JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(4) : 449-460 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.449

국내 지르콘 취급 산업 종사자 NORM 흡입에 따른 내부피폭 방사선량 평가

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

[1]경희대학교 원자력공학과

Assessment of Internal Dose for Worker due to Inhale NORM in Zircon Industry

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

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoung-Daero, Giheoung-Gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do 17104, Republic of Korea

Abstract Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) is used as a raw material in various industries around the world. The IAEA identify the zircon handling industry as a major NORM handling industry. Since the domestic zircon handling industry handles raw materials in the form of powder, there is a possibility that industrial workers inhale dust containing NORM in the process of performing work. Therefore, as part of the radiological safety assessment for workers in the domestic zircon handling industry, the internal dose due to inhale the NORM must be assessed. The purpose of this study is to assess the internal dose due to inhale the NORM for workers in the domestic zircon handling industry based on the measured particle properties. To achieve the purpose of the study, the major processes of the industry were first selected, and the working environment was investigated to analyze the exposure scenario of worker. In addition, based on the analysis results of major processes and working environments for each industry, the radioactivity concentration of materials and particle properties of dust in major processes were analyzed. Based on the finally analyzed working environment and particle properties, the internal dose for workers in the zircon handling industry was assessed. The internal dose for workers in the refractory, casting frame, and glaze manufacturing industries, which are representative of the zircon industry in Korea, was 1.83×10^{-4}~8.19×10^{-3} mSv y^{-1}. Thorium was found to be the major nuclide with the highest dose contribution in the domestic zircon handling industry. And the main influencing factors of the internal dose due to particle inhalation were derived as radioactivity concentration, particulate concentration, particle size, and working time. The internal dose for workers in each industry was different depending on the type of work, working environment, and handling materials. The internal dose for workers in the domestic zircon handling industry was found to be less than 1 mSv y^{-1}, which is the annual dose limit for the public stipulated by the domestic Nuclear Safety Act. The results of this study are expected to be used as basic data for identifying the exposure status of workers in the domestic NORM handling industry and developing effective safety management measures.

Key words: NORM, Zircon, Particle property, Internal dose, Naturally occurring radionuclide

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 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 6 December 2022 **Revised** 16 December 2022 **Accepted** 21 December 2022

1. 서 론

NORM (Naturally Occurring Radioactive Material)은 ^{238}U, ^{232}Th 붕괴계열 핵종, ^{40}K 등의 천연방사성핵종을 함유하고 있는 물질을 의미한다. 전 세계적으로 NORM은 다양한 분야의 산업원료로 사용되고 있다. 국제원자력기구 (International Atomic Energy Agency; IAEA), 국제방사선방호위원회 (International Commission on Radiological Protection; ICRP), 유럽연합 (European Union; EU) 등 다수의 국제기구에서는 대표적인 NORM 중 하나인 지르콘을 취급하는 산업에 대한 방사선학적 안전관리의 필요성을 강조하며 지르콘 취급 산업을 주요 NORM 취급 산업군으로 분류하고 있다[1-3]. 지르콘은 내화성, 화학적 안정성 등의 특성으로 인해 다수의 산업분야에서 활용되고 있으며 세계적으로 연간 100만 톤 이상 소비되고 있다[4]. 국내의 경우 내화물, 주조틀, 유약 등을 제조하기 위해서 분말형태의 지르콘 함유물질을 원료물질로 사용하고 있다. 지르콘 취급 산업의 대표적인 원료물질인 지르콘샌드 (Zircon sand) 내 함유되어 있는 ^{238}U 계열 핵종의 방사능 농도는 2~4 Bq g^{-1} 수준으로 나타난다[4]. IAEA에서는 일반적인 자연선원에 의한 피폭을 기존피폭으로 규명하고 있다. 하지만 식품, 사료, 음용수 이외의 NORM에 의한 피폭은 해당 물질 내 함유되어 있는 ^{238}U 계열 및 ^{232}Th 계열 핵종에 대해 1 Bq g^{-1}, ^{40}K에 대해 10 Bq g^{-1}의 방사능 농도를 기준으로 계획피폭상황으로 규명하고 방사선학적 안전성평가를 수행할 것을 권고하고 있다[5,6]. 따라서 지르콘을 취급하는 산업의 경우 원료물질에 함유된 천연방사성핵종으로 인해 야기되는 방사선학적 영향에 대한 안전성 평가가 필요하다.

이와 관련하여 국제기구에서는 NORM 취급 산업에 대한 방사선학적 특성 및 피폭현황 등을 파악하기 위해 다수의 연구를 수행하였다. IAEA에서는 지르콘 취급 산업에서 고려해야할 주요 피폭경로, 주요 물질의 방사능 농도, 종사자 및 일반인에 대한 유효선량 평가 결과를 제시하고 있다[4]. 유엔방사선영향과학위원회 (United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation; UNSCEAR)에서는 광석 채광, 석유 및 천연가스 시추 등 다수의 국외 NORM 취급 산업 종사자에 대한 유효선량 평가 결과를 제시하고 있다[7]. 국외에서는 NORM 취급 산업을 대상으로 다수의 피폭방사선량 평가 연구가 수행되었다. Luisa 등은 스페인 지르콘샌드 밀링 (milling) 산업체 종사자에 대한 외부 및 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[8]. Fathabadi 등은 이란에서 지르콘을 원료물질로 취급하는 세라믹 산업 종사자의 외부, 내부, 라돈 피폭방사선량 평가를 수행하였다[9]. Serena 등은 이탈리아 지르콘샌드 및 지르콘플라워 (Zircon flour) 생산 산업 종사자에 대한 유효선량을 평가하였다[10]. Kim 등은 미국 인산염 취급 산업체에서 작업하는 종사자의 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[11]. 국내의 경우, 지승우 등은 국내 인산염 취급 산업 종사자의 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[12]. 박종혁 등은 국내 지르콘 취급 산업 종사자에 대한 외부피폭 방사선량 평가를 수행하였다[13].

국외의 경우 NORM 취급 산업에서 작업하는 종사자의 피폭방사선량 평가에 관한 연구가 다수 수행된 이력이 존재한다. 하지만, 국내에서는 일부 NORM 취급 산업 종사자에 대한 피폭방사선량 평가가 수행되었으나, 지르콘 취급 산업 종사자의 내부피폭 방사선량 평가에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 일반적으로 NORM 취급 산업의 경우 동일한 물질을 취급하더라도 산업체의 규모, 공정, 설비 등이 상이하며, 이에 따른 방사선학적 영향도 상이하게 나타날 것으로 예상된다. 따라서, 국내 산업 특성을 고려한 내부피폭 방사선량 평가가 수행되어야 할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 국내 지르콘 취급 산업 종사자의 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량을 평가하는 것이다. 이를 위해 먼저 현장조사와 설문조사를 기반으로 실제 평가 대상 산업체의 주요 공정 및 작업환경을 분석하였다. 그리고 내부피폭에 영향을 미치는 주요 입자특성을 선정하고 평가 대상 산업체의 실측자료를 기반으로 입자특성을 분석하였다. 최종적으로 IMBA (Integrated Modules for Bioassay Analysis) 전산코드를 활용하여 내부피폭 선량환산인자를 도출하고 이를 기반으로 종사자의 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 주요 공정 선정 및 작업환경 분석

본 연구단계에서는 지르콘 취급 산업 종사자의 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해 주요 공

정을 선정하였고 종사자의 작업환경을 분석하였다. 주요 공정 선정은 평가 대상 산업체별로 세부적인 평가 지점을 선정하기 위한 절차이다. 이는 현장조사를 기반으로 수행하였으며, 종사자의 작업과정에서 분진이 다량 혹은 빈번하게 발생할 개연성이 높은 공정을 평가 지점으로 선정하였다. 작업환경 분석은 주요 공정 내에서 작업하는 종사자의 피폭시나리오를 분석하기 위한 절차이다. 이는 현장조사와 설문조사를 기반으로 수행하였으며, 주요 공정 내 종사자의 수, 교대근무 여부, 근무형태, 작업시간, 마스크 착용 유무 등을 파악하였다.

2.2. 방사능 농도 및 입자특성 분석

본 연구단계에서는 지르콘 취급 산업 종사자의 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해 취급물질의 방사능 농도와 실측한 입자특성을 분석하였다. 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량은 평가 대상 산업체의 정보를 반영한 입자특성 값을 사용하지 않을 경우 실제 피폭량과 상이할 수 있다. 이에 ICRP에서는 정확한 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해서는 실측한 입자특성을 기반으로 내부피폭 방사선량을 평가하여야 한다고 권고하고 있다[14]. 그리고 ICRP에서는 내부피폭에 영향을 미치는 주요 입자특성으로 입자크기 및 분포, 입자밀도, 입자 모양, 흡수형태 등을 제시하고 있다. 본 연구에서는 분석 대상 입자특성으로 입자크기 및 분포, 밀도, 모양을 선정하였고 선원항 평가를 위해 취급물질의 방사능 농도를 분석하였다. 이외에 현실적인 측정이 어려운 핵종별 흡수형태는 ICRP에서 제시하는 기본값을 채택하였다[15].

방사능 농도는 평가 대상 산업체별 주요 공정에서 취급하는 물질을 시료로 채집하여 HPGe (GC 3020, Canberra, USA)를 활용하여 분석하였다. 분석 대상 핵종은 ^{238}U, ^{232}Th 계열 내 천연방사성핵종 중 대표적인 감마방출핵종인 ^{226}Ra과 ^{228}Ra로 선정하였다. 분석 시료는 방사능 농도 분석을 수행하기에 앞서 분쇄, 회화, 냉각 등의 전처리를 수행하였다. 그리고 4주간 밀봉하여 기체상태의 ^{222}Rn 및 ^{220}Rn의 누출을 방지하고 취급물질 내 ^{238}U 및 ^{232}Th 계열 천연방사성핵종들이 방사평형을 이루도록 하였다. IAEA의 기술보고서에 따르면 산업체에서 원료물질로 사용하는 지르콘샌드의 경우 천연방사성핵종 계열이 방사평형을 이루고 있다고 제시된 바 있다[4]. 또한 일부 선행연구에 따르면 보크사이트 내 함유되어 있는 천연방사성핵종 계열이 방사평형을 이루고 있다고 제시한 바 있다[16]. 본 연구의 평가 대상 산업체에서는 지르콘 및 보크사이트 등을 원료물질로 취급하기 때문에 해당 물질 내 포함된 ^{238}U, ^{232}Th 계열 핵종들이 전체붕괴계열에 걸쳐 방사평형을 이루고 있는 것으로 가정하였다. 입자크기 및 분포는 산업체 주요 공정 내에서 종사자가 실제로 작업하는 위치에 다단계입자채집기 (Andersen 1 ACFM Non-viable Ambient Particle Sizing Sampler, Thermo scientific, USA)를 설치하여 입자크기별로 분진을 채집하였다[17]. 이후 미세 중량저울을 통해 입자크기별 중량분포를 분석하여 공기 중 입자농도와 입자크기를 분석하였다. 다단계입자채집기로 채집가능한 분진의 양은 소량이기 때문에 입자크기별 방사능 분석을 수행하여 공기역학적 방사능중간직경 (Activity Median Aerodynamic Diameter; AMAD)을 도출하기에 한계가 있다. 미국 환경보호청 (U.S. Environmental Protection Agency; EPA)에서는 입자가 균일하게 분포할 경우 AMAD를 공기역학적 질량중간직경 (Mass Median Aerodynamic Diameter; MMAD)과 동일하다고 가정할 수 있음을 제시한 바 있다[18]. 본 연구에서는 앞선 주요 공정 및 작업환경 분석을 통해 평가 대상 공정 종사자의 작업반경이 좁고 작업환경이 실내인 것을 확인하였고 해당 분석 결과를 기반으로 종사자의 위치에서의 입자가 균일하게 분포한다고 가정하였다. 최종적으로 입자크기별 중량분포를 통해 MMAD를 산출하였고 이를 AMAD와 같다고 가정하였다[19]. 입자밀도는 평가 대상 산업체별 주요 공정에서 취급하는 물질을 시료로 채집하여 밀도분석기 (AccuPyc 1330, Micromeritics, German)를 통해 분석하였다. 입자모양은 다단계 입자채집기로 채집한 분진을 대상으로 주사전자현미경 (Stereoscan 440, Leica Cambridge, England)을 통해 분석하였다. 그리고 촬영된 입자의 모양을 기반으로 모양인자를 도출하였다.

2.3. 입자 흡입으로 인한 내부피폭 방사선량 평가

본 연구단계에서는 앞서 분석한 주요 공정 및 작업환경, 입자특성 등을 기반으로 지르콘 취급 산업 종사자의 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량을 평가하였다. 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해서는 종사자가 작업과정에서 연간 흡입하는 방사성핵종의 양과 내부피폭 선량환산인자를 도출하여야 한다. 연간 방사성핵종 흡입량은 방사능 농도, 공기 중 입자농도, 호흡률,

작업시간, 마스크의 여과율 등을 고려하여 도출할 수 있다[20]. 방사능 농도는 앞선 단계에서 분석한 공정별 취급물질의 방사능 농도 중 종사자가 흡입하는 분진의 원인이 되는 주요 취급물질의 방사능 농도를 적용하였다. 공기 중 입자농도는 앞서 입자특성 분석 단계에서 도출한 공정별 공기 중 입자농도를 적용하였다. 주요 공정 선정 및 작업환경 분석결과, 국내 지르콘 취급 산업 종사자의 작업형태는 ICRP에서 제시하고 있는 표준 작업자의 작업활동 유형과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 호흡률은 표준 작업자의 호흡률인 1.2 $m^3\ h^{-1}$를 적용하였다. 작업시간은 앞서 작업환경 분석 단계에서 나타난 주요 공정별 종사자의 실제 작업시간을 적용하였다. 그리고 대부분의 종사자가 2급 방진마스크를 착용하는 것으로 확인되어, 입자채집기로 채집한 공기 중 입자농도의 80%가 마스크 내 여과된다고 가정하여 평가를 수행하였다[21].

$$I^p = \sum_i R_i^p \times C^p \times B \times T^p \times FR$$

- I^p = 공정 p 종사자의 연간 방사성핵종 흡입량 (Bq y^{-1})
- R_i^p = 공정 p 취급물질 내 방사성핵종 i의 방사능 농도 (Bq g^{-1})
- C^p = 공정 p의 공기 중 입자농도 (g m^{-3})
- B = 종사자의 호흡률 (1.2 $m^3\ h^{-1}$)
- T^p = 공정 p 종사자의 연간 작업시간 (h y^{-1})
- FR = 2급 방진 마스크의 여과상수 (0.2)

선량환산인자는 IMBA 전산코드를 활용하여 핵종별 내부피폭 선량환산인자를 도출하였다. IMBA 전산코드는 ICRP에서 제시하는 내부피폭 방사선량 평가모델인 인체 호흡기모델, 소화기모델, 생체역학모델 등을 기반으로 내부피폭 방사선량 평가가 가능한 전산코드이다. 본 연구에서는 앞서 분석한 입자특성을 입력인자로 적용하였고, 격실 간 전이율, 흡수분율 등의 인자들은 ICRP에서 제시하는 기본값을 채택하였다[14,15,22]. 최종적으로 연간 방사성핵종 흡입량과 선량환산인자를 고려하여 주요 공정별 종사자의 내부피폭 방사선량을 평가하였다.

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

- D_{inh}^p = 공정 p 종사자의 내부피폭 방사선량 (mSv y^{-1})
- I_i^p = 공정 p 종사자의 연간 방사성핵종 i 흡입량 (Bq y^{-1})
- $DCF_{inh,i}$ = 방사성핵종 i에 대한 내부피폭 선량환산인자 (mSv Bq^{-1})

3. 결 과

본 연구에서는 국내 지르콘 취급 산업 종사자의 입자흡입에 따른 내부피폭 방사선량을 평가하였다. 이를 위해 평가 대상 산업체의 주요 공정과 작업환경을 파악하여 피폭시나리오를 분석하였다. 그리고 주요 공정 내 종사자의 연간 방사성핵종 흡입량을 평가하기 위해 취급물질의 방사능 농도와 공기 중 입자농도를 분석하였다. 그리고 내부피폭 선량환산인자를 도출하기 위하여 실측 기반의 입자크기, 밀도, 모양 등과 같은 입자특성을 분석하였다. 최종적으로, 종사자의 피폭환경, 연간 방사성핵종 흡입량, 내부피폭 선량환산인자를 종합적으로 고려하여 종사자의 내부피폭 방사선량을 평가하였다.

3.1. 주요 공정 선정 및 작업환경 분석

Table 1에 지르콘 취급 산업체별 주요 공정 및 종사자의 작업환경을 나타내었다. 내화물 제조 산업체 (Refractory manufacturing industry)의 주요 공정은 (1) 투입공정 (Input process), (2) 제품 배합공정 (Mixing process), (3) 포장공정 (Packaging process), (4) 성형공정 (Molding process)으로 확인되었다. 투입공정에서 종사자는 호이스트 크레인을 사용하여 보크사이트 (Bauxite)가 저장된 톤백 (ton bag) 용기를 운반하고 용기의 하부를 절개하여 보크사이트를 호퍼 (hopper)에 투입하는 작업을 수행하였다. 해당 작업에서는 호퍼의 하부와 연결된 레인 (lane)을 통해 물질이 투입되는 과정에서 분진이 발생하는 것으로 확인되었다. 제품 배합공정은 보크사이트 제품 배합공정과 지르콘 제품 배합공정으로 구분된다. 보크사이트 제품 배합공정에서 종사자는 자동화 설비 내에 투입된 물질에 접착액 및 수분을 첨가하는 작업을 수행하였다. 지르콘 제품 배합공정에서 종사자는 지르콘 원료물질 칭량, 배합기 투입, 비닐 밀봉 등의 작업을 수행하는 것으로 확인되었다. 해당 작업 중 배합기에 지르콘 원료물질을 투입 과정에서 다량의 분진이 발생하는 것으로 확인되었다. 포장공정에서 종사자는 보크사이트 부정형제품 (Monolithic product)을 포장용기 내 밀봉하는 작업을 수행하였다. 포장공정은 실내에 위치하고 있었으며 포장용기 내 물질이 투입되고 포장용기를 탈부착하는 과정에서 다량의 분진이 발생하는 것으로 확인되었다. 성형공정에서 종사자는 지르콘 혼합물질을 수동으로 칭량하고 직접 성형틀에 투입하는 작업을 수행하였다. 해당 공정에서는 성형 작업 중

Table 1. Main processes and working environments of the zircon handling industry

Industry	Main process	Number of workers	Work type	Working time ($h\ y^{-1}$)
Refractory	Input process	1	Putting Bauxite into the hopper	1,667
	Bauxite mixing process	1	Addition of adhesive liquid and moisture Putting raw material into the kneader	1,500
	Zircon mixing process	1	Zircon weighing Putting zircon into the kneader	1,667
	Packaging process	1	Monolithic product packaging (1 ton, 25 kg)	2,000
	Molding process	1	Zircon product molding	1,667
Casting frame	Coating process	2	Zircon flour diluent coating (First coating) Zircon sand coating (Second coating)	833
	Knockout process	1	Small sand mold crushing Large sand mold crushing Tree-shaped castings transport	1,000
Glaze	Input process	1 (3 shifts)	Feeding raw materials into the hopper	831
	Mixing process		Raw material mixing Mixture discharge Mixture transport	831
	Product A packaging process	3	Product input Product weighing	1,917
			Product discharge and packaging (1 ton, 25 kg) Product transport	1,864
	Product B packaging process	2	Product packaging Zircon silicate hopper input	1,542

에 분진이 발생하는 것으로 확인되었다.

주조틀 제조산업체 (Casting frame manufacturing industry)의 주요 공정은 (1) 코팅공정 (Coating process), (2) 탈사공정 (Knockout process)으로 확인되었다. 코팅공정에서 종사자는 지르콘플라워와 지르콘샌드를 파라핀 형틀의 표면에 입히는 작업을 수행하였다. 해당 공정에서는 코팅기 내부에서 순회되는 지르콘샌드가 외부로 방출되어 일정량의 분진이 발생하는 것으로 확인되었다. 탈사공정은 주물사 내에 투입된 금속의 냉각이 완료된 후, 주물사를 분쇄하는 작업이 수행되는 공정이다. 탈사공정에서 종사자는 금속 주조 및 냉각이 완료된 트리형 주조물을 탈사지역으로 운반한 뒤, 망치나 탈사기 등의 장비를 사용하여 분쇄하는 작업을 수행하였다. 해당 공정에서는 망치나 탈사기를 사용하여 분쇄를 수행하는 과정에서 분진이 발생하는 것으로 확인되었다.

유약 제조 산업체 (Glaze manufacturing industry)에서는 지르콘플라워 및 지르콘 실리케이트 (Zircon silicate)를 원료물질로 취급하였다. 유약 제조 산업체의 주요 공정은 (1) 투입공정 (Input process), (2) 혼합공정 (Mixing process), (3) 제품 A 포장공정 (Product A packaging process), (4) 제품 B 포장공정 (Product B packaging process)으로 확인되었다. 투입공정에서 종사자는 호이스트 크레인을 이용하여 지르콘플라워 및 기타 원료물질을 사일로에 투입하는 작업을 수행하였다. 혼합공정에서 종사자는 투입공

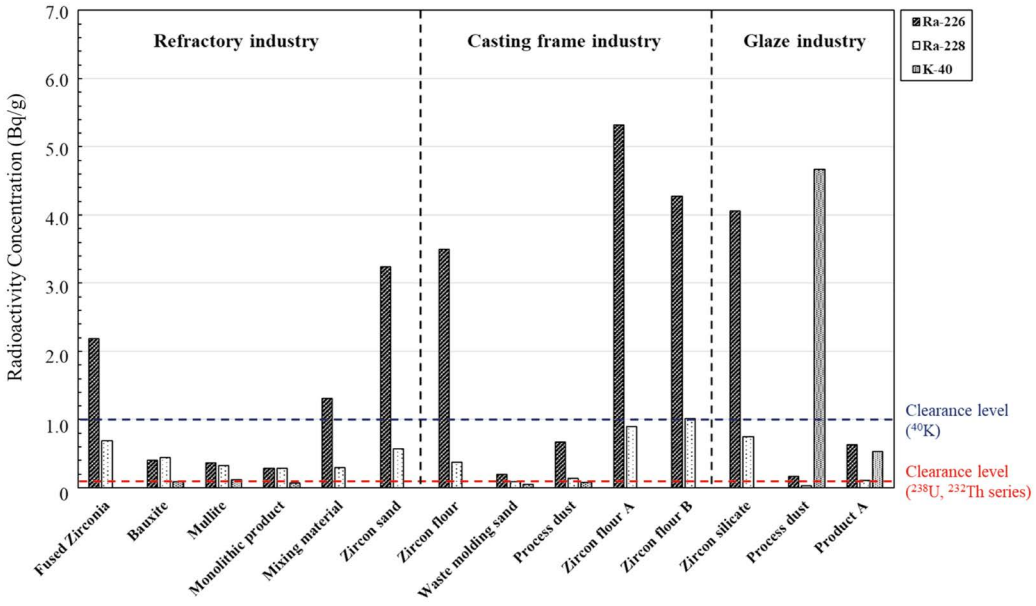

Fig. 1. Radioactivity concentration of handled material for zircon industry.

정 이후 자동화 장비로 배합된 물질을 혼합기를 가동하여 혼합시키는 작업을 수행하였다. 투입공정과 혼합공정은 같은 지역 내에 존재하였으며, 원료물질 투입, 혼합, 혼합물질 배출 과정에서 분진이 발생하는 것으로 확인되었다. 제품 A 포장공정은 투입 및 칭량공정과 포장 및 운반공정으로 구분된다. 투입 및 칭량공정에서 종사자는 제조가 완료된 제품을 칭량하는 작업과, 포장기를 사용하여 제품을 포장하는 작업을 수행하였다. 포장 및 운반공정에서 종사자는 1 톤 및 25 kg 단위로 제품을 칭량하고 톤백용기와 지대포장용기에 투입하여 밀봉하는 작업을 수행하였다. 제품 A 포장공정에서는 투입 및 포장 작업이 수행되는 과정에서 분진이 발생하는 것으로 확인되었다. 제품 B 포장공정은 제품 A에 지르콘 실리케이트를 투입하여 제품 B를 생산하는 공정이다. 제품 B 포장공정에서 종사자는 호이스트 크레인을 이용하여 제품 A에 지르콘 실리케이트를 투입하는 작업과 투입 후 밀봉하여 운반하는 작업을 수행하였다. 그리고 해당 공정에서는 지르콘 실리케이트 투입하는 작업과 제조된 제품을 포장하는 작업에서 일정량의 분진이 발생하는 것으로 확인되었다.

3.2. 방사능 농도 및 입자특성 분석

Fig. 1에 지르콘 취급 산업체별 취급물질의 방사능 농도를 나타내었다. 내화물 제조산업체에서 취급하는 물질은 지르콘 계열과 알루미나 계열로 구분된다. 지르콘 계열과 알루미나 계열은 부정형, 정형 내화물 제조에 사용된다. 내화물 제조산업체 내 취급물질의 방사능 농도는 용융 지르코니아(Fused zirconia) 내 함유되어 있는 ^{226}Ra에 대해 2.18 Bq g^{-1}로 가장 높게 나타났다. 지르콘제품 제조에서는 지르콘 계열의 원료물질이 최대 95%까지 투입되어 혼합된 소성노즐용 혼련원료(Mixing material)가 사용된다. 해당물질 내 함유되어 있는 ^{226}Ra, ^{228}Ra의 방사능 농도는 부정형제품 제조에 사용되는 알루미나 계열의 원료물질인 보크사이트, 뮬라이트(Mullite)에 비해 1.0~4.6배 정도 높게 나타났다. 주조틀 제조산업체 내 취급물질의 방사능 농도는 지르콘플라워 내 함유되어 있는 ^{226}Ra에 대해 3.50 Bq g^{-1}으로 가장 높게 나타났다. 해당 산업체에서 공정부산물로 발생하는 폐주물사(Waste molding sand)는 코팅작업에서 사용되는 기타 원료물질과 희석되어 ^{226}Ra, ^{228}Ra의 방사능 농도가 지르콘 계열 원료물질에 비해 4.2~17.4배 정도 낮게 나타났다. 유약 제조산업체 내 취급물질의 방사능 농도는 지르콘플라워 A에 함유되어 있는 ^{226}Ra에 대해 5.32 Bq g^{-1}으로 가장 높게 나타났다. 지르콘계열의 원료물질의 방사능 농도는 원산지에 따라 상이하게 나타났으며, 제품 A 내 함유된 ^{226}Ra, ^{228}Ra의 방사능 농도는 기타 원료물질과 희석되어 지르콘 원료물질의 방사능 농도에 비해 6.4~9.4배 정도 낮은 수준으로 나타났다.

Figs. 2, 3에 지르콘 취급 산업체의 주요 공정별 공기 중 입자농도 및 크기분포를 나타내었다. 내화물 제조산업체

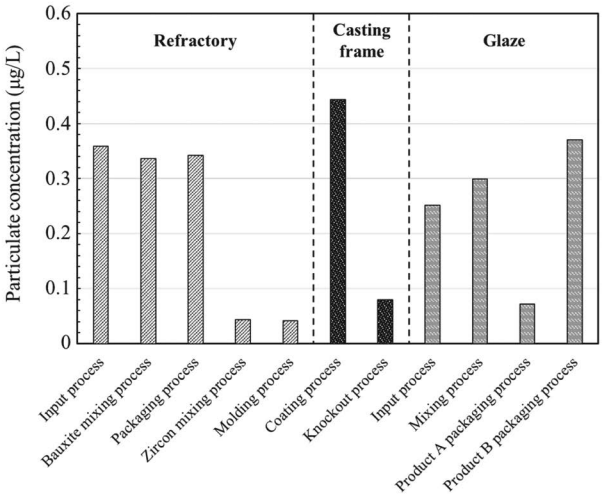

Fig. 2. Particulate concentration of main process for zircon industry.

의 공기 중 입자농도는 주요 공정에 따라 0.042~0.36 μg L^{-1} 범위로 나타났고, MMAD는 1.04~6.92 μm 범위로 나타났다. 공기 중 입자농도는 (1) 투입공정, (2) 포장공정, (3) 보크사이트 제품 배합공정, (4) 지르콘 제품 배합공정, (5) 성형공정 순서로 높게 나타났다. 주조틀 제조산업체의 공기 중 입자농도는 주요 공정에 따라 0.080~0.44 μg L^{-1} 범위로 나타났고, MMAD는 4.3~4.9 μm 범위로 나타났다. 공기 중 입자농도는 (1) 코팅공정, (2) 탈사공정 순서로 크게 나타났다. 유약 제조산업체의 공기 중 입자농도는 주요 공정에 따라 0.072~0.37 μg L^{-1} 범위로 나타났고, MMAD는 1.92~8.80 μm 범위로 나타났다. 공기 중 입자농도는 (1) 제품 B 포장공정, (2) 혼합공정, (3) 투입공정, (4) 제품 A 포장공정 순서로 높게 나타났다.

Table 2에 산업체별 취급물질의 입자밀도를 나타내

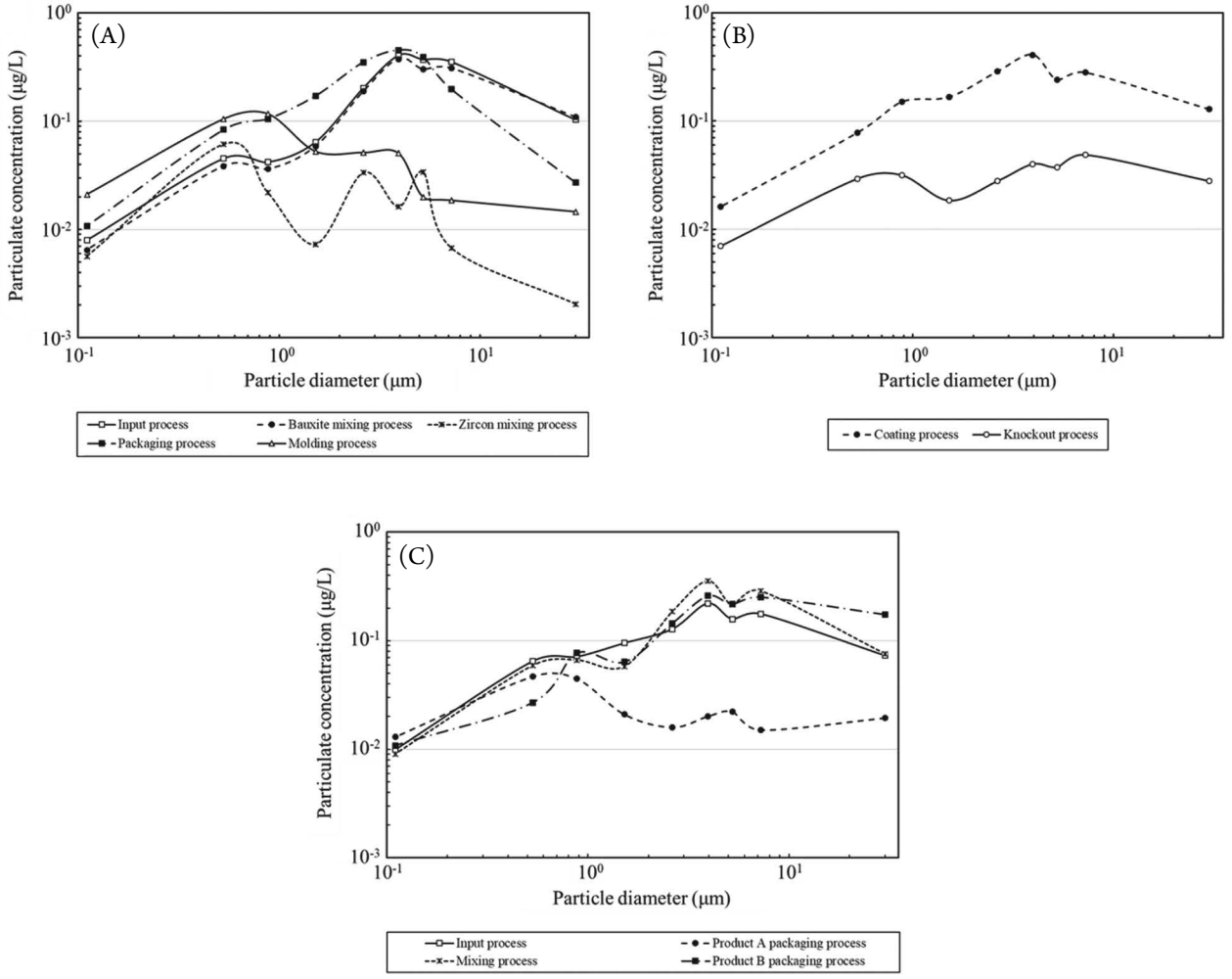

Fig. 3. Particle size distribution of main process for zircon industry (A: Refractory , B: Casting frame, C: Glaze).

Table 2. Density of material handled in the zircon industry

Industry	Sample	Density (g cm^{-3})
Refractory	Fused zirconia	5.8
	Bauxite	3.7
	Mullite	2.9
	Monolithic product	3.4
	Mixing material	5.4
Casting frame	Zircon sand	4.7
	Zircon flour	4.7
	Waste molding sand	2.7
	Process dust	2.9
Glaze	Zircon flour A	4.5
	Zircon flour B	4.7
	Zircon silicate	4.6
	Process dust	2.7
	Product A	2.6

었다. 내화물 제조산업체에서 취급하는 물질의 밀도는 2.9~5.8 g cm^{-3}으로 나타났다. 그중 부정형 제품의 밀도는 보크사이트 및 뮬라이트 등과 같은 알루미나 계열 원료물질의 평균밀도인 3.3 g cm^{-3}과 유사하게 나타났으며, 정형 제품인 소성노즐용 혼련원료의 밀도는 지르콘 계열 원료물질의 밀도인 5.8 g cm^{-3}과 유사하게 나타났다. 주조틀 제조산업체에서 취급하는 물질의 밀도는 2.7~4.7 g cm^{-3}으로 나타났다. 지르콘플라워는 지르콘샌드를 분쇄하여 제조한 원료물질로, 동일한 성분을 포함하고 있기 때문에 밀도가 유사하게 나타났다. 공정분진(Process dust)은 지르콘 계열 원료물질 이외의 기타 원료물질이 혼합되기 때문에 상대적으로 낮은 밀도가 나타났다. 유약 제조 산업체에서 취급하는 물질의 밀도는 2.6~4.7 g cm^{-3}으로 나타났다. 제품 A의 밀도는 원료물질인 지르콘플라워에 비해 55~57% 수준으로 나타났다. 제품 A의 성분은 지르콘 계열 원료물질에 비해 상대적으로 밀도가 낮은 규소, 마그네슘, 붕소 등으로 구성되어 있기 때문에, 제품 A의 밀도가 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다. 그리고 선행연구에 따르면, 지르콘 및 보크사이트 계열 물질의 밀도는 각각 약 4.7, 2.6 g cm^{-3} 수준으로 제시된 바 있으며 해당 물질의 밀도는 본 연구에서 분석한 지르콘 및 보크사이트 계열 물질의 밀도와 유사한 것으로 나타났다[4,23]. Fig. 4에 주조틀 제조산업체의 코팅공정 내 입자채집기 단계별 입자모양을 나타내었다. 산업체별 입자모양은 내화물 제조산업체, 주조틀 제조산업체, 유약 제조산업체에서 공통적으로 구형에 가깝게 나타났다. 따라서 각 산업체별 모양인자는 공통적으로 1로 도출되었다.

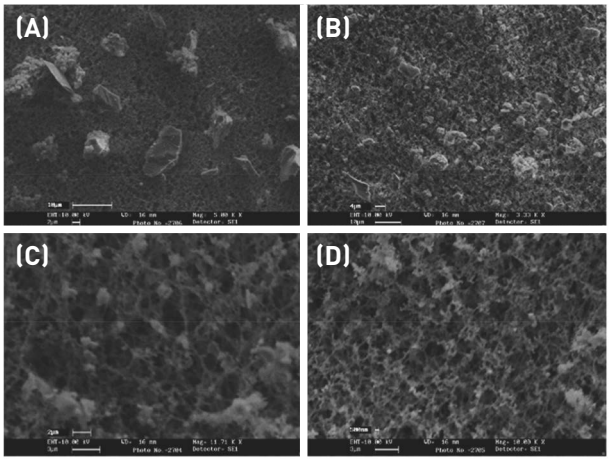

Fig. 4. Shape of airborne particulates by stage collected at coating process in casting frame industry (A: 0th stage, B: 3th stage, C: 5th stage, D: 7th stage).

3.3. 종사자 내부피폭 방사선량 평가

Table 3에 산업체별 주요 공정 종사자의 연간 방사성핵종 흡입량을 나타내었다. 내화물 제조산업체 주요 공정 종사자의 연간 방사성핵종 흡입량은 투입공정에서 ^{232}Th 계열 핵종에 대해 가장 높게 나타났다. 해당 공정에서 종사자는 보크사이트를 취급하는 과정에서 ^{232}Th 계열 핵종에 대해서 6.32×10^{-2} Bq y^{-1}를 흡입하는 것으로 나타났다. 주조틀 제조산업체 주요 공정별 종사자의 연간 방사성핵종 흡입량은 코팅공정에서 ^{238}U 계열 핵종에 대해 가장 높게 나타났다. 해당 공정에서 종사자는 지르콘샌드와 지르콘플라워를 취급하는 과정에서 ^{238}U 계열 핵종에 대해 각각 1.44×10^{-1}, 1.55×10^{-1} Bq y^{-1}를 흡입하는 것으로 나타났다. 유약 제조산업체 주요 공정별 종사자의 연간 방사성핵종 흡입량은 투입공정에서 ^{40}K에 대해 가장 높게 나타났다. 해당 공정에서 종사자는 공정 분진에 함유되어 있는 ^{40}K 계열 핵종에 대해 2.79×10^{-1} Bq y^{-1}를 흡입하는 것으로 나타났다.

Table 4에 지르콘 취급 산업 주요 공정별 종사자의 내부피폭 방사선량을 나타내었다. 내화물 제조산업체 종사자의 내부피폭 방사선량은 1.52×10^{-3}~4.08×10^{-3} mSv y^{-1}로 나타났다. 내화물 제조산업체 종사자의 내부피폭 방사선량은 (1) 투입공정, (2) 포장공정, (3) 보크사이트 제품

Table 3. Annual intake through inhalation of worker of main process in each zircon industries

Industry	Worker	Material	Annual intake (Bq y^{-1})		
			^{238}U series	^{232}Th series	^{40}K
Refractory	Input process worker	Bauxite	5.79×10^{-2}	6.32×10^{-2}	1.24×10^{-2}
	Bauxite mixing process worker	Monolithic product	3.41×10^{-2}	3.47×10^{-2}	7.77×10^{-3}
	Zircon mixing process worker	Mixing material	2.71×10^{-2}	6.13×10^{-2}	–[a]
	Packaging process worker	Monolithic product	3.86×10^{-2}	3.92×10^{-2}	8.79×10^{-3}
	Molding process worker	Mixing material	2.17×10^{-2}	4.91×10^{-3}	–[a]
Casting frame	Coating process worker	Zircon sand	1.44×10^{-1}	2.53×10^{-2}	–[a]
		Zircon flour	1.55×10^{-1}	1.67×10^{-2}	–[a]
	Knockout process worker	Waste molding sand	3.86×10^{-3}	1.70×10^{-3}	9.12×10^{-4}
Glaze	Input process worker	Zircon flour	2.67×10^{-1}	4.48×10^{-2}	–[a]
	Mixing process worker	Process dust	1.00×10^{-2}	1.86×10^{-3}	2.79×10^{-1}
	Input and weighing process worker	Product A	2.09×10^{-2}	3.57×10^{-3}	1.76×10^{-2}
	Packaging and transport process worker	Product A	2.03×10^{-2}	3.48×10^{-3}	1.71×10^{-2}
	Product B packaging worker	Product A	7.96×10^{-2}	1.36×10^{-2}	6.71×10^{-2}
		Zircon silicate	4.45×10^{-2}	8.25×10^{-3}	–[a]

a): Radioactivity concentration is no detected in handled material

Table 4. Internal dose due to inhale NORM for zircon industry

Industry	Worker	Internal dose (mSv y^{-1})
Refractory	Input process worker	4.08×10^{-3}
	Bauxite product mixing process worker	2.30×10^{-3}
	Zircon product mixing process worker	1.84×10^{-3}
	Packaging process worker	3.79×10^{-3}
	Zircon product molding process worker	1.52×10^{-3}
Casting frame	Coating process worker	8.19×10^{-3}
	Knockout process worker	1.83×10^{-4}
Glaze	Input process worker	7.86×10^{-3}
	Mixing process worker	2.62×10^{-4}
	Input and weighing process worker	9.52×10^{-4}
	Packaging and transport process worker	9.26×10^{-4}
	Product B packaging worker	2.55×10^{-3}

배합공정, (4) 지르콘 제품 배합공정, (5) 성형공정 순서로 크게 나타났다. 내화물 제조산업체에서는 알루미나 계열 물질을 취급하는 종사자의 내부피폭 방사선량이 지르콘 계열 물질을 취급하는 종사자에 비해 높게 나타났다. 지르콘 계열 물질의 방사능 농도는 알루미나 계열 물질에 비해 높으나, 지르콘 계열 물질을 취급하는 공정에서 발생하는 분진의 농도가 미미하기 때문에 내부피폭 방사선량이 상대적으로 작게 나타났다. 주조틀 제조산업체 종사자의 내부피폭 방사선량은 $1.83 \times 10^{-4} \sim 8.19 \times 10^{-3}$ mSv y^{-1}로 나타났으며, (1) 코팅공정, (2) 탈사공정 순서로 크게 나타

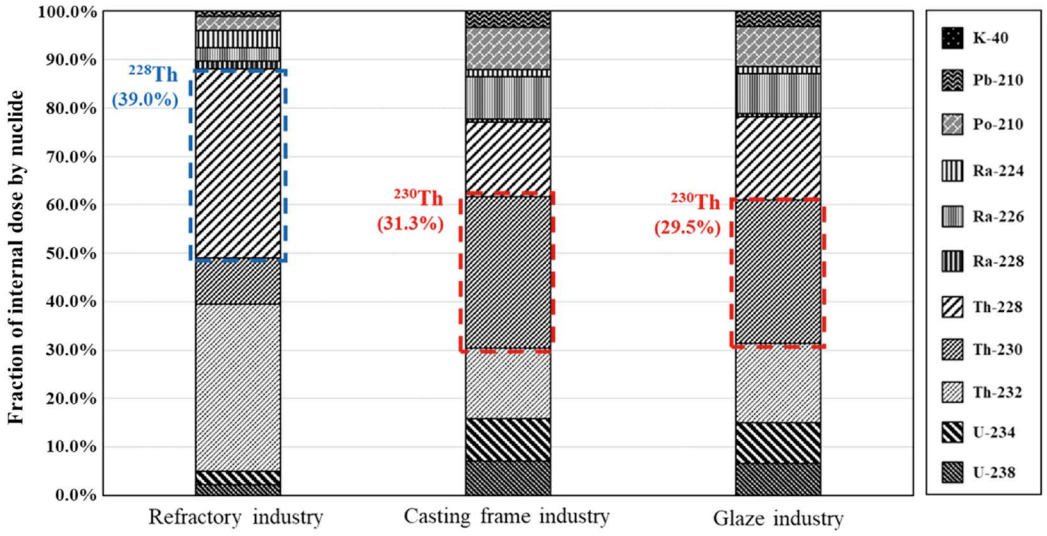

Fig. 5. Fraction of internal dose by radionuclide in zircon industry.

났다. 코팅공정 종사자의 내부피폭 방사선량은 취급하는 물질의 방사능 농도의 영향으로 탈사공정 종사자에 비해 약 4배 정도 높게 나타났다. 유약 제조 산업체 종사자의 내부피폭 방사선량은 2.62×10^{-4}~7.86×10^{-3} mSv y^{-1}로 나타났다. 유약 제조산업체 종사자의 내부피폭 방사선량은 (1) 투입공정, (2) 제품 B 포장공정, (3) 제품 투입 및 칭량공정, (4) 제품 포장 및 운반공정, (5) 혼합공정에서 순서로 크게 나타났다. 투입공정 종사자의 내부피폭 방사선량은 취급물질의 방사능 농도의 영향으로 타 공정에 비해 3.1~30.0배 정도 높게 나타났다.

4. 고 찰

본 연구에서는 주요 공정에서 취급하는 물질 내 함유되어 있는 ^{238}U, ^{232}Th 계열 핵종과 ^{40}K을 평가 대상 핵종으로 선정하여 내부피폭 방사선량을 평가하였다. 국내 지르콘 취급 산업 종사자의 입자흡입에 따른 내부피폭 방사선량은 1.83×10^{-4}~8.19×10^{-3} mSv y^{-1}로 나타났다. 내부피폭 방사선량 핵종별 기여분율은 취급물질 내 핵종별 방사능 농도, 핵종특성 등에 따라 상이하게 나타난다. 그리고 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량은 입자특성, 방사능 농도, 작업형태 등 다양한 인자에 대한 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 국내 지르콘 취급 산업체별로 가장 높은 선량이 나타난 공정들을 대상으로 내부피폭 방사선량에 대한 핵종별 선량기여분율을 분석하여 국내 지르콘 취급 산업 내 주요 핵종을 도출하였다. 그리고 평가 대상 산업체에서 나타나는 내부피폭 방사선량을 비교 분석하여 종사자의 내부피폭 방사선량에 지배적인 영향을 끼치는 주요 인자를 도출하였다.

4.1. 지르콘 취급 산업 핵종별 내부피폭 방사선량 기여분율 분석

Fig. 5에 지르콘 취급 산업별 내부피폭 방사선량에 대한 핵종별 선량기여분율을 나타내었다. 내화물 제조산업체 내부피폭 방사선량에 대한 핵종별 선량기여분율은 ^{228}Th (39.0%), ^{232}Th (34.4%), ^{230}Th (9.6%), 그 외 핵종 (17.0%) 순서로 높게 나타났다. 주조틀 제조산업체 내부피폭 방사선량에 대한 핵종별 선량기여분율은 ^{230}Th (31.3%), ^{228}Th (15.4%), ^{232}Th (14.6%), 그 외 핵종 (38.8%) 순서로 높게 나타났다. 유약 제조산업체 내부피폭 방사선량에 대한 핵종별 선량기여분율은 ^{230}Th (29.5%), ^{228}Th (17.2%), ^{232}Th (16.5%), 그 외 핵종 (36.7%) 순서로 높게 나타났다. 내화물 제조산업체의 경우 ^{232}Th 계열 내 ^{228}Th 핵종이 가장 기여율이 높은 핵종으로 나타난 것에 반해, 주조틀 제조산업체와 유약 제조산업체에서는 ^{238}U 계열 내 토륨 핵종인 ^{230}Th이 가장 기여율이 높은 핵종으로 나타났다. 이는 내화물 제조산업체에서 취급하는 물질 내 함유되어 있는 ^{238}U 계열 핵종과 ^{232}Th 계열 핵종의 방사능 농도가 유사하게 나타난 반면, 주조틀 제조산업체와 유약 제조산업체에

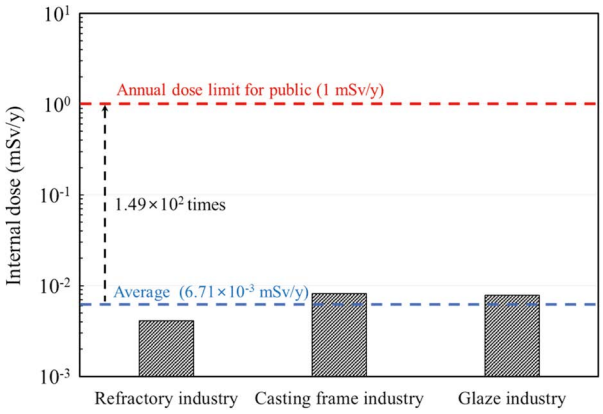

Fig. 6. Internal dose of worker by zircon industry.

서는 ^{238}U 계열 핵종의 방사능 농도가 ^{232}Th 계열 핵종의 방사능 농도에 비해 각각 5.7~9.3배, 5.9배 정도 높게 나타났기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 모든 산업체에서 내부피폭 방사선량에 기여하는 주요 핵종은 토륨인 것으로 나타났다. 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량은 폐에 대한 선량이 대부분을 차지한다[24]. 따라서 폐 선량에 대한 선량환산인자를 핵종별로 비교한 결과, 토륨 핵종의 선량환산인자가 타 핵종에 비해 2.0~68.0배 수준으로 높게 나타났기 때문에 내부피폭 선량기여가 주요한 핵종으로 도출된 것으로 판단된다.

4.2. 지르콘 취급 산업별 내부피폭 방사선량 비교 분석

Fig. 6에 지르콘 취급 산업별 최대 내부피폭 방사선량을 나타내었다. 지르콘 취급 산업별 내부피폭 방사선량은 4.08×10^{-3}~8.19×10^{-3} mSv y^{-1}으로 나타났으며, (1) 주조틀 제조산업체, (2) 유약 제조산업체, (3) 내화물 제조산업체 순서로 높게 평가되었다. 주조틀 제조 산업체 종사자의 경우 타 산업체 종사자에 비해 작업시간이 약 2배가량 짧은 것으로 나타났다. 하지만, 해당 산업체 내 공기 중 입자농도가 상대적으로 높게 나타났기 때문에 내부피폭 방사선량이 가장 높게 평가된 것으로 판단된다. 유약 제조산업체의 경우, 타 산업체에 비해 공기 중 입자농도와 연간작업시간이 비교적 낮게 나타났다. 하지만 취급물질의 방사능 농도가 타 산업체에 비해 ^{238}U 계열 핵종에 대해 1.5~13.2배가량 높게 나타났으며 ^{232}Th 계열 핵종의 경우 1.3~2.4배가량 높게 나타났다. 그리고 입자특성들 중 밀도, 모양 등은 산업체별로 유사하게 나타났으나, MMAD가 타 산업체에 비해 약 0.8배 정도로 낮게 나타났기 때문에 상대적으로 높은 내부피폭 선량환산인자가 도출되어 선량이 비교적 높게 평가된 것으로 판단된다. 즉, 유약 제조산업체는 방사능 농도와 입자 크기의 영향으로 인해 선량이 비교적 높게 평가된 것으로 판단된다. 지르콘 취급 산업 종사자의 내부피폭 방사선량은 방사능 농도, 공기 중 입자농도, 작업시간, 입자크기와 같은 주요 인자의 영향을 받는 것으로 나타났다. 해당 영향인자는 종사자의 작업형태, 작업설비, 작업공정 등의 산업특성과 취급물질 형태, 원산지와 같은 물질특성에 따라 상이하게 나타난 것으로 판단된다. 하지만 지르콘 취급 산업 종사자의 내부피폭 방사선량은 원자력안전법에서 규정하고 있는 일반인에 대한 연간 선량한도인 1 mSv y^{-1} 미만으로 나타나, 종사자에 대한 방사선학적 영향은 미미할 것으로 판단된다[25].

5. 결 론

본 연구에서는 실측한 입자특성을 기반으로 지르콘 취급 산업 종사자의 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량을 평가하였다. 이를 위하여 첫 번째, 평가 대상 산업체의 주요 공정을 선정하고 주요 공정에서 근무하는 종사자의 작업환경을 분석하였다. 두 번째, 정확한 내부피폭 방사선량 평가를 위하여 취급물질의 방사능 농도와 실측한 입자특성을 분석하였다. 세 번째, 종사자의 연간 방사성핵종 흡입량을 산출하였고, IMBA 전산코드를 사용하여 도출한 내부피폭 선량환산인자를 통해 입자 흡입으로 인한 내부피폭 방사선량을 평가하였다.

지르콘 취급 산업 종사자의 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량은 1.83×10^{-4}~8.19×10^{-3} mSv y^{-1}로 나타났다. 내화물 제조산업체에서는 원료물질 투입과정에서 발생한 다량의 분진의 영향으로 투입공정에서 내부피폭 방사선량이 가장 높게 나타났다. 주조틀 제조산업체에서는 코팅기 내부에서 유출된 분진과 취급물질의 방사능 농도의 영향으로 코팅공정에서 내부피폭 방사선량이 가장 높게 나타났다. 유약 제조산업체에서는 토출구에 포장용기를 연결하여 포장하는 과정속에서 발생한 다량의 분진의 영향으로 포장공정에서 내부피폭 방사선량이 가장 높게 나타났다. 내부피폭 방사선량에 가장 기여율이 높은 핵종은 토륨인 것으로 나타났으며 입자흡입으로 인한 내부피폭 방사선량은 취급물질의 방사능 농도, 공기 중 입자농도, 작업시간, 입자크기 등의 인자에 의해 크게 영향을 받

는 것으로 나타났다. 그리고 해당 영향인자들은 산업체별 작업형태, 작업설비, 작업공정 등의 산업특성과 취급물질의 원산지 등과 같은 물질특성에 따라 상이하게 나타났다. 본 연구에서 평가한 산업체별 내부피폭 방사선량은 원자력안전법에서 규정하고 있는 일반인의 연간선량한도인 1 mSv y^{-1}를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서 평가한 결과, 국내 지르콘 취급 산업 종사자에 대한 방사선학적 영향은 미미한 것으로 나타났다. 따라서 국내 지르콘 취급 산업에 대해서는 국제기구에서 권고하고 있는 차등적인 안전관리를 통해 효율적인 안전관리 수단을 확보해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행한 결과는 국내 지르콘 취급 산업 피폭현황 파악을 위한 기반 자료로서 활용될 수 있을 것이다. 그리고 향후 국내 NORM 취급 산업에 대한 차등적인 안전관리체계 수립을 위한 데이터 기반 구축에 기여할 것으로 판단된다.

사 사

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

참고문헌

1. IAEA. 2006. Assessing the Need for Radiation Protection measures in Work Involving Minerals and Raw Materials. IAEA Safety Report Series No. 49.
2. EURATOM. 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM. European Atomic Energy Community.
3. ICRP. 2019. Radiological protection from naturally occurring radioactive material (NORM) in industrial processes. ICRP Publication 142. Ann. ICRP 48(4).
4. IAEA. 2007. Radiation Protection and NORM Residue Management in the Zircon and Zirconia Industries. IAEA Safety Report Series No. 51.
5. IAEA. 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources : International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3.
6. IAEA. 2018. Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7.
7. UNSCEAR. 2022. Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Volume IV.
8. 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.
9. Fathabadi N, Farahani MV, Amani S, Moradi M and Haddadi B. 2011. Evaluation of Occupational Exposure to Naturally Occurring Radioactive Materials in the Iranian Ceramics Industry. *Radiat. Prot. Dosim.* **145**(4):400-404.
10. Righi S, Andretta M, Bruzzi L. 2005. Assessment of the radiological impacts of a zircon sand processing plant. *J. Environ. Radioact.* **82**(2):237-250.
11. Kim KP, Wu C-Y, Birky BK and Bolch WE. 2006. Influence of Particle Size Distribution on Inhalation Dose to Workers in the Florida Phosphate Industry. *Health Phys.* **91**(1):58-67.
12. 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.
13. Park JH, Lee BM, Jin YH, Lee SY and Kim KP. 2022. Assessment of External Radiation Dose for Workers in Domestic Zircon Industries. *J. Radiat. Ind.* **16**(1):31-39.
14. ICRP. 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24(1-3).
15. ICRP. 1995. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 71. Ann. ICRP 25(3-4).
16. Takashi Satio. 1997. $^{234}U/^{238}U$ Activity Ratios of Uranium in Bauxite and Aluminum Compounds. *RADIOISOTOPES* **36**: 331-335.
17. Virgil AM. 2004. History of Impactors - The First 110 Years. *AS&T* **38**(3):247-292.
18. EPA. 1994. Methods for Derivation of Inhalation Reference Concentrations and Application of Inhalation Dosimetry. EPA/600.8-90/066F.
19. Department of Mines and Petroleum. 2010. Managing Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Mining and Mineral Processing. NORM 3.5.
20. TIFAC. 2018. Bauxite Status, Opportunities, and Road Ahead.
21. MEL. 2020. Notice of Ministry of Employment and Labor No.2020-35. Notice of safety certification for protective equipment.
22. ICRP. 1995. Age-dependent Dose to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 3 Ingestion Dose Coefficient. ICRP Publication 69. Ann. ICRP 25(1).
23. U.S. Department of Energy. 2009. Methods and Models of the Hanford Internal Dosimetry Program, PNNL-MA-860. PNNL-15614, Rev.1.
24. Kim S-Y, Choi CK, Park I, Kim YG, Choi WC, Kim KP. 2015. Assessment of Inhalation Dose Sensitivity by Physicochemical Properties of Airborne Particulates Containing Naturally Occurring Radioactive Materials. *J. Radiat. Prot. Res.* **40**(4):216-222.
25. NSSC. 2021. Enforcement Decree of the Nuclear Safety Act Artcle 2 Paragraph 4.