

# Establishment of the Dose Constraints Using the Frequency Distribution for the Annual Exposure Dose per Radiation Worker

Sang-Min Park<sup>1</sup>, Jeong-Min Seo<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiological Science, Graduate School, Catholic University of Pusan

Received: June 24, 2024. Revised: October 24, 2024. Accepted: October 31, 2024.

## ABSTRACT

In this study, an indicator for setting dose constraints was presented using the frequency distribution of the annual exposure dose per radiation worker. To this end, from January 2017 to December 2019, we surveyed personal dosimeter reading values per month for 13 radiography inspection offices that had reported the establishment of a workplace to move and use radioisotopes, etc. for the purpose of radiographic testing (RT) in Korea, and performed a frequency analysis of the annual exposure dose per radiation worker. In this study, the indicator for setting dose constraints was based on the 95th percentile according to the recommendations of international organizations related to radiation protection. As a result, the dose constraints in the field of RT was set at an average of 5.15 mSv over the three-year investigation period. The nuclear energy-related business operator, if was set its own dose constraints proposed in this study and was operated successfully, were able to manage the exposure dose inequality of 52 people, equivalent to 5% of registered radiation workers, and could expect a reduction in collective dose of 760 man-mSv. Therefore, the nuclear energy-related business operator set its own dose constraints using the indicator for setting dose constraints proposed in this study, will be able to achieve optimization of protection by excluding exposure situations in which a dose level higher than the set dose constraint is expected from the process of establishing a protection plan.

Keywords: Dose constraints, Frequency distribution, Annual exposure dose per radiation worker, Optimization of protection

## I. INTRODUCTION

방사선을 이용하는 행위는 경제적 이득이 수반될 수 있지만 방사선 피폭에 따른 위대한 영향이 발생할 수 있기 때문에 방사선을 이용하는 행위로부터 발생할 수 있는 해(harm)보다 개인 또는 사회에 줄 수 있는 편익이 커야 할 뿐만 아니라 유익한 방사선의 이용을 부당하게 저해하지 않으면서 방사선 위험에 대한 적절한 안전관리가 요구된다<sup>[1,2]</sup>. 이를 위하여 국제방사선방호위원회(ICRP; International Commission on Radiological Protection)는 피폭을 유발하는 선원과 피폭 받는 개인에 대한 시·공간적 방호 작용점을 구조화하여 피폭 네트워크를 관리하고 다양한 방사선 피폭 상황에 따라 원자력관계사업자가 자

제적으로 선량 제한 값을 설정하여 피폭 가능성, 피폭자의 수, 개인의 피폭 선량 등을 합리적으로 달성 가능한 낮게 유지함으로써 사전적 방호의 최적화를 달성할 것을 권고하고 있다<sup>[3-7]</sup>.

이러한 선량 제한 값은 계획피폭상황에서는 선량제약치(dose constraint), 비상 및 기존피폭상황에서는 참조준위(reference level)를 명목적 개인 선량으로 적용할 수 있다<sup>[3-7,8]</sup>. 또한 사전적 방호의 최적화는 설정된 선량 제한 값 보다 높은 선량 준위가 예측되는 피폭 상황을 방호 계획 수립 과정에서 배제시키는 것이 매우 중요하다<sup>[5-7,9]</sup>. 그러나 선량 제한 값들이 너무 과도하게 설정되면 방호의 최적화를 빈번하게 실패할 확률이 높고 너무 보수적으로 설정되면 방호의 최적화의 역할을 수행할 수 없기

\* Corresponding Author: Jeong-Min Seo E-mail: thomas8@cup.ac.kr Tel: +82-51-510-0581  
Address: No. 510-1, Bld. A, #57, Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Busan, Republic of Korea

때문에 규제기관 및 원자력관계사업자가 주어진 피폭 상황에 따른 경험과 논의를 거쳐 적절하게 설정하고 이를 이행할 수 있어야 한다.

방호의 최적화 달성을 위한 의사 결정 보조 기법(DATs; decision aiding techniques)들은 방호 수준을 결정해야 하는 이해 관계자들이 본질적 불확실성과 가치 판단을 고려하여 비용 편익 분석법<sup>[10]</sup>, 단위 집단선량의 금전가<sup>[11]</sup>, 비용 효율 분석법<sup>[12]</sup>, 다속성 효용 분석법<sup>[12]</sup> 등 다양한 정량적 기법들이 적용되고 있다. 그러나 원자력관계사업자나 방사선안전관리 조직 구성원들이 필요한 자료를 수집하고 막연한 속성에 대한 모델링과 가치 판단을 통해 방사선 작업 환경을 고려한 방호의 최적화 과정을 이행하는 것은 현실적으로 매우 어려울 수 있다. 또한 국내의 방사선 및 방사성동위원소 이용 기관들의 피폭 상황은 관리 가능한 단일 선원에 의하여 발생하고 복수 선원에 의한 피폭 기여도가 현저히 낮은 피폭 환경을 제공하고 있기 때문에 계획피폭 상황에서 복수 선원에 의한 개인의 선량한도를 방호의 핵심 기준으로 정하는 것은 방호의 최적화 조건에 부합되지 않을 수 있다<sup>[13]</sup>. 따라서 원자력관계사업자는 단일 선원에 의한 명목적 개인 선량을 선원 중심적 선량 제한 체계로 관리함으로써 방호의 최적화를 달성하여야 한다. 이를 위하여 명목적 개인 선량은 계획피폭상황에서 선량제약치를 개인의 선량한도보다 낮게 설정하고 주어진 특정 피폭원에서 그 값을 초과하는 선량이 존재하지 않도록 사전적 방호 조치를 계획하며 이를 이행하여 선량제약치 아래에서 합당한 개인의 연간 피폭 선량을 보장할 수 있어야 한다. 이와 관련하여 방호의 최적화 조건 이행을 위한 다양한 선행 연구들이 수행되었다<sup>[14-19]</sup>. 그러나 이러한 선행 연구들은 대부분 방사선 작업 상황을 정성적 또는 정량적으로 단순하게 제시하는 평가 모델로 간주될 수 있으며 개인의 선량 불평등 완화, 방사선 작업 환경을 고려한 선량제약치의 설정 등 방호의 최적화 달성을 위한 정량적 지표들을 제공한다고 보기 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구는 방사선 작업 환경을 고려한 방호의 최적화 달성을 위하여 원자력관계사업자가 해당 사업소에서 관리하고 있는 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포를 적용하고

자체적으로 선량제약치를 설정하여 이를 운영할 수 있는 설정 지표를 제시하고자 하였다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. 조사 방법 및 연구 대상의 선정

본 연구는 자료 조사 방법 및 연구 대상의 선정 과정은 Fig. 1에 제시하였다. 자료 조사는 2023년 10월부터 2024년 1월까지 4개월간 수행되었다. 연구 내용 및 목적, 연구 대상 및 방법, 조사 방법 및 활용 범위, 개인 정보 보호 및 비밀 보장, 연구 담당자의 연락처 등이 포함된 연구 동의서를 작성하여 방사선투과검사를 목적으로 작업장 개설 신고를 완료한 사업소에 전자 메일 또는 소셜 네트워크 서비스를 이용하여 송부하였다. 본 연구에 동의 및 참여 의사를 밝힌 사업소를 개별 방문하여 2017년 1월부터 2019년 12월까지 3년간 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값을 조사하였다. 본 연구에서 2020년 이후의 개인 선량계 판독 값은 코로나 바이러스 감염증(COVID-19) 발병 이후 실물 경기의 부진으로 방사선투과검사 발주량의 급격한 감소와 방사선 작업 주기의 불확실성 등으로 통계적 대표성이나 신뢰성이 없을 것으로 판단하여 본 연구에서 제외되었다.

조사된 모집단에서 방사선작업종사자의 구분은 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값이 0을 포함한 어떤 값이 하나 이상인 경우를 등록된 방사선작업종사자로 정의하였으며 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값이 판독업무 등록기준 및 검사에 관한 규정 제4조<sup>[20]</sup>에 따라 최저 측정 준위(LLD; lower limit of detection) 이상인 어떤 값이 하나 이상인 경우를 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자로 정의하였다. 여기서 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값은 통계적 규칙이나 연산 구조가 정해져 있지 않기에 통계적으로 의미 있는 결과를 도출하기 위하여 모집단의 크기, 신뢰 구간, 오차 범위 등을 고려하여 최적의 표본 크기를 선정할 필요가 있다<sup>[21,22]</sup>. 따라서 본 연구 대상은 전체 모집단의 크기에 따라 95% 신뢰 구간,  $\pm 5\%$  이내의 오차 범위에서 주어진 Eq. (1)을 이용하여 최적의 표본 크기를 구하고 전

체 모집단 내에서 모집단의 크기가 계산된 최적의 표본 크기를 초과하는 경우를 통계적으로 의미 있는 표본 집단으로 선정하였다<sup>[21]</sup>.

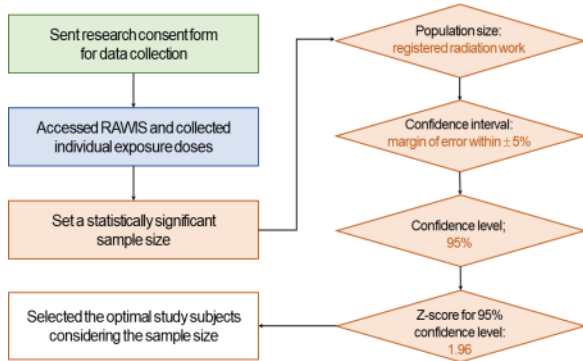


Fig. 1. Flowchart of research subject selection and survey method in this study.

$$Sample\ size = \frac{z^2 \times p(1-p)}{e^2} \div \left( 1 + \frac{z^2 \times p(1-p)}{e^2 N} \right) \quad (1)$$

- $z$  :: Value corresponding to the desired confidence interval
- $p$  :: Confidence interval
- $e$  :: Error range
- $N$  :: Population size

본 연구는 2017년 1월부터 2019년 12월까지 3년간 방사선투과검사를 목적으로 작업장 개설 신고를 완료한 19개소를 대상으로 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값 84,535건이 조사되었다(Table 1).

Table 1. Results for determining the study subjects from the population surveyed at the radiography inspection offices from January 2017 to December 2019.

Classification		Number
Number of population <sup>1</sup>	Radiation offices	19
	Sample cases	84,535
Number exceeding sample size <sup>1</sup>	Radiation offices	13
	Registered radiation worker	36,211
	Attended radiation worker	17,019

<sup>1</sup> was calculated using the given equation (1), and means that the number of registered radiation workers exceeded the calculated sample size. These values included duplicated values for entrants and retirees.

조사된 모집단에서 95% 신뢰 구간, ±5% 이내의 오차 범위에서 최적의 표본 크기를 만족하는 13개

사업소를 대상으로 등록된 방사선작업종사자 36,211건, 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자 17,019건의 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값을 연구 대상으로 선정하였다.

## 2. 통계 분석

본 연구는 SPSS Ver. 29(SPSS Statistics, IBM Corp., USA) 프로그램을 이용하여 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값에 대한 통계 분석을 수행하였다. 사업소에 등록된 방사선작업종사자와 실제 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자로 구분하여 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값 및 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량에 대한 빈도 분포를 연도별로 분석하였다. 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값에 대한 빈도 분석은 피폭 선량 구간 빈도와 통계적 연관성을 알아보기 위하여 카이 제곱 분석(Pearson's chi-squared test)을 수행하여 독립성 검정을 실시하였다. 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량에 대한 빈도 분석은 반복측정 분산분석(Repeated-Measure ANOVA)을 수행하여 평균 및 표준편차를 구하였으며 유의수준 0.05 미만에서 표본 집단 사이에 유의미한 평균의 차이가 있는지를 검증하였다. 또한 표본 집단에 대한 중심 척도 분석은 표본 집단의 50% 범주 내에서 사분위수를 이용하였으며 산포도 분석은 표본 집단의 전체 범주 내에서 백분위수를 이용하였다. 이 경우 표본 집단의 표준 편차가 평균에 근접하거나 평균보다 큰 경우 산포도가 넓게 퍼져 분포하고 사고 피폭 등과 같은 특정 상황에서의 과피폭 선량이 표본 집단의 특이치 또는 이상치로 포함될 수 있기 때문에 본 연구는 분위수를 이용한 박스 플롯 차트(box plot chart)를 추가적으로 분석하였다.

## 3. 빈도 분포를 이용한 선량제약치 설정 지표 분석

본 연구에서 선량제약치 설정 지표는 최적의 표본 크기를 갖는 표본 집단에서 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량을 0.2 mSv 단위의 피폭 선량 구간으로 나누어 구간 비율 척도를 구하고 90 및 95 백분위수에 해당하는 피폭 선량을 선량제약치 설정 지표로 각각 설정하고 두 설정 지표를 분석하였다.

### III. RESULT

#### 1. 개인 선량계 판독 값에 대한 빈도 분석

표본 집단에서 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값은 0.5 mSv 미만인 경우가 13,736건(80.71%)으로 가장 높게 조사되었으며 0.5 mSv 이상 1 mSv 미만 경우가 2,242건(13.17%), 그 밖에 1 mSv를 초과하여 피폭한 건수는 1,041건(6.12%)으로 조사되었다 (Table 2).

Table 2. Frequency analysis results for the personal exposure dosimeter reading values per month given to radiation workers.

Exposure dose interval (mSv)	Frequency (N)	Ratio (%)
Less than 0.2	7,852	46.13
More than 0.2 and less than 0.5	5,884	34.57
More than 0.5 and less than 1.0	2,242	13.17
More than 1.0 and less than 2.0	804	4.72
More than 2.0 and less than 3.0	115	0.68
More than 3.0 and less than 4.0	39	0.23
More than 4.0	83	0.49
Total	17,019	100

These values included duplicated values for entrants and retirees.

1개월 단위의 개인 선량계 판독 값에 대한 빈도 분포가 연도별로 피폭 선량 구간 빈도와 통계적으로 의미 있는 연관성이 있는지 알아보기 위하여 카이 제곱 검정을 실시한 결과 통계적으로 유의미한 연관성이 있는 것으로 분석되었다.

1개월 단위의 개인 선량계 판독 값에 대한 빈도 분포를 연도별로 분석한 결과 2017년도가 6,760건 (39.7%)으로 가장 많았으며 그 밖에 2019년도가 4,934건(31.3%), 2018년도가 5,325건(29.0%)으로 각각 나타났다( $p < 0.001$ , Table 3).

Table 3. Comparison results of chi-square tests for the personal exposure dosimeter reading values per month given to radiation workers and radiation exposure doses by year.

Exposure dose interval (mSv)	Years of exposure (cases, %) <sup>1</sup>			$\chi^2$
	2017	2018	2019	
Less than 0.2	2,923 (17.17)	2,160 (12.69)	2,769 (16.27)	162.2***
More than 0.2 and less than 0.5	2,410 (14.16)	1,702 (10.00)	1,772 (10.41)	
More than 0.5 and less than 1.0	988 (5.81)	697 (4.10)	557 (3.27)	
More than 1.0 and less than 2.0	346 (2.03)	283 (1.66)	175 (1.03)	
More than 2.0 and less than 3.0	40 (0.24)	45 (0.26)	30 (0.18)	
More than 3.0 and less than 4.0	22 (0.13)	14 (0.08)	3 (0.02)	
More than 4.0	31 (0.18)	33 (0.19)	19 (0.11)	
Total	6,760 (39.72)	4,934 (28.99)	5,325 (31.29)	

\* $p < .05$ , \*\* $p < .01$ , \*\*\* $p < .001$   
<sup>1</sup> The relative ratio for the frequency of exposure dose intervals by year to the total number of personal dosimeter reading values per month. These values included duplicated values for entrants and retirees.

#### 2. 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량에 대한 빈도 분석

방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량은 어떤 집단의 연간 집단선량을 방사선작업종사자로 나눈 값으로 정의하고 있기 때문에 방사선작업종사자의 구분에 따라 달리 평가될 수 있다<sup>[16,17]</sup>. 따라서 본 연구는 사업소에 등록된 방사선작업종사자와 실제 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자로 구분하여 연도별로 분석하였다. 사업소에 등록된 방사선 작업종사자 1인당 연간 평균 선량은 2017년 0.73 mSv, 2018년 0.74 mSv, 2019년 0.53 mSv로 2019년의 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량이 가장 낮게 나타났다. 그러나 실제 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량은 2017년 1.40 mSv, 2018년 1.28 mSv, 2019년 1.14 mSv로 사업소에 등록된 전체 방사선작업종사자를 적용하여 분석한 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량보다 각각 1.93, 1.73, 2.15배 증가되었다. 연도별로 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량이 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 알아보기 위하여 반복



측정 분산분석을 실시한 결과 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다( $p > 0.05$ , Table 4).

Table 4. Comparison results for the average annual exposure dose by year of radiation workers who attended in radiation work to the average annual exposure dose of registered radiation workers.

Division	Years (mSv)			F	p	
	2017	2018	2019			
Registered radiation workers	Mean	0.73	0.74	0.53	0.588	0.772
	SD	0.46	1.17	0.49		
Attended radiation workers	Mean	1.40	1.28	1.14	0.762	0.637
	SD	0.62	0.60	0.70		
Increase rate <sup>1</sup>	1.93	1.73	2.15			

<sup>1</sup> The increase ratio for the average annual exposure dose of radiation workers who attended in radiation work to the annual exposure dose of registered radiation workers. These values included duplicated values for entrants and retirees. \* $p < .05$ , \*\* $p < .01$ , \*\*\* $p < .001$

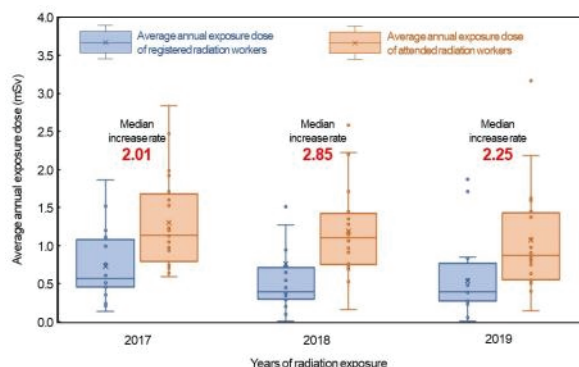


Fig. 2. Quartile distribution (Box-and-whisker plot) of average annual exposure dose by year of radiation workers who attended in radiation work to the average annual exposure dose of registered radiation workers.

연도별 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량 분포를 박스 플롯 차트로 추가 분석한 결과 사업소에 등록된 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량 분포는 표본 집합의 50% 범위에 포함되는 사분위수 범위가 평균 중위수 0.44 mSv를 중심으로 사분위수 범위가 0.3 mSv에서 1.0 mSv 범주에서 비교적 좁게 분포하고 있었으며 표본 집합의 90% 범위에 포함되는  $p$  백분위수의 범위가 특이치 및 이상치를 제외하고 최대 1.89 mSv까지 분포하고 있었다. 그러나 실제 방사선 작업에 참여한 방사선작업종

사자를 적용하여 분석한 결과, 표본 집합의 50% 범위에 포함되는 사분위수의 경우 평균 중위수가 약 2.3배 이상 증가한 1.03 mSv를 중심으로 사분위수 범위가 약 1.6배 증가한 0.5 mSv에서 1.6 mSv까지 분포하고 있었으며 표본 집합의 90% 범위에 포함되는  $p$  분위수의 범위가 특이치 또는 이상치를 제외하고 최대 2.78 mSv까지 비교적 넓게 분포하고 있었다(Fig. 2).

### 3. 빈도 분포를 이용한 선량제약치 설정 지표 분석

방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포를 연도별로 분석한 결과, 연간 10 mSv를 초과하여 피폭 받은 방사선작업종사자는 연도별로 각각 20명, 18명, 13명으로 전체 표본 집단에 대하여 각각 1.14%, 1.15%, 0.82% 정도를 차지하고 있었다. 그러나 이러한 소수의 방사선작업종사자들에 대한 집단선량은 연도별로 각각 451.7, 355.5, 174.1 man-mSv로 전체 표본 집단의 총 집단선량에 대하여 연도별로 각각 16.1%, 14.9%, 9.8%를 차지하고 있었다(Table 5). 또한 연간 20 mSv를 초과하여 피폭 받은 방사선작업종사자는 연도별로 각각 3명, 4명, 1명으로 전체 표본 집단에 대하여 각각 0.17%, 0.26%, 0.06% 정도를 차지하고 있었다. 그러나 이러한 극소수의 방사선작업종사자들에 대한 집단선량은 연도별로 각각 251.9, 158.8, 25.7 man-mSv로 전체 표본 집단의 총 집단선량에 대하여 연도별로 각각 9.0%, 7.0%, 1.5%를 차지하고 있었다(Table 5).

Table 5. Comparison results for frequency distribution on the annual exposure dose per radiation worker who attended in radiation work by year

Classification of descriptive statistical dose (mSv)	Years (mSv)			
	2017	2018	2019	
Exceeding 10 mSv	Radiation workers (%) <sup>1</sup>	20 (1.14)	18 (1.15)	13 (0.82)
	Cumulative dose (%) <sup>1</sup>	451.7 (16.1)	355.5 (14.9)	174.1 (9.8)
Exceeding 20 mSv	Radiation workers (%)	3 (0.17)	4 (0.26)	1 (0.06)
	Cumulative dose (%)	251.9 (9.0)	158.8 (7.0)	25.7 (1.5)
Max dose	121.25	51.45	25.74	

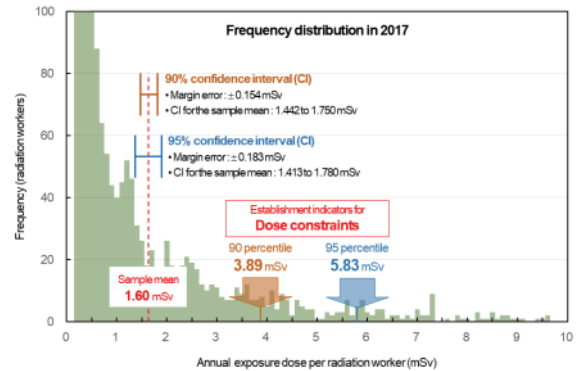
<sup>1</sup> Ratio of cumulative dose of radiation workers exceeding 10, or 20 mSv to the total exposure dose of all radiation workers. These values included duplicated values for entrants and retirees.

이산형 빈도 분포에서 표본 평균에 비하여 어떤 관측 값이 매우 커지면 표본 분산이 매우 크게 증가되면서 빈도수가 급격하게 감소되는 경향을 보이기 때문에 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포는 10 및 20 mSv를 초과하여 피폭 받은 방사선작업종사자의 집단선량이 증가함에 따라 표준 편차가 표본 평균보다 최대 2.45배까지 증가되면서 양의 산포도가 매우 넓게 분포하고 빈도수가 매우 작은 경향을 보였다. 이러한 빈도 분포는 90 또는 95 백분위수를 이용한 선량제약치 설정 지표에 영향을 줄 수 있다. 따라서 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포를 이용한 선량제약치 설정 지표를 연도별로 분석한 결과, 첫 번째 분석 지표로서 90 백분위수에 해당하는 피폭 선량을 기준으로 설정된 선량제약치는 연도별로 2017년의 경우 3.89 mSv, 2018년의 경우 3.57 mSv, 2019년의 경우 2.75 mSv를 각각 설정할 수 있었다(Fig. 3). 이러한 결과를 토대로 원자력관계사업자가 선량제약치를 명목적 개인 선량으로 관리하는 경우 2017년은 전체 방사선작업종사자에 대하여 9.4%에 해당하는 176명, 연간 피폭 선량 전체에 대하여 48.73%에 해당하는 1,366.3 man-mSv의 집단선량을 관리할 수 있을 것으로 예상할 수 있다(Table 6). 동일한 방법으로 2018년과 2019년은 156명(10.45%)에 대한 집단선량 1,094.8 man-mSv(48.4%)와 159명(9.9%)에 대한 집단선량 854.7 man-mSv(48.3%)를 관리할 수 있을 것으로 예상할 수 있었다(Table 6).

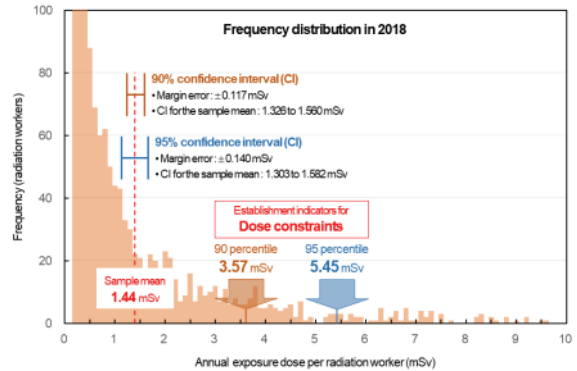
또한 두 번째 분석 지표로서 95 백분위수에 해당하는 피폭 선량을 기준으로 설정된 선량제약치는 연도별로 2017년의 경우 5.83 mSv, 2018년의 경우 5.45 mSv, 2019년의 경우 4.17 mSv를 각각 설정할 수 있었다(Fig. 3).

만약 이러한 선량제약치를 원자력관계사업자가 자체적으로 명목적 개인 선량으로 제한하는 경우 2017년은 전체 방사선작업종사자에 대하여 4.64%에 해당하는 87명, 연간 피폭 선량 전체에 대하여 33.64%에 해당하는 943.2 man-mSv의 집단선량을 관리할 수 있을 것으로 예상할 수 있었다(Table 6). 동일한 방법으로 2018년과 2019년은 78명(5.22%)에 대한 집단선량 761.7 man-mSv(33.7%)와 79명(4.9%)

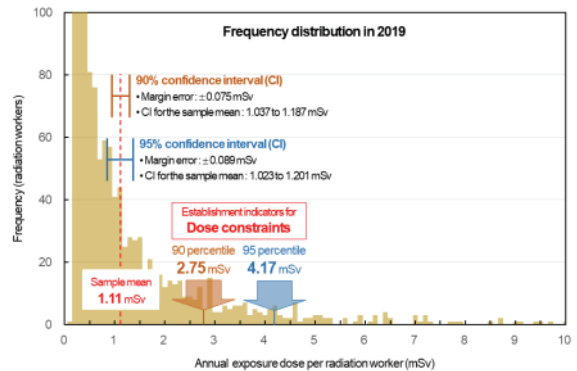
에 대한 집단선량 575.5 man-mSv(32.5%)를 관리할 수 있을 것으로 예상할 수 있었다(Table 6).



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Estimated range of reliable sample mean, and the dose constraints indicators (90 and 95 percentiles) in the confidence intervals (90% and 95%) for the frequency distribution of annual exposure dose per radiation worker.

Table 6. Comparison results on the indicators for setting dose constraints using the frequency distribution of annual exposure dose per radiation worker by year.

Classification of statistical dose (mSv)		Years (mSv)		
		2017	2018	2019
90 percentile	Dose constraint (mSv)	3.89	3.57	2.75
	Excluded radiation workers (%) <sup>1</sup>	176 (9.40)	156 (10.45)	159 (9.86)
	Excluded cumulative dose (mSv) <sup>2</sup>	1,366.3 (48.73)	1,094.8 (48.44)	854.7 (48.26)
95 percentile	Dose constraint (mSv)	5.83	5.45	4.17
	Excluded radiation workers (%)	87 (4.64)	78 (5.22)	79 (4.90)
	Excluded cumulative dose (mSv)	943.2 (33.64)	761.7 (33.70)	575.5 (32.50)

<sup>1</sup> When setting dose constraints, relative ratio of excluded radiation workers to total radiation workers. When attended radiation workers were applied, total radiation workers was 1,873, 1,493, and 1,613 persons in 2017, 2018, and 2019, respectively.  
<sup>2</sup> means the cumulative exposure dose of excluded radiation workers. These values included duplicated values for entrants and retirees.

#### IV. DISCUSSION

ICRP는 방호의 최적화 달성을 위하여 선량제약치를 지속적으로 권고하고 있다<sup>13,4)</sup>. 선량제약치는 계획피폭상황에서 어떤 단일 선원으로부터 피폭 받는 개인의 전망적 피폭 선량에 대한 상한 값으로 정의하고 있다. 그러므로 어떤 단일 선원으로부터 피폭 받는 개인의 피폭 선량을 선량한도보다 낮게 설정하고, 주어진 특정 피폭원에서 그 값을 초과하는 선량이 존재하지 않도록 사전적 방호 조치를 수행함으로써 선량제약치 아래에서 합당한 개인의 피폭 선량 준위를 보장하고 적절한 선원 중심적 방호 조치 방안을 결정하는데 적용하고 있다<sup>23)</sup>. 그럼에도 불구하고 선량제약치는 단순한 선량 감축만을 의미하는 것이 아니라 피폭 집단 및 피폭 환경의 특성, 사회적 상황과 가치, 방사선의 외적 위험, 방호의 기술적 또는 경제적 상황, 규제 제약 등의 다양한 속성들을 모두 고려하여 복합적 가치 판단을 수행할 수 있어야 한다. 이와 같은 이유로 대부분의 소규모 원자력관계사업자가 필요한 모든 자료를 수집하고 막연한 속성에 대한 모델링과 가치

판단을 통해 방사선 작업 환경을 고려하여 방호의 최적화 과정을 자체적으로 이행하는 것은 현실적으로 매우 어려울 수 있다<sup>15)</sup>. 따라서 본 연구는 방사선투과검사 분야를 대상으로 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 기술 통계 분석 및 빈도 분석을 수행하여 원자력관계사업자가 해당 사업소의 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포를 이용하여 자체적으로 선량제약치를 설정 및 운영할 수 있도록 선량제약치 설정 지표를 제시하고자 하였다.

이를 위하여 본 연구는 2017년부터 2019년까지 총 3년간 방사선투과검사 사업소 13개소를 대상으로 등록된 방사선작업종사자 36,211건, 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자 17,019건의 개인 선량계 판독 값을 연구 대상으로 선정하였으며 등록된 전체 방사선작업종사자에 대하여 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자의 비율은 약 47%로 나타났다(Table 1). 본 연구 대상은 동 기간 동안 국내에서 방사선투과검사를 목적으로 이동사용 허가를 받은 사업소의 약 24%에 해당하기 때문에 국내 방사선투과검사에 대한 모집단을 대표할 수 있는 표본 집단으로 간주할 수 있었다<sup>24,25)</sup>. 또한, 한국원자력안전재단(KOFoNS; Korea Foundation of Nuclear Safety)에서 발표한 2022년도 피폭 방사선량 분석보고서<sup>25)</sup>에 따르면 최저 측정 준위 이상의 선량을 받은 방사선작업종사자를 선량측정가능자로 정의하여 별도 관리하고 있는데 동 기간 동안 선량측정가능자는 연평균 등록된 전체 방사선작업종사자의 47.8%로 보고하고 있으며 본 연구와 비교하여 약 0.8%의 차이만을 보이고 있다. 이러한 차이는 조사된 전체 모집단에서 통계적으로 의미 있는 결과를 도출하기 위하여 사업소별 단위 모집단의 크기에 따라 95% 신뢰 구간, ±5% 이내의 오차 범위에서 구한 최적의 표본 크기를 만족하는 대상을 선정하였기 때문으로 판단되었다.

방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량은 어떤 표본 집단의 연간 집단선량(man-mSv)을 방사선작업종사자(man)로 나눈 값으로 정의하고 있기 때문에 방사선작업종사자의 구분 방법에 따라 달리 평가될 수 있다.<sup>16,17)</sup> 이와 관련하여 Richardson 등<sup>16,27)</sup>은

외부 피폭에 대한 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량 분석에서 실제 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자에 대한 평가 누락이 방사선안전관리 실태 조사에 대한 중대한 정보 제공 오류를 범할 수 있을 것으로 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량은 사업소에 등록된 방사선작업종사자와 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자로 구분하여 분석하였다. 본 연구에서 사업소에 등록된 전체 방사선작업종사자를 대상으로 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량을 분석한 결과 연도별로 각각 0.73, 0.74, 0.53 mSv로 나타났다(Table 4). 이러한 결과는 원자력안전위원회 정기 간행물인 2020년 원자력 안전연감[24]에서 보고한 방사선투과검사 분야에 대한 연도별 방사선작업종사자 1인당 평균 선량 0.84, 0.70, 0.58 mSv와 비교하여 거의 일치하였다. 또한 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자를 대상으로 분석한 경우 연도별로 각각 1.40, 1.28, 1.14 mSv로 사업소에 등록된 전체 방사선작업종사자를 적용하여 분석한 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량보다 각각 1.93, 1.73, 2.15배 증가되는 경향을 보였다(Table 5). 따라서 사업소에 등록된 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량 평가 방식은 방사선안전관리 현황이나 방사선안전규제 정책에 대한 표본 특성을 모두 대표할 수 없기 때문에 실제 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 기술적 분석이 요구될 뿐 만 아니라 이를 기반으로 선량제약치를 설정하는 지표 분석이 요구될 것으로 판단되었다.

선량제약치 설정 방법과 관련하여 국제원자력기구(IAEA; International Atomic Energy Agency)는 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포를 기반으로 적절한  $p$  분위수를 선택하여 선량제약치를 설정하고 통계적 무작위성을 고려하여 설정된 선량제약치보다 더 많이 받는 방사선작업종사자가 5% 이하가 되도록 권고하고 있다<sup>[28]</sup>. 또한 선량제약치 설정 방법과 관련된 선행 연구들은 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포에서 95% 분위수를 선량제약치로 설정한 사례들이 종종 있었다<sup>[29,30]</sup>. 따라서 본 연구에서 선량제약치 설정 지표는 방사선작업종사자 1인당 연

간 피폭 선량에 대한 빈도 분포를 이용하여 95 백분위수를 선량제약치로 설정하였다.

본 연구에서 95 백분위수를 기준으로 설정된 선량제약치는 연도별로 각각 5.83, 5.45, 4.17 mSv로 분석되었다(Fig. 3). 본 연구를 기반으로 원자력관계사업자가 자체적으로 선량제약치를 설정하고 성공적으로 운영하였다고 가정할 때 연도별로 각각 87명(4.64%), 78명(5.22%), 79명(4.90%)의 방사선작업종사자에 대한 피폭 불평등을 관리할 수 있다(Table 6). 또한 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량은 2017년도의 경우 전체 집단선량에 대하여 33.6%에 해당하는 943 man-mSv의 집단선량이 감소됨에 따라 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량 1.40 mSv를 0.90 mSv로 35.7%를 감소시킬 수 있었으며 마찬가지로 2018년도와 2019년의 경우 전체 집단선량에 대하여 각각 33.7%와 32.5%에 해당하는 762 man-mSv와 576 man-mSv의 집단선량이 감소됨에 따라 각각 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량 1.28 mSv와 1.14 mSv를 0.77 mSv와 0.78 mSv로 39.8%와 31.6%를 감소시킬 수 있기 때문에 방호의 최적화를 달성할 수 있을 것으로 판단되었다.

본 연구에서 제안된 선량제약치 설정 지표는 방사선작업종사자의 약 5% 이하의 소규모 과피폭 선량 집단을 집중 관리함으로써 전체 집단선량에 대하여 약 30% 정도의 집단선량과 약 20% 정도의 방사선작업종사자 1인당 연간 평균 선량을 감소시켜 방호의 최적화를 달성할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 원자력관계사업자는 해당 사업소에서 관리되고 있는 방사선원, 방사선 작업 과정에서 발생할 수 있는 방사선학적 위해 정도, 방사선 작업 절차에 따른 예상 피폭 선량과 실제 피폭 선량 평가, 방사선작업종사자의 작업 참여율 등의 방사선 작업 환경을 충분히 고려하여 본 연구에서 제안된 선량제약치 설정 지표를 이용하여 과도하지 않은 선량 준위를 선량 제한 값으로 설정하고 설정된 선량 제한 값 보다 높은 선량 준위가 예측되는 피폭 상황을 방호 계획 수립 과정에서 배제시킴으로써 방호의 최적화를 달성할 수 있을 것으로 판단되었다.



## V. CONCLUSION

최근 방사선 방호와 관련된 국제기구들은 방호의 최적화 달성을 위하여 계획피폭상황에서 선량 제약치 적용 의무에 대하여 지속적으로 논의하고 있다. 따라서 본 연구는 원자력관계사업자가 해당 사업소의 방사선 작업 환경을 고려하여 방호의 최적화를 달성할 수 있도록 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포를 이용한 선량 제약치 설정 지표를 제시하였다. 원자력관계사업자가 본 연구에서 제안한 선량 제약치 설정 지표를 자체적으로 해당 사업소의 방사선안전관리에 적용하여 방사선안전관리 조직 구성원들의 분석적 사고 역량 증대, 방사선 작업 환경 개선, 방사선 피폭 저감화를 위한 합리적 노력 등의 포괄적 방호 활동을 수행함으로써 방사선작업종사자 개인의 피폭 불평등을 완화시키고 사전적 방호의 최적화를 달성하여 작업장 방사선안전문화를 정착시킬 수 있을 것으로 판단하였다. 특히, 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량은 방사선작업종사자 종합정보시스템(RAWIS; Radiation Worker Information Service System)이나 해당 사업소의 방사선작업종사자 피폭 선량기록부 등에서 표본 자료를 쉽게 접근할 수 있기 때문에 본 연구에서 제안된 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량을 기반으로 빈도 분포를 이용한 선량 제약치 설정 지표는 원자력관계사업자가 해당 사업소의 선량 제약치를 사회적·경제적·심리적 요건 등의 방사선 작업 환경을 모두 고려하여 합리적으로 달성 가능한 선량 제한 값으로 쉽게 설정 및 운영할 수 있을 것으로 판단되었다. 그러나 본 연구에서 사업소에 등록된 전체 방사선작업종사자와 비교하여 실제 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자의 비율이 약 50% 수준에 불과하기 때문에 기존의 사업소에 등록된 전체 방사선작업종사자를 대상으로 하는 방사선안전관리 현황 분석은 표본 집단에 대한 중대한 기술적 통계 오류가 발생할 여지가 있을 것이다. 따라서 방사선안전관리 현황 분석은 실제 방사선 작업에 참여한 방사선작업종사자를 대상으로 최적의 표본 집단을 추출하고 연간 방사선 작업 참여 기간별로 면밀한 통계적 검증을 기반으로 개인의 피폭 불평등을 적극적으로

완화할 필요가 있다. 원자력관계사업자가 해당 사업소에서 방사선 작업에 참여하는 방사선작업종사자를 대상으로 본 연구에서 제안된 선량 제약치 설정 지표를 자체적으로 설정 및 운영한다면 약 5%에 해당하는 과도한 피폭 선량 집단을 선량 제약치 선량 준위 아래에서 관리할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 여기서 5%에 해당하는 과도한 피폭 선량 집단은 해당 사업소에서 연간 방사선 작업이 집중되어 상대적 방사선 작업 강도 및 작업 시간이 높기 때문에 전체 집단선량 대비 약 30%의 집단선량을 차지하는 소수의 방사선작업종사자를 의미한다. 본 연구를 기반으로 설정된 선량 제약치 이내로 방사선작업종사자 개인의 피폭 선량 준위를 제한하는 방호 활동은 원자력관계사업자 측면에서 방사선 작업 환경을 고려하여 합리적으로 달성 가능한 낮은 피폭 선량을 유지하려는 방호의 최적화 과정으로 정의할 수 있을 것이며 국가 및 규제기관의 관리 측면에서 사업소 단위의 자발적 위험 관리에 따른 작업장 방사선 안전 문화를 정착시킬 수 있고 상대적 방사선 위험도가 높은 사업소에 대한 방사선작업종사자들을 효율적으로 관리할 수 있을 것이다.

## Reference

- [1] W. Rühm, C. Clement, D. Cool, D. Laurier, F. Bochud, K. Applegate, T. Schneider, S. Bouffler, K. Cho, G. Hirth, M. Kai, S. Liu, S. Romanov, A. Wojcik, "Summary of the 2021 ICRP workshop on the future of radiological protection", *Journal of Radiological Protection*, Vol. 42, No. 2, pp. 1-22, 2022. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6498/ac670e>
- [2] Y. C. Chi, "A Modification to the Situation-based Scheme for Sorting Exposures Proposed in ICRP Publication 103", *Health Physics*, Vol. 122, No. 2, pp. 306-312, 2022. <http://dx.doi.org/10.1097/HP.0000000000001484>
- [3] International Commission on Radiological Protection, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 103, 2007.
- [4] International Commission on Radiological Protection, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP

- Publication 60, 1991.
- [5] International Commission on Radiological Protection, "The Optimisation of Radiological Protection : Broadening the Process", ICRP Publication 101b, 2006.
- [6] International Commission on Radiological Protection, "Ethical foundations of the system of radiological protection", ICRP Publication 138, 2018.
- [7] International Commission on Radiological Protection, "Use of dose quantities in radiological protection", ICRP Publication 147, 2021.
- [8] K. W. Cho, Y. M. Kim, "Implementation of the ICRP 2007 recommendations in Korea", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 67, No. 7-8, pp. 1286-1289, 2009.
- [9] V. Tsapaki, S. Balter, C. Cousins, O. Holmberg, D. L. Miller, P. Miranda, M. Rehani, E. Vano, "The International Atomic Energy Agency action plan on radiation protection of patients and staff in interventional procedures: Achieving change in practice", *Physics in Medicine*, Vol. 52, pp. 56-64, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.06.634>
- [10] International Commission on Radiological Protection, "Cost-benefit analysis in the optimisation of radiological protection", ICRP Publication 37, 1983.
- [11] International Commission on Radiological Protection, "Implications of Commission Recommendations that Doses be Kept as Low as Readily Achievable", ICRP Publication 22, 1973.
- [12] International Commission on Radiological Protection, "Optimization and decision-making in radiological protection", ICRP Publication 55, 1989.
- [13] Korean Association for Radiation Application, "Survey on the Status of Radiation / RI Utilization in 2018", 2020.
- [14] Y. H. Ryu, J. H. Cho, K. R. Dong, W. K. Chung, J. W. Lee, E. J. Choi, "Survey on radiation safety management (RSM) among Korean radiation workers who operate radiation generators or handle radioactive isotopes", *Archives of Environmental & Occupational Health*, Vol. 69, No. 1, pp. 11-22, 2014. <https://doi.org/10.1080/19338244.2012.701250>
- [15] S. T. Kim, J. Yoo, "Analysis of the Radiological Safety Control Level Versus the Exposure of Radiation Workers in South Korea from 2008-17", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 184, No. 1, pp. 98-108, 2019. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncy190>
- [16] Korea Institute of Nuclear Safety, "Information Analysis and Management for Safety Regulation on Radiation Worker", KINS/ER-190, Vol. 1-5, 2014.
- [17] Korea Institute of Nuclear Safety, "Analysis on the Risk Evaluation Model and Feasibility Study on Model Application of the KISOE System", KINS/HR-1461, 2016.
- [18] Y. J. Bae, "Study on the Risk Assessment Method at Workplace of Radiation Facilities according to Occupational Radiation Exposure", Master's Thesis, Daegu Catholic University, 2016.
- [19] R. Munbodh, T. M. Roth, K. L. Leonard, R. C. Court, U. Shukla, S. Andrea, M. Gray, G. Leichtman, E. E. Klein, "Real-time analysis and display of quantitative measures to track and improve clinical workflow", *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, Vol. 23, No. 9, pp. e13610, 2022. <http://dx.doi.org/10.1002/acm2.13610>
- [20] Regulations on registration standards and inspection for reading work, Articles 4, 2023.
- [21] M. Rodríguez Del Águila, A. González-Ramírez, "Sample size calculation", *Allergol Immunopathol (Madr)*, Vol. 42, No. 5, pp. 485-492, 2014.
- [22] G. D'Arrigo, S. Roumeliotis, C. Torino, G. Tripepi, "Sample size calculation of clinical trials in geriatric medicine", *Aging Clinical and Experimental Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 1209-1212, 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/s40520-020-01595-z>
- [23] V. Kamenopoulou, G. Drikos, P. Dimitriou, "Dose constraints to the individual annual doses of exposed workers in the medical sector", *European Journal of Radiology*, Vol. 37, No. 3, pp. 204-208, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/s0720-048x\(00\)00286-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0720-048x(00)00286-2)
- [24] Nuclear Safety and Security Commission, "Nuclear safety yearbook 2020", 2021.
- [25] Korea Foundation of Nuclear Safety, "Exposure radiation dose analysis report in 2022", 2023.
- [26] D. Richardson, S. Wing, J. Watson, S. Wolf, "Missing annual external radiation dosimetry data among Hanford workers", *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology*, Vol. 9,

No. 6, pp. 575-585, 1999.

<http://dx.doi.org/10.1038/sj.jea.7500064>

- [27] A. De Giorgi, A. Bongiovanni, S. De Sio, S. Sernia, G. Adamo, G. La Torre, "Assessment of the Impact of Low-dose Ionizing Radiation Exposure on Health Care Workers: A Study of Methods Used from a Scoping Review", *Health Physics*, Vol. 125, No. 2, pp. 102-108, 2023.  
<http://dx.doi.org/10.1097/HP.0000000000001693>
- [28] Nuclear Energy Agency, "Considerations on the Concept of Dose Constraints", OECD/NEA, 2014.
- [29] R. Salinas Mariaca, "Dose constraint for Industrial gammagraphy developed by regulatory authorities", *International Nuclear Information System (INIS)*, Vol. 42, No. 1, pp. 1-7, 2008.
- [30] S. Y. Chang, K. K. Chung, "Considerations on the Concept of Dose Constraint", *Journal of Radiological Protection*, Vol. 21, No. 4, pp. 329-330, 1996.

## 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포를 이용한 선량제약치 설정 방안

박상민<sup>1</sup>, 서정민<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>부산가톨릭대학교 일반대학원 방사선학과

### 요 약

본 연구는 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분포를 이용한 선량제약치 설정 지표를 제시하고자 하였다. 이를 위하여 2017년 1월부터 2019년 12월까지 국내의 방사선투과검사를 목적으로 작업장 개설 신고를 완료한 13개 사업소를 대상으로 1개월 단위의 개인 선량계 판독 값을 조사하고 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량에 대한 빈도 분석을 수행하였다. 본 연구에서 선량제약치 설정 지표는 방사선 방호 관련 국제기구의 권고에 따라 95 백분위수를 기준으로 설정하였다. 결과적으로 3년의 조사 기간 동안 방사선투과검사 분야의 선량제약치는 평균 5.15 mSv로 설정되었다. 원자력관계사업자가 본 연구에서 제안된 선량제약치를 자체적으로 설정하고 성공적으로 운영하였다고 가정할 때 등록된 방사선작업종사자의 5%에 해당하는 52명의 피폭 불평등을 관리할 수 있으며 760 man-mSv의 집단선량이 감소될 것으로 예상할 수 있었다. 따라서 원자력관계사업자가 본 연구에서 제안된 선량제약치 설정 지표를 이용하여 선량제약치를 자체적으로 설정하고 설정된 제한 값보다 높은 선량 준위가 예측되는 피폭 상황을 방호 계획 수립 과정에서 배제시킴으로서 방호의 최적화를 달성할 수 있을 것이다.

중심단어: 선량제약치, 빈도 분포, 방사선작업종사자 1인당 연간 피폭 선량, 방호의 최적화

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	박상민	부산가톨릭대학교 일반대학원 방사선학과	대학원생
(교신저자)	서정민	부산가톨릭대학교 방사선학과	교수