JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(2) : 135-141 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.2.135

방사성 부품 작업환경의 삼중수소 농도 분석 및 작업종사자 내부피폭선량 평가

최경준[1], 강창우[1,*]

[1]국군화생방방호사령부 국군화생방방어연구소

Analysis of Tritium Concentration in Working Environment and Internal Exposure Dose Assessment for Radiation Workers

Gyoungjun Choi[1] and Changwoo Kang[1,*]

[1]CBRN Defense Research Institute, 69-37 Shinheungmal-gil, Seocho-gu, Seoul 06796, Republic of Korea

Abstract Tritium is used in various types of parts such as luminous bodies. These parts are maintained for inspection and replacement at a facility licensed to use radioactive isotopes. This study analyzed the concentration of tritium in working facilities to supplement and develop the safety management system for the maintenance environment of parts containing tritium. In addition, the internal exposure dose was evaluated to analyze the effects of leaked tritium when continuously exposed to workers. As a result of evaluating the internal exposure dose for workers for 30 days, the maximum was 9.70 μSv and the average was 1.45 μSv. Based on the results of this study, the internal radiation exposure safety of workers handling parts containing tritium was confirmed, and additional protective measures to prevent unnecessary exposure to tritium were suggested. This study is expected to contribute to supplementing and developing the radiation safety management system.

Key words: Tritium, Liquid scintillation counter, Internal exposure dose, Radiation safety

1. 서 론

수소는 중수소와 삼중수소의 동위원소를 가지고 있으며, 삼중수소는 방사성핵종으로 12.35년의 물리적 반감기를 가지고 있다. 삼중수소는 최대에너지가 18.6 keV, 평균에너지가 5.7 keV인 베타선을 방출하기에 인체 조직 8 μm 이상을 투과하지 못하는 것으로 알려져 있다. 따라서 외부피폭에 대한 영향은 미미하지만 호흡이나 섭취를 통해 인체 내부로 유입 시 내부피폭을 유발할 수 있다[1]. 호흡기로 흡입된 기체성 삼중수소(HT)는 인체 내에서 용해되는 비율이 극히 낮고, 한 번 흡입된 기체의 0.004% 이하만 흡수되고 대부분 체외로 배출된다[2,3]. 하지만 공기 중 수분과 결합한 삼중수소수(HTO)는 호흡과 피부를 통해 인체 내로 흡수되고 흡수량의 98~99%가 인체 내부에서 혈액과 수분 형태로 전신에 퍼진 후 내부피폭을 유발할 수 있다[4,5]. 인체 내부에서 물의 형태로 존재하는 삼중수소는 신진대사 작용을 통해 특정 장기에 축적되지 않고 소변과 땀으로 배출되며 이때의 생물학적 반감기는 약 10일이다[6].

삼중수소는 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으며, 특히 삼중수소가 포함된 야광체 등 다양한 형태의 부품으로 사용 중이다. 발광제품에는 삼중수소가 0.025 GBq부터 많

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author. Changwoo Kang
Tel. +82-2-2008-6560 E-mail. cwkang06@mnd.go.kr
Received 28 February 2023 Revised 16 June 2023 Accepted 16 June 2023

게는 370 GBq까지 포함되어 있으며 발광제품을 정비하는 곳에서는 매월 수십 TBq의 제품을 정비하는 경우도 있다.[1] 현재 원자력안전법상 37 GBq 이상의 삼중수소를 사용하는 곳은 허가를 받도록 법제화되어 있다. 삼중수소에 대한 내부피폭영향 평가는 주로 원자력발전소 등에서 실시되고 있으나, 본 연구에서는 삼중수소가 포함된 부품을 정비하는 작업환경에 대해 공기 중 오염도, 정비부품의 삼중수소 누설 여부, 임의의 작업기간 동안 삼중수소에 의한 내부피폭선량을 평가하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 삼중수소를 취급하는 종사자에 대해 내부피폭 안전성을 확인하였고, 삼중수소에 불필요하게 피폭이 되지 않도록 정비환경개선 등의 추가 방호조치를 제시하였다. 이는 방사선 작업종사자의 효율적인 안전관리가 지속될 수 있는 체계를 발전시키는 데 기여할 것으로 판단된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 작업환경 공기 중 삼중수소 분석

삼중수소 사용허가를 맡은 시설 중 20개소 작업환경에 대한 공기 중 삼중수소 농도를 측정하고 오염 여부를 분석하기 위해 공기시료를 채취하였다. 수집된 시료는 전처리 및 안정화작업을 거쳐 액체섬광계수기를 통해 삼중수소 농도를 분석하였다. 일반적인 환경시료 분석은 Fig. 1과 같은 절차에 의해서 수행된다.

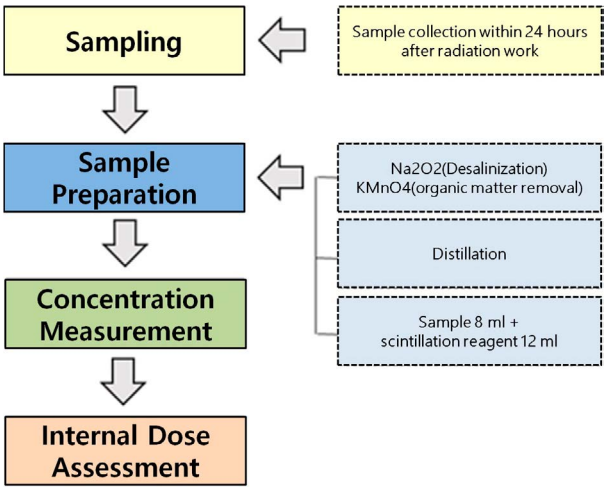

Fig. 1. Sample collection and analysis procedures.

ICRP Publication 75 (General Principles for the Radiation Protection of Workers)에서는 작업장에서 삼중수소 등의 기체나 휘발성 물질이 다량으로 취급될 때 공기 오염 감시가 필요함을 설명하고 있다.[2] 오염 감시 방법으로는 경보용 감시, 구역 샘플링, 대표 샘플링 방식이 있으며, 종사자가 삼중수소에 노출될 것으로 예상되는 작업환경에서는 공기 오염 정도를 정량화하는 방법으로 대표 샘플링이 적합하다[7]. 따라서 본 연구에서도 작업종사자가 삼중수소에 노출될 것으로 예상되기에 대표 샘플링 방법을 적용하였다. 공기시료는 Fig. 2에서 보이는 것처럼 방사선 작업 중인 환경에서의 공기 중 삼중수소를 포집하였으며, Fig. 3의 직접 제작한 버블러 시료채취장비를 이용해 정비작업 4시간 동안 500 mL 증류수 2병에 채취하였다[8].

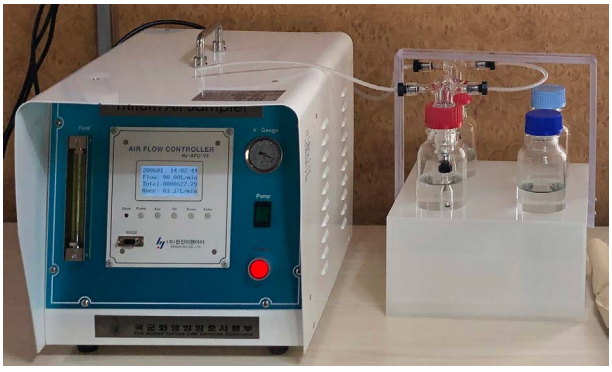

Fig. 2. Sampling equipment using a bubbler.

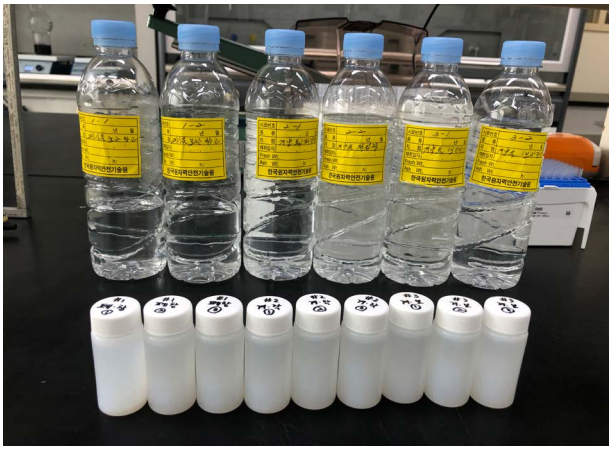

Fig. 3. Collected environmental samples and samples after pre-treatment.

[1] 권인태. 2019. 군부대 발생 삼중수소 RI 폐기물 처리지침. 육군 군수사. pp. 1-9.
[2] ICRP 75: 국제방사선방호위원회에서 1997년에 발간되었으며 '종사자의 방사선방호에 대한 일반원칙'이 기술됨.

빗물이나 해수 등 일반적인 환경시료 전처리 시에는 염분이나 유기물을 제거하기 위해 시약을 첨가하거나 증류를 실시한다. 그러나 본 연구에서는 작업환경 내 삼중수소 시료를 3차 증류수를 이용하여 포집하였기 때문에 별도의 시약을 첨가하거나 추가적인 증류는 실시하지 않았다. 분석용 시료는 시료 8 mL에 섬광체 12 mL를 혼합해 제조하였으며 냉암소에서 12시간 이상 보관 후에 PerkinElemer GCT-6220 액체섬광계수기를 사용하여 삼중수소 농도를 분석하였다.

2.2. 정비 종사자 내부피폭 평가 방법

소변시료를 통한 생체검정에서는 소변시료의 측정 결과와 국제방사선방호위원회(ICRP)에 의해 제시되는 소변 배설함수[3)]를 통해 섭취량으로 환산되고, 유효선량환산계수를 통해 최종 내부피폭 유효선량으로 산출된다. 그러나 실제 원전종사자의 삼중수소 내부피폭 감시의 경우, 섭취량 추정 없이 소변시료 내 삼중수소 농도로부터 선량을 직접 산출하는 '직접계산법(Direct assessment)'을 사용하고 있으며 본 연구도 이를 적용하였다[1,9].

2.2.1. 작업난이도에 따른 내부피폭선량 평가 대상자 분류 및 시료 채취

삼중수소의 부품을 직접 교체하거나 정비하는 작업종사자와 육안점검 등 단순 교체를 실시하는 종사자 간 삼중수소에 노출될 위험성은 상이할 것으로 예상된다. 따라서 작업 성격에 따라 삼중수소 접촉 가능성이 높은 종사자를 그룹 (가)군으로 설정하였고, 상대적으로 작업난이도가 낮고 부품의 단순 점검을 실시하는 종사자를 그룹 (나)군으로 구분하였다. 소변시료 채취는 그룹 (가) 종사자 11명, 그룹 (나) 종사자 6명을 대상으로 총 2회에 걸쳐 실시하였다. 1차 소변시료 채취 후 종사자는 30일 동안의 작업 근무일수에 따라 해당 부품 정비작업을 실시하였고 이어서 2차 소변시료를 채취하였다. 삼중수소 부품 정비작업자의 내부피폭을 평가하기 위한 소변시료를 채취할 때 삼중수소 부품 정비작업 이후 소변시료 채취까지의 경과 시간은 중요한 요소이다. 삼중수소는 인체에 흡수되어 단시간에 전신에 퍼진 후 시간이 지남에 따라 땀과 소변으로 배출되기 때문이다. 따라서 생물학적 반감기 약 10일을 고려할 경우 방사선 작업 종료 후 소변시료 채취 시기가 언제인가에 따라 평가 결과가 달라질 수 있다. 중수로 원전종사자가 소변시료를 제출하는 시간에 따른 방사능 농도를 측정한 연구문헌에 따르면 섭취 후 2시간부터 24시간 이내에 제출한 소변시료는 농도값이 유사했으나, 그 이후 제출한 소변시료부터는 농도값이 낮아짐을 알 수 있었다[10]. 따라서 본 연구에서도 시료채취 시간을 작업 종료 후 2시간부터 24시간 이내의 소변시료만을 채취하여 분석하였다.

2.2.2. 전처리 및 측정

소변시료는 고유한 색깔을 가지고 있기 때문에 액체섬광계수기로 분석 시 소변색이 분석장비의 효율을 저하시키는 방해요소가 될 수 있다. 또한 각종 염분과 유기물질로 인해 측정 시 방해가 될 수 있어 소변을 1차 증류하는 전처리 과정을 거친다. 과망간산나트륨과 과망간산칼륨을 시료 500 g당 1 g 넣어 소변시료에 포함된 염분과 유기물질을 침전시키고 증류를 함으로써 색깔에 의한 방해요소를 제거하였다. 증류한 시료 8 mL에 섬광체 Ultima Gold LLT 시약 12 mL를 혼합하여 냉암소에서 12시간 이상 보관 한 후 액체섬광계수기로 측정하였다[9].

2.2.3. 내부피폭선량 평가

삼중수소에 의한 선량 평가 방법은 ANSI N13.14에 따라 4가지 방법이 있다[11]. 그중에서 본 연구는 Eq. 1의 방사선 작업종사자 및 수시출입자에 대한 유효선량 평가 방법을 적용하였다. 이는 작업 전 삼중수소 농도값(C1)과 작업 후 삼중수소 농도값(C2)이 있을 때 유효한 방법으로 알려져 있다.

$$D = 29\,T(C1 + C2) \quad (1)$$

D: 선량(μSv)
C1, C2: 측정된 방사능값(MBq L^{-1})
T, t: days (일)

한편, 환경준위 수준의 방사능을 가지는 시료의 농도를 계측할 때 백그라운드와 장비의 영향으로 방사능의 존재를 식별하기 어려운 경우가 발생한다. 이때 시료의 방사능 존재 유무를 판단하기 위한 통계학적 개념을 적용하여 측정값의 최저검출하한(MDA)을 표시함으로써 분석 결과의 신뢰성을 제고한다. 본 연구에서는 Eq. 2의 최저검출하한 산출 시 신뢰도(k)는 95%를 사용하였고 계측효율(ε)은 삼중수소 표준시료로 교정한 계측효율을 적용하였으며, 시료는 60분간 측정하였으며, 수율(Y)은 삼중수소 전처리

[3)]소변 배설함수: 방사능을 섭취한 후 t 시간 경과 한 후 소변으로 배설된 양을 나타낸 함수

시에는 통상적으로 적용되는 1.0을 적용하였다. 삼중수소 반감기는 12.35년을 적용한 붕괴상수를 이용하였다.

$$n_{DL} = \frac{k}{2} \times \left[\frac{k}{T_s} + \left[(\frac{k}{T_s})^2 + 4n_b \times (\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_b}) \right]^{0.5} \right]$$

$$MDA = \frac{n_{DL}}{(\epsilon \times V \times 60 \times Y)} \quad (2)$$

k: degree of freedom

ε (%): Counting efficiency

V (mL): Sample volume

Y (%): Chemical recovery ratio

T_s, T_b: Counting time

n_b: BKG Counting

3. 결과 및 고찰

3.1. 공기 중 삼중수소 오염도

삼중수소 사용허가를 받은 곳 중에서 20개소의 작업환경 내 공기 중 삼중수소를 측정하고 환경 중 오염 여부를 분석한 결과 Fig. 4와 같이 모든 작업장에서 미량의 삼중수소는 검출됨을 알 수 있다. 삼중수소 농도가 가장 높게 측정된 곳은 폐기 예정인 부품을 보관하는 곳으로 삼중수소 농도는 1,120 mBq L^{-1}이었으나, 원자력안전법상 방사선관리구역 내 허용한도인 300,000 mBq L^{-1}에 훨씬 못 미치는 결과로 확인되었다.[4] 그럼에도 자연상태의 공기중 삼중수소 농도가 0.167 mBq L^{-1}인 것을 감안한다면 정비환경에서는 미량의 삼중수소가 존재함을 알 수 있다.

정비환경에서의 삼중수소 검출 원인이 삼중수소가 포함된 부품의 파손이나 노후화 때문인 것으로 추정되어 일부 부품에 대해 삼중수소 누설 여부를 확인하였다. 삼중수소 누설검사 방법은 국방규격의 신품 누설검사 방법을 적용하였다. 각 부품마다 누설검사 합격기준이 정해져 있어 신품 입고 시에 해당 기준을 만족하여야 한다. 다만, 폐기 예정 또는 사용 간 정비 중인 부품에 대해서는 별도의 삼중수소 누설기준이 존재하지 않기에 누설 비교 시 신품기준을 적용하였다.

Table 1에서 보이는 것처럼 누설검사 결과 부품 #1, #2를 제외한 부품에서 신품기준 값을 초과하여 삼중수소가 누설되고 있었으며 부품 #9에서는 신품기준 대비 약 23배의

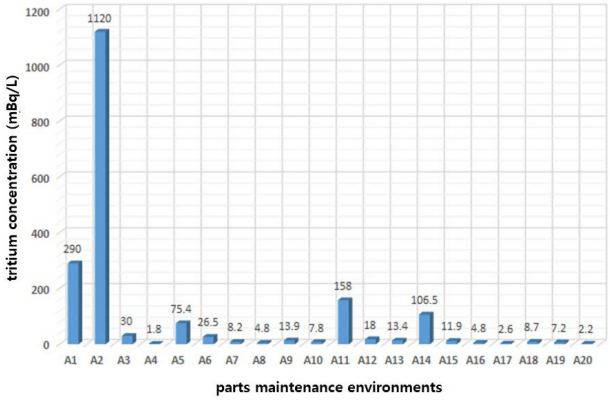

Fig. 4. Tritium concentrations in maintenance environments.

Table 1. Results of tritium leak test for each part

Part No.	Capasity (kBq)	Leak test result (kBq)	New part reference (kBq)
#1	1.85×10^6	1.5	< 1.9
#2	1.85×10^6	1.4	< 1.9
#3	1.85×10^6	3.7	> 1.9
#4	1.85×10^6	6.2	> 4.6
#5	3.33×10^8	5.3	> 4.6
#6	3.33×10^8	8.6	> 1.3
#7	3.33×10^8	13.2	> 1.3
#8	3.33×10^8	5.4	> 1.3
#9	3.70×10^8	171.0	> 7.4
#10	1.85×10^8	9.2	> 6.1

삼중수소가 누설됨을 알 수 있었다. 따라서 작업장에서 삼중수소 부품을 정비할 때 부품 자체에서 미량의 삼중수소가 누설되고 있는 것으로 분석된다. 현재 삼중수소가 포함된 부품과 관련하여 신품에 대한 누설기준은 있으나, 사용 후 부품에 대해서는 삼중수소 허용 범위에 대한 기준이 부재하다. 따라서 관련 기준을 마련하고 삼중수소 누설 허용 범위 이하에서 부품을 정비한다면 불필요한 내부피폭을 방지할 수 있을 것이다.

3.2. 삼중수소가 포함된 부품을 정비하는 작업종사자의 내부피폭 평가

3.2.1. 작업종사자의 삼중수소 오염 농도

Table 2는 삼중수소를 취급하는 방사선작업종사자의 소변시료에서 검출된 삼중수소 농도와 이를 피폭선량으로

[4] 원자력안전위원회고시 제2019-10호 방사선방호등에 관한 기술기준 별표3 '방사성물질의 유도공기중 농도'

환산한 값이다. 작업난이도가 높고 고용량의 삼중수소 부품을 취급하는 환경, 그룹 (가)의 종사자는 1차 분석 결과 최대 10,010.60 ± 41.94 Bq L^{-1}, 2차에서는 최대 1,177.06 ± 10.85 Bq L^{-1}이 검출되었다. 최저검출하한(MDA)은 1.22 Bq L^{-1}으로 1차 소변시료 결과 4명의 종사자가 MDA값 이하로 검출되었으며, 2차 시료 분석 결과에서는 6명의 종사자가 MDA 이하의 결과가 나타났다. 삼중수소 부품에 대한 육안점검과 단순 교체만을 실시하는 그룹 (나)군의 종사자 소변시료에서는 1차 분석 결과 최대 73.83 ± 2.41 Bq L^{-1}, 2차 소변시료에서는 최대 97.17 ± 4.78 Bq L^{-1}이 검출되었다.

장비의 최저검출하한(MDA)은 1.22 Bq L^{-1}으로 1차 소변시료에서 3명의 종사자가 MDA 이하의 검출 결과가 나왔으나 2차 소변시료에서는 모두 MDA 이상의 결과가 나왔다. Table 2에서 보이는 것처럼 그룹 (가)의 종사자 11명 중 3명의 종사자가 290 Bq L^{-1} 이상의 삼중수소 농도가 확인되었고, 그룹 (나) 종사자에 비해 소변시료 내 삼중수소 농도가 높게 검출됨을 알 수 있다. 이는 해당 종사자가 부품을 정비할 때 작업 성격에 따라 소변시료 내 삼중수소 농도의 차이가 발생함을 알 수 있다. 각 그룹 내에서 종사자별 삼중수소 농도 차이는 작업시간과 부품의 파손 여부 등에 따라 달라질 것으로 예상되나, 본 연구에서는 실제 삼중수소가 높게 측정된 인원이 어느 부품을 정비하였는지를 알기 위한 정밀한 추적 및 실험은 실시하지 않았다. 분석 결과를 요약하면 부품 분해점검을 실시하는 그룹 (가)의 종사자가 단순 육안점검만을 실시하는 그룹 (나)의 종사자들에 비해 상대적으로 높은 삼중수소에 노출되었다.

3.2.2. 작업종사자의 내부피폭선량 평가

작업종사자의 내부피폭선량을 평가하기 위해 2차 소변시료에서 측정된 삼중수소 농도를 피폭선량으로 환산하였다. 이는 1차 측정과 2차 측정 사이 기간인 30일 동안의 피폭선량이며, 이를 기준으로 연간 선량으로 환산하였다. 삼중수소 농도가 최대로 측정된 그룹 (가) J 근무자는 최대 9.70 μSv로 평가되었고 종사자 전체 평균은 1.45 μSv로 평가되었다. J 근무자는 연간으로 환산 시 최대 약 0.116 mSv에 피폭되는 것으로 평가되었으며 작업자 전체 평균은 0.02 mSv로 계산된다. 이러한 결과는 원자력안전법상 방사선작업종사자 연평균 선량한도인 20 mSv에 크게 못 미치는 수치이며 일반인 선량한도 1 mSv보다도 낮은 수치이다.

Table 2. Result of internal exposure dose for radiation workers (MDA = 1.22 Bq L^{-1})

Group	Man	1st (Bq L^{-1})	2nd (Bq L^{-1})	2nd dose assessment		Yearly dose (μSv)
				Dose (mrem)	Dose (μSv)	
Group No. 1	A	159.03	0.33	0.014	0.138	1.66
	B	< MDA	< MDA	0.000	0.000	0.00
	C	322.80	294.33	0.054	0.535	6.42
	D	< MDA	< MDA	0.000	0.000	0.00
	E	7665.70	306.67	0.692	6.917	83.00
	F	8026.05	54.57	0.701	7.010	84.13
	G	101.90	–*)	0.009	0.088	1.06
	H	97.66	77.93	0.015	0.152	1.83
	I	< MDA	< MDA	0.000	0.000	0.00
	J	10010.60	1177.06	0.971	9.706	116.47
	K	< MDA	< MDA	0.000	0.001	0.01
Group No. 2	L	< MDA	1.48	0.000	0.001	0.02
	M	1.34	4.38	0.000	0.005	0.06
	N	73.84	97.18	0.015	0.148	1.78
	O	1.28	2.48	0.000	0.003	0.04
	P	< MDA	16.14	0.002	0.015	0.18
	Q	< MDA	3.40	0.000	0.004	0.05

*)Insufficient second urine sample for analysis prevented further investigation.

원자력안전위원회고시에 따르면 내부피폭선량 평가 시 연간 2 mSv가 넘는 종사자들은 내부피폭선량을 규제기관에 보고해야 하는 의무가 있으나[5], 측정된 결과는 규제기관에 별도의 내부피폭선량을 보고해야 하는 피폭선량 값에 한참 못 미치는 것으로 확인되었다. 다만, 이번 연구 결과를 통해 삼중수소가 포함된 부품을 정비하는 작업환경에서 검출되는 삼중수소는 노후화된 부품에서 삼중수소가 누설되거나 정비 중 파손된 부품에서 누설되는 삼중수소 때문임을 확인할 수 있었다. 특히 삼중수소 폐부품을 저장하고 있는 환경에서 가장 높은 삼중수소 농도가 검출된 것이 특징이었다. 부품에서 누설되는 삼중수소로부터 작업자가 노출되는 것을 추가적으로 방지하기 위해 점검 작업을 위한 전용 후드를 설치하고, 기관별로 일반작업과 분해점검 작업을 구분하여 삼중수소에 직접 노출되는 인원과 시간을 줄여나갈 필요가 있겠다. 또한 부품파손 등 비상상황 발생 시 종사자에 대한 방호조치를 위해 행동조치 요령, 사후조치 절차 등이 포함된 안전관리 교육을 강화한다면 종사자의 불필요한 피폭을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구는 삼중수소가 포함된 부품의 정비환경에 대한 안전관리체계를 강화하기 위해 작업장 내 공기 오염과 정비부품에서 노출되는 삼중수소 오염도를 분석하였다. 삼중수소 부품을 정비하는 작업환경 중 20개소를 임의로 선정하여 공기 중 삼중수소를 분석한 결과 삼중수소가 가장 높게 측정된 곳은 삼중수소가 포함된 부품의 폐기를 위해 일시적으로 보관하는 곳으로 최고 1,120 mBq L^{-1}의 삼중수소가 확인되었으며 부품을 정비하는 환경에서도 약 290 mBq L^{-1}의 삼중수소가 측정되었으나, 이는 원자력안전법상 방사선관리구역 내 허용한도인 300,000 mBq L^{-1}에 훨씬 못 미치는 결과로 확인되었다. 지속적인 모니터링과 작업장 환경개선을 통해 안전하게 관리되고 있는 것으로 평가된다.

누출된 삼중수소가 종사자에게 지속적으로 장기간 노출될 때 미치는 영향을 확인하기 위하여 작업종사자들의 내부피폭선량을 평가하였다. 피폭선량 평가를 위해 종사자는 작업난이도에 따라 두 개의 그룹으로 구분하였고 소변시료를 2회 수집하여 분석하였다. 시료 수집 2회간 간격은 30일의 격차를 두어 2차 수집 시 일정 기간 동안 피폭된 선량을 평가할 수 있도록 하였다. 작업난이도가 높고 고용량의 삼중수소 부품을 취급하는 환경, 그룹 (가)의 종사자는 2차 소변시료 측정 결과 최대 1,177.06 ± 10.85 Bq L^{-1}이 검출되었다. 또한 일반적인 육안점검과 단순 교체 등을 실시하는 환경, 그룹 (나)에서의 종사자는 2차 소변시료에서 최대 97.17 ± 4.78 Bq L^{-1}이 검출되었다. 해당 종사자들을 대상으로 30일 기간 동안 내부피폭선량을 평가한 결과 그룹 (가)에서 최대 9.70 μSv로 평가되었고 종사자 전체 평균은 1.45 μSv로 평가되었다. 이를 연간 선량으로 환산 시 0.01~0.12 mSv로써 종사자 선량한도 연간 20 mSv, 일반인 선량한도 1 mSv에 크게 못 미치는 것으로 확인되었다. 종사자가 삼중수소로 인해 영향을 받는 것은 제한적이라는 것을 의미한다. 삼중수소 부품을 정비하는 종사자의 경우 방사선안전교육, 건강검진, 외부피폭선량평가를 실시 중에 있으며, 이를 통해 방사선 피폭이 안전하게 관리 및 유지되고 있는 것으로 판단된다. 다만, 삼중수소를 취급하는 방사선작업종사자는 작업 성격과 취급부품에 따라 인체 내로 흡입되는 삼중수소의 양과 내부피폭 정도가 상이할 수 있다. 따라서, 부품 파손 등 일시적인 노출로부터 종사자를 보호하기 위한 작업장 전용 후드 설치, 비상상황에 대비한 행동조치 요령 등을 구체화하고 대비할 필요성이 있겠다. 이번 연구는 삼중수소 내부피폭선량 평가를 통해 종사자에 대한 안전성을 확인하고, 방사선 안전관리 체계를 보완 발전시키는 데 기여할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Lee ED and Kwak HJ. 2003. Consideration of Propriety for Recording level to Evaluate the Internal Dose. KNS Spring meeting, pp. 26-31.
2. Han S-J, Lee GJ, Yeom JM and Shin D. 2015. A Study and Analysis on Tritium Radioactivity and Environmental Behavior in Domestic NPPs. *J. Radiat. Prot. Res.* **40**(4):267-276. https://doi.org/10.14407/jrp.2015.40.4.267
3. Cho YW. 1992. A Study on the Tritium Distribution in Some Environmental Samples-Rice, Chinese cabbage, Pine needles. Master's Thesis. Graduate School, Chungbuk National University.
4. National Council on Radiation Protection and Measurement.

[5] 원자력안전위원회고시 제2017-77호 내부피폭선량의 측정 및 산출에 관한 규정 제4조 '측정대상'

1979. Tritium and Other Radionuclide Labelled Organic Compounds Incorporated in Genetic Materials. NCRP-63.
5. Hill RL and Johnson JR. 1993. Metabolism and Dosimetry of Tritium. *Health Phys*. **65**(6):628-647. https://doi.org/10.1097/00004032-199312000 -00003
6. Kim HG and Kong TY. 2009. Analysis of Metabolism and Effective Half-life for Tritium Intake of Radiation Workers at Pressurized Heavy Water Reactor. *J. Radiat. Prot. Res*. **34**(2):87-94. https://doi.org/10.15669/pnst.1.545
7. Beninson D. 1997. General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP. pp. 49-52.
8. Hickey EE. 1993. NUREG-1400 Air Sampling in the Workplace. USNRC. pp. 15-16.
9. KHNP. 2008. Nuclear Power Plant STA, Measurement and Evaluation of Internal Exposure Radiation Dose, Standard Technology Administration Radiation-06:8-9.
10. Kim HG, Kong TY and Jeong WT. 2011. Trends and Issues in Metabolism and Dosimetry for Tritium Intake. *J. Radiat. Prot. Res.* **36**(2):102.
11. ANSI N13.14. 1994. Internal Dosemetry Programs for Tritium Exposure, Healthy Physics Society.
12. Nuclear Safety and Security Commission Notification No. 2019-10 Regarding Radiation Protection, etc. Technical Standards Annex 3 'Induced Concentration of Radioactive Materials in Air'.