KINS

KINS/GR

2019년 생활주변방사선 안전관리 실태조사 및 분석
(Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment, 2019)

2020년 1월

한국원자력안전기술원
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY

제 출 문

원자력안전위원회 위원장 귀하

본 보고서를 "2019년도 생활주변방사선 안전관리 실태조사 및 분석" 보고서로 제출합니다.

2020년 1월

연 구 기 관 명 : 한국원자력안전기술원

연구책임자 : 김 용 재

연 구 원 :

구 본 철, 권 정 완, 김 홍 석, 박 재 우, 박 창 수,
서 한 창, 선 승 진, 양 완 승, 오 상 욱, 우 주 희,
유 형 준, 이 영 민, 이 재 국, 이 정 태, 이 주 현,
이 준 호, 이 현 석, 이 현 우, 이 훈, 임 성 아,
장 석 현, 장 재 호, 장 정 환, 전 승 엽, 조 건 우,
지 승 우, 채 정 석, 최 원 철, 최 은 주, 최 준 범,
최 창 일, 최 현 준, 최 희 열

(가나다 순)

(공백)

목 차

(공백)

// 요 약 문

I. 제목

생활주변방사선 안전관리 실태조사 및 분석

II. 사업의 목적 및 필요성

생활주변에서 접할 수 있는 방사선의 안전관리에 관한 사항을 규정함으로써 국민의 건강과 환경을 보호하여 삶의 질을 향상시키고 공공의 안전에 이바지함을 목적으로 ’12년7월26일에 국가적 차원의 관리체계인 생활주변방사선 안전관리법(이하 “생활방사선법”)이 시행되었다. 생활주변방사선 안전관리 실태조사 및 분석의 수행을 통하여 달성하고자 하는 주요 목표는 다음과 같다.

- 천연방사성핵종을 함유하는 물질을 취급하는 작업자 보호
- 천연방사성핵종을 함유하는 제품을 사용하는 일반인 보호
- 국제노선을 운항하는 항공기의 승무원 보호
- 수입 화물 및 재활용고철의 방사선 감시를 통한 방사성물질의 국내 유입 차단
- 오염된 물질의 일반 생활환경으로의 확산 방지를 통한 국민 보호

III. 사업의 범위 및 내용

생활방사선법 제23조에 따라 원료물질과 공정부산물의 유통현황 및 가공제품의 제조 또는 수출입현황, 취급자 또는 제조업자가 운영하는 시설 주변의 방사능 농도 및 환경의 오염 정도, 김시기 운영자가 설치・운영하는 감시기의 운영・관리 현황 등의 내용을 점검하기 위해 안전관리 실태조사 및 분석을 수행하였다. 업무 일원화에 따라 ’19년도 실태조사 대상의 범위는 ① 공항・항만 감시기, ② 재활용고철 감시기, ③ 원료물질 및 공정부산물 취급 사업장, ④ 가공제품, ⑤ 항공운송사업자 및 ⑥ 재활용고철 대단위 수집업자로 결정되었다.

Ⅳ. 결과

공항·항만 감시기 운영자 실태조사에서는 40개 운영자에 대한 사전검토 후, 12개의 현장 실태조사를 수행하였고, 전반적인 운영현황이 우수함을 확인하였다. 차단기 및 인력 문제가 있는 부두는 감시기 알고리즘 수정 및 운영체계를 변경하였고, 공항의 경우 2차 검색 시간을 단축할 수 있도록 최신 장비를 우선 보급 및 지원하기로 하였다.

재활용고철취급자 13개사 18개 사업장에 대한 실태조사 결과, 총 57대의 감시기가 설치·운영되고 있으며, 2018년도 취급량은 전년 대비 7.2% 증가를 확인하였다. 지정된 담당자는 일상점검을 실시하고 그 기록을 보관하며, 감시기의 점검은 운영방식에 따라 일일, 주간, 분기 등의 단위로 이루어짐을 확인하였다.

원료물질 및 공정부산물에 대한 실태조사는 원료물질 취급 사업장, 유의물질 발생 사업장, 공정부산물 발생시설 및 유의물질 의심 사업장 4가지 분야 총 15개 업체에 대하여 진행되었다. 방사능 농도 분석결과 공정부산물을 발생하는 업체는 없었으며, 최대 피폭방사선량은 연간 0.21 mSv 수준으로 평가되어 추가적인 방사선 관련 안전관리는 필요하지 않은 것으로 판단하였다.

가공제품 실태조사는 총 513개 제품에 대한 방사능 농도분석 및 연간 피폭방사선량 평가로 진행되었다. 전체 513개 제품의 라돈·토론 농도를 측정하였으며, 411개 제품에 대하여 내부피폭선량을 평가하였다. 평가결과 연간 피폭방사선량이 1 mSv를 초과한 제품은 일반매트리스 17개 등 총 68개 제품이었다.

항공운송사업자 실태조사에 따르면 국내 9개 사업자가 존재, ’18년도 전체승무원은 22,484명으로 파악되었다. 우주방사선 피폭방사선량 프로그램으로 CARI-6/6M과 NAIRAS를 사용하고 있으며, 연평균 1인당 2.09 mSv를 받는 것으로 조사되었다. 안전지침에 따라 연간 6 mSv를 초과하는 승무원은 없었으며, 항공운송사업자는 사내전산망 등을 통하여 해당 정보를 제공하고 있었다.

생활주변방사선방호 시행계획에 따라 재활용고철 대단위 수집업자 실태조사를 수행하였다. 대상(大商) 16개 업체 및 공항·항만 감시기 유의물질 발생 4개 업체에 대하여 현장조사가 진행되어, 각 업체별 주요 취급금속 및 취급량, 감시기 보유여부 등을 확인하였다. 또한 한국비철금속협회 등의 통계자료를 바탕으로 비철금속산업 현황과 주요 비철품목별 수입실적을 조사하였다.

표 목 차

그 림 목 차

(공백)

제 1 장. 개요

생활주변방사선 안전관리법(이하 "생활방사선법") 제23조(생활주변방사선 안전관리 실태조사 및 분석)에 따른 안전관리 실태조사 및 분석은 천연방사성핵종을 함유하는 물질을 취급하는 작업자 보호, 천연방사성핵종을 함유하는 제품을 사용하는 일반인 보호, 국제노선을 운항하는 항공기의 승무원 보호, 수입 화물 및 재활용고철의 방사선 감시를 통한 방사성물질의 국내 유입 차단 및 오염된 물질의 일반 생활환경으로의 확산 방지를 통한 국민 보호를 주요 목적으로 하고 있다. 생활주변방사선 안전관리에 관한 사항은 매년 안전관리 실태조사·분석 계획을 수립 및 시행하고, 그 결과를 통해 안전관리 업무의 효율적 추진을 위한 기초자료 수집이나 제도 개선 사항을 도출하여 차기년도 실태조사에 반영하는 순환적인 체계를 갖추고 있다.

원자력안전위원회(이하 "원안위")는 매년 실태조사 계획을 수립하고, 같은 법 제27조(생활주변방사선 전문기관의 지정·운영 등)에 따라 지정, 운영되는 전문기관에 통보하여 이를 수행하고 있다. 한국원자력안전기술원(이하 "KINS")은 '13년부터 상기 전문기관 중 하나로 해당 실태조사 업무를 위탁받아 수행하며 그 결과를 원안위에 보고하였다. 기존에 KINS는 원료물질 및 공정부산물 취급업체와 공항·항만 방사선·방사능 감시기(이하 "감시기") 운영자를 실태조사의 대상으로 삼아 계획을 수립하고 이를 수행해 왔다.

다만, '18년 속칭 '라돈침대'를 필두로 음이온 발생을 위하여 모나자이트를 투입한 제품으로 인한 사회적 이슈가 발생하였으며, 국회 과학기술방송통신위원회에서는 '19년 예산심사 부대의견을 통하여 KINS와 한국원자력안전재단(이하 "원안재단")에 이원화 되어있던 실태조사 업무를 일원화할 것을 권고하였다. 이에 따라 원안위는 실태조사 업무를 KINS에 일원화하기로 결정하였고, KINS에서는 '19년부터 '생활주변방사선 안전관리사업'을 통해 기존에 수행하던 실태조사 업무와 더불어 원안재단에서 이관 받은 생활주변방사선 안전관리 업무에 대한 계획을 수립하였으며 이를 실행하였다.

상기 업무 일원화에 따른 '19년도 실태조사 대상의 범위는 ① 공항·항만 감시기, ② 재활용고철 감시기, ③ 원료물질 및 공정부산물 취급 사업장, ④ 가공제품, ⑤ 항공운송사업자 및 ⑥ 재활용고철 대단위 수집업자이다. 본 보고서에는 해당 실태조사에 대한 계획 수립부터 수행 내용 및 결과까지 총 업무가 정리되어 있다.

제 2 장. 생활주변방사선 실태조사

1. 공항・항만 감시기 실태조사

1.1. 실태조사 및 분석 계획

1.1.1. 실태조사 수행대상

원안위는 생활방사선법 제19조에 따라 공항・항만의 물동량 및 취급 화물의 종류에 대한 분석결과를 고려하여 '12년부터 '18년 말까지 연차적으로 16개 공항・항만에 총 110개의 감시소를 설치・운영하였다. 또한, 같은 법 제19조제3항에 따라 설치한 감시기의 운영을 항공교통사업자 및 항만시설운영자에게 위탁운영하고 있다(총 17개 위수탁계약자, 40개 운영자).

'19년에는 기존과 같이 전년도 신규설치 공항・항만 운영자, 운영 개선이 필요한 운영자에 대해 실태조사를 수행하였으며, 특히 공항 감시기 설치가 점진적으로 증가함에 따라, 공항 특성에 부합하는 운영절차서 개발을 위한 기초자료 확보를 위해 전체 공항 감시기 운영자에 대해 실태조사를 수행하였다. 감시기 운영자 실태조사・분석 대상 및 사유는 **표 1**과 같다.

표 1. 공항・항만 감시기 운영자 실태조사・분석 대상 및 사유

구분	조사 대상	현장조사 대상 선정 사유
공항·항만 감시기 운영·관리 현황	(사전검토) 40개 감시기 운영자	· '18년 신규설치 · 운영개선 필요 · 기타
	(현장조사) 12개 감시기 운영자	

1.1.2. 실태조사 내용 및 항목

감시기 운영관리 현황 실태조사의 내용에는 생활방사선법 제20조의2 및 같은 법 시행규칙 제8조의2에 따른 감시기 운영・관리 기준준수 여부와 생활방사선법 시행령 제13조에 따라 원안위가 감시기 운영자에게 위탁한 감시기 운영업무 범위 등에 해당하는 사항이 포함되며, 주요 항목은 **표 2**와 같다.

표 2. 공항 · 항만 감시기 운영자 실태조사 · 분석 내용

구분	조사·분석 내용
방사선감시기 운영·관리 기준준수 여부 확인	· 감시기의 설치·운영에 관한 업무의 업무별 담당자 지정 · 감시기를 일상점검하고 그 결과를 기록·보관 · 감시기의 점검·관리 방법 및 업무에 관한 절차서 마련 · 감시기 고장·파손 및 위치 변경 발생 시 지체 없이 원안위에 보고
경보대응 적합성 확인	· 경보발생에 따른 대응절차(2차검색 등) 숙지 여부
기타	· 감시기 운영관련 교육(전문교육 등) 이수 여부 확인 · 장비 정상상태 확인 및 운영 관련 변경 등 확인

1.2. 실태조사 · 분석 방법

공항 · 항만 감시기 운영 · 관리 현황 실태조사는 **표 3**에 제시된 방법으로 수행한다. 먼저 공항 · 항만별 감시기 담당자(관리, 운영책임자 등)를 대상으로 실태조사의 배경 · 방향 및 관련 생활방사선법 사항을 설명하고, 관련서류를 통해 감시기 운영 · 관리 기준준수 여부를 확인하는 회의를 진행한 뒤, 현장점검을 통해 감시기 경보대응 적합성 확인 및 관련기기의 정상상태 등을 확인한다. 특히 경보대응 적합성 확인의 경우, 실제 방사선원을 이용하여 경보를 발생한 후, 현장요원이 대응하는 모습을 직접 확인하는 방식으로 진행한다.

상반기 실태조사에서는 주로 운영의 개선이 필요한 공항 · 항만을 점검하고자 하였는데, 특히 과거부터 지속적인 문제가 되었던 차단기 작동관련 이슈 및 인력부족으로 인한 감시기 업무의 어려움 등에 대해 근본적 원인 파악 및 문제 해결을 하고자 하였다. 하반기에는 2018년 신규 설치한 공항 · 항만 감시기 운영자 및 추후 공항 전용 운영절차서 개발을 위한 기초자료 확보 목적으로 공항 감시기 운영자에 대해 실태조사를 수행하였다.

표 3. 공항 · 항만 감시기 운영자 실태조사 · 분석 방법

구분	내용
회의	· 실태조사 배경, 방향 및 생활방사선법 관련사항 설명 · 감시기 운영·관리 기준준수 여부 및 교육 이수 여부 확인
현장점검	· 감시기 경보대응 숙지 여부 및 장비 정상상태 등 확인

그림 1. 실태조사 경보대응 적합성 확인(차량통제)

그림 2. 실태조사 경보대응 적합성 확인(2차검색 시연)

1.3. 실태조사・분석 결과

현재 공항・항만의 감시기 운영자는 총 40개 기관으로, 이 중 사전검토를 통해 현장 실태조사 대상을 선정하였다. 4개의 '18년 신규설치 감시기 운영자 및 운영개선이 필요한 3개의 감시기 운영자, 그리고 3개의 공항 감시기 운영자가 선정되었고, 기타 현장 실태조사가 필요한 2개 감시기 운영자를 추가로 선정하여 감시기 운영관리 기준 준수 현황 등을 확인하고자 하였다.

1.3.1. '18년 신규설치 공항・항만 감시기 운영자 (4개 감시기 운영자)

감시기를 신규로 설치한 현장의 경우, 감시기 운영자의 업무경험이 상대적으로 짧기 때문에, 실태조사를 통해 감시기가 정상적으로 작동하고 있는지 뿐만 아니라 운영요원들의 업무 숙련도를 확인하고, 필요 시 추가교육 등을 통해 역량을 제고하는 것이 매우 중요하다. 이러한 목적으로 '18년 신규설치 감시기 운영자에 대해 교육, 운영상태, 유지보수, 대응 숙련도, 기록관리, 절차서 점검 등 실태조사를 수행하였다.

실태조사 수행결과 전반적으로 감시기 운영이 우수함을 확인하였고, 특히 감시기 경보 발생 시 대응절차 숙련도가 우수함을 확인하였다. 실제로 '18년 감시기를 신규설치한 공항의 감시기 운영자는 국내에 거주하는 베트남인의 방사성물질 밀반입 시도 4건을 완벽하게 차단함으로써, 대응절차 숙련도가 우수함을 입증하였다.

이외에도 감시기 운영・관리기준과 관련하여 4개 운영자 모두 일일점검 결과를 빠짐없이 기록하고 있음을 확인하였고, 업무절차서 역시 현장에 비치되어 있음을 확인하였다.

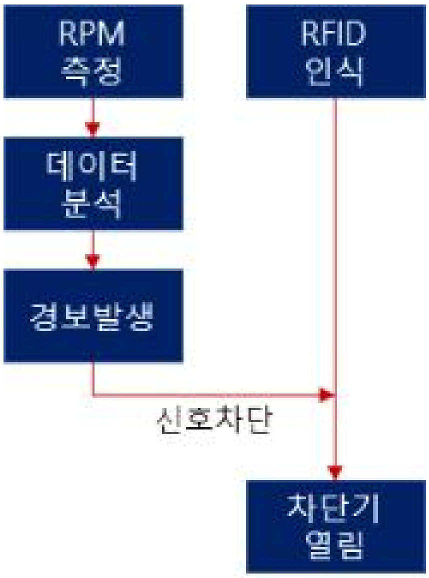
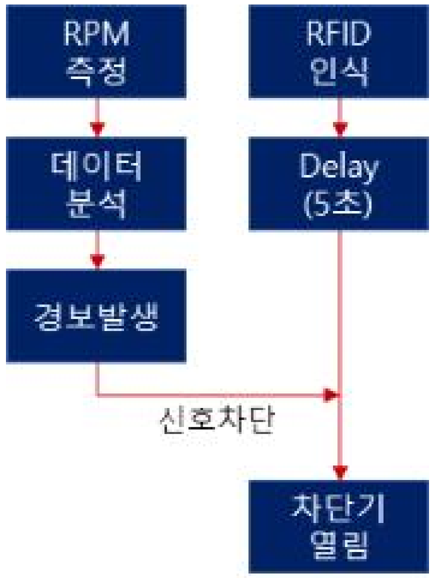
1.3.2. 운영개선이 필요한 공항・항만 감시기 운영자 (3개 감시기 운영자)

부산항은 전국 공항・항만 중 경보발생 수가 압도적으로 많은 지역이다(전체 경보의 약 1/3). 경보발생 수가 많다는 것은 결국 물동량이 매우 많다는 의미이며, 주변장치 오작동과 같은 문제의 발생 가능성도 높다. 특히 경보발생 시 차단기가 정상적으로 동작하지 않을 경우, 해당 차량이 추가확인 없이 현장을 이탈할 수 있기 때문에 차단기의 정상작동은 매우 중요하다. 부산항 A부두에서는 이러한 차단기 문제가 간혹 발생하였고, 이에 따라 근본적 확인을 위해 실태조사를 수행하였다.

실태조사를 통해 원인을 확인한 결과, 감시기를 통한 화물측정 및 데이터 분석을 하는데 걸리는 시간이 RFID를 통해 차량을 인식하는 시간보다 길 경우, 경보가 발생하기 전에 차량이 인식되면서 차단기가 열리는 것으로 확인되었다. 이를 해결하기 위해, RFID가

차량을 인식한 후 5초 이후에 신호가 전달되도록 함으로써, 감시기가 충분한 시간을 가지고 화물측정 및 데이터 분석을 할 수 있도록 **표 4**와 같이 알고리즘을 수정하였다.

표 4. 부산항 A부두 차단기 작동 알고리즘 수정 전/후

<수정 전>	<수정 후>
	

부산항 B부두는 부두 게이트 업무 담당 직원이 감시기 운영을 맡고 있으나, 근무조가 1명으로 구성됨에 따라 현장요원이 식사를 하거나 혹은 화장실 용무 등으로 인해 자리를 비울 경우 감시공백이 발생할 수 있어, 이에 대한 해결방안을 모색하는 것을 중점으로 실태조사가 진행되었다.

근본적 문제해결을 위해서는 현장요원 인력보강이 필요하나, 이는 부두 운영사의 재정적 문제로 인해 불가능하였다. 차선책으로 부두상황을 전반적으로 모니터링 하는 상황실 인력이 다수임에 따라, 현장요원이 자리를 비울 경우, 해당인력이 방사선감시 업무를 대신할 수 있도록 운영체계를 변경하였고, 해당 운영체계가 잘 정착할 수 있도록 관리·운영책임자의 엄중한 관리를 요청하였다.

목포항 C부두는 '19년1월부터 감시기를 운영주체가 변경됨에 따라, 감시기의 정상작동 여부 및 운영요원들의 업무 숙련도를 확인하기 위해 현장 실태조사를 실시하였다. 실태조사 결과, 감시기 운영관리 기준 준수 및 경보대응절차 숙련도가 우수하였고, 이전 운영기관으로부터 기존 감시기 업무이력 등 역시 제대로 인수인계되었음을 확인하였다.

1.3.3. 공항 감시기 운영자 (3개 기관)

공항에서 운영하는 감시기 수가 점차 증가(현재 12개 감시소 운영 중)함에 따라 공항 특성에 맞는 감시기 운영절차를 개발할 필요가 발생하였다. 이에 따라 공항 운영특성에 적합한 감시기 운영절차를 수립하기 위한 첫 단계인 기초정보 수집을 위해 인천공항에서 운영 중인 감시기에 대한 실태조사를 수행하였다.

실태조사 수행결과, 공항은 항만에 비해 2차검색에 상대적으로 오랜 시간이 소요되는 것을 확인하였는데, 이는 여러 화주의 화물이 하나의 컨테이너에 적재되어 있어 각 화물에 대한 개별측정을 통해서만 방사선 경보를 발생한 화물을 특정할 수 있기 때문으로 파악되었다. 2차검색 수행에 오랜 시간이 소요될 경우 결국 반출이 지연되어 화주의 문제제기로 이어질 수 있어, 절차 최적화 및 장비개선을 통한 2차검색 시간 단축은 매우 중요하다. 이에 KINS는 운영체계 개선을 통해 2차검색 절차를 최적화하는 것뿐만 아니라, 좀 더 빠르고 정확한 장비를 공항에 우선으로 보급함으로써 2차검색에 소요되는 시간을 단축할 수 있도록 하는 업무를 ’20년에 수행할 예정이다.

앞서 언급한 애로사항에도 불구하고, 공항 감시기 운영은 전반적으로 양호하였다. 특히 경보가 가장 많이 발생하는 인천공항 D 화물터미널의 경우, 터미널 내 감시기 전용 2차검색장 설치 등 자체 운영환경 개선을 통해 감시기 경보대응 역량을 제고하였다. E 화물터미널은 경보발생 시 화물을 감시기에 재통과시킴으로써 오경보 여부를 판단하는 등 감시기 경보대응 프로세스를 자체적으로 최적화하는 적극적인 모습을 보였다.

1.3.4. 기타 감시기 운영자 (2개 기관)

기타 현장 실태조사가 필요하다고 판단한 2개 감시기 운영자에 대하여, 감시기 운영관리 기준 준수 현황 및 경보대응 절차 숙련도 등을 파악을 위한 실태조사를 수행하였다.

실태조사 수행결과, 2개 감시기 운영자 모두 전반적으로 감시기 운영현황이 우수함을 확인하였다. 특히 인천항 F부두의 경우, 관리・운영책임자의 관리감독 아래 일일점검 수행 및 경보대응 실적이 매우 우수함을 확인하였다. 부산항 G부두의 경우는 보안 요원이 감시기 업무를 담당하는데 그 중 감시기 전문인력을 별도로 지정함으로써, 감시기 운영 및 경보대응 역량을 집중적으로 관리할 수 있는 체계를 마련하였다.

2. 재활용고철 감시기 실태조사

2.1. 실태조사·분석 계획

생활방사선법 제20조 및 제20조의2에 따라 단위 용량 30톤 이상의 전기 용융시설을 운영하여 고철을 재활용하는 자(이하 “재활용고철취급자”)는 감시기의 설치 및 감시기 운영·관리 기준을 준수하도록 하고 있다. 이는 재활용고철취급자가 취급하기 위해 국내 또는 국외에서 수집한 재활용 고철 중에 천연방사성핵종 또는 인공방사성핵종을 함유하거나 오염된 방사성물질을 포함하는 경우가 존재하기 때문이다.

생활방사선법 제21조에서는 방사성핵종을 함유하거나 오염된 방사성물질을 포함하고 있는 재활용고철이 원안위가 정하여 고시하는 방사능농도를 초과하거나 초과할 것으로 의심되는 경우 이를 유의물질로 정의하고 있다. 이러한 유의물질이 감시기에서 검출될 경우 재활용고철취급자는 유의물질에 대한 사항을 원안위에 보고하고 조치를 취하도록 하고 있다.

원안위는 ’19년도 생활주변방사선방호 시행계획을 통하여 방사성물질 유입 감시체계 고도화 실행을 위한 재활용고철취급자에 대한 실태조사를 추진하도록 하고 있다. 이에 따라, KINS는 우선 1단계로 조사대상인 재활용고철취급자의 변동사항을 확인하는 것을 계획하였다. 2단계 서면조사에서는 ’18년도 기준으로 1단계 조사대상의 재활용고철취급자의 감시기 설치 및 전기 용융시설 현황, 재활용고철 취급량, 감시기 운영관리 및 교육 현황에 대한 사항을 조사하기로 계획하였다.

2.2. 실태조사·분석 방법

1단계로 상기 재활용고철취급자의 변동사항을 확인하였다. 철강협회를 통해 확인한 바에 따르면, 단위 용량 30톤 이상의 전기 용융시설을 운영하여 고철을 재활용하는 자는 전년 대비 변동이 없는 것으로 조사되었다. 이에 따라, 2019년 실태조사·분석 대상을 13개 재활용고철취급자의 18개 사업장으로 정하였다.

2단계에서는 상기 18개 사업장에 대하여 서면조사를 통해 감시기 설치 및 전기 용융시설 현황, 재활용고철 취급량, 감시기 운영관리 및 교육 현황을 요구하였고 수집된 자료를 기반을 실태조사·분석을 수행하였다.

2.3. 실태조사・분석 결과

2.3.1. 재활용고철취급자 감시기 및 전기 용융시설 현황

재활용고철취급자는 13개사 18개 사업장으로, 총 57대의 감시기를 설치・운영하고 있었다. **표 5**에 재활용고철취급자의 감시기 및 전기 용융시설 현황을 정리하였다.

표 5. 재활용고철취급자 감시기 및 전기 용융시설 현황 ('18.12월 기준)

연번	제강사명	사업장	감시기 대수	설치연도	전기 용융시설	용량
1	현 대 제 철	포항공장	10	13년 4대, 14년 2대, 15년 3대, 17년 1대	4	30T, 80T, 100T, 120T
2		인천공장	5	13년 3대, 15년 2대	5	60T, 70T, 80T, 90T, 120T,
3		당진공장	5	11년 1대, 13년 4대	3	150T, 150T, 150T
4		순천공장	2	15년 2대	4	100T, 100T, 100T, 30T
5	포 스 코	광양공장	8	01년 2대, 05년 1대, 15년 3대, 16년 2대	1	150T
6		포항공장	10	12년 1대, 14년 4대, 15년 5대	5	100T, 100T, 100T, 300T, 300T
7	대 한 제 강	녹산공장	1	09년 1대	1	80T
8	동 국 제 강	포항공장	2	07년 1대, 08년 1대	1	140T
9		인천공장	2	08년 2대	2	100T, 120T
10	세아창원특수강	창 원 시	2	12년 2대	2	60T, 100T
11	한 국 철 강	창 원 시	2	12년 1대, 14년 1대	2	70T, 120T
12	한 국 제 강	함 안 군	1	12년 1대	1	70T
13	한국특수형강	함 안 군	1	08년 1대	1	100T
14	두산중공업	창 원 시	1	03년 1대	2	30T, 100T
15	환영철강공업	당 진 시	1	05년 1대	1	100T
16	세아베스틸	군 산 시	2	99년 1대, 09년 1대	4	100T, 100T, 100T, 150T
17	와이케이스틸	부 산 시	1	14년 1대	1	90T
18	태 웅 제 강	부 산 시	1	16년 1대	1	120T
합 계			57	-	41	-

2.3.2. 재활용고철 취급 현황

'18년도 재활용고철은 24,566,019 톤을 취급하였고, 국내 재활용고철은 16,586,832 톤(67.5%), 수입 재활용고철은 7,979,187 톤(32.5%)을 취급하였다. '18년도 재활용고철 취급량은 '17년(22,917,119톤) 대비 7.2% 증가하였다.

현대제철(순천공장), 한국제강, 두산중공업 3개 사업장은 국내고철만을 취급하였고 현대제철(포항공장, 인천공장, 당진공장), 포스코(광양공장, 포항공장), 동국제강(인천공장), 와이케이스틸 7개 사업장은 항만 내 감시기를 설치·운영하고 있는 것으로 조사되었다.

표 6. '18년 재활용고철 취급량 ('18.12월 기준)

연번	제강사명	사업장	재활용고철 취급량(톤)	
			국내	수입
1	현대제철	포항공장	636,847	275,999
2		인천공장	2,206,000	3,941,597
3		당진공장	2,199,914	1,498,252
4		순천공장	142,500	0
5	포스코	광양공장	703,710	161,276
6		포항공장	700,148	241,875
7	대한제강	녹산공장	876,163	199,530
8	동국제강	포항공장	1,102,725	193,500
9		인천공장	1,766,000	796,000
10	세아창원특수강	창원시	426,856	40,861
11	한국철강	창원시	1,010,540	122,412
12	한국제강	함안군	712,000	0
13	한국특수형강	함안군	584,052	11,802
14	두산중공업	창원시	107,000	0
15	환영철강공업	당진시	825,224	7,463
16	세아베스틸	군산시	1,936,673	323,154
17	와이케이스틸	부산시	594,300	147,015
18	태웅제강	부산시	56,180	18,451
합계			16,586,832	7,979,187
			24,566,019	

2.3.3. 감시기 운영관리 및 교육현황

재활용고철취급자는 생활방사선법 제20조의1 제1항 및 같은 법 시행규칙 제8조의2에 따라 아래의 감시기의 운영・관리 기준을 준수하도록 하고 있다.

- ○ 감시기의 설치・운영에 관한 업무의 업무별 담당자를 정할 것
- ○ 감시기를 일상점검하고 그 결과를 기록・보관할 것
- ○ 감시기의 점검・관리 방법 및 점검・관리 업무에 관한 절차서를 마련할 것
- ○ 감시기 고장・파손 및 위치변경이 발생한 경우에는 지체 없이 원안위에 보고할 것. 이 경우 재활용고철취급자는 해당 감시기를 대신하여 방사선 또는 방사능을 감시할 수 있는 방안과 감시기 수리에 관한 계획을 함께 보고하여야 한다.

감시기의 설치・운영에 관한 업무의 업무별 담당자 지정과 관련하여 사업장별 인력 및 시설 등을 감안하여 감시기의 설치・운영에 필요한 담당부서 및 담당자를 지정・운영하고 있으며, 설치 운영하고 있는 감시기에 대하여 일상점검을 실시하고 있고 그 기록을 보관하고 있는 것으로 조사되었다.

감시기의 점검・관리 방법 및 점검・관리 업무에 관한 절차서 마련과 관련하여 각 사업장에서는 사업장의 특성에 맞게 절차서를 마련하고 있고, 정기점검 주기는 사업장의 운영방식에 따라 일일, 주간, 월간, 분기 등의 단위로 점검하고 있는 것으로 조사되었다. 다만, 감시기에 대한 성능점검은 감시기 전문업체와 유지보수 계약을 체결하여 수행하고 있는 것으로 파악하였다.

감시기 고장・파손 및 위치변경과 관련하여 동국제강 인천공장 감시기의 노후화로 인한 고장 및 포스코 광양공장의 감시기의 파손이 각각 1대씩 발생하여, 원안위에 고장・파손의 현황을 보고한 후 수리하여 현재 정상 운영 중인 것으로 확인되었다.

생활방사선법 제26조의2에 따라 감시기 운영 및 유의물질 조치 등에 관한사항에 대하여 원안위에서 실시하는 교육을 받도록 하고 있다. 해당 교육은 원안재단이 같은 법 제28조에 따라 실태조사・분석 업무를 원안위로부터 위탁 받아 수행하고 있다.

’18년 원안재단이 수행한 교육에는 태웅제강, 동국제강 인천공장 및 와이케이스틸 3개 사업장이 교육을 받지 않은 것으로 확인되었다. 이에 원안위는 3개 사업장에 대하여 동일한 사례가 재발하지 않도록 안내하였다.

아울러, 각 사업장에서는 고철 수입 시 생활주변방사선 안전관리를 위한 안전지침에 따라 원자력사고(7등급)가 발생한 국가로부터 수입 시에는 고정형 감시기를 통한 “무방사능 확인서”를 요구하고 있는 것으로 조사되었다.

3. 원료물질 및 공정부산물 실태조사

3.1. 실태조사·분석 계획

'19년도 원료물질 및 공정부산물에 대한 생활주변방사선 안전관리 실태조사는 크게 원료물질 취급 사업장, 유의물질 발생 사업장, 공정부산물 발생시설 및 유의물질 의심 사업장의 4가지 분야에 대하여 수행되었다. 현장에서의 조사 및 분석 내용은 **표 7**에 정리하였다. 다만, 현장 상황이나 여건을 고려하여 해당 조사의 내용은 확대나 축소되는 경우가 있었다.

표 7. 원료물질 및 공정부산물 실태조사·분석 내용

조사·분석 사항
· 원료물질 및 공정부산물 현황(취급수량, 유통현황 등) 파악 · 작업공정 및 종사자 근무형태 · 작업장 방사선량률(원료물질, 부산물 및 공정) 측정 · 공기 중 분진농도 및 라돈·토론 농도 측정 · 시료 채취 및 분석 · 종사자 외부 및 내부 피폭방사선량 평가

3.1.1. 원료물질 취급 사업장

생활방사선법 제9조에 따라 원료물질·공정부산물 취급자(이하 "취급자") 및 가공제품 제조업자(이하 "등록제조업자")로 등록한 업체는 같은 법 제12조에 따라 원료물질, 공정부산물 및 가공제품의 취득·발생·보관·판매·처분 현황(이하 "유통현황")을 기록·보관하고, 이를 원안위에 보고해야 한다. 상기 유통현황 내용을 분석하면 취급자가 국내 다른 사업장에 판매한 원료물질의 종류와 수량 등의 내용을 확인할 수 있다.

생활방사선법에 따라 취급자로 등록한 사업장에서 가장 많이 취급하는 원료물질은 저어콘과 포타슘 화합물(염화포타슘, 수산화포타슘 및 탄산포타슘 등)이다. 다만 '16년 KINS가 실시한 포타슘 화합물 취급 사업장에 대한 실태조사 결과에 따르면, 해당 사업장에서의 내부피폭 방사선량은 국제원자력기구(IAEA; International Atomic Energy Agency)가 사소한 선량으로 간주한 면제기준인 연간 10 μSv의 0.07%에 불과하여 내부피폭 선량평가 자체가 불필요하다고 판단한 바 있다. 또한 외부피폭 방사선량의 경우에도 연간 최대

0.54 mSv로 평가되어 방사선 관련 안전관리를 수행할 필요성이 없는 것으로 판단하였다.

이에 따라 '19년도에는 앞서 언급한 유통현황 보고를 분석하여 포타슘 화합물은 제외하고, 취급자가 국내에서 저어콘을 대량으로 판매한 사업장 9곳(**표 8**)을 대상으로 선정하여 실태조사를 진행하였다.

표 8. 원료물질 취급 사업장 실태조사 업체정보

<table>
<tr><th>업체명</th><th>생산제품 (소분류)</th><th>취급형태 (대분류)</th></tr>
<tr><td>원료물질 취급 사업장 A</td><td rowspan="4">도형제</td><td rowspan="6">도형제</td></tr>
<tr><td>원료물질 취급 사업장 B</td></tr>
<tr><td>원료물질 취급 사업장 C</td></tr>
<tr><td>원료물질 취급 사업장 D</td></tr>
<tr><td>원료물질 취급 사업장 E</td><td rowspan="2">주물</td></tr>
<tr><td>원료물질 취급 사업장 F</td></tr>
<tr><td>원료물질 취급 사업장 G</td><td>프리트</td><td rowspan="2">유약</td></tr>
<tr><td>원료물질 취급 사업장 H</td><td>타일</td></tr>
<tr><td>원료물질 취급 사업장 I</td><td>압전 세라믹</td><td>세라믹</td></tr>
</table>

3.1.2. 유의물질 발생 사업장

전국에 분포하는 공항・항만에서는 생활방사선법 제19조제1항에 따라 감시기가 설치되어 운영되고 있으며, 같은 법 제20조의2에 따른 감시기 운영자는 수출입 화물에 대한 방사선 감시를 지속적으로 수행하고 있다. 또한 효율적인 감시업무를 위하여, 감시기로 측정된 방사선 계수율과 천연/인공 핵종 판별여부에 따른 단계별 대응절차도 마련되어 있다. 감시기 운영자는 같은 법 제21조제1항에 따라 원안위가 정하여 고시하는 방사능 농도(^{40}K : 10 Bq/g, 그 밖의 모든 천연방사성핵종 : 1 Bq/g)를 초과하거나 초과할 것으로 의심되는 물질을 유의물질로 규정하고, 해당 유의물질을 원안위에 보고하도록 하고 있다.

IAEA는 천연방사성물질(NORM; Naturally Occurring Radioactive Material)을 취급하는 산업분야(**표 9**)에 대한 정보 및 해당 분야의 안전관리 필요성에 관한 보고서를 발간하였다(IAEA 2006). KINS는 생활방사선법 시행 이후 해당 산업 중 국내에 존재하는 분야를 선정하여 실태조사를 진행하여 왔다. 반면 이와는 별도로 공항·항만 감시기를 통하여 검출된 유의물질을 발생시킨 사업장에 대한 실태조사를 수행할 경우, 상기 보고서에 제시되어 있지 않은 새로운 천연방사성물질이나 NORM 산업분야에 대한 안전관리 필요성도 파악할 수 있는 개연성이 있다.

표 9. IAEA의 천연방사성물질(NORM) 산업분야 (IAEA 2006)

NORM 산업분야
· 희토류 채광(Extraction of rare earth elements) · 토륨 및 토륨 화합물 생산 및 이용(Production and use of thorium and its compounds) · 니오븀 및 철 함유 니오븀 생산(Production of niobium and ferro-niobium) · 우라늄 외 광물 채광(Mining of ores other than uranium ore) · 원유 및 가스 생산(Production of oil and gas) · 이산화티타늄 염료 산업(Manufacture of titanium dioxide pigments) · 인산 산업(The phosphate industry) · 저어콘 및 지르코니아 산업(The zircon and zirconia industries) · 주석, 구리, 알루미늄, 아연, 납, 철 및 강철 생산 산업(Production of tin, copper, aluminium, zinc, lead, and iron and steel) · 석탄화력발전(Combustion of coal) · 수처리(Water treatment)

’19년도에는 유의물질 중 상기 대응절차에 의해 천연핵종으로 판별되고, 또한 후속조치가 필요한 방사성물질의 사용이 의심되는 사업장(화주)에 대하여 실태조사를 진행하였다. 조사대상 선별을 위해 감시기 유의물질 발생 리스트를 연중 분석하였고, 추적조사 결과 생활방사선법에 따라 이미 등록이 완료된 사업장은 조사대상에서 제외하였다. 이에 따른 유의물질 발생 사업장 실태조사 대상으로 총 3곳이 선정되었다.

표 10. 원료물질 취급 사업장 실태조사 업체정보

업체명	원료물질	생산제품
유의물질 발생 사업장 A	저어콘	타일
유의물질 발생 사업장 B	염화지르코니아	저어콘 화합물
유의물질 발생 사업장 C	온열방석 부자재	온열방석 (완제품)

3.1.3. 공정부산물 발생시설 (수처리)

앞서 표 9에서 제시한 바와 같이 수처리(water treatment)는 IAEA가 분류한 NORM 산업분야 중 하나이다. 수처리는 땅에서 끌어올린 지하수를 음용수 또는 공업용수 등으로 사용하고자 지하에서 취수하여 오염물질을 제거하는 대규모 공정처리를 의미한다. 해당 산업에서는 천연방사성핵종이 농축된 이온교환수지(ion exchange resin) 등의 폐기물이 발생할 수 있으며, 라돈 흡입으로 인한 종사자 피폭이 야기될 수 있음을 명시하고 있다(IAEA 2006).

KINS는 수처리 업체에서 발생하는 공정부산물에 대한 사전조사의 목적으로 한국기초과학지원연구원(이하 "KBSI")에 위탁하여 2년간('15년-'16년) 선행연구를 진행하였다. 여기서 말하는 수처리 업체란 먹는샘물 제조업체로 한정되어 있으며, 지하수를 관정에서 뽑아낸 후 정수·살균 처리를 통하여 먹는샘물을 생산하고 이를 시중에 유통하는 업체를 의미한다. 해당 연구결과는 수처리 업체가 사용 후 폐기하는 활성탄 및 마이크로 필터 등의 폐필터에는 ^{210}Pb가 존재하여 공정부산물이 될 가능성이 있음을 밝히고 있다. 이는 암석에 존재하는 우라늄 및 우라늄 계열의 라돈(^{222}Rn)이 지하수와 함께 취수정을 통하여 정수설비에 유입되고, 해당 라돈 붕괴계열 중 유일한 장반감기 핵종인 ^{210}Pb만이 필터에 침적될 수 있기 때문이다.

이에 따라 KINS는 '17년도에 국내에 존재하는 수처리 업체를 대상으로 실태조사를 기획하여 수행한 바에 있다. 조사의 대상은 앞서 언급한 KBSI의 연구결과를 바탕으로 폐필터의 방사능 농도가 1 Bq/g을 초과할 수 있을 것으로 예상되는 7곳을 선정하였다. 다만, 그중 1곳은 당시의 조사에 응하지 않아 실태조사를 수행하지 못하였다. 따라서 2019년도에는 수처리 업체에 대한 실태조사 마무리 차원에서 상기 미수행 업체 1곳에 대한 조사를 수행하였다.

3.1.4. 유의물질 의심 사업장

원료물질(모나자이트)을 다양한 생활제품 제조에 사용함으로 인한 라돈·토론 피폭 사안이 ’18년도에 발생하였으며, 이에 따라 생활방사선법은 ’19년 1월 일부개정을 거쳐, 같은 해 7월에 시행되었다. 개정된 생활방사선법은 제15조제2항에 따라 제조업자로 하여금 전리, 여기 등 방사선에 의한 효과를 내기 위하여 원료물질 또는 공정부산물을 첨가한 제품이나, 신체에 착용하거나 장시간 신체에 밀착되어 사용되는 제품 등 원안위가 정하여 고시하는 제품을 제조 또는 수출입할 수 없도록 규정하고 있다.

상기 법 개정에 따라 일부 제조업자들은 사업장에서 사용하는 원료 및 생산제품에 대한 방사능 농도를 확인하기 위하여 개별적으로 분석기관에 방사능 농도분석 의뢰를 하는 경우가 있었다. 2019년도에는 해당 분석결과의 공유에 따라 유의물질 발생이 의심되는 일부 사업장을 선정할 수 있었다.

유의물질 의심 사업장 A는 목걸이 제조 목적으로 구입한 비즈(구슬)에서 ^{232}Th 계열의 핵종이 1.29 Bq/g으로 평가되었다. 유의물질 의심 사업장 B는 인산석고를 원료로 하여 비료를 생산하는 업체였으며, ^{238}U 계열의 핵종이 3.92 Bq/g으로 분석되었다. 이에 따라 상기 2곳의 사업장에 대한 실태조사를 진행하였다.

표 11. 유의물질 의심 사업장 실태조사 업체정보

업체명	원료물질	생산제품
유의물질 의심 사업장 A	목걸이 부자재	목걸이
유의물질 의심 사업장 B	인산석고	비료

3.2. 실태조사·분석 방법

실태조사 대상으로 확정된 사업장에 대한 원활한 실태조사 수행을 위하여, 조사에 대한 사항을 유선으로 안내하고 협조공문 발송을 진행하였다. 다만, ’17년 실태조사 예정으로 공문이 기(旣) 발송되었던 수처리 업체에 대해서는 기존 공문으로 갈음하였으며, 비료 생산에 의한 유의물질 의심 사업장은 원안위의 사전안내에 따라 실태조사를 진행하였다. 발송한 협조공문에는 실태조사 시 수행할 항목이 기술되어 있으며, 사전 유선안내 시에도 충분하게 설명하였다.

3.2.1. 원료물질 및 공정부산물 취급현황 조사

실태조사 시 우선 업체가 취급하는 원료물질 및 공정부산물에 대한 현황(취급수량, 유통현황 등) 파악이 진행된다. 이때 해당 물질이 생활방사선법에서 정하는 취급자 및 등록제조업자의 등록기준 방사능 농도와 연간 취급 방사능량을 초과하는지 확인하였다. 이에 따라 기준을 초과할 경우 등록안내도 병행된다.

해당 내용에 대해서는 업체 담당자에게 관련 자료를 미리 준비하도록 요청하였다. 또한 협조공문과 함께 발송한 사전조사서의 회신 내용을 숙지하여 현장에서 소요되는 시간을 최소화함으로써 본 조사의 효율성을 높이고자 하였다.

3.2.2. 종사자 작업공정 및 근무형태 파악

원료물질 및 공정부산물을 취급함으로써 종사자에게 방사선 관련 안전관리가 필요한지에 대한 확인이 필요하다. 따라서 기본적인 피폭방사선량 평가를 위하여 각 업체에 대한 작업공정 및 종사자 근무형태를 조사하였다.

전반적인 작업공정에 대한 사항은 주로 업체 담당자가 제공하는 서면자료나 구두설명을 통해 파악하였다. 이후 담당자의 안내에 따라 실제 작업장에 접근하여 작업공정을 상세하게 확인하는 과정을 거쳤다. 원료물질을 취급하거나 공정부산물이 발생하는 정확한 근무형태(근무방식 및 공정 접근시간 등)는 공정별로 상이하므로, 실제로 작업을 수행하는 종사자에게 별도로 질의하기도 하였다.

조사대상 중 일부 업체는 취급물질에서 방사선량률 증가가 나타나지 않거나, 더 이상 취급계획이 없는 소량의 물질만 보관하는 경우(제한적 접근)가 있었다. 이러한 경우, 상기 작업공정 및 근무형태 파악은 생략하였다.

3.2.3. 사업장 내 작업환경 분석

천연방사성핵종이 함유된 원료물질 및 공정부산물을 취급하는 작업에 의해 종사자는 방사선에 의한 피폭을 받을 수 있으며, 이에 따라 사업장 내 작업환경을 분석하였다. 먼저, 작업공정 파악과 동시에 휴대용 GM 방사선량률 측정기 Radeye B20(Thermo 社)을 이용하여 공정지역 및 종사자 접근지역 등에 대한 방사선량률(표면 및 공간)을 측정하였다. 또한 분진으로 인한 내부피폭 우려가 있는 지점에서는 광학입자계수기(OPC; optical particle counter)를 이용하여 작업장 내 분진 농도를 측정하였다. 이때는 입도별 농도를 측정할 수 있는 OPC 장비인 Modell 11-R(GRIMM 社)이 사용되었다.

그림 3. 방사선량률(좌) 및 공기 중 분진 농도(우) 측정

라돈(^{222}Rn)은 기체 형태의 천연방사성핵종으로 자연적으로 어디나 존재하는 방사성물질이며, 일반적으로 받는 방사선피폭의 50% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있다(UNSCEAR 2000). 또한 IAEA에서는 수처리 시설의 실내라돈 농도가 작업장의 최고치인 1,000 Bq/m^3를 초과할 수 있음을 명시하고 있다(IAEA 2006). 따라서 수처리 업체의 경우에는 라돈에 대한 측정·분석을 추가로 수행하였다. 해당 라돈 측정 시, 분석 지점을 결정하기 위한 스크리닝 용도로는 RAD-7(Durridge 社, 미국)을 사용하였으며, 실제 종사자 피폭방사선량은 선정된 지점에 3개월 비치하여 회수된 Raduet(Radosys 社, 헝가리)을 사용하였다.

그림 4. 수처리 시설 내 취수정의 라돈 농도 측정 : RAD-7(좌) 및 Raduet(우)

3.2.4. 방사능 농도 분석

업체가 취급하는 원료물질 또는 공정부산물의 방사능 농도는 취급자 및 등록제조업자 등록기준을 초과할 경우 해당 등록을 위한 안내 및 검토 자료로 필요하다. 또한 필요에 따라 종사자 내부피폭 선량평가 시 입력인자로 사용된다.

기존 취급자의 유통현황 보고 등을 통해 취급여부를 확인한 원료물질 취급 사업장에 대해서는, 해당 취급자의 등록서류를 확인함으로써 방사능 농도 확인이 가능하였다. 다만 일부 유의물질 및 공정부산물 발생 사업장에 대해서는 취급 물질에 대한 추가적인 방사능 농도 확인이 필요한 경우가 있었으며, 이 경우 감마분광분석이 진행되었다.

해당 분석 시 시료를 계측용기(D6H4)에 충진 및 밀봉하여 3주 이상의 방사평형 과정을 거쳤다. 이후 고순도 게르마늄 검출기(HPGe)로 측정하고, 다음의 산출식을 이용하여 방사능 농도를 계산하였다.

$$\text{방사능 농도}(Bq/g) = \frac{\text{순계수}(count)}{\text{질량}(g) \times \text{효율} \times \text{감마선 방출확률} \times \text{계측시간}(s)}$$

수처리 업체 폐필터의 경우, 분석 핵종이 ^{210}Pb임에 따라 저에너지 감마선(46.5 keV)에 대한 분석을 수행해야 한다. 이때 시료 자체적으로 감마선을 흡수하는 자기흡수효과(self absorption effect)를 보정하는 작업을 추가로 진행하였다.

3.2.5. 종사자 피폭방사선량 평가

실태조사의 중요한 목적 중 하나는 종사자가 원료물질·공정부산물을 취급하거나 공정부산물이 발생되는 공정 주변에서 근무함으로써 받게 되는 피폭방사선량을 객관적, 정량적으로 평가하는 것에 있다.

외부피폭 방사선량 평가를 위하여 아래 산출식을 사용하였다. 측정선량률은 근무자의 노출시간이 긴 지점의 값이 주로 적용되며, 필요한 경우 여러 지점에서의 피폭방사선량을 합산하였다. 계산 시 배경방사선에 의한 피폭선량 기여분은 제외된다.

$$\text{외부피폭 방사선량}(mSv/y) = \frac{(\text{측정선량률} - \text{배경선량률})(\mu Sv/y) \times \text{연간 작업시간}(h/y)}{1{,}000}$$

내부피폭 방사선량 평가를 위해서는 IMBA(Integrated Modules for Bioassay Analysis) Professional Plus 코드를 사용하였다. 해당 전산코드는 ICRP-66의 호흡기 모델 및 ICRP-30의 GI 경로 모델 등을 사용한 해석적 방법으로 계산을 수행한다. 입력 값으로는 OPC를 분석하여 얻은 공기역학적 방사능 중간직경(AMAD; Activity Median Aerodynamic Diameter), 직경 분포에 따른 분산(GSD; Geometric Standard Deviation) 및 방사성핵종별 공기 부피 당 방사능 농도 등 실태조사를 통해 확인한 값과 물질안전보건자료(MSDS) 등 문헌 정보를 통해 얻은 값을 사용하였다.

수처리 업체의 경우 라돈에 의한 피폭선량도 분석하였다. 이 경우 Raduet으로 측정한 라돈 농도(C_{Rn}), 업체 담당자로부터 파악한 공간별 연간 점유시간(T)과 선량환산인자(DCF) 및 평형인자(F)를 바탕으로 공간별 피폭방사선량을 계산하였다.

$$E = C_{Rn} \times F \times T \times DCF$$

E : 라돈에 의한 피폭방사선량 (mSv/y)
C_{Rn} : 측정된 라돈의 농도 (Bq/m^3)
F : 평형인자
T : 연간 점유시간 (h)
DCF : 라돈 선량환산계수 (20.4×10^{-6} mSv·Bq^{-1}·h^{-1}·m^3)

3.3. 실태조사·분석 결과

3.3.1. 원료물질 취급 사업장

원료물질 취급 사업장 A-D에 해당하는 4곳은 모두 저어콘을 이용하여 도형제를 생산하고, 이를 주물(casting) 제조업체에 납품하는 방식의 업체였다. 도형제란 내부가 비어있는 거푸집(주형)에 쇳물을 담아 주물을 제조할 때, 거푸집의 가장 안쪽 면을 매끄럽게 하기 위한 코팅 목적으로 사용되는 물질(제품)을 말한다. 따라서 입자가 곱고 열에 강한 저어콘이 도형제의 주원료로 사용된다.

각 업체마다 도형제에 포함되는 저어콘의 비율(45-85%)은 상이하나, 기본적인 원료는 저어콘 + 물 + 첨가제(소량)의 형태로 동일하였다. 또한 원료물질을 구입·보관하고 기타 재료와 혼합 및 교반 과정을 거친 뒤, 포장하여 출하하는 단순한 형태의 생산 공정을 가지고 있었다. 따라서 제품생산 시 별도의 부산물은 발생하지 않는다.

원료물질 취급사업장 E와 F는 앞서 기술한 4곳과는 달리 주물을 최종제품으로 생산하는 업체였다. 해당 업체는 도형제를 외부에서 납품받지 않고 직접 제조하여 사용하는 방식을 취하고 있었으며, 기본적인 제품생산 공정은 아래와 같다.

① 부재료와 혼합하여 도형제 제조
② 제품형태의 몰드(왁스)를 도형제에 담가 코팅 후 건조
③ 거푸집 주성분(모래 등)으로 코팅 및 건조 (수차례 반복하여 두께 및 강도 증가)
④ 열처리하여 거푸집 내부의 왁스 탈락
⑤ 소성된 거푸집에 쇳물을 부어 굳힘
⑥ 절단 등의 과정으로 거푸집 제거하여 주물제품 완성

위와 같은 방법으로 생산된 주물에는 저어콘이 함유되지 않으며, 산업폐기물로 처리되는 거푸집(폐주물)에는 소량 함유되는 것을 예상할 수 있다. 도형제는 거푸집 안쪽 면에 코팅되며, 저어콘이 함유되지 않은 모래 등 다른 원료가 거푸집의 대부분을 차지하기 때문이다. 해당 폐주물에 대한 방사선량률 측정결과 배경준위 수준에서 크게 벗어나지 않음을 확인하였다.

원료물질 취급 사업장 G와 H는 저어콘을 유약의 원료로 사용하는 업체였다. 구체적으로 사업장 G는 건축자재(타일, 위생도기, 기와 등) 생산 시 사용되는 세라믹 소재인 프리트(frit)와 유약(glaze)을 제조 및 판매하는 업체이다. 프리트는 산화물 원료(점토, 석회석 등)를 고온(1,500-1,600℃)에서 용융하여 과립의 유리질 상태(유리가루 형태)로 만든 고체 유약이다. 반면, 일반적으로 유약이라 함은 프리트와 각종 천연광물을 혼합하여 도자기나 타일의 표면을 피복(coating) 시키기 위해 사용되는 액상의 물질을 말한다.

프리트의 주원료는 SiO_2(약 60%)이며, 저어콘(약 10%), 붕사, 석회석, 아연 등이 소량 첨가된다. 여기서 저어콘은 프리트(또는 프리트가 적용된 제품)가 백색을 나타내도록 하는 목적으로 사용된다. 해당 프리트 제품은 상기 다양한 원료를 일정한 비율로 배합하여 혼합한 뒤, 용융 및 냉각 공정을 거쳐 생산된다.

사업장 H는 건물 외장재나 욕실 내장재 등의 타일제품을 최종적으로 제조하는 업체로, 위 업체 G와 마찬가지로 백색을 나타내기 위한 유약의 원료로 저어콘을 사용한다. 저어콘은 사업장 내 유약장에서 타 원료와 혼합되며, 점토 등으로 만들어진 반제품 상태의 타일에 시유(유약 도포)된 후 소성과정을 거쳐 최종 타일제품이 완성된다.

원료물질 취급 사업장 I는 실태조사 대상 중 유일하게 압전 세라믹 제품을 만드는 업체였다. 압전효과(piezoelectric effect)란 특정 물질을 매개로 기계적 에너지와 전기적 에너지가 상호변환 되는 현상을 말한다. 즉, 압력이나 진동을 가하면 전기가 발생하고, 전기를 흘려주면 진동이 발생하는 효과이다.

해당 업체는 제품의 주원료로 산화납(80%)과 저어콘(18%)을 사용하며, 알루미나 등 기타 원료를 소량 첨가한다. 압전 세라믹 제품은 정해진 비율에 맞게 원료를 혼합하고, 탈수, 건조, 분쇄, 하소(열처리 후 건조분말 제조), 재혼합, 분무건조의 과정을 거쳐 생산된다.

상기 9개 사업장의 제품생산 공정을 파악하면서 방사선량률 측정을 병행하였다. 이때 원료물질, 공정설비 또는 제품 등의 1 m 거리에서 측정을 수행하였다. 보수적인 평가를 위해 종사자는 피폭방사선량이 가장 높을 것으로 예상되는 작업지점에서 작업시간 동안 측정대상 1 m 거리를 유지하는 것으로 가정하였다. 이에 따라 외부피폭 방사선량 평가에 선정된 위치에서의 측정결과를 정리하면 **표 12**와 같다.

표 12. 원료물질 취급 사업장 방사선량률 측정결과 (측정대상 1 m 거리)

업체명	측정 위치	작업 내용	방사선량률 (배경준위) (μSv/h)
사업장 A	적재제품 (도형제)	제품포장	0.57 (0.18)
사업장 B	원료물질 (저어콘)	투입 및 포장	0.30 (0.11)
사업장 C	원료물질 (저어콘)	투입	0.62 (0.17)
	적재제품 (도형제)	포장	0.41 (0.17)
사업장 D	원료물질 (저어콘)	투입	0.29 (0.16)
	적재제품 (도형제)	포장	0.31 (0.16)
사업장 E	도형제 탱크	믹싱	0.40 (0.16)
사업장 F	원료물질 (저어콘)	투입	0.56 (0.16)
사업장 G	원료물질 (저어콘)	투입	0.50 (0.18)
사업장 H	원료물질 (저어콘)	투입	0.53 (0.20)
사업장 I	필터프레스	탈수	0.39 (0.24)

앞서 언급한 바와 같이 원료물질 취급 사업장 실태조사 대상은 취급자의 유통현황 보고를 분석하여 선정된 경우였다. 따라서 사용하는 원료물질의 농도는 이미 파악한 상태로 방사능 분석은 생략하였다. 또한 대부분의 사업장에서 원료를 단순 혼합하여 제품을 생산하였기 때문에 별도의 부산물도 발생하지 않았다. 다만 주물 생산업체 두 곳 중, 배경준위 대비 방사선량률의 증가가 미미하게 나타난 E사의 폐주물(표면 10 ㎝ 거리에서 0.27 μSv/h)에 대하여 시료채취 및 방사능 분석을 수행하였다. 그 결과 방사평형된 ^{226}Ra (^{238}U 계열)이 0.36 Bq/g으로 평가되어 생활방사선법에 따른 공정부산물 정의기준(0.5 Bq/g)에도 미치지 못함을 확인하였다.

표 13. 원료물질 취급 사업장 종사자 최대 피폭방사선량

업체명	최대 피폭방사선량 (mSv/y)		
	외부	내부	합계
사업장 A	0.20	0.013	0.21
사업장 B	0.089	0.030*	0.12
사업장 C	0.13	0.0054*	0.13
사업장 D	0.030	0.020*	0.050
사업장 E	0.19	0.024	0.21
사업장 F	0.081	0.00044	0.081
사업장 G	0.050	0.00053	0.051
사업장 H	0.043	0.00081	0.044
사업장 I	0.023	0.00048	0.023

* 생산중단 또는 작업완료로 인하여, 사업장 A에서의 분진 농도 측정값으로 갈음

표 13에는 종사자 피폭방사선량 평가결과를 나타냈다. 외부피폭 방사선량은 앞서 기술한 작업장 내 방사선량률 측정결과와 해당 위치에서의 종사자 작업시간을 고려하여 도출되었다. 또한, 종사자 작업지역에서 광학입자계수기로 측정한 공기 부피당 분진 농도(μg/L)와 원료물질의 방사능 농도(Bq/g)를 활용한 내부피폭 방사선량 평가도 수행하였다. 다만 사업장 B, C, D의 경우, 경기 하락으로 인하여 생산을 중단하거나 조사당일 작업이 완료됨에 따라, 사업장 A에서의 측정값으로 분진 농도를 갈음하였다. 도형제 생산업체 중 사업장 A의 규모가 가장 크고, 실제 원료투입 시 발생하는 공기분진을 측정하였으므로 보수적인 평가가 적용된 것으로 판단하였다.

원료물질 취급 사업장 종사자에 대한 피폭방사선량은 내·외부 합계 연간 최대 0.21 mSv로 평가되었다. 이는 종사자 선량한도(연평균 20 mSv)의 약 1.1%에 해당하는 수준으로 상기 9곳 사업장의 종사자에 대한 추가적인 방사선 관련 안전관리는 필요하지 않은 것으로 판단하였다.

3.3.2. 유의물질 발생 사업장

유의물질 발생 사업장 A는 이전 장에서 다룬 원료물질 취급 사업장 H와 동일한 방식으로 저어콘을 취급하는 사업장이었다. 다만, 취급하는 저어콘의 일부를 외국에서 수입함에 따라 공항·항만 감시기의 경보를 발생시킨 경우였다. 현장에서 채취한 해당 시료를 분석한 결과 방사능 농도는 ^{226}Ra(^{238}U 계열)이 5.27 Bq/g으로 나타났다. 그 외 실태조사 시 수행한 내용은 타일제조 원료물질 취급 사업장과 동일하며, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

타일제품 생산 공정에서 방사선피폭을 고려할 작업은 유약장에서의 원료물질 투입 공정이다. 이때 원료물질(저어콘) 1 m 거리에서 측정된 방사선량률은 0.70 μSv/h 정도였으나, 취급시간이 길지 않아 이로 인한 외부피폭 방사선량은 연간 0.028 mSv에 불과하였다. 또한, 해당 지역에서의 내부피폭 방사선량은 연간 0.00031 mSv로 계산되어, 내·외부 피폭을 합산한 총 피폭방사선량은 연간 최대 0.028 mSv로 평가되었다.

유의물질 발생 사업장 B는 염화지르코니아(Zirconium oxychloride) 및 ZBC(Zirconium basic carbonate)라는 물질을 중국에서 수입하고, 해당 물질을 사업장 내 화학공정을 통하여 Zirconium tetrahydroxide 등의 다양한 저어콘 화합물로 만드는 업체였다. 공정 시에는 생산 지시서에 준하여 원·부자재가 투입되며, 용해 및 합성, 반응 등을 거쳐 최종 저어콘 화합물이 완성되며, 별도의 부산물은 발생하지 않는다. 해당 실태조사는 상기 2종의 원료 중 염화지르코니아 수입 시 감시기의 경보가 발생함에 따라 진행되었다.

국내에서 주로 취급하는 저어콘은, 그 조성의 차이 없이 물리적인 분쇄도(입자크기)에 따라 저어콘 샌드(sand), 저어콘 플라워(flour) 및 저어콘 실리케이트(silicate) 등으로 불리며, ^{238}U 계열의 천연방사성핵종이 불순물의 형태로 존재하고 있다. 반면 상기 염화지르코니아는 호주산 저어콘 샌드를 중국 업체가 수입하여 화학공정을 거쳐 분리한 제품으로, 사업장 B는 일반적인 저어콘이 아닌 이 제품을 수입한 것이다.

실태조사에 참여했던 업체 담당자에 따르면, 상기 염화지르코니아는 과거부터 지속적으로 수입하여 제품생산에 사용해오던 물질이며, 해당 감시기 경보가 최초의 사례임을 밝혔다. 또한 해당 수입물량에는 화학공정에서 완전히 분리되지 않은 일부 불순물이 함

유된 것으로 추정하였다. 이에 따라 사업장 B는 자체적으로 방사선량률 측정기를 구입하여 이후 수입 물량에 대한 추가검수를 진행하고 있으며, 중국 거래처에도 방사선이 측정되지 않는 제품의 수출을 지속적으로 요청하고 있었다.

현장 실태조사 당시 사업장 B는 제품생산 계획에 따라 수입한 염화지르코니아 20 ton 중 19 ton은 투입하였으며, 나머지 1 ton은 실태조사를 위하여 보유 중이었다. GM 측정기로 확인한 결과, 해당 염화지르코니아의 표면 및 주변은 배경준위 대비 방사선량률의 증가가 전혀 나타나지 않았다. 이에 따라 수입된 염화지르코니아는 화학공정(중국)을 통해 ^{238}U 계열의 천연방사성핵종이 제거된 원료임을 확인할 수 있었다.

제품 생산 시 이미 투입된 염화지르코니아는 방사성핵종이 함유되지 않은 다른 재료와 희석되어 제품화되고, 이를 납품받은 업체의 경우에도 자사제품 생산 시 첨가제 등으로 사용하는 것으로 조사되었다. 또한 해당 경보발생 물량을 제외하면 기본적으로 염화지르코니아는 방사능을 포함하고 있지 않으므로, 최종제품에 대한 추가적인 조사는 필요하지 않은 것으로 판단하였다. 업체가 취급하는 다른 저어콘 화합물에도 배경준위 대비 방사선량률 증가가 나타나지 않아 종사자에 대한 피폭선량평가는 생략하였다.

유의물질 발생 사업장 C는 반제품 형태의 온열방석 부자재를 수입하여 온열방석 완제품을 제조(임가공)한 후 해외로 수출(홍콩)하는 업체였다. 수입한 부자재는 **그림 5**와 같이 부직포 내부에 작은 알갱이 모양의 '고온소결 광물질 황토볼' 을 삽입 후 봉제된 형태였다. 해당 반제품은 수입·통관 후 외주 임가공업체로 보내지고, 전열선과 부직포, 면직섬유 부자재와 결합하는 봉제 과정을 거쳐 완제품으로 마감되는 것으로 조사되었다.

그림 5. 반제품 온열방석

업체의 수입내역을 확인한 바에 따르면, 수입량은 ’18년 하반기부터 ’19년 상반기까지 250 kg 씩 5차례에 걸쳐 총 1,250 kg에 불과하였으며, 생산된 완제품은 전량 수출완료 상태였다. 실태조사를 위하여 업체가 남겨 놓은 부자재의 방사선량률을 측정한 결과, 표면에서는 0.63 μSv/h 정도였으나, 50 cm만 이격해도 배경준위 수준으로 감소하였다. 또한 해당 반제품을 앞서 언급한 수입 경우에만 제한적으로 취급한 것을 고려하면, 종사자가 받는 피폭은 무시할 수 있는 수준인 것으로 판단하였다. 이에 더하여 사업장 C는 향후 해당 부자재를 취급할 의사가 없음을 밝힘에 따라 피폭선량평가는 생략하였다.

유의물질 발생 사업장 종사자에 대한 피폭방사선량은 사업장 A에 한해서만 내・외부 합계 연간 최대 0.028 mSv로 평가되었다. 이는 종사자 선량한도(연평균 20 mSv)의 약 0.14%에 불과한 수준이고, 나머지 사업장의 경우는 앞서 언급한 바와 같이 무시할만한 수준으로 판단하였다. 이에 따라 상기 3곳의 사업장 종사자에 대한 추가적인 방사선 관련 안전관리는 필요하지 않은 것으로 판단하였다.

3.3.3. 공정부산물 발생시설 (수처리)

수처리 업체는 먹는샘물 제조 시 지하수를 취수, 원수저장, 여과, 살균하는 작업을 진행한다. 지하수 여과를 위해서는 주로 필터를 사용하고, 살균 목적으로는 주로 자외선(UV) 램프가 이용된다. ’19년 실태조사가 진행된 수처리 업체 1곳도 상기 공정은 거의 동일하였다. 여기서 필터의 종류는 다른 재질 혹은 동일한 재질이지만 공극이 다른 필터가 사용되었다. 공극이 큰 필터를 공정의 앞단에, 공극이 작은 필터를 공정 뒷단에 설치하여 불순물이 입경에 따라 단계적으로 제거되도록 수처리 공정을 운영하고 있었다.

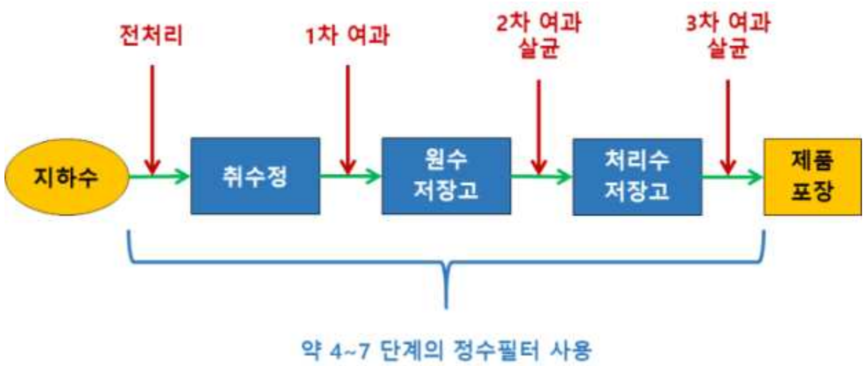


그림 6. 수처리업체 먹는샘물 제조 공정 개략도

과거 실태조사 경험을 바탕으로 조사대상 업체에 대해 중점적으로 확인해야 하는 필터는 원수 저장조 뒷단의 두 종류 전처리 필터였다. 해당 업체는 1.2 ㎛와 0.65 ㎛ 공극의 1차·2차 전처리 필터를 사용하였으며, 6개월 주기로 교체하며 각각 연간 160개씩의 필터를 사용하였다. 방사선량률은 필터하우징 표면 10 cm 거리에서 각각 0.57 μSv/h와 0.35 μSv/h로 측정되었다. 다만, 정수실 내의 필터는 서로 인접해 있어 독립적인 측정은 불가능한 상태였다.

그림 7. 수처리 업체의 정수실 내부

실태조사는 필터 교체주기에 맞춰 진행하였으므로 상기 두 종류의 필터를 시료로 확보할 수 있었다. 해당 시료에 대한 방사능 농도 분석결과, 관정에서 지하수와 함께 배출된 것으로 추정할 수 있는 라돈(^{222}Rn)의 붕괴핵종인 ^{210}Pb이 각각 0.290 Bq/g과 0.336 Bq/g으로 평가되었다. 이에 따라, 해당 폐필터는 생활방사선법상 공정부산물 농도의 정의기준(0.5 Bq/g)에 미치지 못함을 확인할 수 있었다.

수처리 업체에서 종사자에 대한 방사선피폭을 고려해야 할 작업은 정수실에서의 필터 교체작업 정도이다. 해당 종사자에 대한 피폭방사선량(라돈 제외)은 내·외부 합계 연간 최대 0.0039 mSv로 평가되었으며, 이에 따라 추가적인 방사선 관련 안전관리는 필요하지 않은 것으로 판단된다.

앞서 언급한 바와 같이 수처리 업체에 대해서는 추가적인 실내라돈 측정이 진행되었다. 해당 업체는 총 3개의 취수정으로부터 지하수를 끌어올리고 있었으며, 이곳의 라돈

농도는 3개월 평균 1,944 Bq/m^{3}로 상대적으로 높은 값을 보였다. 이는 지하수가 존재하는 대수층 및 토양으로부터 방출되는 라돈이 취수설비를 통해 지면 위로 함께 올라온 후, 좁은 폐쇄상태의 해당 취수정 공간에 축적되기 때문인 것으로 판단된다. 반면 두 곳의 정수실은 평균 152 Bq/m^{3}로 측정되었다. 다만 해당 공정지역에서는 채수, 필터교체, 청소 작업 정도만 진행되고, 특히 라돈농도가 상대적으로 높은 취수정에서는 상주시간이 연간 4.3시간 정도로 극히 짧은 것으로 확인되었다. 따라서 취수정과 정수공정에서의 작업을 모두 합쳐 평가한 피폭방사선량은 0.21 mSv/y에 불과하였다.

3.3.4. 유의물질 의심 사업장

유의물질 의심 사업장 A는 화산석인 돌솟(화산송이)을 원료로 하여 주로 벽돌 등 건축 자재를 생산 및 판매하는 업체였으며, 거래처로부터 약 1 ton의 목걸이 제작용 비즈(구슬)를 구매하여 보관 중이었다. 다만 해당 거래는 ’15년 이전의 일이었고, 그 이후 제품화 과정 없이 창고에 보관만 하고 있는 상태였다. 또한 당시 비즈를 판매한 업체는 이미 폐업상태 임이 확인됨에 따라 해당 업체에 대한 추가적인 조사는 진행하지 않았다.

사업장 A가 개별적으로 분석기관에 의뢰하여 확인된 상기 비즈의 방사능 농도 분석결과에 따르면 우라늄은 0.175 Bq/g, 토륨은 1.29 Bq/g였으며, 비율로 볼 때 이는 해당 비즈에 모나자이트가 일부 포함된 것으로 추정해 볼 수 있다. 다만, 보유하고 있는 비즈 표면에서는 방사선량률이 최대 0.3 μSv/h에 불과하였으며, 현재 밀봉된 상태로 직접적인 취급 계획이 없었다. 이러한 사항을 고려하여 종사자에 대한 피폭방사선량 평가(외부 및 내부)는 수행할 필요가 없으며, 추가적인 방사선 관련 안전관리는 필요하지 않은 것으로 판단하였다.

앞서 언급한 바와 같이 ’19년도에 개정된 생활방사선법은 제조업자로 하여금 신체에 착용하거나 장시간 신체에 밀착되어 사용되는 제품에 원료물질 또는 공정부산물을 사용하는 것을 금지하고 있다. 이에 따라 사업장 A는 방사능 농도 분석결과를 바탕으로 해당 비즈가 목걸이 제품 등에 사용될 수 없다는 내용을 파악하였으며, 또한 향후에도 사용할 계획 및 의사가 없음을 밝혔다. 이는 과거 모나자이트 등을 사용하여 문제시 되었던 다양한 생활 제품이 시장의 자정작용을 통하여 퇴출되고 있음을 의미하는 긍정적인 사례로 평가된다.

유의물질 의심 사업장 B에서 생산 중인 비료제품의 주원료는 인산석고(85% 이상)이며, 나머지 대부분은 당밀로 가루형태의 인산석고를 결정형태로 성형하기 위한 용도로 투입된다. 또한 최종제품에는 분진 발생을 막기 위해 코팅제를 1% 미만으로 첨가하는 것으로

파악되었다. 상기 원료는 화학공정 없이 물리적인 혼합만 이루어지므로, 공정 과정에서 제품에 방사능이 농축될 개연성은 낮은 것으로 실태조사 시 판단하였다.

실제 각 공정별 방사선량률을 측정한 결과, 모든 원료와 공정설비 및 완제품에서 배경준위 대비 방사선량률의 증가는 나타나지 않았다. 이에 따라 공정에 의한 종사자 외부피폭 선량평가는 진행하지 않았으며, 공기분진 입자포집을 통한 내부피폭 선량평가 역시 생략하였다.

조사한 바에 따르면 사업장 B에서 원료로 사용 중인 인산석고는 생활방사선법에 따라 취급자로 등록되어 있는 인산염 비료 생산업체에서 발생한 부산물이었다. 해당 인산석고에 대해서는 '18년도에 실태조사를 진행한 바 있는데, 적치장의 공간방사선량률은 배경준위 수준이었으며, 방사능 농도는 모두 0.4 Bq/g 정도로 확인되었다.

추가적인 확인을 위하여 사업장 B에서 사용하는 원료(인산석고) 및 비료제품 시료를 채취하여 KINS에서 분석하였으며, 그 결과 ^{226}Ra(^{238}U 계열)의 방사능 농도가 각각 0.41 Bq/g 및 0.45 Bq/g로 평가되었다. 이 값은 모두 생활방사선법에 따른 공정부산물 정의기준(0.5 Bq/g)에 미치지 못하는 값이다.

실태조사 수행 이후, 조사대상 선정 단계에서 보고된 방사능 농도 결과(3.92 Bq/g)에 오류가 존재했음이 분석기관에 의해 발견되었으며, 해당 기관은 ^{238}U 계열 방사능 농도를 0.46 Bq/g로 정정하여 이를 다시 공유하였다. 이에 따라 사업장 B에 대해서는 취급자 등록이나 방사선 관련 안전관리가 필요하지 않다는 점이 재확인되었다.

4. 가공제품 실태조사

4.1. 조사제품 취득 및 종류

가공제품 실태조사에서는 총 513개 제품에 대한 방사능 농도분석 및 피폭선량평가를 수행하였다. 조사제품은 업체제공 329개, 일반인제공 108개, 직접구매 42개, 타기관의뢰 34개의 네 가지 방법으로 취득하였다. 일반인제공은 생활방사선 기술지원센터(콜센터)를 통해 결함의심제품을 제보한 일반인들에게 해당제품을 직접 제공받았으며, 업체제공은 업체 자체제공 또는 현장조사를 통해 제품을 취득하였다.

취득경로별 주요 제품 종류는 업체제공 제품의 경우 매트리스 90개, 속옷 80개, 전기매트 35개, 베개, 온열매트, 라텍스 매트리스 등이었으며 일반인제공 제품은 속옷 70개, 타올 6개, 담요, 전기매트, 베개, 패드 등이었다. 직접구매 취득 돌침대 28개, 속옷 14개이며 타기관의뢰 제품은 식품의약품안전처의 온열매트 17개, 경찰서의 장신구 10개, 한국소비자원의 라텍스 매트리스 등이었다.

조사제품들은 유사한 사용특성 또는 형태에 따른 피폭상황을 고려하여 크게 9개 대분류와 27가지 세부 제품군으로 분류하였다. 주요 제품군으로는 매트리스 91개, 슈트형 속옷 51개, 전기매트 39개, 온열매트 36개 등이었다.

표 14. 가공제품 조사제품 분류

대분류	제품군	제품 수(개)
매트리스류	일반	91
	라텍스	19
침대류	돌침대	33
	흙침대	3
침구류	베개	34
	이불	22
매트류	전기매트	39
	온열매트	36
	온수매트	3
패드류	-	15
소파류	-	5

속옷류	슈트	51
	팬티	33
	레깅스	30
	쉐이퍼	21
	브래지어	13
	거들	12
	밴드	3
	런닝	1
장신구류	벨트	12
	목걸이	9
	팔찌	4
	발찌	2
	조끼	2
기타	타올, 천	9
	지압용품	6
	담요	5
계		513

4.2. 방사능 측정 · 분석 및 피폭선량평가

취득한 제품들은 제품 사용에 의한 피폭선량을 평가하기 위해 제품에 함유되어 있는 천연방사성핵종의 방사능 농도를 측정·분석하였다. 제품에 의한 피폭은 내부피폭과 외부피폭의 두 가지 경로를 고려하였으며 내부피폭은 라돈(^{222}Rn)과 토론(^{220}Rn)의 측정결과, 외부피폭은 ^{238}U과 ^{232}Th의 분석결과를 이용하여 평가하였다.

라돈 및 토론의 측정은 능동형 측정기기(RAD-7, Durridge 社)을 이용하였으며 측정을 위한 별도의 전처리과정 없이 제품의 원형태 그대로를 측정하였다. 측정위치·높이 및 시간은 제품에 따라 내부피폭평가를 위해 수립된 제품별 시나리오를 적용하였다. 측정된 라돈·토론 농도(Bq/m^3)는 계산식에 의해 내부피폭선량(mSv/y)으로 환산하였다.

$$\text{내부피폭선량}[mSv/y] = \text{농도}[Bq/m^3] \times \text{평형인자} \times \text{사용시간}[h/y] \times \text{선량환산인자}[mSv/(Bq{\cdot}h/m^3)]$$

평형인자 : 라돈 0.4 (^{222}Rn 대비 약 40% 딸핵종이 존재)
토론 0.04 (^{220}Rn 대비 약 4% 딸핵종이 존재)

선량환산인자 : 라돈 20.4×10^{-6} mSv/(Bq·h/m^3)
토론 120×10^{-6} mSv/(Bq·h/m^3)

^{238}U과 ^{232}Th은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Agilent 社)를 이용한 직접측정방법과 감마분광분석기(HPGe, Ortec 社)를 이용한 간접측정방법의 두 가지 방법으로 분석하였다. 직접측정방법은 제품시료를 550℃에서 강열회화한 회분을 700℃-1200℃에서 용융하여 철공침 후 희석한 시료의 ^{238}U과 ^{232}Th을 질량분석기를 이용하여 방사능 농도를 구하였다. 간접측정방법은 제품시료를 분쇄하여 표준용기(직경 6 cm, 높이 4 cm)에 충진 및 밀봉하여 약 3주간 방사평형 시킨 후 ^{238}U과 ^{232}Th 딸핵종의 감마에너지를 측정하였다. 외부피폭선량(mSv/y)은 분석된 ^{238}U, ^{232}Th 방사능 농도(Bq/g)와 제품 1개당 무게(g), 피폭 시나리오의 사용부위 및 사용시간(h)을 적용하여 Geant4 기반으로 만들어진 피폭선량평가 프로그램으로 평가하였다.

그림 8. 가공제품 피폭선량평가 프로그램

4.3. 방사능 농도 및 피폭선량평가 결과

조사제품 총 513개 제품의 라돈·토론을 측정하였으며 411개 제품의 내부피폭선량을 평가하였다. 내부피폭평가에서 제외된 102개 제품은 제품의 사용위치가 호흡기에서 50 cm 이상 이격되어 섭취·흡입에 의한 내부피폭 가능성이 낮아 평가에서 제외되었다. 외부피폭평가는 각 제품군 중 내부피폭선량이 높은 제품 58개를 선정하여 ^{238}U과 ^{232}Th 농도를 분석하여 평가하였다.

피폭선량평가된 411개 제품 중 피폭선량 1 mSv를 초과한 제품은 68개 제품으로 일반 매트리스 17개, 전기매트 14개, 이불 8개, 패드 6개, 온열매트 6개, 베개 5개, 슈트형 속옷 4개, 담요 4개, 라텍스 매트리스 2개, 온수매트 1개, 소파 1개 제품이었다.

아래의 제품군별 분석·평가 결과는 제품명의 경우 "가(제조업체)-A(모델)-1(건)"의 순으로 표기하였으며 농도, 선량은 유효자리 3자리로 표시하였다. 라돈·토론 측정의 배경준위는 시료측정과 동시에 수회 측정하여 얻어진 평균값을 사용하였으며, 제품으로 인해 기여되는 농도가 없을 때, 즉, 측정값이 배경준위 이하인 경우는 "-"으로 처리하였다. 또한 내부피폭 가능성이 낮은 제품은 "평가제외"로 표기하였다.

4.3.1. 매트리스류 (일반 매트리스, 라텍스)

표 15. 매트리스 제품군 분석·평가 결과

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
1	가-A-1	10.4	-	0.116				
2	가-A-2	-	-	-				
3	가-A-3	4.51	-	0.0504				
4	가-A-4	10.0	-	0.112				
5	가-A-5	-	-	-				
6	가-A-6	-	72.3	0.475				
7	가-B-1	7.11	-	0.0794				
8	가-B-2	-	-	-				
9	가-C-1	-	379	2.49	0.204	2.05	0.134	2.62
10	가-C-2	21.4	-	0.239				
11	가-C-3	-	-	-				
12	가-C-4	-	-	-				
13	가-C-5	-	-	-				
14	가-C-6	-	89.1	0.585				

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
15	가－D－1	－	－	－				
16	가－D－2	－	－	－				
17	가－E－1	8.81	287	1.98	0.11	1.38	0.0573	2.04
18	가－E－2	－	58.6	0.385				
19	가－E－3	－	275	1.81				
20	가－E－4	－	112	0.737				
21	가－F－1	－	－	－				
22	가－F－2	－	－	－				
23	가－G－1	21.5	561	3.93	0.138	1.22	0.068	3.99
24	가－G－2	－	－	－				
25	가－G－3	－	－	－				
26	가－G－4	4.41	－	0.0493				
27	가－G－5	7.01	－	0.0783				
28	가－G－6	－	－	－				
29	가－G－7	－	－	－				
30	가－G－8	13.0	－	0.145				
31	가－G－9	－	－	－				
32	가－G－10	1.61	－	0.0180				
33	가－G－11	－	－	－				
34	가－G－12	－	－	－				
35	가－G－13	24.3	－	0.272				
36	가－G－14	－	－	－				
37	가－G－15	－	－	－				
38	가－G－16	24.3	－	0.272				
39	가－G－17	－	－	－				
40	가－G－18	3.91	－	0.0437				
41	가－G－19	－	－	－				
42	가－G－20	－	－	－				
43	가－G－21	－	－	－				
44	가－G－22	－	－	－				
45	가－G－23	－	－	－				
46	가－G－24	15.6	－	0.174				
47	가－G－25	14.4	627	4.28	0.223	2.00	0.156	4.44
48	가－G－26	12.7	－	0.142				
49	가－G－27	7.41	－	0.0828				
50	가－G－28	－	－	－				
51	가－G－29	5.56	58.37	0.446				
52	가－G－30	－	－	－				
53	가－G－31	－	－	－				
54	가－G－32	1.21	413	2.72				
55	가－G－33	－	219	1.44				
56	가－H－1	－	－	－				
57	가－H－2	－	－	－				
58	가－I－1	－	－	－				
59	가－J－1	－	－	－				

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
60	가-J-2	9.91	-	0.111				
61	가-J-3	33.9	347	2.66	0.210	2.16	0.115	2.78
62	가-J-4	-	-	-				
63	가-J-5	-	-	-				
64	가-J-6	13.3	358	2.50				
65	가-J-7	-	154	1.01				
66	가-K-1	-	-	-				
67	가-K-2	1.21	-	0.0135				
68	가-K-3	13.3	-	0.149				
69	가-K-4	-	-	-				
70	가-K-5	-	-	-				
71	가-K-6	-	-	-				
72	가-L-1	-	-	-				
73	가-L-2	-	-	-				
74	가-L-3	-	-	-				
75	가-L-4	-	-	-				
76	가-M-1	9.91	313	2.17				
77	가-M-2	28.4	308	2.34				
78	가-M-3	7.01	190	1.33				
79	가-M-4	-	194	1.28				
80	가-M-5	10.4	216	1.54				
81	가-M-6	1.31	214	1.42				
82	가-M-7	9.91	594	4.02	0.248	2.41	0.345	4.37
83	가-N-1	-	-	-				
84	가-N-2	-	-	-				
85	가-N-3	-	-	-				
86	가-N-4	-	-	-				
87	가-N-5	-	-	-	0.242	2.38	0.166	0.166
88	가-N-6	-	-	-				
89	가-N-7	-	-	-				
90	나-A-1	0.812	-	0.00907				
91	다-A-1	-	-	-				
92	라-A-1	0.850	159	1.05	0.128	1.55	0.202	1.25
93	라-A-2	-	51.0	0.335				
94	라-A-3	0.0663	91.5	0.602				
95	라-A-4	7.55	65.1	0.512				
96	라-A-5	12.0	80.9	0.666				
97	라-A-6	-	30.2	0.198				
98	라-A-7	2.49	29.0	0.219				
99	라-A-8	5.90	34.5	0.292				
100	라-A-9	1.86	15.0	0.119				
101	라-A-10	-	39.1	0.257				
102	라-A-11	-	22.7	0.149				
103	라-A-12	6.21	123	0.878				
104	라-B-1	0.261	56.0	0.370				

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
105	라-B-2	-	56.1	0.368				
106	라-B-3	16.9	681	4.67	0.143	1.61	0.200	4.87
107	라-B-4	1.09	2.48	0.0285				
108	라-B-5	4.65	-	0.0519				
109	라-C-1	-	23.9	0.157				
110	라-C-2	7.17	22.5	0.228				

4.3.2. 침대류 (돌침대, 흙침대)

표 16. 침대류 분석·평가 결과

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭 농도(Bq/m³) 라돈	내부피폭 농도(Bq/m³) 토론	내부피폭 선량 (mSv/y)	외부피폭 농도(Bq/g) ^{238}U	외부피폭 농도(Bq/g) ^{232}Th	외부피폭 선량 (mSv/y)	연간피폭선량 (mSv/y)
1	가-A-1	2.84	-	0.0317				
2	나-A-1	-	2.71	0.0178				
3	나-A-2	-	-	-				
4	나-B-1	-	12.5	0.0800				
5	나-B-2	4.64	14.7	0.150				
6	나-C-1	-	2.50	0.0200				
7	나-C-2	5.64	-	0.0600				
8	나-D-1	4.44	-	0.0500				
9	나-D-1	7.94	-	0.0900				
10	나-E-1	9.64	-	0.108				
11	나-E-2	-	-	-				
12	나-F-1	7.94	-	0.0887				
13	나-F-2	-	-	-				
14	나-G-1	4.04	-	0.0451				
15	나-G-2	0.341	-	0.00380				
16	나-H-1	0.940	-	0.0105				
17	나-H-2	-	-	-				
18	나-I-1	-	-	-				
19	나-I-2	-	-	-				
20	나-J-1	-	-	-				
21	나-J-2	-	-	-				
22	나-K-1	-	-	-				
23	나-K-2	-	-	-				
24	나-L-1	3.04	-	0.034				
25	나-L-2	-	-	-				
26	나-M-1	-	-	-				
27	나-M-2	4.04	-	0.0450				
28	다-A-1	-	4.92	0.0323				
29	라-A-1	-	-	-				
30	라-B-1	2.44	-	0.0273				
31	마-A-1	-	58.6	0.385				
32	마-B-1	-	58.2	0.382				
33	바-A-1	3.04	6.49	0.0766				
34	바-A-2	-	6.48	0.0426				
35	사-A-1	0.773	114	0.759				
36	아-A-1	-	35.5	0.233				

4.3.3. 침구류 (베개, 이불)

표 17. 침구류 분석·평가 결과

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
1	베개-가-A-1	12.9	-	0.144				
2	베개-나-A-1	0.0725	-	0.000810				
3	베개-다-A-1	1.01	1325	8.72	0.0731	0.687	0.0102	8.73
4	베개-다-A-2	-	522	3.43				
5	베개-다-B-1	79.2	3783	25.7	0.650	6.29	0.0345	25.7
6	베개-라-A-1	-	-	-				
7	베개-라-A-2	0.846	-	0.00944				
8	베개-라-C-1	2.12	2.31	0.0389				
9	베개-라-C-2	-	-	-				
10	베개-라-C-3	-	-	-				
11	베개-라-D-1	2.12	65.1	0.452				
12	베개-라-E-1	-	5.42	0.0356				
13	베개-라-F-1	0.198	5.57	0.0388				
14	베개-라-F-2	-	7.17	0.0471				
15	베개-라-F-3	2.08	-	0.0232				
16	베개-라-G-1	29.0	1447	9.83	0.732	5.57	0.119	9.95
17	베개-라-H-1	0.420	5.88	0.0433				
18	베개-라-H-2	-	-	-				
19	베개-라-H-3	3.18	-	0.0355				
20	베개-라-I-1	3.620	-	0.0405				
21	베개-라-J-1	-	59.4	0.390				
22	베개-마-A-1	-	-	-				
23	베개-마-A-2	-	-	-				
24	베개-마-B-1	-	-	-				
25	베개-마-C-1	1.86	-	0.0208				
26	베개-마-D-1	-	-	-				
27	베개-바-A-1	-	-	-				
28	베개-바-B-1	7.94	-	0.0886				
29	베개-바-B-2	11.9	-	0.133				
30	베개-바-B-3	-	-	-				
31	베개-바-B-4	2.64	-	0.0295				
32	베개-사-A-1	4.51	-	0.0504				
33	베개-아-A-1	7.16	102	0.753				
34	베개-자-A-1	8.92	368	2.52				
35	이불-가-A-1	5.81	297	2.02				
36	이불-가-A-2	5.61	294	1.99	0.0661	0.55	0.024	2.01
37	이불-가-A-3	25.7	430	3.11				
38	이불-가-B-1	-	-	-				
39	이불-가-B-2	-	0.552	0.00363				

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
40	이불-가-B-3	-	-	-				
41	이불-나-A-1	84.8	4225	28.7				
42	이불-나-B-1	-	217	14.2				
43	이불-다-A-1	11.5	-	0.129				
44	이불-다-A-2	11.5	-	0.129				
45	이불-다-A-3	-	-	-				
46	이불-다-A-4	4.82	7.06	0.100				
47	이불-라-A-1	-	0.552	0.00363				
48	이불-라-A-2	-	-	-				
49	이불-라-B-1	0.691	-	0.00771				
50	이불-라-B-2	-	-	-				
51	이불-라-C-1	-	-	-				
52	이불-라-D-1	1.94	-	0.0217				
53	이불-마-A-1	12	1956	13.0	0.0702	0.674	0.0153	13.0
54	이불-마-B-1	27.5	2397	16.1	0.357	3.68	0.0367	16.1
55	이불-바-A-1	9.97	67.3	0.553				
56	이불-바-A-2	11.4	303	2.12				

4.3.4. 매트류 (전기매트, 온열매트, 온수매트)

표 18. 매트류 분석 · 평가 결과

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
1	전기-가-A-1	4.77	12.8	0.137				
2	전기-가-A-2	3.67	-	0.041				
3	전기-가-A-3	14.9	8.84	0.224				
4	전기-가-A-4	-	2.69	0.0177				
5	전기-가-A-5	0.523	0.149	0.00682				
6	전기-가-A-6	-	12.8	0.0839				
7	전기-가-B-1	7.17	232	1.61				
8	전기-가-B-2	4.97	133	0.927				
9	전기-가-B-3	-	2.51	0.0165				
10	전기-가-C-1	5.12	105	0.744				
11	전기-가-C-2	1.62	303	2.01	0.0542	0.458	0.0148	2.02
12	전기-가-C-3	7.77	124	0.898				
13	전기-가-C-4	9.62	73.3	0.589				
14	전기-가-C-5	2.92	19.5	0.161				
15	전기-가-C-6	1.53	12.4	0.0983				
16	전기-나-A-1	6.49	996	6.62	0.760	8.42	0.767	7.39
17	전기-나-A-2	6.49	996	6.62				
18	전기-다-A-1	17.2	1150	7.75				
19	전기-다-A-2	-	-	-				
20	전기-다-A-3	-	-	-				
21	전기-다-A-4	-	-	-				
22	전기-라-A-1	-	103	0.676				
23	전기-마-A-1	-	-	-				
24	전기-마-B-1	-	-	-				
25	전기-마-B-2	-	-	-				
26	전기-마-B-3	-	15.8	0.104				
27	전기-마-C-1	2.71	546	3.62				
28	전기-마-D-1	8.95	475	3.22				
29	전기-마-D-2	-	839	5.52				
30	전기-마-E-1	-	-	-				
31	전기-마-E-2	37.0	1318	9.07	1.30	9.99	0.149	9.22
32	전기-바-A-1	-	-	-				
33	전기-바-B-1	-	-	-				
34	전기-바-C-1	112	7245	48.9	0.041	0.291	0.0359	48.9
35	전기-사-A-1	8.47	979	6.53				
36	전기-사-A-2	10.8	413	2.83				
37	전기-사-A-3	9.29	314	2.17				
38	전기-사-B-1	10.7	684	4.61	0.0159	0.165	0.04	4.65
39	전기-아-A-1	4.97	42.3	0.333				

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
40	온열-가-A-1	1.57	2.83	0.0696				
41	온열-가-A-2	-	-	-				
42	온열-가-A-3	-	-	-				
43	온열-가-B-1	4.11	-	0.0555				
44	온열-가-B-2	4.21	2.36	0.0625				
45	온열-가-C-1	-	-	-				
46	온열-가-D-1	-	0.846	0.00556				
47	온열-가-E-1	-	-	-				
48	온열-나-A-1	-	-	0.0900				
49	온열-나-B-1	0.717	-	0.00801				
50	온열-나-C-1	-	-	-				
51	온열-나-C-2	1.01	-	0.006				
52	온열-나-C-3	-	-	-				
53	온열-나-C-4	8.81	635	4.27				
54	온열-나-C-5	16.2	369	2.60				
55	온열-나-C-6	-	579	3.81				
56	온열-나-C-7	12.8	734	4.97				
57	온열-나-C-8	-	-	-				
58	온열-나-D-1	8.66	165	0.632				
59	온열-나-E-1	3.64	1.93	0.0534				
60	온열-나-E-2	-	-	0.0129				
61	온열-나-F-1	-	-	-				
62	온열-나-G-1	-	40.4	0.265				
63	온열-나-H-1	-	2.80	0.0184				
64	온열-나-H-2	0.598	2.04	0.0201				
65	온열-나-I-1	-	-	-				
66	온열-나-I-2	-	23.6	0.0829				
67	온열-나-I-3	-	-	-				
68	온열-나-I-4	1.41	-	0.00841				
69	온열-나-J-1	12.4	772	5.21				
70	온열-나-J-2	21.4	1199	8.12	3.62	31.3	0.129	8.25
71	온열-나-J-3	-	-	-				
72	온열-나-J-4	7.87	0.212	0.0893				
73	온열-다-A-1	-	-	-				
74	온열-다-B-1	-	-	-				
75	온열-다-C-1	-	-	-				
76	온수-가-A-1	-	340	1.67				
77	온수-나-A-1	-	-	-				
78	온수-다-A-1	4.74	37.9	0.227				

4.3.5. 패드류, 소파류

표 19. 패드류, 소파류 분석·평가 결과

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
1	패드-가-A-1	32.5	1869	1.41				
2	패드-나-A-1	1.21	242	1.61				
3	패드-나-B-1	35.8	652	4.68				
4	패드-다-A-1	-	-	-				
5	패드-다-A-2	-	-	-				
6	패드-라-A-1	3.59	-	0.0401				
7	패드-라-B-1	-	-	-				
8	패드-라-B-2	-	-	-				
9	패드-라-B-3	-	-	-				
10	패드-마-A-1	6.44	-	0.0719				
11	패드-마-A-2	-	-	-				
12	패드-마-A-3	8.69	-	0.097				
13	패드-바-A-1	43.4	2224	15.1				
14	패드-바-A-2	73.8	3274	22.3				
15	패드-바-A-3	78.8	4372	29.6	0.619	5.54	0.138	29.7
16	소파-가-A-1	10.4	114	0.866				
17	소파-가-B-1	5.30	247	1.68				
18	소파-나-A-1	-	21.5	0.141				
19	소파-나-B-1	-	-	-				
20	소파-나-C-1	-	-	-				

4.3.6. 속옷류 (슈트, 팬티, 레깅스, 쉐이퍼, 브래지어, 거들, 밴드, 런닝)

표 20. 속옷류 분석·평가 결과

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m³)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
1	슈트-가-A-1	0.941	-	0.0500				
2	슈트-가-B-1	-	100	0.730				
3	슈트-가-B-2	1.84	34.7	0.672				
4	슈트-가-B-3	8.94	134	1.13				
5	슈트-가-B-4	6.24	222	1.300	0.317	2.48	0.0325	1.33
6	슈트-가-B-5	1.84	-	0.0206				
7	슈트-가-B-6	-	138	0.979				
8	슈트-가-C-1	3.61	30.3	0.457	0.0966	0.0567	0.0365	0.494
9	슈트-가-D-1	0.940	248	1.49	0.318	3.38	0.0505	1.54
10	슈트-가-D-2	1.84	51.4	0.300				
11	슈트-가-D-3	11.6	62.5	0.454				
12	슈트-가-D-4	-	22.7	0.150				
13	슈트-가-D-5	-	40.7	0.268				
14	슈트-가-E-1	-	-	-				
15	슈트-가-E-2	-	-	-				
16	슈트-가-F-1	19.6	180	1.18	0.170	1.18	0.0231	1.20
17	슈트-가-G-1	-	-	-				
18	슈트-가-H-1	3.31	7.02	0.147				
19	슈트-가-H-2	7.54	89.2	0.710				
20	슈트-가-I-1	-	-	0.0461				
21	슈트-나-A-1	8.610	1.78	0.108				
22	슈트-나-A-2	13.9	-	0.175				
23	슈트-나-A-3	-	2.17	0.0120				
24	슈트-나-A-4	6.31	-	0.0592				
25	슈트-나-A-5	5.91	-	0.0857				
26	슈트-나-B-1	-	14.5	0.0982				
27	슈트-라-A-1	-	42.4	0.256				
28	슈트-라-A-2	-	38.5	0.320				
29	슈트-라-A-3	-	-	-				
30	슈트-라-B-1	5.91	80.3	0.517				
31	슈트-라-B-2	3.31	22.7	0.156				
32	슈트-라-B-3	1.84	-	0.0173				
33	슈트-라-C-1	8.61	48.9	0.403				
34	슈트-라-C-2	7.54	-	0.124				
35	슈트-라-D-1	1.15	12.7	0.141				
36	슈트-라-D-2	-	-	-				
37	슈트-라-E-1	-	105	0.602				
38	슈트-라-E-2	3.31	1.78	0.0796				
39	슈트-라-E-3	-	-	-				

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
40	슈트-라-F-1	5.91	75.1	0.524				
41	슈트-라-F-2	-	-	-				
42	슈트-라-F-3	10.4	-	0.132				
43	슈트-라-G-1	0.595	38.5	0.363				
44	슈트-라-G-2	-	56.8	0.468				
45	슈트-라-G-3	4.74	-	0.0445				
46	슈트-마-A-1	8.61	1.78	0.232				
47	슈트-마-A-2	5.91	1.78	0.158				
48	슈트-마-A-3	7.54	-	0.148				
49	슈트-바-A-1	8.61	-	0.096				
50	슈트-바-B-1	8.61	7.02	0.150				
51	슈트-바-C-1	14.5	-	0.143				
52	팬티-가-A-1	0.600	12.3	0.170				
53	팬티-가-B-1	8.61	1.78	0.0900				
54	팬티-가-B-2	4.74	-	평가제외				
55	팬티-가-B-3	3.61	-	평가제외				
56	팬티-가-B-4	6.31	-	평가제외				
57	팬티-가-B-5	5.91	-	0.0660				
58	팬티-가-C-1	0.830	-	평가제외				
59	팬티-가-C-2	-	4.70	평가제외				
60	팬티-가-C-3	-	-	평가제외				
61	팬티-가-C-4	3.31	12.3	0.106	0.0900	1.06	0.00232	0.108
62	팬티-가-C-5	7.54	4.70	평가제외				
63	팬티-나-A-1	-	-	평가제외				
64	팬티-나-B-1	-	-	평가제외				
65	팬티-나-C-1	1.84	-	평가제외				
66	팬티-나-D-1	18.2	1.95	평가제외				
67	팬티-나-D-2	6.31	-	평가제외				
68	팬티-다-A-1	0.600	1.78	평가제외				
69	팬티-다-B-1	-	24.5	평가제외				
70	팬티-다-B-2	3.31	-	평가제외				
71	팬티-다-C-1	7.54	-	평가제외				
72	팬티-다-D-1	-	-	평가제외				
73	팬티-다-D-2	-	-	평가제외				
74	팬티-다-E-1	13.2	78.4	평가제외				
75	팬티-다-E-2	1.84	-	평가제외				
76	팬티-다-F-1	-	-	평가제외				
77	팬티-다-F-2	13.2	-	평가제외				
78	팬티-다-G-1	6.31	2.17	평가제외				
79	팬티-라-A-1	0.600	-	평가제외				
80	팬티-라-B-1	-	13.4	평가제외				
81	팬티-라-C-1	7.54	-	평가제외				
82	팬티-라-D-1	5.91	7.02	평가제외				
83	팬티-라-E-1	8.61	1.79	평가제외				
84	팬티-마-A-1	8.61	-	평가제외				

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
85	레깅스-가-A-1	-	-	-				
86	레깅스-가-B-1	-	58.7	평가제외				
87	레깅스-가-B-2	-	4.70	평가제외				
88	레깅스-가-B-3	3.31	48.9	0.319	0.0608	0.0614	3.09.E-04	0.319
89	레깅스-가-C-1	0.595	48.9	0.275				
90	레깅스-가-C-2	-	-	평가제외				
91	레깅스-가-C-3	1.84	-	평가제외				
92	레깅스-가-C-4	-	59.4	0.365	0.0560	0.0588	0.00742	0.372
93	레깅스-가-D-1	-	-	평가제외				
94	레깅스-가-D-2	0.595	17.5	0.151				
95	레깅스-나-A-1	22.8	-	평가제외	0.0397	0.0556	2.47.E-04	2.47.E-04
96	레깅스-다-A-1	5.24	103	평가제외	0.110	0.0586	4.06.E-04	4.06.E-04
97	레깅스-다-A-2	4.74	-	평가제외				
98	레깅스-다-B-1	4.74	-	평가제외				
99	레깅스-다-B-2	3.29	-	평가제외				
100	레깅스-다-C-1	4.01	12.7	평가제외				
101	레깅스-다-C-2	7.54	-	평가제외				
102	레깅스-다-D-1	13.9	22.7	평가제외				
103	레깅스-다-D-2	7.54	-	평가제외				
104	레깅스-라-A-1	9.01	-	평가제외				
105	레깅스-라-A-1	7.54	-	평가제외				
106	레깅스-라-A-1	7.54	-	평가제외				
107	레깅스-마-A-1	7.54	70.8	평가제외				
108	레깅스-마-B-1	17.3	7.79	평가제외				
109	레깅스-마-C-1	13.9	1.78	평가제외				
110	레깅스-바-A-1	14.5	-	평가제외				
111	레깅스-바-B-1	16.6	-	평가제외				
112	쉐이퍼-가-A-1	13.9	1.78	0.167				
113	쉐이퍼-가-A-2	4.74	-	0.0562				
114	쉐이퍼-가-A-3	4.74	-	0.0530				
115	니퍼-가-A-1	8.61	59.4	0.408	0.0578	0.0360	0.0151	0.423
116	니퍼-가-A-2	-	10.7	0.0590	0.107	0.0566	3.79.E-04	0.0594
117	니퍼-가-A-3	-	33.2	0.183				
118	니퍼-가-A-4	4.74	8.27	0.0901				
119	니퍼-가-B-1	5.24	31.2	0.220				
120	니퍼-가-C-1	4.74	-	0.0445	0.0499	0.0360	2.04.E-04	0.0447
121	니퍼-가-C-2	-	22.7	0.125	0.0530	0.0632	2.87.E-04	0.125
122	니퍼-가-C-3	-	105	0.581	0.0935	0.0521	3.39.E-04	0.581
123	니퍼-가-D-1	5.91	1.78	0.0652	0.0500	0.0649	2.86.E-04	0.0655
124	니퍼-가-E-1	-	52.7	0.291	0.107	0.0590	3.86.E-04	0.291
125	니퍼-가-E-2	-	1.78	0.0100	0.110	0.0584	3.90.E-04	0.0104
126	니퍼-나-A-1	-	-	-				
127	니퍼-나-A-2	-	7.79	0.043				
128	니퍼-나-B-1	0.825	-	0.008				
129	니퍼-나-B-2	9.01	13.4	0.158				

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
130	브라-가-A-1	-	-	-				
131	브라-가-A-2	3.64	-	0.111				
132	브라-가-A-3	5.91	1.78	0.0875				
133	브라-나-A-1	-	51.4	0.284	0.0511	0.0347	5.71.E-04	0.285
134	브라-나-B-1	-	19.0	0.193	0.0371	0.0486	5.95.E-04	0.194
135	브라-나-C-1	1.84	-	0.0173				
136	브라-나-D-1	3.31	12.3	0.186	0.0387	0.0493	6.10.E-04	0.187
137	브라-다-A-1	-	-	-				
138	브라-다-B-1	16.1	-	0.180				
139	브라-다-C-1	8.61	-	0.127				
140	브라-라-A-1	-	35.8	0.275				
141	브라-라-A-2	8.61	1.78	0.120				
142	브라-라-B-1	0.825	-	0.0144				
143	거들-가-A-1	3.31	33.2	평가제외				
144	거들-가-A-2	3.31	1.78	평가제외				
145	거들-가-B-1	-	12.3	평가제외				
146	거들-가-C-1	4.74	-	평가제외				
147	거들-가-D-1	-	7.02	평가제외				
148	거들-나-A-1	0.830	-	평가제외	0.0487	0.0616	2.84.E-04	2.84.E-04
149	거들-나-A-2	-	-	평가제외	0.0537	0.0333	2.12.E-04	2.12.E-04
150	거들-나-A-3	0.600	-	평가제외	0.0548	0.0374	2.26.E-04	2.26.E-04
151	거들-나-B-1	11.81	7.79	평가제외	0.0582	0.0348	2.26.E-04	2.26.E-04
152	거들-나-C-1	0.600	-	평가제외	0.0601	0.0362	2.34.E-04	2.34.E-04
153	거들-나-D-1	3.31	-	평가제외	0.0571	0.0341	2.21.E-04	2.21.E-04
154	거들-다-A-1	16.6	1.78	평가제외				
155	슬립-가-A-1	10.4	-	0.116				
156	슬립-가-A-2	5.91	-	0.0660				
157	슬립-가-A-3	6.31	2.17	0.0917				
158	밴드-가-A-1	5.24	-	평가제외				
159	밴드-가-A-2	-	5.02	평가제외				
160	밴드-가-A-3	-	-	평가제외				
161	밴드-가-B-1	-	-	평가제외				
162	밴드-가-B-2	29.9	3978	평가제외				
163	밴드-가-C-1	-	309	평가제외				
164	런닝-가-A-1	3.31	43.7	0.478				

4.3.7. 장신구류 (벨트, 목걸이, 팔찌, 발찌, 조끼)

표 21. 장신구류 분석·평가 결과

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m³)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
1	벨트-가-A-1	2.77	39.9	평가제외				
2	벨트-나-A-1	-	-	평가제외				
3	벨트-나-A-2	-	-	평가제외				
4	벨트-나-A-3	-	-	평가제외				
5	벨트-나-A-4	-	42.2	평가제외				
6	벨트-나-A-5	6.75	-	평가제외				
7	벨트-나-A-6	-	-	평가제외				
8	벨트-나-B-1	-	37.7	평가제외				
9	벨트-나-B-2	10.5	219	평가제외				
10	벨트-나-B-3	-	-	평가제외				
11	벨트-나-B-4	-	-	평가제외				
12	벨트-다-A-1	7.54	-	평가제외				
13	목걸이-가-A-1	1.69	-	0.0806				
14	목걸이-나-A-1	-	-	-	0.0243	0.0614	2.43.E-06	2.43.E-06
15	목걸이-나-B-1	3.61	2.17	0.0458	2.10	20.4	0.000147	0.0459
16	목걸이-나-C-1	11.8	2.17	0.123	2.17	20.2	0.000146	0.123
17	목걸이-나-D-1	-	-	-	2.59	23.6	0.000130	0.000130
18	목걸이-나-E-1	9.01	2.17	0.097	2.58	23.7	0.000166	0.0967
19	목걸이-나-F-1	0.825	2.17	0.0197	2.81	24.4	0.000261	0.0200
20	목걸이-다-A-1	-	2.81	0.0155				
21	목걸이-라-A-1	-	-	-				
22	팔찌-가-A-1	-	77.7	평가제외				
23	팔찌-나-A-1	5.04	-	평가제외	2.81	20.6	0.0000404	4.04.E-05
24	팔찌-나-B-1	3.59	15.9	평가제외	2.22	20.8	0.0000692	6.92.E-05
25	팔찌-나-C-1	5.44	3.49	평가제외	0.882	6.59	0.0000028	2.80.E-06
26	발찌-가-A-1	1.84	4.70	평가제외				
27	발찌-나-A-1	5.04	2.08	평가제외	2.81	24.7	0.0000276	0.0000276
28	조끼-가-A-1	20.3	56.7	0.599				
29	조끼-가-A-2	4.26	104	0.728				

4.3.8. 기타류 (타월, 천, 지압물품, 담요 등)

표 22. 기타류 분석・평가 결과

연번	제품명 (시료번호)	내부피폭			외부피폭			연간피폭선량 (mSv/y)
		농도(Bq/m^3)		선량 (mSv/y)	농도(Bq/g)		선량 (mSv/y)	
		라돈	토론		^{238}U	^{232}Th		
1	패치-가-A-1	2.14	-	평가제외				
2	패치-나-A-1	7.44	116	평가제외				
3	패치-나-B-1	-	84.4	평가제외				
4	지압-가-A-1	-	-	평가제외				
5	지압-나-A-1	4.97	15.9	평가제외				
6	지압-나-B-1	4.97	7.89	평가제외				
7	천-가-A-1	25.6	1346	평가제외				
8	천-가-B-1	4.54	1783	평가제외				
9	타올-가-A-1	8.24	876	평가제외				
10	타올-가-A-2	55.3	1882	평가제외				
11	타올-가-A-3	60.3	2465	평가제외				
12	타올-가-A-4	37.4	1829	평가제외				
13	타올-가-B-1	27.0	1083	평가제외				
14	타올-가-B-2	29.8	1661	평가제외				
15	손수건-가-A-1	-	2.81	평가제외				
16	담요-가-A-1	-	134	0.878				
17	담요-가-A-2	5.04	272	1.85				
18	담요-가-A-3	-	229	1.50				
19	담요-가-A-4	-	232	1.53				
20	담요-가-B-1	20.0	1363	9.18				

5. 항공운송사업자 실태조사

5.1. 실태조사·분석 계획

생활방사선법 제18조제1항 및 같은 법 시행령 제9조에 따라 국제항공운송사업을 경영하는 자(이하 “항공운송사업자”)는 우주방사선에 피폭할 우려가 있는 운항승무원 및 객실승무원의 건강 보호와 안전을 위하여 노력하도록 하고 있다.

상기 항공운송사업자는 국제항공노선에 탑승하는 승무원을 대상으로 승무원이 선량한도를 초과하지 않도록 우주방사선에 대한 피폭방사선량 조사·분석 및 기록, 피폭방사선량 저감화 조치, 피폭방사선량 정보제공 등의 안전조치를 취하도록 하고 있다.

원안위는 ’19년도 생활주변방사선방호 시행계획을 통하여 지각·우주방사선 관리체계 정착·실행을 위한 항공운송사업자에 대한 실태조사를 추진하도록 하고 있다. 이에 따라, KINS는 1단계로 조사대상인 항공운송사업자 변동사항을 확인하였다. 2단계로 ’18년도 기준으로 항공운송사업자 운항 현황, 승무원에 대한 안전조치 및 교육사항에 대한 서면조사와 3단계로 대형항공사에 대한 현장조사를 계획하였다.

5.2. 실태조사·분석 방법

실태조사·분석은 1단계로 항공운송사업자 변동사항을 확인한 결과 전년도와 동일하게 대한항공, 아시아나항공, 에어부산, 에어서울, 에어인천, 이스타항공, 제주항공, 진에어, 티웨이항공으로 조사되었다.

2단계로 상기 항공운송사업자에 대한 서면조사를 통해, ’18년도 기준 항공운송사업자 현황, 승무원에 대한 안전조치 및 교육사항을 요구하였고 수집된 자료를 기반을 실태조사·분석을 수행하였다.

3단계로 우주방사선에 따른 승무원의 피폭방사선량 정보를 제공하여 승무원이 항상 확인할 수 있도록 생활방사선법이 ’19.7.9일 개정되어 대형항공사인 대한항공과 아시아나항공이 해당 개정사항을 반영하고 있는지 확인하기 위한 현장조사를 실시하였다.

5.3. 실태조사・분석 결과

5.3.1. 항공운송사업자 현황

'18년 항공운송사업자의 전체 노선 수는 1,421개로 '17년(1,400개) 수준과 비슷하고 운항횟수는 연간 327,700건으로 '17년(367,733건) 대비 10.9% 감소한 것을 확인하였다. 항공사별로는 대한항공과 아시아나 항공이 절반을 넘게 차지하는 것으로 나타났다.

표 23. '18년 항공사별 국제항공 노선수 및 운항횟수 현황

구분	대한항공	아시아나	에어부산	에어서울	에어인천	이스타	제주항공	진에어	티웨이	계
노선수	610	259	33	42	26	125	173	93	60	1,421
운항횟수	114,543	75,267	21,989	10,164	2,248	18,602	44,158	27,199	13,530	327,700

국제항공노선에 탑승하는 승무원의 수는 22,484명으로 '17년(20,472명) 대비 9.8% 증가하였다. 승무원별로는 운항승무원이 6,499명(28.9%), 객실승무원이 15,985명(71.1%)으로 분포하고 있다. 항공사별로는 대한항공이 10,699명(47.6%)으로 전체 승무원 수에서 절반 정도를 차지하고 있으며, 아시아나항공이 5,951명(26.4%), 그 외에 항공사가 5,834명(26.0%)으로 분포하고 있는 것으로 나타났다.

표 24. '17년과 '18년 항공사별 승무원 현황

항공사명	2017년 승무원(명)			2018년 승무원(명)		
	운항승무원	객실승무원	계	운항승무원	객실승무원	계
대한항공	2,845	7,627	10,472	2,850	7,849	10,699
아시아나	1,365	3,891	5,256	1,561	4,390	5,951
에어부산	228	433	661	278	552	830
에어서울	78	188	266	115	166	281
에어인천	15	0	15	35	0	35
이 스 타	205	391	596	254	484	738
제주항공	387	848	1,235	600	1,048	1,648
진 에 어	421	773	1,194	452	843	1,295
티 웨 이	268	509	777	354	653	1,007
계	5,812	14,660	20,472	6,499	15,985	22,484

5.3.2. 승무원에 대한 안전조치

5.3.2.1. 우주방사선 피폭선량 평가프로그램 현황

항공운송사업자는 생활주변방사선 안전관리를 위한 안전지침 제5장에 따라 우주방사선 피폭방사선량 평가프로그램을 선택하여 사용할 수 있다. 항공운송사업자 중 대한항공, 아시아나, 에어부산, 제주항공 및 진에어 5개 항공사는 CARI-6/6M을 에어서울, 에어인천, 이스타 및 티웨이 4개 항공사는 NAIRAS 모델의 우주방사선 피폭방사선량 평가 프로그램을 활용하여 승무원의 피폭선량을 평가하고 있는 것으로 조사되었다.

표 25. 항공사별 우주방사선 피폭선량 평가프로그램 사용 현황

대한항공	아시아나	에어부산	에어서울	에어인천	이스타	제주항공	진에어	티웨이
CARI-6M	CARI-6M	CARI-6	NAIRAS	NAIRAS	NAIRAS	CARI-6M	CARI-6M	NAIRAS

5.3.2.2. 승무원의 피폭방사선량 현황

전체 승무원 22,484명의 1인당 연평균 피폭방사선량은 2.09 mSv로 '17년도와 동일한 것으로 나타났다. 승무원별 연평균 피폭선량은 객실승무원이 2.25 mSv이고, 운항승무원이 1.71 mSv로 집계되었다. 항공사별 평균선량은 대한항공이 2.80 mSv로 가장 높았고, 그 다음으로 아시아나항공이 2.11 mSv로 나타났다. 이는 대한항공과 아시아나항공이 다른 항공사보다 노선수와 운항횟수가 많고, 북극 노선을 운항하기 때문인 것으로 파악된다.

표 26. '18년 항공사별 승무원 피폭방사선량 현황

항공사명	객실승무원(mSv)			운항승무원(mSv)			전체평균**
	최대	최소	평균*	최대	최소	평균*	
대한항공	5.39	0	2.97	5.65	0	2.32	2.80
아시아나	4.02	0	2.17	4.91	0	1.95	2.11
에어부산	1.80	0	0.65	1.17	0	0.64	0.65
에어서울	1.19	0	0.88	1.04	0	0.66	0.79
에어인천	0	0	0	-	-	-	0
이 스 타	1.18	0	0.61	1.23	0	0.61	0.61
제주항공	1.40	0	0.87	1.50	0	0.76	0.83
진 에 어	1.49	0	1.02	1.50	0	0.80	0.94
티 웨 이	1.29	0	0.76	1.30	0	0.66	0.73
전체평균**	-	-	2.25	-	-	1.71	2.09

* 객실 또는 운항승무원 연간 피폭선량의 합을 객실 또는 운항승무원 수로 나눈 값

** 전체승무원(객실+운항)의 연간 피폭선량 합을 전체승무원 수로 나눈 값

5.3.2.3. 피폭 저감화 조치

생활방사선법 시행령 제10조에 따라 우주방사선으로 인한 피폭방사선량이 연간 50 mSv를 넘지 않는 범위에서 5년간 100 mSv(연평균 20 mSv)를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 생활주변방사선 안전관리를 위한 안전지침에서는 직접 측정 또는 전산프로그램에 의한 평가를 통하여 승무원의 피폭방사선량을 조사·분석하고, 그 결과 6 mSv를 초과하지 않게 관리하도록 권고하고 있다.

실태조사 결과 '18년 9개 항공운송사업자에 종사하는 승무원 중 6 mSv 초과자는 없는 것으로 조사되었다.

또한, 임신한 승무원은 임신한 사실을 항공운송사업자에게 알려야 하며, 항공운송사업자는 승무원의 임신 사실을 확인한 시점부터 출산 시까지 2 mSv를 초과하지 않도록 우주방사선 피폭방사선량을 관리하도록 하고 있다.

실태조사 결과 항공운송사업자는 임신한 승무원 1,074명에 대하여 임신 사실을 확인한 즉시 비행정지 등 업무전환 조치를 하였고, 2 mSv를 초과한 임신한 승무원은 없는 것으로 조사되었다.

5.3.2.4. 승무원에 대한 피폭선량 정보제공

생활방사선법 제18조제4항 및 같은 법 시행령 제10조제3호에 따라 항공운송사업자는 우주방사선에 따른 승무원의 피폭방사선량 정보를 제공하여 승무원이 항상 확인할 수 있도록 '19.7.9. 개정되었다.

실태조사 결과 항공운송사업자는 에어인천을 제외하고 사내전산망 통해 승무원에 대한 피폭방사선량 정보를 월 또는 분기단위로 갱신하여 제공하는 것으로 조사되었다.

표 27. 항공사별 승무원 피폭방사선량 제공 현황

구분	대한항공	아시아나	에어부산	에어서울	에어인천	이스타	제주항공	진에어	티웨이
제공방법	사내전산망	사내전산망	사내전산망	사내전산망	이메일	사내전산망	사내전산망	사내전산망	사내전산망
제공주기	월1회	분기1회	월1회	분기1회	분기1회	분기1회	월1회	분기1회	분기1회

5.3.2.5. 승무원에 대한 교육사항

생활방사선법 제26조에 따라 원안위는 생활주변방사선에 대한 이해 및 생활주변방사선 안전관리의 효과를 높이기 위하여 생활주변방사선에 피폭할 우려가 있는 사람을 위한 교육프로그램을 개발·운용할 수 있도록 하고 있다. 원안재단은 원안위의 위탁업무를 받아 해당 교육업무를 수행하고 있다.

실태조사 결과 항공운송사업자는 '18년도에 76명이 원안재단이 실시하는 교육을 받은 것으로 조사되었다. 항공운송사업자의 자체교육 방법을 통하여 대한항공, 아시아나항공, 에어부산 및 진에어는 집체교육과 온라인 교육을 병행하고 있으며, 이스타항공은 집체교육을, 에어서울, 에어인천, 제주항공 및 티웨이는 온라인교육을 실시하는 것으로 조사되었다.

표 28. '18년 항공사별 우주방사선 교육 실시 현황

구분 (명)	대한항공	아시아나	에어부산	에어서울	에어인천	이스타	제주항공	진에어	티웨이	합계
원안재단 교육	19	19	9	7	3	15	12	7	16	107
자체집체 교육	880	1,840	239	-	-	743	-	187	-	3,889
자체온라인 교육	5,986	4,733	552	281	36	-	1,648	662	1,007	14,905

6. 재활용고철 대단위 수집업자 실태조사

6.1. 실태조사·분석 계획

원안위는 제2차 생활주변방사선방호 종합계획('18-'22)의 비전인「생활 속 방사선으로부터 국민이 안심하는 사회」 달성을 위한 중장기 정책 목표를 설정하였으며, 이의 추진전략 중 하나가 방사성물질 유입 감시체계 고도화이다.

'19년도 생활주변 방사선방호 시행계획에서는 방사성물질 유입 감시체계 고도화 실행방법으로 재활용고철 대단위 수집업자(이하 "고철 수집업자")에 대한 실태조사와 비철금속 분야 현황을 검토하는데 초점을 두고 있다.

이를 실행하기 위해 KINS는 1단계로 조사대상 업체 파악을 위한 업계 기초조사, 2단계 서면조사, 3단계 현장조사로 구분 추진하였다.

1단계의 업계 기초조사는 고철 수집업자의 범위를 정하는 것과 관련 업체들의 정보를 파악하는 것이다. 재활용고철의 흐름은 소비자로부터 시작하여 고철을 수집하는 소상(小商), 다음 단계인 중상(中商) 및 대상(大商), 생활방사선법에 따라 감시기를 설치·운영하는 재활용고철 취급자로 이어지고 경우에 따라 공장 등 건축물 철거 시 직접 소·중상 또는 대상으로 유입될 수도 있다. 방사선감시 확대 검토를 위한 조사범위는 대상으로 하는 것이 적절하다고 판단하였으며 재활용고철취급자의 협조를 받아 대상의 현황, 연락처 등을 수집할 수 있었다.

2단계 서면조사는 업체별 취급금속, 유통물량, 방사선감시 여부 등 현황 수집을 위한 것으로 1단계에서 파악된 대상들에 대해 조사표로 발송하는 것이다.

3단계 현장조사는 2단계에서 확보된 감시기 보유업체, 유통물량이 상대적으로 많은 업체 그리고 공항·항만 감시기에서 경보 발생 사례가 있는 업체들 중 실태조사의 의미가 있는 업체에 대한 실질적 조사이다.

금년도 실태조사에서는 고철 등의 유통 흐름, 업계의 규모, 취급 금속 등 전반적 현황을 파악하고 재활용고철취급자 이외 유통단계에서 감시기 설치·운영 시 고철 수집업자의 상황과 국가의 방사선 감시범위 확대 판단 등을 검토하는데 필요한 정보를 수집하고자 하였다.

6.2. 실태조사 · 분석 방법

실태조사를 위해 먼저 어떤 업체를 실제로 조사할지 결정이 필요하였다. 이를 위해 고철 수집업자와 공항 · 항만 방사선감시기에서 방사능 유의물질이 검출된 금속류 수입업체로 나누어 검토하였다. 먼저 고철 수집업자의 조사 추진 방법은 아래와 같다.

재활용고철 수집업자 파악 ➜ 서면조사 ➜ 현장조사 대상 선정 ➜ 현장조사 실시

그림 9. 고철 수집업자 조사 추진 방법

앞서 언급한 바와 같이 고철 수집업자 실태조사 대상을 파악하고자 생활방사선법에 따른 현 18개 재활용고철취급자에게 당해 1차 공급업체인 일명 대상(大商) 현황제공을 요청하였다. 회신 결과 약 250개 업체의 업체명과 주소지 등이 수집되었다. 수집된 주소지에 준비한 서면조사표를 안내공문과 함께 발송하였다.

서면조사표가 발송된 업체들 중 일부는 주소지 정보가 정확하지 않은 점도 있었고 이사를 하거나 수취인 불명 등으로 반송 사례가 다수 발생하였으며, 생활방사선법의 적용업체가 아닌 이유 등으로 회신을 꺼리는 경우도 많았다.

빠른 회신 유도를 위해 유선 연락처로 직접 접촉을 취하였는데 관련 제도에 대한 이해가 부족하고 기업정보라는 이유 등으로 회신을 거부하는 경향을 보였다. 회신 독려에도 불구하고 결국 회신에 협조한 업체는 약 60개 업체에 정도에 머물렀다.

현장조사를 할 업체 선정은 서면조사표를 회신한 업체 중에서 감시기 운영, 유통 물량이 비교적 큰 업체, 수출입 사례가 있는 업체 등으로 분류하고 우선순위를 정하였다. 이들 업체를 중심으로 현장방문을 수락한 16여 업체에 대해 최종 현장조사가 이루어졌다. 다음은 공항 · 항만 감시기에서 유의물질이 발생된 업체에 대한 현황파악 추진 순서이다.

공항 · 항만 방사선감시기 유의물질 발생 업체 파악 ➜ 금속 화물 취급업체 분류 ➜ 현장조사 대상 선정 ➜ 현장조사 실시

그림 10. 공항 · 항만 감시기 유의물질 발생업체 현황파악 추진 순서

공항·항만 감시기에서 유의물질이 발생된 업체를 조사한 이유는 비철금속 분야의 유통경로, 해당 주요업체, 유의물질 발생원인, 수입처 등을 파악하고자 한 것이다.

한편으로 비철금속 분야 관련단체를 통해서도 비철금속의 유통물량, 비철금속 취급 업체 등의 조사를 시도하였다. 관련 대표적 단체로 한국비철금속협회가 있으며 유관 단체로 도시광산협회, 건설폐기물협회, 한국순환자원유통센터 등이 있었다. 한국비철금속협회에 20여개 회원사가 있고 이들 업체는 알루미늄, 구리, 아연, 납, 니켈 등을 취급하는 것으로 확인되었다.

현장조사를 할 비철금속 분야 업체는 공항·항만 감시기 유의물질 경보발생 또는 한국비철금속협회 회원 등 연관성을 보며 최종 4개 업체를 정하였다.

6.3. 실태조사·분석 결과

6.3.1. 현장조사

현장조사는 대상(大商) 16개 업체, 공항·항만 감시기에서 유의물질이 발생한 4개 업체, 총 20개 업체에 대하여 수행하였다.

앞서 언급한 바와 같이 고철 수집업자로 정한 1차 공급업체 즉 대상들의 대표적 취급 금속은 고철이나 스테인리스 스틸이며, 연간 1만 톤에서 40만 톤 규모로 다양하였다. 지역별로는 포항이 10곳으로 가장 많고 울산, 경주, 대구, 시흥 등에 위치하고 있다.

포항은 포스코가 소재한 곳으로 포스코가 납품업체에게 방사선 측정을 요구하고 있어 고정형 감시기가 설치된 10곳이 있었으며 휴대용 측정기를 보유한 업체도 3곳이 있었다. 감시기 등 보유율이 높은 것은 금번 현장조사 대상을 선정할 때 감시기 보유업체를 우선 고려했기 때문이다. 따라서 대상(大商)들 대다수가 감시기나 방사선측정기를 보유했다고 보기는 어렵다.

전기로(爐) 등 용융시설을 보유한 업체는 없었으며 고철 수집인 업체 특성으로 향후 용융시설 확보 가능성은 낮아 보였다. **그림 11**은 방문업체의 현장모습 사례이다.

비철금속 분야의 현황 파악을 위해 공항·항만 감시기에서 유의물질 경보가 발생된 업체 중 빈도가 높은 4개 업체를 선정하였다. 이들 업체는 동 스크랩, 알루미늄 스크랩, 제강분진, 아연 부유물(징크 스키밍) 등을 수입하는 과정에서 경보가 발생된 것이었으며 유의물질은 당시 수입국으로 반송된 것으로 파악되었다.


스테인리스 스틸 스크랩


운영 중인 감시기

그림 11. 고철 수집업자 방문업체 현장

해당 업체들은 대단위 고철 수집업자인 대상에 비해 외형적 규모가 컸는데 종사자 수는 적게 50여명에서 1천2백명이 넘는 곳도 있었다. 업체별로 동, 아연, 알루미늄 등으로 취급 금속이 특화되었고 연간 유통량은 수십만 톤에서 100만 톤에 달했다. 특이점은 고철 수집업자와 달리 업체마다 전기로(爐) 또는 가열로(爐) 형태의 시설을 다수 보유하고 있었다. 이들 업체는 최종 비철금속 괴(ingot)등을 제조하였는데 생활방사선법의 재활용고철취급자와 유사한 성격이라고 볼 수 있다. 아래 사진은 방문업체의 현장모습 사례이다.


가동 중인 용융로


비철금속 스크랩

그림 12. 비철금속 방문업체 현장

방사선 감시와 관련하여 1개 업체가 고정형 감시기를, 다른 1개 업체는 휴대용 감시기를 보유하고 있었다. **표 29**은 현장 실태조사 결과를 업체별로 요약한 것이다.

표 29. 재활용고철 대단위 수집업자 업체별 현장 실태조사 요약

구 분	업체명	소재지	직원수	주요 취급금속 (연 취급량)	감시기보유	
					종류	설치년도
대단위고철 수집업자 (16개)	㈜I○○	포항	34	스테인레스 (30,000톤)	고정형	2018
	㈜K○○	포항	14	스테인레스 (50,000톤)	고정형	2018
	㈜I○○	대구	11	스테인레스 (360,000톤)	휴대용	–
	㈜P○○	포항	19	고철 등 (396,581톤)	고정형	2011
	K○○㈜	포항	12	스테인레스 (35,700톤)	고정형 휴대용	2013
	D○○㈜	포항	10	스테인레스 (18,000톤)	고정형 휴대용	2010
	㈜S○○	포항	6	스테인레스 (20,000톤)	고정형	2008
	K○○㈜	포항	10	스테인레스 (12,000톤)	고정형 휴대용	2018
	㈜S○○	포항	5	스테인레스, 구리 (30,000톤)	고정형	2006
	㈜M○○	포항	6	고철, 스테인레스 (10,000톤)	고정형	2006
	㈜H○○	화성	13	스테인레스 (23,000톤)	휴대용	–
	㈜S○○	시흥	25	고철, 비철 일부 (18,000톤)	–	–
	㈜D○○	김해	23	고철, 비철 일부 (200,000톤)	–	–
	㈜S○○	울산	130	비철(알루미늄) (8,000톤)	휴대용	–
	㈜S○○	시흥	5	스테인레스 (1,500톤)	–	–
	㈜S○○	포항	7	스테인레스 (13,000톤)	고정형	2018
공항만 감시기 경보발생업체 (4개)	B○○㈜	경주	58	아연 (60,000톤)	고정형	2018
	L○○㈜	울산	600 (울산)	구리(70,000톤), 금·은 일부	–	–
	㈜D○○	울산	70 (울산)	알루미늄 (90,000톤)	–	–
	K○○㈜	온산	1,260 (온산)	아연, 연, 동 등 (1,000천 톤)	휴대용	–

6.3.2. 비철금속 유통현황 등 조사

국내 비철금속 관련 종합적인 현황 파악을 위해 한국비철금속협회, 한국무역협회, 통계청 등으로부터의 자료를 조사하였다. 한국비철금속협회의 '20년도 비철금속 수급전망 자료에 따르면 '17년 10인 이상 기업을 기준으로 비철금속 업체 수 860여개사, 종업원 수는 37,000여명으로 밝히고 있다.

표 30. 1차 비철금속산업 현황 ('17년)

업 종		사업체수(개)	종사자수(명)	출하액(10억원)
제련, 정련 및 합금	구리	28	1,484	8,035
	알루미늄	106	3,729	3,385
	납, 아연	39	3,696	8,317
	기 타	32	745	749
	소 계	205	9,654	20,486
압연, 압출 및 연신제품	구리	117	7,488	9,115
	알루미늄	271	11,275	7,294
	기 타	44	1,996	1,844
	소 계	432	20,759	18,253
주조업	구리	23	574	200
	알루미늄	117	3,540	1,227
	기 타	24	702	126
	소 계	164	4,816	1,553
기타 1차 비철금속	-	67	1,783	603
총 계		868	37,012	40,895

'18년도 기준으로 비철금속류의 국내 수입현황은 수량 순으로 알루미늄 괴 1,446천 톤, 알루미늄 스크랩 773천 톤, 알루미늄 판 407천 톤, 구리 스크랩 338천 톤, 구리 괴 285천 톤, 납 괴 144천 톤 등이다. **표 31**은 주요 비철 품목별 수입실적이다.

표 31. 비철금속류 주요 품목별 수입실적

(단위: 천불, 톤)

품 목	'17년		'18년	
	금 액	중 량	금 액	중 량
알루미늄 괴	3,356,874	1,621,431	3,280,302	1,446,299
구리 스크랩	1,701,338	331,003	1,988,769	338,644
구리 괴	2,019,737	329,836	1,888,834	285,651
알루미늄 판	978,265	274,711	1,336,262	407,148
알루미늄 스크랩	1,132,521	797,149	1,165,392	773,566
구리 박	816,443	67,763	845,223	67,122
조 동	488,795	70,279	349,820	53,322
니켈 괴	251,766	23,280	402,545	29,120
Al 기타제품	311,813	41,309	376,308	53,458
티타늄	264,287	13,363	272,899	12,058
알루미늄 박	263,811	56,025	326,532	70,476
니켈 분	151,205	4,047	218,055	5,797
주석 괴	275,061	13,508	290,959	14,268
납 괴	301,819	131,301	342,558	144,753
망간	190,885	101,135	227,482	100,697
구리 매트	128,922	58,980	155,995	59,997
구리 판	165,044	17,770	162,198	15,350
알루미늄 봉	103,661	17,913	128,283	25,260
구리 관	114,072	13,555	133,041	15,577
아연 괴	188,424	63,548	191,881	60,913
소 계	13,204,743	4,047,906	14,083,338	3,979,476
점유율(%)	88.5	95.8	88.2	95.9
합금 등 기타제품	1,710,593	177,859	1,876,653	171,744
비철금속 전체	14,915,336	4,225,765	15,959,991	4,151,220

비철금속 취급 4개 업체 현장 방문 시 수입국과 수입국별 유통량을 파악하고자 하였으나 무역상(trader)을 통해 납품을 받으며 무역상은 특정 국가를 정하지 않고 주문받은 금속의 조건에 맞는 스크랩을 각국으로부터 확보하여 공급하는 방식인 것으로 확인되었다.

제 3 장. 결론

국민의 건강과 환경을 보호하여 삶의 질을 향상시키고 공공의 안전에 이바지함을 목적으로 '12년7월26일에 생활주변에서 접할 수 있는 방사선의 안전관리에 대한 국가 차원의 관리체계인 생활방사선법이 시행되었다. 그리고 법 제23조에 따라 생활주변방사선 안전관리 실태조사 및 분석이 연차별로 진행되어 왔다. '19년에는 해당 실태조사의 수행 주체가 KINS로 일원화 되었고, 이에 따라 KINS에서는 다음 6가지 대상에 대한 실태조사 및 분석이 일괄적으로 수행되었다.

KINS는 40개 공항·항만 감시기 운영자에 대한 사전검토 후, 전년도 신규설치, 운영개선 필요 등에 따라 12개의 감시기 운영자에 대한 현장 실태조사를 수행하였다. 전년도 신규설치 감시기 운영자의 경우, 전반적으로 감시기 운영현황이 우수함을 확인하였다.

차단기 관련 운영개선이 필요한 부산항 A부두의 경우, RFID가 차량을 인식한 후 5초 이후에 신호가 전달되도록 함으로써, 감시기가 충분한 시간을 가지고 화물측정 및 데이터 분석을 할 수 있도록 알고리즘을 수정, 경보가 발생할 경우 화물이 적절하게 통제되도록 조치하였고, B부두의 인력부족 문제는 부두 상황실 인력이 현장요원이 자리를 비울 경우 방사선감시 업무를 대신할 수 있도록 운영체계를 변경하였다.

공항 감시기운영자에 대한 현장 실태조사 수행결과, 전반적으로 감시기 운영현황이 우수함을 확인하였다. 그러나 공항의 운영 특성상 2차검색에 오랜 시간이 소요되어 감시기 운영에 애로사항이 있는 것을 확인하였는데, KINS는 이를 위해 공항 운영체계를 개선하고, 최신 장비를 공항에 우선으로 보급하여 2차검색 시간을 단축할 수 있도록 지원할 예정이다.

재활용고철취급자 13개사 18개 사업장에 대해서도 실태조사가 수행되었다. 총 57대의 감시기가 설치·운영되고 있으며, '18년 재활용고철 취급량은 전년 대비 7.2% 증가하였다. 재활용고철취급자는 담당자를 지정하여 일상점검을 실시, 그 기록을 보관하고 있는 것으로 조사되었다. 감시기의 점검은 운영방식에 따라 일일, 주간, 분기 등의 단위로 이루어지며, 성능점검은 전문업체와 유지보수 계약의 방식으로 진행됨을 확인하였다.

감시기의 고장 및 파손이 발생한 동국제강 인천공장과 포스코 광양공장은 원안위에 보고 후, 현재는 수리 완료하여 정상 운영 중에 있다. '18년 원안재단 교육에 참여하지 않은 3개 사업장에 대해서는 동일 사례가 재발되지 않도록 안내하였다.

원료물질 및 공정부산물에 대한 실태조사는 원료물질 취급 사업장, 유의물질 발생 사업장, 공정부산물 발생시설 및 유의물질 의심 사업장의 4가지 분야 총 15개 업체에 대하여 진행되었다.

원료물질 취급 사업장은 도형제, 유약, 세라믹 제조를 위하여 저어콘을 취급하는 9개 업체였다. 해당 사업장에서는 모두 공정부산물이 발생하지 않았으며, 외부피폭 우려가 있는 지역에서의 최대 방사선량률은 0.62 μSv/h, 최대 피폭방사선량도 내·외부 피폭 합계 0.21 mSv/y 수준으로 낮게 평가되었다.

공항·항만 감시기를 통하여 유의물질이 발생된 사업장은 타일, 저어콘 화합물 및 온열방석을 제조하는 3개 업체였다. 다만, 타일 제조업체에서의 피폭방사선량은 0.028 mSv/y에 불과하였고, 저어콘 화합물을 생산하는 업체의 원료 및 제품에서는 배경준위 대비 방사선량률의 증가가 나타나지 않아 방사선 관련 안전관리가 불필요하였다. 온열제품 제조업체는 방석 부자재를 수입하여 완제품 방석을 제조, 전량 수출하였으며, 향후 해당 부자재를 취급할 계획이 없음을 밝혔다. 또한 과거의 해당 제품 취급에 의한 종사자 피폭도 무시할 수 있는 수준이었다.

공정부산물로 발생시킬 소지가 있는 먹는샘물 제조업체는, 지하수와 함께 배출된 라돈의 딸핵종인 ^{210}Pb가 필터에 농축될 수 있다. 다만 방사능 분석결과 공정부산물 정의기준에 미치지 못하였으며, 종사자에 대한 피폭방사선량도 우려할 필요가 없는 0.0039 mSv/y 수준으로 평가되었다.

유의물질 의심 사업장 2곳 중 하나는, 과거 모나자이트가 투입된 것으로 추정되는 비즈(구슬)를 보유하고 있었으나, 방사능 농도 분석결과에 따라 향후 취급 의사가 없음을 밝혔다. 이에 따라 모나자이트는 시장에서의 자정작용으로 퇴출되고 있음을 확인하였다. 다른 한 곳은 생산하는 비료에서 등록기준 이상의 방사능 농도가 보고되어 실태조사를 진행하였으나, 최종적으로는 해당 기관에서의 분석 오류로 확인되었다. 또한 실제로도 배경준위 대비 방사선량률의 증가가 나타나는 공정지역이 없는 것을 확인하였다.

가공제품 실태조사는 총 513개 제품에 대한 방사능 농도분석 및 연간피폭선량을 평가로 진행하였다. 전체 513개 제품의 라돈·토론 농도를 측정하였으며, 섭취·흡입경로에 의한 내부피폭 가능성이 낮은 제품 102개를 제외한 411개 제품에 대해서 내부피폭선량을 평가하였다. ^{238}U, ^{232}Th의 농도 분석 및 외부피폭선량평가는 제품군 중 라돈·토론 측정값이 높은 제품 58개를 대상으로 수행하였다.

상기 411개 제품 중 피폭선량 1 mSv를 초과한 제품은 68개 제품으로 일반매트리스 17개, 전기매트 14개, 이불 8개, 패드 6개, 온열매트 6개, 베개 5개, 슈트형 속옷 4개, 담요

4개, 라텍스 매트리스 2개, 온수매트 1개, 소파 1개 제품이었다.

항공운송사업자에 대한 실태조사에 따르면 국내에는 9개의 사업자가 존재하며, 전체 승무원은 22,484명으로 전년대비 9.8% 증가한 것으로 파악되었다. 해당 사업자는 우주방사선에 의한 피폭방사선량 평가프로그램으로 CARI-6/6M과 NAIRAS를 사용하고 있으며, 승무원 연평균 1인당 2.09 mSv을 받는 것으로 조사되었다. 안전지침에 따라 승무원은 연간 6 mSv를 초과하지 않도록 권고하고 있으며, 해당 수치 초과자는 없는 것으로 조사되었다. 또한 개정된 법에 따라 승무원이 항상 피폭방사선량 정보를 확인할 수 있으며, 항공운송사업자는 사내전산망 또는 이메일을 통하여 해당 정보를 제공하고 있다.

생활주변방사선방호 시행계획에 따라 방사성오염 금속 감시범위 확대 필요성 검토의 일환으로 재활용고철 대단위 수집업자 실태 및 비철금속 분야 업계현황을 조사하였다.

대단위 수집업자는 대상(大商)으로 불리고 있음에도 16개 업체 중 100명이 넘는 한 곳을 제외하면 10여명 내외의 중소업체였다. 이번 조사로 파악한 대상만 250여개이며, 각 대상마다 거래하는 중상(中商)도 수십 개에 이르고 중상에 납품하는 거의 개인 수준의 소상(小商)까지 합하면 기하급수적으로 늘어날 것이라 예상된다. 한편 소・중・대상은 업계에서 부르는 표현에 불과해 특정화하여 구분하기 어렵고 업체 존속성도 불투명하다.

방사성 유의물질 감시체계를 재활용고철취급자 보다도 역량이 부족한 업체까지 확대할 경우 국가가 관리하는데 비효율적일 수 있으며 자칫 각 유통단계에서 책임회피식 유의물질 은폐 등 부작용도 우려된다. 검토한 결과로는 재활용고철 유통을 대표할 수 있고 국가가 명확하게 관리 가능한 현행 재활용고철취급자 중심의 감시체계가 적절하다고 보이며 제도의 목적달성에도 효과적이라 판단된다.

다만, 비철금속 분야는 금속별 종류나 취급 형태가 다양하고 크고 작은 용융시설 운영 등 다소 복잡한 구조를 띠고 있어 금번 조사로는 충분히 자료를 확보한 것으로 보기 어렵다. 수입 비철 스크랩 등이 공항・항만 감시기에서 유의물질 검출 사례가 있던 만큼 비철금속 분야에 감시기 설치 의무를 부과할지 검토를 위한 추가조사가 필요할 것으로 판단된다.

제 4 장. 참고문헌

1) 생활주변방사선 안전관리법, 법률 제11715호, 2013.3.23. 시행

2) 생활주변방사선 안전관리법 시행령, 대통령령 제23991호, 2012.7.26. 시행

3) 생활주변방사선 안전관리법 시행규칙, 총리령 제1027호, 2013.6.21. 시행

4) KINS, 2016a, 국내 수처리 시설에서의 천연방사성핵종 농축 및 발생현황 기초조사, KINS/HR-1455

5) KINS, 2016b, 2015년도 생활주변방사선 안전관리 사업결과보고서, KINS/GR-547, vol.3 Summ.

6) KINS, 2017a, 2016년도 생활주변방사선 안전관리 사업결과보고서-실태조사・분석 및 등록심사 분야, KINS/GR-547, vol.4 No.1

7) KINS, 2017b, 지하수 사용 수처리시설에서의 천연방사성핵종 농축 공정부산물 실태조사, KINS/HR-1523

8) KINS 2018, 2017년도 생활주변방사선 안전관리 사업결과보고서-실태조사・분석 및 등록심사 분야, KINS/GR-547, vol.5 No.1

9) KINS 2019, 2018년도 생활주변방사선 안전관리 사업결과보고서-실태조사・분석 및 등록심사 분야, KINS/GR-547, vol.6 No.1

10) IAEA, 2006, Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials, IAEA Safety Report Series No.49

11) UNSCEAR, 2010, Source and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2018 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume 1, Annex B

(공백)

KINS

KOREA
INSTITUTE OF
NUCLEAR
SAFETY

한국원자력안전기술원 우)305-338 대전광역시 유성구 과학로 62
KINS KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY www.kins.re.kr