JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(1) : 31-39 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.1.31

국내 저어콘 취급 산업체 작업종사자 외부피폭 방사선량 평가

박종혁[1], 이병민[1], 진용호[1], 이성연[1], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Assessment of External Radiation Doses for Workers in Domestic Zircon Industries

Jong Hyeok Park[1], Byung Min Lee[1], Yong Ho Jin[1], Seong Yeon Lee[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

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

Abstract The IAEA and ICRP mentioned that the zircon and zirconia industries as major industries where exposure occurred by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). In industries and processes handling zircons, there is possibility that radiation exposure is occurred by raw materials, byproducts, and final products which include NORM. Therefore, it is necessary to conduct dose assessment on workers in zircon industries. The purpose of this study is to conduct external dose assessment on workers in investment casting manufacturers among domestic zircon industries. To achieve this purpose, an analysis of radiation exposure circumstances was conducted to identify handling materials and working conditions in each manufacturer. Based on analysis of radiation exposure circumstances, the exposure dose rate was measured in major processes where the radiation exposure of workers was expected as significant. Finally, the external dose assessment of workers in each manufacturer was conducted considering exposure dose rates and working times on major processes. The exposure dose rate in main processes of casting frame manufacturers A, B and facing material manufacturers C was measured to be 0.17 to 0.80 μSv h^{-1}. In addition, the annual external doses of workers in each manufacturer were 0.05 to 0.29 mSv y^{-1}. The external doses of workers were different due to handling materials, working types and working times. However, the annual external doses of workers in each manufacturer were less than the dose limit for public prescribed by the domestic Nuclear Safety Act. It indicates that the effect of external radiation dose was insignificant. The results of this study will be used as a basis for figuring out the radiological characteristics of domestic zircon industries and the external dose level of workers.

Key words: Zircon industry, NORM, Raw material, Worker, External radiation dose assessment

1. 서 론

천연방사성핵종 함유물질(Naturally Occurring Radioactive Material; NORM)은 지구상에 자연적으로 유래된 방사성핵종을 함유하는 물질이며, 모든 광물과 산업원료에 포함되어 있다[1]. 일반적으로 NORM에 의한 피폭은 미미한 수준이지만, 다수의 국제기구 및 국외 기관에서는 특정 산업 및 공정에서 농축된 NORM에 의해 유의미한 수준의 방사선학적 영향이 발생할 수 있음을 언급하였다[2-4]. 이에 따라 국제원자력기구(International Atomic

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry
***Corresponding author.** Kwang Pyo Kim
Tel. +82-31-201-2560 Fax. +31-273-3592 E-mail. kpkim@khu.ac.kr
Received 8 February 2022 **Revised** 13 February 2022 **Accepted** 17 March 2022

Energy Agency; IAEA)에서는 작업종사자의 방사선학적 방호가 필요한 NORM 산업군을 분류하고, 안전관리 필요성에 관한 보고서를 발간하였다. IAEA에서는 저어콘을 취급하는 산업군을 포함한 11개 산업군을 주요 NORM 산업군으로 제시하였다[5-7]. 저어콘은 전 세계적으로 연간 소비량이 약 100만 톤을 초과하며, 다양한 산업에서 활용되고 있다. 그리고 대표적인 원료물질인 저어콘샌드 내에는 약 3 Bq g^{-1} 정도의 ^{238}U, ^{232}Th 혼합물이 존재하는 것으로 알려져 있다[8]. 저어콘을 취급하는 산업체에서는 제품을 생산하는 과정에서 원료물질, 공정부산물, 가공제품에 함유된 NORM에 의해 작업종사자의 방사선 피폭이 발생할 개연성이 있으므로 작업종사자에 대한 안전관리를 위해 방사선학적 평가가 수행되어야 한다.

Table 1에 국내외에서 수행된 NORM 산업체의 선량평가 연구 사례를 나타내었다. 국외에서는 다양한 NORM 취급 산업체의 작업종사자 선량평가 관련 연구가 수행되었다. Righi 등은 이탈리아 북동부의 저어콘샌드 가공시설에 종사하는 작업종사자와 인근 주민을 대상으로 연간 유효선량 평가를 수행하였다[9]. Ballesteros 등은 스페인의 저어콘샌드 정련공정에 종사하는 작업종사자에 대한 유효선량 평가를 수행하였다[10]. Kuzmanovic 등은 세르비아의 저어콘을 취급하는 세라믹 산업 작업종사자에 대한 유효선량 평가를 수행하였다[11]. 미국 아르곤 국립연구소(Argonne National Laboartory; ANL)에서는 NORM 취급 산업 중 석유 산업 작업종사자에 대한 유효선량 평가를 수행하였다[12]. 아일랜드 방사선 방호 위원회(Radiological Protection Institute of Ireland; RPII)에서는 화력 발전소, 천연가스 생산, 보크사이트 취급 산업체의 작업종사자에 대한 유효선량 평가를 수행하였다[13]. Haridasan 등은 인도의 희토류 화합물 생산시설에 대한 작업종사자의 유효선량 평가를 수행하였다[14]. Dal-Molin 등은 영국의 철 가공시설에 대한 작업종사자의 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[15]. 국내에서는 장정환 등이 국내 포타슘 산업체의 작업종사자에 대한 외부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[16]. 지승우 등은 국내 인산염 산업체를 대상으로 작업종사자의 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[17].

저어콘은 대표적으로 정밀금속, 내화물, 용접봉, 유약 등의 제조산업분야에서 활용된다. 이 중 정밀금속 주조산업에서는 저어콘샌드 및 저어콘플라워를 철합금 및 비철합금 주물 제조 시 주조틀 및 코팅막슬러리(도형제)의 원료물질로 사용한다. 일반적인 정밀 주조용 슬러리에는 저어콘이 약 30~50%가량 함유되어 있는 것으로 알려져 있다[18]. 이에 따라 다량의 저어콘샌드 및 저어콘플라워를 취급하는 산업체의 작업종사자는 원료물질 및 공정부산물을 취급하는 과정에서 지속적인 방사선 피폭환경에 노출될 수 있다. 따라서 작업종사자의 안전관리를 위해 내부 및 외부피폭 방사선량 평가가 수행되어야 한다.

Table 1. A case of a dose assessment studies for NORM industries conducted in each country

Nation	Author	Type of industry	Type of assessment
Italy	Righi *et al*.	Zircon sand processing industry	Effective dose assessment of worker and public
Spain	Ballesteros *et al*.	Zircon sand refining industry	Effective dose assessment of worker
Serbia	Kuzmanovic *et al*.	Ceramic handling zircon industry	
U.S.A	ANL	Oil industry	
Ireland	RPII	Thermal power plant Natural gas production industry Bauxite industry	
India	Haridasan *et al*.	Rare earth compound production industry	
England	Dal-Molin *et al*.	Iron processing industry	Internal dose assessment of worker
Korea	Jang *et al*.	Potassium industry	External dose assessment of worker
	Ji *et al*.	Phosphate industry	Internal dose assessment of worker

본 연구의 목적은 저어콘 취급 산업체 중 정밀금속 주조산업체의 작업종사자 외부피폭 방사선량 평가를 수행하는 것이다. 이를 위해 먼저 저어콘을 취급하는 정밀금속 주조산업체 3곳을 대상으로 방사선 피폭환경 분석을 수행하였으며, 이를 기반으로 방사선학적 영향이 클 것으로 예상되는 주요 공정의 공간방사선량률을 측정하였다. 그리고 최종적으로 작업종사자의 근무시간과 주요 공정의 공간방사선량률을 통해 정밀금속 주조산업 작업종사자에 대한 외부피폭 방사선량 평가를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 외부피폭 방사선량률 측정장비 선정

천연방사성핵종 함유물질에서 방출되는 방사선을 측정하기 위해서는 방사선의 종류와 측정 목적에 부합한 측정장비를 선정해야 한다. 본 연구에서는 측정장비 선정 시 천연방사성핵종 함유물질에서 방출되는 감마선을 측정할 수 있는 에너지 범위와 사업장 전역의 감마선 측정을 위한 휴대성을 고려하였다. 그리고 작업종사자의 피폭 방사선량을 즉시 확인할 수 있는 개인선량당량(personal dose equivalent: H_p(d)) 출력 가능 여부를 고려하였다. 이에 따라 감마선을 직접측정할 수 있고, 휴대가 용이하며, 선량당량 출력이 가능한 Thermo사의 RadEye B20-ER 다목적 서베이미터를 계측장비로 선정하였다. 해당 계측기는 보상형 GM 계측기로서, 17 keV~3 MeV 범위의 감마선 에너지를 측정할 수 있으며, 0~100 mSv h^{-1} 범위의 방사선량률을 측정할 수 있다.

2.2. 정밀금속 주조산업체별 방사선 피폭환경 분석

저어콘과 같은 원료물질에는 천연방사성핵종인 우라늄 계열, 토륨 계열, ^{40}K 등의 핵종이 함유되어 있다. 이에 따라 다량의 원료물질을 취급하는 작업종사자는 원료물질에서 방출되는 방사선에 의한 외부피폭 영향을 받을 개연성이 있으며, 작업종사자의 외부피폭 방사선량은 산업체 내 다수의 공정에서 수행되는 작업별 근무형태와 근무시간 등의 요인에 따라 상이하게 평가된다. 따라서 저어콘 취급 산업체에 종사하는 작업종사자의 피폭 경로를 파악하기 위해서는 해당 사업장의 작업 공정 및 종사자의 근무형태 파악이 선행되어야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 정밀금속 주조산업체 3곳을 평가대상 산업체로 선정하였다. 그리고 산업체별 작업종사자의 방사선 피폭환경을 분석하기 위해 각 산업체에 종사하는 작업종사자와의 인터뷰 및 현장조사를 수행하였다. 이를 통해 각 산업체별 작업 공정, 종사자의 근무형태, 근무시간을 도출하였다.

2.3. 외부피폭 방사선량률 측정

작업종사자의 외부피폭 방사선량을 평가하기 위해 각 산업체 주요공정에서의 외부피폭 방사선량률을 측정하였다. 외부피폭 방사선량률을 측정하기 위해서는 먼저 측정위치를 선정하고, 측정방법론을 수립하여야 한다. 다수의 국제기구 및 국내에서는 명확한 외부피폭 방사선량률 절차가 마련되어 있지 않은 실정이다. 일본의 문부과학성에서는 NORM 취급 산업체의 사업자로 하여금 작업종사자의 안전관리를 위한 '우라늄 또는 토륨을 포함한 원재료, 제품 등의 안전에 관한 가이드라인'을 발간하였다[19]. 본 연구에서는 상기 가이드라인에서 제시하는 측정위치 선정 및 방사선량률 측정방법론을 참조하여 외부피폭 방사선량률 측정을 수행하였다. 상기 가이드라인에 따라 외부피폭 방사선량률의 측정 위치는 방사선 피폭환경 분석 결과를 통해 다수의 종사자가 오랜 시간 근무하는 지점이거나 원료물질 및 공정부산물로부터 종사자가 쉽게 노출될 우려가 있는 지점을 측정 지점으로 선정하였다. 측정 시 종사자의 작업 위치가 정해진 경우에는 작업 위치의 지면으로부터 1 m 높이에서 작업방향을 향하여 측정을 수행하였다. 하지만 작업 위치가 일정하지 않은 경우에는 해당 지역에서 취급하는 물질, 발생하는 공정부산물, 기기 등의 표면과 계측기의 입사면이 수직이 되도록 위치시킨 뒤 1 m 이격된 거리에서 지면으로부터 1 m의 높이로 측정을 수행하였다. 방사선량률은 종사자의 작업 형태를 고려하여 선정된 각 지점당 30초간 측정하였다. 그리고 각 산업체의 측정지점과 산업체 인근 환경과의 방사선량률을 비교하기 위해 각 산업체 인근의 배경준위 방사선량률을 측정하였다. 배경준위 방사선량률 측정은 산업체에서 취급되는 원료물질 및 공정부산물의 영향을 받지 않도록 하기 위해 산업체 부지 인근의 주차장 및 산업체 정문에서 동일한 방식으로 수행하였다.

2.4. 외부피폭 방사선량 평가

정밀금속 주조산업 작업종사자의 외부피폭 방사선량은

앞서 방사선 피폭환경 분석 단계에서 도출한 작업공정별 종사자의 근무형태, 작업시간과 주요공정에서의 외부피폭 방사선량률 측정 결과를 활용하여 평가하였다. 그리고 외부피폭 방사선량 평가 시 작업시간, 방사선량률, 배경준위, 휴게시간을 고려하여 외부피폭 시나리오를 수립하였다. 먼저 작업시간의 경우 작업종사자의 외부피폭 방사선량의 보수성을 위해 산업체별 작업종사자의 작업시간은 휴일을 제외한 연간 250일을 근무하는 것으로 산정하여 평가를 수행하였다. 그리고 외부피폭 방사선량 평가에 활용한 방사선량률은 30초간 측정된 범위 내에서 최대값을 적용하였다. 마지막으로 작업공정 내에서 저어콘 함유물질 취급 작업에 의한 외부피폭 방사선량만을 고려하기 위해 배경준위를 제외한 방사선량률만 고려하였으며, 근무시간 중 휴게시간은 평가에서 제외하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 정밀금속 주조산업 작업종사자의 외부피폭 방사선량 평가를 수행하였다. 이를 위해 먼저 외부피폭 방사선량률을 측정하기 위한 계측장비를 선정하였다. 그리고 방사선 피폭환경 분석을 위해 작업종사자와의 인터뷰 및 현장조사를 수행하여 작업종사자의 방사선피폭이 유의할 것으로 예상되는 지점을 선정하고, 작업공정별 근무인원 및 작업시간에 대해 조사하였다. 그리고 산업체별 주요 작업공정에서 선정된 각 지점에서 방사선량률을 측정하였다. 최종적으로 주요 작업공정별 종사자의 근무형태, 작업시간, 방사선량률을 종합하여 작업종사자의 외부피폭 방사선량 평가를 수행하였다.

3.1. 정밀금속 주조산업체별 방사선 피폭환경

Fig. 1에 정밀금속 주조산업체별 주요공정을 나타내었다. 주조틀 제조산업체 A와 B는 유사한 형태의 작업공정으로 이루어진 것으로 나타났다. 주조틀 제조산업체 A와 B의 주요 작업공정은 코팅공정과 탈사공정으로, 두 공정에서는 작업종사자가 저어콘이 함유된 원료물질 및 공정부산물을 취급하는 형태의 작업이 수행되는 것으로 확인되었다. 코팅지역에서는 작업종사자가 저어콘플라워 및 저어콘샌드를 이용하여 파라핀 형틀을 코팅하는 형태의 작업을 수행하였다. 탈사지역에서는 저어콘플라워 코팅 이후 건조, 파라핀 형틀제거, 소성이 완료된 주조물을 망치 등을 이용하여 분쇄하는 작업과 주조물을 운반하는 작업을 수행하였다. 주조틀 제조산업체 A의 경우 대다수의 작업을 작업종사자가 직접 수행하는 반면, 주조틀 제조산업체 B에서는 대다수의 작업이 자동화 기계를 활용하는 형태로 수행되었다. 도형제 제조산업체 C의 주요 작업공정은 제품 생산 및 포장 공정으로 확인되었다. 해당 공정에서는 저어콘 함유 원료물질의 운반 및 배합, 원료물질 혼합과 가공제품 포장 및 운반 작업을 수행하는 것으로 확인되었다. 그리고 해당 공정 내 모든 작업은 중장비를 활용하여 원격작업의 형태로 수행되는 것으로 확인되었다.

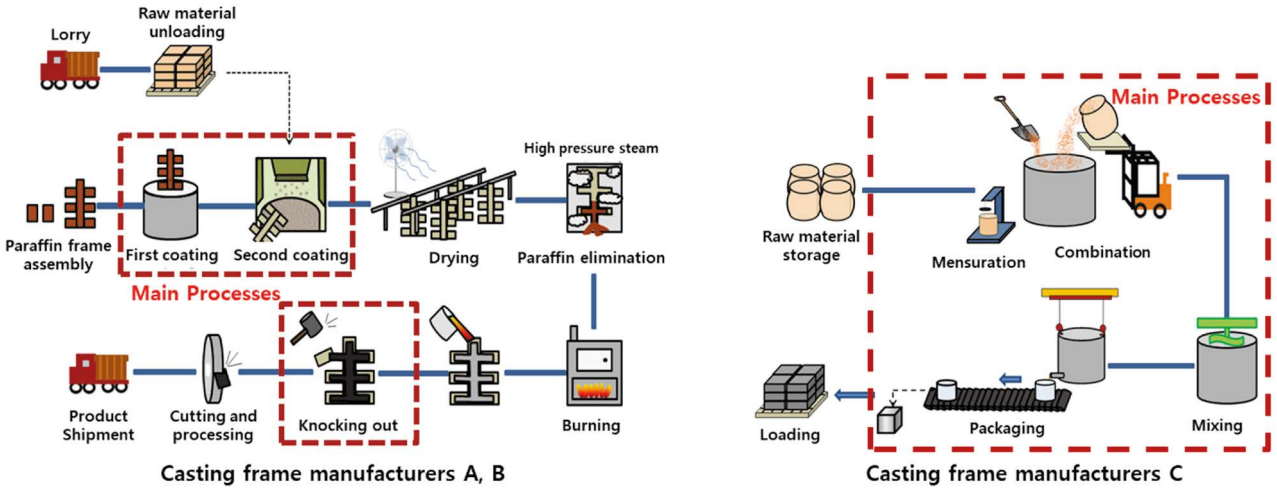

Fig. 1. Main work process of investment casting industry A, B, C.

Table 2. Working time for each major process of investment casting industries

Industry	Process area	Number of workers	Working time (Working frequency)
Casting frame manufacturers A	Coating area	2 workers	– Zircon flour diluent coating (First coating): 30 sec work^{-1} (200 works day^{-1}) – Zircon sand coating (Second coating): 30 sec work^{-1} (200 works day^{-1})
	Knockout area	1 worker	– Small sand formwork knockout: 2 mins work^{-1} (40 works day^{-1}) – Large sand formwork knockout: 2 mins work^{-1} (40 works day^{-1}) – Tree type casting carrying: 2 mins work^{-1} (40 works day^{-1})
Casting frame manufacturers B	Coating area	1 worker	– Zircon flour diluent mixing: 1 hour work^{-1} (1 work 2 days^{-1}) – Paraffin tree type frame carrying: 3 hours day^{-1}
	Knockout area	2 workers	– Sand coating formwork knockout: 30 mins·work^{-1} (5 works day^{-1}) – Molding sand waste disposal: 10 mins work^{-1} (5 works day^{-1}) – Casting carrying: 20 mins work^{-1} (5 works day^{-1})
Facing material manufacturers C	Production and packaging area	2 workers	– Raw material carrying and combination: 40 mins work^{-1} (4 works day^{-1}) – Raw material mixing: 20 mins work^{-1} (4 works day^{-1}) – Packaging and carrying: 30 mins work^{-1} (4 works day^{-1})

Table 2에 정밀금속 주조산업체 작업종사자의 주요공정별 근무인원과 일인당 작업 소요시간을 나타내었다. 주조틀 제조산업체 A의 주요공정인 코팅공정과 탈사공정에서는 각각 2인, 1인의 작업종사자가 근무하는 것으로 확인되었다. 주요공정별 작업시간은 종사자 일인당 코팅공정에서 약 3.3 hours day^{-1}, 탈사공정에서 약 4 hours day^{-1}의 작업시간을 소요하는 것으로 나타났다. 주조틀 제조산업체 B의 주요공정인 코팅공정과 탈사공정에서는 각각 1인, 2인의 작업종사자가 근무하는 것으로 확인되었다. 주요공정별 작업시간은 종사자 일인당 코팅공정에서 약 3.5 hours day^{-1}, 탈사공정에서 약 5 hours day^{-1}의 작업시간을 소요하는 것으로 나타났다. 도형제 제조산업체 C의 주요공정인 제품 생산 및 포장 공정에서는 2인의 작업종사자가 근무하는 것으로 확인되었다. 주요공정에서의 작업시간은 종사자 일인당 제품 생산 및 포장 공정에서 약 6 hours day^{-1}의 작업시간을 소요하는 것으로 확인되었다.

3.2. 작업공정별 외부피폭 방사선량률 측정

Table 3에 정밀금속 주조산업체별 주요공정에서의 외부피폭 방사선량률을 나타내었다. 주조틀 제조산업체 A의 배경준위는 약 0.13~0.15 μSv h^{-1}로 나타났다. 주조틀 제조산업체 A의 주요공정인 1, 2차 코팅공정에서의 외부피폭 방사선량률은 약 0.39~0.68 μSv h^{-1}로, 배경준위에 비해 약 3배~5배 수준인 것으로 나타났다. 이는 1, 2차 코팅공정에서 이루어지는 대다수의 작업이 저어콘 함유물질을 취급하는 형태로 수행되기 때문에 저어콘 함유물질에서 방출되는 감마선에 의해 배경준위보다 상대적으로 높은 방사선량률이 나타난 것으로 판단된다. 탈사공정에서의 외부피폭 방사선량률은 0.17~0.23 μSv h^{-1}로 배경준위와 비슷한 수준인 것으로 나타났다. 이는 코팅 이후 이어지는 건조, 파라핀제거, 소성 공정에서 저어콘 함유물질이 일부 희석되었기 때문에 1, 2차 코팅지역에 비해 비교적 낮은 선량률을 나타낸 것으로 판단된다.

주조틀 제조산업체 B의 경우, 배경준위는 약 0.14~0.17 μSv h^{-1}로 나타났다. 코팅지역의 방사선량률은 0.20~0.80 μSv h^{-1}로 나타났으며, 배경준위의 약 1.5배~5배 수준인 것으로 나타났다. 코팅공정에서는 저어콘 함유물질을 취급하는 형태의 작업이 수행되기 때문에 배경준위에 비해 높은 방사선량률을 나타낸 것으로 판단된다. 탈사지역에서의 외부피폭 방사선량률은 0.17~0.18 μSv h^{-1}로 배경준위와 비슷한 수준으로 나타났다. 이는 코팅 공정 이후 다수의 공정을 통해 저어콘 함유물질이 일부 희석되었기 때문인 것으로 판단된다.

도형제 제조산업체 C의 경우, 배경준위는 약 0.14~0.15 μSv h^{-1}로 나타났다. 주요공정인 제품생산 및 포장구역의 방사선량률의 방사선량률은 0.23~0.40 μSv h^{-1}로 배경준위의 약 1.5배~2.5배가량 차이가 나타났다. 이는 주요공정 내 작업이 중장비를 활용한 원격형태로 수행되기 때문

Table 3. External radiation dose rate in major processes for investment casting industry

Industry	Measurement location		Exposure dose rate ($\mu Sv\ h^{-1}$)
Casting frame manufacturers A	Background exposure dose rate (parking lot)		0.13~0.15
	First, second coating area	Coating area space	0.39~0.42
		Zircon flour diluent mixer (about 150 L)*	0.44~0.47
		Zircon sand coating machine*	0.59~0.62
		Zircon flour and zircon sand (about 600 kg)*	0.64~0.68
	Knockout area	Knockout area space	0.17~0.23
Casting frame manufacturers B	Background exposure dose rate (parking lot)		0.14~0.17
	Coating area	Coating area space	0.20~0.21
		Zircon flour tone bag*	0.53~0.80
		Zircon sand tone bag*	0.40~0.46
		Zircon flour diluent mixer (about 150 L)*	0.32~0.35
		Other raw material coating machine*	0.32~0.33
	Knockout area	Knockout area space	0.17~0.18
Facing material manufacturers C	Background exposure dose rate (manufacturer main gate)		0.14~0.15
	Production and packaging area	Working space for putting in raw materials	0.38~0.40
		Working space for mixing raw materials	0.23~0.25
		Working space for packaging	0.26~0.30

*Exposure dose rate measured 1 m apart from the substance

에 실제 작업위치에서의 방사선량률이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

3.3. 작업자 외부피폭 방사선량 평가

Table 4에 정밀금속 주조산업체별 작업종류에 따른 작업종사자의 외부피폭 방사선량을 나타내었다. 주조틀 제조산업 A에서의 작업종류별 외부피폭 방사선량은 코팅공정 현장근무자, 탈사공정 현장근무자에 대해 각각 약 0.29, 0.06 $mSv\ y^{-1}$로 나타났다. 코팅공정 현장근무자의 연간 외부피폭 방사선량은 탈사공정 현장근무자에 비해 약 5배가량 높게 평가되었다. 이는 코팅공정에서 원료상태의 저어콘 함유물질이 취급되며, 코팅공정에서 탈사공정으로 작업공정이 진행됨에 따라 저어콘 함유물질의 농도가 일부 희석되기 때문에 코팅공정의 선량이 비교적 높게 평가된 것으로 판단된다.

주조틀 제조산업체 B에서의 작업종류별 외부피폭 방사선량은 코팅공정 현장근무자, 탈사공정 현장근무자에 대해 각각 약 0.11, 0.05 $mSv\ y^{-1}$로 나타났다. 코팅공정 현장근무자의 연간 외부피폭 방사선량은 탈사공정 현장근무자에 비해 약 3배가량 높게 평가되었다. 이는 주조틀 제조산업체 A와 마찬가지로 코팅공정에서 탈사공정으로 작업공정이 진행되어 탈사공정 내 저어콘 함유물질의 농도가 희석되기 때문에 코팅공정의 선량이 비교적 높게 평가된 것으로 판단된다.

도형제 제조산업체 C에서의 제품 생산 및 포장 작업종사자의 외부피폭 방사선량은 0.23 $mSv\ y^{-1}$로 나타났다. 해당 산업체에서는 제품 생산에서 포장까지 일련의 과정이 동일한 공간에서 이루어지기 때문에 2명의 작업종사자가 동일한 선량을 받는 것으로 평가되었다.

4. 고 찰

4.1. 정밀금속 주조산업체별 외부피폭 방사선량률 분석

Fig. 2에 정밀금속 주조산업체별 주요공정의 평균 방사선량률을 나타내었다. 산업체별 주요공정의 평균 방사선

Table 4. External radiation dose of workers according to the type of work by investment casting industry

Industry	Types of work	Working time (h y^{-1})	Exposure dose rate (μSv h^{-1})	Annual external dose (mSv y^{-1})
Casting frame manufacturers A	Zircon flour diluent coating	416.7	0.46 (Zircon flour diluent mixer*)	0.29
	Zircon sand coating	416.7	0.61 (Zircon sand coating machine*)	
	Small sand formwork knockout	333.4	0.20 (Knockout area space)	0.06
	Large sand formwork knockout	333.4	0.20 (Knockout area space)	
	Tree type casting carrying	333.4	0.20 (Knockout area space)	
Casting frame manufacturers B	Zircon flour diluent mixing	125	0.34 (Zircon flour diluent mixer*)	0.11
	Paraffin tree type frame carrying	750	0.21 (Coating area space)	
	Sand coating formwork knockout	625	0.18 (Knockout area space)	0.05
	Molding sand waste disposal	208.3	0.18 (Knockout area space)	
	Casting carrying	416.7	0.18 (Knockout area space)	
Facing material manufacturers C	Raw material carrying and combination	666.7	0.39 (Working space for putting in raw materials)	0.23
	Raw material mixing	333.3	0.24 (Working space for mixing raw materials)	
	Packaging and carrying	500	0.28 (Working space for packaging)	

*Exposure dose rate measured 1 m apart from the substance

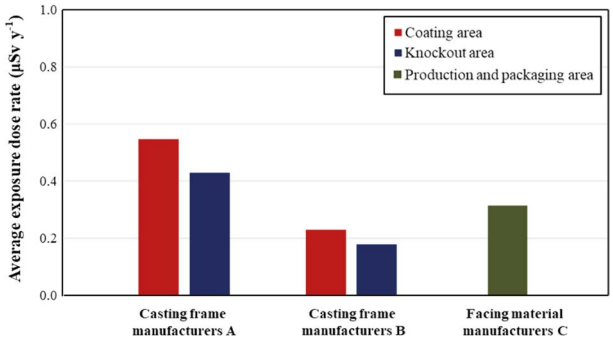

Fig. 2. Average exposure dose rate in main processing area of each investment casting industry.

량률은 주조틀 제조산업체 A, 도형제 제조산업체 C, 주조틀 제조산업체 B 순으로 높게 나타났다. 그리고 산업체별 주요공정의 평균 방사선량률은 모든 주요공정에 대해 0.6 μSv h^{-1} 미만인 것으로 나타났다. 주조틀 제조산업체 A의 경우, 주조틀 제조산업체 B와 비교하여 동일 공정에서 약 2배 이상의 차이가 나타났다. 이는 주조틀 제조산업체 B의 경우 주요공정에서 수행되는 작업이 대부분 자동화 기기를 활용하는 형태로 이루어지는 반면, 주조틀 제조산업체 A의 경우 일부 도수 작업이 수행되는 작업특성이 반영되어 방사선량률이 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다. 도형제 제조산업체 C의 경우 원료물질 배합, 혼합, 제품생산, 포장의 전 과정이 이루어지지만, 주요공정 내 방사선량률은 주조틀 제조산업체 A에 비해 낮게 평가되었다. 도형제 제조산업체 C에서는 다량의 원료물질이 취급되지만, 대다수의 작업이 중장비를 활용하는 원격작업의 형태로 이루어지기 때문에 실제 작업종사자와 취급물질 간 거리가 멀어 작업 위치에서의 방사선량률은 낮게 평가된 것으로 판단된다.

4.2. 정밀금속 주조산업체별 작업종사자의 외부피폭 방사선량 분석

Fig. 3에 정밀금속 주조산업체의 주요공정별 작업종사자의 외부피폭 방사선량을 나타내었다. 정밀금속 주조산업체의 주요공정별 작업종사자의 외부피폭 방사선량은 0.05~0.29 mSv y^{-1}로 상이하게 나타났다. 그리고 작업종사자 일인당 평균 외부피폭 방사선량은 약 0.16 mSv y^{-1}로 나타났다. 주조틀 제조산업체 A의 코팅공정 작업종사자와 도형제 제조산업체 C의 제품생산 및 포장공정 작업종사자가 평균 외부피폭 방사선량 이상의 선량을 받는 것으로 나타났다. 산업체별 작업자의 연간 외부피폭 방사선량은 작업 형태, 연간 작업시간 등의 차이로 인해 상이하게 나타났다. 주조틀 제조산업체 A와 주조틀 제조산업체 B의 코팅공정에서 종사하는 작업종사자는 약 2배가량

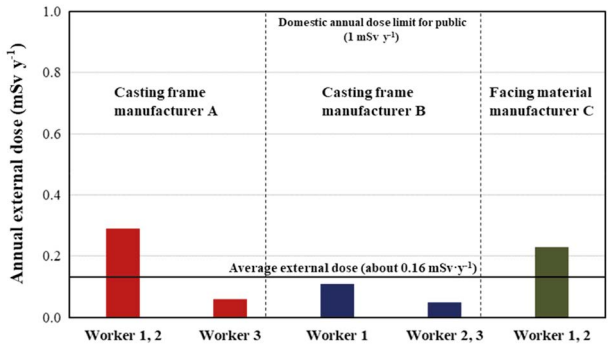

Fig. 3. Annual external dose of each worker by investment casting industry A, B, C.

의 외부피폭 방사선량 차이가 나타났다. 각 산업체의 코팅공정 내에서 작업을 수행하는 시간은 유사하지만, 주조틀 제조산업체 A의 경우, 일부 작업에서 원료물질을 도수로 직접 취급하는 형태로 수행되기 때문에 선량이 비교적 높게 평가된 것으로 판단된다. 그리고 도형제 제조산업체 C의 경우, 주조틀 제조산업체 A, B의 코팅공정에 비해 주요공정의 방사선량률은 낮게 나타났지만, 작업시간이 약 1.5배 이상 높게 나타났기 때문에 선량이 비교적 높게 평가된 것으로 판단된다.

산업체별 작업종사자의 외부피폭 방사선량은 국내 원자력안전법에서 규정하고 있는 일반인 선량한도인 연간 1 mSv를 초과하지 않는 것으로 평가되었다[20]. 그리고 생활주변방사선 안전관리법에서 규정하고 있는 NORM 산업체 작업종사자의 선량한도인 연간 50 mSv를 넘지 않는 범위에서 5년간 누적선량 100 mSv를 초과하지 않는 것으로 평가되었다[21]. 따라서 저어콘 함유물질 취급에 따른 작업종사자의 외부피폭 방사선량 영향은 미미한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구의 목적은 국내 저어콘 취급 산업체 작업종사자의 외부피폭 방사선량 평가를 수행하는 것이다. 이를 위해 국내 3개의 정밀금속 주조산업체를 선정하여 산업체별 방사선 피폭환경을 분석하였다. 그리고 작업종사자의 피폭이 유의할 것으로 예상되는 주요공정에서 방사선량률을 측정하였다. 최종적으로 작업종사자의 근무시간과 주요 공정구역의 방사선량률을 통해 작업종사자의 외부피폭 방사선량 평가를 수행하였다.

주조틀 제조산업체 A, B와 도형제 제조산업체 C의 주요공정별 방사선량률은 0.17~0.80 μSv h^{-1} 범위로 나타났다. 방사선량률은 배경준위와 비슷한 수치부터 배경준위의 약 5배에 해당하는 수준까지 다양한 범위로 나타났다. 주조틀 제조사업장 A, B에서는 저어콘샌드 및 저어콘플라워가 취급되는 1, 2차 코팅구역에서 상대적으로 높은 방사선량률이 나타났으며, 도형제 제조사업장 C의 경우도 저어콘 함유물질을 취급하는 제품 생산 및 포장 구역에서 상대적으로 높은 방사선량률이 나타났다.

저어콘 취급 사업장별 작업종사자의 연간 외부피폭 방사선량은 0.05~0.29 mSv y^{-1}로 나타났다. 사업장별 작업종사자의 연간 외부피폭 방사선량은 작업 중 취급하는 물질, 작업 형태, 작업시간 등의 차이에 기인하여 상이하게 나타났다. 주조틀 제조사업장 A, B에서는 저어콘샌드 및 저어콘플라워 등이 취급되는 1, 2차 코팅구역에서 높은 선량이 평가되었으며, 도형제 제조사업장 C에서는 저어콘 함유 원료물질이 활용되는 제품 생산 및 포장구역에서 가장 높은 선량이 나타났다. 각 산업체별 작업종사자의 외부피폭 방사선량은 국내 원자력안전법에서 규정하고 있는 일반인 선량한도인 연간 1 mSv를 초과하지 않는 것으로 평가되었다.

본 연구에서 평가한 산업체는 국내 저어콘 취급 산업체의 일부이므로, 저어콘 취급 산업체를 포함한 NORM 취급 산업체의 안전관리를 위해서는 추가적인 산업체에 대한 방사선학적 평가가 수행되어야 할 것으로 시사된다. 본 연구에서 수행한 결과는 국내 저어콘 취급 산업체의 방사선학적 특성과 작업종사자의 방사선 피폭 수준을 파악하는 데 활용될 수 있을 것이다. 그리고 향후 NORM 취급 산업체의 안전관리체계 마련을 위한 데이터 기반 구축에 기여할 것으로 판단된다.

사 사

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

참고문헌

1. FPTRPC. 2014. Canadian Guidelines for the Management

of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM).
2. ARPNSA. 2008. Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). Radiation Protection Series No. 15.
3. IAEA 2005. Naturally occurring radioactive materials (NORM IV). IAEA TECDOC 1472.
4. ICRP. 2019. Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industrial Processes. ICRP Publication 142.
5. IAEA. 2002. Monitoring and Surveillance of Residues from the Mining and Milling of Uranium and Thorium. IAEA Safety Report Series No. 27.
6. IAEA. 2003. Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. IAEA Safety Report Series No. 34.
7. IAEA. 2013. Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry. IAEA Safety Report Series No. 78.
8. IAEA. 2006. Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials. IAEA Safety Report Series No. 49.
9. Righi S, Andretta M and Bruzzi L. 2005. Assessment of the radiological impacts of a zircon sand processing plant. *J. Environ. Radioact.* **82**(2):237-250.
10. Ballesteros L, Zarza I, Ortiz J and Serradell V. 2008. Occupational exposure to natural radioactivity in a zircon sand milling plant. *J. Environ. Radioact.* **99**(10):1525-1529.
11. Kuzmanović P, Todorović N, Mrđa D, Nikolov J, Knežević J and Hansman J. 2019. Radiation exposure to zircon minerals in Serbian ceramic industries. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **322**(2):949-960.
12. Smith KP, Blunt DL, Williams GP and Tebes CL. 1996. Radiological Dose Assessment Related to Management of Naturally Occurring Radioactive Materials Generated by the Petroleum Industry. ANL/EAD-2.
13. RPII. 2008. Radiological Assessment of NORM Industries in Ireland: Radiation Dose to Workers and Members of the Public.
14. Haridasan PP, Pillai PMB, Tripathi RM and Puranik VD. 2008. Occupational Radiation Exposure due to NORM in a Rare-Earth Compounds Production Facility. *Radiat. Prot. Dosimetry* **131**(2):217-221.
15. 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.
16. Jang JH, Ji SW, Park JH, Song JY, Kim WJ and Kim KP. 2018. Assessment of Radiation Dose to Workers Resulting from External Exposure to Potassium in NORM industries in Korea. *J. Korean Phys. Soc.* **72**(11):1387-1392.
17. 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.
18. IAEA. 2007. Radiation Protection and NORM Residue Management in the Zircon and Zirconia Industries. IAEA Safety Report Series No. 51.
19. 文部科学省. 2009. ラン又はトリウムを含む原材料、製品等の安全確保に関するガイドライン.
20. 원자력안전위원회. 2021. 원자력안전법 시행령 제133조.
21. 원자력안전위원회. 2021. 생활주변방사선 안전관리법 시행령 제5조의2.