

연구보고서

# 저선량 방사선발생장치 사용에 따른 피폭선량 조사

유재룡·진영우·박민석·김한성·김민섭·어인모

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



# 제 출 문

산업안전보건연구원장 귀하

본 보고서를 “저선량 방사선발생장치 사용에 따른 피폭 선량 조사”의 최종 보고서로 제출합니다.

2021 년 11 월

## 연구진

연구기관 : 한국원자력의학원

연구책임자 : 유재룡 (선임연구원, 한국원자력의학원)

연구원 : 진영우 (특임의무직, 한국원자력의학원)

연구원 : 박민석 (연구원, 한국원자력의학원)

연구원 : 김한성 (연구원, 한국원자력의학원)

연구원 : 김민섭 (의료기사, 한국원자력의학원)

연구원 : 어인모 (의료기사, 한국원자력의학원)



# 요약문

- 연구기간 2021년 04월 ~ 2021년 11월
- 핵심 단어 저선량 방사선발생장치, 방사선작업종사자, 피폭선량
- 연구과제명 저선량 방사선발생장치 사용에 따른 피폭선량 조사

## 1. 연구배경

- 방사선이용분야는 업종에 따라 방사성동위원소(RI; radioisotope)와 방사선발생장치(RG; radiation generator) 사용기관으로 구분되며, 사용목적 및 기관의 특성에 따라 교육, 군사, 의료, 공공, 산업, 연구 및 기타로 구분됨. 원자력안전법 시행규칙에 따라 용도 또는 용량의 기준에 따라 허가 및 신고기관으로 구분됨.
- 허가기관의 경우 해당기관에서 방사선작업종사자로 등록하여 작업종사자에 대한 피폭방사선량을 관리하나 신고기관의 경우 교육훈련, 안전관리규정 및 정기검사 등의 의무가 면제됨.
- 2008년부터 2017년까지 방사성동위원소 사용기관은 25% 증가한 반면, 방사선발생장치 사용기관은 150% 증가하였음.
- 방사선이용분야 중 산업분야의 방사선이용 비율이 가장 높으며 방사성동위원소 사용기관의 경우 60% 이상이며, 방사선발생장치 사용기관의 경우 80% 이상을 차지하고 있음. 특히, 방사선발생장치 사용기관 중 90% 이상이 신고대상임.
- 방사선 이용 사업장에서는 작업종사자 건강관리를 위하여 개인피폭

선량 측정 및 건강 진단을 실시하여야 하나, 신고대상 방사선발생장치 사용 사업장은 관계기관에 신고하여 사용하기 때문에 저선량 방사선 피폭에 관한 실태는 확인되지 않고 있는 실정임.

- 산업분야에서 방사선 이용에 따른 방사선사고가 발생하였으며 산업체에서의 방사선사고가 전체의 약 65%에 해당됨. 이에, 방사선이용기관의 증가에 따라 방사선사고의 발생 가능성이 증가할 것으로 예상된다.
- 신고대상 방사선발생장치와 관련된 국내·외 사고가 지속적으로 발생하고 있는 상황임. 신고대상 방사선발생장치의 사용과 관련한 사고는 고장 시 유지·관리를 위한 장비 수리 중 발생한 사례이며, 대부분 손등과 같은 국소부위 피폭임. 그러나 방사선 안전을 위한 차폐문 연동장치 자동잠금을 해제 등과 같은 절차를 위반하여 발생한 사고사례가 있음.
- 방사선이용기관 중 신고대상 장비 사용기관의 방사선작업종사자에 대한 건강보호 및 방사선안전관리에 대한 현황 파악을 위한 현장조사의 수행 필요

## 2. 국내 방사선발생장치 이용기관 현황

### ○ 방사선발생장치의 분류 및 국내 도입 현황

- 원자력안전법에서는 방사선발생장치에 대하여 용도 및 용량의 기준을 정하여 허가대상, 신고대상 그리고 규제면제(제외)로 구분하고 있음.
- 허가대상 방사선발생장치 사용기관은 설계 승인, 도입기관 현장조사, 정기검사 등을 통하여 관리되고 있으나, 신고대상 방사선발생장치 사

용기관은 설계승인 이후 신고 과정만으로 방사선발생장치의 사용이 가능함.

- 국내 도입된 허가대상, 신고대상 방사선발생장치는 매년 증가하고 있으며 신고대상 방사선발생장치 사용기관의 수가 허가대상 방사선발생장치 사용기관의 수보다 빨리 증가하고 있음.
- 방사선발생장치 중 약 90% 이상이 신고대상 장비이며, 엑스선 형광·회절 분석, 가속이온주입, 수화물검색, 휴대형 폭발물 탐지·처리, 제품결함검사를 포함한 방사선투과검사 등의 목적 사용됨.
- 방사선발생장치는 기기의 구조에 따라 완전방호형, 캐비닛형, 무인격리형, 휴대개방형으로 구분할 수 있으며 구조에 따라 작업종사자의 피폭선량이 상이할 수 있음.
- 완전방호형의 경우 설계기준 및 구조적 특징으로 방사선작업종사자의 피폭 발생 가능성이 매우 낮으며 대부분 규제면제(제외) 대상임.
- 신고대상 방사선발생장치 중 캐비닛형 구조의 비율이 가장 높으며(80% 이상), 제품결함검사 및 성분분석의 목적에 활용되는 장비의 비율이 가장 높음.

#### ○ 조사 대상 사용기관 분류

- 국내에 도입하여 사용중인 신고대상 방사선발생장치는 약 14,000대이며, 서울/인천/경기 지역에 약 40% 이상으로 집중되어 있는 경향을 나타냄.
- 저선량 방사선발생장치 사용기관 중 산업분야가 80% 이상.
- 방사선발생장치 사용목적에 따라 가속이온주입, 방사선투과검사, 성분분석, 보안검색, 식품조사 및 기타로 분류하였으며, 이를 바탕으로

피폭선량 조사를 위한 현장조사 대상기관을 선정함.

### ○ 신고대상 방사선발생장치 사용 현황 및 조사 대상 업체 선정

- 방사선발생장치의 사용목적 분류를 바탕으로 현장조사 대상기관(30개)을 선정하기 위해 2배수에 달하는 기관을 제안하였음.
- 방사선발생장치의 사용목적이 동일할 경우 피폭가능성이 높은 장비(관전압 및 관전류가 높은 장비) 사용기관을 현장조사 대상 우선순위에 포함하였음.

### ○ 피폭선량 현장 조사

- 열형광선량계, 전자개인선량계 및 서베이미터를 활용하여 방사선발생장치 사용에 따른 피폭선량을 평가.
- 방사선발생장치 사용 시 작업종사자의 위치에서의 피폭선량을 심부선량( $H_p(10)$ ) 및 표층선량( $H_p(0.07)$ )으로 구분하여 평가.
- 방사선발생장치 사용 시 산란선에 의한 영향을 평가하기 위해 작업종사자의 위치를 제외한 방사선발생장치 주변 등에 대해 공간선량 평가.
- 작업장 내 저선량 방사선에 대한 측정을 위해 열형광선량계(TLD; thermo luminescent dosimeter) 판독 알고리즘을 조정하여 선량평가.  
 ※ 일반적으로 TLD 판독 장비의 교정은 감마선원( $Cs-137$ )을 이용하며 판독과정의 보정 알고리즘을 통해 엑스선장에서의 데이터 값으로 변환함. 이에 따라 TLD 판독기관에서 저선량 판독을 위한 알고리즘을 조정 저선량 방사선발생장치로부터 방출되는 방사선에 의한 피

폭선량 평가.

- 방사선발생장치에서 방출되는 방사선의 영향을 평가하기 위해 백그라운드의 영향을 고려하여야 하므로, 작업장의 백그라운드와 관독기관의 백그라운드 값을 고려하여 실제 TLD 관독결과 산출.

### 3. 연구 활용방안

- 국내 방사선동위원소 및 방사선발생장치 사용현황 등의 자료를 바탕으로 저선량 방사선발생장치 중 신고대상 방사선발생장치 사용기관에 대한 현황 파악을 통하여 실제 저선량 방사선발생장치 이용기관에서의 방사선 피폭에 관한 기초자료로 활용.
- 신고대상 방사선발생장치 사용실태를 파악하고 사용형태에 따른 방사선량 측정을 통하여 저선량 방사선에 피폭되는 작업종사자의 피폭저감화를 위한 방안 마련.

#### 4. 연락처

- 연구책임자 : 한국원자력의학원 선임연구원 유재룡
- 연구상대역 : 산업안전보건연구원 직업건강연구실 역학조사부  
연구원 최준혁
  - ☎ 052) 703-0874
  - E-mail : radio@kosha.or.kr



# 목 차

I. 서론 .....	1
1. 연구의 배경, 필요성 및 목표 .....	1
1) 연구의 배경 .....	1
2) 연구의 필요성 .....	7
3) 연구의 목표 .....	7
2. 연구내용 및 방법 .....	8
1) 연구내용 .....	8
2) 연구방법 .....	8
II. 국내 방사선발생장치 이용현황 및 피폭선량 조사 .....	15
1. 저선량 방사선발생장치의 사용실태 .....	15
2. 분야별 방사선 발생장치 사용유형, 장비 조사 .....	22
3. 방사선 발생장치 사용에 따른 피폭영향 조사 .....	27
1) 피폭선량 조사 대상 기관의 선정 .....	27
2) 피폭선량 조사 계획 .....	33
3) 피폭선량 조사 대상 기관 특성 및 장비 .....	41
4) 방사선발생장치 방사선 측정결과 .....	48
4. 방사선 발생장치 사용에 따른 작업종사자 예상 피폭선량 조사 .....	52
1) 선량계를 이용한 작업종사자 예상피폭선량 .....	52

5. 설문조사 .....	55
1) 방사선작업 유형 .....	55
2) 방사선작업에 사용되는 방사선원 .....	57
3) 방사선작업종사자 방사선발생장치를 이용한 작업빈도 .....	58
4) 방사선작업종사자 개인선량계 및 보호구 착용 .....	59
5) 방사선작업종사자 교육 이수 유·무 .....	60
6) 방사선건강영향에 대한 설문조사 .....	61
Ⅲ. 결론 .....	65
1. 고찰 .....	65
1) 국내 저선량 방사선발생장치 이용 실태 .....	65
2) TLD 및 방사선량 측정장비를 이용한 방사선량 측정 결과 .....	67
3) 발생장치 사용 사업장 안전관리 실태 설문조사 결과 .....	68
4) 연구 제한점 .....	69
2. 결론 .....	71
1) 방사선발생장치 관련 종사자에 대한 건강관리 강화를 위한 방사선안전교육 수행 검토 .....	71
2) 피폭선량 저감화를 위한 방안 .....	72
2) 방사선 면제설비 기준 재검토 .....	73
참고문헌 .....	76
[Appendix 1] 종사자 외부피폭선량평가를 위한 설문지 ..	79

## 표 차례

<표 I-1> 산업분야에 따른 방사선의 이용 .....	2
<표 II-1> 저선량 방사선발생장치의 분류 .....	16
<표 II-2> 방사선발생장치 구조기준에 따른 분류 .....	19
<표 II-3> 구조, 목적기준에 따른 국내 신고대상 방사선발생장치의 도입 현황 .....	20
<표 II-4> 저선량 방사선발생장치 조사 대상 기관 추출 수 및 최종 예상 선정 기관 수 .....	27
<표 II-5> 현장조사 대상 후보기관 .....	28
<표 II-6> TLD 상세 정보 .....	36
<표 II-7> EPD 상세 정보 .....	39
<표 II-8> ion chamber를 기반으로 한 서베이미터 상세 정보 .....	40
<표 II-9> 광자특성 및 TLD 선량변환계수 .....	50
<표 II-10> 1차선 또는 1차선 부근 측정결과(작업당) .....	51
<표 II-11> 작업종사자 피폭선량 측정결과(작업당) .....	54
<표 II-12> 방사선발생장치를 이용한 작업유형 .....	56



## 그림 차례

[그림 I-1] 연도별 (2008-2017) RI/RG 이용시설의 증감추이 .....	3
[그림 I-2] 1 mSv 이하의 방사선작업종사자 .....	4
[그림 I-3] 방사선 사고 통계 (1970년 - 2010년) .....	7
[그림 II-1] 허가, 신고대상 방사선발생장치 도입 기관 수 .....	18
[그림 II-2] 신고대상 방사선발생장치 지역별 도입 현황 .....	23
[그림 II-3] 허가, 신고대상 방사선발생장치 도입 기관 수 .....	24
[그림 II-4] 신고대상 방사선발생장치의 용도별 분포 .....	24
[그림 II-5] TLD 내부 구성 .....	35
[그림 II-6] TLD 판독시스템 및 선량계 소자 .....	36
[그림 II-7] 피폭선량 측정 개략도 .....	38
[그림 II-8] 피폭선량 측정을 위한 선량계 배치 .....	38
[그림 II-9] 가속이온주입기 (예) .....	42
[그림 II-10] 가속이온주입기 사용기관 피폭선량 측정 개략도 .....	43
[그림 II-11] 변압기형가속장치 (예) .....	44
[그림 II-12] 변압기형가속장치 사용기관 피폭선량 측정 개략도 .....	45
[그림 II-13] 엑스선발생장치(XRF) (예) .....	46
[그림 II-14] 엑스선발생장치 사용기관 피폭선량 측정 개략도 .....	47
[그림 II-15] 방사선작업에 사용되는 방사선원 .....	57
[그림 II-16] 방사선발생장치를 이용한 작업빈도 .....	58
[그림 II-17] 방사선작업종사자 개인선량계 및 보호구 착용관련 .....	59
[그림 II-18] 방사선작업종사자 및 교육이수 현황 .....	60
[그림 II-19] 방사선 인체영향에 대한 관심 .....	61
[그림 II-20] 방사선 건강 이해도, 인체영향에 대한 걱정/불안감 .....	62



# I. 서론

.....



# I. 서론

## 1. 연구의 배경, 필요성 및 목표

### 1) 연구의 배경

- 방사선의 다양한 이점으로 산업, 의료, 연구, 교육 등의 비발전분야의 원자력산업이 점차 발전하고 있다. 방사선은 방사선발생장치 또는 방사선동위원소의 형태로 여러 용도로 활용되고 있으며, 비파괴적검사 또는 분석이 가능하다는 장점으로 현장에서 많은 편의와 편리를 제공하고 있다. 하지만 방사선은 피폭의 위험성이 항상 있기 때문에 관련 관리시스템의 부실 또는 관리상의 소홀로 인하여 작업종사자에 대한 피폭이 발생할 수 있다. 이 경우 작업종사자의 건강상 위해가 발생할 수 있으며 그 정도에 따라 장애 또는 사망에까지 이를 수 있다. 특히 산업분야에서 방사선 이용이 지속적으로 증가하고 있으며 신규 인허가 수 기준으로 2017년에는 403개 기관, 2018년에는 527개 기관으로 나타났다(방사선진흥협회 2019, 방사선진흥협회 2020). 이와 같이 산업분야에서 방사선 이용이 지속적으로 확대됨에 따라 직업적 방사선 피폭 가능성이 높아져 산재보상신청건도 증가하는 추세이다.
- 방사선 이용 사업장은 크게 허가기관 그리고 신고기관으로 나뉘 수 있으며, 모든 관련 사업장은 작업종사자 건강관리를 위하여 개인피폭선량 측정 및 건강 진단을 실시하여야 한다. 하지만 신고대상 방사선발생장치 사용 사업장은 관계기관에 신고하여 사용하기 때문에 저선량 방사선 피폭에 관한 실태는 확인되지 않고 있는 실정이다.

또한, 신고대상 방사선기기를 사용하려는 기관은 최초 신고 후 사용 폐지까지 규제기관의 점검 및 각종 의무(교육훈련, 안전관리규정, 정기검사 등)가 면제된다. 요약하자면, 허가기관의 경우 해당기관에서 방사선작업종사자로 등록하여 피폭방사선량을 관리하나, 신고기관의 경우 방사선작업종사자로의 등록 의무가 면제된다.

<표 I-1> 산업분야에 따른 방사선의 이용

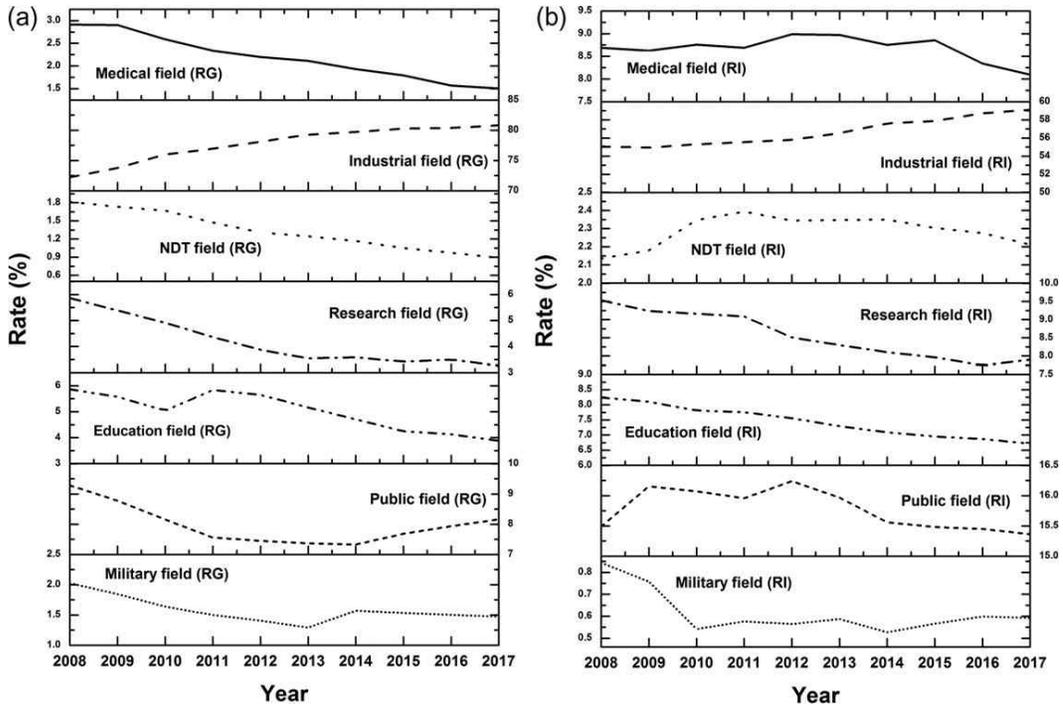
업종		교육 기관	군사 기관	의료 기관	공공 기관	산업체	연구 기관	기타	합계	
RI	신고	96	7	12	316	1,021	195	1	1,648	2,331
	허가	63	8	171	27	388	26	0	683	
RG	신고	132	78	0	601	5,668	152	1	6,632	7,254
	허가	124	27	103	33	282	53	0	622	

(자료 : 원자력안전정보공개센터)

- 방사선이용분야는 방사성동위원소 및 방사선발생장치로 구분되며 교육, 군사, 의료, 공공, 산업, 연구기관 및 기타로 구분된다.
- 2017년 12월 기준 허가종류별 방사성동위원소/방사선발생장치 인 허가 현황 중 방사성동위원소 사용기관 중 신고대상은 약 70%(전체 2,331중 1,648)이며, 방사선발생장치 사용기관 중 신고대상은 약 91%(전체 7,254 중 6,632)에 해당된다.
- 방사선이용기관의 수는 2008년부터 2017년까지 지속적으로 증가하는 경향을 나타내는데 방사성동위원소 사용은 25% 증가 하였으며, 방사선발생장치 사용은 150% 증가 하였다.

※ 2008년 기준 RI 및 RG이용분야의 기관수 : 각각 2014, 2370 개  
 2017년 기준 RI 및 RG이용분야의 기관수 : 각각 2532, 6311 개

- 방사성동위원소 및 방사선발생장치 이용과 관련 기관의 수는 전체적으로 감소하는 경향을 보이는 반면, 산업분야의 경우 방사성동위원소 및 방사선발생장치 사용분야에서 공통적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

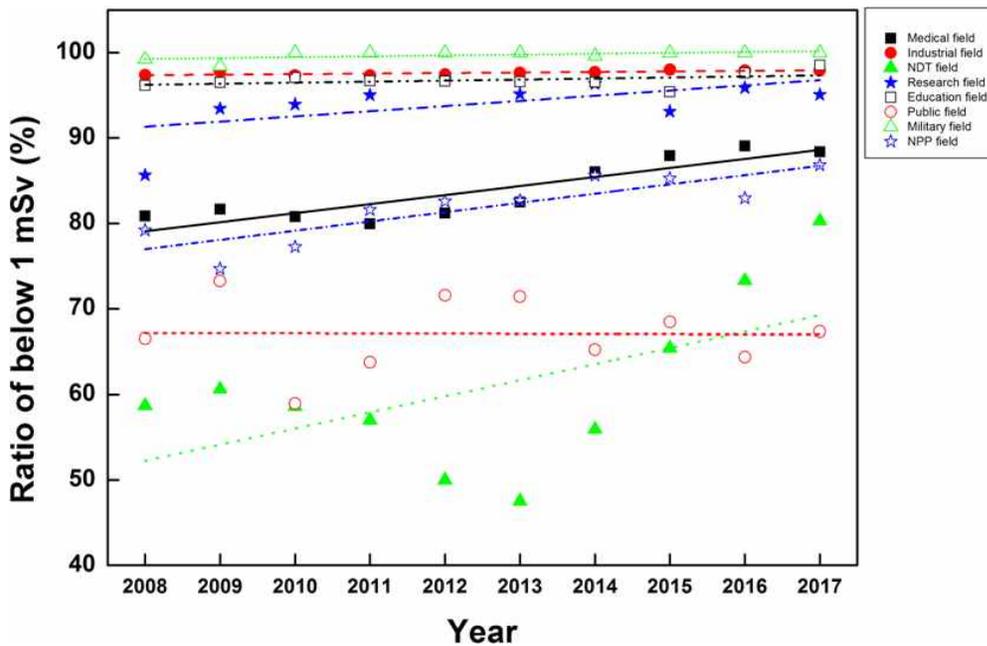


[그림 I -1] 연도별 (2008-2017) RI/RG 이용시설의 증감추이  
(자료 : Kim and Yoo, 2018)

- 특히, 최근 10년간 분야별 인허가 현황을 살펴보면 산업체 중 신고기관이 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 산업체에서 가장 많이 사용하는 장비 중 엑스선 형광분석용 및 엑스선 회절분석용 방사성동위원소등과 수화물 검색용 방사선발생장치가 신고대상이기 때문인 것으로 판단된다(한국방사선진흥협회 2020).
- 방사선관련작업으로 인한 피폭의 경향을 파악하기 위해, 방사선작업 종사자로 등록된 자에 대한 피폭방사선량의 추이를 평가한 결과

(2008년 - 2017년) 1 mSv 이하의 비율이 증가하는 것으로 보아 방사선방호 조치의 개선을 통한 피폭방사선량이 감소하는 경향을 보이고 있다.

- 그러나, 비파괴검사 및 군사분야의 경우 1 mSv 이하의 비율이 약 70% 수준에 머무르고 있어 피폭선량 저감화를 위한 지속적인 노력이 요구된다.



[그림 I-2] 1 mSv 이하의 방사선작업종사자

(자료 : Kim and Yoo, 2018)

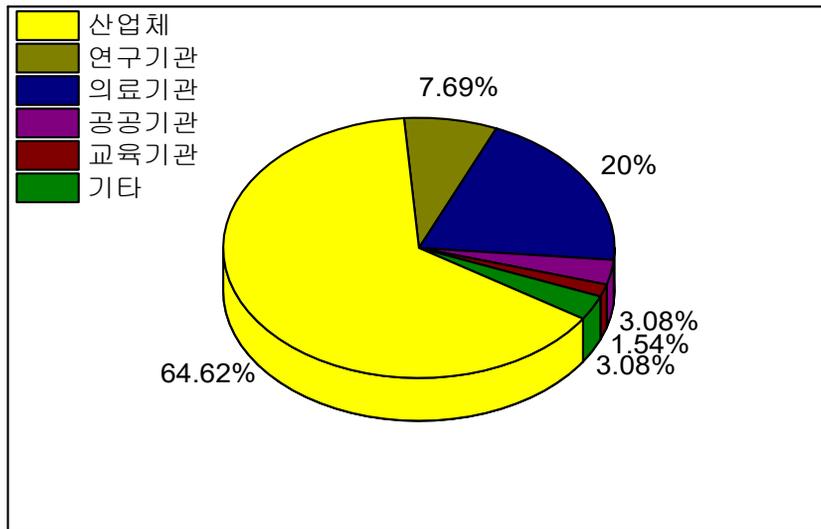
- 방사성동위원소 및 방사선발생장치의 사용의 증가에 따라 이용 기관에서의 방사선 사고 발생 가능성도 동시에 증가하게 된다. 그림 I-3에서는 1970년부터 2010년까지의 업종별 방사선 사고 통계에 대해서 보여주고 있다. 산업체의 경우 총 42건(65%)으로 가장 많은 사고가 발생하였음을 확인할 수 있었다. 다음으로 의료기관이 총 13

건(20%), 연구기관이 총 5건(8%), 공공기관이 총 2건(3%), 교육기관이 총 1건(2%) 순서로 발생하였다. 방사선 사고 유형별로는 분실·도난이 45%, 피폭이 39%, 화재가 5%, 오염 및 기타가 11%로 나타났다. 방사선발생장치 사용에 따라서는 방사선 피폭이 가장 큰 사고 요인으로 나타날 수 있다. 방사선 피폭에 따른 급성 방사선장해도 1981년부터 2010년까지 30건 발생하였기에, 방사성동위원소 및 방사선발생장치 이용기관에 대한 피폭선량 평가 및 안전관리 체계 점검이 필요할 것이다(김무환 2014).

- 신고대상 방사선발생장치와 관련된 국내·외 사고가 지속적으로 발생하고 있는 상황이다. 신고대상 방사선발생장치의 사용과 관련한 사고는 고장 시 유지·관리를 위한 장비 수리 중 발생한 사례이며, 대부분 손 등과 같은 국소부위 피폭으로 보고되었다(UNSCEAR report 2000).
- 그러나 최근 국내에서는 장비의 운영 시 안전을 위한 절차를 위반한 사고가 발생하였다. 제품 결합용 엑스선 발생장치로(관전압: 100 kVp, 관전류: 0.1 mA) 신고대상 방사선발생장치이다. 상기의 장비는 엑스선 투과영상으로 반도체 불량여부를 확인하기 위한 목적으로 운영되는 장비인데, 지속적인 반복작업 시 방사선안전관리를 위한 방사선발생장치 차폐문 연동장치를 임의해제 하여 장비를 운영하였다. 방사선 발생장치 차폐문 연동장치에 이물질이 부착하여 차폐문이 개방된 상태에서도 방사선이 발생하였으며, 이와 같은 방법을 사용하여 내·외부 검사 작업을 반복적으로 수행하였다. 특히, 안전관련 절차를 지켜야 함에도 불구하고 협력업체 직원에게 작업 교육 시 연동장치 해제 방법을 알려주었다고 보고된 바 있다. 관련하여 7명의 선량한도 초과자가 발생하였으며, 선량한도 초과자에 대해서는 작업 형태 및 작업량을 조사하고 염색체 및 혈액검사를 수행하였다. 피폭 선량평가 결과 피부(손가락)의 등가선량은 1.0 Gy ~ 39.6 Gy로 평

가되었으며, 유효선량은 0.3 mSv ~ 11.9 mSv로 보고되었다.

- 상기 사고로 인해 동일/유사 기기(캐비닛형 RG, 결함검사용, 도어타입, 비전자식 연동장치) 사용기관에 대한 특별점검을 수행하였으며 안전장치 임의해제 사례는 미확인되었다고 보고되었다.
- 신고대상 방사선발생장치 사용과 관련하여 장비의 유지·보수를 위한 과정에서 피폭이 발생할 우려가 있을 것으로 판단된다. 특히 상기와 같이 차폐문 연동장치가 설치되어 있는 장비의 경우 작업 중 연동장치 해제가 가능할 경우 피폭의 가능성이 존재할 것이라 판단된다. 따라서 신고대상 방사선발생장치 사용기관의 경우 유지·보수를 위한 인력 및 실제 운영을 위한 작업종사자의 작업행태에 대한 파악이 필요하다.
- 이렇게 지속적으로 이용 기관의 수는 증가하고 있지만, 신고기관 종사자에 대한 방사선에 대한 위해는 허가기관의 종사자와는 달리 명확히 파악되지 않고 있는 실정이 지속되고 있다. 따라서 산업분야의 저선량 발생장치(신고대상) 이용기관을 중심으로 하여, 관련 종사자의 건강보호 및 방사선 안전문화 확산을 위한 실태조사 및 피폭선량 현장조사의 수행이 필요하다.



[그림 I -3] 방사선 사고 통계 (1970년 - 2010년)

(자료 : 김무환 등, 한국원자력안전기술원)

## 2) 연구의 필요성

- 방사선발생장치 이용의 확대에 따른 방사선피폭 가능성이 높아질 수 있으며, 이에 작업종사자의 방사선에 의한 영향 평가가 필요하다.
- 저선량에 대한 세포 및 소동물에 대한 기초연구는 수행되고 있으나, 실제 저선량방사선 이용기관에서의 방사선피폭에 관한 기초자료의 확보가 필요하다.

## 3) 연구의 목표

- 저선량 방사선발생장치 사용실태를 파악하고 방사선량 측정을 통하여 저선량 방사선에 피폭되는 작업종사자 피폭 관리방안 마련

## 2. 연구내용 및 방법

### 1) 연구내용

- 신고대상 방사선 발생장치 사용 실태 조사
- 분야별 방사선 발생장치 사용유형, 장비 조사
- 방사선 발생장치 사용에 따른 피폭 영향 조사
- 방사선 발생장치 사용에 따른 작업종사자 예상 피폭선량 조사
- 저선량 방사선 발생장치 및 관련 작업종사자 피폭 관리방안 제언

### 2) 연구방법

- 신고대상 방사선 발생장치 사용 실태 조사

원자력안전규제 관련 기관(한국원자력안전기술원, KINS)의 담당부서(산업방사선평가실)와 긴밀한 협조를 통하여 국내 신고대상 방사선발생장치 사용현황, 실태 및 장비 특성 등을 파악하였다. 한국원자력안전기술원으로부터 제공받은 자료를 바탕으로 신고대상 방사선발생장치를 사용 에너지, 구조, 관전압 및 관전류 등을 기준으로 분류하였으며, 해당 기관의 장비사용에 따라 방사선작업종사자의 피폭 가능성이 높은 기관을 대상으로 현장평가 계획을 수립하였다.

- 분야별 방사선 발생장치 사용유형, 장비 조사

방사선이용과 관련한 산업에는 방사성동위원소 또는 방사선발생장치의 이용으로 구분된다. 방사성동위원소는 자체적으로 방사선을 방출하는 방사성물질을 의미하며 대표적으로 Cs-137, Co-60, Ir-192 등이 산업에 이용되고 있다. 이러한 방사성동위원소는 밀봉 또는 개봉선원으로 구분되며, 지속적인 방사선을 방출하므로 보관, 운송 및 사용 시 방사선작업

종사자 뿐만 아니라 일반인에 대한 방사선영향을 최소화하기 위한 차폐 시설이 반드시 필요하다. 특히 방사성동위원소는 각 핵종마다 고유의 방사선 즉 알파, 베타 및 감마선 등을 방출한다. 이와 같은 방사선은 각각의 고유 에너지를 방출하는 특성이 있다. 반면 방사선발생장치는 장비작동 시 방사선이 발생하는 장비로 장비의 가동이 중지된 상태에서는 방사선이 발생되지 않는 특성이 있다. 특히, 방사선발생장치는 관전압, 타겟 물질 및 관전류에 따라 방출되는 방사선의 에너지가 달라진다. 따라서 사용 목적에 따라 방사선의 에너지 강도를 조절할 수 있는 특성이 있다.

방사성동위원소 및 방사선발생장치는 방출되는 에너지의 강도 및 표면방사선량률, 구조, 용도 등을 기준으로 허가사용과 신고사용으로 구분된다. 방사성동위원소 및 방사선발생장치 사용 등의 허가에 해당되는 기관은 관련 작업종사자를 방사선작업종사자로 등록하여 피폭방사선량을 관리하여야만 하고, 교육훈련, 안전관리규정 준수 및 정기검사의 의무가 있다. 반면 신고대상 방사선발생장치 이용기관의 관련 작업종사자 역시 방사선작업종사자로 구분되나, 허가기관과 다르게 피폭방사선량의 관리, 교육훈련, 안전관리규정 준수 및 정기검사의 의무를 면제한다. 이와 관련하여, 원자력안전법 시행규칙에서는 신고대상 방사선발생장치의 용도(엑스선 형광분석용, 엑스선 회절분석용, 가속이온주입용, 수화물 검색용, 그 밖에 위원회가 정하여 고시하는 것)와 용량(자체 차폐된 방사선발생장치로서 가속관의 최대전압이 170 킬로볼트 이하이고, 표면방사선량률이 시간당 10 마이크로시버트 이하일 것)의 기준을 제시하고 있다.

방사선이용분야는 교육, 군사, 의료, 공공, 산업, 연구 및 기타로 구분되며 이에 따른 방사선발생장치의 허가 및 신고를 구분하였다. 그리고 방사선발생장치는 구조에 따라 완전방호형, 캐비닛형, 무인격리형 및 휴대개방형으로 구분되며 본론에서 세부적인 사항을 설명하였다.

본 연구에서는 산업분야에 사용되는 방사선발생장치 사용에 따른 피폭선량 조사를 목표로 하고 있다. 이에 신고대상장비를 대상으로 하여 구조

에 따른 분류를 수행하였다.

▪ 방사선 발생장치 사용에 따른 피폭 영향 조사

방사선발생장치 사용에 따른 피폭영향을 조사하기 위해서는 방사선발생장치의 종류, 특성, 구조 및 사용방식 등에 따라 피폭우려가 높은 사업장을 선정하여야 한다. 이에, 신고대상 방사선발생장치 기관에 대한 사전 검토 후 조사대상기관을 선정하여 현장조사를 수행하였다. 현장조사 기관에 대해서는 방사선발생장치 사용 시 작업공간 내 공간선량률 및 작업종사자의 위치에서의 피폭선량을 측정하였다.

방사능계측기(서베이미터 또는 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터)를 이용하여 방사선발생장치에서 방출되는 1차선을 직접측정하고 산란선 평가를 위해 방사선발생장치 주변을 측정하였다. 작업장 내 순계수치(net count) 획득을 위해 방사선으로부터 영향을 받지 않는 위치에서 백그라운드를 측정하며, 측정값에서 제외한다.

▪ 방사선 발생장치 사용에 따른 작업종사자 예상 피폭선량 조사

방사선발생장치 사용에 따른 방사선작업종사자의 예상 피폭선량을 평가하기 위해 실용량<sup>1)</sup>(operational quantity) 측정이 가능한 장비를 이용하였다. 작업형태 및 작업종사자의 위치에 따른 피폭선량 평가를 위해 열형광선량계(TLD; thermo luminescent dosimeter)와 전자개인선량계(EPD; electronic personal dosimeter)를 사용한다. 일반적으로 방사선작업종사자의 피폭선량평가를 위한 선량계는 작업종사자의 흉부에 착용하는 것을 기본으로 한다. 이에 방사선작업종사자의 작업위치 등을 반영하여 선량계의 위치를 설정하고자 한다. 또한 상기의 선량계는 방사선작업종사자의 심부선량  $H_p(10)$  및 표층선량  $H_p(0.07)$  평가가 가능하다. 여기서 표층선량은 피부선량을 의미한다. 신고대상 방사선발생장치의 사용

1) 방사선작업장 공간선량 감시 및 개인별 피폭관리 목적으로 서베이미터나 TLD를 이용하여 측정된 흡수선량값으로 유효선량을 대체

방식에 따른 방사선조사(radiation exposure) 시간을 산정하고, 해당 작업과 동일한 시간동안 TLD를 분할조사여 피폭선량을 추정하였다. 아울러, 방사선발생장치에서 방출되는 방사선으로부터 영향을 받지 않는 곳에서 백그라운드를 측정하여 TLD를 이용한 측정결과에 대한 신뢰성 확보를 하였다.

상기 실험방법을 이용한 측정결과에 대한 객관성 및 신뢰성 확보를 위해 국내 전문가의 자문을 수행 하였다.

- 저선량 방사선 발생장치 및 관련 작업종사자 피폭 관리방안 제언  
방사선발생장치의 특성(관전압, 관전류, 구조 등) 및 작업형태를 분석하여 피폭 경향을 파악하고 이를 바탕으로 방사선작업종사자의 피폭선량 저감을 위한 방안을 강구하였다. 특히 방사선발생장치 운영 중 방출되는 방사선이 영향을 미치는 영역(방향 및 거리 등)을 파악하기 위해 방사선 발생장치 주변의 공간선량률을 평가하였다.

아울러, 방사선안전과 관련된 설문조사를 통하여 대상기관의 방사선안전관리를 위해 보완되어야 할 사항을 파악하고, 업종별 장비특성 및 업무 특성을 파악하여 방사선피폭선량 저감을 위한 방안을 강구하기 위해 역학 전문가 및 방사선 전문가가 해당 산업장 방사선안전관리 책임자와의 면담 및 설문을 수행하였다.

방사선에 대한 이해도를 제고하기 위해 방사선에 의한 인체영향 등에 대한 정보를 제공하고 현장에서 사용하는 방사선발생장치의 특성(관전압, 관전류, 구조 등)에 따른 방사선 특성에 대한 설명 수행하였다.



## Ⅱ. 국내 방사선발생장치 이용현황 및 피폭선량 조사





## Ⅱ. 국내 방사선발생장치 이용현황 및 피폭 선량 조사

### 1. 저선량 방사선발생장치의 사용실태

- 국내 방사선발생장치의 안전한 이용을 위해서 발생장치의 도입, 인·허가 및 사용과 관련한 규제가 원자력안전법에 근거하여 이루어지고 있다. 표 II-1 에서처럼 원자력안전법에서는 방사선발생장치에 대하여 일정용도 또는 용량의 기준을 정하여 허가대상, 신고대상 그리고 규제면제(제외)로 구분하고 있으며, 이러한 분류기준을 바탕으로 국내 방사선발생장치에 대한 관리를 수행하고 있다.
- 대부분의 저선량 방사선발생장치는 신고대상으로 분류할 수 있으며, 엑스선 형광·회절 분석, 가속이온주입, 수화물검색, 휴대형 폭발물 탐지·처리, 제품결함검사를 포함한 방사선투과검사 등의 목적으로 국내에서 사용되고 있다.

<표 II-1> 저선량 방사선발생장치의 분류

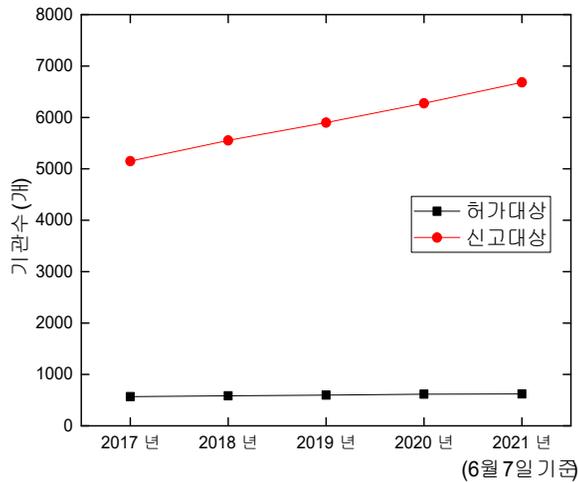
허가대상	신고대상	규제면제
<ul style="list-style-type: none"> <li>원자력안전법의 용도 또는 용량 기준을 초과하는 경우</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>일정용도 또는 용량이하의 방사선 발생장치                      용도 : 엑스선 형광 및 회절분석 용, 가속이온주입 용, 수화물 검색용 등                      용량 : 자체 차폐된 방사선 발생장치로서 가속관의 최대 전압이 170 kV 이하이고, 표면 선량률이 10 <math>\mu</math>Sv/h 이하인 경우</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>발생하는 방사선의 에너지가 5 keV 이하인 것</li> <li>의료 진단용으로 사용하는 엑스선 발생장치</li> <li>원자력안전법 및 고시에 따른 완전방호형 방사선발생장치</li> </ul>

(자료 : 원자력안전법 시행규칙 제 66조)

- 대표적으로 몇 가지 용도의 발생장치에 대해 간략히 설명하자면, 우선 X선 형광분석의 경우 시료의 재질 및 성분을 분석하기 위해 30~50 kV, 0.1~1 mA 정도의 낮은 전압, 전류의 방사선을 사용한다. 자체적으로 차폐된 형태의 장비의 경우 피폭 가능성이 없으며, 휴대형으로 사용되는 장치의 경우 엑스선 조사야에 직접 피폭 시 일부 피폭이 발생할 수 있다. 하지만 최근의 경우 센서를 통해 조사야 내 물체에 대한 탐지를 조사에 앞서 수행하므로, 비정상적인 피폭상황을 방지하는 시스템으로 구성되어 있다. 엑스선 회절분석은 결정 구조에 대한 분석을 위해 사용되며, 매우 좁은 선속의 방사선이 방출되는 형태이며, 도어락(Door lock)이 설치되어 있어 장치의 문을 개방할 경우 방사선의 방출이 제한되는 형태로 제작이 되어 방사선 피폭이 발생할 가능성이 낮다. 하지만, 2020년 신고대상 방사선발생장치 이용에 따른 피폭사고에서 작업종사자가 도어락을 임의해제하고 작업을 수행하여 피폭당하는 사고가 발생하였기 때문에 신고대상 방사선발생장치의 시스템적 안정성에 덧붙여 실제 사용기관의 안전

관리에 대한 인식 및 운영 시스템에 대한 점검이 필요하다(방사선 사건 설명회 2021). 가속이온주입용 발생장치의 경우 주로 반도체 공정에서의 웨이퍼(wafer) 생산 시 사용된다. 주로 알파입자보다 큰 이온(B, P, As)을 가속하기 때문에 이온의 가속에 따른 피폭은 발생하지 않는다. 알파입자는 공기 중 비정(Range)이 매우 짧기 때문에 외부피폭에 대한 기여량이 없는데, 이온을 가속하는 과정 그리고 이온을 생산하는 과정에서 물질과 이온의 충돌(제동복사)에 따른 엑스선의 발생으로 인한 피폭이 발생할 수 있다. 수화물검색용 발생장치는 다른 발생장치들과 다르게 완전히 차폐되지 않고 일부 개방된 형태로 사용된다. 따라서 수화물의 이동에 따른 장치 출입구 개방으로 방사선이 장치 외부로 나올 수 있으나 일반적인 경우 작업종사자의 위치가 방사선이 새어 나오는 지점과는 거리가 있어 직접적인 피폭 발생가능성은 낮을 것이라 판단된다(방사선기기의 설계승인 및 검사에 관한 기준 2021, 정은교 2015).

- 국내 도입된 허가대상, 신고대상 방사선발생장치의 수는 그림 II-1에서처럼 점차 증가하고 있으며, 특히 신고대상 방사선발생장치 이용기관의 수가 허가대상 방사선발생장치 이용기관 수보다 보다 가파른 폭으로 증가하고 있다.



[그림 II-1] 허가, 신고대상 방사선발생장치 도입 기관 수

(2021년 6월 기준)

(자료 : 한국원자력안전기술원 방사선안전관리통합정보망 (RASIS))

- 신고대상 방사선발생장치 도입 기관수의 증가에 맞춰 신고대상 방사선발생장치의 이용현황 파악 및 종사자의 피폭선량에 대한 평가가 필요하다. 특히 허가대상 기관 방사선발생장치에 대한 규제는 설계승인, 도입기관 현장조사, 정기검사 등의 방법으로 엄격하게 이루어지고 있으나, 신고대상 방사선발생장치의 경우 발생장치의 설계승인 이후, 신고 과정만으로 방사선발생장치의 이용이 가능하다.
- 따라서 본 과제에서는 신고대상 방사선발생장치의 사용에 따른 피폭선량을 조사하고자 하며, 그 대상의 선정을 위해 우선 신고대상 방사선발생장치의 구조기준, 사용목적기준에 따른 분류를 수행하였다. 국내 도입된 저선량 방사선발생장치의 인허가 관련한 자료의 수집은 방사선안전관리포털(RASIS) 내 자료 및 한국원자력안전기술원 산업방사선평가실의 협조를 통해 이루어졌으며 수집된 자료를 바탕으로 방사선발생장치의 현황에 대해 파악하였다.

- 방사선발생장치는 기기의 구조에 따라 완전방호형, 캐비닛형, 무인격리형, 휴대개방형으로 구분 할 수 있으며, 구조에 따라서 이용자에 대한 피폭선량이 다르게 나타날 수 있다(방사선기기의 설계승인 및 검사에 관한 기준, 2021). 표 II-2에 방사선발생장치의 구조기준에 따른 분류 기준을 나타내고 있다. 해당 분류 기준 중 완전방호형의 경우 설계 기준 및 형태적 특징으로 종사자의 피폭 발생 가능성이 매우 낮게 나타나며, 대부분 규제면제 대상이다.

<표 II-2> 방사선발생장치 구조기준에 따른 분류

완전방호형	캐비닛형	무인격리형	휴대개방형
<ul style="list-style-type: none"> <li>밀폐된 격리 구조물 형태</li> <li>최대가동조건에서 접촉부 표면방사선량률이 1 <math>\mu</math>Sv/h 미만</li> <li>가속관 최대전압이 50 kV 미만</li> <li>특수공구를 사용 하지 않는한 분해가 되지 않아야 함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>밀폐된 격리 구조물 형태</li> <li>접촉가능 부의 선량은 구조물 외부의 방사선량과 동일</li> <li>최대가동조건에서 접촉부 표면방사선량률이 10 <math>\mu</math> Sv/h 미만</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>단일 목적의 격리 구조물 사용</li> <li>표면방사선량률이 2 mSv/h 미만</li> <li>점유도가 낮은 위치에 고정설치 또는 장비 부근에 종사자가 체류 하지 않는 위치에 설치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>이동사용 목적을 위한 휴대용 형태</li> <li>표면방사선량률이 2 mSv/h 미만, 1 m 거리에서 0.02 mSv/h 미만</li> </ul>

(자료 : 방사선기기의 설계승인 및 검사에 관한 기준, 2021)

- 방사선발생장치는 여러 분야에서 다양한 이용 목적을 위해 사용되며, 국내에서는 가속이온주입, 방사선투과검사(제품결함검사, 비파괴검사), 성분분석, 식품조사, 보안검색(수화물검색), 폭발물 탐지 등의 목적으로 사용된다.

<표 II-3> 구조, 목적기준에 따른 국내 신고대상 방사선발생장치의 도입 현황  
(설계승인 된 기기의 수)

단위: 개(비율 %)

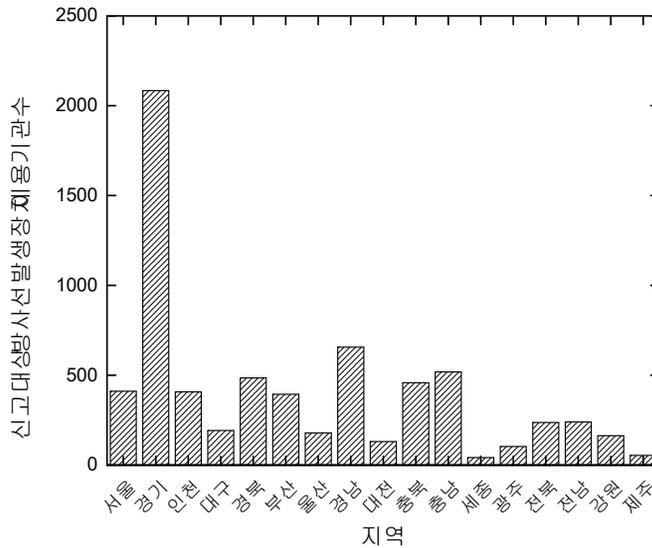
목적 기준	구조 기준			
	완전방호형	무인격리형	캐비닛형	휴대개방형
가속이온 주입	8(13)	0(0)	73(10)	0(0)
제품결합 검사	25(40)	2(8)	355(50)	0(0)
비파괴검사	16(25)	10(40)	57(8)	4(6)
성분분석	12(19)	8(32)	93(13)	55(82)
보안검색	0(0)	2(8)	102(14)	2(3)
폭발물탐지	0(0)	0(0)	0(0)	6(9)
제품가공	1(2)	0(0)	10(1)	0(0)
기타	1(2)	3(12)	22(3)	0(0)
총계	63	25	712	67

- 표 II-3와 같이 국내 도입된 신고대상 방사선발생장치의 사용 목적 및 구조기준에 따라 정리 할 수 있으며, 방사선투과검사(제품결합검사, 비파괴검사) 및 성분분석 목적으로 신고대상 방사선발생장치를 많이 사용하고 있다. 또한 국내 도입된 신고대상 방사선 발생장치의 대부분은 캐비닛형 구조(83%)인 것을 확인 할 수 있다. 따라서 본

연구에서는 캐비닛형 구조의 신고대상 방사선발생장치 이용에 따른 피폭선량에 초점을 맞추어 조사를 진행하고자 한다. 보안검색, 폭발물 탐지 목적의 신고대상 방사선발생장치의 경우 도입 장치의 수가 전체에서 낮은 비율을 나타내며 주로 특수목적(군사, 보안 등)으로 사용되기에 본 과제의 조사 범위에서는 제외하였다. 제품가공 목적의 신고대상 방사선발생장치도 전체 장치 수에서 낮은 비율을 나타내기 때문에 조사 범위에서 제외하였다.

## 2. 분야별 방사선 발생장치 사용유형, 장비 조사

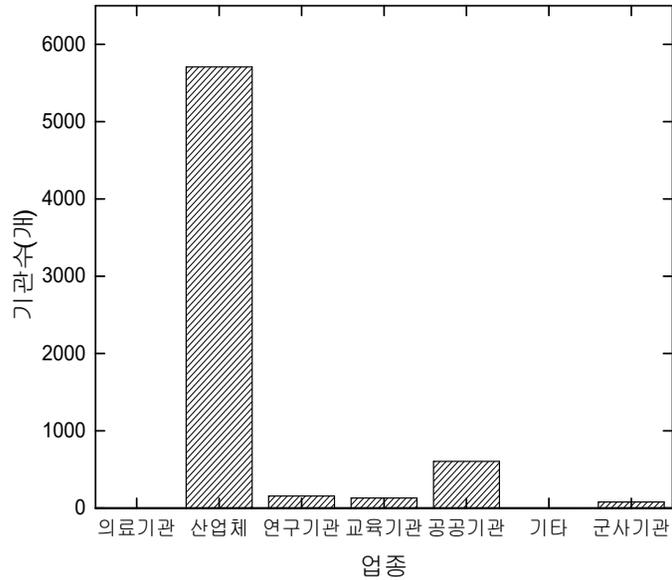
- 본 연구의 조사대상은 전체 신고대상 방사선발생장치 사용 기관 중 일부의 대상기관만 추출하여 선정하였다. 따라서 추출 기관의 대표성 확보를 위해 조사대상 기관 선정 시 현재 국내 신고대상 방사선 발생장치의 현황을 반영하고자 하였다. 그러기 위해 국내 사용기관의 분포 및 기관 별 장비 사용 목적별 분류를 수행하였다. 국내 저선량 방사선발생장치 이용기관 현황의 조사를 위하여 관련 선행연구와 방사선안전관리포털(RASIS) 그리고 한국원자력안전기술원 산업방사선평가실을 통하여 자료를 획득하였고 해당 자료를 인용하여 국내 현황에 대해 파악하였다.
- 국내에서 도입하여 사용 중인 저선량 방사선발생장치의 수는 약 14,000 대이며, 수도권을 비롯하여 전국에서 산업, 의료, 연구, 교육, 군사 등의 다양한 목적으로 사용되고 있다. 지역별 신고대상 방사선발생장치 이용 기관 현황은 그림 II-2에서 확인할 수 있다. 신고대상 방사선발생장치를 가장 많이 이용하는 지역은 경기도이며 총 2,084개 기관(약 31%)이며, 서울, 인천을 포함한 수도권의 경우 총 2,902개 기관으로 전체의 43%를 차지한다. 다음으로는 부산·울산·경남이 1228개 기관 (18%), 대전·충북·충남·세종이 1149개 기관 (17%), 대구·경북이 879개 기관 (10%), 광주·전북·전남이 580개 기관 (9%), 강원이 163개 (2%), 제주가 54개 (1%) 순서로 신고대상 방사선발생장치를 이용하고 있음을 확인할 수 있다(방사선안전관리 통합정보망, 2021).



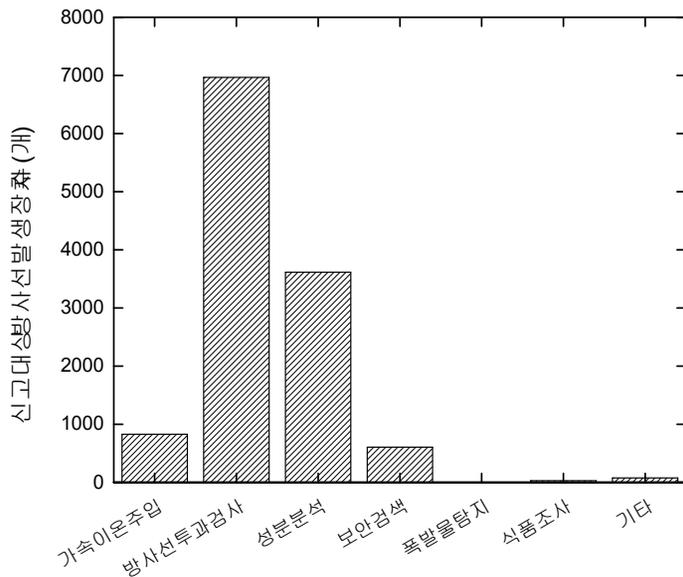
[그림 II-2] 신고대상 방사선발생장치 지역별 도입 현황

(자료 : 한국원자력안전기술원 방사선안전관리통합정보망 (RASIS))

- 저선량 방사선발생장치 이용 목적별 도입 기관수는 그림 II-3에 나타내고 있다. 산업분야에서 전체의 84%인 12,126개의 방사선발생장치를 사용하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 산업분야에서 사용하는 방사선발생장치의 수가 전체의 다수를 차지하였으며, 다음으로 공공기관이 1,429개 기관(10%), 교육기관이 334개 기관(2%), 연구기관이 301개 기관(2%), 군사기관이 176개 기관(1%), 그리고 의료기관 및 기타가 각 1개 기관에서 방사선발생장치를 사용하는 것으로 확인할 수 있었다(방사선안전관리통합정보망, 2021).



[그림 II-3] 허가, 신고대상 방사선발생장치 도입 기관 수  
 (자료 : 한국원자력안전기술원 방사선안전관리통합정보망 (RASIS))



[그림 II-4] 신고대상 방사선발생장치의 용도별 분포  
 (자료 : 한국원자력안전기술원 방사선안전관리통합정보망 (RASIS))

- 저선량 방사선발생장치 이용기관을 산업체, 공공기관, 교육기관, 연구기관, 군사기관, 의료기관 등으로 구분하여 각 업종별로 명단을 파악하였다. 그러나 모든 업종의 기관 조사대상으로 설정하여 피폭선량 조사를 수행하기는 현실적인 어려움이 따르며 본 과제의 현장조사 대상기관을 30개로 예상하고 있기 때문에 국내 저선량 방사선발생장치 이용기관의 대부분을 차지하고 있는 산업분야에 대하여 조사범위를 한정하여 과제를 수행하였다. 또한 산업분야의 경우 여러 업체에서 다양한 사용 용도로 발생장치를 사용하고 있어, 조사 기관 선정 과정에서 국내 발생장치의 사용 용도에 대한 현황을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.
- 현재 각 기관에서 사용되는 발생장치의 용도에 따른 분류를 위해 산업체 전체에서 사용하는 신고대상 방사선발생장치 리스트에서 사용 용도에 대한 큰 범주를 바탕으로 발생장치를 분류하였다. 방사선발생장치 인허가 자료의 이용 목적을 바탕으로 1)가속이온주입, 2)방사선투과검사, 3)성분분석, 4)보안검색, 5)식품조사, 6)기타 의 분류 범주를 설정하였다. 이 중 방사선투과검사 범주는 일반적인 제품결함검사 목적에서, 두께측정, 게이지 측정 검사 등을 포함하고 있다. 성분분석 범주의 경우 엑스선 형광·회절분석, 물성분석 등의 사용 용도를 포함하고 있다. 현재 각 기관에서 사용되는 발생장치의 용도는 그림 II-4에서처럼 가속이온주입 목적으로 829 대(7%), 방사선투과검사 목적으로 6,967 대(56%), 성분분석 목적으로 3615 대(30%), 보안검색 목적으로 606 대(5%), 식품조사 목적으로 30 대(1%), 기타 목적으로 78 대(1%)로 조사되었다. 방사선투과검사 목적으로 신고대상 방사선발생장치를 사용하는 기관이 가장 많이 이용하는 것을 확인할 수 있으며, 그 이후 성분분석, 가속이온주입, 보안검색, 식품조사 목적 순서로 신고대상 방사선발생장치를 사용하고 있는 것을 확인할 수 있다. 현재까지의 신고대상 방사선발생장치 사

용기관에 대한 분류를 바탕으로 피폭선량 조사를 위한 조사대상 기관을 선정하여 현장측정을 수행하였다.

### 3. 방사선 발생장치 사용에 따른 피폭영향 조사

#### 1) 피폭선량 조사 대상 기관의 선정

- 저선량 방사선발생장치 사용에 따른 피폭선량조사를 위해 30개 이내의 조사대상 기관을 선정하였다. 방사선발생장치의 구조기준, 사용 기관의 발생장치 이용 목적에 따른 장비 이용 현황 자료를 바탕으로 하여 현재 국내 저선량 방사선발생장치 이용기관을 선정하였다. 따라서 구조기준에 따라 캐비닛형 그리고 표 II-4와 같이 산업분야에서 사용되는 방사선발생장치 중 용도별 분포를 반영하여 조사대상 업체를 추출하였다. 보안 검색 목적의 방사선발생장치 이용기관은 앞서 언급한 대로 특수목적으로 사용이 주를 이루기 때문에 본 과제의 조사 범위에서는 제외하였다.

<표 II-4> 저선량 방사선발생장치 조사 대상 기관 추출 수 및 최종 예상 선정 기관 수

사용 목적	국내 이용 분포	조사 대상 기관 추출 수	최종 예상 선정 기관 수
가속이온주입	7%	6	2
방사선투과검사	56%	32	16
성분분석	30%	19	10
보안검색*	5%	-	-
식품조사	1%	1	1
기타	1%	2	1
총계	100%	60	30

- 저선량 방사선발생장치의 사용 목적별 분포를 기반으로 하여 조사 대상 기관을 선정할 예정이며, 최종 30개의 대상 기관의 선정을 위해 2배수의 추출 기관에 대하여 사업소 내 피폭선량 측정에 대한 협조를 얻은 후 방문하여 측정이 이루어질 수 있도록 하였다. 국내 저선량 방사선발생장치 분포 현황에 대한 반영과 더불어, 이용 업종의 다양성도 함께 고려하여 특정 산업 분야에 치우치지 않도록 조사 대상 기관을 추출하였다. 동일한 사용 목적 내에서는 방사선발생장치의 사용에 따른 피폭유발 확률이 높을 것이라 예상되는 상대적으로 허가 전압/전류량이 큰 방사선발생장치 위주로 조사 대상을 선정하였다(표 II-5). 장치의 구조적인 특성도 중요하지만, 일반적으로 방사선발생장치의 사용 전압/전류량이 클 경우 누설선량과 관련한 피폭 발생 가능성도 높아지게 된다.

<표 II-5> 현장조사 대상 후보기관

허가구분	명칭	허가량 /전압 (kVp)	MBq변환 /전류 (mA)	사용목적	업종분류
식품조사 (2)					
RG사용 신고	변압기형 가속장치	80	34	식품조사	유업
RG사용 신고	엑스선 발생장치	120	7.5	식품조사	과실, 채소 가공 저장 처리업
기타 (2)					
RG사용 신고	변압기형 가속장치	150	100	기타	항공기부품 제조업
RG사용 신고	변압기형 가속장치	80	500	기타	알루미늄, 용접물 제조
가속이온주입 (6)					

허가구분	명칭	허가량 /전압 (kVp)	MBq변환 /전류 (mA)	사용목적	업종분류
RG사용 신고	가속이온 주입기			가속이온 주입	디스플레이
RG사용 신고	가속이온 주입기	900	6.9	가속이온 주입	반도체 제조업
RG사용 신고	가속이온 주입기			가속이온 주입	반도체 소자, 모듈 제조
RG사용 신고	가속이온 주입기			가속이온 주입	디스플레이
RG사용 신고	가속이온 주입기	270	27	가속이온 주입	반도체 장비 제조
RG사용 신고	가속이온 주입기	90	30	가속이온 주입	자동차 사출 부품
성분분석, 정량/정성분석 (21)					
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	200	성분분석, 정량/정성 분석	금속분말, 합금분말 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	100	성분분석, 정량/정성 분석	내화물, 세라믹 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	100	80	성분분석, 정량/정성 분석	플라스틱 접착처리 제품 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	60	성분분석, 정량/정성 분석	2차전지 재료사업
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	170	성분분석, 정량/정성 분석	비금속 광물제품 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	150	성분분석, 정량/정성 분석	파운드리, 반도체
RG사용	엑스선	60	300	성분분석,	실리콘 관련제품

허가구분	명칭	허가량 /전압 (kVp)	MBq변환 /전류 (mA)	사용목적	업종분류
신고	발생장치			정량/정성 분석	제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	60	성분분석, 정량/정성 분석	반도체, 디스플레이 장비 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	150	성분분석, 정량/정성 분석	금속(자석) 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	160	성분분석, 정량/정성 분석	첨단기초소재 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	60	성분분석, 정량/정성 분석	반도체, 디스플레이 장비 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	80	성분분석, 정량/정성 분석	절삭공구 제품 생산
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	60	성분분석, 정량/정성 분석	페인트 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	150	성분분석, 정량/정성 분석	브레이크 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	150	성분분석, 정량/정성 분석	시멘트, 슬래그 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	80	성분분석, 정량/정성 분석	제약
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	170	성분분석, 정량/정성 분석	세라믹, 타일, 유약 제조
RG사용	엑스선	60	150	성분분석,	프레스, 합금 제조

허가구분	명칭	허가량 /전압 (kVp)	MBq변환 /전류 (mA)	사용목적	업종분류
신고	발생장치			정량/정성 분석	
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	170	성분분석, 정량/정성 분석	금속(몰리브덴) 가공
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	170	성분분석, 정량/정성 분석	스마트폰, 배터리, 무선충전 모듈 등 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	125	성분분석, 정량/정성 분석	SPD 필름 제조
방사선투과검사 (32)					
RG사용 신고	엑스선 발생장치	120	7.5	방사선 투과검사	조미소재, 소스 등
RG사용 신고	엑스선 발생장치	160	22.5	방사선 투과검사	자동차 부품 생산
RG사용 신고	엑스선 발생장치	160	22.5	방사선 투과검사	변성기, 에폭시 몰드 제품 생산
RG사용 신고	엑스선 발생장치	75	8	방사선 투과검사	제과
RG사용 신고	엑스선 발생장치	160	10	방사선 투과검사	증착필름, 콘덴서 생산
RG사용 신고	엑스선 발생장치	160	0.5	방사선 투과검사	반도체 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	150	7.5	방사선 투과검사	식품제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	120	8	방사선 투과검사	타이어 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	120	40	방사선 투과검사	금형가공, 정밀정형

허가구분	명칭	허가량 /전압 (kVp)	MBq변환 /전류 (mA)	사용목적	업종분류
RG사용 신고	엑스선 발생장치	120	7.5	방사선 투과검사	식품제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	80	10	방사선 투과검사	식품제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	110	60	방사선 투과검사	금형 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	125	3	방사선 투과검사	반도체 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	110	0.8	방사선 투과검사	배터리(전기차) 생산
RG사용 신고	엑스선 발생장치	100	3	방사선 투과검사	음용수 생산
RG사용 신고	엑스선 발생장치	50	6.6	방사선 투과검사	제약
RG사용 신고	엑스선 발생장치	55	3	방사선 투과검사	고주파 중계기, 보안시스템 제작
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	150	방사선 투과검사	반도체, 파운드리
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	300	방사선 투과검사	전자재료 생산
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	100	방사선 투과검사	자동차 전자제품, 모터
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	170	방사선 투과검사	태양전지 박막 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	60	80	방사선 투과검사	제약
RG사용 신고	엑스선 발생장치	65	4	방사선 투과검사	PCB 회로기판 제작
RG사용 신고	엑스선 발생장치	70	2	방사선 투과검사	전선, 통신선 생산
RG사용 신고	엑스선 발생장치	70	100	방사선 투과검사	반도체(전력용) 제조
RG사용	엑스선	80	4	방사선	광학데이בל,

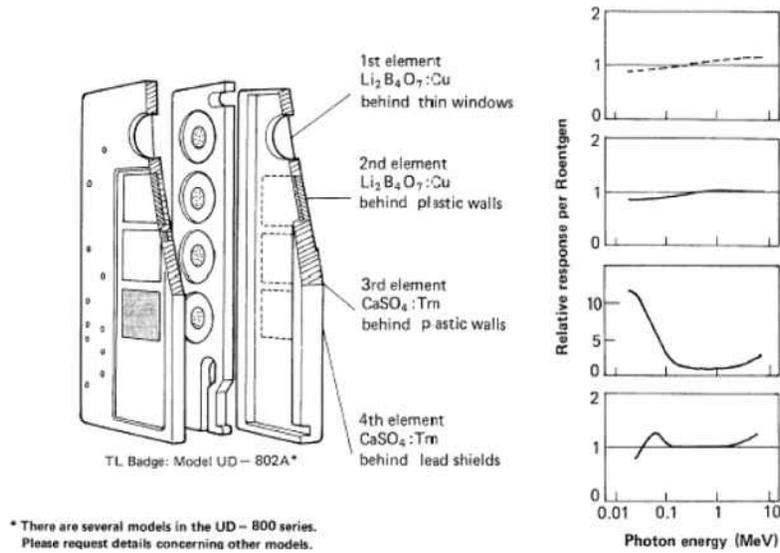
허가구분	명칭	허가량 /전압 (kVp)	MBq변환 /전류 (mA)	사용목적	업종분류
신고	발생장치			투과검사	레이저 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	80	5	방사선 투과검사	금속검출기 개발, 제조, 판매
RG사용 신고	엑스선 발생장치	80	5	방사선 투과검사	전력기기 생산
RG사용 신고	엑스선 발생장치	80	5	방사선 투과검사	SMT, PBA 제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	80	3.3	방사선 투과검사	식품제조
RG사용 신고	엑스선 발생장치	125	500	방사선 투과검사	의료, 보안, 산업분야 이미징
RG사용 신고	엑스선 발생장치	150	7.5	방사선 투과검사	건설, 엔지니어링

## 2) 피폭선량 조사 계획

- 국내 저선량 방사선발생장치 이용기관에 대한 피폭선량 조사의 수행을 위해 피폭선량측정을 위한 TLD 및 전자개인선량계(EPD; electronic personal dosimeter) 그리고 작업장 내 공간선량 측정을 위한 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터를 사용하였다. 앞서 진행한 연구자료 검토를 바탕으로 본 과제의 피폭선량 측정방법 및 계획을 수립하였다(한국산업환경보건연구소 2007, 이두용 등 2007, 최명수 등 2011).
- TLD는 개인피폭선량측정을 위한 법적선량계로 국내 방사선 관계종사자 및 방사선작업종사자 피폭선량 관리를 위해 사용되고 있다. TLD는 LiF, CaSO<sub>4</sub>, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>와 같은 고체결정에 Mn, Si 등의 불순물을 혼합하면 방사선에 의해 여기(excited)된 전자가 전도대에서 다

시 안정상태로 가기 위해 천이하는 과정에서 포획(trap)중심을 형성하게 된다. 이와 같은 원리로 TLD 선량계는 방사선이 조사된 양이 포획 중심을 형성한 전자 또는 정공의 수에 비례하게 나타나게 되는 것을 이용하여 방사선량을 측정하게 된다. 포획된 전자는 선량계에 일정 온도의 열을 가하여 포획중심에서 탈출하여 또 다른 정공을 만남으로써 일정 파장의 빛(섬광)을 발생하며 안정상태로 돌아가게 된다. 이 과정에서 나오는 빛의 양을 광전자증배관으로 측정함으로써 포획된 전자·정공의 수를 알 수 있게 되므로 최종적으로는 측정된 빛의 양이 방사선량을 의미하게 된다. 이와 같은 원리로 TLD로 일정 시간동안 방사선에 피폭한 뒤 누적된 방사선량을 측정할 수 있게 된다(G. Knoll 2010, 이재기 2016). 일반적으로 방사선 관계·작업 종사자의 경우 3개월 이내의 기간을 두어 누적된 선량을 개인피폭선량 데이터로 평가하고 있다.

- TLD는 넓은 범위의 방사선량을 측정할 수 있으며, 반복 사용이 가능하며 TLD 소자(LiF, BeO, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>)는 유효원자번호가 비슷한 인체등가물질이므로 인체의 피폭선량을 평가하는데 적합하다. 다른 선량계(ex. 필름선량계)에 비해 온도, 습도에 의한 영향도 비교적 적으며, 에너지 및 방향의존성도 작아 선량측정에 유용하다. 또한 그림 II-5 다양한 소자 및 필터 사용으로 여러 에너지대의 방사선 및 전자, 광자, 중성자 등의 측정이 가능하다(이재기 2016).



[그림 II-5] TLD 내부 구성

(자료 : Panasonic industrial company - TLD system 카탈로그)

- 작업장 내 저선량 방사선에 대한 측정이 본 연구의 목적으로, 이를 위해서는 TLD 판독 알고리즘에 대한 검토가 우선 필요하다. TLD의 선량 판독은 (주)오르비텍을 통해 수행되었으며, 해당 업체의 경우 TLD를 이용한 저선량 측정 알고리즘을 확보하고 있다. 그림 II-6은 본 과제에서 활용하는 선량계 및 판독시스템에 대한 사진 그리고 TLD 선량계에 대한 상세 정보는 표 II-6과 같다.



[그림 II-6] TLD 판독시스템 및 선량계 소자

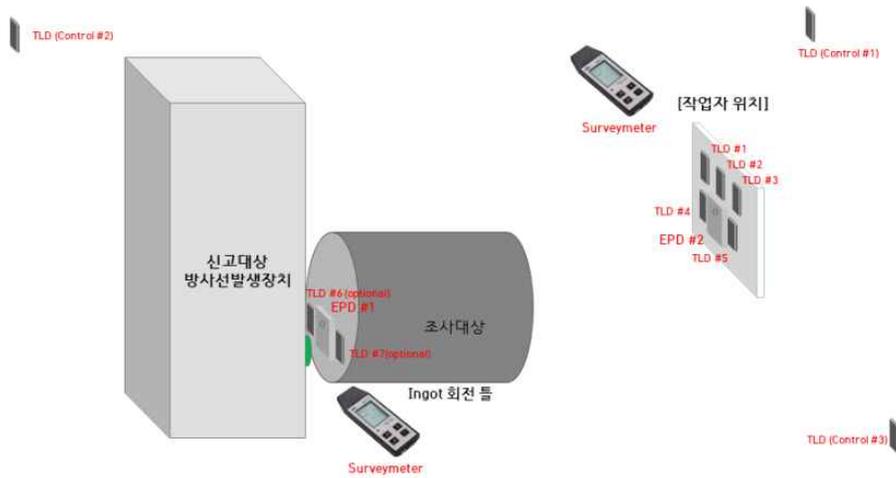
<표 II-6> TLD 상세 정보

구분	내용
제작사	Panasonic Industrial Company (USA)
크기 및 무게	4.9 × 2.3 × 0.6 cm, 약 5g
형광체	${}^6\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu}$ , ${}^{10}\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu}$ ${}^{11}\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu}$ , $\text{CaSO}_4 : \text{TM}$
측정 방사선 종류	1) 10 keV ~ 10 MeV 사이의 엑스선, $\gamma$ 선 ( $H_P 10$ ) 2) 피부선량 ( $H_P 0.07$ ) 3) 중성자선
측정 방사선 범위	10 $\mu\text{Sv}$ ~ 10 Sv
최저측정하한 (LLD)	0.092 mSv (3개월 동안의 선량계 fading을 고려한 값)
교정 선원	Cs-137( $\gamma$ 선-662 keV)
ECF 보정 여부	수행

(자료 : Panasonic industrial company - TLD system 카탈로그)

- 판독장비의 교정은 Cs-137(662 keV  $\gamma$ -선) 선원으로 이루어지지만, 판독과정의 보정 알고리즘을 통해 엑스선장에서의 데이터 값으로 변환하게 된다. 해당 알고리즘을 통해 본 연구에서의 저선량 방사선발생장치 사용에 따른 엑스선 선량 측정에 TLD의 활용이 가능하다.
- TLD의 측정하한은 0.092 mSv로 일반인 피폭선량 한도 1 mSv의 1/10 수준이며 매우 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 판독과정에서 각각의 TLD에 대한 소자보정인자(ECF; element correction factor)를 적용하여 각 선량계마다의 성능 보정을 수행하게 되며 이를 통해 더욱 정밀한 선량 판독이 가능해진다. 또한 정확한 피폭선량값을 획득하기 위해 다수의 선량계를 활용하여 측정값을 획득하고, 측정값의 통계적 평가의 수행을 통해 실제 측정 시 나타날 수 있는 오차 요인을 최소화 시키고자 하였다.
- 저선량 방사선의 측정에서는 백그라운드에 대한 고려가 매우 중요하다. 백그라운드에 대한 고려 없이 단순히 선량 값을 측정한다면 과대평가 된 선량 판독 결과를 도출하게 된다. 따라서 TLD 선량의 판독 시 백그라운드에 대한 적절한 보정이 이루어져야 한다. 이를 위해 선량계의 판독 과정에서 판독 대상 TLD와 동일 시간 경과한 판독기관 내 별도의 백그라운드 측정용 TLD를 이용한 백그라운드 값을 이용하여 보정해주게 된다. 또한 각 작업장 마다 위치적 차이 및 현장 구조상의 특징으로 백그라운드 방사선 값이 서로 다르게 나타나기 때문에, 피폭선량 측정과 더불어 백그라운드 방사선 측정용 TLD를 추가로 배치하여 사업소 내 백그라운드 값을 획득하고 판독기관의 백그라운드 데이터와 비교를 수행하고자 한다.
- 현장 조사 대상 사업장 내에서 수행할 측정의 개략도(measurement geometry) 및 피폭선량측정을 위한 선량계 거치대의 구조는 그림 II-7, 8과 같으며 조사 대상 기관에서 저선량 발생장치 인근 종사

자 작업 위치에 위치시켜 피폭선량을 측정하였다. 발생장치 사용에 따른 피폭선량을 측정함과 동시에 백그라운드 측정용 TLD도 작업장 내에 배치하여 일정시간 동안의 백그라운드를 측정하여 작업종사자 피폭선량과 비교하여 측정결과의 유의성을 평가하였다.



[그림 II-7] 피폭선량 측정 개략도



[그림 II-8] 피폭선량 측정을 위한 선량계 배치

- 현장 조사 대상 사업장 내에서 피폭선량을 측정하기 위해 TLD 판독 결과를 주로 사용하며, 보조적인 수단으로 EPD와 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터를 이용하여 측정하였다. EPD는 TLD와 마찬가지로 개인피폭선량을 평가하는 장비이며, 실시간 측정결과를 확인할 수 있는 장점이 있다. 관련하여, 원자력발전소에서는 방사선관련 작업 당 선량을 확인하기 위하여 동일한 형태의 전자개인선량계를 보조선량계로 사용하고 있다. 방사선발생장치로부터 발생하는 방사선을 측정하기 위한 장비로 서베이미터를 사용한다. 일반적으로 GM counter, 비례계수관(proportional counter)을 기반으로 한 서베이미터를 사용한다. 본 연구에서는 상대적으로 정확하고 저에너지 방사선 측정에 적합한 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터를 사용하였다. ion chamber를 기반으로 한 서베이미터는 측정 정확도가 높기 때문에 측정표준기로 사용한다. EPD와 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터에 대한 정보는 표-7, 8과 같다.

<표 II-7> EPD 상세 정보

구분	내용
제작사	Thermo Fisher scientific (USA)
크기 및 무게	8.5 × 6.3 × 1.9 cm, 약 95g
형광체	silicon diode
측정 방사선 종류	1) 15 keV ~ 10 MeV 사이의 엑스선, γ선 (H <sub>p</sub> 10) 2) 피부선량 (H <sub>p</sub> 0.07) 3) 중성자선
측정 방사선 범위	1 μSv ~ 10 mSv 0 μSv/h ~ 4 Sv/h

(자료 : Thermo Fisher scientific - EPD Mk2 카탈로그)

&lt;표 II-8&gt; ion chamber를 기반으로 한 서베이미터 상세 정보

구분	내용
제작사	STEP Sensortechnik und Elektronik Pockau GmbH (Germany)
크기 및 무게	1) Probe diameter 11.2 cm, length 26 cm 2) Display unit 25 × 10.8 × 4.2 cm 3) 1.5 kg
타입	Air-opened ionization chamber
측정 방사선 종류	1) 100 keV ~ 15 MeV 사이의 엑스선, $\gamma$ 선 (H <sub>P</sub> 10) 2) 피부선량 (H <sub>P</sub> 0.07)
측정 방사선 범위	0 ~ 2000 mSv/h

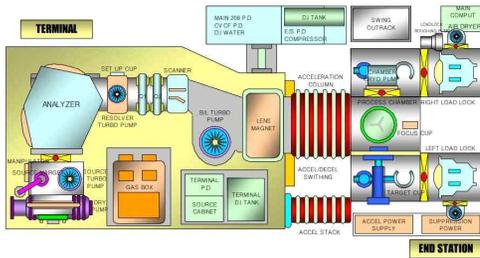
(자료:Technical description and operating instructions-Survey meter OD-02)

### 3) 피폭선량 조사 대상 기관 특성 및 장비

- 방사선발생장치란 인공적으로 방사선을 발생시키기 위해 제작된 것으로서 가속된 하전입자를 이용하거나 표적물질과 상호작용 시켜 부수적으로 발생하는 모든 방사선(주로 엑스선)을 이용하는 장치를 말한다.

#### (1) 가속이온주입기

- 가속이온주입기의 경우 가속된 전자가 방출되어 표적물질에 입사하는 경우 전자와 표적물질을 구성하는 원자 사이에 발생하는 전기적인 상호작용에 의해 전자기파인 엑스선이 방출된다. 가속이온주입기의 경우 엑스선을 발생시키기 위한 목적으로 사용되는 장비가 아니다. 즉 가속이온주입기는 반도체를 생산하기 위해 실리콘(Si)에 보론(B) 또는 질소(N) 이온 주입을 목적으로 사용된다.
- 본 연구에서 측정된 가속이온주입기의 경우 표적물질에 이온을 주입하기 위한 목적으로 전자빔을 주사시키며 변압기형 가속장치와 동일한 개념으로 체동복사선 또는 특성 엑스선이 방출되는 형태이다.
- 가속이온주입기는 작업장 외 별도의 공간에 설치되어 자동으로 이온을 주입하는 형태이다. 즉 가속이온주입기를 운영하는 작업자는 장비의 컨트롤러를 이용하여 작업 셋업 및 진행하며, 작업 중 장비에 접근하지 않는 형태이다.
- 즉, 본 연구를 통해 조사된 가속이온주입기는 캐비닛형이므로 전자빔 발생장치가 작업공간에 직접 피폭되는 형태가 아니다. 즉 이온주입을 위한 별도의 공간에 설치되어 있으며, 작업종사자가 별도의 control room에서 장비를 운영하는 형태이다(그림 II-9).

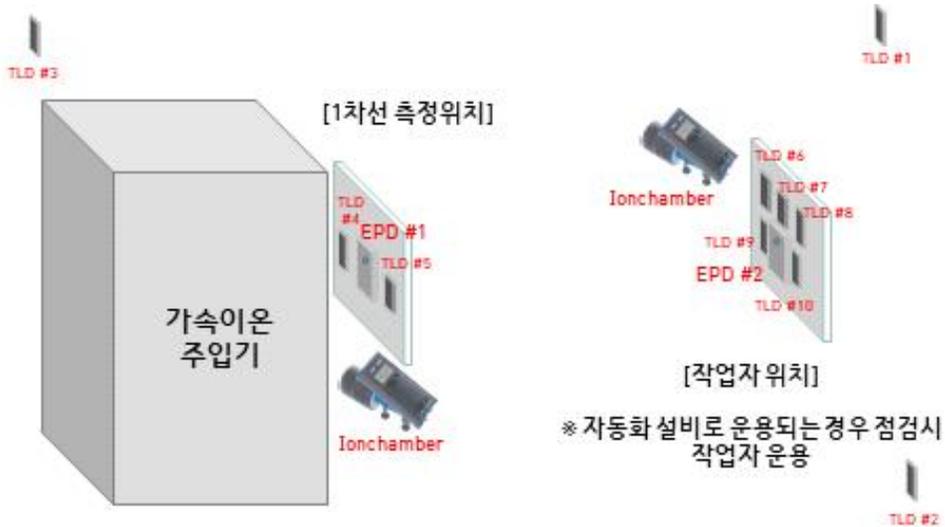


[그림 II-9] 가속이온주입기 (예)

(자료 : 박승현 정은교, 2012)

- 가속이온주입기에서 방출되는 방사선을 측정하기 위해 TLD, EPD 및 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터를 이용하였다. 가속이온주입기의 빔 발생장치는 캐비닛 내부에 설치되어 운영되므로 운영 중 작업종사자가 빔 발생장치 부근에 접근하는 것은 불가능한 형태이다. 따라서 가속이온주입기로부터 방출되는 방사선을 측정하기 위해 빔 발생장치에서 가장 가까운 장소를 선택하여 선량 및 선량률을 측정하였으며, 실제 작업종사자의 피폭선량은 장비를 운영하기 위한 모니터 정면에서 측정을 수행하였다 (그림 II-10).
- 작업종사자의 위치는 장비 운영방식에 따라 상이한 것을 확인하였다. 즉 자동화설비로 운용되는 경우 장비 가동 시 작업종사자가 가속이온 주입기 캐비닛 부근에 위치하지 않는다. 단, 점검 시 작업종사자가 가속이온주입기 캐비닛에 접근이 가능하다. 그러나, 점검 시에는 장비를 운영하지 않으므로 방사선은 방출되지 않기 때문에 피폭은 발생하지 않는다.
- 가속이온주입기 사용기관은 방사선안전관리 현황이 매우 양호한 것으로 확인되었으며, 특히 가속이온 주입기가 설치되어 있는 캐비닛은 인터락 설비가 되어 있어 장비 운영 중 장비에 접근을 차단하고

있는 것을 확인하였다.

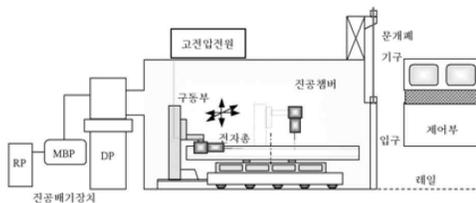


[그림 II-10] 가속이온주입기 사용기관 피폭선량 측정 개략도

(2) 변압기형 가속장치

- 변압기형가속장치의 경우 가속된 전자가 방출되어 표적물질에 입사하는 경우 전자와 표적물질을 구성하는 원자 사이에 발생하는 전기적인 상호작용에 의해 전자기파인 엑스선이 방출된다. 변압기형 가속장치는 경우 엑스선을 발생시키기 위한 목적으로 사용되는 장비가 아니다. 즉 변압기형가속장치의 경우 전자 주입을 통한 전자빔 용접의 목적으로 사용된다.
- 본 연구에서 측정된 변압기형 가속장치의 경우 용접을 위해 전자빔을 주사시키며, 그 산출물로서 표적물질과 전자와의 반응으로 발생하는 제동복사선 또는 특성 엑스선이 방출되는 것이다. 반면 가속이온주입기의 경우 표적물질에 이온을 주입하기 위한 목적으로 전자빔을 주사시키며 변압기형 가속장치와 동일한 개념으로 제동복사선 또는 특성 엑스선이 방출되는 형태이다.

- 변압기형 가속장치는 작업장 내 설치된 진공챔버에 설치되어 있다. 본 연구에서 현장측정을 수행한 변압기형 가속장치는 대규모장비로 실제 작업을 위한 준비를 위해 작업자가 진공챔버내에 투입되는 형태이나, 실제 가속이온 주입 작업 시 작업자는 진공챔버에 체류하지 않는 형태이다. 따라서, 변압기형 가속장치 운영 중 관련 작업종사자는 챔버로부터 이격된 거리에 체류하게 되는 형태이다. 특히 변압기형 가속장치 운영 중 가속장치의 빔 조사방향에서의 공간선량률이 약간 상승하게 되는데, 가속장치 운영을 위한 control room은 빔 조사방향 반대이므로 선량의 변화가 없는 것을 확인하였다. 즉 전자빔 발생장치는 용접 또는 이온주입을 위한 별도의 공간에 설치되어 있으며, 작업종사자가 별도의 control room에서 장비를 운영하는 형태이다 (그림 II-11).



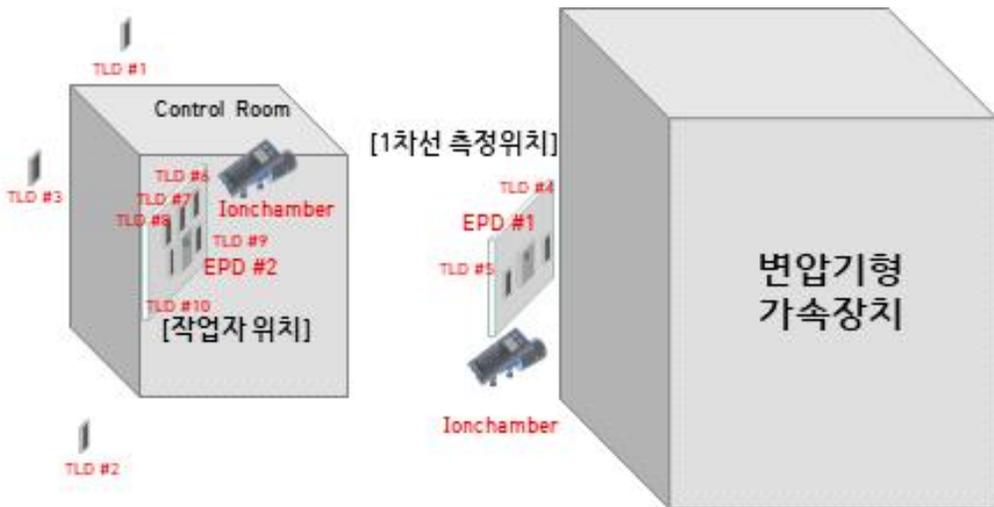
[그림 II-11] 변압기형가속장치 (예)

(자료 : 정인철, 2006; 철강금속신문, 2016)

- 즉, 본 연구를 통해 조사된 변압기형가속장치는 캐비닛형이므로 전자빔 발생장치가 작업공간에 직접 피폭되는 형태가 아니다.
- 변압기형가속장치에서 방출되는 방사선을 측정하기 위해 TLD, EPD 및 ion-chamber을 기반으로 한 서베이미터를 이용하였다. 변압기형

가속장치의 빔 발생장치와 가장 가까운 장소를 선택하여 선량 및 선량률을 측정하였으며, 실제 작업종사자의 피폭선량은 장비를 운영하기 위한 control room에서 측정을 수행하였다 (그림 II-12).

- 변압기형 가속장치 사용기관은 산업안전과 관련하여 안전관리 현황이 양호하였으나, 방사선안전과 관련하여 control room위치 및 공간 선량률에 대한 이해도가 높은 것을 확인하였다.



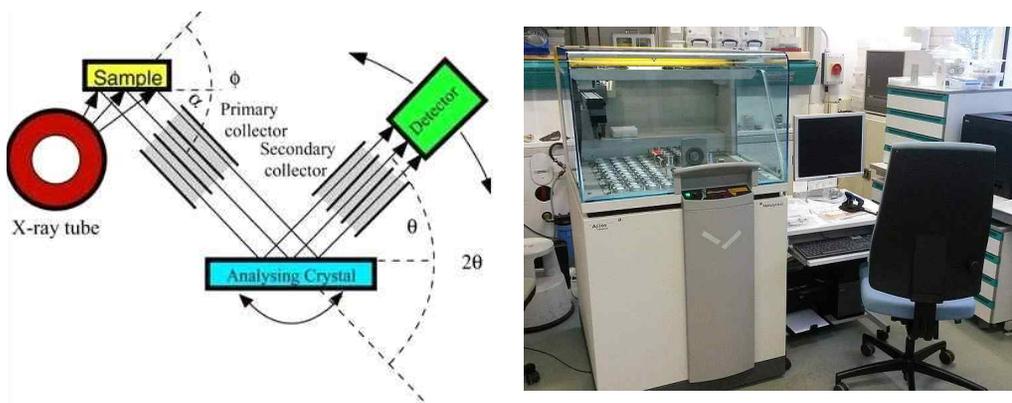
[그림 II-12] 변압기형가속장치 사용기관 피폭선량 측정 개략도

(3) 엑스선 발생장치 (성분분석, 정량/정성분석)

- 엑스선 발생장치에서 방출되는 엑스선은 대부분 제동복사선이다. 가속된 전자가 원자핵의 전기장에 의하여 감속되는 정도는 임의적이므로 방출되는 제동복사선의 에너지도 임의의 에너지를 갖는 연속스펙트럼의 양상을 보인다. 또한, 엑스선 발생장치에서는 제동복사선 뿐 아니라 약간의 특성 엑스선도 같이 방출된다. 원자가 갖는 에너지 준위는 각 핵종에 따라 고유하기에 여기 또는 전리작용으로 발생

하는 특성 엑스선의 에너지 역시 핵종에 따라 고유한 불연속적인 스펙트럼을 갖게 된다. 이를 이용하여 XRD(X-ray Diffraction, 엑스선 회절분석)나 XRF(X-Ray Fluorescence, 엑스선 형광분석)와 같은 물질분석에 주로 사용 된다.

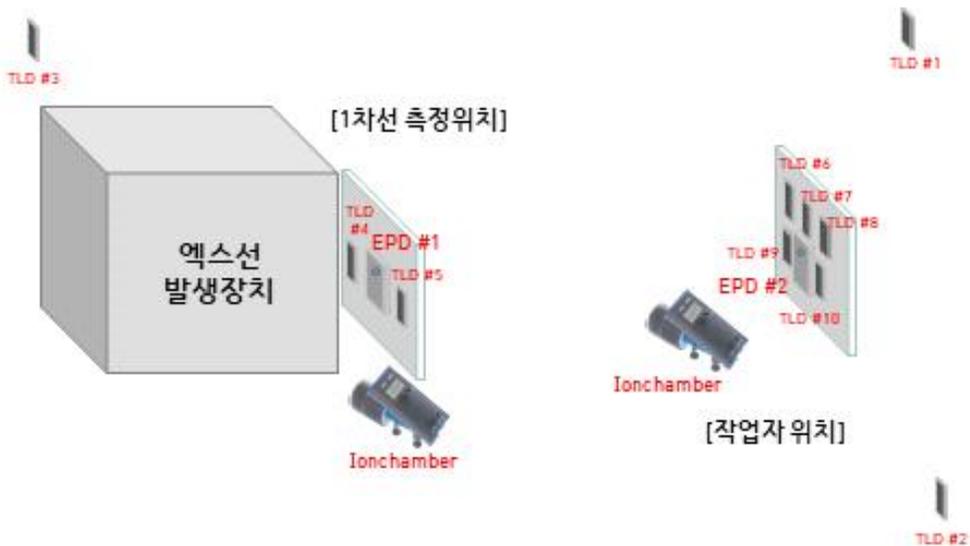
- 엑스선 발생장치에서 방출되는 엑스선의 스펙트럼은 전자를 가속하는 관전압과 표적물질에 의해 결정된다. 관전압이 증가하면 스펙트럼이 고에너지 측으로 이동하고 관전압이 낮아지면 저에너지 측으로 이동한다. 이렇듯 스펙트럼의 형태는 관전압에 의한 영향이 지배적이나 표적물질에 따라 약간의 변화가 생긴다.
- 물질의 성분분석을 위한 엑스선 발생장치의 방사선 방출부는 캐비닛 내부에 있기 때문에 작업 중 방사선에 의한 직접적인 피폭은 발생하지 않는 형태이다. 측정대상물질의 성분분석을 위한 시료는 장비의 작동을 중지한 상태에서 캐비닛 내부로 유입이 가능하며, 대상물질 셋팅이 완료된 상태에서 캐비닛이 잠기는 형태이므로 작업 주 피폭의 가능성은 낮을 것이라 판단된다 (그림 II-13).



[그림 II-13] 엑스선 발생장치(XRF) (예)

(자료 : <https://www.gfz-potsdam.de/en/home/>)

- 엑스선 발생장치도 가속이온주입기와 동일한 캐비닛 형태이다. 물질의 성분분석을 위한 목적으로 방출시키는 방사선을 측정하기 위해 TLD, EPD 및 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터를 이용하였다. 엑스선 발생장치의 빔 발생장치 캐비닛은 상대적으로 가속이온주입기 또는 변압기형가속장치에 비해 크기가 작다. 그러나, 상기 장비들과 동일한 방식으로 빔 발생장치에서 가장 가까운 장소를 선택하여 선량 및 선량률을 측정하였으며, 장비 운영을 위한 컴퓨터 위치에서 실제 작업종사자의 피폭선량을 측정하였다 (그림 II-14).
- 성분분석을 위한 엑스선 발생장치 사용기관의 방사선안전관리 현황은 양호한 것으로 확인되었다.



[그림 II-14] 엑스선발생장치 사용기관 피폭선량 측정 개략도

#### 4) 방사선발생장치 방사선 측정결과

- 실제 측정결과는 백그라운드를 포함하여 측정된 결과이므로 실제 방사선에 의한 공간선량률은 측정결과에서 백그라운드를 제거한 값이 되어야 한다. 그러나 본 연구에서는 방사선발생장치로부터 발생하는 방사선의 영향정도를 파악하기 위해서 측정결과와 백그라운드를 병기하였다. 공간선량률을 평가하기 위해 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터를 이용하여 측정하였다. ion chamber를 기반으로 한 서베이미터의 경우 방사선 측정 시 표준으로 사용되는 장비로 일반적으로 사용되는 비례계수관(proportional counter), GM counter에 비해 측정정확도가 높다. 따라서 저에너지 광자의 측정을 위해서는 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터의 사용이 필요하다.
- TLD의 경우 최저측정하한(LLD; low limit of detection)이 0.092 mSv 이므로 LLD 미만의 값은 별도로 표기하지 않고 '< LLD'로 표기하였다. 즉 TLD로 측정한 결과는 0.092 mSv이하의 값에 대해서는 신뢰하지 않으므로 실제 선량결과로 활용하지 않는다. 반면 EPD의 경우 제조사에서는 선량계의 화면에 나타내는 선량범위가 1  $\mu$ Sv - 10 mSv 이다. 17 keV - 1.5 MeV (Cs-137 기준)의 광자 에너지를 기준으로 할 경우 심부선량( $H_p(10)$ ) 결과는  $\pm 20\%$ 의 범위에 있으나, 상대적으로 낮은 광자에너지(15 keV - 17 keV)에서는 심부선량( $H_p(10)$ ) 결과가  $\pm 50\%$ 의 범위에 있다. 따라서 저에너지 광자 측정 시 측정결과의 불확도를 감안하여야 한다.
- 엑스선발생장치의 방출에너지를 고려하여 적절한 알고리즘을 적용하였으며 판독을 위한 방사선에너지 별 알고리즘은 표 II-9와 같다. TLD 판독을 위해 ANSI N13.11-1993에 근거하여 해당 선장분류 및 성능검사 기준을 만족하는 KS 알고리즘을 사용하여 평가하였다. 판독 알고리즘은 TLD 선량계에 포함된 4개의 각 소자별 RAW DATA 측정값을 비교하여 방사선장을 우선 도출하게 되며, 정해진

방사선장별 선량산출식을 적용하여 최종적으로 피폭선량값을 평가하였다. 제한적인 방사선 조사량을 감안하여 저에너지 광자의 각 선장별 평가값을 모두 계산하여 제시하였다(해당 결과는 이론적인 계산값으로, 참조값임).

- $C_{kd}$  ,  $C_{k,s}$  는 선량환산계수로 흡수선량(Gy)를 유효/등가선량(Sv)로 환산해주는 계수이다. 특히  $C_{k,d}$  는 심부선량( $H_p(10)$ ),  $C_{k,s}$  는 표층선량( $H_p(0.07)$ ) 이다.
- 실제 측정가능한 선량은 흡수선량(Gy)이며, 유효선량(Sv)은 방사선가중치( $W_R$ )와 조직가중치( $W_T$ )를 고려하여 계산된 값을 의미한다. 그러나, TLD 또는 EPD 등을 이용하여 유효선량을 추정할 수 있는데, 이를 '실용량' 이라 한다. 실용량은 기본적으로 방사선작업장 공간선량 감시 및 개인별 피폭관리를 위한 목적으로 사용된다. 다시말해서 측정된 흡수선량률 값이 계산으로 구해진 유효선량률 값과 보수적으로 근접할 수 있는 측정조건에서 서베이미터나 TLD를 보정한 후 보정된 TLD를 이용하여 측정된 흡수선량률 값으로 유효선량률을 대체하는 것이라 할 수 있다. 즉 실용량은 방사선방호 목적을 위해 사용되는 유효선량률과 비슷한 값을 가지면서 실측이 가능한 흡수선량률을 의미한다.

<표 II-9> 광자특성 및 TLD 선량변환계수

Radiation Source							Dose Conversion Factor	
Source Code	Additional Filter (mm)			Half-Value Layer (HVL) (mm Al)	Homogeneity Coefficient (1st HVL/ 2nd HVL)	Average Energy (keV)	C <sub>k,d</sub>	C <sub>k,s</sub>
	Al	Cu	Sn					
M30	0.5			0.36	0.64	20	0.42	1.02
M60	1.51			1.68	0.68	34	1.00	1.21
M100	5.0			5.03	0.73	51	1.52	1.49
M150	5.0	0.25		10.25	0.89	70	1.78	1.64
H150	4.0	4.0	1.51	17.0	1.0	117	1.71	1.62
Cs-137						662	1.21	1.21

- 본 연구에서는 방사선발생장치로부터 방출되는 방사선을 측정하기 위해 TLD, EPD 및 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터를 기반으로 한 서베이미터를 사용하였다. 방사선발생장치 사용기관의 방사선발생장치 가동시간(공정에 필요한 방사선발생장치 가동 시간 및 횟수)는 작업공정에 따라 매우 상이하였기 때문에 작업당 선량으로 환산하여 결과를 나타내었다(표 II-10).

<표 II-10> 1차선 또는 1차선 부근 측정결과(작업당)

장비분류	구분	백그라운드	1차선 또는 1차선 부근			공간선량률	
		TLD	TLD		EPD ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Ionchamber ( $\mu\text{Sv/h}$ )	
			Hp(10)	Hp(0.07)		작동시	백그라운드
엑스선 발생장치	A	< LLD	< LLD	< LLD	0.09	0.34	0.20
	C	< LLD	< LLD	< LLD	0.04	0.14	0.12
	D	< LLD	< LLD	< LLD	0	0.11	0.11
	G	< LLD	< LLD	< LLD	0.02	0.15	0.10
	J	< LLD	< LLD	< LLD	2.80	0.25	0.13
가속이온 주입기	B	< LLD	< LLD	< LLD	0.09	0.28	0.24
	F	< LLD	< LLD	< LLD	0.02	0.18	0.18
	H	< LLD	< LLD	< LLD	0	0.18	0.18
	I	< LLD	< LLD	< LLD	0.05	0.23	0.14
변압기형 가속장치	E	< LLD	< LLD	< LLD	0.05	0.34	0.13

\*TLD의 LLD는 0.092 mSv이며, 0.092 mSv 이하일 경우 <LLD로 표시함

#### 4. 방사선 발생장치 사용에 따른 작업종사자 예상 피폭선량 조사

- 본 연구에서 측정된 엑스선 발생장치는 작업 시 시료당 10분 내외의 작업시간이 소요되며, 1일 10~20개 시료가 측정된다. 엑스선 발생장치는 작업 시 연속적인 방사선 방출이 아닌 불연속적으로 방사선이 방출되며 방출될 때 백그라운드의 약 1.5~1.7배 까지 상승된다. 따라서 엑스선 발생장치 가동 시 작업종사자에 대한 피폭선량은 백그라운드(약 130 nSv/h) 수준이거나 약 1.5~1.7배정도 높은(약 198 nSv/h) 수준인 것을 알 수 있다.
- 본 연구에서 측정된 변압기형 가속장치의 경우 용접을 위해 전자빔을 주사시키며, 그 산출물로서 표적물질과 전자와의 반응으로 발생하는 제동복사선 또는 특성 엑스선이 방출되는 것이다. 반면 가속이온주입기의 경우 표적물질에 이온을 주입하기 위한 목적으로 전자빔을 주사시키며 변압기형 가속장치와 동일한 개념으로 제동복사선 또는 특성 엑스선이 방출되는 형태이다.
- 본 연구를 통해 조사된 변압기형가속장치와 가속이온주입기는 캐비닛형이므로 전자빔 발생장치가 작업공간에 직접 피폭되는 형태가 아니다. 즉 전자빔 발생장치는 용접 또는 이온주입을 위한 별도의 공간에 설치되어 있으며, 작업종사자가 별도의 control room에서 장비를 운영하는 형태이다. 따라서 전자빔 발생장치 가동 시 작업종사자에 대한 피폭선량은 백그라운드(약 130 nSv/h) 수준이거나 약 2~3배정도 높은(약 350 nSv/h) 수준인 것을 알 수 있다.

##### 1) 선량계를 이용한 작업종사자 예상피폭선량

- 신고대상 방사선발생장치 기관에 대한 조사를 수행하였으며 조사대

상기관을 선정하여 현장조사를 수행하였다. 현장조사 기관에 대해서는 방사선발생장치 사용 시 작업공간 내 공간선량률 및 작업종사자의 위치에서의 피폭선량을 측정하였다. 방사능계측기(ion chamber를 기반으로 한 서베이미터)를 이용하여 방사선발생장치에서 방출되는 1차선을 직접측정하고 산란선 평가를 위해 방사선발생장치 주변을 측정하였다. 작업장 내 순계수치(net count) 획득을 위해 방사선으로부터 영향을 받지 않는 위치에서 백그라운드를 측정하고 측정값에서 제외하였다.

- 작업형태 및 작업종사자의 위치에 따른 피폭선량 평가를 위해 TLD와 EPD를 사용하였다. 일반적으로 방사선작업종사자의 피폭선량평가를 위한 선량계는 작업종사자의 흉부에 착용하는 것을 기본으로 하므로, 이에 방사선작업종사자의 작업위치 등을 반영하여 선량계의 위치를 설정하였다. 또한 상기의 선량계는 방사선작업종사자의 심부선량  $H_p(10)$  및 표층선량  $H_p(0.07)$ 을 측정하였다. 여기서 표층선량은 피부선량을 의미한다. 방사선발생장치에서 방출되는 방사선으로부터 영향을 받지 않는 곳에서 백그라운드를 측정하여 TLD를 이용한 측정결과를 확보하였다.
- 현장조사기관 별 작업공정에 따라 작업공간의 규모가 상이하여 작업공간 공간선량률을 측정은 작업종사자가 이동 또는 작업하는 공간 내의 거리에 따른 공간선량률을 측정하였다. 또한 방사선발생장치 사용 시 작업종사자 위치에서 공간선량률을 측정하였다.
- TLD 판독결과는 현장조사기관 모두 LLD(0.092 mSv) 이하이며 현장에서 측정한 작업공간의 공간선량률에서 판독기관에서의 백그라운드를 제외한 값이다. 방사선발생장치 사용시 작업종사자 위치에서 측정한 EPD 평가결과(0.05  $\mu$ Sv)를 통해 피폭선량 수준을 알 수 있었다. 또한 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터를 이용한 측정을 통해 작업종사자 위치의 백그라운드(0.15  $\mu$ Sv/h)와 방사선발생장치

사용시 작업종사자 위치의 공간선량률(0.22  $\mu\text{Sv/h}$ ) 수준을 알 수 있었다.

<표 II-11> 작업종사자 피폭선량 측정결과(작업당)

장비분류	구분	백그라운드	작업종사자 위치에서의 선량			공간선량률	
		TLD	TLD		EPD ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Ionchamber ( $\mu\text{Sv/h}$ )	
			H <sub>p</sub> (10)	H <sub>p</sub> (0.07)		작동시	백그라운드
엑스선 발생장치	A	< LLD	< LLD	< LLD	0	0.34	0.20
	C	< LLD	< LLD	< LLD	0.06	0.14	0.12
	D	< LLD	< LLD	< LLD	0	0.11	0.11
	G	< LLD	< LLD	< LLD	0.02	0.15	0.10
	J	< LLD	< LLD	< LLD	2.25	0.25	0.13
가속이온 주입기	B	< LLD	< LLD	< LLD	0.06	0.28	0.24
	F	< LLD	< LLD	< LLD	0	0.18	0.18
	H	< LLD	< LLD	< LLD	0	0.18	0.18
	I	< LLD	< LLD	< LLD	0.05	0.23	0.14
변압기형 가속장치	E	< LLD	< LLD	< LLD	0.05	0.34	0.13

\*TLD의 LLD는 0.092 mSv이며, 0.092 mSv 이하일 경우 <LLD로 표시함

## 5. 설문조사

- 국내 저선량 방사선발생장치 이용기관의 방사선안전관리에 관한 현황과약을 위해 면담과 설문을 병행하였다. 설문내용은 일반적인 방사선작업종사자의 안전관리에 관한 사항으로 해당 기관에서 사용하고 있는 방사선발생장치의 기본적인 정보와 방사선작업종사자의 보호를 위한 선량계 및 보호구 착용에 관한 사항을 포함하였다.
- 국내 저선량 방사선발생장치 이용기관의 방사선안전관리에 관한 현황과약을 위해 설문조사를 하였다. 설문내용은 일반적인 방사선작업종사자의 안전관리에 관한 사항으로 해당 기관에서 사용하고 있는 방사선발생장치의 기본적인 정보와 방사선작업종사자의 보호를 위한 선량계 및 보호구 착용에 관한 사항을 포함하였다. 저선량 방사선발생장치 이용기관의 작업종사자와 안전관리자를 대상으로 설문조사를 실시하였다.

### 1) 방사선작업 유형

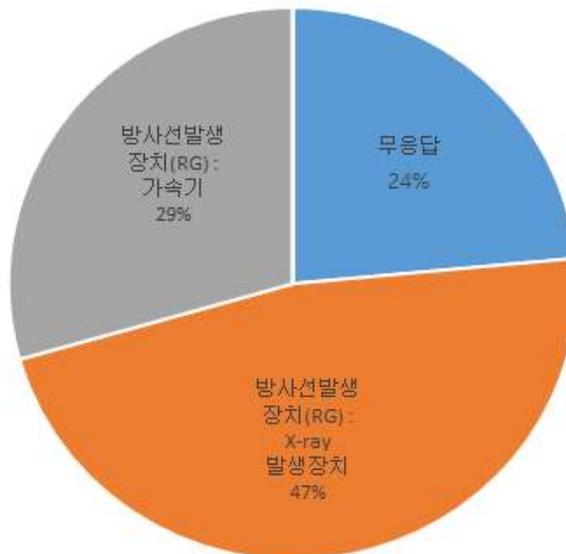
- 본 연구에서 저선량 방사선발생장치 사용기관의 현장측정을 통해 공간선량률, 피폭선량 등을 평가하였으며, 작업유형 파악 및 방사선안전관리 개선을 위한 설문조사를 수행하였다. 현장평가 대상 저선량 방사선발생장치 사용기관에서 보유하고 있는 방사선발생장치는 엑스선 발생장치, 이온주입가속기 및 전자빔 용접을 위한 변압기형 가속장치이다.
- 상기의 장비는 작업유형에 따라 평균작업시간과 작업빈도가 기관별로 상이한 것을 알 수 있다(표 II-12).

&lt;표 II-12&gt; 방사선발생장치를 이용한 작업유형

작업내용	평균 작업시간	방사선원	작업빈도
XRF 측정(BaSO <sub>4</sub> )	60 m	엑스선 발생장치	주 2-3회
장비 동작	1 hr	가속이온주입기	기타
이온주입(ion implant)	1 hr	가속이온주입기	주 5회 이상
	3 hr		주 2-3회
장비컨트롤 작업	1-2 hr	가속이온주입기	주 2-3회
XRD 계측기 점검값 확인	1 hr/주	엑스선 발생장치	주 0-1회
XRD 측정	2.5 hr	엑스선 발생장치	주 5회 이상
XRD 측정	1 hr/주	엑스선 발생장치	주 0-1회
wafer bump의 void 검사	20 m	엑스선 발생장치	주 4-5회
wafer void 측정 엑스선 발생장치	20 m	엑스선 발생장치	주 4-5회
전자빔 용접(AL)	4 hr	변압기형 가속장치	주 5회 이상
설비 PM작업	2-3 hr	변압기형 가속장치	주 2-3회
불량확인(wire연결확인)	5 hr	엑스선 발생장치	주 5회 이상
wire 불량검출	4 hr	엑스선 발생장치	주 5회 이상
안전관리	1 hr/일	엑스선 발생장치	주 2-3회

## 2) 방사선작업에 사용되는 방사선원

- 본 연구 조사 기관이 사용중인 방사선발생장치는 엑스선 발생장치 발생장치 약 47%, 가속기는 약 29%, 무응답(장비에 대한 이해도가 부족함) 약 24%이다.
- 본 연구를 통해 조사된 방사선발생장치는 변압기형가속장치와 이온 임플란트(가속이온주입기)는 캐비닛형이며, 이는 전자빔 발생장치가 작업공간에 직접 피폭되는 형태가 아니다. 즉 전자빔 발생장치는 용접 또는 이온주입을 위한 별도의 공간에 설치되어 있으며, 작업종사자가 별도의 control room에서 장비를 운영하는 형태이다.



[그림 II-15] 방사선작업에 사용되는 방사선원

3) 방사선작업종사자 방사선발생장치를 이용한 작업빈도

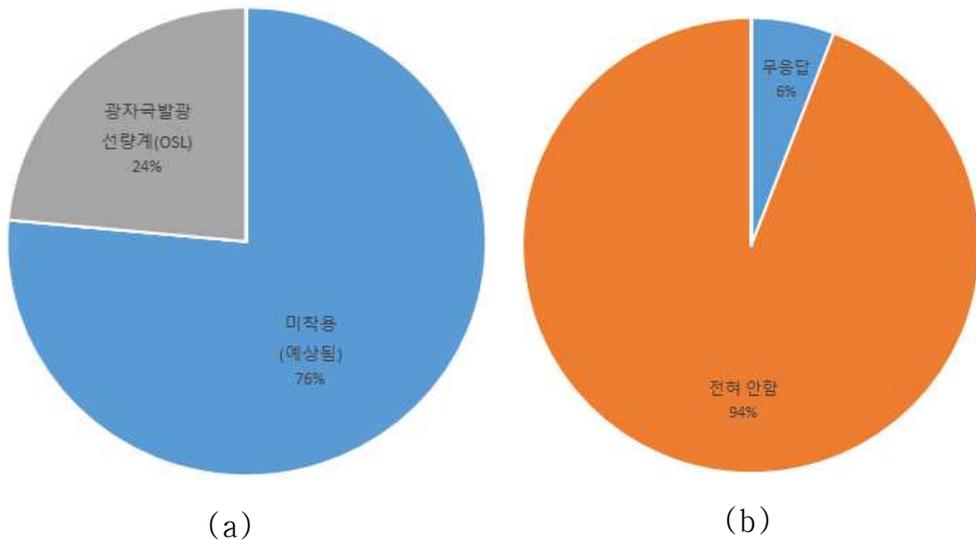
- 방사선발생장치 작업빈도와 관련하여 설문대상자 중 70% 이상은 주당 2회 이상 사용하고 응답하였다. 단, 방사선발생장치 1회 사용 시간은 작업내용에 따라 약 20 - 300분으로 차이가 있다. 따라서 공정별 피폭선량을 시간당 선량으로 산출할 경우 과대 또는 과소평가가 될 수 있다. 이에, 각 공정별 사용시간 및 사용빈도를 고려하여 피폭선량을 평가하였다.



[그림 II-16] 방사선발생장치를 이용한 작업빈도

4) 방사선작업종사자 개인선량계 및 보호구 착용

- 개인선량계 착용과 관련하여 설문대상자 중 24%에 해당되는 인원이 개인선량계 착용을 하는 것으로 확인되었다. 개인선량계는 광자극발광선량계(OSLD)인 것으로 확인되었다.
- 신고대상 방사선발생장치 사용기관에서는 방사선에 의한 영향을 최소화 하기위한 보호구(납 보호복, 납 고글, 납 장갑, 갑상샘 보호대)를 착용하지 않는 것으로 예상된다. 신고대상 방사선발생장치 사용기관은 방사선작업종사자 등록의 의무가 면제된다. 즉 신고대상 방사선발생장치 사용기관의 작업종사자는 선량계 착용의 의무가 없기 때문에 현장 측정 시 해당기관의 작업종사자 개인선량계 착용비율이 낮게 나타났다.

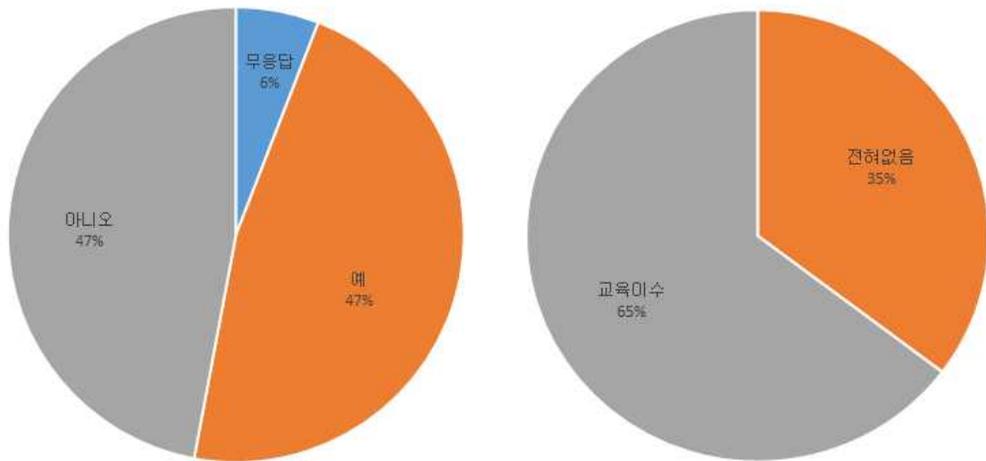


[그림 II-17] 방사선작업종사자 개인선량계 및 보호구 착용관련

(a) 개인선량계 착용빈도 (b) 보호구 착용 유·무

5) 방사선작업종사자 교육 이수 유·무

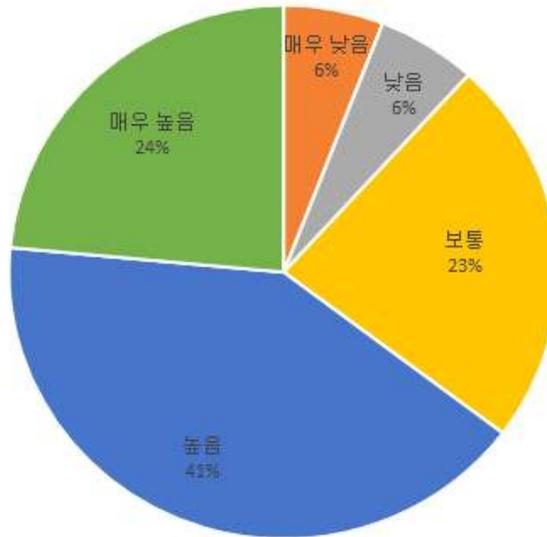
- 신고대상 방사선발생장치 사용기관의 작업종사자 중 약 50%에 해당되는 인력이 방사선 작업종사자인 것을 인지하지 못하는 것으로 예상되며 이는 별도의 교육이나 선량관리 의무가 없기 때문일 것이라 추정된다. 따라서 작업종사자가 현재 사용하는 방사선 발생장치 임을 설명하였으며, 향후 방사선 안전관리를 위한 방안을 설명하였다.
- 작업종사자 중 약 47%가 방사선작업종사자인 것을 인지하고 있고 약 65%가 방사선 안전관련 교육을 이수하였다. 업무에 적합한 방사선 안전관련 교육을 수행한다면 방사선작업종사자로 인지 못한 작업종사자가 올바르게 인지 및 교육 이수 또한 높아 질 것으로 예상된다.



(a) (b)  
 [그림 II-18] 방사선작업종사자 및 교육이수 현황  
 (a) 방사선작업종사자 (b) 교육이수

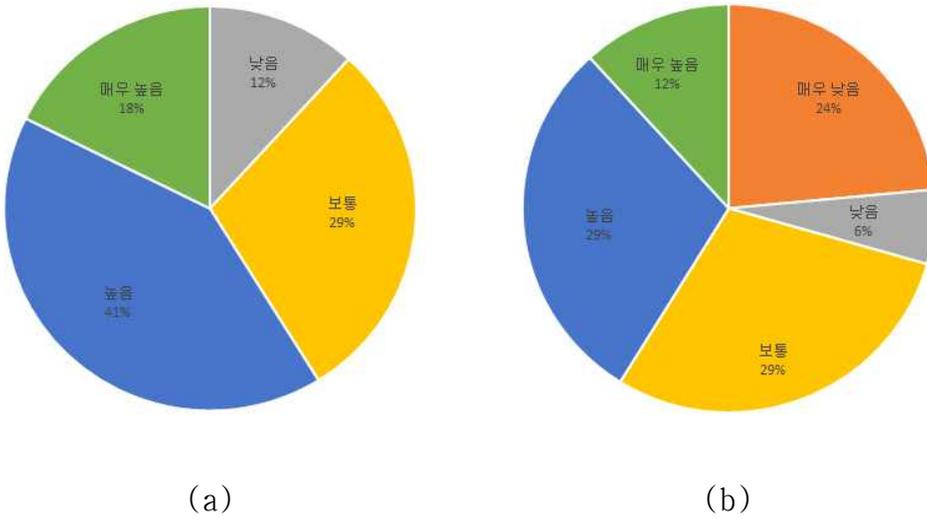
## 6) 방사선건강영향에 대한 설문조사

- 방사선에 의한 인체영향에 대한 관심도가 상당히 높은 수준이며, 건강영향에 대한 이해도 또한 유사하게 나타난다. 반면, 방사선에 의한 인체 영향에 대한 걱정/불안감이 상대적으로 높은 것으로 확인 되었다.



[그림 II-19] 방사선 인체영향에 대한 관심

- 방사선 건강영향에 대한 이해도가 낮은 집단의 경우 전체대비 41%에 해당되었으며 반면 인체 영향에 대한 걱정/불안감이 높은 집단이 41%인 것을 확인하였다. 즉 방사선에 대한 이해도가 낮을수록 방사선에 대한 걱정/불안감이 높은 것으로 예상할 수 있다. 방사선에 대한 이해도가 높을수록 방사선에 대한 걱정/불안감이 낮다고 예상할 수 있다. 이를 바탕으로 방사선관련 교육을 직무에 맞는 맞춤형 교육이 필요할 것으로 예상된다.



[그림 II-20] 방사선 건강 이해도, 인체영향에 대한 걱정/불안감

(a) 건강에 대한 이해도 (b) 인체영향에 대한 걱정/불안감



### Ⅲ. 결론



### Ⅲ. 결론

#### 1. 고찰

##### 1) 국내 저선량 방사선발생장치 이용 실태

- 국내 사용중인 저선량 방사선발생장치는 원자력안전법의 분류기준에 따라 허가대상, 신고대상, 규제면제로 나뉘어 관리되고 있다. 통계데이터를 통해 신고대상 방사선발생장치의 수가 매년 지속적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있으며, 그에 반해 허가대상 방사선발생장치는 매년 비슷한 수준을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 국내 저선량 방사선발생장치 사용 기관은 대부분 방사선투과검사(56%), 물질의 성분분석(30%) 목적으로 방사선발생장치를 사용하는 것으로 확인 되었으며, 반도체 제조 관련 업종 및 부품 제조와 같은 제조업 분야에서 그 사용이 많은 것을 확인할 수 있었다.
- 국내에서 사용하고 있는 방사선발생장치 중 허가대상의 경우, 설계승인, 현장조사, 정기검사 등의 방법으로 엄격하게 규제가 이루어지고 있으나, 신고대상 및 규제면제 방사선발생장치 경우 이용 종사자에 대한 관리 및 사용 기관에 대한 주기적인 관리가 이루어지지 않는 것을 확인할 수 있었다. 물론 대부분의 방사선발생장치가 피폭의 우려가 낮은 캐비닛형(80%)이었으나, 방사선발생장치의 관리상태 및 누설 방사선량 등에 대해 주기적인 모니터링은 이루어지지 않고 있었다. 허가대상을 제외한 신고대상 및 규제면제 방사선발생장치의 경우 방사선발생장치 사용기관에 대한 규제당국의 별도의 검사, 조사가 이루어지지 않고 있다. 신고대상 및 규제면제 방사선발생장치의 이용에 따른 피폭 우려가 크지 않다 판단 될 수 있지만, 장비의

지속 사용으로 인한 결손, 고장 등으로 인한 방사선 누설이 발생할 수 있다. 방사선 누설의 발생은 곧 사용 종사자의 피폭으로 이어지기 때문에 방사선발생장치 및 이용기관에 대한 지속적인 모니터링의 수행이 필요하다 할 수 있다.

- 국내 사용되는 정전기 제거 장치는 대표적인 규제면제 방사선방사선 발생장치라 할 수 있다. 정전기 제거 장치는 저에너지 엑스선을 이용하여 일정 범위를 이온화하여 제전하는 방식으로 많이 사용되며 다양한 형태의 설비에 폭 넓게 적용이 가능하다(라인공정 설비에 일반적으로 설치). 원자력안전법에 따라 5 keV 이하의 출력을 가지는 장비는 규제면제 대상으로 분류되며, 그로 인한 허가/신고 의무 면제로 인해 사용기관에서는 손쉽게 방사선발생장치를 사용할 수 있다. 방사선발생장치의 이용의 편의성에 비해 이용 종사자에 대한 관리 의무가 없으므로, 방호목적으로 별도의 개인피폭선량계를 개인에 제공하지 않는 한 불특정하게 발생할 수 있는 방사선 누출에는 대처할 수 없는 시스템으로 운영되고 있어 장기적으로는 문제가 발생할 수 있을 것으로 예상된다.
- 현장 조사 결과 일부 사업장에서는 신고대상 방사선발생장치 이용 종사자에 대해 방사선작업종사자는 아니지만, 그에 준하는 보건조치 및 개인피폭선량관리를 하는 것으로 확인할 수 있었다. 하지만 대부분의 사업장에서는 신고대상 방사선발생장치 이용 종사자에 대한 별도의 방사선학적 조치사항이 부재한 것을 확인할 수 있었다.
- 원자력안전법 상으로는 방사선발생장치 이용 종사자에 대한 별도의 건강관리가 없어도 되나 산업안전보건법에는 ‘사업주는 종사자에 대한 건강장해를 예방하기 위한 조치를 해 두어야 한다’ 라고 명시되어 있다. 실제로 이용 종사자에 대한 건강진단은 산업안전보건법에 의한 특수검진을 실시한 것으로 파악되고 있다. 두 법령사이의 간극으로 이용 종사자에 대한 방사선학적 위해를 파악하지 못하고 있는

현실이라 할 수 있겠다. 물론 모든 방사선발생장치 사용 기관에 대한 규제는 현실적으로는 어려울 수 있으나, 규제 외 대상 방사선발생장치 이용 종사자의 방사선 인체영향에 대한 지속적인 연구와 모니터링이 필요할 것으로 사료된다.

## 2) TLD 및 방사선량 측정장비를 이용한 방사선량 측정 결과

- 국내 저선량 방사선발생장치 취급 사업장에 대한 현장조사를 통해 TLD, EPD를 이용하여 종사자 피폭선량에 대한 평가를 수행하였으며, 방사선발생장치 주변 공간선량률의 측정으로 사업장 내 공간 방사선량률을 평가하였다. 이용 종사자의 개인피폭선량은 대부분의 현장조사 기관에서 LLD 이하로 나타나 방사선 발생장치이용에 따른 피폭은 발생하지 않는 것으로 확인할 수 있었다. 방사선안전관리자의 관리 하 모든 장비가 잘 관리되고 있음을 확인할 수 있었으나, 현장조사 기관 수가 부족하여 국내 저선량 방사선발생장치 이용기관 전반의 경향을 반영하기에는 어려움이 있다. 공간선량률 측정 결과 장비 운영시에도 백그라운드와 차이 없는 방사선량률을 보였으며, 별도의 방사선 누설이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 다만, 방사선발생장치의 누설 방사선량과 관련한 주기적인 모니터링을 실시하는 기관은 일부였으며, 대부분의 기관은 주기적인 모니터링 없이 장비를 사용하고 있었다.
- 저선량 방사선발생장치의 1차선 측정을 위해서는 방사선원항 (radiation source term, 이하 ‘선원항’ 이라 한다)의 정의가 우선 필요하다. 엑스선 발생장치의 특성(타겟물질, 타겟각도, 고유/여과 필터, 관전압, 관전류 등)에 따라 1차선의 분포 및 특성이 다르게 나타나기 때문에, 엑스선 스펙트럼 생성 프로그램을 이용하여 해당 장비 특성에 맞는 선원항 정의가 필요하다. 엑스선 분광분석장비를 통

한 선원항 측정도 적용해 볼 수 있는 방법이지만 측정조건이 부정확할 경우 측정결과에 대한 신뢰도 확보가 어렵다는 단점이 있다. 정의된 선원항 정보를 활용하여 몬테카를로 전산모사를 통해 1차선에 의한 피폭선량을 평가할 수 있다. 엑스선 발생장치의 특성에 대한 정보 획득이 어렵다면, 공간선량률을 이용한 평가를 수행하여야 한다. 이 경우 ion chamber을 이용하여 발생장치 주변 및 엑스선 조사 형태에 대한 측정을 수행하여야 한다. 일반적인 서베이미터(GM counter, proportional counter 기반 서베이미터)를 통해서도 주변 공간선량률을 측정할 수 있으나, 이온 전리함의 경우 저에너지 엑스선에 대한 측정이 용이하여, 상대적으로 정확한 측정결과를 기대할 수 있다.

- 본 연구에서는 저선량 방사선발생장치의 구조적 특성의 한계로 인해 엄밀한 의미의 1차선 측정결과를 도출하지 못하였다. 향후 이를 보완하여 몬테카를로 전산모사를 이용하여 1차선으로 인한 종사자 개인피폭선량에 대한 평가가 수행될 경우 보다 향상된 결과를 기대할 수 있을 것이라 판단된다. 실제 1차선에 의한 직접적인 피폭사고가 발생한다면, 국소(손, 발 등)에 대한 피폭이 대부분일 것으로 판단되며 1차선으로 인한 피폭 가능성이 있는 발생장치의 경우 시설물 또는 보조설비 등을 설치하여 근본적인 사고 발생을 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3) 발생장치 이용 사업장 안전관리 실태 설문조사 결과

- 현장조사 과정에서 사업장의 안전관리 실태를 파악 및 방사선안전관리에 대한 개선사항을 도출하기 위해 방사선발생장치 이용 종사자 및 기관 방사선안전관리자에 대한 설문 및 면담을 수행하였다. COVID-19 상황으로 인해 모든 이용 종사자에 대한 면담은 진행할

수 없었다. 현장에서는 방사선안전관리자가 타 업무와 겸직을 하는 경우가 많았으며, 전체 절반이 넘는 이용종사자가 방사선작업종사자가 아닌 상태로 업무를 수행하고 있었다. 허가대상 장비가 아니라면 꼭 방사선작업종사자가 아니라도 발생장치를 다룰 수 있지만, 설문 에 응답한 발생장치 이용 종사자 중 35%는 방사선작업종사자와 관련한 교육을 이수하지 못하였다고 응답하였다. 이는 곧 방사선 건강 영향에 대한 관심과 이해도에 영향을 주게 되어 방사선에 대한 무분별한 불안감 및 걱정을 야기할 수 있다. 설문 결과에서도 방사선 인체영향에 대한 관심과 이해도가 높을수록 방사선의 인체영향에 대한 걱정과 불안감이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 방사선작업종사자가 아닌 방사선발생장치 이용 종사자의 경우 사업장 내에서 방사선안전관리자의 주도 하에 방사선안전교육을 주기적으로 수행하는 것이 필요할 것이다.

#### 4) 연구 제한점

- 본 연구는 국내 저선량 방사선발생장치 취급 사업장의 안전관리 실태 파악 및 작업종사자의 피폭선량 조사하기 위하여 설문조사, 현장 방문 시 TLD와 EPD를 이용하여 방사선발생장치에서 방출되는 방사선 측정 및 작업종사자의 피폭선량을 측정하였다. 아울러, 사업장 내에서 방사선발생장치 운영 시 공간선량률을 평가하기 위해 ion chamber를 기반으로 한 서베이미터를 이용하였다.
- 조사 결과의 대표성 확보를 위하여 다수의 저선량 방사선발생장치 취급 사업장에 대한 조사를 하고자 하였으나, COVID-19 상황의 여파로 현장조사 업체 섭외에 어려움이 많았다. 또한 여러 사용목적의 방사선발생장치에 대한 실태를 조사하고자 하였으나, 최종적으로는 다소 한정된 사용목적의 이용기관에 대한 조사가 이루어졌다.

- 방사선발생장치의 사용에 따른 정확한 피폭선량평가를 위해서는 선원항정의가 필수적이다. 즉, 선원항정의를 위해서는 타겟물질, 타겟 각도, 필터, 관전압, 관전류에 대한 정보가 필수적이다. 그러나, 상기 장비의 세부항목 파악이 용이하지 않았으므로, 선원항정의를 직접 하지 않고 1차선 부근의 선량을 직접 평가하는 방식을 선택하였다.
- 신고대상 방사선발생장치는 구조적 분류에 따라 캐비닛형이 대부분을 차지하고 있다. 즉, 운전 중 측정을 위해 장비의 개방이 불가한 형태이므로 1차선의 직접적인 측정은 불가하였기 때문에 방사능 계측장비를 이용하여 빔과 가장 가까운 위치에 근접하여 측정을 수행하였다. 이와 같이 다양한 구조의 장비를 측정할 경우 전체적인 경향 파악이 가능할 것으로 판단된다.
- 방사선발생장치 사용에 따른 피폭경향 및 안전관리 방안을 강구하기 위해서는 상기의 선원항 정의 및 측정을 기반으로 하여 방출되는 방사선의 모양(shape)을 평가하여 피폭의 발생 가능성이 높은 영역을 설정하고, 이를 통해 방사선안전관리 방안을 강구하는 것도 필요할 것이라 판단된다.
- 현장 실태 조사 과정에서 COVID-19 상황으로 인해 방사선발생장치 이용 작업종사자에 대해 직접 만나 면담이 진행되기 어려웠으며, 한정된 인원에 대한 조사만 이루어졌다. 서면 형태의 설문조사만 방사선안전관리자 및 이용 작업종사자에 대해 이루어졌다. 따라서 향후 코로나19 상황이 개선되고 현장측정이 원활해진다면, 다수의 저선량 방사선발생장치 취급 사업장에 대한 면밀한 피폭선량조사가 가능할 것으로 사료된다. 다만, 관련부처인 고용노동부 및 원자력안전위원회가 충분히 긴 기간을 두고 사업장 내 작업종사자의 피폭선량 관리에 관심을 가져 연구를 진행하여야 하겠다.

## 2. 결론

- 본 연구는 국내 저선량 방사선발생장치 취급 사업장에서의 피폭선량에 대한 평가 및 실태 조사를 수행하였다. 국내 산업분야에서 사용되는 저선량 방사선발생장치 및 관련 종사자의 경우 원자력안전법 및 산업안전보건법을 근간으로 하여 관리되고 있었으며, 전반적으로 관리상태가 양호하였다. 그러나 방사선발생장치 관리와 관련하여 두 법령 사이에서도 상충되는 사안이 있었으며, 발생장치 및 이용 종사자에 대한 관리는 규정으로 명확하게 제시되고 있지 않아 각 취급 사업장에 따라 관리가 상이하게 이루어지는 부분이 있었다. 따라서 수행한 조사내용을 참고하여 방사선발생장치 및 종사자 관리와 관련한 현행 법령 및 제도적 측면상의 개선점에 대해 제언하고자 한다.

### 1) 방사선발생장치 관련 종사자에 대한 건강관리 강화를 위한 방사선안전교육 수행 검토

- 국내 산업분야 방사선발생장치 취급 사업장에 대한 조사 수행 결과 종사자의 개인피폭선량은 매우 낮은 수준임을 확인할 수 있었다. 다만 방사선발생장치 관련 종사자에 대한 관리는 사업장별로 상이함을 확인할 수 있었다. 국내 저선량 방사선발생장치 이용 기관 특히 허가대상 방사선발생장치 취급 사업장의 경우 방사선작업종사자로 등록하여 종사자를 관리하고 있다. 하지만 신고대상 방사선발생장치 취급 사업장에서는 관련 종사자에 대한 관리가 사업장별로 달랐으며, 몇몇 기관에서는 관련 종사자에 대한 교육 및 건강검진을 방사선작업종사자에 준하는 수준으로 관리하고 있었으나, 일부기관에서는 관련 종사자에 대한 교육 및 방사선작업종사자 건강검진이 이루어

어지지 않고 있었다. 현재 원자력안전법상으로는 신고대상 방사선발생장치 관련 종사자에 대한 의무규정은 별도로 명시되어 있지 않고 사용 및 안전관리에 대한 내용만 제시되고 있다. 산업안전보건법 상에서는 관련 종사자에 대해 전반적인 관리를 하도록 규정을 하고 있어 두 법령 사이의 간극이 있음을 확인할 수 있다. 신고대상 방사선발생장치는 개인 피폭에 대한 우려가 낮은 장비이기 때문에 방사선작업종사자에 준하는 종사자 관리는 불필요한 행정소요를 만들 수 있으므로 1)각 사업장의 방사선안전관리자가 자체적으로 매년 방사선안전교육을 수행하고 2)장비의 누설 방사선에 대한 주기적인 모니터링의 수행으로 종사자의 피폭에 대한 우려를 낮추고 장비의 안전한 사용이 보장될 것이라 판단된다.

## 2) 피폭선량 저감화를 위한 방안

- 방사선발생장치의 사용 시 안전장치, 인력, 운영방법 및 피폭선량에 영향을 미치는 요소를 평가하여 방사선발생장치의 사용에 따른 피폭선량을 저감화 방안의 마련이 필요할 것으로 판단된다.
- 안전장치와 관련하여 방사선의 모양(beam shape)를 평가하여 방사선에 직접 영향을 받는 공간에 대한 제어를 위해 시설물 또는 보조설비등을 설치하여 피폭선량을 저감화 할 수 있을 것이라 판단된다. 실제 1차선에 의한 직접적인 피폭사고는 국소(손, 발 등)피폭이 대부분을 차지하고 있으나 근본적인 사고 발생을 방지하기 위한 목적으로 안전장치의 구축이 필요할 것으로 판단된다.
- 신고대상 방사선발생장치 사용기관의 경우 산업안전관리자를 운영하고 있으나, 방사선안전관리를 위한 방사선안전관리자의 지정 및 운영이 미흡한 실정이다. 실제 신고대상 방사선발생장치 사용기관의 경우 방사선안전관리를 위한 의무이행 사항이 적용되지 않기 때문이다. 그러나, 과거 신고대상 방사선발생장치 관련 사고 사례를 바탕으로

로 방사선관련 사고의 가능성을 최소화 하기 위해 방사선영향 및 관련 절차 등의 준수를 위한 관리인력이 필요할 것이라 판단된다.

- 피폭선량의 저감화를 위해 장비의 운영방식을 최적화 하기 위한 방안 마련이 필요할 것으로 판단된다. 즉 신고대상 방사선발생장치의 경우 신고 시 장비의 관전압 및 표면방사선량률을 기준으로 장비를 운영하고 있다. 그러나, 사용목적에 적합한 장비의 최적 조건 탐색을 통해 관전압 등을 최적화 하여 방사선에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 방안의 마련이 필요할 것으로 사료된다.
- 방사선발생장치의 경우 실제 작업종사자의 위치에서의 피폭선량에 영향을 미치는 요소를 평가해야 할 것으로 판단된다. 즉, 본 연구를 통해 측정된 작업종사자 위치에서의 피폭선량측정결과는 전체 신고대상 기관을 반영하고 있지 않기 때문에 실제 방사선발생장치 운영 시 산란선 및 누설방사선의 비율을 평가하여 작업종사자 위치에서의 피폭선량 측정을 통한 피폭선량 저감화 방안의 강구가 필요할 것으로 사료된다.

### 3) 방사선 면제설비 기준 재검토

- 방사선면제설비 기준은 원자력안전법에서만 정의되어 있으며, 산업안전보건법에는 그 기준이 부재하다. 현행 원자력안전법에 따르면 출력이 5 keV를 초과하는 방사선발생장치는 신고 또는 허가를 받아 기관에 설치가 가능하다. 하지만 산업현장에서는 5 keV 이하의 엑스선 발생장치를 사용하고 있으며, 이는 원자력안전법상 방사선 면제설비에 해당하기 때문에 사업자의 방사선 안전관리 의무는 없다. 하지만 산업안전보건기준에 관한 규칙의 방사선 기준에는 포함이 되어있어, 방사선안전관리 상의 gray zone이 존재하게 된다. 또한 방사선 면제설비를 일반 장비로 분류하여 관리하여 무분별한 사용이 이루어진다면 방사선학적 인과에 해당하는 피해가 발생할 수 있다.

따라서 원자력안전법 및 산업안전보건법 사이의 상충된 사항을 보완하고, 현장에서 발생할 수 있는 방사선안전관리 사각지대의 해소를 위하여 두 법에서 정의하는 방사선 및 방사선발생장치의 기준을 통일하고 산업안전보건법에서 방사선 면제설비에 대한 기준을 정의할 필요가 있을 것으로 사료된다.



## 참고문헌

한국방사선진흥협회. 2017년도 방사선 및 방사성동위원소 이용실태 조사 최종보고서. (사)한국방사선진흥협회. 2019.

한국방사선진흥협회. 2018년도 방사선 및 방사성동위원소 이용실태 조사 최종보고서. (사)한국방사선진흥협회. 2020.

한국산업환경보건연구소. 방사선 및 방사성 동위원소 취급사업장의 보건관리 실태조사. 한국산업안전공단 산업안전보건연구원. 2007.

이두용, 김광진, 박희찬. 방사선 및 방사성동위원소 작업종사자 피폭실태 연구. 한국컨텐츠학회논문지. 9(6). pp. 247-255. 2009.

최명수, 임경섭, 이재국, 이승행, 최원철, 이상민, 김광표. 국내 방사선 작업종사자의 피폭방사선량 분석에 관한 연구. 경희대학교. 2011년도 대한방사선방어학회 춘계 학술발표회. 2011.

Sang-Tae Kim, Jaeryong Yoo. Analysis of the radiological safety control level versus the exposure of radiation workers in South Korea from 2008-17. Radiat. Prot. Dosim. 184(1). pp 98-108. 2019.

김무환, 정규환, 최창일, 김아름, 장기원, 조민수, 하위호, 김선실, 양미현. 방사선사고(radiation accident). 한국원자력안전기술원. 2014.

방사선 사건/사고 사례. 2021년 방사선 사건 설명회. 한국원자력안전기술원. 2021.

방사선기기의 설계승인 및 검사에 관한 기준. 원자력안전위원회 고시

제 2021-3호. 2021

정은교, 김갑배, 송세욱. 전리방사선 노출과 관리. 한국산업조건학회지 25(1). pp 27-35. 2015.

Panasonic Industrial Company. TLD system 카탈로그(Panasonic dosimetry).

G. Knoll. Radiation detection and measurement-4th ed. John Wiley & Sons, Inc. 2010.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Source and effects of ionizing radiation. Volume I. Annex E: Occupational radiation exposures. UNSCEAR 2000 report. 2000.

이재기. 방사선방호원론. 한국방사선진흥협회. 2016.

박승현, 정은교. 반도체 제조 사업장에 종사하는 근로자의 작업환경 및 유해요인 노출특성 연구. 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원. 2012.

정인철. 대형 전자빔 용접장치의 적용사례 고찰. 대한용접학회지. 2006.



## [Appendix 1] 종사자 외부피폭선량평가를 위한 설문지

## 종사자 외부피폭선량평가를 위한 설문지

귀 기관의 무궁한 발전을 기원하며 바쁘신 와중에도 불구하고 귀중한 시간을 내어 주셔서 감사합니다. 한국원자력의학원 국가방사선비상진료센터에서는 우리나라 저선량 방사선발생 장치 이용시설의 방사선작업종사자에 대한 피폭선량 자료를 수집하고 있습니다. 그 일환으로 방사선작업이 이루어지는 작업공간 내 공간선량을 측정, 개인피폭선량평가 및 방사선작업 종사자들의 작업현황 등을 조사하기 위한 설문조사를 수행하고 있습니다. 평가결과를 통해 국내 방사선안전관리체계를 보다 공고히 하고자 하오니 바쁘시더라도 아래 문항을 성실히 기재 하여 주시고 앞으로도 적극적인 협조를 부탁드립니다. 감사합니다.

소속 기관명		부서명	
성명		성별	<input type="checkbox"/> 남 <input type="checkbox"/> 여
직위 / 직종		생년월일	년 월 일
전화번호		이메일	



## ② 피폭선량평가에 대한 설문조사

피폭선량 평가 검사 만족도	검사 만족도	<input type="checkbox"/> 매우 불만족(1) <input type="checkbox"/> 불만족(2) <input type="checkbox"/> 보통(3) <input type="checkbox"/> 만족(4) <input type="checkbox"/> 매우 만족(5)
	검사 시 불편사항 (직접 작성)	
피폭선량 평가에 대한 이해도	검사 이전 피폭선량 이해도	<input type="checkbox"/> 매우 낮음(1) <input type="checkbox"/> 낮음(2) <input type="checkbox"/> 보통(3) <input type="checkbox"/> 높음(4) <input type="checkbox"/> 매우 높음(5)
	검사 이후 피폭선량 이해도	<input type="checkbox"/> 매우 낮음(1) <input type="checkbox"/> 낮음(2) <input type="checkbox"/> 보통(3) <input type="checkbox"/> 높음(4) <input type="checkbox"/> 매우 높음(5)
	피폭선량 평가 관련 개선사항 (직접 작성)	

## ③ 방사선건강영향에 대한 설문조사

방사선건강영향 관심도	방사선작업 관련 인체영향에 대한 관심도	<input type="checkbox"/> 매우 낮음(1) <input type="checkbox"/> 낮음(2) <input type="checkbox"/> 보통(3) <input type="checkbox"/> 높음(4) <input type="checkbox"/> 매우 높음(5)
	방사선 건강영향에 대한 이해도	<input type="checkbox"/> 매우 낮음(1) <input type="checkbox"/> 낮음(2) <input type="checkbox"/> 보통(3) <input type="checkbox"/> 높음(4) <input type="checkbox"/> 매우 높음(5)
	방사선작업에 따른 본인의 인체영향에 대한 걱정/불안감	<input type="checkbox"/> 매우 낮음(1) <input type="checkbox"/> 낮음(2) <input type="checkbox"/> 보통(3) <input type="checkbox"/> 높음(4) <input type="checkbox"/> 매우 높음(5)
	방사선 인체영향 관련 염려/우려사항 (직접 작성)	

한국원자력의학원 국가방사선비상진료센터



## 연구진

연구기관: 한국원자력의학원

연구책임자: 유재룡(선임연구원, 한국원자력의학원)

연구원: 진영우(특임의무직, 한국원자력의학원)

연구원: 박민석(연구원, 한국원자력의학원)

연구원: 김한성(연구원, 한국원자력의학원)

연구원: 김민섭(의료기사, 한국원자력의학원)

연구원: 어인모(의료기사, 한국원자력의학원)

## 연구기간

2021. 04. 27. ~ 2021. 11. 30.

본 연구는 산업안전보건연구원의 2021년도 위탁연구 용역사업에 의한  
것임

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,  
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을  
알려드립니다.

산업안전보건연구원장

저선량 방사선발생장치 사용에 따른 피폭선량 조사  
(2021-산업안전보건연구원-730)

발 행 일 : 2021년 11월 30일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 한국원자력의학원 선임연구원 유재룡

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (44429) 울산광역시 중구 중가로 400

전 화 : 052-703-0874

팩 스 : 052-703-0336

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

