 약간의 첨가제를 사용하여 판상으로 성형한 제품이다. 석고보드 제조 공정은 원료입고, 소성, 배합, 성형, 조절단, 건조, 정절단, 출하의 순으로 이루어진다.

#### 3) 시멘트제조업

시멘트의 제조에 필요한 원료는 석회석, 점토, 규석, 산화철 원료, 석고 등이며 시멘트의 제조는 석회석의 채광, 원료 조합, 소성, 제품 및 출하 공정으로 이루어진다.

연구대상은 인광석을 직접 사용하여 비료를 생산하는 사업장 1개소와 화학석고를 사용하여 석고보드를 생산하는 사업장 2개소, 인산석고를 부원료로 사용하는 시멘트를 생산하는 사업장 7개소를 대상으로 하였다. 비료 및 석고보드 제조사업장은 전공정을 대상으로 하였고 시멘트 제조사업장은 인산석고를 취급하거나 인접한 공정인 치장, 호퍼, 피더, 시멘트밀 등 4개 공정에 대해서만 평가하였다.

### 2. 연구방법

#### 1) 라돈농도 및 입자분포 측정

공기중 라돈농도 측정은 알파벵계 검출기(알파트랙, ㈜알엔테크, 한국)와 연속모니터측정기(Radon Sentinel

1030, Sun Nuclear, USA)를 사용하였다. 라돈농도 측정은 개인노출 측정장비로 개발된 것이 없어 지역노출 측정기를 일반적으로 사용한다. 그래서 측정기를 근로자의 주작업위치 또는 호흡기 위치에 가급적 가깝게 설치하여 측정하였다. 입자의 크기 및 분포를 측정하기 위해 사용된 기기는 나노입자측정기(Nanoparticle sizer, NanoScan SMPS Model 3910; Particle Size Range: 10~420 nm, TSI Co., USA)와 광학입자계수기(Optical particle counter, Dust monitor 1108; Particle Size Range: 300 nm~20 μm, GRIMM Co., Germany)이다. NanoScan SMPS는 14개 채널로 구분되어 있고 GRIMM 1108도 14개 채널을 가진 입자크기 범위가 0.35~22.5 μm인 측정기이다.

나노입자 또는 초미세먼지를 측정할 수 있는 TSI NanoScan SMPS와 미세먼지를 측정할 수 있는 GRIMM Dust monitor 1108을 사용하여 입경별 입자 수농도로 부터 질량농도로 환산하였고 나노입자농도(11.5-250 nm)를 산출하였다(Ramachandran, 2005).

일반적으로, 방사능 중간 공기역학 직경(AMAD)은 10~100 nm 범위에서는 핵응결모드(nucleation mode)로, AMAD가 100~400 nm인 범위에서는 집적모드(accumulation mode)로, 그리고 AMAD>1 μm 인 경우에는 조대모드(coarse mode)로 구분된다(Kim, 2014). 본 연구에서는 AMAD의 입자크기 범위를 기기조건에 따라 10~115 nm 범위에서는 핵응결모드를, 100~350 nm 범위에서는 집적모드를, AMAD> 0.9 μm에서는 조대모드로 산출하였다.

#### 2) 유효선량 환산

라돈으로 인한 건강위험을 나타내고자 할때 라돈농도와 라돈선량이라는 개념을 사용하게 되는데 공기중 라돈농도의 단위는 단위체적당 벵켈(Bq/m<sup>3</sup>)를 사용하고, 라돈선량은 밀리시버트(mSv) 또는 작업수준월(Working Level Month, WLM)으로 표현한다.

라돈에 의한 연간 유효선량(H)은 다음식으로 계산할 수 있다.

$$H(\text{mSv/yr}) = \text{Radon gas concentration} \times \text{Equilibrium factor} \times \text{Occupancy factor} \times \text{Dose conversion factor} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, 평형상수(equilibrium factor, F)는 환기율에

따라 0.3~0.7을 적용한다. 일반적으로 실내 라돈에 대해서는 0.4, 실외에 대해서는 0.6을 적용하고 있다. 그리고 토론에 대해서는 실내 0.04, 실외 0.004를 사용한다. 거주율 또는 점유율(occupancy factor)은 일반적으로 실내인 경우 80%, 실외인 경우 20%를 적용하며 (UNSCEAR, 2000) ICRP에서는 보통 1.0(100%)를 적용한다(ICRP, 1993). 연간 거주시간 또는 작업시간은 일반대중의 경우 연간 7,000시간 또는 8,760시간, 작업장인 경우 연간 2,000시간을 적용한다. 라돈의 선량 환산인자(dose conversion factor)는 권고 및 자문기관에 따라 유엔 방사선영향과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)의 경우 9 nSv/(Bq·hr/m³)를, ICRP는 2010년 8 nSv/(Bq·hr/m³)를, 미국 방사선방호측정심의회(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)의 경우 17 nSv/(Bq·hr/m³)를 제시하였다(UNSCEAR, 2000; ICRP, 2010; NCRP, 2009). 그러나, ICRP는 2017년 선량환산인자값을 33 nSv/(Bq·hr/m³)로 4배 이상 강화하였다.

작업수준월(WLM)은 1 WL 농도의 공기를 한달 작업시간인 170 시간 호흡한 누적 피폭량으로 다음과 같이 정의된다.

$$WLM = WL \times (t/170 \text{ hours}) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, WL은 작업수준의 수, t는 노출시간(exposure time in hours), 170시간 동안의 1 WL의 노출은 1 WLM이다(Abo-Elmagd & Sadek, 2014; UNSCEAR, 2000). 그리고  $WL = \text{라돈농도}(\text{Bq}/\text{m}^3) \times (\text{평형상수}/3,700)$ 이므로 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$WLM = \text{Radon concentration}(\text{Bq}/\text{m}^3) \times (F/3,700) \times (t/170) \dots\dots\dots (3)$$

ICRP 및 UNSCEAR에 의해 채택된 시버트(Sv)와 작업수준월(WLM)간 작업근로자에 대한 선량환산값은 각각 5 mSv/WLM 및 6 mSv/WLM이다(ICRP, 1993-1994; UNSCEAR, 1993, 2000).

모든 통계분석은 유의수준 0.05수준에서 분석하였고 통계분석을 위해 사용한 프로그램은 SPSS 18.0을 사용하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 비료 제조사업장 라돈 농도

인산비료를 생산하기위해 원료물질인 인광석을 직접 사용하는 사업장의 각 공정에서 측정된 라돈농도는 원료창고 72.9 Bq/m³, 분쇄 6.2 Bq/m³, 운전실 9.5 Bq/m³, 야적장 27.5 Bq/m³이었으며, 원료창고에서 최대

**Table 1.** Radon concentration and effective dose in fertilizer manufacturing process

Process name	Number of samples	Radon concentration(Bq/m³)			IAED*(mSv/yr)				WLM/yr		
		GM(GSD)	AM±SD	Range	ICRP 115 (2010)	ICRP 137 (2017)	UNSCEAR (2000)	NCRP (2009)	ICRP 65 (1993)	ICRP 115 (2010)	ICRP 137 (2017)
Total	108	14.3(2.7)	20.6±17.0	2.0~551.3	0.11	0.54	0.12	0.22	0.022	0.0092	0.027
Material storage (Phosphate rock)	9	72.9(1.4)	77.1±27.9	41.5~551.3	0.39	2.04	0.44	0.84	0.078	0.0325	0.102
Ball mill	4	6.2(2.2)	7.5±4.5	2.0~40.7	0.04	0.20	0.04	0.08	0.008	0.0033	0.050
Control room	3	9.5(1.2)	9.5±1.5	8.1~11.1	0.05	0.25	0.05	0.10	0.010	0.0042	0.0125
Reactor	3	5.4(2.0)	6.2±3.6	2.5~9.6	0.03	0.16	0.04	0.07	0.006	0.0025	0.008
Di-filter	4	12.6(1.3)	13.0±4.0	9.6~18.7	0.07	0.34	0.07	0.14	0.014	0.0058	0.017
Hemi-filter	4	8.7(1.2)	8.8±1.5	6.6~9.6	0.05	0.23	0.05	0.10	0.010	0.0042	0.0115
Neutralize gypsum storage	4	13.8(2.6)	19.4±18.6	6.6~46.1	0.10	0.51	0.11	0.21	0.020	0.0083	0.0255
Open-storage area (Phospho-gypsum)	6	27.5(1.5)	29.4±12.2	16.4~70.3	0.15	0.78	0.17	0.32	0.030	0.0125	0.039

\* IAED : Indoor Annual Effective Dose as AM(Arithmetic Mean)  
 † Estimated dose conversion factors for radon exposure{Estimated annual effective dose [ICRP : 8 nSv(2010), 33 nSv(2017); UNSCEAR : 9 nSv(2000), 14 nSv(2013); NCRP : 17 nSv(2009)] per Bq/m³}  
 ‡ Estimated annual effective dose [ICRP : 5 mSv(1993), 12 mSv(2010), 20 mSv(2017)] per WLM}  
 § BG(Background) : 7.0(3.7~12.0) Bq/m³

551.3 Bq/m<sup>3</sup>까지 검출되었다(Table 1). 이것은 고용부에서 고시하고 있는 작업장 노출기준인 연간 평균라돈농도 600 Bq/m<sup>3</sup>에 근접하는 수치이다.

2. 석고보드 제조사업장 라돈농도

국내에서 석고보드를 생산하는 사업장은 2개사로 A사는 2014년 4월부터 인산석고를 사용하지 않고 있으며 B사는 2007년부터 탈황석고를 사용하여 석고보드를 제조하고 있었다. 인산석고가 들어간 석고보드가 사회적 이슈가 되면서 제조공정에서 사용을 중지한 상태이었다. 그래서 인지 사업장의 각 공정에서 라돈농도는 석고장(원료창고) 14.9 Bq/m<sup>3</sup>, 소성 11.4

Bq/m<sup>3</sup>, 배합 8.1 Bq/m<sup>3</sup>, 성형 10.0 Bq/m<sup>3</sup>, 조절단 22.6 Bq/m<sup>3</sup>, 건조 8.9 Bq/m<sup>3</sup>, 정절단 14.7 Bq/m<sup>3</sup> 등으로 낮은 수준이었다(Table 2). 대부분의 공정의 평균 라돈농도는 환경부 실내공기질 관리기준(다중이용시설)인 148 Bq/m<sup>3</sup>에도 훨씬 못미치는 수준이었다.

3. 시멘트 제조사업장 라돈농도

시멘트 제조사업장 인산석고 취급공정의 라돈농도는 치장 23.2 Bq/m<sup>3</sup>, 호퍼 20.2 Bq/m<sup>3</sup>, 피더 16.8 Bq/m<sup>3</sup>, 시멘트밀 11.9 Bq/m<sup>3</sup> 순으로 나타났다(Table 3). 적치장에서 최대 144.3 Bq/m<sup>3</sup>으로 환경부 실내공기질 관리기준인 148 Bq/m<sup>3</sup>에 근접하였으나 작업장 노출기준을

Table 2. Radon concentration and effective dose in gypsum-board manufacturing process

Process name	Number of samples	Radon concentration(Bq/m <sup>3</sup> )			IAED*(mSv/yr)				WLM/yr		
		GM(GSD)	AM±SD	Range	ICRP 115 (2010)	ICRP 137 (2017)	UNSCEAR (2000)	NCRP (2009)	ICRP 65 (1993)	ICRP 115 (2010)	ICRP 137 (2017)
Total	47	11.7(2.4)	15.2±9.2	0.7~39.3	0.08	0.40	0.09	0.17	0.016	0.0067	0.020
Material storage (Gypsum)	7	14.9(1.8)	16.8±8.0	3.7~27.7	0.09	0.44	0.10	0.18	0.018	0.0075	0.022
Burnability	6	11.4(3.6)	16.3±8.0	0.9~21.9	0.06	0.43	0.09	0.18	0.012	0.005	0.0215
Mixing	11	8.1(2.3)	10.8±8.6	2.2~31.6	0.06	0.29	0.06	0.12	0.012	0.005	0.0145
Forming	8	10.0(3.2)	13.7±6.6	0.7~20.8	0.07	0.36	0.08	0.15	0.014	0.0058	0.018
Pre-cutting	4	22.6(1.6)	24.3±10.6	13.1~37.5	0.12	0.64	0.14	0.26	0.024	0.010	0.032
Drying	2	8.9(1.4)	9.1±3.2	6.9~11.4	0.05	0.24	0.05	0.10	0.010	0.0042	0.012
Cutting	4	14.7(2.6)	19.6±15.0	4.2~39.3	0.10	0.52	0.11	0.21	0.020	0.0083	0.026
Shipment	2	10.5(1.1)	10.6±1.4	9.6~11.6	0.05	0.28	0.06	0.12	0.010	0.0042	0.014
Control room	3	15.0(2.3)	18.3±12.2	6.0~30.3	0.09	0.48	0.11	0.20	0.018	0.0075	0.024

\* IAED : Indoor Annual Effective Dose as AM(Arithmetic Mean)

† Estimated dose conversion factors for radon exposure{Estimated annual effective dose [ICRP : 8 nSv(2010), 33 nSv(2017); UNSCEAR : 9 nSv(2000), 14 nSv(2013); NCRP : 17 nSv(2009)] per Bq/m<sup>3</sup>}

‡ Estimated annual effective dose [ICRP : 5 mSv(1993), 12 mSv(2010), 20 mSv(2017)] per WLM}

§ BG(Background) : 7.0(3.7~12.0) Bq/m<sup>3</sup>

Table 3. Radon concentration and effective dose in cement manufacturing process

Process name	Number of samples	Radon concentration(Bq/m <sup>3</sup> )			IAED*(mSv/yr)				WLM/yr		
		GM(GSD)	AM±SD	Range	ICRP 115 (2010)	ICRP 137 (2017)	UNSCEAR (2000)	NCRP (2009)	ICRP 65 (1993)	ICRP 115 (2010)	ICRP 137 (2017)
Total	93	21.9(1.7)	24.0±13.8	1.0~144.3	0.12	0.63	0.14	0.26	0.024	0.010	0.0315
Stowage area	27	23.2(2.2)	27.5±19.7	2.0~144.3	0.14	0.73	0.16	0.30	0.028	0.0117	0.0365
Hopper	33	20.2(1.6)	19.7±10.9	1.0~99.9	0.10	0.52	0.11	0.21	0.02	0.0083	0.026
Feeder	25	16.8(2.5)	21.2±14.7	4.0~64.0	0.11	0.56	0.12	0.23	0.022	0.0092	0.028
Cement mill	8	11.9(2.7)	15.0±10.9	1.0~34.0	0.08	0.40	0.09	0.16	0.016	0.0067	0.020

\* IAED : Indoor Annual Effective Dose as AM(Arithmetic Mean)

† Estimated dose conversion factors for radon exposure{Estimated annual effective dose [ICRP : 8 nSv(2010), 33 nSv(2017); UNSCEAR : 9 nSv(2000), 14 nSv(2013); NCRP : 17 nSv(2009)] per Bq/m<sup>3</sup>}

‡ Estimated annual effective dose [ICRP : 5 mSv(1993), 12 mSv(2010), 20 mSv(2017)] per WLM}

§ BG(Background) : 7.0(3.7~12.0) Bq/m<sup>3</sup>

초과하는 경우는 없었다.

4. 인산석고의 입자분포 및 방사능 중간 공기역학 직경(AMAD)

1) 피더공정의 수농도와 나노입자 분포

인산석고를 취급하는 시멘트 제조사업장 피더공정 5개소에서의 입자 수농도(number concentration)는 기하평균으로 137,696.3(19,129~309,775) #/cm<sup>3</sup>[GSD 3.3 (1.0~2.3)]이었고 범위는 9,927~450,035 #/cm<sup>3</sup>이었다

(Table 4). 질량농도(mass concentration)는 기하평균으로 0.07(0.04~0.08) mg/m<sup>3</sup>[GSD 2.3(1.47~4.02)]이었고 범위는 0.01~0.48 mg/m<sup>3</sup>이었다. 일반적으로 나노입자는 1~100 nm 크기의 입자를 말하는데, 여기에서는 나노입자의 응집(aggregate)현상을 고려하여 1.0~250 nm 크기 까지의 범위를 나노입자농도로 산출하였다. 나노 크기 입자의 특성은 입자수농도 44,973.1 #/cm<sup>3</sup> (GSD 2.9)이었고 입자크기는 기하평균으로 65.7 nm(GSD 1.9)이었으며 밀도는 1.2 g/cc이었다.

Table 4. Concentration of particle number and mass, distribution of nano particle in feeder process

Site	N	Number concentration (#/cm <sup>3</sup> )		Mass (mg/m <sup>3</sup> )		Nano particle (#/cm <sup>3</sup> )		Size of nano particle (nm)	
		GM (GSD)	Range	GM (GSD)	Range	GM (GSD)	%	GM (GSD)	Range
Total	-	137,696.3 (3.3)	9,927~450,035	0.07 (2.30)	0.01~0.48	44,973.1 (2.9)	34.6 (4.2~98.0)	65.7 (1.9)	24.9~184.6
A	1	26,046.5 (1.4)	15,857~54,510	0.08 (3.35)	0.03~0.13	9,359.2 (1.35)	36.6 (25.2~58.1)	48.3 (1.8)	33.3~123.5
B	2	30,942.7 (2.3)	9,927~450,035	0.08 (3.73)	0.01~0.48	10,336.6 (2.41)	39.8 (4.2~98.0)	73.4 (2.2)	29.0~184.6
C	5	309,774.9 (1.0)	249,060~424,640	0.08 (1.47)	0.07~0.10	91,642.1 (1.04)	29.6 (24.6~32.0)	66.5 (1.8)	24.9~88.7
D	2	28,709.7 (2.2)	8,612~429,266	0.07 (4.02)	0.02~0.32	12,559.4 (2.12)	47.3 (8.3~87.4)	60.0 (1.9)	37.5~135.6
E	1	19,128.5 (1.2)	29,140~35,824	0.04 (2.69)	0.02~0.06	19,128.5 (1.18)	61.8 (46.3~83.3)	62.8 (2.1)	50.9~72.2

\* N : Number of samples

Table 5. Distribution of number concentration(#/cm<sup>3</sup>) according to AMAD in feeder process

Site	N	Sampling time (hr)	Nucleation mode (10~100 nm)		Accumulation mode (100~400 nm)		Coarse mode (> 1.0 μm)	
			GM (GSD)	%	GM (GSD)	%	GM (GSD)	%
Total	11	1~16	5,139.0 (3.4)	12.3±19.7	47,166.9 (7.6)	45.0±18.2	2,142.2 (2.6)	5.7±9.1
A	1	3	2,045.7 (6.5)	17.5±16.3	8,050.9 (2.8)	38.1±17.1	3,492.6 (1.7)	14.0±5.2
B	2	3.5	2,611.5 (11.7)	28.5±26.5	4,909.7 (5.3)	30.8±23.6	3,860.5 (2.9)	15.2±11.1
C	5	16	5,362.8 (2.0)	2.0±0.8	170,169.9 (1.1)	55.0±1.8	2,068.9 (2.1)	0.9±0.9
D	2	4	8,569.1 (2.3)	36.7±20.4	3,323.4 (3.7)	17.8±13.1	4,229.7 (2.9)	16.6±10.2
E	1	1	11,509.3 (1.6)	40.5±18.3	9,134.3 (2.3)	36.4±17.7	235.9(1.7)	0.8±0.4

\* N : Number of samples

## 2) 피더공정의 방사능 중간 공기역학 직경(AMAD)

공기중 라돈 딸핵종들은 붕괴하면서 응결입자를 형성하는데 이러한 응결입자들은 방사능입자의 크기분포가 세모드(trimodal) 형태의 대수정규분포의 합으로 표현된다. 시멘트 제조사업장 피더공정의 방사능 중간 공기역학 직경에 따른 입자수 농도 분포를 보면, 핵응결모드(nucleation mode)는  $12.3 \pm 19.7\%$ (2.0~40.5%), 집적모드(accumulation mode)는  $45.0 \pm 18.2\%$ (17.8~55.0%), 조대모드(coarse mode)는  $5.7 \pm 9.1\%$ (0.8~16.6%)이었다 (Table 5).

## IV. 고 찰

본 연구에서 인광석을 취급하는 사업장의 각 공정에서 측정된 라돈농도는 평균  $20.6 \text{ Bq/m}^3$ 이었고 석고보드 및 시멘트 제조사업장에서는 각각  $15.2 \text{ Bq/m}^3$ 와  $24.0 \text{ Bq/m}^3$ 이었다.

각 사업장별 라돈의 평균농도는 큰 차이가 없었으며 ( $p < 0.05$ ) 측정된 라돈농도는 대수정규분포(log-normal distribution)를 하는 것으로 나타났다(Cosma et al., 2013; Celebi et al., 2014; Epstein et al., 2014). 또한, 이것을 라돈으로 인한 건강영향으로 설명하기 위해 연간 유효선량으로 환산하면 국제권고기관 마다 또는 권고한 년도에 따라 선량환산인자가 약간씩 차이가 있지만 비료제조업에서는  $0.11 \sim 0.54 \text{ mSv/yr}$ ,  $0.0092 \sim 0.027 \text{ WLM/yr}$ 이었고 석고보드제조업에서는  $0.08 \sim 0.40 \text{ mSv/yr}$ ,  $0.0067 \sim 0.020 \text{ WLM/yr}$ 이었으며 시멘트제조업에서는  $0.12 \sim 0.63 \text{ mSv/yr}$ ,  $0.01 \sim 0.0315 \text{ WLM/yr}$ 이었다. Table 1~3에서 보면 선량환산인자값이 ICRP에서는 1993년 및 2010년  $8 \text{ nSv}(\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3)$ 에서 2017년  $33.0 \text{ nSv}(\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3)$ 로 강화되었고 1993년 ICRP 65에서  $5 \text{ mSv/WLM}$ 이던 것이 2010년 ICRP 115에서  $12 \text{ mSv/WLM}$ 으로, 다시 2017년 ICRP 137에서  $20 \text{ mSv/WLM}$ 으로 강화되었다(ICRP, 1993; ICRP, 2010; Tirmarche et al., 2010; ICRP, 2017).

비료, 석고보드 및 시멘트 제조업체 모두 전체공정의 총 라돈농도는 큰 차이가 없었으나 천연방사성물질을 직접 취급하는 원료창고에서 근무하는 근로자는 8시간 근무한다고 가정할 경우 연간 평균  $2.04 \text{ mSv}$ 의 유효선량에 노출되며 단시간 동안 최대  $14.55 \text{ mSv}$ 에 노출될 수 있다고 볼 수 있다. 이것은 외부피폭을 무시하고 내부피폭만을 고려한 것으로 직업인의 연간 선량 한도( $20 \text{ mSv/yr}$ )를 초과하지는 않지만 일반인의 선량

한도( $1.0 \text{ mSv/yr}$ )를 초과하는 수치이다. 반면에, 석고보드 제조업체의 공장동에 근무하는 근로자의 공기중 라돈농도는  $8.1 \sim 22.6 \text{ Bq/m}^3$ 로 낮았다. 이것을 연간 유효선량으로 환산하면, 평균  $0.40 \text{ mSv/yr}$ , 최대  $1.04 \text{ mSv/yr}$ 에 노출되는 것으로 평가되었다. 생활환경에서의 라돈 노출실태를 보면, 국립보건원에서 1996년 주거시설을 대상으로 조사한 결과는 전체 주거시설의 평균라돈농도가  $27.8 \text{ Bq/m}^3$ 이었고 아파트  $19.6 \text{ Bq/m}^3$ , 빌라  $24.8 \text{ Bq/m}^3$ , 일반주택  $31.5 \text{ Bq/m}^3$ , 연립주택  $34.8 \text{ Bq/m}^3$ 이었다. 또 국립환경과학원은 2011~2016년 전국 주택 라돈 조사에서 라돈농도는 단독 주택의 경우  $131.2 \sim 134.0 \text{ Bq/m}^3$ , 연립·다세대 주택은  $79.0 \sim 81.6 \text{ Bq/m}^3$ 로 나타났다으며, 아파트는  $56.0 \sim 65.5 \text{ Bq/m}^3$ 이었다고 발표하였다(NIER, 2017). 이와 같이 생활환경에 비해 석고보드를 생산하는 작업환경에서 상대적으로 낮은 농도분포를 보인 이유는 이제는 생산공정에서 천연방사성물질이 함유된 인산석고 대신에 탈황석고를 사용하고 있기 때문으로 분석되었다. 그리고 시멘트제조업의 인산석고 취급공정 근로자는 라돈으로 인해 연간 평균  $0.63 \text{ mSv/yr}$ , 최대  $3.81 \text{ mSv/yr}$ 의 유효선량에 노출된다고 할 수 있다. 선량한도, 즉 노출기준을 적용함에 있어 이와 같은 작업에 종사하는 근로자를 원자력안전법에서 규정하는 방사선작업종사자로 보고 관리되고 있는지 궁금하다(ICKL, 2016). 일부 인광석을 취급하는 공정에 대해서는 피폭관리가 이루어지고 있으나 공정 부산물인 인산석고 등을 취급하는 시설 및 공정의 경우에는 그렇지 못하다.

인산비료를 제조하는 사업장은 비료의 3요소인 질소(N), 인산( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), 가리( $\text{K}_2\text{O}$ )를 만들기 위해 인광석, 염화칼륨 등을 원료물질로 사용한다. 이들 원료물질에는 방사성물질을 함유하고 있으므로 원자력안전위원회에서는 「생활주변방사선 안전관리법(이하 “생활방사선법”이라 한다)」 제9조 제4항에 따라 대상물질에 대해 물질의 종류, 수량 및 농도를 등록하도록 규정하고 있다.

원료물질인 인광석은 천연방사성물질로서 방사성물질인  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  및  $^{232}\text{Th}$ 가 들어있고 이들은 붕괴하면서 알파, 베타 및 감마선을 방출한다. 생활방사선법 제2조제2호에 따라 방사성물질이 함유된 원료물질의 방사능농도가  $1 \text{ Bq/g}$  초과하면 원자력안전위원회에 등록하도록 규정하고 있다. 또한, 생활방사선법 제2조제3호에 따라 원자력안전위원회가 정하여 고시하는 공정부산물의 방사능농도는 포타슘( $^{40}\text{K}$ )을 제외한 모

든 천연방사성핵종에 대해서 그램당 0.5 Bq을 초과하지 않게 관리하도록 규정하고 있다.

원료물질로 사용하고 있는 인광석, 염화가리 및 석고의 방사성물질의 함량 및 방사능 농도가 등록기준에 해당하는 경우는 인광석에서는 수입산지별로 보면, 수입국가 9개국 중 4개국(모로코, 토고, 이스라엘, 중국산)에서  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ 이 1 Bq/g을 초과하였고 염화가리에서는 수입국 중 3개국(캐나다, 벨라루스, 러시아산) 전부  $^{40}\text{K}$ 이 1 Bq/g을 초과한 것으로 나타났다(Jang et al., 2015). 본 연구대상 사업장에서는 중국 및 모로코산 인광석을 수입하여 사용하고 있었다. 대상 사업장으로부터 취득한 인광석 산지별 방사성물질 함량은 중국산 귀주성이 4.66 Bq/g, 호북성 2.36 Bq/g, 모로코산 61.80 Bq/g 으로 등록기준에 해당하였다.

이와 같이 천연자원을 산업에 이용하는 행위는 우연적으로 발생하는 방사성핵종의 농도를 증가시켜 일반근로자 뿐만 아니라 작업종사자의 방사선 피폭을 가중시킬 수 있는데, 이러한 산업활동으로 방사능에 노출될 수 있는 대표적인 작업은 모나자이트, 지르콘, 티탄철석 등과 같은 광물을 취급하는 공정에서 볼수 있다. 이들 광물은  $^{238}\text{U}$  및  $^{232}\text{Th}$  계열의 방사능 농도가 0.1~수천 Bq/g 정도 함유하는 것으로 알려져 있다(IAEA, 2013; Jang, 2014; 2015).

공기중 라돈 딸핵종의 에어로졸은 미응결입자(unattached particle)와 응결입자(attached particle)를 만들어 내는데, 이러한 방사능 입자들은 세가지 형태의 대수정규분포를 이룬다. 즉 AMAD이 10~100 nm 범위에서는 핵응결모드, AMAD가 100~1,000 nm인 범위에서는 집적모드, 그리고 AMAD>1 $\mu\text{m}$ 인 조대모드로 구성되며 최대 방사능은 일반적으로 집적모드에 분포하는 것으로 알려져 있다(Kim, 2014). 본 연구에서도 입자분포는 집적모드가 45.0%를 차지하는 것으로 나타나 다른 모드에 비해 비중이 가장 높아 이와 같은 입자특성이 호흡기에 주는 영향이 더 클 것으로 예상되었다. 방사선 분야에서 정의하는 핵응결모드는 입자분포가 나노입자크기를 의미하므로 시멘트 제조산업의 피더공정을 대상으로 입자분포를 측정된 결과, 유럽위원회에서 발표한 나노입자가 차지하는 비율은 평균 34.6%(4.2~98.0%)로서 50%를 넘지 않는 것으로 나타났지만, 일부 사업장에서는 작업시간대에 따라 50%를 넘는 경우도 있었다(EU, 2011).

## V. 결 론

이상과 같이, 라돈에 대한 선량환산계수를 사용하여 연간 유효선량을 산출해 보았다. 인산석고를 직접 또는 간접으로 취급하는 근로자는 연간 평균 라돈선량 0.16~2.04 mSv 또는 0.010~0.102 WLM에 노출된다고 평가할 수 있다. 국제원고기관의 선량환산인자 값이 점차 강화되고 있는 상황이다. 과거에는 문제가 안되던 노출상황이 이제는 문제가 될수 있는 상황으로 전개될 수 있다. 또한, 연구대상공정의 공기중 입자크기가 인체에 더 나쁜 영향을 주는 것으로 알려진 AMAD 100~1,000 nm인 집적모드에서 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다. 지금까지 기술한 라돈농도 노출에 따른 선량환산은 내부피폭만을 고려한 것이다. 이와 같은 천연방사성물질에서의 방사선 노출은 라돈 흡입 및 섭취에 따른 내부피폭과 물질 표면에서 방출되는 감마선에 의한 외부피폭도 측정하여 합산한 값이 실제 전체 방사선 피폭량이 된다. 따라서, 본 연구에서 기술한 라돈농도를 환산한 선량값이 1 mSv를 초과하지 않는다고 해서 선량한도 미만이라고 판단해서는 안된다.

## References

- Abo-Elmagd M, Metwally SA, Elmongy HM, Salama E, El-Fiki SA. External and internal exposure to natural radiations inside ancient Egyptian tombs in Saqqara. *Radiat. Meas.* 2006;41(2):197-200
- Abo-Elmagd M, Sadek AM. Development of a model using the MATLAB System identification toolbox to estimate Rn-222 equilibrium factor from CR-39 based passive measurements. *Journal of Environmental Radioactivity* 2014;138:33-37, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.07.024>
- Baldauf RW, Devlin RB, Gehr P, Giannelli R, Beth HS et al. Ultrafine Particle Metrics and Research Considerations: Review of the 2015 UFP Workshop. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2016; 13: 1054(1-21)
- Celebi N, Ataksor B, Taskin H, Albayrak BN. Indoor radon measurements in turkey dwellings. *Radiat. Prot. Dosim.* 2014, <http://dx.doi:10.1093/rpd/ncu329>
- Chang BU, Kim Y, Oh JJ. The current status of NORM/TENORM industries and establishment of regulatory framework in Korea. *Radiation Protection Dosimetry* 2011; 146(1-3); 170-173



- Chung EK, Jang JK, Kim KB, Park HD, Song SW. A study for occupational exposure and OELs of radon. Research Report of Occupational Safety and Health Research Institute(Pub. No. 2015-1130).; 2015. p. 1-100
- Chung EK, Kwon JW, Kim KB, Kim JK, Jang JK et al. A study for occupational exposure and assessment method of radon. Research Report of Occupational Safety and Health Research Institute(Pub. No. 2014-814).; 2014. p. 1-95
- Cosma C, Cucos A, Dicu T. Preliminary results regarding the first map of residential radon in some regions in Romania. Radiat. Prot. Dosim. 2013, <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/nct015>
- Epstein L, Koch J, Riemer T, Orion I, Haquin G. Radon concentrations in different types of dwellings in Israel. Radiat. Prot. Dosim. 2014;162:605-608
- EPA(U.S. Environmental Protection Agency). EPA assessment of risks from radon in homes. Washington, DC: EPA; 402-R-03-003; 2003. Available at: <http://www.epa.gov/radiation/docs/assessment/402-r-03-003.pdf>
- EU(European Union). Commission recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial (2011/696/EU), Official Journal L 275, 38-40
- Gezer F, Turhan S, Ugur FA, Goren E, Kurt MZ et al. Natural radionuclide content of disposed phosphogypsum as TENORM produced from phosphorus fertilizer industry in Turkey. Annals of Nuclear Energy 2012; 50: 33-37
- IAEA. Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry. Safety Reports Series: No.78 IAEA Vienna, 2013
- IAEA. Naturally Occurring Radiative Material(NORM V). Proceedings of an international symposium, IAEA Vienna, 2007
- IARC. IARC Monographs on the Carcinogenicity of Chemicals to Humans. 2015. Available from: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/>
- ICRP. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65, Ann. ICRP 23(2), 1993
- ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Oxford;Pergamon Press. 1994
- ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4), 2007
- ICRP. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny & Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1), 2010
- ICRP. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126, Ann. ICRP 43(3), 2014
- ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137, Ann. ICRP 46(3-4), 2017
- Information Center of Korea Laws(ICKL). Nuclear Safety Act. Nuclear Safety and Security Commission. 2016
- Information Center of Korea Laws. Surrounding radiation safety management law. Nuclear Safety and Security Commission. 2017
- Jang JG. Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment, 2014. Research Report of Korea Institute of Nuclear Safety. 2015
- Kim KP, Lim HY, Choi WC. Characterization of Particulates Containing Naturally Occurring Radioactive Materials in Phosphate Processing Facility. Journal of Radiation Protection 2014;39(1):7-13
- NCRP. Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP Report No.160, 2009
- NIER(National Institute of Environmental Research). Nationwide survey(2015-2016) of indoor radon at home in Korea- Public facilities. Ministry of Environment. 2017. Available from: <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EB%9D%BC%EB%8F%88&menuId=286&orgCd=&boardId=823150&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>
- Ramachandran G. Occupational Exposure Assessment for Air Contaminants. Boca Raton, FL: CRC Press(ISBN: 1-56670-609-2).; 2005. p. 109-128
- Tirmarche M, Harrison JD, Laurier D, Paquet F, Blanchardon E, Marsh JW. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny. ICRP Publication 115: ICRP 37(11-56), 2010
- UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2000
- UNSCEAR. Annex E. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. New York: United Nations, UNSCEAR 2006 Report. 2009
- WHO, WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. WHO Press, Geneva, 2009