Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 4, pp. 517-522, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.4.517

Technical article

액체 섬광 계수기와 유기섬광체 변화에 따른 물시료에서의 삼중수소 분석 평가

민소연[1] · 김지원[1] · 박세준[1] · 이대수[1] · 유보종[1] · 주광태[1] · 한승재[1] · 김규현[1,*]

[1]주식회사 코라솔

Evaluation of Tritium Analysis in Water Sample using Different Liquid Scintillation Counter Techniques and Scintillation Cocktails

Soyeon Min[1], Ji Won Kim[1], Se Jun Pak[1], Dae Soo Lee[1], Bo Jong Yoo[1], Gwang Tae Joo[1], Seung Jae Han[1], and Gyuhyeon Kim[1,*]

[1]Korasol Co. Ltd., 60-gil #125, Dapsimni-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02611, Republic of Korea

ABSTRACT In this study, tritium analysis was evaluated using two different LSC systems (Quantulus 1220, Hidex 300 SLL) to compare their detection capabilities, background characteristics, and counting efficiencies. Additionally, two scintillation cocktails (Ultima Gold LLT, Aqualight+ ULL) was tested to assess their performance in tritium detection with various sample matrices. While Quantulus and Ultima Gold series cocktails have been widely used and validated in tritium analysis, there is limited data available regarding the analytical reliability and performance of Hidex 300 SLL combined with Aqualight+ ULL. Therefore, this study aims to evaluate and verify the analytical feasibility and performance of these systems, focusing on counting efficiency, background count rate, figure of merit (FoM), and quenching effects. Moreover, the results of 'satisfaction' were obtained by evaluating the tritium analysis capabilities of both LSC systems using KRISS proficiency test samples. The findings of this study will provide valuable data for selecting optimal LSC instruments and cocktails for tritium analysis depending on operational environments and analytical purposes. In particular, this evaluation will be contributed to strengthening the reliability and applicability of Hidex 300 SLL and Aqualight+ ULL for future tritium monitoring and radioactive waste management practices.

Key words: Liquid Scintillation Counter, Scintillation Cocktail, Tritium, Hidex 300 SLL, Quantulus 1220

1. 서 론

전 세계적으로 원자력 발전시설의 노후화로 인해 원전 해체의 필요성이 점차 증대되고 있다. 우리 나라의 경우, 국내 최초의 상업용 원자로인 고리 1호기의 해체계획서가 최근 최종 승인되어 대량의 해체폐기물이 발생될 예정이며 이에 따른 해체폐기물 특성처리, 처분 및 분석에 막대한 예산과 시간이 소요될 전망이다.

이러한 해체폐기물의 경우 다양한 생성요인으로 인해 발생된 방사성 핵종들을 다수 함유하고 있는데 그 중 하나인 삼중수소(^{3}H, T, Tritium)는 반감기 약 12.3년의 베타 선을 방출하는 핵종으로 산소와 쉽게 반응하여 물 혹은 수증기(HTO)의 형태를 띈다[1]. HTO는 화학적 형태 특성 상 환경에서의 이동성이 크고 피폭으로 인한 인체 내 분포가 용이하기 때문에 해체폐기물 취급 과정 중 높은 내부 피폭 가능성을 지니고 있다[2]. 또한 원자로 내 냉각재로 중수(D_2O, D: Deuterium)를 사용하는 중수로에서는 삼중수소의 발생량이 경수로 원전에 비해 월등히 많기 때문에 삼중수소의 환경 배출량이 다른 방사성 핵종에 비해 높은 편이다[3]. 그렇기 때문에 해체 폐기물 내 삼중수소의 정확한 핵종 재고량 파악은 원전 해체시 필수적으로 고려해야 할 요소다.

삼중수소는 베타선을 방출하기 때문에 베타선을 검출할 수 있는 분석 기기를 사용해 핵종 재고량을 파악할 수 있는데 액체 섬광 계수기(Liquid Scintillation Counter, LSC)는 베타선 계측의 대표적인 방법으로 폭넓게 사용된다[4]. LSC는 시료와 섬광액(Scintillation Cocktail) 사이의 에너지 전달을 통해 광자를 발생

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

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Gyuhyeon Kim
Tel: +82-2-711-5145, Fax: +82-2-711-5147, E-mail: kyubba@korasol.co.kr

Received 30 October 2025 Revised 24 December 2025 Accepted 24 December 2025

시키며 이를 광전자증배관(Photomultiplier Tube, PMT)으로 검출하므로, 낮은 검출 한계와 빠른 분석이 가능하다[5]. 그럼에도 불구하고 LSC의 종류 및 그에 따른 차폐 능력, 섬광액의 종류와 조성, LSC vial의 재료 특성, 액체 시료 내 전도도, 유기물, 이온 조성 등의 화학적 특성 등은 삼중수소 계측 효율과 정확도에 유의미한 영향을 미칠 수 있다[6,7].

기존 연구에서는 하나의 LSC에 다양한 섬광액을 사용하여 계측 효율(Counting Efficiency), 최소 검출 한계(Minimum Detectable Activity, MDA), 성능 지수(Figure of Merit, FoM)을 비교하여 성능 시험을 하거나, 재료가 다른 Vial 및 섬광액 혼합 비율을 변화시키거나, 서로 다른 LSC를 사용하여 핵종 종류에 따른 계측 효율과 정확도를 비교하는 방법등이 사용되었다[2,8,9]. 또한, 해체 환경에서 발생 가능한 다양한 시료 형태(고체, 액체, 금속 등)를 전처리하는 방법(전해농축법, 증류법 등)의 경우 많은 연구가 이루어져 최적화 및 활용되고 있다[10]. 그러나 새로운 LSC와 섬광액이 계속해 출시되고 있기 때문에 이에 대한 핵종 분석 능력 비교평가가 필요하며 보다 다양한 변수를 적용하여 LSC의 계측 효율을 최적화하는 연구는 여전히 요구되는 실정이다.

따라서 본 연구는 삼중수소를 포함한 액체 시료를 대상으로, 서로 다른 LSC와 섬광액을 활용하여 계측 효율, 계측 범위(Region of Interest, ROI), 성능 지수(FoM), 배경 계수율, 그리고 소광 곡선(Quenching Curve)에 중점을 두어 핵종 분석 성능을 평가하고 검증하였다. 또한, 검증 절차를 마친 LSC를 활용하여 한국표준과학연구원에서 주관하는 2025 KRISS 숙련도시험 프로그램 시료 측정 및 결과를 분석함으로써, 원전 해체시 해체폐기물 내 삼중수소 분석 신뢰성 향상 및 방사성 폐기물 관리 체계 고도화에 기여하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

삼중수소가 함유된 액체 시료의 베타선량은 두 가지 종류의 LSC로 분석되었으며, 하나는 Quantulus 1220 (Revvity Inc., Waltham, MA, USA)이고 다른 하나는 300 SL Super Low Level (Hidex 300 SLL; Hidex Oy, Turku, Finland)이다. Quantulus 1220은 베타 핵종을 분석하기 위한 LSC로 널리 사용되어 왔고 Hidex 300 SLL의 경우 비교적 최근에 출시된 LSC기 때문에 연구 결과가 많지 않다[7,8,11]. 두 기기 다 외부 선원(Eu-152)을 탑재하고 있으며 Hidex의 경우 TDCR method라는 효율 교정 방식이 존재하나 국내에서 공인된 효율 교정 방식이 아니고 정확한 비교가 불가능하기 때문에 효율 교정 방식으로는 Eu-152를 사용한 소광 정도에 따른 측정 범위를 나타내는 소광인자(SQP(E): Spectral Quench Parameter of the External standard) 값을 비교하는 방식을 사용하였다[12]. LSC vial의 경우 종류에 따라 삼중수소 베타선량 검출효율에 영향을 미칠 수 있으나 다양한 선행 연구에서 그 영향에 대해 분석 및 고찰하였기 때문에 이번 연구에서는 PE vial만을 사용하여 실험을 진행하였다[1,2]. 섬광액 차이에 따른 삼중수소 계측 효율 및 MDA 변화를 살펴보기 위해 두 가지 종류의 섬광액을 사용하였으며 하나는 Ultima Gold LLT (LLT; Revvity Inc., Waltham, MA, USA)이고 다른 하나는 Aqualight+ Ultra Low Level (ULL; Hidex Oy, Turku, Finland)이다. 소광곡선 교정을 위해 20.01 Bq g^{-1} 농도의 ^{3}H 표준 선원(CRM No. 205-01-201)를 한국표준과학연구원에서 구매하여 ^{3}H 교정 선원을 만드는 데 사용하였다. 또한, CRM의 방사능 준위가 낮은 편이기 때문에 환경 시료로 가정하고 환경 시료를 분석할 때 주로 사용하는 비율인 증류수(DW; Distilled Water, 18.2 MΩ · cm) 8 mL와 두 종류의 섬광액 12 mL흘 혼합하여 20 mL를 만들어 배경 방사능 측정 용액으로 활용하였다[10]. ^{3}H 교정 선원을 제조하기 위해 ^{3}H 표준 선원을 1 mL 분취 후 증류수와 혼합하여 10 mL를 만들고 이를 1:19~10:10의 비율로 배합비를 달리하여 준비한 후 소광곡선을 도출하고 정확한 소광곡선 비교를 위해 ^{3}H Quenched Standards (Part No. 6008501A, 266,500 dpm std^{-1} ± 3%, Exp. Date: 09/25/29, Revvity Inc., Waltham, MA, USA)를 구매하여 소광곡선 비교 실험을 실시하였다. 그리고 계측 범위에 따른 성능 지수의 변화를 알아보기 위해 Hidex 300 SLL의 ROI를 0-1023, 0-170, 0-160, 50-160 (채널)의 네 종류로 설정하고 두 가지의 섬광액을 가지고 배경 계수율 및 계측 효율을 측정하였고 Quantulus 1220의 경우 0-1023의 한 종류로만 측정하였다. 일반적으로 삼중수소 계측은 보수적으로 평가하기 위해 액체섬광계수기의 모든 채널(0-1023)을 활용하여 측정하지만 삼중수소 계측 스펙트럼이 0-360 사이에 주로 분포되는 특징이 있고 제조사에서 권장하는 특정 채널 영역이 존재하기 때문에 여러 연구들에 의해 최적화된 ROI를 선정하여 측정을 진행하였다[2,13].

삼중수소의 계측 효율(eff) 산출 공식은 다음과 같다.

$$eff(\%) = \frac{Net\ Number\ of\ Counts\ Detected}{Number\ of\ Decay\ Events} * \times 100 \quad (1)$$

그리고 FoM 산출 공식은 다음과 같다.

$$FoM = \frac{eff^2}{C_{Bg}} \quad (2)$$

여기서 C_{Bg}는 배경 계수율(Counts per minute)을 의미한다.

또한, 삼중수소 계측의 유효성 평가를 목적으로 미지의 방사능 농도를 보유한 액체 시료를 대상으로 삼중수소 분석 능력을 평가하기 위하여 2025 KRISS 숙련도시험 (PT-2025-58 염기성 용액 중 베타 방출 핵종 방사능 분석, 02.007 (방사능물질)) 시료를 활용하여 분석 시료를 제작하였다. 시료는 액체 시료 내 삼중수소 분석 국가표준을 참고하여 과망간산칼륨($KMnO_4$)과 수산화나트륨(NaOH)을 유기물 제거용으로 시료에 첨가한 후, 증류장치를 이용한 증류법으로 전처리하였다[14]. 이후 처리된 시료를 각각

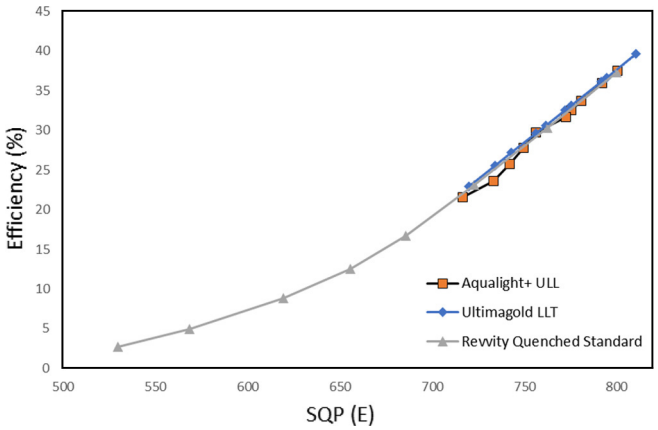

Fig. 1. Comparison of SQP(E) and counting efficiencies by using different quenched set with Quantulus 1220 (Quench equations for ^{3}H – ULL: y = 5E-05x^2 + 0.1189x − 89.46; LLT: y = 8E-07x^2 + 0.1828x − 109.05; Revvity: y = −3.352E-07x^3 + 0.001005x^2 – 0.7573x + 172). [a]ULL: Aqualight+ ULL; [b]LLT: Ultima Gold LLT; [c]Revvity: Revvity ^{3}H Quenched Standards.

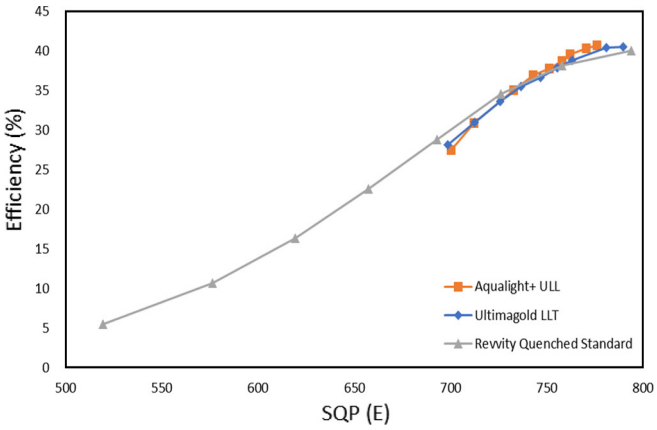

Fig. 2. Comparison of SQP(E) and counting efficiencies by using different quenched set with Hidex 300 SLL (Quench equations for ^{3}H – ULL: y = −0.0013x^2 + 2.0867x – 797.58; LLT: y = −0.001x^2 + 1.6228x – 618.49; Revvity: y = −3E-06x^3 + 0.0051x^2 – 3.1803x + 643.25). ULL: Aqualight+ ULL; [b] LLT: Ultima Gold LLT; [c] Revvity: Revvity ^{3}H Quenched Standards.

Hidex – Aqualight+ ULL, Quantulus – Ultima Gold LLT 조합으로 8 : 12 비율로 혼합한 후, 각 시료 당 50분씩 계측하여 삼중수소 농도를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

먼저, Ultima Gold LLT, Aqualight+ ULL, Revvity ^{3}H Quenched standard를 사용하여 Quantulus 1220을 이용해 측정한 값으로 도출한 소광 곡선을 비교한 결과는 Fig. 1과 같다. LLT cocktail 시료의 경우 1 : 19~10 : 10의 비율로 배합비를 달리하여 준비한 표준선원 용액을 측정한 결과, SQP(E)값이 719.72~810.56 (범위: 90.84)로 측정되었고 ULL cocktail 시료의 경우 716.33~800.39 (범위: 84.06)으로 측정되어 LLT로 만들어진 시료의 범위가 더 넓은 것을 확인할 수 있었다. 다른 문헌에서도 일반적으로 SQP(E)값이 700~800 사이에 존재할 경우 유효한 값으로 인정되기 때문에 해당 시료를 사용한 소광 곡선은 유효한 것으로 판단된다[15,16]. 측정 효율의 경우, LLT cocktail 시료가 22.89~39.6%, ULL cocktail 시료가 21.57~37.48%로 측정되어 LLT로 만들어진 시료의 측정 효율이 ULL cocktail 시료 대비 약 5~6% 정도 높다는 것을 확인할 수 있었다. LLT와 ULL 모두 DIN (Di-isopropylnaphthalene) 계열 섬광액이지만 LLT의 경우 1,2차 섬광체인 PPO (2,5-Diphenyloxazole) 와 bis-MSB (1,4-Bis-(2-methylstyryl)-benzene)가 각각 최대 2.5% 함유되어 있어 함유하고 있지 않은 ULL보다 계측 효율이 상대적으로 더 높게 나온 것으로 판단된다[17]. 소광 곡선 비교를 위해 측정한 Revvity ^{3}H Quenched standard 시료의 경우 SQP(E)값이 529.56~799.89 (범위: 270.33), 측정 효율값은 2.69~37.26%으로 확인되었다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 LLT, ULL cocktail 시료의 소광 곡선과 소광 표준시료의 소광 곡선간의 기울기와 추이가 유사한 것을 확인할 수 있기 때문에 두 섬광액을 이용해 만든 시료의 소광 곡선이 삼중수소 농도 측정에 유효함을 확인할 수 있었다. 마찬가지로, Hidex 300 SLL을 이용해 측정한 값으로 도출한 소광 곡선을 비교한 결과는 Fig. 2와 같다. LLT cocktail 시료의 경우 SQP(E)값이 698.47~789.56 (범위: 91.09)로 측정되었고 ULL cocktail 시료의 경우 700.37~776.04 (범위: 75.67)으로 측정되어 LLT로 만들어진 시료의 범위가 더 넓은 것을 확인할 수 있었다. 측정 효율의 경우, LLT cocktail 시료가 28.2~40.5%, ULL cocktail 시료가 27.5~40.7%로 측정되어 LLT로 만들어진 시료의 측정 효율이 시료 간의 큰 차이는 없으나 Quantulus 1220의 측정 효율값 대비 약 8% 더 높다는 것을 확인할 수 있었는데 이것은 Hidex 300 SLL의 경우 세 개의 PMT가 120° 간격으로 배치되어 있어 두 개의 PMT가 180° 간격으로 배치되어 있는 Quantulus 1220에 비해 검출되는 광전자가 많다는 기존 연구와 상응하는 것을 확인 할 수 있었다[11]. 소광 곡선 비교를 위해 측정한 Revvity ^{3}H Quenched standard 시료의 경우 SQP(E)값이 519.59~793.96 (범위: 274.37), 측정 효율값은 5.5~40.1%으로 확인되었다. Hidex 300 SLL도 Quantulus 1220과 마찬가지로 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 LLT, ULL cocktail시료의 소광 곡선과 ^{3}H Quenched standard 시료의 소광 곡선간의 기울기와 추이가 유사한 것을 확인할 수 있기 때문에 두 섬광액을 이용해 만든 시료의 소광 곡선이 삼중수소 농도 측정에 유효함을 확인할 수 있었다.

Table 1. Detailed instrumental settings of two LSC systems for tritium measurements

			Quantulus 1220	Hidex 300 SLL
Instrumental Settings	Counting Parameters	Counting Time (min)	50	50
		Maximum Counts	130,000	N/A
		Coincidence Time (ns)	20	22
		Vial Repeats	3	3
		Range Repeats	1	1
	Cooling Temperature (°C)		13.5	17
	External Std (Eu-152) Exposure Time (sec)		15	60

Table 2. Comparison of two LSC's counting efficiency, BKG, and FoM using different ROIs with Ultima Gold LLT

LSC	Quantulus 1220	Hidex 300 SLL			
ROI[a] (Channels)	0-1023	0-1023	0-170	0-160	50-160
Efficiency (%)	24.97	38.80	36.20	32.30	30.50
BKG[b] (CPM)	0.86	37.29	4.71	4.44	4.63
FoM[c]	725	40	278	235	201

[a]ROI: Region of Interest; [b]BKG: Background level; [c]FoM: Figure of Merit.

Table 3. Comparison of two LSC's counting efficiency, BKG, and FoM using different ROIs with Aqualight+ ULL

LSC	Quantulus 1220	Hidex 300 SLL			
ROI[a] (Channels)	0-1023	0-1023	0-170	0-160	50-160
Efficiency (%)	24.34	37.80	35.70	31.60	30.10
BKG[b] (CPM)	0.99	39.83	4.82	4.43	4.34
FoM[c]	598	36	264	225	209

[a]ROI: Region of Interest; [b]BKG: Background level; [c]FoM: Figure of Merit.

Table 4. Comparison of two LSC's counting results of 2025 KRISS proficiency test samples

Nuclide	KRISS Setting Value		Quantulus 1220			Hidex 300 SLL		
	Radioactivity (Bg g^{-1})[a]	Uncertainty[b]	Radioactivity (Bg g^{-1})	Uncertainty	z'-score	Radioactivity (Bg g^{-1})	Uncertainty	z'-score
^{3}H	5.35	0.22	4.97	0.37	−1.88	5.15	0.61	−1.02

[a]The setting value is based on the results of certification (R-205-0007) by the Korea Institute of Standards and Science as a TDCR measurement method used to establish a national radioactivity measurement standard for beta-emitting nuclides, where z'-score ≤ 2 is satisfaction, 2 ≤ z'-score ≤ 3 is warning, z'-score ≥ 3 is unsatisfaction; [b]Confidence Interval about 95%, k = 2

LLT를 사용해 만든 배경 방사능 용액을 두 가지 LSC로 측정하여 배경 계수율, 계측 효율 및 성능 지수를 비교한 결과는 Table 2에 정리되어 있다. Quantulus t1220의 경우 모든 채널(ROI 0-1023)을 이용하여 배경 계수율을 측정했음에도 0.86 cpm의 낮은 값을 보였다. 하지만 Hidex 300 SLL의 경우 모든 채널을 이용하였을 때 37.29 cpm의 높은 값을 보였고 ROI가 좁아질수록 배경 계수율이 줄어듬을 확인할 수 있었다. 그 이유는 Quantulus 1220의 경우 외부 방사능 차폐를 위해 750 kg의 납을 사용해 검출기를 감싸는 구조를 가진 반면 Hidex 300 SLL은 소형 몸체로 인해 Quantulus 1220이 사용한 납의 10% 정도만 차폐재로 사용하였기 때문에 300 SL과 달리 300 SLL은 guard counter도 존재하지만 배경 계수율이 높게 나오는 것으로 확인되었다[11]. 계측 효율은 ROI 0-1023에서 Quantulus 1220이 24.97%, Hidex 300 SLL이 38.8%를 나타내었는데 이는 PMT 구조의 차이에 기인한 것으로 설명된다. 계측 효율이 낮음에도 더 낮은 배경 계수율로 인해 FoM의 경우 Quantulus 1220은 모든 채널에서 725를 기록한 반면, Hidex 300 SLL은 ROI 0-170에서 가장 높은 값인 278을 기록하였다. 이와 같은 현상은 ULL 섬광액을 사용했을 때

도 동일하게 전개되며 ULL을 사용해 만든 배경 방사능 용액을 두 가지 LSC로 측정하여 배경 계수율, 계측 효율 및 성능 지수를 비교한 결과는 Table 3에 정리되어 있다. Quantulus 1220의 경우 ROI 0-1023에서 배경 계수율0.99 cpm, Hidex 300 SLL의 경우 37.80 cpm의 값을 보였고, 계측 효율은 ROI 0-1023에서 Quantulus 1220이 24.34%, Hidex 300 SLL이 39.83%를 나타내었다. FoM의 경우 Quantulus 1220은 모든 채널에서 598을 기록한 반면, Hidex 300 SLL은 ROI 0-170에서 가장 높은 값인 264를 기록하였다. 삼중수소 계측의 유효성 평가를 위해 2025 KRISS 숙련도시험 시료를 두 가지 LSC로 계측한 결과는 Table 4와 같다. KRISS 인증서(R-205-0007)에 의거한 삼중수소의 농도 설정값은 5.35 Bq g^{-1}, 불확도는 신뢰수준 95% (k = 2)에서 0.22였고, Quantulus 1220으로 계측한 삼중수소 농도값은 4.97 Bq g^{-1}, 불확도는 신뢰수준 95% (k = 2)에서 0.22였으며, Hidex 300 SLL로 계측한 삼중수소 농도값은 5.15 Bq g^{-1}, 불확도는 신뢰수준 95% (k = 2)에서 0.22로 계측 및 평가되었다. 두 기기로 분석한 값 모두 숙련도시험 평가방식인 z'-score를 이용해 평가한 결과 각각 −1.88, −1.02로 평가되었다.

4. 결 론

해체 폐기물 내 베타 핵종 분석 기술 고도화를 위해 액체 섬광 계수기인 Quantulus 1220, Hidex 300 SLL과 섬광액 Ultima Gold LLT, Aqualight+ ULL을 사용해 배경 계수율, 베타 핵종 계측 효율, FoM 및 소광 곡선을 비교한 결과 배경 계수율 측면에서 Quantulus 1220이 높은 성능을 나타냈다. Hidex 300 SLL의 경우 차폐재가 더 적게 사용되었으나 ROI 조정을 통해 낮은 배경 계수율을 확보할 수 있었다. 상대적으로 1,2차 섬광체가 더 많이 함유된 LLT를 사용했을 때, ULL을 사용했을 때보다 상대적으로 계측 효율이 높아지고 배경 계수율이 낮아지는 경향이 있으나 방사성 해체 폐기물의 선량을 고려할 때 해체 폐기물 분석 정확성의 큰 차이는 없을 것으로 판단된다. 해체 폐기물에서 발생할 수 있는 대략적인 삼중수소의 선량 기준에 대해서는 면제 준위 및 국내외 인수 기준 사례를 참고하여 8E+8~3.13E+11 Bq g^{-1} 미만이어야 함을 감안할 때 두 LSC 및 두 섬광액을 사용할 경우에 해체폐기물 내 삼중수소 분석에 문제가 없음을 확인할 수 있었다 [18,19]. 또한, 두 LSC를 사용하여 계측한 KRISS 숙련도시험 시료의 삼중수소 농도가 설정값과 유사하게 나오는 것을 확인하여 삼중수소 계측의 유효성을 확보하였음이 증명되었다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 원전해체경쟁력강화기술개발사업의 연구결과입니다(RS-2023-00234176).

참고문헌

1. Yoon YY and Kim Y. 2020. Comparative study of tritium analysis method with high-volume counting vial. *Journal of Radiation Protection and Research* **45**:142-146. https://doi.org/10.14407/jrpr.2020.45.3.142.
2. An EM, Kim JH, Lee HY, Han SJ and Kim BG. 2021. Evaluation of Effects on Tritium Measurement According to HTO Type Sample Preparation Conditions. *Journal of Radiation Science and Technology* **44**:381-387. https://doi.org/10.17946/jrst.2021.44.4.381.
3. Lee J-G, Lee G-H, Lee Y-J, Kim S-I, Yuk D-S and An S-M. 2016. A Study on the Current Status and Trend of Tritium Emission in Domestic Nuclear Power Plant. *Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society Conference* 333-334.
4. Wood MJ, McElroy RGC, Surette RA and Brown RM. 1993. Tritium Sampling and Measurement. *Health Physics* **65**:610-627. https://journals.lww.com/health-physics/fulltext/1993/12000/tritium_sampling_and_measurement.2.aspx.
5. Schubert F and Kallmeyer J. 2023. Liquid scintillation counting at the limit of detection in biogeosciences. *Frontiers in Microbiology* **14**:1-14. https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2023.1194848.
6. Khan M and Um W. 2015. Liquid Scintillation Counting Methodology for 99Tc Analysis: A Remedy for Radiopharmaceutical Waste. *Analytical Chemistry* **87**:9054-9060. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b02279.
7. Jakonić I, Nikolov J, Todorović N, Tenjović B and Vesković M. 2014. Study on quench effects in liquid scintillation counting during tritium measurements. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **302**:253-259. https://doi.org/10.1007/s10967-014-3191-1.
8. Verrezen F, Loots H and Hurtgen C. 2008. A performance comparison of nine selected liquid scintillation cocktails. *Applied Radiation and Isotopes* **66**:1038-1042. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.02.050.
9. Jäggi M and Eikenberg J. 2014. Comparison of the TriCarb and Hidex 300 SL technique using measurements of 241Pu and 90Sr on various samples. *Applied Radiation and Isotopes* **93**:120-125. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.02.022.
10. Lee Y, Jeong S-H, Choi H-Y, Kwon E-H, Kim R-W, Koo H and Oh YH. 2025. Review on the Monitoring Application of Tritium Analysis Method in Seawater. *Journal of Korean Society for Marine Environment and Energy* **28**:35-41.
11. Kim H, Jung Y, Lee W, Choi G-S, Chung KH and Kang MJ. 2016. Comparison of the Quantulus 1220 and 300SL Liquid Scintillation Counters for the Analysis of 222Rn in Groundwater. *Journal of Radiation Protection and Research* **41**:395-401.
12. Priya S, Gopalakrishnan RK and Goswami A. 2014. TDCR measurements of 3H, 63Ni and 55Fe using Hidex 300SL LSC device. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **302**:353-359. https://doi.org/10.1007/s10967-014-3190-2.
13. Copia L, Wassenaar LI, Juvonen R and Oikari T. 2024. Enhancing low-level tritium detection in environmental waters: assessing the Hidex ULLA liquid scintillation counter. *Journal of Environmental Radioactivity* **280**:107545. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2024.107545.
14. KSSN. 2024. Water quality — Tritium — Test method using liquid scintillation counting KS I ISO 9698:2019.
15. Varlam C, Ionita G, Stefanescu I and Steflea D. 2001. Comparative

study between external stadard method and internal standard method for low-level tritium measurements. *International Conference Nuclear Energy in Central Europe* 1-8.
16. Warwick PE, Kim D, Croudace IW and Oh J. 2010. Effective desorption of tritium from diverse solid matrices and its application to routine analysis of decommissioning materials. *Analytica Chimica Acta* **676**:93-102. https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.07.017.
17. Komosa A and Ślepecka K. 2010. Effect of liquid scintillating cocktail volume on 3H and 14C measurement parameters using a Quantulus spectrometer. *Nukleonika* **55**:155-161.
18. Kim B and Kim C-L. 2014. Review of the Acceptance Criteria of Very Low Level Radioactive Waste for the Disposal of Decommissioning Waste. *Journal of the Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology* **12**:165-169. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2014.12.2.165.
19. KORAD. 2025. Acquisition Criteria of Low-and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility (WAC-SIL-2025-2).