Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 2, pp. 117-126, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.2.117

Original article

국내 원자력발전소 방사선작업에 대한 피폭 분석 및 대표 고 피폭 작업 선정

이찬양[1,2] · 임영기[1] · 김광표[2,*]

[1]대한방사선방어학회, [2]경희대학교 원자력공학과

Exposure Analysis and Selection of Representative High Exposure Tasks for Radiation Work in Domestic Nuclear Power Plants

Chan Yang Lee[1,2], Young-Khi Lim[1,*], and Kwang Pyo Kim[2,*]

[1]The Korean Association for Radiation Protection, #319, Hanyang Institute of Technology Bldg., 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Republic of Korea
[2]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheoung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

ABSTRACT This study aims to identify high exposure tasks among the tasks performed in domestic nuclear power plants as a basis for developing training programs to improve the efficiency of workers' work. To this end, we first analyzed the exposure status of radiation work in domestic nuclear power plants. Radiation tasks in nuclear power plants were categorized, collective doses were investigated, and the collective doses were calculated based on the collective doses, and representative high exposure tasks were identified. We found that the collective and individual doses in domestic nuclear power plants are continuously decreasing, but there is an imbalance of exposure among workers. In terms of work classification, nuclear power plants are managed in 236 work codes based on light water reactors and 181 work codes based on heavy water reactors, depending on the work equipment and location. Among the total work codes, 23 codes have an annual average dose exceeding 10 μSv, and based on this, 10 representative high exposure tasks were derived. The representative high exposure tasks were selected as S/G nozzle dam work, S/G debris removal work, nuclear instrumentation system, S/G eddy current detection work, and insulation work. The results of this study are expected to serve as an important basis for reducing the exposure of workers in nuclear power plants and improving work efficiency.

Key words: ALARA, Radiation Dose to Worker, Nuclear Power Plant Work Code, Highly exposed work

1. 서 론

1978년 고리 1호기의 상업운전 이후 원자력발전소의 호기 수가 증가함에 따라 원전 내 작업작업종사자의 수도 지속적으로 증가하고 있다. 또한, 원전 국외수출 및 신규 원전 건설, SMR 건설 추진 등으로 이러한 추세가 더욱 강화할 것으로 예상된다. 한편, 원전에 대한 국민적 관심과 후쿠시마 등 원전 중대사고 발생, 안전에 대한 규제 강화 등으로 원전 내 작업작업종사자에 대한 피폭저감을 요구하는 목소리도 증가하고 있다. 작업작업종사자 수 증가 및 피폭저감 요구에 따라 한국수력원자력㈜는 2012년에 사이버 ALARA 센터를 구축하여 ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 개념을 국내 원전에 적극적으로 도입하였으며, 피폭저감을 위한 노력을 하고 있다. 그러나 아직까지 작업종사자의 피폭을 사전에 예측하고 관리하는 시스템이 부족하며, 노후 원전의 증가와 계획예방정비 기간의 증가 등으로 인해 작업종사자들에 대한 피폭이 증가할 가능성이 높아졌다. 따라서 효율적인 작업 수행 및 피폭 관리가 요구되고 있다. 효율적 작업 수행을 위해서는 반복된 훈련을 통해 작업종사자가 작업과 작업현장에 익숙해지는 것이 매우 중요하다. 그러나 방사선 작업 현장을 현실에서 구현하기는 많은 어려움이 있어 VR(가상현실) 등 최신 기술을 활용하여 사실적으로 묘사된 작업현장을 구현해 작업 훈련을 하는 방안이 필요하다.

홍대석 등은 원전 내에서 수행되는 방사선작업을 그룹화하고 각 그룹별 대표적 피폭작업을 도출하였다.[2] 연구에서는 원전

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Kwang Pyo Kim
Tel: +82-31-201-2560, Fax: +82-31-273-3592, E-mail: kpkim@khu.ac.kr
Received 14 May 2024 **Revised** 18 May 2024 **Accepted** 12 June 2024

내 작업을 원자로 관련작업, 증기발생기 관련작업, 펌프 및 밸브 관련작업, 기타작업으로 구분하고 각 그룹별 피폭경향을 도출하였다. 서장수 등은 계획예방정비 기간중의 원전작업종사자의 작업리스크를 정량화하고 피폭시나리오를 개발하기 위하여 중수로형 원전의 계획예방정비기간 중 피폭현황을 분석하였다. 연구에서는 원전 내 작업허가서를 기반으로 작업구분별 작업횟수, 작업종사자 수, 선량, 작업시간을 조사하였고 원전 내에서 수행되는 작업 중 증기발생기 등 일부 작업그룹에서 피폭이 주로 발생함을 확인하였다[3]. 조영호 등은 원전 내 작업종사자의 집단선량을 평가하여 고피폭을 야기하는 주요 인자에 대한 분석을 통해 고피폭 저감을 위한 방향을 제시하였다. 연구에서는 원전 내 작업을 26개 그룹으로 분류하고 선량률, 작업인원, 작업빈도 조사를 통한 집단선량을 분석하여 상위 10개 고피폭 작업을 도출하였다. 원자로냉각재펌프 점검보수 작업, 핵연료교체 작업 등이 고피폭 작업으로 조사되었다[4].

앞선 연구에서는 원전 내 작업종사자 전체를 대상으로 피폭을 평가하거나 일부 주기기를 대상으로 작업 피폭을 평가하였다. 이로 인해 큰 작업그룹별 피폭 경향을 확인할 수 있지만, 구체적인 작업, 피폭 경로 파악 등 피폭저감을 위한 구체적인 계획 수립을 위한 기반자료로 활용하기에는 한계점이 있다. 또한, 대부분 연구에서 집단선량을 기준으로 고피폭 작업을 도출하였으며, 이에 따라 작업종사자의 개인 피폭선량을 분석 및 관리하는데 있어 한계를 지닌다.

국내 원전의 증가와 안전에 대한 관심 증가로 작업종사자 피폭저감에 대한 필요성은 지속적으로 증가하고 있다. 작업종사자의 피폭저감을 위해서는 피폭저감기술의 개발 외에도 최적의 작업 시나리오 도출, 반복된 훈련 등을 통한 작업 숙련도 향상, 작업환경에 대한 이해를 통해 작업시간을 원천적으로 줄이는 방안이 필요하다. 이를 위해 작업종사자가 방사선작업 현장에 익숙해지고 작업절차를 주기적으로 훈련해야 한다. 그러나 피폭상황을 구현하거나 원전 내 작업현장을 구현하기는 현실적으로 어려워서, 한국전력기술㈜, 한전KPS㈜ 등 원전 관련 유관기관은 VR/AR 등의 가상현실 기반 훈련 프로그램을 도입하기 위한 연구개발을 수행 중이다. VR훈련 프로그램 내에는 원전 작업절차에 따른 모든 작업 시나리오가 탑재되야 하나, 원전 내 모든 작업을 VR 훈련 프로그램으로 제작하는 것은 시간적, 비용적 한계를 지닌다. 따라서 작업의 중요성, 주기적 수행 여부, 피폭선량 등 기준을 따라 대표작업을 선정하고 대표작업에 대한 훈련 프로그램 개발이 우선되야 한다. 대표작업 선정을 위해서 원전 내 방사선 작업 현황 및 작업종사자의 피폭 수준을 분석하고, 대표적인 고피폭 작업을 도출할 필요가 있다.

본 연구는 원전 내 각 방사선작업에 따른 피폭을 분석하고, 이를 기반으로 주요 고피폭 작업을 선정하는 것이다. 이를 위해 먼저 원전 내 작업종사자 피폭데이터를 분석하였다. 다음으로 원전 내 방사선작업 작업코드를 조사하고 작업코드별 피폭선량을 도출하여 대표적인 고피폭 작업을 도출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 원전 방사선작업 일반 현황 분석

본 연구단계에서는 한국수력원자력㈜(이하, 한수원)에서 매년 발간되는 원자력발전소 방사선관리연보의 2009년부터 2017년까지의 작업종사자 피폭 데이터를 기반으로 원전 내 피폭 일반 현황을 분석하였다. 방사선관리연보에서는 원전별 작업종사자 및 작업코드별 피폭선량 등에 대한 피폭데이터 등이 수록되어 있으며, 본 연구에서는 해당 데이터를 바탕으로 집단선량 등을 분석하여 국내 원전의 피폭 변화를 도출하였다.

2.2. 원전 내 대표 고피폭 작업 선정을 위한 후보군 분석

본 연구단계에서는 원전 내 대표 고피폭 작업을 선정하기 앞서서 원전 내에서 수행되는 방사선작업을 관리하기 위한 방사선작업코드 현황을 조사하였다. 원전 내에서는 다양한 방사선작업이 수행되고 있다. 이러한 작업을 효율적으로 관리하기 위하여 국내 원전에서는 방사선작업을 주요 특징 등을 기반으로 그룹화하여 방사선 코드를 부여하고 있다. 본 연구에서는 방사선 작업코드 분류 현황을 조사하고 각 작업코드별 집단선량 현황을 분석하였다.

후보군 도출을 위해 각 작업코드별 집단선량과 피폭발생 원인 등을 분석하였다. 그러나, 원전 내에서 수행되는 모든 방사선 작업이 고피폭을 유발하지 않는다. 따라서 원전 작업코드별 분류기준을 파악하고 선량 변화 및 반복성 등을 분석하여 대표 고피폭 방사선 작업 후보군을 도출하였다.

2.3. 대표 고피폭 작업 도출

본 연구단계에서는 앞서 도출된 후보군 중 대표적인 고피폭 작업을 도출하였다. 후보 작업코드별 집단선량과 연간 출입인원을 바탕으로 연평균 피폭선량을 산출하였고 피폭선량을 바탕으로 대표 고피폭 작업을 도출하였다. 이와 함께 대표 고피폭 작업별 피폭현황과 피폭원인을 분석하였다.

3. 결　과

본 연구에서는 국내 원전에서 종사하는 작업종사자의 피폭현황을 조사하고 방사선 작업코드별 피폭현황을 분석하여, 대표적인 고피폭 작업을 도출하였다. 이를 위해 방사선관리연보 데이터를 기반으로 원전 내 일반적인 방사선 피폭현황을 분석하였다. 그리고 원전 내 작업코드 분류현황을 조사하고 작업코드별 집단선량을 조사하였으며, 후보군을 도출하였다. 작업코드별 연간출입인원을 기반으로 1인당 피폭선량을 산출하여 대표적 고피폭 작업을 도출하였다.

Table 1. Nuclear power plant dose species from 2009-2017

Year	Operating Nuclear Power Plant (Units)	Number of workers (people)	Collective Dose (man-mSv)				Average dose to Unit (man-mSv Unit^{-1})	Average dose per person (mSv person^{-1})
			Normal Operation	Planned Maintenance	Interim maintenance	Total		
2009	20	11,723	1,603	14,717	-	16,320	816	1.39
2010	20	13,236	1,244	14,613	-	15,857	793	1.2
2011	21	14,691	1,182	9,983	9	11,174	532	0.76
2012	23	14,715	1,280	9,032	159	10,471	455	0.71
2013	23	14,786	1,302	10,328	492	12,122	527	0.82
2014	23	14,260	1,131	7,134	58	8,324	362	0.58
2015	25	14,926	1,109	7,676	75	8,861	354	0.59
2016	25	14,396	1,072	9,625	313	11,008	440	0.76
2017	25	14,501	987	6,528	13	7,528	301	0.34

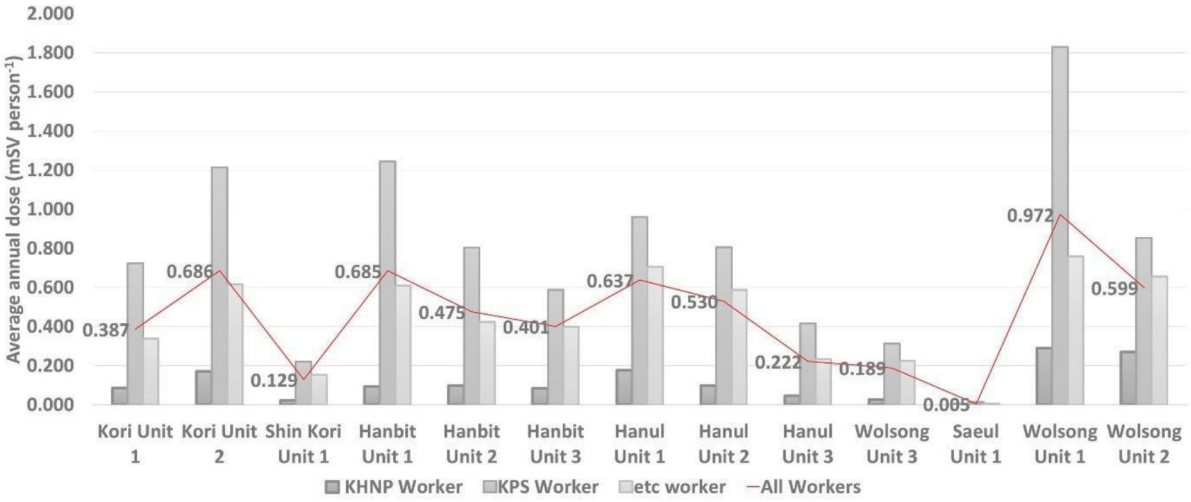

Fig. 1. Average dose by worker organization and reactor site from 2009 to 2017

3.1. 원전 방사선작업 일반 현황 분석

Table 1에 2009년부터 2017년까지의 원전의 방사선 선량을 종합하여 나타내었다. 원전 내에서 발생하는 피폭은 크게 (1) 정상운전, (2) 계획예방정비, (3) 중간정비[1]로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 비계획적인 중간정비에서 발생하는 피폭선량은 제외하고 분석하였다. 먼저, 원전의 총 집단선량은 2009년 16,320 man-mSv에서 2017년 7,528 man-mSv로 약 53.9% 감소하였다. 정상운전시 집단선량은 2009년 1,603 man-mSv에서 2017년 987 man-mSv로 약 38.4% 감소하였다. 계획예방정비시 집단선량은 2009년 14,717 man-mSv에서 2017년 6,528 man-mSv로 약 55.6% 감소하였다. 호기당 평균 집단선량은 2009년 816 man-mSv에서 2017년 301 man-mSv로 약 63.1% 감소하였다. 1인당 평균 피폭선량은 2009년 1.39 mSv에서 2017년 0.34 mSv으로 75.5% 감소하였다.

Fig. 1에서는 2009년부터 2017년까지 국내 원전 사업소별로 종사자의 연평균 피폭선량을 나타내었다. 원전 내 작업종사자는 작업에 따라 소속기관이 구분되며, 크게 (1) 한국수력원자력, (2) 한전KPS, (3) 기타 로 구분된다. 2009년부터 2017년까지 원전 내 전체 종사자의 연평균 피폭선량은 0.795 mSv으로 도출되었다. 연평균 종사자 피폭선량을 소속기관별로 구분할시, 한국수력원자력 0.12 mSv, 한전KPS 1.62 mSv, 기타 0.73 mSv으로 한전KPS에 소속된 종사자가 한국수력원자력 종사자에 비해 약 13.5배 더 높은 피폭을 받음을 확인하였다.

3.2. 원전 내 대표 고피폭 작업 선정을 위한 후보군 분석

Table 2에서는 2017년을 기준으로 국내 원전에서 수행되고

1) 중간정비: 발전소 일부 기기에 이상 발생시 정비계획을 수립하여 전력수급상 지장이 적은 시기에 발전소를 정지한 후 시행하는 정비활동

Table 2. Nuclear Work Code Classifications as of 2017

Cord	Work Code Name	Cord	Work Code Name
A00	REFUELLING	L00	ROUTINE INSPECTIONS
B00	Reactor Vessel or Internal	M00	GENERAL WORK
C00	Steam Generator - PRIMARY SIDE	N00	SCAFFOLDING
D00	S/G - SECONDARY SIDE	O00	INSULATION
E00	RHR & SI SYS	P00	CONTROL ROD DRIVE
F00	CVCS & Coolant Pump Seal Water System	Q00	DOSE BY SYSTEM NOT LISTED ABOVE
G00	PZR	R00	LARGE TASK
H00	REACTOR WATER CLEAN-UP SYSTEM	S00	SGR – REPLACE
I00	RCS PUMP	T00	REACTOR HEAD REPLACEMENT
J00	PRIMARY CIRCUIT	U00	DECOMMISSIONING
K00	VALVE WORK		

Table 3. Dose by light water reactor year and work code (man-mSv)

Work Cord	Cord Name	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Average
A	REFUELLING	200.2	279.4	270.9	233.2	192.5	128.7	125.3	163.6	114.0	189.8
B	Reactor Vessel or Internal	1361.6	1295.7	1575.8	1371.5	2162.6	1235.1	1233.3	1839.8	772.4	1427.5
C	S/G - PRIMARY SIDE	1247.4	1039.6	1259.0	854.4	2205.9	825.8	1101.9	1354.1	797.3	1187.3
D	S/G - SECONDARY SIDE	374.0	351.1	397.3	477.5	487.4	443.2	532.2	594.5	375.4	448.1
E	RHR & SI SYS	167.6	427.0	622.4	105.5	101.5	81.5	53.6	148.2	62.4	196.6
F, H, J	Reactor Coolant System	265.0	177.2	175.0	194.2	193.5	141.9	149.5	210.3	122.0	181.0
G	PZR	222.5	165.5	641.9	479.3	121.0	218.0	137.0	37.3	22.8	227.2
I	RCS PUMP	263.5	312.9	343.7	375.3	784.1	381.8	605.4	1053.1	919.7	559.9
K	VALVE WORK	464.2	435.4	374.2	296.1	417.9	342.7	453.6	470.4	338.2	399.2
L	ROUTINE INSPECTIONS	254.4	216.9	282.8	244.9	193.8	168.7	192.3	239.1	154.8	216.4
M	GENERAL WORK	2356.3	1975.2	2105.5	2255.1	2572.4	2047.5	2006.8	2729.3	1865.0	2223.1
N	SCAFFOLDING	6.4	40.0	3.1	20.0	56.5	19.7	24.0	81.0	27.9	30.9
O	INSULATION	0.7	2.2	10.2	5.2	6.7	9.9	0.3	5.8	0.2	4.6
P	CONTROL ROD DRIVE	11.0	13.1	19.7	101.4	23.4	87.3	215.3	92.2	1.2	62.7
Q	Dose by System Not Listed Above	300.4	401.3	314.5	225.6	308.3	140.3	172.9	254.0	254.9	263.6
R	LARGE TASK	0.0	29.6	13.5	2.1	8.4	66.6	56.1	13.9	7.3	21.9
S	SGR - REPLACE	0.0	0.0	692.2	679.1	212.3	453.3	0.0	0.0	10.6	227.5
T	REACTOR HEAD REPLACEMENT	0.0	0.0	0.0	0.0	112.3	33.6	76.5	1.7	31.9	28.4
Total	-	7495.1	7161.9	9101.7	7920.2	10160.5	6825.5	7136.0	9288.3	5877.8	7895.8

있는 방사선작업의 대분류 현황을 나타내었다. 원전 내에서 수행되는 모든 방사선작업은 작업의 수행위치, 관련 기기 등에 따라 작업코드와 작업명이 부여되고 해당 작업코드에 따라 피폭선량이 관리되고 있다. 작업코드는 X00와 같이 대문자와 숫자 2자리 총 3자리로 구성됨을 확인하였다. 작업코드는 경수로와 중수로의 대분류 체계는 거의 동일하나 T00의 경우 경수로는 원자로 헤드 교체, 중수로는 압력관 교체 공사이며, U00의 경우 경수로에만 존재하는 코드로 확인되었다. 2017년 기준 경수로는 236개, 중수로는 181개의 작업코드로 원전 내 방사선작업을 구분 및 관리하고 있음을 확인하였다.

Table 3과 4에서는 방사선작업 대분류를 기준으로 2009년부터 2017년까지의 작업코드별 집단선량을 경수로와 중수로로 구분하여 나타내었다. 경수로의 경우 General Work 연평균 2223.1 man-mSv로 가장 높은 집단선량을 나타내었으며, 중수로의 경우 Replacing the Pressure Tube (압력관 교체 공사)가 8912.5 man-mSv로 가장 높은 집단선량을 나타내었다.

Table 4. Dose by heavy water reactor year and work code (man-mSv)

Work Cord	Cord Name	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Average
A	REFUELLING	458.7	364.4	314.2	468.8	376.6	228.6	230.5	236.6	181.4	317.7
B	REACTOR VESSEL OR INTERNAL	133.7	57.7	29.0	386.3	153.7	96.3	96.7	23.7	139.2	309.5
C	S/G - PRIMARY SIDE	111.6	190.6	47.4	160.7	131.1	109.1	259.2	283.9	190.9	164.9
D	S/G - SECONDARY SIDE	47.3	151.6	20.5	208.5	164.8	28.1	61.9	52.7	87.7	111.3
E	RHR & SI SYS	0.0	0.0	0.0	0.0	20.5	0.0	17.8	16.4	0.0	18.2
H	Reactor Water Clean-up System	127.6	241.2	105.7	88.0	56.4	90.0	72.3	87.8	82.3	105.7
I	RCS PUMP	39.1	138.2	10.6	42.1	29.4	18.3	23.3	27.6	18.6	38.6
J	PRIMARY CIRCUIT	5.9	208.5	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	77.7
K	VALVE WORK	0.0	0.0	0.0	0.0	39.3	6.8	19.9	13.2	14.0	18.6
L	ROUTINE INSPECTIONS	71.4	40.3	10.0	103.3	73.5	53.8	117.3	61.2	136.7	81.1
M	GENERAL WORK	1081.5	800.6	567.9	706.4	535.3	487.5	575.0	546.7	490.6	653.6
N	SCAFFOLDING	34.1	43.1	2.9	0.0	35.4	77.3	1.4	48.1	13.6	32.0
P	CONTROL ROD DRIVE	0.0	23.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9
Q	Dose by System Not Listed Above	0.0	0.0	0.0	386.9	288.0	116.3	250.5	337.5	298.2	279.5
R	LARGE TASK	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.1	0.0	0.0	0.0	38.1
T	Replacing the Pressure Tube	6714.5	6462.5	962.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8912.5
Total	-	8825.4	8722.1	2072.1	2550.9	1903.9	1350.2	1725.6	1735.4	1653.2	3393.2

Fig. 2에서는 2009년부터 2017년까지 작업코드별 평균 집단선량을 경수로와 중수로로 구분하여 나타내었다. (S, T코드 제외) 경수로와 중수로 모두에서 General Work 코드가 가장 높은 집단선량을 나타내었다. 특별작업을 제외한 나머지 16개 코드그룹(F, H, J는 1개 그룹으로 간주)중 N코드(Scaffolding, 비계작업), O코드(Insulation, 차폐작업), P코드(Control Rod Drive), R코드(Large Task)은 평균 집단선량이 100 man-mSv 이하로 확인되었다.

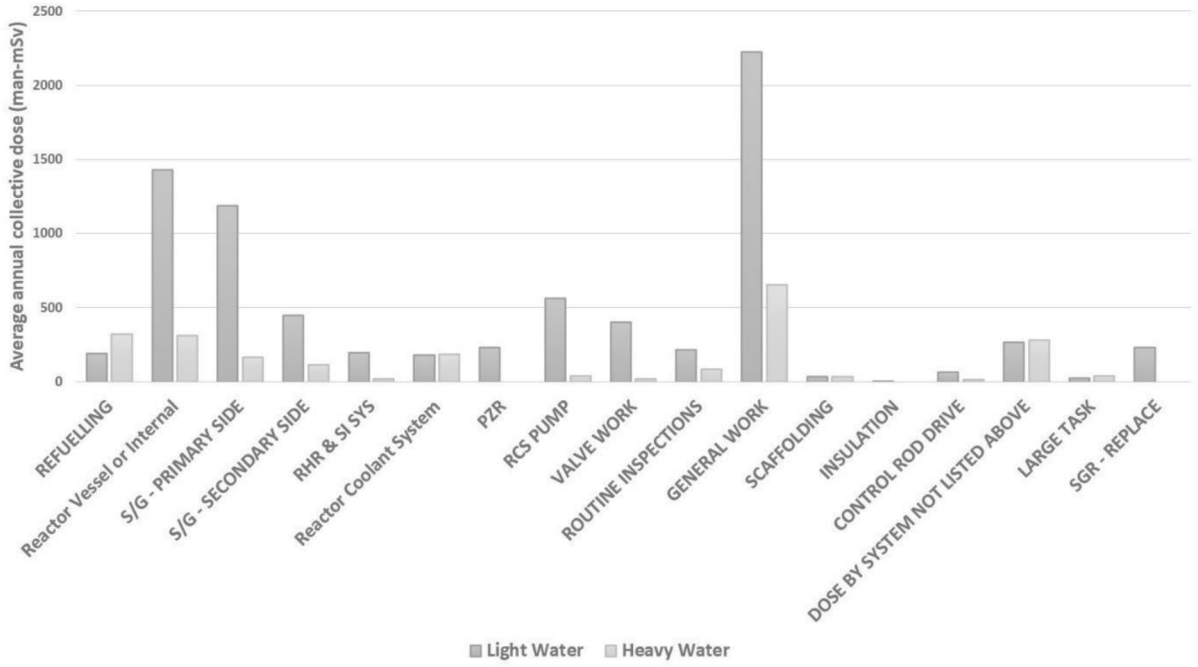

Fig. 2. Average annual collective dose by job code from 2009 to 2017.

Table 5. Personal dose by light water reactor work code from 2009 to 2017 (μSv person^{-1})

Work Cord		Cord Name	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
	A	REFUELLING	9.52	11.47	12.04	12.80	9.69	7.93	6.65	7.89	6.24
B	B01~B04,B6	Reactor disassembly and assembly	78.76	69.19	72.26	61.80	50.03	57.92	56.20	80.75	48.75
	B05, B32	Reactor Inspection	43.19	36.08	32.88	21.61	24.06	25.16	31.18	35.74	45.64
	B07~B21	Nuclear Instrumentation	78.22	76.88	75.61	73.21	98.03	96.33	52.71	99.99	41.31
	B31, B99	etc.	25.82	17.91	37.23	23.43	61.01	51.17	32.67	33.13	25.95
C	C01~C09	Man-way	74.35	68.20	74.70	60.51	58.66	83.11	56.98	84.55	82.06
	C11~C19	Nozzle Dam	212.91	205.51	181.50	145.94	75.79	154.15	118.79	135.49	85.75
	C21~C29	ECT	82.73	66.96	71.43	52.36	87.04	61.25	75.22	89.26	86.45
	C31~C39	Tube	58.80	52.47	55.03	37.53	36.21	61.97	46.33	53.16	30.78
	C99	etc.	121.12	91.63	256.14	24.90	2.97	20.68	58.77	24.52	20.90
D	D01, D02	Man-way/Hand-Hole	85.33	70.19	87.51	47.28	47.93	75.07	53.39	61.88	53.27
	D03	Lancing	67.48	59.02	66.74	46.79	68.15	66.10	44.91	54.16	55.33
	D04	FOSAR	154.44	148.42	138.26	87.94	92.37	172.83	50.02	70.86	49.71
	D05, D99	etc.	14.00	11.05	7.52	18.86	33.11	3.53	11.19	4.14	30.11
	E	RHR & SI SYS	45.87	79.79	71.91	27.52	20.58	49.18	18.14	22.74	13.82
	F, H, J	CVCS & Coolant Pump Seal Water System	32.67	30.26	28.12	20.27	22.35	28.49	20.62	20.90	21.43
	G	PZR	70.33	36.28	60.47	46.99	27.04	23.54	24.15	5.54	28.54
	I	RCS PUMP	25.87	29.33	23.05	31.59	35.29	23.80	25.32	22.12	21.62
	K	VALVE WORK	31.43	28.39	25.28	19.06	20.38	17.47	18.64	17.92	20.61
	L	ROUTINE INSPECTIONS	3.02	2.30	2.97	2.64	2.39	2.01	1.79	2.09	1.67
M	M01, M09	In-Service Inspection	63.72	56.75	38.69	42.47	41.85	43.07	45.95	50.92	20.42
	M03, M04	Other Inspections	0.00	0.00	1.11	0.00	0.00	15.57	0.00	10.87	5.99
	M11~M19	ILRT, LLRT	10.67	10.90	9.08	4.70	6.62	5.84	5.77	8.87	4.94
	M21	Grid operation	1.83	1.63	1.76	1.81	1.95	1.47	1.24	1.84	1.45
	M31, M32	Radiation Safety, Laundry	2.92	2.29	2.57	2.95	2.84	2.67	2.12	2.36	1.75
	M33, M34	Waste Management	5.29	4.11	4.01	3.67	3.70	3.83	4.11	3.12	2.72
	M35, M36	Vitrification equipment	0.00	0.00	1.03	0.56	0.82	8.82	0.30	2.53	0.17
	M99	etc.	7.15	6.41	5.16	4.96	5.10	5.76	4.26	5.08	3.53
	N	SCAFFOLDING	22.00	58.18	8.30	34.27	16.76	23.78	22.88	24.52	8.88
	O	INSULATION	13.21	24.13	78.76	56.13	81.58	240.49	50.00	106.85	1.04
	P	CONTROL ROD DRIVE	12.83	8.15	12.04	38.25	22.30	21.19	37.42	34.95	1.81
	Q	DOSE BY SYSTEM NOT LISTED ABOVE	10.30	10.14	10.46	7.51	6.96	6.16	5.26	6.24	6.34
	R	LARGE TASK	2.86	65.46	8.46	0.72	1.68	14.67	6.14	4.01	13.43
	S	SGR - REPLACE	0.00	0.00	15.63	0.00	5.03	12.79	0.00	0.00	14.57
	T	REACTOR HEAD REPLACEMENT	0.00	0.00	0.00	0.00	18.60	16.67	15.03	0.61	1.42

3.3. 대표 고피폭 작업 도출

Table 5에서는 2009년부터 2017년까지 경수로원전의 작업코드별 집단선량과 연 출입인원에 따른 개인 평균 피폭선량을 나타내었다. 방사선관리연보에서는 일부 저 피폭에 대해서는 대분류 또는 대분류 그룹으로만 피폭선량을 확인할 수 있으며, 이에 따라 방사선관리연보에서는 총 35개의 작업코드와 피폭데이터를 확인할 수 있다.

Fig. 3에서는 방사선 작업코드별 연평균 피폭선량을 정리하여 나타내었다. 개인당 평균 피폭선량이 100 μSv 이상인 작업은 Nozzle Dam 작업, 이물질제거작업(FOSAR) 2개이며, 50 μSv을 초과한 작업은 핵계측계통 작업, S/G ECT 작업, 보온재 작업, S/G 1차측 May-way 작업, S/G 기타 작업, S/G 2차측 Man-

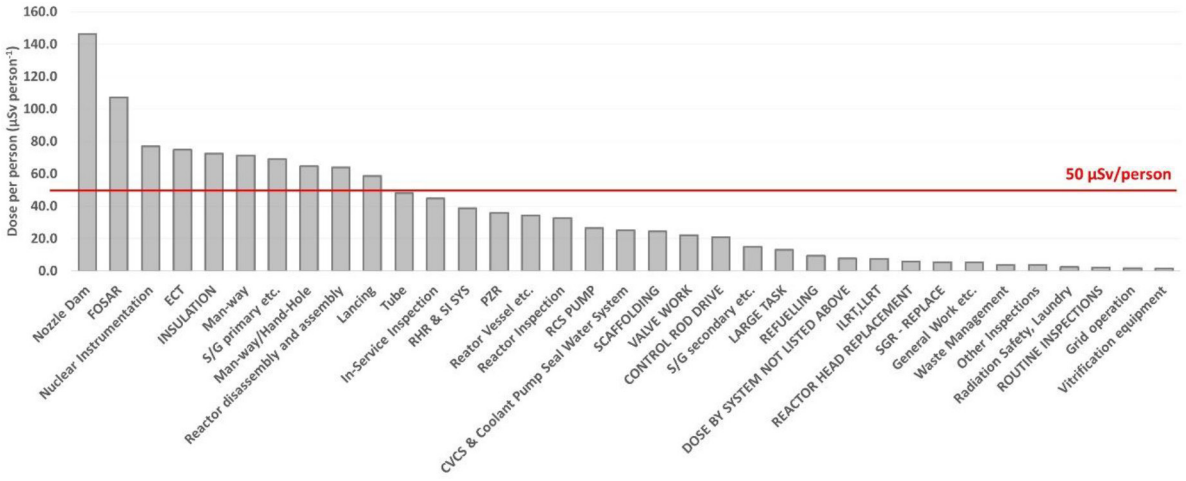

Fig. 3. Average annual personal dose by reactor job code (μSv person^{-1}).

Table 6. List of Highly Exposed Work in Nuclear Power Plants

Net	Work Code Name	Net	Work Code Name
1	S/G Nozzle Dam	6	S/G Primary side Man-Way
2	S/G FOSAR	7	S/G primary etc.
3	Reactor Nuclear Instrumentation	8	S/G Secondary side Man-Way/Hand-Hole
4	S/G ECT	9	Reactor disassembly and assembly
5	INSULATION	10	S/G Secondary side Lancing

Way 작업, 원자로 분해/조립, S/G 2차측 Lancing 8개 작업으로 나타났다. 그 외 10 μSv를 초과하는 작업은 S/G Tude 작업, 가동 중 검사 등 13개 작업으로 나타났다. 가동 중 검사를 제외한 M코드에 해당하는 작업은 대부분 10 μSv 이하의 저 피폭작업으로 나타났다. Table 6에서는 개인별 평균 피폭선량을 기준으로 대표 고피폭 작업을 도출하였다. 35개의 작업코드 중 50 μSv 이상인 작업 10개를 대표작업으로 선정하였다.

4. 고 찰

본 연구에서는 원전 내 피폭데이터를 기반으로 대표 고피폭 작업을 도출하였다. 국내 원전은 2009년부터 2017년까지 집단선량 및 개인 피폭선량은 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 국내원전은 기기. 장소에 따른 방사선 작업코드를 수립하여 대분류 21개중 특별작업을 제외한 19개 작업은 경수로와 중수로가 동일함을 확인할 수 있었다. 또한, 경수로 236개, 중수로 181개의 하위 작업코드를 확인하였다. 대표 고피폭 작업은 집단선량이 아닌 개인이 받는 피폭을 기준으로 도출되야 한다. 따라서 각 작업코드별 집단선량과 연 출입인원을 기반으로 개인 피폭선량을 도출하여 대표 고피폭 작업을 도출하였다.

4.1. 원전 방사선작업 일반 현황 분석

국내 원전의 집단선량 및 작업종사자의 피폭선량은 지속적으로 감소하고 있음을 Table 1을 통해 확인할 수 있다. 원전 호기 및 작업 종사자의 수는 지속적으로 증가하고 있지만, 차폐 능력이 강화된 신규 원전의 도입 및 피폭 저감을 위한 연구개발이 지속되기 때문으로 판단된다. 그러나 한국수력원자력 종사자를 제외한 다른 기관 종사가 더 높은 피폭이 발생함을 Fig. 1을 통해 확인할 수 있다. 더욱이 한전KPS 및 기타소속의 평균 피폭선량은 2017년 전국 방사선작업종사자 평균 피폭선량인 0.40 mSv에 비해 약 4배, 1.8배 더 높은 것으로 나타났다[20]. 이러한 피폭선량의 차이는 한국수력원자력에 출입하는 한전KPS 및 기타 기관 소속 종사자는 고피폭 작업 등 위험성이 높은 작업을 한국수력원자력으로 부터 위탁 받아 수행하기 때문에 상대적으로 더 높은 피폭을 받는 것으로 판단된다. 또한 상대적으로 기록준위 이하의 피폭을 받는 종사자 표본이 한수원에 더 많기 때문으로 판단된다.

4.2. 원전 내 대표 고피폭 작업 선정을 위한 후보군 분석

원전 내 방사선작업은 작업이 이루어지는 공간 또는 관련 주요 기기를 대상으로 분류 기준이 수립됨을 Table 2를 통해 알 수

있다. 특히, 방사선 피폭 가능성이 높거나 고피폭이 우려되는 기기 및 장소에 대해서는 더 세부적으로 작업코드를 분류하여 관리하고 있다. 피폭 위험이 적거나 피폭 수준이 낮은 작업코드의 경우 대분류 수준에서 관리되고 있다. 이는 위험성이 높음 고피폭 작업에 대한 관리에 보다 집중하기 위함으로 판단된다.

경수로에서의 작업코드별 집단선량을 Table 3에 나타내었다. 경수로의 경우 General Work (M코드)가 가장 높은 집단선량을 나타내었다. General Work 작업 그룹에는 가동 중 검사, 방사선 안전관리, 통신, 제염 및 세탁, 필터 작업, 도장 작업, 폐기물관리 등이 소속되어 있다. 이러한 작업이 계획예방정비 중 수행되는 작업에 비해 개인별 피폭량이 상대적으로 낮다. 그러나 General Work 그룹의 경우 다른 작업대비 많은 작업종사자 연평균 553,338명이 투입된다. 고피폭 작업 B코드인 원자로 분해/조립(B코드)이 연평균 27,105명이 투입되는 것을 감안했을 때 약 20배의 투입인원이 차이가 있음을 확인할 수 있다. Table 4에서는 중수로에서의 작업코드별 집단선량을 나타내었다. 중수로의 경우 경수로와 마찬가지로 general Work(M코드)가 가장 높은 집단선량을 나타내었다. 경수로와 마찬가지로 코드내 출입인원의 크기로 인한 것으로 판단된다.

경수로 S코드와 T코드는 각각 증기발생기 교체, 원자로헤드 교체이며, 중수로의 T코드는 압력관 교체 공사로 일상적이지 않은 특별 작업으로 확인되었다. 이러한 특별작업은 높은 집단선량을 보이나, 모든 원전에서 수행되는 일상적인 작업이 아니기에 이번 피폭분석에서는 제외하였다.

코드 중 N코드(Scaffolding, 비계작업), O코드(Insulation, 차폐작업), P코드(Control Rod Drive), R코드(Large Task)의 평균 집단선량은 상대적으로 다른 코드에 비해 낮게 나타났다. N코드는 원전 내에서 작업 또는 공사 등을 수행하기 위하여 설치하는 비계작업이다. 해당 작업이 다른 작업에 비해 선원과의 거리가 멀거나 접촉 가능성이 낮기 때문에 집단선량이 낮은 것으로 판단된다. O코드는 차폐작업 또는 보온재 작업이며 원전 내 배관을 감싼 보온재 등의 탈락 등을 보수하는 작업이다. 해당 작업은 주기적으로 수행하지만 다른 작업에 비해 작업시간과 투입인원이 낮아 집단선량이 낮은 것으로 판단된다. P코드는 제어봉관련 작업이며, R코드는 사용후핵연료 수조에서 수행되는 조밀랙 관련 작업이다. 조밀랙 작업의 경우 연평균 약 6000 man-hr의 시간동안 수행되지만 깊은 수조 내에서 작업을 수행하기에 일정 두께 이상의 냉각수에 의한 차폐로 집단선량이 낮은 것으로 판단된다. F코드와 H코드, J코드는 각각 CVCS, Reactor Water Clean-up, PRIMARY CIRCUIT (1차측 냉각재 회로)로 원자로 냉각재 계통이며 방사선관리연보에서는 그룹화하여 하나의 집단으로 관리하고 있다.

방사선관리연보에서는 높은 집단선량을 보이는 B코드, C코드, D코드, M코드를 작업별로 세분화하여 집단선량을 관리하고 있다. B, C, D코드는 각각 원자로, 증기발생기에서 수행되는 작업으로 작업수행시 방사선원과 근접하거나 접촉할 가능성이 매우 높은 지역이다. 이로 인해 고피폭이 발생하는 것으로 판단된다. M코드는 정상운전시 수행되는 작업코드로 M코드 내에서는 주로 방사선안전관리와 세탁, 폐기물관리, 계통운전에서 높은 집단선량을 보이나, 앞서 언급한 것처럼 다른 작업코드 대비 최소 10배 이상의 작업시간 및 연 출입인원으로 인해 집단선량이 높아진 것으로 판단된다.

4.3. 대표 고피폭 작업 도출

2009년부터 2017년까지 경수로 원전내에서 작업코드별 집단선량과 연 출입인원을 바탕으로 1인당 피폭선량을 산출하여 Table 5에서 나타내었다. 집단선량의 경우 개인당 받는 피폭량이 작을지라도 집단의 크기에 따라 집단선량의 크기가 달라진다. 집단선량이 높을시 해당 집단선량이 고피폭에 의한 것인지 집단규모에 따라 높은것인지 구분하기 어렵다. 이에 따라 고피폭 작업은 각 작업에 따라 개인이 받는 피폭을 기준으로 도출해야 한다. 따라서, Fig. 5에서는 각 작업코드당 집단선량과 연 출입인원을 바탕으로 연도별 평균 피폭선량을 도출했다.

A코드는 핵연료 교체 작업으로 연평균 집단선량은 189.8 man-mSv이며, 개인당 평균 피폭선량은 9.36 μSv으로 산출되었다. 핵연료 교체 작업은 냉각재를 원자로 높이 이상으로 충수하여 냉각수 안에서 수행된다. 이에 따라 충분한 물리적 차폐가 되므로 피폭이 상대적으로 낮게 발생하는 것으로 판단된다.

B코드는 원자로 분해/조립 작업으로 연평균 집단선량은 1427.5 man-mSv이며, 개인당 평균 피폭선량은 52.0 μSv으로 산출되었다. B코드는 크게 원자로 분해/조립, 원자로 검사, 핵계측계통, 기타의 4가지 그룹으로 피폭선량을 관리하고 있다. 원자로 분해/조립 작업은 원자로 헤드 개봉 및 조립시 원자로 내부에 핵연료가 장전된 상태로 작업을 수행하기 때문에 높은 피폭선량을 보이는 것으로 판단된다. 핵계측계통 작업은 원자로 헤드 관통관 검사, 제어봉 육안검사 등이 포함되어 있어 헤드 내부의 표면 오염에 의한 외부피폭이 유발되어 고피폭이 발생하는 것으로 판단된다.

C코드는 증기발생기 1차측 수실내에서 수행되는 작업으로 연평균 집단선량은 1187.3 man-mSv이며, 개인당 평균 피폭선량은 81.9 μmSv으로 산출되었다. 1차측의 경우 원자로내에서 핵연료와 접촉하고 방사선원이 포함된 1차측 냉각수가 흐르는 장소로 냉각수내의 방사선원의 흡착 등으로 표면오염이 심하며, 이로 인해 피폭선량이 높은 것으로 판단된다. C코드는 크게 Man-Way, Nozzle Dam, ECT (와전류탐상), Tube, 기타의 5가지 그룹으로 관리되고 있다. Man-Way 작업은 증기발생기 하단부에서 종사자 출입을 위한 출입구를 개봉, 폐쇄하는 작업이며 Nozzle Dam은 증기발생기 하단에서 원자로와 이어지는 냉각재 통로를 폐쇄하고 개봉하는 작업이다. 특히, Nozzle Dam 작업의 경우 평균 피폭선량이 146.2 μSv으로 모든 작업코드 중 가장 높

은 피폭선량을 보인다. 이는 Nozzle Dam 폐쇄 및 개봉 작업시 수실내 방사선원에 의한 외부피폭과 수실 내 수증기의 흡입으로 인한 내부피폭으로 고피폭이 유발되는 것으로 판단된다.[19] 또한 증기발생기 수실 상단에 위치한 Tube 다발에는 넓은 표면적으로 인해 다량의 방사선원(Co-59, C-60 등)이 흡착되어 고피폭이 발생하는 것으로 판단된다.

D코드는 증기발생기 2차측 수실내에서 수행되는 작업으로 연평균 집단선량은 448.1 man-mSv이며, 개인당 평균 피폭선량은 61.4 μmSv으로 산출되었다. D코드는 크게 Man-Way/Hand-Hole, Lancing (슬러지 제거), 이물질제거, 기타의 4가지 그룹으로 관리되고 있다. D코드 중 Lancing 작업과 이물질제거작업(FOSAR, Foreign Object Search and Retrieval)은 2차측 수실을 육안검사 하고 슬러지 등의 이물질을 제거하는 작업이다. Tube의 균열 등으로 1차측 냉각재가 2차측으로 혼합되거나 1차측에 존재하는 선원에 의해 방사화된 슬러지 등이 존재하여 고피폭이 발생하는 것으로 판단된다.

E코드는 원자로 잔열제거 및 안전주입계통에서 수행되는 작업으로 연평균 집단선량은 196.6 man-mSv이며, 개인당 평균 피폭선량은 38.8 μmSv으로 산출되었다. 잔열제거 및 안전주입계통은 1차측 냉각재가 존재하는 계통으로 원자로와 마찬가지로 냉각재내에 포함된 방사선원의 흡착 등으로 고피폭이 발생하는 것으로 판단된다.

I코드는 원자로냉각재펌프(RCP)와 관련된 작업으로 연평균 집단선량은 560 Man-mSv이며, 개인당 평균 피폭선량은 26.4 μSv으로 산출되었다. RCP 작업의 경우 RCP 분해, 점검, 조립시 1차측 냉각재에 의한 피폭이 발생하나, 그 외의 작업은 별도로 마련된 작업공간에서 수행하기 때문에 상대적으로 낮은 피폭이 발생하는 것으로 판단된다.

O코드는 1차측 냉각재 배관에 대한 보온재와 관련된 작업으로 연평균 집단선량은 4.57 Man-mSv이며, 개인당 평균 피폭선량은 72.5 μSv으로 산출되었다. 1차측 냉각재 배관 내부표면에는 1차측 냉각재에서 존재하는 방사선원이 흡착되어 표면에 존재한다. 또한 보온재는 배관 보호와 온도 보호뿐만 아니라 차폐체의 역할도 수행하기에 보온재를 제거할시 차폐능력도 제거되어 고피폭이 발생하는 것으로 판단된다.

연평균 50 μSv의 피폭이 발생하는 것으로 예측되는 10개 대표 작업을 Table 6에 정리하였다. 10개의 작업 중 7개의 작업이 증기발생기에서 수행되는 작업이며, 2개 작업은 원자로와 관련된 작업, 1개 작업은 1차측 냉각재 배관과 관련된 작업으로 도출되었다. 즉, 해당 작업의 공통점은 원자로 1차측 냉각재가 지속적으로 유동하는 지역이며 작업종사자 피폭의 주된 요인이 1차측 냉각재 내에 함유된 방사선원인 것으로 판단된다. 원전 가동시 발생한 방사선원이 냉각재에 함유되거나 방사선원이 기기 표면에 흡착되어 해당 지점에서 작업을 수행하는 종사자에게 고피폭을 유발하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 원전 내 작업종사자의 가상현실 기반 교육/훈련 프로그램을 개발하기 위하여 원전 내 피폭데이터를 기반으로 대표 고피폭 작업을 도출하였다. 이를 위하여, 첫 번째, 방사선관리연보 피폭데이터를 기반으로 원전 내 작업종사자의 피폭현황을 분석하였다. 두 번째, 원전 내에서 수행되는 방사선작업의 분류 코드를 조사하였으며, 작업코드별 집단선량을 분석하였다. 세 번째, 세부 작업코드별 집단선량과 연 출입인원을 기반으로 작업코드별 연평균 피폭선량을 산출하여, 대표 고피폭 작업을 도출하였다.

2009년에 대비하여 2017년의 원전 내 총 집단선량은 53.9% 감소한 7,528 man-mSv이며, 호기당 평균 집단선량은 63.1% 감소한 301 man-mSv로 나타났다. 원전 내 종사자 1인당 평균 피폭선량은 75.5% 감소한 0.34 mSv으로 나타났다. 원전 내 방사선작업은 경수로와 중수로 모두 21개 대분류로 방사선작업을 분류하고 있으며, 2017년 기준 경수로 236개, 중수로 181개의 작업코드가 조사됐다. 방사선 작업코드 중 General Work 코드는 다른 작업에 비해 상대적으로 낮은 저 피폭작업으로 구성되어 있으나, 다른 작업대비 10배 이상의 작업 투입인원의 영향으로 경수로와 중수로 모두에서 가장 높은 집단선량을 가진 코드로 나타났다. 작업코드별 집단선량과 연 출입인원을 바탕으로 연도별 피폭선량을 산출하여 나타냈다. S/G Nozzle Dam 직업이 146.2 μSv으로 가장 높은 피폭선량 나타냈으며, S/G FOSAR 등 50 μSv을 초과한 작업은 10개인 것으로 나타났다. 고피폭이 발생하는 작업은 1차측 냉각재의 영향을 받는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 원전 내 방사선피폭 데이터를 기반으로 대표 고피폭 작업 10개를 도출하였다. 본 연구에서 도출된 대표 고피폭 작업은 향후 원전 내 대표작업 도출 및 방사선작업 훈련 시나리오 개발의 기반자료로서 활용될 수 있을 것이다. 그리고 향후 국내 원전 내 작업종사자의 안전관리 및 피폭저감에 기여할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2022년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20224B10300090, ALARA 분석평가 프로그램 및 3D-BIM 기반 실감몰입형 피폭선량 예측진단 합시스템 기술개발).

7. 참고문헌

1. Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., 2009-2017. Annals of Radiation Control at Nuclear Power Plants.
2. Hong, D S, and Lee, G J. 2003. A Studyon the Radiation Exposure Trendat Kori Nuclear Power Plants for the Reduction of Occupation-

al Radiation Dose. *Abstracts of Proceedings of the Korean Nuclear Society* **2003**:140-145.
3. Seo, Jang-Su, Son, Jung-Gwon, and Won, Yu-Ho. 2008. Analyzing the radiation status of CANDU-type nuclear power plants. *Abstracts of Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society* **2008**:319-320.
4. Cho Young-ho, Moon Joo-hyun, Kang Chan-soon, Heo Young-hoe, Yoon Cheol-hwan and Kim Tae-wook. 2002. Analyses of High Occupational Dose Jobs for ALARA. *Abstracts of Proceedings of the Korean Nuclear Society* **2002**:184-195.
5. Soo-Wung Choi, Tac-Hwan Kim Cha-Kwon Chunh and Shul-Koo Cho. 1999. A Study on Patterns of Dose for Radiation Workers in Korea. *Korean Journal of Epidemlology* **21**(1):72-80.
6. Oh Hae-cheol, Na Jang-hwan, Lee Jae-sung and Moon Joo-hyun. 1999. Methodology to Reduce Occupational Dose in NPP Design. *Abstracts of Proceedings of the Korean Nuclear Society* **1999**:224-235.
7. Kim Hak-soo, Kim Mi-kyung, Kang Gi-doo and Shin Sang-woon. 2003. Determination of Items for Periodic Safety Review on PWR Radiation Protection. *Abstracts of Proceedings of the Korean Nuclear Society* **2003**:165-72.
8. Hee Geun Kim, Tae Young Kong, Woo Tae Jeong and Seok Tae Kim. 2010. An Effects of Radiation Dose Assessment for Radiation Workers and the Member of Public from Main Radionuclides at Nuclear Power Plants. *Journal of radiation protection and research* **35**(1):12-20.
9. Chang Ju Song, Sung Joon Kim, Woosuk Choi, Jinho Son, Hwa Pyeong Kim, Jiwoong Kim and Tae Young Kong. 2023. Collective dose analysis of nuclear workers in Korea, *Abstracts of Proceedings of the Korean Association for Radiation Protection* **2023**:57-58.
10. Nuclear Safety and Security Commission. 2002. 2021 Exposure Dose Analysis Report.
11. Jong-Soon Song. 1993. An Optimization Study on the Radiation Management in Nuclear Power Plants. *Journal of radiation protection and research* **18**(1):71-82.
12. Young-Khi Lim. 2015. Radiation Exposure on Radiation Workers of Nuclear Power Plants in Korea : 2009-2013. *Journal of radiation protection and research* **40**(3):162-167. https://doi.org/10.14407/jrp.2015.40.3.162
13. Young-Khi Lim. 2017. Radiation Exposure on Radiation Workers of Nuclear Power Plants in Korea : 2011-2015. *Journal of radiation protection and research* **42**(4):222-228. https://doi.org/10.14407/jrpr.2017.42.4.222
14. Korea Advanced Institute of Science and Technology. 2004. Trend Analysis of Occupational Radiation Exposure and Upgrading Suggestion for High ORE Equipment.
15. Nuclear Environment Technology Institute. 2005. Plant; Development of Occupational Radiation Exposure Reduction Technology at Nuclear Power Plant.
16. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. 2007. Developent of Occupational Radiation Exposure Reduction Technology at Nuclear Power Plant (II).
17. Kim Jung-In, Jungkwon Jung, Byungil Lee and Young-Khi Lim. 2011. Analyze exposure status and radiation energy characteristics by major radiation tasks in nuclear power plants. *Abstracts of Proceedings of the Korean Association for Radiation Protection* **2011**:174-175.
18. Park Sangeun. 2005. Correlation analysis of nuclear workers' exposure during O/H periods. Master's dissertation. Kyung Hee University
19. Dhonh He Lee. 2017. Managerial Factors Influencing Dose Reduction of the Nozzle Dam Installation and Removal Tasks Inside a Steam Generator Water Chamber. Journal of the Ergonomics Society of Korea **36**(5):559-568. https://doi.org/10.5143/JESK.2017.36.5.559
20. Nuclear Safety and Security Commission. 2021. 2020 Nuclear Safety Survey. KoFONS/GR-001/2021