JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(2) : 151-160 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.2.151

국내 수처리시설 종사자 작업유형에 따른 외부피폭방사선량 평가

전성훈[1], 이성연[1], 김혁재[1], 김민성[1], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Assessment of External Radiation Dose for Workers in Domestic Water Treatment Facility According to the Working Type

Seong Hun Jeon[1], Seong Yeon Lee[1], Hyeok Jae Kim[1], Min Seong Kim[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

Abstract The International Atomic Energy Agency (IAEA) proposes 11 industries that handle Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) that are considered to need management. A water treatment facility is one of the above industries that takes in groundwater and produces drinking water through a water treatment process. Groundwater can accumulate natural radionuclides such as uranium and thorium in raw water by contacting rocks or soil containing natural radionuclides. Therefore, there is a possibility that workers in water treatment facilities will be exposed due to the accumulation of natural radionuclides in the water treatment process. The goal of this study is to evaluate the external radiation dose according to the working type of workers in water treatment facilities. In order to achieve the above goal, the study was conducted by dividing it into 1) analysis of the exposure environment, 2) measurement of the external radiation dose rate 3) evaluation of the external radiation dose. In the stage of analyzing the exposure environment, major processes that are expected to occur significantly were derived. In the measurement stage of the external radiation dose rate, a map of the external radiation dose rate was prepared by measuring the spatial radiation dose rate in major processes. Through this, detailed measurement points were selected considering the movement of workers. In the external radiation dose evaluation stage, the external radiation dose was evaluated based on the previously derived external radiation dose rate and working time. As a result of measuring the external radiation dose rate at the detailed points of water treatment facilities A to C, it was 1.90×10^{-1} to 3.75×10^{0} μSv h^{-1}, and the external radiation dose was analyzed as 3.27×10^{-3} to 9.85×10^{-2} mSv y^{-1}. The maximum external radiation dose appeared during the disinfection and cleaning of activated carbon at facility B, and it is judged that natural radionuclides were concentrated in activated carbon. It was found that the external radiation dose of workers in the water treatment facility was less than 1 mSv y^{-1}, which is about 10% of the dose limit for the public. As a result of this study, it was found that the radiological effect of external radiation dose of domestic water treatment facility workers was insignificant. The results are expected to contribute as background data to present optimized safety management measures for domestic NORM industries in the future.

Key words: Water treatment facility, Workers, External radiation dose, Dose assessment, NORM

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 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 17 May 2023 **Revised** 11 June 2023 **Accepted** 12 June 2023

1. 서 론

국내 산업체에서 사용되는 산업원료는 NORM (Naturally Occurring Radioactive Material)이 많은 비중을 차지한다[1]. 국제원자력기구 (International Atomic Energy Agency; IAEA)에서는 NORM에 대한 안전관리 기준을 제시하고 있으며 관리가 필요한 11개 산업을 식별하였고 대표적으로 수처리시설이 존재한다[2-4]. 수처리시설은 지하수를 음용수로 사용하기 위해 대규모 수처리 공정을 수행한다[5]. 미국 환경보호청 (U.S. Environmental Protection Agency; EPA)에서는 수처리 공정 중 지하수에 함유된 천연방사성핵종이 마이크로필터 및 활성탄으로 이동하여 해당 물질을 취급하는 종사자가 방사선피폭이 발생할 수 있음을 언급하였다[6]. 수처리시설에서는 NORM이 농축되어 주요 관리 대상인 공정부산물이 발생되며 종사자는 이를 취급하면서 피폭이 발생할 수 있다[7]. 따라서 수처리시설의 경우 공정부산물에 의해 종사자가 방사선학적 영향이 발생할 수 있으므로 안전성 평가가 수행되어야 한다.

국외에서는 수처리시설에서 발생하는 공정부산물에 대한 방사선학적 특성 및 피폭방사선량 관련 연구가 다수 수행되었다. 영국 보건보호청 (Health Protection Agency; HPA)에서는 수처리시설 내 발생되는 공정부산물의 방사선학적 특성을 기반으로 종사자의 피폭방사선량 평가를 수행하였다[8]. 유럽연합 (European Union; EU)의 TENAWA 프로젝트에서는 음용수에서 천연방사성핵종을 제거하기 위한 논의를 진행하였고 종사자의 방사선학적 영향을 감소시키기 위한 안전관리 권고안을 제시하였다[9]. 미국 환경부에서는 음용수 내 천연방사성핵종으로 인한 일반인의 피폭방사선량 관리에 대한 연구를 수행하였다[10]. 유엔방사선영향과학위원회 (United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation; UNSCEAR)에서는 수처리시설을 비롯한 국외 NORM 산업 종사자에 대한 방사선량 평가를 수행하였다[11]. 이외에도 L. Taoufiq 등은 수처리시설에서의 방사선학적 영향에 대한 연구를 통해 수처리 전후 방사능의 변화를 평가하였다[12]. D. Madzunya 등은 남아프리카에서 수처리 공정 후 생산된 음용수 섭취에 따른 일반인의 방사선학적 평가를 수행하였다[13]. 한편, 국내에서는 정종태 등이 수처리시설에서 발생하는 천연방사성핵종이 축적된 공정부산물의 방사능 농도 분석에 대한 연구를 수행하였다[14]. 하지만, 국내에서는 수처리시설에서 발생하는 공정부산물의 방사선학적 특성에 대한 연구는 수행된 바 있지만, 국내 근무환경 및 작업유형 등에 따른 종사자의 피폭방사선량에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 국내 수처리시설 및 종사자에 대한 최적화된 방사선학적 안전관리 체계를 구축하기 위해서는 종사자에 대한 외부피폭방사선량 평가가 수행되어야 한다.

본 연구의 목적은 수처리시설 종사자의 작업유형에 따른 외부피폭방사선량을 평가하는 것이다. 상기 목적 달성을 위해 피폭환경분석의 일환으로 종사자 및 관리자의 인터뷰 그리고 현장조사를 통해 주요 공정을 도출하였다. 보상형 GM 계측기를 활용하여 공간방사선량률 지도를 작성하였고 주요 피폭지점을 도출하였다. 최종적으로 수처리시설 작업유형에 따른 종사자의 외부피폭방사선량을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 방사선 피폭환경 분석

종사자에 대한 방사선학적 안전성을 확인하기 위해서는 사업장의 유의미한 피폭이 발생할 수 있는 지점을 선정해야 한다. 이를 선정하기 위해 수처리시설의 공정과 종사자의 근무형태 분석이 수행되어야 한다. 본 연구에서 선정한 수처리시설들의 공정은 국내 타 수처리시설과의 공정, 설비 등이 유사하다는 점을 고려하여 대표적인 3가지 시설을 선정하였다. 이후, 종사자 및 관리자의 인터뷰, 현장조사 등을 통해 종사자의 근무형태를 분석하였다. 공정분석 단계에서는 수처리시설의 전반적인 공정과 유의미한 피폭이 발생할 것으로 예상되는 공정을 파악하였다. 근무형태 분석 단계에서는 공정별 근무인원, 교대근무 여부, 작업유형과 작업시간을 조사하였다. 작업시간 계산 시 실제 작업시간을 적용하기 위해 휴게시간은 제외하였다. 본 연구에서는 국내 수처리시설 3곳을 평가대상 산업체로 선정하였다.

2.2. 외부피폭방사선량률 측정

본 연구단계에서는 측정장비를 활용해 지역별 공간방사선량률을 측정하여 외부피폭방사선량률 지도를 작성

하였다. 이를 통해 외부피폭방사선량률이 높게 나타나는 지역에서 종사자의 동선을 고려한 주요 측정지점에서의 외부피폭방사선량률을 측정하였다. 측정 장비는 휴대가 용이하고 감마선으로 인한 피폭 수준을 즉시 확인할 수 있는 Thermo사의 RadEye B20-ER Multi-purpose Surveymeter로 선정하였다[15]. 이는 보상형 GM 계측기로서 측정 가능한 감마선 에너지의 범위는 17 keV~3 MeV이고 0~100 mSv h^{-1} 범위의 방사선량률을 측정할 수 있다[16].

수처리시설 내 공정의 면적과 구역별 공간방사선량률은 각 시설의 특성에 따라 상이할 수 있다. 시설의 부지는 10 m×10 m의 정사각형으로 구획한 이후, 각 사각형 내에서 휴대용 계측기를 이용해 공간방사선량률을 측정하였다. 공간방사선량률은 측정오차가 발생하므로 3회 반복측정 후 최댓값을 외부피폭방사선량률 지도 작성 시 활용하였다. 이를 통해 외부피폭방사선량률 지도를 작성하였고 구역별 공간방사선량률 수준을 시각화하였다. 외부피폭방사선량률 지도는 선량률에 따라 차등화된 색으로 구분하여 도시하였다. 해당 지점의 방사선량률이 배경방사선량률과 비교 시 유의미하게 확인된 경우, 종사자의 작업동선을 고려한 주요한 측정지점을 선정하였고 외부피폭방사선량률을 측정하였다. 측정 시 시설 인근 환경과의 방사선량률 비교를 위해 인근의 배경방사선량률을 측정하였다. 배경방사선량률 측정은 수처리 시설의 NORM으로 인한 영향을 최소화 하기위해 인근 시설 외부에서 공간방사선량률을 측정하였다.

2.3. 외부피폭방사선량 평가

본 연구단계에서는 수처리시설 종사자의 외부피폭방사선량 평가를 위해 각 시설별 주요 공정에서 작업하는 종사자를 평가 대상으로 선정하였다. 외부피폭방사선량 평가는 선정된 종사자가 수행하는 주요 작업유형에 따라 수행하였고 작업환경, 외부피폭방사선량률을 고려하여 평가하였다. 작업환경은 앞서 피폭환경 분석 단계에서 도출한 공정별 근무인원, 교대근무 여부, 작업시간을 활용하였다. 외부피폭방사선량률은 방사선량률 지도를 통해 도출한 주요 피폭지점에서의 외부피폭방사선량률을 고려하였다. 방사선량 평가 시, 배경방사선량률은 제외하였고 종사자의 작업유형별 연간 작업시간을 고려하였다. 본 연구단계에서는 1인 종사자를 기준으로 1년을 50주로 가정하여 연간 작업시간으로 환산하여 도출하였다. 산출한 작업시간과 앞서 도출한 외부피폭방사선량률 측정값을 활용하여 작업유형별 외부피폭방사선량을 평가하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 수처리시설 종사자의 외부피폭방사선량 평가를 수행하였다. 연구를 수행하기 위해 시설별 현장조사 및 인터뷰를 통해 주요 공정을 파악하였다. 계측장비를 활용하여 방사선량률 지도를 작성하였고 종사자의 동선을 고려한 주요한 피폭 지점을 도출하였다. 해당 지점에서 외부피폭방사선량률을 측정하였으며 본 연구의 최종목표인 수처리시설 종사자의 작업유형에 따른 외부피폭방사선량 평가를 수행하였다.

3.1. 수처리시설별 방사선 피폭환경 분석

Fig. 1에 수처리시설 A의 공정도 및 지하수 흐름도를 나타내었다. 수처리시설의 공정은 취수 공정, 원수저장 공정, 흡착 공정, 여과 공정, 살균 공정, 폐필터 처분 공정 등으로 이루어진다. 취수 공정은 지하수를 펌프를 이용하여 지하수를 취수정으로 끌어올리는 공정이다. 원수저장 공정은 취수정에서 끌어올린 지하수를 원수저장조로 유입하기 이전에 필터를 사용하여 1차 여과 공정이 수행된다. 흡착 공정에서는 자갈, 모래, 활성탄 순서로 층을 형성하여 불순물을 흡착시킨다. 여과 공정에서는 마이크로필터를 통해 불순물을 걸러내었고 살균 공정에서는 자외선을 이용하여 일반세균과 곰팡이균을 제거한다. 폐필터 처분 공정에서는 위탁업체가 폐필터와 폐활성탄 교체 후 수거하여 산업폐기물로 처분하거나 다른 용도로 재활용한다. 수처리시설 종사자의 근무지역은 시설별로 유사하게 나타났으며 대표적으로 원수저장지역, 수처리지역, 휴게지역으로 구분되었다. 원수저장지역은 취수정에서 이동한 지하수를 저장조에 저장하는 지역이며 수질 관리를 위해 채수하는 작업과 압력을 확인하는 작업이 수행된다. 수처리지역은 원수저장지역에서 이동한 지하수를 여과, 흡착하는 지역이며 오존농도, 자외선 준위를 확인하는 작업이 수행된다. 휴게지역은 종사자가 휴식을 취하거나 대기하는 지역으로 분석되었다.

Table 1에 수처리시설 종사자의 주요공정별 근무인원과

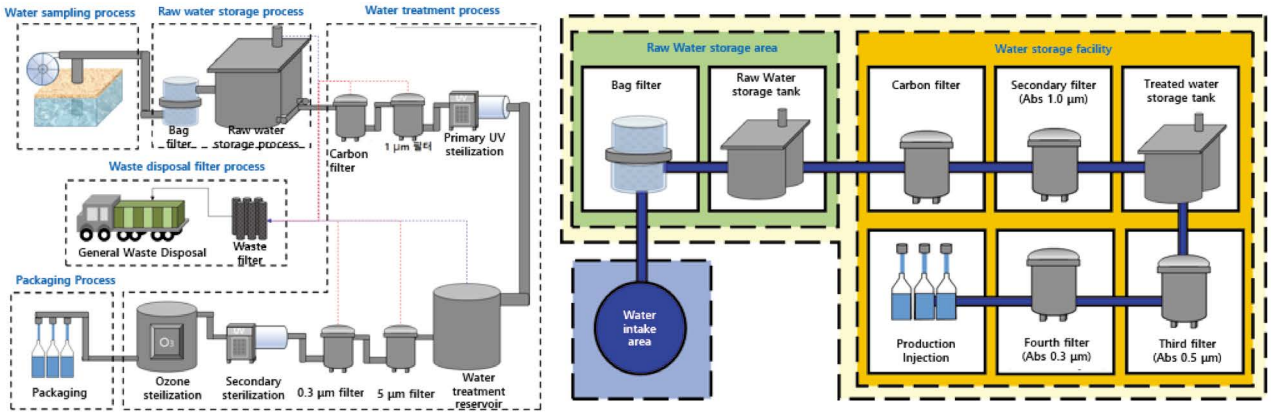

Fig. 1. Main work process of water treatment facility A.

Table 1. Working time for each major process of water treatment facility

Industry	Working area	Number of workers	Working type	Annual working time ($h\ y^{-1}$)
Facility A	Water intake area	3 worker (2nd shift)	Water sampling	16.67
	Raw water storage area		Water collection and pressure verification	16.67
			Exhaust filter replacement	0.33
			Susfilter cleaning	1.33
	Water treatment area		1st filter replacement	8
			4th filter replacement	8
Facility B	Raw water storage area	1 worker (No shift)	Checking differential pressure and cleaning	41.67
			1st filter replacement	6
	Water treatment area	2 worker (No shift)	Activated carbon disinfection and cleaning	125
			Filter cleaning	6
			Activated carbon replacement	3
Facility C	Water intake area	1 worker (No shift)	Sterilization control and flow check	16.67
	Water treatment area	1 worker (No shift)	Pre-processing microfilter replacement	1.5
			Primary Microfilter Replacement	1.5
			Activated carbon replacement	1.5
	Production building area	10 worker (No shift)	4th filter replacement	1
			Exhaust filter replacement	1

작업유형 및 1인당 작업시간을 나타냈다. 수처리시설 A에서는 6가지, 수처리시설 B에서는 5가지, 수처리시설 C에서는 6가지의 작업유형이 존재하는 것으로 파악되었다. 수처리시설 A의 작업지역인 원수저장지역과 수처리지역 그리고 제어실에서는 3인이 한 조가 되어 교대 근무를 하는 것으로 파악되었다. 수처리시설 B에서는 원수저장시설에서는 1인, 수처리지역에서는 2인, 휴게지역에서는 3인이 근무하는 것으로 나타났다. 수처리시설 C에서는 수처리 지역에서 1인, 생산동에서는 10인, 휴게실 및 식당에서는 2인이 근무하는 것으로 분석되었다.

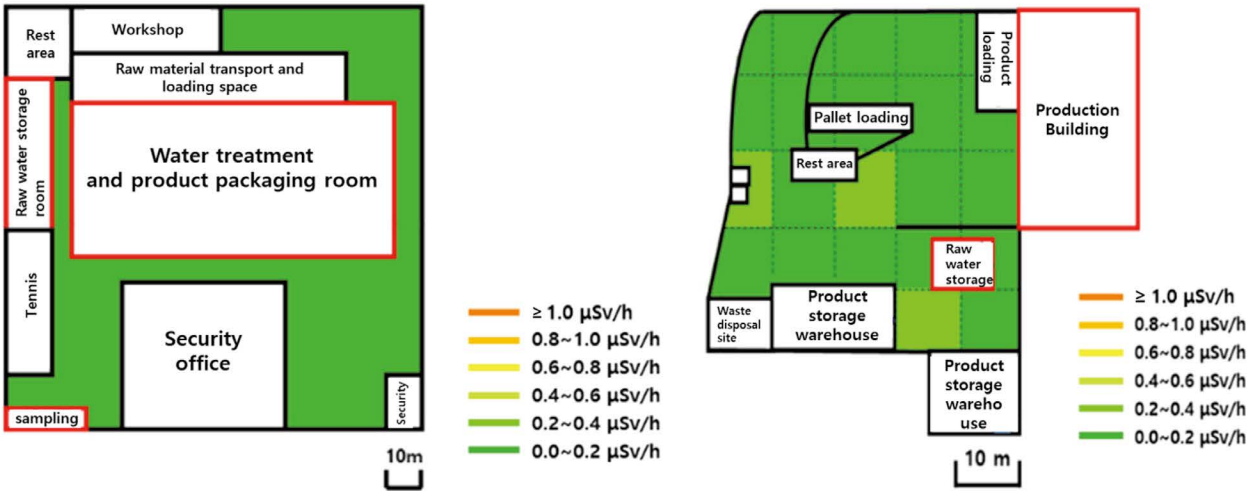

Fig. 2. External radiation dose rate map of the whole facility A and B site.

Table 2. External radiation dose rate of workers according to the working type in water treatment facility

Facility	Working area	Working type	External radiation dose rate ($\mu Sv\ h^{-1}$)	Background dose rate ($\mu Sv\ h^{-1}$)
Facility A	Water intake area	Water sampling	0.19	0.12
	Raw water storage area	Water collection and pressure verification	0.28	0.12
		Exhaust filter replacement	3.75	0.12
		Susfilter cleaning	0.55	0.12
	Water treatment area	1st filter replacement	1.1	0.12
		4th filter replacement	0.7	0.12
Facility B	Raw water storage area	Checking differential pressure and cleaning	0.27	0.13
		1st filter replacement	0.27	0.13
	Water treatment area	Activated carbon disinfection and cleaning	0.89	0.13
		Filter cleaning	0.19	0.13
		Activated carbon replacement	0.89	0.13
Facility C	Water intake area	Sterilization control and flow check	0.23	0.17
	Water treatment area	Pre-processing microfilter replacement	0.32	0.17
		Primary Microfilter Replacement	0.33	0.17
		Activated carbon replacement	1.87	0.17
	Production area	4th filter replacement	0.21	0.17
		Exhaust filter replacement	0.34	0.17

3.2. 작업공정별 외부피폭방사선량률 측정

Fig. 2에 수처리시설 A, B의 외부피폭방사선량률 지도를 도시하였다. Table 2에는 외부피폭방사선량률 지도를 통해 선정된 주요 피폭 지점에서 근무하는 종사자의 외부피폭방사선량률을 나타내었다. 수처리시설 A에서의 배경방사선량률은 $1.20\times10^{-1}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 나타났다. 종사자의

Table 3. External radiation dose of workers according to the working type by investment water treatment facility

Industry	Worker	Working type	Net external radiation dose rate ($\mu Sv\ h^{-1}$)	Annual working time ($h\ y^{-1}$)	Annual external radiation dose ($mSv\ y^{-1}$)
Facility A	Worker A	Water sampling	0.07	16.67	1.80×10^{-2}
		Water collection and pressure verification	0.16	16.67	
		Exhaust filter replacement	3.63	0.33	
		Susfilter cleaning	0.43	1.33	
		1st filter replacement	0.98	8	
		4th filter replacement	0.58	8	
Facility B	Worker A	Checking differential pressure and cleaning	0.14	41.67	5.83×10^{-3}
	Worker B	1st filter replacement	0.14	6	9.85×10^{-2}
		Activated carbon disinfection and cleaning	0.76	125	
		Filter cleaning	0.06	6	
		Activated carbon replacement	0.76	3	
Facility C	Worker A	Sterilization control and flow check	0.06	16.67	1.00×10^{-3}
	Worker B	Pre-processing microfilter replacement	0.15	1.5	3.27×10^{-3}
		Primary Microfilter Replacement	0.16	1.5	
		Activated carbon replacement	1.70	1.5	
		4th filter replacement	0.04	1	
		Exhaust filter replacement	0.17	1	

외부피폭방사선량률은 취수정에서 $1.90\times10^{-1}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 파악되었고 원수저장지역에서의 외부피폭방사선량률은 2.80×10^{-1}~$3.75\times10^{0}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 나타났다. 해당 측정은 취급량이 가장 많은 5~8월에 측정된 결과이며 취급량이 적은 시기에 수행할 경우 외부피폭방사선량률이 떨어질 것으로 판단된다[17]. 수처리실에서는 외부피폭방사선량률이 7.00×10^{-1}~$1.10\times10^{0}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 나타났다.

수처리시설 B에서의 배경방사선량률은 $1.30\times10^{-1}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 나타났다. 주요 공정지역인 원수저장실에서의 외부피폭방사선량률은 $2.70\times10^{-1}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 파악되었고 수처리 지역에서의 외부피폭방사선량률은 1.90×10^{-1}~$8.90\times10^{-1}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 나타났다. 상대적으로 높은 방사선량률이 나타나는 지역은 활성탱크 지역으로 파악되었으며 활성탱크 내부에 천연방사성핵종이 축적 및 흡착되었기 때문으로 판단된다.

수처리시설 C에서의 배경방사선량률은 $1.70\times10^{-1}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 나타났다. 주요 공정지역인 취수정에서는 $2.30\times10^{-1}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 파악되었고 수처리실에서는 3.20×10^{-1}~$1.87\times10^{0}\ \mu Sv\ h^{-1}$로 나타났다. 해당 지역은 수처리시설 B와 유사하게 활성탱크의 천연방사성핵종의 축적으로 인해 타 공정지역보다 높은 방사선량률이 나타난 것으로 판단된다. 생산동에서는 2.10×10^{-1}~$3.40\times10^{-1}\ \mu Sv\ h^{-1}$ 범위로 나타났다.

3.3. 종사자 외부피폭 선량평가

Table 3에는 수처리시설에서의 작업유형별 외부피폭방사선량을 나타냈다. 수처리시설 A에서 근무하는 종사자 A의 외부피폭방사선량은 $1.80\times10^{-2}\ mSv\ y^{-1}$로 나타났다. 종사자 A는 1차 필터 교체작업 수행 시 최대 외부피폭방사선량이 나타났으며 약 44%를 차지했다. 해당 작업은 폐필터를 교체하는 작업이며 백그라운드를 제외한 외부피폭방사선량률은 $9.85\times10^{-2}\ \mu Sv\ h^{-1}$이고 연간 작업시간은 8시간으로 조사되었다. 이는 A 시설의 평균 외부피폭방사선량률인 $1.09\times10^{-1}\ \mu Sv\ h^{-1}$와 평균 작업시간인 8.5시간과 유사하게 나타났다. 하지만 최대 외부피폭방사선량률이 나타난 배기필터 교체작업에 비해 외부피폭방사선량률은 약 0.3배이지만 연간 작업시간은 약 26배 높게 분석되었다.

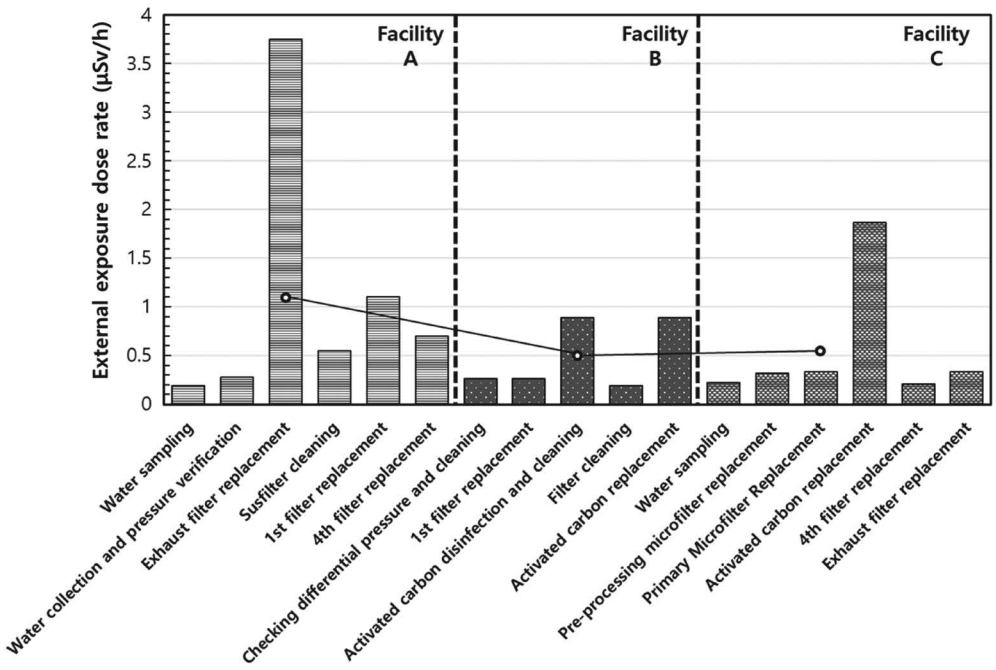

Fig. 3. Average external radiation dose rate per working type by each water treatment facility.

수처리시설에 비해 약 1.7배 높고 평균 작업시간인 36.3시간보다 약 3.5배 높은 것으로 분석되었다. B에서 근무하는 종사자 A, B의 수행 작업유형별 총 외부피폭방사선량은 각각 5.83×10^{-3} mSv y^{-1}, 9.85×10^{-2} mSv y^{-1}로 나타났다. 종사자 A는 1차필터 하우징의 유입구와 배출구의 차압을 확인하여 차압이 클 때 유량을 조절하는 작업만 수행하였다. 해당 작업에서 백그라운드를 제외한 외부피폭방사선량률은 1.40×10^{-1} μSv h^{-1}이고 연간 작업시간은 41.67시간으로 파악되었다. 종사자 B는 활성탄 소독 및 세척 작업 시 최대 외부피폭방사선량이 나타났으며 약 96%를 차지했다. 해당 작업은 활성탄탱크 내 소독약과 물을 주입하여 이물질을 세척하는 작업으로 외부피폭방사선량률은 8.90×10^{-1} μSv h^{-1}이고 연간 작업시간은 125시간으로 파악되었다.

수처리시설 C에서 근무하는 종사자 A의 작업유형별 총 외부피폭방사선량은 3.27×10^{-3} mSv y^{-1}로 나타났다. 종사자 A는 활성탄 교체 작업 수행 시 최대 외부피폭방사선량이 나타났으며 약 79%를 차지했다. 해당 작업은 활성탄탱크에서 폐활성탄을 교체하는 작업이며 백그라운드를 제외한 외부피폭방사선량률은 1.70×10^{0} μSv h^{-1}이고 연간 작업시간은 1.5시간으로 나타났다. 이는 C 시설의 평균 작업시간인 3.9시간의 약 0.4배이지만 평균 외부피폭방사선량률인 5.48×10^{-1} μSv h^{-1}에 비해 약 3.5배 높은 것으로 분석되었다.

4. 고 찰

4.1. 수처리시설 작업유형별 종사자의 외부피폭방사선량률 분석

Fig. 3에 수처리시설 A~C의 작업유형별 종사자의 외부피폭방사선량률을 나타내었다. 수처리시설 종사자의 외부피폭방사선량률은 1.90×10^{-1}~3.75×10^{0} μSv h^{-1}로 분석되었고 작업에 대한 평균 외부피폭방사선량률은 7.26×10^{-1} μSv h^{-1}로 파악되었다. 시설별 평균 외부피폭방사선량률은 A 시설, C 시설, B 시설 순으로 높게 나타났다. 최대 외부피폭방사선량률은 A 시설에서 배기필터 교체 작업 중에 나타났으며 3.75×10^{0} μSv h^{-1}로 분석되었다. 이는 해당 작업에서 취급되는 배기필터에 라돈과 자핵종이 농축되어 종사자에게 방사선학적으로 영향을 미친 것으로 분석된다. ^{222}Rn은 반감기가 4일 미만인 점을 고려하면 라돈이 직접 필터에 농축된 것이 아니라 원수 저장조에서 라돈의 방사성 붕괴가 발생하고 그 붕괴산물인 자핵종들이 마이크로 필터와 활성탄 필터에 농축된 것으로 판단된

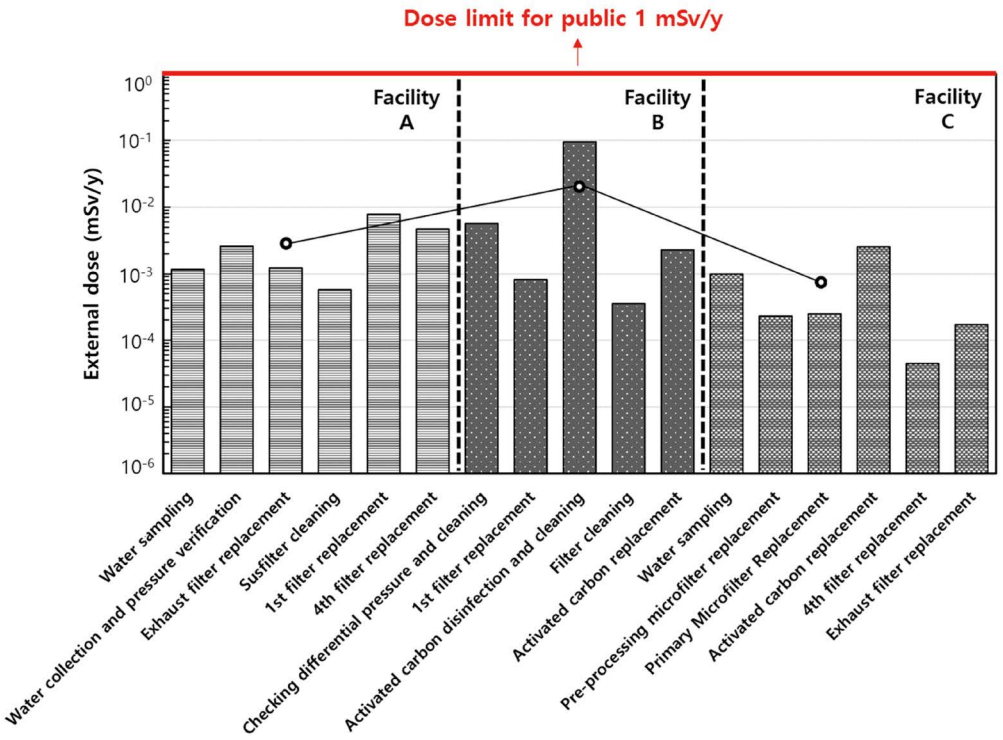

Fig. 4. Average external radiation dose per working type by each water treatment facility.

다[17]. 두 번째로 높은 방사선량률은 C 시설에서 활성탄 교체 작업에서 1.87×10^{0} μSv h^{-1}로 나타났다. 이는 지하수 내 함유되어 있는 불순물과 이취물질에 함유된 천연방사성핵종이 활성탄에 흡착된 효과로 판단된다[18]. 상기 효과로 인해 B 시설에서 활성탄 소독 및 세척 작업, 활성탄 교체 작업에서도 다소 높은 외부피폭방사선량률이 나타났다. 반면 최소 외부피폭방사선량률은 1.90×10^{-1} μSv h^{-1}로 A 시설에서 채수 작업 중에 나타났으며 배경방사선량률 수준으로 파악된다. 해당 작업에서는 여과 및 흡착공정이 수행되지 않았기 때문에 천연방사성핵종이 축적될 개연성이 낮은 것으로 분석된다. 따라서 수처리시설에서 외부피폭방사선량률의 주된 원인은 여과 및 필터과정에서 천연방사성핵종의 흡착 및 농축으로 판단된다.

4.2. 수처리시설 작업유형별 종사자의 외부피폭방사선량 분석

Fig. 4에 수처리시설 A~C의 작업유형별 주요공정에서 종사자의 외부피폭방사선량을 나타내었다. 수처리시설의 외부피폭방사선량은 3.27×10^{-3}~9.85×10^{-2} mSv y^{-1}로 분석되었고 작업유형별 평균 외부피폭방사선량은 7.43×10^{-3} mSv y^{-1}로 나타났다. 시설별 외부피폭방사선량은 B 시설, A 시설, C 시설 순으로 나타났다. 공정별 평균 외부피폭방사선량은 취수정에서 7.22×10^{-4} mSv y^{-1}, 원수저장지역에서 2.16×10^{-3} mSv y^{-1}, 수처리지역에서 1.41×10^{-2} mSv y^{-1}, 생산동에서 1.07×10^{-4} mSv y^{-1}로 나타났다. 수처리지역에서는 공정부산물을 근거리에서 취급하는 활성탄 세척 및 교체작업, 1차필터 교체작업유형들이 존재하여 평균 외부피폭방사선량에 비해 약 2배 높게 분석되었다. 원수저장지역에서는 차압확인 과정에서 라돈 및 자핵종의 방출로 인해 종사자가 피폭되었고 평균 외부피폭방사선량의 약 0.3배 수준이었다. 취수정에서는 채수 작업이 이루어졌으며 평균 외부피폭방사선량의 약 0.1배 수준으로 나타났고 외부피폭방사선량률이 낮았기 때문으로 판단된다. 생산동에서는 배기필터 및 4차 필터 교체 작업이 수행되었고 평균 외부피폭방사선량에 비해서는 0.15배 수준으로 나타났다. 이는 외부피폭방사선량률이 평균 외부피폭방사선량률의 0.3배 정도이고 연간 작업시간이 평균 작업시간의 0.1배 정도이기 때문으로 분석되었다.

본 연구에서 B시설에서 근무하는 종사자 B가 9.85×

10^{-2} mSv y^{-1}로 가장 높게 나타났다. 이는 원자력안전법에서 규정하고 있는 국내 일반인 선량한도인 1 mSv y^{-1}미만이며 일반인 선량한도의 약 10%에 해당하는 것으로 파악되었다[19]. 또한 생활주변방사선법에서 명시하고 있는 NORM 산업체의 종사자 연간 50 mSv를 넘지 않으면서 5년 간 100 mSv를 초과하지 않는 기준을 만족하는 것으로 분석되었다[20]. 따라서 조사된 수처리시설에서 근무하는 종사자에 대한 방사선학적 영향은 다소 미미할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서의 수처리시설 종사자의 외부피폭방사선량을 평가하였다. 현장조사 및 종사자 인터뷰를 기반으로 근무인원, 작업빈도 및 작업시간과 같은 종사자의 근무환경을 분석하였다. 이를 통해 유의미한 피폭이 발생될 것으로 예상되는 주요 공정을 파악하였고 외부피폭방사선량률 지도를 통해 주요 피폭 지점을 도출하였다. 최종적으로 보상형 GM 계측기로 측정한 방사선량률과 연간 작업시간을 활용하여 작업유형별 종사자의 외부피폭방사선량 평가를 수행하였다. 수처리시설 A~C의 외부피폭방사선량률은 1.90×10^{-1}~3.75×10^{0} μSv h^{-1}, 배경방사선량률은 1.20×10^{-1}~1.70×10^{-1} μSv h^{-1}로 나타났다. 수처리시설 A에서는 배기필터 교체작업과 1차필터 교체작업 수행 시에 상대적으로 높은 외부피폭방사선량률이 나타났다. 해당 작업에서 천연방사성핵종을 함유한 불순물이 필터에 여과 및 흡착되어 높은 방사선량률이 나타났다. 수처리시설 B와 C에서도 상기 이유로 활성탄 소독 및 세척작업, 활성탄 교체 작업에서 타 작업에 비해 다소 높은 외부피폭방사선량률이 나타났다. 따라서 외부피폭방사선량률의 주요 요인은 수처리시설 필터 및 활성탄에서의 천연방사성핵종의 흡착에 따른 농축이라 판단하였다. 수처리시설의 종사자별 외부피폭방사선량은 3.27×10^{-3}~9.85×10^{-2} mSv y^{-1}로 나타났으며 작업의 종류, 연간 작업시간 등에 따라 상이한 값이 조사되었다. 최대 외부피폭방사선량은 B시설에서 활성탄 소독 및 세척 작업 수행 시 나타났다. 해당 작업은 활성탄으로부터 매우 근접한 거리에서 수행되고 연간 작업시간이 가장 많은 것으로 파악되었다. 반면 최소 외부피폭방사선량은 C시설에서 4차 필터 교체작업 수행 시 나타났다. 해당 작업 시 외부피폭방사선량률은 1.87×10^{0} μSv h^{-1}으로 타 작업에 비해 높은 것으로 판단된다. 본 연구의 결과, 국내 수처리시설에서 종사자의 외부피폭에 대한 방사선학적 영향은 미미한 것으로 나타났으며 본 결과는 국내 NORM 취급 산업분야 내 종사자의 피폭방사선량 평가에 활용될 수 있다. 또한 천연방사성핵종 함유물질 취급 종사자의 방사선학적 안전관리방안 마련 시 배경자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

참고문헌

1. FPTRPC. 2014. Canadian Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM).
2. IAEA. 2006. Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials, SRS 49.
3. ARPNSA. 2008. Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). Radiation Protection Series No. 15.
4. IAEA. 2005. Naturally occurring radioactive materials (NORM IV). IAEA TECDOC 1472.
5. ICRP. 2019. Radiological Protection from Naturally Occuring Radioactive Material (NORM) in Industrial Processes.
6. EPA. 1996. Management of Water Treatment Plant Residuals. Washington, DC: US Environmental Protection Agency; Report EPA/625/R-95/008.
7. NSSC. 2021. Enforcement Decree of the Nuclear Safety Act Article 5 Paragraph 2.
8. HPA. 2008. Handbook for Assessing the Impact of a Radiological Incident on Levels of Raioactivity in Drinking Water and Risks to Operatives at Water Treatment Works: Supporting Scientific Report. Health Protection Agency; Report HPA-RPD-041.
9. STUK. 2000. Treatment Techniques for Removing Natural Radionuclides from Drinking Water: Final Report of the TENAWA project; STUK A169.
10. EPA. 2005. A Regulators' Guide to the Management of Radioactive Residuals from Drinking Water Treatment Technologies. Washington, DC: US Environmental Protection Agency; Report EPA/816/R-05/004.
11. UNSCEAR. 2022. Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Volume IV.
12. Taoufiq L, Laamyem A, Boukhair A, Essediqi E, Monkade M, Zabada A. 2018. Radiological assessment of wastewater treat-

ment processes based on the use of coal ashes as a filter. *JKSR* **11**:217-224.
13. Madzunya D, Dudu VP, Mathuthu M, Manjoro M. 2020. Radiological health risk assessment of drinking water and soil dust from Gauteng and North West Provinces, in South Africa. Heliyon **6**(2):e03392.
14. Jeong JT, Baik M-H, Park C-K, Park T-J, Ko N-Y and Yoon KH. 2014. A Basic Study on the Radiological Characteristics and Disposal Methods of NORM Waste. *JNST* **12**(3):217-233.
15. Homeland Security. 2016. Handheld Radiation Survey Meters Market Survey Report.
16. GOVINDA RAJAN. Radiation Monitoring Instruments.
17. KINS. 2017. Study on the By-products of Natural Radionuclides Concentration Process in Water Treatment Facilities Using Groundwater. KINS/HR-1523.
18. Tkagi S. 2011. Fate of Perfluorootanesulfonate and perfluoroctanoate in drinking water treatment processes: 3930.
19. NSSC. 2021. Enforcement Decree of the Nuclear Safety Act Article 144.
20. ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.