

모나자이트 취급공정에서의 라돈 및 토론 노출 특성

정은교*

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Characteristics of Internal and External Exposure of Radon and Thoron in Process Handling Monazite

Eun Kyo Chung*

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to evaluate airborne radon and thoron levels and estimate the effective doses of workers who made household goods and mattresses using monazite.

Methods: Airborne radon and thoron concentrations were measured using continuous monitors (Rad7, DurrIDGE Company Inc., USA). Radon and thoron concentrations in the air were converted to radon doses using the dose conversion factor recommended by the Nuclear Safety and Security Commission in Korea. External exposure to gamma rays was measured at the chest height of a worker from the source using real-time radiation instruments, a survey meter (RadiagemTM 2000, Canberra Industries, Inc., USA), and an ion chamber (OD-01 Hx, STEP Co., Germany).

Results: When using monazite, the average concentration range of radon was 13.1–97.8 Bq/m³ and thoron was 210.1–841.4 Bq/m³. When monazite was not used, the average concentration range of radon was 2.6–10.8 Bq/m³ and the maximum was 1.7–66.2 Bq/m³. Since monazite has a higher content of thorium than uranium, the effects of thoron should be considered. The effective doses of radon and thoron as calculated by the dose conversion factor based on ICRP 115 were 0.26 mSv/yr and 0.76 mSv/yr, respectively, at their maximum values. The external radiation dose rate was 6.7 μ Sv/hr at chest height and the effective dose was 4.3 mSv/yr at the maximum.

Conclusions: Regardless of the use of monazite, the total annual effective doses due to internal and external exposure were 0.03–4.42 mSv/yr. Exposures to levels higher than this value are indicated if dose conversion factors based on the recently published ICRP 137 are applied.

Key words: dose conversion factor, effective dose, internal and external exposure, monazite, radon and thoron

1. 서 론

최근 침대매트리스에서 라돈이 검출되어 사회적인 이슈가 발생하였다. 원자력안전위원회(이하 원안위)는 침대 매트리스 속커버나 스펀지에 라돈 발생 원인으로 추정되는 천연방사성물질(Naturally Occurring Radioactive Material, NORM)인 모나자이트가 포함되어 연간 피

폭선량이 1 밀리시버트(mSv)를 초과하는 것으로 확인된 침대 제품은 총 7종이었다고 보고하였다. 생활주변 방사선 안전관리에 관한 규정 제4조 제1항에 가공제품에 의한 일반인의 피폭선량이 연간 1 mSv를 초과하지 않도록 규정하고 있다.

세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 광부들에 대한 연구와 스웨덴의 최근 조사에서 밝혀

*Corresponding author: Eun Kyo Chung, Tel: 052-703-0881, E-mail: jungek60@kosha.or.kr
Occupational Safety and Health Research Institut. KOSHA. 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44429
Received: April 29, 2019, Revised: June 13, 2019, Accepted: June 19, 2019

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

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.

진 위험성평가에서 일생동안 폐암에 걸릴 확률을 3%라고 가정하면 라돈에 의한 폐암의 위험성을 1 Bq/m³당 $3 \sim 6 \times 10^{-5}$ (3~6명/10만명)으로 추정하고 있다. 만약 1,000 Bq/m³의 고농도 라돈을 가지는 가정에서 거주한다고 가정했을 때 $3 \sim 6 \times 10^{-2}$ (3~6 %)의 폐암의 위험성을 가진다. 그리고 건물에서 라돈의 연간평균농도가 100 Bq/m³ (2.7 pCi/L) 이상일 때 개선할 것을 권고하고 있다(WHO, 2009).

라돈은 거의 대부분이 호흡시 함께 배출되므로 라돈 자체로서는 인체에 피해가 거의 없으나 붕괴 자손인 ²¹⁸Po과 ²¹⁴Po은 전기적으로 대전되어 있으며 이들 핵종은 인체에 직접적으로 또는 분진에 부착되어 간접적으로 호흡에 의해 몸속으로 흡입되고 폐속에 침착되어 궁극적으로 암을 발생시킬 수 있다. 흔히 라돈과 라돈 붕괴자손은 분진에 부착되거나 부착되지 않은 형태로 인간의 호흡기계통의 민감한 세포조직에서 발견되고 있다(Chung et al., 2014).

미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)은 2003년 미국인의 라돈 및 라돈 붕괴자손에 의한 폐암 사망자는 연간 약 21,000명 정도이며 이것은 대기오염에 의한 사망위험 보다 10배 이상 높으며 음주 운전으로 인한 사망자수(17,400명)보다 더 높고 전체 폐암사망자의 10%가 넘는 수치라고 발표하였다. 이를 바탕으로 라돈에 대한 권고치로 148 Bq/m³ (4 pCi/L)를 제안하고 있다. 이 농도에서 일생동안 피폭될 경우 폐암으로 사망할 확률이 약 1~2%로 추정하고 있다(EPA, 2003).

고용노동부에서는 2018년 3월 선진국 및 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서 권고하는 참조준위 등을 참고하여 작업장에 대한 라돈의 노출기준으로 연간 평균 600 Bq/m³를 설정하였다(MoEL, 2018). 그러나 모나자이트와 같은 천연방사성물질은 우라늄 및 토륨에서 라돈으로 붕괴되는 과정에서 주요 선원인 알파 및 베타선 뿐만 아니라 감마선도 방출한다. 그러므로 라돈 및 분진 등에 의한 내부피폭 뿐만 아니라 감마선에 의한 외부피폭도 고려하여야 한다.

본 연구의 목적은 라돈 발생 원료물질인 모나자이트를 사용하여 침대 매트리스 뿐만 아니라 생활용품 등 제품을 생산하는 사업장 노동자의 라돈 노출실태를 파악하고 라돈선량을 평가 함으로써 향후 노동자 건강보호 조치 및 라돈 관련 제도 개선에 필요한 기초자료를 제공하는데 있다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상

연구대상 사업장은 현재 모나자이트를 사용하고 있거나 보유하고 있는 사업장 3개소와 과거 모나자이트를 사용하여 제품을 생산하였으나 지금은 사용하지 않고 있는 ○○침대 협력업체 등 3개소를 대상으로 하였다. 즉 모나자이트를 접착제와 혼합하여 섬유원단에 코팅, 건조, 포장하여 전기장판을 제조하는 회사 1개소(작업자 2명), 모나자이트를 계량 및 혼합, 조립 및 완성하여 자동차 엔진성능 개선장치를 개발하는 회사 1개소(작업자 1명), 그리고 모나자이트를 사용하여 모기 퇴치용 천연페인트를 제조하는 회사 1개소(작업자 3명)와 모나자이트를 수성바인더와 혼합, 코팅, 가공하여 원단을 생산하는 회사 1개소(작업자 9명), 코팅된 원단을 누비, 미싱, 접착, 봉합 및 조립하여 매트리스를 만드는 회사 1개소(작업자 11명), 그리고 모나자이트를 점토 등과 혼합, 성형 및 건조하여 타일을 제조하는 회사 1개소(작업자 2명)이었다.

2. 연구방법

1) 내부피폭 측정

라돈농도 측정은 개인노출 측정장비로 개발된 것이 없어 지역노출 측정기를 일반적으로 사용한다. 모나자이트 원료가 사용되는 각 공정에 대해서 측정장비를 주요 작업 위치 또는 호흡기 위치에 가깝게 배치하여 공기 중 라돈 및 토론농도를 측정하였다. 측정장비는 라돈측정기(Rad7, Durrig Company Inc., USA)를 사용하였다. 이것은 스펙트럼 분석에 의한 알파입자 방출량을 정전기를 이용한 채집방식으로 측정한다. 원자력안전법에 근거한 선량한도와 비교하기 위해 라돈농도(산술평균)은 라돈 선량으로 환산하여 종합적으로 평가하였다. 선량한도란 외부피폭선량과 내부피폭선량을 합한 선량으로, 인체에 해가 없다고 생각되는 방사선의 양적 한도를 말한다. 방사선의 피폭 선량한도는 방사선작업종사자의 경우 5년 평균 유효선량값으로 20 mSv이고 일반인의 경우 1 mSv이다. 공기 중 라돈 및 토론 농도에 의한 연간 피폭선량 환산은 라돈과 라돈 딸핵종간의 비율인 평형인자(F)는 라돈의 경우 0.4, 토론 0.04, 거주인자 1.0, 선량환산계수는 ICRP 115에 근거한 원안위 권고치로서 라돈 20.4×10^{-6} mSv/(Bq·h·m⁻³), 토론 120×10^{-6} mSv/(Bq·h·m⁻³)를 적용하였

다(ICRP115, 2010). ICRP는 2018년 라돈의 선량환산 계수를 더 크게 강화하였다(ICRP137, 2018). 그리고 알파비적 검출기(α -track, Rn-tech Co., Korea) 및 연속 모니터측정기(Radon Sentinel 1030, Sun Nuclear, USA)로 측정한 자료는 평가결과에 반영하지 않고 측정한 결과에 대한 정도관리 및 배경농도 산정에 활용하였다.

2) 외부피폭 측정

감마선에 의한 개인노출을 측정하기 위해서는 열형광 선량계(Thermoluminescence Dosimeter, TLD)나 유리선량계 등과 같은 개인선량계를 사용하여 3개월 동안 누적피폭량을 측정해야 하나 단기간내에 측정값을 얻어 평가해야하는 상황이어서 지역측정 방법을 선택하였다. 모나자이트는 우라늄 및 토륨에서 라돈으로 붕괴되는 과정에서 감마선도 방출하므로 먼저 감마선 발생원을 찾기위해 직독식 측정장비로 NaI(Tl)섬광검출방식인 SX-2R 프로브가 장착된 방사선 측정기(Radiagem™ 2000, Canberra Industries, Inc., USA)와 유효선량 단위인 시버트(Sv)로 표현되는 전리함(ion chamber) 방식의 측정기(OD-01 Hx, STEP Co., Germany)를 병행 사용하였다. 모나자이트를 원료로 사용하는 각 공정에 대해 측정장비를 생산설비 또는 주요 발생원으로 부터 10 cm 거리 또는 가슴높이에서 표면 또는 공간 방사선량률을 측정하였다.

3) 총 유효선량 산출

의도적인 라돈발생 원료물질인 모나자이트는 우라늄 및 토륨에서 여러 단계를 거쳐 라돈 및 토론으로 붕괴되는 과정에서 알파 및 베타선 뿐만 아니라 감마선도 방출하므로 외부피폭에 의한 유효선량과 내부피폭에 의한 유효선량을 합산하여 다음과 같이 평가해야 한다.

$$E_t \text{ (mSv/yr)} \approx E_e + E_i \text{ (1)}$$

여기서, E_e : 외부피폭에 의한 총 노출선량(mSv/yr)
 E_i : 내부피폭에 의한 총 노출선량(mSv/yr)

또한, 모나자이트는 라돈 및 토론에 의한 노출 뿐만 아니라 산업장에서 생산활동을 통해 분진의 형태로 비산될 수 있으므로 호흡기를 통한 분진(dust)노출을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉 내부피폭에 의한 총 노출선량은

$$E_i = \sum [E(\text{inhalation-dust}) + E(\text{inhalation-radon}) + E(\text{inhalation-thoron}) + E(\text{ingestion}) + \dots] \text{ (2)}$$

그리고 분진(inhalation-dust)에 의한 총 노출선량(mSv/yr)은

$$E(\text{inhalation-dust}) = \sum [AM_i \times HW_i \times BR] \times DCF_i \text{ (3)}$$

여기서, AM_i : 작업 카테고리 i에 대한 총 알파입자 방사능 농도의 산술평균 (Bq/m^3)
 HW_i : 작업 범주 i에서 평가기간 동안 작업자의 근무시간
 BR : 작업자의 호흡률 (경미작업 $1.2 m^3/hr$, 격렬작업 $1.68 m^3/hr$)
 $[AM_i \cdot HW_i \cdot BR]$: 작업카테고리 i에 대한 평가기간 동안의 흡입량 (Bq)
 DCF_i : 개별 방사능중양공기역학적직경(Activity Median Aerodynamic Diameter, AMAD) 크기 및 다른 우라늄 및 토륨 중량비에 대한 mSv/Bq의 선량환산계수

분진 노출에 의한 방사능농도 측정은 필터가 장착된 개인시료 채취기(Personal Air Sampler, PAS) 또는 고용량 공기포집기(High Volume Air Sampler, HVS)로 공기중 분진을 포집하여 감마분광분석기나 알파핵종 분석기를 이용하여 분석할 수 있다(Chung & Kim, 2016).

4) 자료 분석

모든 통계분석은 유의수준 0.05수준에서 분석하였고 통계분석을 위해 사용한 프로그램은 SPSS 18.0을 사용하였다. 본 연구에서 '피폭'과 '노출'을 동일한 용어로 혼용하여 사용하였다.

III. 결 과

1. 사업장 및 공정별 라돈 및 토론농도(알파입자에 의한 내부피폭)

대상 사업장별 라돈 및 토론농도(기하평균)는 각각 A사 $63.9(1.7)$ (범위: $16.0 \sim 144.2$) Bq/m^3 , $287.2(1.8)$ (범

위: 99.3~1,260.0) Bq/m³, B사 16.6(4.8)(범위: 0.1~83.0) Bq/m³, 468.8(2.9)(범위: 66.2~2,580.0) Bq/m³, C사 16.9(1.1)(범위: 13.3~19.9) Bq/m³, 210.1(1.2)(범위: 149.0~266.0) Bq/m³, D사 10.8(2.8) (범위: 1.0~33.3) Bq/m³, 33.5(3.4)(범위: 5.0~134.0) Bq/m³, E사 2.9(8.3) (범위: 0.1~34.5) Bq/m³, 16.6(7.0) (범위: 0.5~222.0) Bq/m³, F사 4.7(4.6)(범위: 0.1~30.2) Bq/m³, 2.8(5.9)(범위: 0.5~46.0) Bq/m³ 이었다(Table 1). 공정별로는 현재 모나자이트를 사용하는 경우 계량 및 혼합 공정이 가장 높게 나타났고 조립 및 완성>가열 및 소성>실험>성형 및 건조 등의 순이었다. 모나자이트를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우에 라돈농도는 차이가 많았다($p<0.05$). 그리고 ICRP 115에 근거하여 원자력안전위원회에서 권고한 선량환산계수로 환산한 라돈 및 토론 선량(범위)은 각각 0.001~0.26 mSv/yr, 0.012~0.76 mSv/yr 으로 산출되었다.

2. 사업장 및 공정별 외부 방사선량(감마선에 의한 외부 피폭)

대상 사업장의 공정별 외부 방사선량은 모나자이트의 사용유무에 따라 큰 차이가 있었다($p<0.05$). 외부 방사선량은 측정위치에 따라 크게 차이가 있었으며 작업장 중앙의 가슴높이에서 0.3~6.7 uSv/hr이었고 작업장 바닥으로부터 10 cm 거리에서 최대 53.0 uSv/hr까지 검출되었다. 이와 같이 비교적 높게 나타난 이유는 모나자이트를 혼합하여 사용하면서 반죽이 작업장 바닥에 흘러내려 오랜기간 쌓여 오염된 것으로 확인되었다. 이것을 연간 유효선량으로 계산하면 가슴높이에서 최대 4.3 mSv/yr, 10 cm 높이에서 최대 33.9 mSv/yr이었다(Table 2).

3. 내부 및 외부피폭에 의한 총 연간 유효선량

조사대상 사업장의 모나자이트를 제조공정에 현재 사

Table 1. Annual effective dose for internal exposure by company and manufacturing process

Company name	Process name	N*	Radon concentration(Bq/m ³)			Thoron concentration(Bq/m ³)			IAED [§] (mSv/yr)		
			GM(GSD) [†]	AM±SD [‡]	Range	GM(GSD)	AM±SD	Range	Total	Radon	Thoron
A	Subtotal	57	63.9(1.7)	71.2±30.7	16.0~144.2	287.2(1.8)	353.9±273.9	99.3~1,260.0	0.07	0.02	0.05
	Weighing and mixing	7	97.8(1.3)	100.6±26.8	77.2~144.2	841.4(1.3)	870.0±233.3	576.0~1,170.0	0.06	0.01	0.05
	Assembly and completion	42	61.8(1.5)	66.4±23.1	16.0~106.8	225.2(1.6)	255.8±188.8	99.3~1,260.0	0.85	0.26	0.59
	Heating and firing	8	52.4(2.4)	71.1±53.2	16.7~133.4	402.0(1.3)	417.1±126.9	266.0~673.0	0.08	0.02	0.06
B	Subtotal	99	16.6(4.8)	29.5±21.5	0.1~83.0	468.8(2.9)	776.8±713.9	66.2~2,580.0	0.095	0.006	0.089
	Weighing	49	13.1(4.7)	24.0±19.4	0.1~83.0	435.0(2.9)	717.2±669.4	66.2~2,200.0	0.088	0.005	0.083
	Mixing	50	20.8(4.8)	34.9±22.2	0.1~83.0	503.6(3.0)	834.1±756.4	69.2~2,580.0	0.103	0.007	0.096
C	Experiment	7	16.9(1.1)	17.0±2.2	13.3~19.9	210.1(1.2)	212.9±35.5	149.0~266.0	0.05	0.001	0.049
D	Subtotal	27	10.8(2.8)	16.3±11.3	1.0~33.3	33.5(3.4)	55.2±41.6	5.0~134.0	0.019	0.006	0.013
	Molding	10	9.5(4.9)	18.6±14.1	1.0~33.3	33.6(3.1)	51.0±41.1	5.0~134.0	0.019	0.007	0.012
	Drying	17	10.8(2.8)	14.9±9.5	1.0~32.9	33.4(3.7)	57.8±42.9	5.0~132.0	0.019	0.006	0.013
E	Subtotal	98	2.9(8.3)	8.8±8.2	0.1~34.5	16.6(7.0)	46.0±47.4	0.5~222.0	0.58	0.14	0.44
	Coating	49	3.3(9.2)	10.7±9.5	0.1~34.5	66.2(1.9)	79.3±45.2	10.8~222.0	0.93	0.17	0.76
	Packing	49	2.6(7.6)	7.0±6.2	0.1~24.7	4.2(6.2)	12.7±15.4	0.5~86.2	0.23	0.11	0.12
F	Subtotal	96	4.7(4.6)	8.3±6.4	0.1~30.2	2.8(5.9)	9.3±11.6	0.5~46.0	0.22	0.13	0.09
	Mixing	48	4.8(5.1)	9.3±7.8	0.1~30.2	4.8(6.1)	13.5±13.8	0.5~46.0	0.034	0.018	0.016
	Sewing	48	4.6(4.1)	7.3±4.6	0.1~21.2	1.7(4.8)	5.1±6.5	0.5~22.0	0.162	0.115	0.047

* N : Number of counts

† GM(GSD) : Geometric Mean(Geometric Standard Deviation)

‡ AM±S.D. : Arithmetic mean±Standard Deviation

§ IAED : Indoor Annual Effective Dose as AM(Arithmetic Mean), Estimated dose conversion factors for radon exposure[Estimated annual effective dose {[ICRP 115 : 20.4 nSv(radon), 120 nSv(thoron)] per Bq/m³}

|| BG(Background) : 0.1~14.0 Bq/m³

Table 2. Annual effective dose for external exposure by company and manufacturing process

Company name	Process name	Sampling site	Number of samples	Radiation Dose(uSv/hr)		Exposure time (hr)	Annual Effective Dose (mSv/yr)
				AM±SD	Range		
A	Weighing and mixing	Chest height in the center of the unit process	3	–	2.0~3.5	1 hr/day	0.04
		10 cm height from the surface of the equipment or raw materials	4	–	2.0~39.6	–	–
	Assembly and completion	Chest height in the center of the unit process	6	–	1.0~2.0	4 hr/day	0.96
		10 cm height from the surface of the equipment or raw materials	6	–	1.0~3.0	–	–
	Heating and firing	Chest height in the center of the unit process	3	–	1.0~2.5	0.5 hr/day	0.09
		10 cm height from the component surface	3	–	1.0~2.9	–	–
B	Weighing	Chest height in the center of the unit process	10	3.6±1.1	1.5~4.5	4 hr/day	3.46
		10 cm height from the component surface	4	25.6±12.1	8.0~43.5	–	24.58
	Mixing	Chest height in the center of the unit process	5	4.5±1.7	2.4~6.7	4 hr/day	4.32
		10 cm height from the floor	14	35.3±8.3	6.1~53.0	–	33.89
	Coating	Chest height in the center of the unit process	7	2.6±0.8	1.2~3.5	–	2.50
	Drying	Chest height in the center of the unit process	3	1.2±0.8	0.7~2.1	–	1.15
C	Experiment	Sample's reagent surface	4	–	1.2~2.1	–	–
		10 cm height from the container	4	–	2.5~3.5	–	–
		Storage container surface	4	–	10.0~14.5	–	–
		Chest height in the center of the unit process	6	–	0.3~0.5	8 hr/day	1.0
D	Molding	10 cm height from the packaging box (tile 10 pieces)	4	0.02±0.01	0.01~0.03	2 hr/day	0.010
		10 cm height from the packaging box (tile 30 pieces)	2	0.28±0.13	0.1~0.4	1 hr/day	0.067
	Drying	10 cm height from the packaging box (tile 40 pieces)	5	0.32±0.13	0.2~0.5	1 hr/day	0.077
E	Coating	Chest height in the center of the unit process	4	–	0.01~0.05	8 hr/day	–
	Packing	Chest height in the center of the unit process	4	–	0.01~0.03	8 hr/day	–
F	Mixing	Chest height in the center of the unit process	4	–	0.01~0.03	1 hr/day	–
	Sewing	Chest height in the center of the unit process	4	–	0.01~0.03	8 hr/day	–

* AM±S.D. : Arithmetic mean±Standard Deviation

† BG(Background) : 0.01~0.03 uSv/hr

Table 3. Total annual effective dose for internal and external exposure by company and manufacturing process

Company name	Process name	Sampling site	Annual effective dose (mSv/yr)		Total annual effective dose (mSv/yr)	Monazite use
			Internal exposure	External exposure		
A	Weighing and Mixing	Chest height in the center of the unit process	0.06	0.04	0.10	Yes
	Assembly and Completion		0.85	0.96	1.81	
	Heating and Firing		0.08	0.09	0.17	
B	Weighing	Chest height in the center of the unit process	0.09	3.46	3.55	Yes
	Mixing		0.10	4.32	4.42	
C	Experiment	Chest height in the center of the unit process	0.03	1.0	1.03	Yes
D	Molding	Chest height in the center of the unit process	0.02	0.01	0.03	No
	Drying		0.02	0.01	0.03	
E	Coating and Packing	Chest height in the center of the unit process	0.58	BG	0.58	No
F	Mixing and Sewing	Chest height in the center of the unit process	0.22	BG	0.22	No

* BG(Background) : <0.01 mSv/yr

용하거나 사용하지는 않지만 제품 또는 원료로 남아있는 경우 발생하는 방사성물질의 흡입에 의한 라돈농도에 따른 라돈선량(내부피폭)과 감마선에 의한 외부피폭선량을 합산한 총 연간 유효선량은 0.03~4.42 mSv/yr 이었다(Table 3). 현재 모나자이트를 제조공정에서 전혀 사용하지 않는 경우 외부피폭에 의한 농도수준은 배경농도(background) 수준에 가까웠다. 그리고 모나자이트 사용여부에 따른 총 유효선량은 각각 0.10~4.42 mSv/yr, 0.03~0.58 mSv/yr으로 확실한 차이를 보여주었다($p < 0.05$).

IV. 고 찰

원료물질인 모나자이트는 희토류 원소를 포함하는 적갈색의 인산염 광물로 생산지에 따라 차이가 있지만 보통 토륨(ThO)이 2~14%(24~400 Bq/g), 우라늄(U₃O₈)이 약 0.05~0.3%(5~70 Bq/g) 함유한 것으로 알려져 있다(IAEA, 2010; Alnour, 2017). 모나자이트([Ce, La, Y, Th] PO₄)는 천연방사성물질로서 우라늄과 토륨의 함유량이 보통 1:10인 것으로 보고하고 있고 이들은 붕괴하면서 알파, 베타 및 감마선을 방출한다(IAEA, 2003). 생활방사선법 제2조 제2호에 따라 방사성물질이 함유된 원료물질의 방사능농도가 1 Bq/g을 초과하면 원안위에 등록하도록 규정하고 있다(ICKL, 2019). 이

와 같은 천연방사성물질에서의 방사선 노출은 라돈 노출, 분진흡입 및 섭취에 따른 내부피폭과 물질 표면에서 방출되는 감마선에 의한 외부피폭도 측정하여 합산한 값이 실제 전체 방사선 피폭량이 된다.

본 연구에서는 라돈 및 토론에 의한 공기중 농도를 선량환산계수를 사용하여 환산한 방사선의 내부피폭과 모나자이트를 직접 취급하므로써 발생하는 감마선에 의한 외부피폭을 합산하여 연간 유효선량을 산출해 보았다.

대상 사업장의 라돈농도(기하평균)는 모나자이트를 사용하는 경우 13.1~97.8 Bq/m³(토론농도 : 210.1~841 Bq/m³)이었고 모나자이트를 사용하지 않는 경우 2.6~10.8 Bq/m³(토론농도 : 1.7~66.2 Bq/m³)이었다. 측정된 라돈 및 토론 농도 분포에 대한 W-test 결과, 대부분 대수정규분포(log-normal distribution)를 하는 것으로 나타났고(Celebi et al., 2014; Epstein et al., 2014; Maria Quarto et al., 2015) 일부 샘플수가 많은 경우 정규분포하는 것으로 나타났다. 토론농도가 라돈농도보다 높은 이유는 모나자이트의 구성성분이 라돈의 모핵종인 우라늄보다 토론의 모핵종인 토륨이 더 많기 때문이다.

사업장별 작업환경 특성을 보면, A사의 경우 에어컨의 영향으로 모나자이트 분진이 조립 및 완성공정 전체에 비산되고 있는 상태이며 B사의 경우는 모나자이트 분진이 작업장 바닥에 퇴적되어 있지만 날리지 않는 상

태이었고 C사는 모나자이트를 실험용기 등에 액체 상태로 담겨져 있어 비산될 상황은 아니었다. 이와 같은 노출환경과 모나자이트에 들어있는 우라늄과 토륨의 함유량 차이가 라돈 및 토론농도의 크기의 차이를 가져온 것으로 판단되었다. 공정별로는 현재 모나자이트를 사용하는 경우 계량 및 혼합 공정이 가장 높게 나타났다. D사는 점토에 모나자이트를 혼합, 성형 및 건조하여 타일을 만드는 데, 현재 작업공정에서 모나자이트를 사용하지 않기 때문인지 라돈 및 토론농도는 낮은 편이었다. 그러나, 특이한 것은 공장 옆에 주택을 지어 과거 모나자이트가 들어간 타일로 거실 바닥, 벽 및 천정에 도배하여 외부선량률이 0.65 $\mu\text{Sv/hr}$ 까지 검출되었으며 실내에 10시간 거주한다고 가정했을 때 유효선량은 1.5~2.3 mSv/yr 으로 외부피폭만으로도 일반인 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

침대 매트리스 제조 공정(E 및 F사)의 경우에는 각 공정에서 모나자이트를 사용하지 않고 있기 때문에 라돈 및 토론농도는 낮은 편이며 일부 코팅공정에서 토론 농도값이 약간 높은 이유는 바닥에 흘러내린 분진이나 기계설비 등에 붙어있는 분진이 깨끗이 제거되지 않아 영향을 준 것으로 생각된다. 작업공정이 습식작업이 많고 섬유원단 취급시 발생하는 분진이 비산될 정도로 휘날리는 작업형태가 아니어서 대부분이 간이형 마스크를 착용하고 작업한 것으로 조사되었고 작업자들은 모나자이트에 대해 크게 위험한 것으로 생각하지 않아 호흡보호구를 착용할 정도로 인체보호에 철저히 대응하지 못한 것으로 볼 수 있다.

외부 방사선량은 측정위치에 따라 크게 차이가 있었으며 작업장 중앙의 가슴높이에서 최대 6.7 $\mu\text{Sv/hr}$ 이었고 이것을 연간 유효선량으로 계산하면 4.3 mSv/yr 으로 이것은 감마선에 의한 피폭만으로도 일반인 기준을 초과하는 수치이다.

모나자이트의 사용유무에 관계없이 라돈선량(내부피폭)과 감마선에 의한 외부피폭 선량을 합산한 연간 총 유효선량은 0.03~4.42 mSv/yr 이었으며 현재 제조공정에서 모나자이트를 전혀 사용하지 않는 경우 외부피폭은 거의 배경농도 수준이었으나 내부피폭은 노출시간 등 작업장 노출환경에 따라 큰 차이가 있었다. 또한, 최근에 발표된 ICRP 137에 근거한 선량환산계수를 적용한다면 이 수치보다 더 높은 수준에 피폭될 수 있음을 암시하고 있다.

모나자이트를 사용하는 경우 측정한 6개 공정 중 4

개 공정(67%)에서 일반인의 선량한도($<1 \text{ mSv}$)를 초과하는 경우가 발생하였지만 모나자이트를 사용하지 않을 때에는 초과하는 경우가 없었다.

국외에서 모나자이트를 사용하여 생활용품을 만드는 작업공정에 대해 노출평가한 논문은 찾아볼 수 없었다. 모나자이트 광석(10 kg)으로부터 희토류원소를 추출하는 과정에서의 방사선량 노출평가 연구에서 라돈농도는 8.72 Bq/m^3 (0.81~14.4 Bq/m^3), 토륨농도는 76.14 Bq/m^3 (56.88~114.7 Bq/m^3)이었고, 공기 중 우라늄농도는 0.39 Bq/m^3 (0.29~0.88 Bq/m^3)이었으며 감마선의 등가선량률(Equivalent dose rates)은 평균 0.15 $\mu\text{Sv/hr}$ (0.11~0.21 $\mu\text{Sv/hr}$)이었을 때, 근로자가 받는 연간 총 유효선량은 평균 3.21 mSv/yr (0.46~12.46 mSv/yr)이었다(Yassin et al., 2016). ThO_2 함유량이 5~10% 및 U_3O_8 함유량이 0.2%인 모나자이트 원료를 저장하는 시설에서의 방사선 노출평가에서 감마선 피폭은 창고내부에서 ~0.15 mSv/h , 외벽에서 0.07 mSv/h 이었고 라돈 및 토륨 딸핵종의 평형등가농도(Equilibrium Equivalent Concentration, EEC)는 각각 45~250 Bq/m^3 , 60~700 Bq/m^3 이었으며 모나자이트 분진 흡입에 따른 방사능 농도는 1,600~14,000 Bq/m^3 이었다(Ekidin et al., 2003). 인도 타밀나두(Tamilnadu) 남서해안의 모나자이트(토륨 약 5~12% 함유) 광산지역에서 노출평가한 결과 라돈 및 토론 농도는 0.22 Bq/m^3 미만이었지만 외부선량률은 0.11~0.23 $\mu\text{Sv/h}$ 이었으며 총 유효선량은 0.41~2.35 mSv/yr 이었다(Mini. et al., 2014). 말레이시아 아망(Aman)공장의 모나자이트(토륨 7%, 우라늄 0.2% 함유) 취급작업에서는 공기중 방사성 분진으로 인한 연간 평균 유효선량은 0.72~116.60 mSv 이었고 라돈 및 토론 딸핵종에 의한 유효선량 범위는 각각 0.00~1.24 mSv , 0.03~1.19 mSv 이었으며 외부 방사선량은 1.83~64.80 mSv 이었다(Ismail, 1997; IAEA, 2003).

Kim et al.(2016)의 연구논문에서는 우라늄 및 토륨의 방사능농도가 1 Bq/g 을 초과하면 선량평가하도록 제안하였고 그에 따라 준위별 조치기준을 제시하였다. 또한, 모나자이트 취급산업의 경우 모나자이트내 우라늄(^{238}U) 21.4 Bq/g , 토륨(^{232}Th) 213.0 Bq/g 을 함유하고 있어 연간 예측선량치가 0.3 mSv 를 초과하므로 조치기준으로 먼저, 모니터링후 설비 및 작업공정 개선, 작업시간 조정, 적절한 보호구 제공, 매월 또는 분기별 작업자에 대한 피폭관리를 하도록 권고하였다(Kim et al.,

2016). Jin et al.(2019)의 연구에서는 모나자이트 매트리스에 대해 라돈 및 토론 노출로 인한 폐암 위험평가는 정확한 선량평가가 선행되어야 하며 보다 정확한 위험평가 모델이 필요하다고 제안하고 있다. 국내에서 최초로 침대, 전기담요, 베개, 라텍스 매트리스 등 생활용품을 대상으로 공기 중 라돈 및 토론 등의 발생특성을 평가한 연구결과에서는 토론농도가 라돈농도에 비해 10배 이상 검출된 것으로 보고하고 있다(Park et al., 2019). 이와 같이 모나자이트처럼 라돈보다 토론이 훨씬 많이 방출되는 물질에 대한 평가는 라돈의 노출기준만을 적용하게 되면 과소평가하게 된다. 그래서 도입된 것이 선량환산계수를 적용하여 유효선량 개념으로 평가하는 것이 국제적인 추세이다.

본 평가대상의 모나자이트를 취급하는 작업공정에서 합산한 유효선량값이 1 mSv를 초과하지만 20 mSv를 초과하지 않는다고 해서 선량한도(직업인, <20 mSv) 미만이라고 단정적으로 판단할 수 없다. 왜냐하면, 아직 이와 같은 작업에 종사하는 노동자가 일반인인지 직업인인지 정의되지 않았고 측정당일 모나자이트를 사용하는 환경에서 평가하지 못한 점(모나자이트를 보관하고 있지만 당일 작업이 없음)과 분진흡입으로 인한 노출을 평가하지 못한 점 등으로 정확한 노출환경을 반영하는데 한계가 있었다. 그렇지만 음이온이 몸에 좋다는 잘못된 인식에서 비롯된 위험으로부터 노동자의 건강을 보호하고 제도적인 관점에서 이와 같은 산업보건 문제를 해결하기 위한 기초자료를 제공하는 데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대해 본다.

V. 결 론

모나자이트를 사용하고 있거나 과거에 사용하였던 사업장을 대상으로 라돈 및 토론농도와 방사선의 내부 및 외부피폭에 대한 선량평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모나자이트를 사용하는 작업공정의 경우 라돈의 평균농도 범위는 13.1~97.8 Bq/m³, 토론은 210.1~841.4 Bq/m³이었다.
2. 토론의 영향을 고려하기 위해 ICRP 115에 근거한 선량환산계수로 산출한 라돈 및 토론의 유효선량은 각각 최대 0.26 mSv/yr, 0.76 mSv/yr 로 확인되었다.
3. 외부 방사선량률은 가슴높이에서 최대 6.7 uSv/hr 이었고 유효선량은 최대 4.3 mSv/yr 이었다.

4. 모나자이트의 사용유무에 관계없이 내부 및 외부 피폭에 의한 연간 총 유효선량은 0.03~4.42 mSv/yr 이었다.

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 광물들이 있다. 금변 사회적 이슈가 된 모나자이트 뿐만 아니라 지르콘, 티탄철석 등과 같은 광물은 ²³⁸U 및 ²³²Th 계열의 방사능 농도가 0.1~수천 Bq/g 정도 함유하는 것으로 알려져 있다(IAEA, 2007; IAEA, 2013). 이들 광물을 다루는 작업공정에 대한 실태조사를 통해 보다 효율적인 작업환경관리가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 라돈 침대사건으로 사회적 이슈가 된 라돈발생 원료물질 모나자이트를 취급하는 사업장을 대상으로 실태조사한 작업환경 유해도평가 결과를 발췌한 것으로 조사에 참여하여 도움을 준 김성호 연구원과 김세동 연구원에게 감사드린다.

References

- Alnour IA, Wagiran H, Ibrahim N, Hamzah S, and Elias MS. Determination of the elemental concentration of uranium and thorium in the products and by-products of Amang. tin tailings process. AIP Conference Proceedings 1799, 030003 (2017); 10.1063/1.4972913. Standardless ...
- Celebi N, Ataksor B, Taskin H, Albayrak BN. Indoor radon measurements in Turkey dwellings. Radiat Prot Dosim 2014, Available from: <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncu329>
- 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
- Chung EK, Kim KB. A study on gamma-spectrometric measurement for naturally occurring radioactive material. Research Report of Occupational Safety and Health Research Institute(Pub. No. 2016-769).; 2016. p. 1-84

- Ekin A, Kirdin I, Yarmoshenko I, Zhukovsky M. The problems of individual monitoring for internal exposure of monazite storage facility workers. U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, p. 1-10, 2003. Available from: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20992905>
- 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>
- 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
- IAEA(International Atomic Energy Agency). Extent of environmental contamination by NORM and technological option for mitigation. IAEA technical report series No 419. Vienna, Austria, 2003;55-163.
- IAEA. Naturally Occurring Radiative Material(NORM V). Proceedings of an international symposium, IAEA Vienna, 2007
- IAEA. Radiation protection and management of NORM residues in the phosphate industry. Safety Reports Series: No.78 IAEA Vienna, 2013
- IAEA. Radiation protection and NORM residue management in the production of rare earths from thorium containing minerals. IAEA safety report series No 68. Vienna, Austria, 2010;40-241
- ICRP(International Commission on Radiological Protection). Lung cancer risk from radon and progeny & statement on radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1), 2010
- ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137, Ann. ICRP 46(3-4), 2018
- ICKL(Information Center of Korea Laws). Surrounding radiation safety management law. Nuclear Safety and Security Commission, 2019
- Ismail Bahari. Radiological and environmental impact of Amang, a TENORM industry in Malaysia. Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials INIS-MY-010. Vol 29, Issue 31, 1997. Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/041/29041542.pdf
- Jin YW, Seo SW, Ha WH, Kang JK, Lee DN et al. Health effects of exposure to radon: implications of the radon bed mattress incident in Korea. Epidemiol Health 2019;41:e2019004 p. 1-7
- Kim KP, Choi CK, Kim YG, Ji SW, Koo BC et al. Development of internal dose assessment procedure for workers in industries using raw materials containing naturally occurring radioactive materials. Journal of Radiation Protection and Research 2016;41(3):291-300
- Maria Quarto, Mariagabriella Pugliese, Giuseppe La Verde, Filomena Loffredo and Vincenzo Roca. Radon exposure assessment and relative effective dose estimation to inhabitants of Puglia region, South Italy. Int. J. Environ. Res. Public Health 2015, 12, 14948-14957; doi:10.3390/ijerph121114948
- Mini K, Manujunatha BM, Sreekumar K. Estimation of radioactivity exposure hazard in environmental matrices due to monazite in placer deposits of southwest coast of Tamilnadu, India. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 2014;4(6):431-434
- MoEL(Ministry of Employment and Labor). Exposure limits for chemical substances and physical agents (MoELPublic Notice No. 2018-62). 2018
- Park DU, Yi SJ, Kim SY, Kwak HS, Lee SH et al. Effective doses estimated according to characteristics of airborne radon and thoron levels generated from some household products. J Environ Health Sci 2019;45(2):99-112
- WHO, WHO Handbook on indoor radon: A Public Health Perspective. WHO Press, Geneva, 2009
- Yassin A. Abdel-Razek, Osman. A. Desouky, Ashraf Elshenawy, Amal S. Nasr1, Haitham S. Mohmmmed et al. Assessment of the radiation exposures during separation of rare earth elements from monazite mineral. International Journal of Advanced Research 2016;4(7):265-272

<저자정보>

정은교(한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 직업환경연구실 선임연구위원)