Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 2, pp. 117-122, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.2.117

Original article

환경 시료 수준의 삼중수소 측정을 위한 액체섬광계수기(300SLL) 계측조건 최적화 및 검증

이현재[1,2] · 이현철[1,*]

[1]부산대학교 기계공학부, [2]경주시월성원전 방사성폐기물처분시설환경감시기구

Optimization and Validation of Liquid Scintillation Counting Conditions for Environmental Tritium Analysis Using HIDEX 300SLL

Hyun Jae Lee[1,2] and Hyun Chul Lee[1,*]

[1]School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea
[2]Wolseong Nuclear Facility Environment&Safety Monitoring Committee, 19-6 Neunggolyeondang-gil, Munmu-daewang-myeon, Gyeongju-si 38119, Republic of Korea

ABSTRACT Accurate quantification of environmental tritium is essential for radiation safety monitoring. As conventional liquid scintillation counters (LSCs) are being phased out, newly adopted systems require rigorous evaluation due to differences in background shielding characteristics. This study aimed to optimize and validate the measurement conditions of a newly adopted LSC system for low-level tritium analysis. Optimization focused on maximizing the Figure of Merit (FOM) by systematically adjusting instrumental parameters, such as coincidence time and the region of interest (ROI). Performance validation using certified reference materials demonstrated excellent precision and accuracy, with all measurement errors falling well within the expanded uncertainty range. Furthermore, the optimized method achieved a minimum detectable activity (MDA) that fully satisfies regulatory requirements for environmental monitoring. These results confirm that, with proper parameter optimization, the adopted LSC system constitutes a valid and highly reliable method for environmental tritium monitoring.

Key words: Environmental radioactivity, Tritium, Liquid scintillation counting, Optimization, Uncertainty evaluation

1. 서 론

삼중수소(Tritium, ^{3}H)는 수소의 방사성 동위원소로, 12.32년의 반감기를 가지며 최대 18.6 keV (평균 5.7 keV)의 낮은 에너지 베타선을 방출하면서 안정한 헬륨(^{3}He)으로 붕괴한다[1]. 삼중수소는 대기 상층에서 우주선과 질소·산소 원자의 상호작용으로 자연적으로 생성되지만, 1950~1960년대의 대기권 핵실험으로 인해 대량이 환경에 방출되었고, 현재는 원자력 발전소 등 핵시설의 운영 과정에서 발생하여 환경으로 방출되는 주요 핵종 중 하나이다[1,2]. 환경으로 배출된 삼중수소는 대부분 산화물 형태의 삼중수소수(HTO)로 존재하며, 일반 물(H_2O)과 거동이 유사하여 강수 및 증기 교환을 통해 물 순환계에 쉽게 편입된다[2,3]. 이로 인해 토양, 지하수, 지표수뿐 아니라 생물권 전반으로 확산된다. 삼중수소의 베타선은 에너지가 낮아 외부 피폭 영향은 미미하지만, 체내로 유입될 경우 내부 피폭을 유발할 수 있어 원전 주변 환경시료의 삼중수소 농도를 정확히 측정하는 것은 방사선 안전 확보에 필수적이다[1,2].

환경 중 저준위 삼중수소 분석에는 액체섬광계수법(LSC, Liquid Scintillation Counting)이 널리 사용된다[4]. 이 방법은 전처리가 간단하고 자동 시료 교환 장치로 대량의 시료를 효율적으로 측정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 원전 외곽이나 자연방사능 수준의 시료는 삼중수소 농도가 매우 낮아 신뢰성 있는 측정을 위해 높은 계측 효율과 낮은 배경계수율을 갖춘 저준위 LSC가 필요하다[4,5]. LSC의 성능은 계측 효율(E)과 배경계수율(B)로부터 산출되는 성능지수(FOM, Figure of Merit = $E^2 \cdot B^{-1}$)로 평가되며, 이는 최소검출농도(MDA, Minimum Detectable Activity)를 결정하는 핵심 요소이다[6,7].

국내에서는 Perkin Elmer(현 Revvity)사의 Quantulus 1220

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

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Hyun Chul Lee
Tel: +82-51-510-2318, E-mail: hyunchul.lee@pusan.ac.kr

Received 13 December 2025 **Revised** 23 March 2026 **Accepted** 25 June 2026

이 저준위 삼중수소 분석의 표준 장비로 활용되어 왔으나, 현재 단종되어 대체 장비의 검증이 필요하다[8]. 최근에는 HIDEX 300SLL, HIDEX ULLA, Revvity Quantulus GCT 6220 등이 사용 가능하나, HIDEX 300SLL은 차폐 성능이 낮아 배경계수율이 높은 단점이 있다[8,9]. 따라서 본 연구에서는 HIDEX 300SLL의 계측 효율 향상과 배경계수율 저감을 위한 분석 조건을 최적화하고, 계측시간 · 관심영역(ROI) · 동시계수시간(CT, Coincidence Time) 등 주요 파라미터를 체계적으로 평가하였다. 이를 통해 환경방사능 감시 기준(5 $Bq \cdot L^{-1}$)[10]을 만족하는 낮은 MDA를 확보함으로써 HIDEX 300SLL의 신뢰성을 검증하고, 향후 환경 중 삼중수소 분석에 효과적으로 활용할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다.

2. 재료 및 방법(Materials and methods)

본 연구에서는 환경 준위의 저준위 삼중수소 측정을 위해 액체섬광계수기(LSC)로 HIDEX사의 300SLL 모델을 사용하였다. 시료와 혼합하여 섬광을 유발하는 액체섬광칵테일은 Revvity사의 저준위 분석용 제품인 Ultima Gold LLT를 사용하였다. 표준물질 및 시료의 정밀한 희석을 위해 OHAUS사의 분석용 저울(Adventurer, 모델 C223200679)을 사용하였다.

2.1. 검증용 표준시료 제작

실험에 사용된 삼중수소 표준물질(KRISS CRM 205-01-201, 일련번호 H-3-24-05)은 한국표준과학연구원(KRISS)에서 인증받은 것으로, 기준일(2024년 5월 1일 09:00 KST) 기준 비방사능이 2.11 $kBq \cdot g^{-1}$ (상대확장불확도 5.0%, k = 2)인 것을 사용하였다.

이 표준물질을 2단계로 정밀 희석하여 2.5, 3.5, 5, 10, 15, 20, 30, 50 $Bq \cdot L^{-1}$ 농도의 검증용 표준시료 8종을 제작하였다. 1차 희석은 표준물질 0.1006 g을 희석수 100.0000 g에 희석하였고, 2차 희석은 1차 희석 용액을 목표 농도에 맞게 희석수로 추가 희석하여 제작하였다. 최종 측정 시료는 제작된 각 농도의 표준시료 8 g과 액체섬광칵테일 12 g을 20 mL 용량의 폴리에틸렌 바이알(vial)에 넣어 총량이 20 g이 되도록 준비하였다.

2.2. 측정 조건 최적화

HIDEX 300SLL 계측기의 최적 분석 조건을 확립하기 위해 성능지수(FOM)를 이용하였다. FOM은 식 (1)과 같이 계측 효율(E, Efficiency)의 제곱을 배경 계수율(B, Background)로 나누어 계산하며, 이 값이 높을수록 저준위 시료 분석에 유리하다[6,7].

$$FOM = \frac{E^2}{B} \quad (1)$$

최적의 FOM 값을 찾기 위해 동시계수 시간(CT)과 관심 영역(ROI)을 주요 변수로 설정하였다. 동시계수 시간은 10 ns부터 28 ns까지 1 ns 간격으로 변경하였고, 관심 영역(ROI)은 삼중수소의 베타선 에너지 스펙트럼(0-18.6 keV)을 고려하여 0-350 채널 범위 내에서 시작 채널과 종료 채널을 다양하게 조합하여 FOM 값의 변화를 분석하였다. 또한, 소광(Quenching) 효과를 보정하기 위해 PerkinElmer (현 Revvity)사의 삼중수소 소광 표준선원(P/N 6010704A, Lot No. 10, 기준일 2023년 6월 20일, 평균 방사능 106,170 dpm ± 3%)를 이용한 교정을 수행하였다[7].

2.3. 방사능 농도 및 최소검출하한치 산출

검증용 표준시료의 방사능 농도는 식 (2)를 이용하여 산출하였다.

$$A = \frac{CPM_{sample} - CPM_{BKG}}{60 \times E \times W} \quad (2)$$

A: 삼중수소 방사능 농도($Bq \cdot L^{-1}$)
CPM_{sample}: 시료의 분당 계수율(Counts Per Minute)
CPM_{BKG}: 배경 시료의 분당 계수율(Counts Per Minute)
E: 계측 효율(%, 분율로 계산 시 100 생략)
W: 시료량(L)

분석법의 검출 능력을 평가하는 지표인 최소검출하한치(MDA)는 식 (3)을 이용하여 계산하였다[4,6].

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{N_B}}{E \times T \times W \times Y} \quad (3)$$

N_B: 배경 계수치(counts)
E: 계측 효율(%, 분율)
T: 계측 시간(seconds)
W: 시료량(L)
Y: 화학적 회수율(%, 본 실험에서는 100%로 간주)

2.4. 측정 불확도 평가

측정 결과의 신뢰도를 확보하기 위해 국제측정불확도표현지침(GUM, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)에 따라 불확도를 평가하였다[10]. 불확도 요인은 측정의 반복성에 기인하는 A형 불확도와 교정성적서, 인증서 등 신뢰할 수 있는 정보에 근거하는 B형 불확도로 구분하였다. 방사능 농도 산출에 영향을 미치는 주요 불확도 요인들을 Table 1과 같이 정리하고, 시료량 측정(u_W), 표준물질 방사능(u_{CPM}), 소광 표준선원(u_{Quench})과 최종적으로 삼중수소 방사능 농도의 평가를 위해 순계수율 측정 반복성(u_{Net}) 등을 고려하였다.

2.5. 삼중수소 방사능 농도 검증

최적화된 조건의 신뢰도를 검증하기 위해, 제작된 8개의 검증용 표준시료를 60분 씩 10회 반복 측정하였다. 측정된 방사능 농

Table 1. Uncertainty budget for the verification of tritium sample activity

Parameter	Measured value (x_i)	Type	Standard uncertainty ($u(x_i)$)	Relative standard uncertainty (u)	Probability distribution	Sensitivity factor (c_i)	ν
Balance (x_W)	50 g	B	0.245 mg	0.00049%	Normal	1.0	∞
Certified reference material (x_{CPM})	2.11 kBq·g^{-1}	B	2.5%	2.5%	Normal	1.0	∞
Quenching standard Source (x_{Quench})	106,170 dpm	B	1.5%	1.5%	Normal	1.0	∞

도의 평균값과 이론적인 표준물질의 방사능 농도 값을 비교하였다. 이때, 시료의 순계수율 측정 반복성(u_{Cnet})을 포함하여 8개 시료의 각각 총 확장불확도를 허용 범위로 설정하고, 측정값이 이 범위 내에 있는지 확인하여 약 95% 신뢰수준에서 결과의 유의성을 평가하였다. 또한, 측정 결과의 통계적 일관성 검증을 위해 카이제곱 검정(X^2-test)을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰(Results and Discussion)

3.1. 액체섬광계수기 성능지수 산출결과

본 연구의 목적인 저준위 환경 시료의 삼중수소 농도를 신뢰도 높게 측정하기 위해서는 계측기의 최소검출한치(MDA)를 낮추는 것이 가장 중요하다. MDA는 계측 효율(E)과 배경 계수율(B)에 의해 결정되며, $E^2 \cdot B^{-1}$로 정의되는 성능지수(FOM)에 반비례한다[6,7]. 따라서 HIDEX 300SLL 계측기의 성능지수(FOM)을 최대화하는 것이 MDA를 최소화하는 핵심 과정이다. 이를 위해서는 계측기의 주요 변수(Parameter)인 동시계수 시간(CT)과 관심영역(ROI)을 체계적으로 변경하며 성능지수(FOM) 값의 변화를 분석하였다. Fig. 1은 동시계수 시간(CT)을 10 ns부터 28 ns까지 1 ns 간격으로, 관심영역(ROI)의 시작 채널과 종료 채널을 0-350 채널 범위 내에서 다양하게 조합하였을 때의 성능지수(FOM) 값을 열지도(Heatmap)으로 나타낸 것이다. 여기서 열지도는 두 독립변수(CT와 ROI)의 조합에 따른 결과값(FOM)의 변화를 색상의 스펙트럼으로 시각화한 그래픽 기법으로, 본 계측 시스템의 성능이 극대화되는 최적화 구간을 직관적으로 판별하기 위해 활용되었다. 열지도 분석 결과, 동시계수 시간(CT)은 24 ns에서 26 ns 사이, 관심영역(ROI)은 0-210 채널 범위(예: 10-180, 20-180 등)에서 전반적으로 가장 높은 성능지수(FOM) 값을 나타내는 '최적 영역'(Heatmap 상 노란색 부분)이 명확하게 관찰되었다.

첫째, 동시계수 시간(CT)이 24 ns 미만으로 너무 짧을 경우, 삼중수소의 베타 붕괴로 인해 섬광체(Cocktail)에서 발생하는 실제 섬광 신호(Scintillation pulse) 중 상대적으로 느리게 감쇄하는 지연 형광(Delayed fluorescence) 성분이 손실될 수 있다. 이는 광전자 증배관(PMT, Photomultiplier Tube)에서 신호로 인식되지 못하고 노이즈로 배제되어 계측 효율(E)의 감소를 초래한

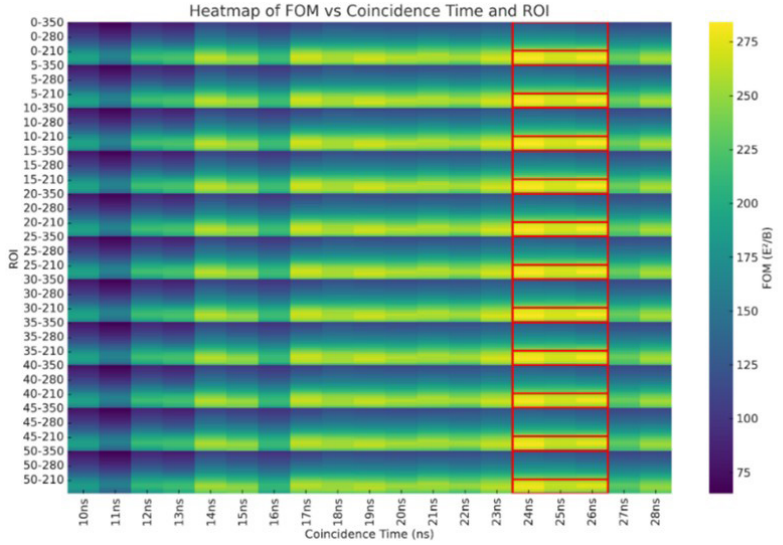

Fig. 1. Heatmap showing the variation of FOM as a function of CT and ROI

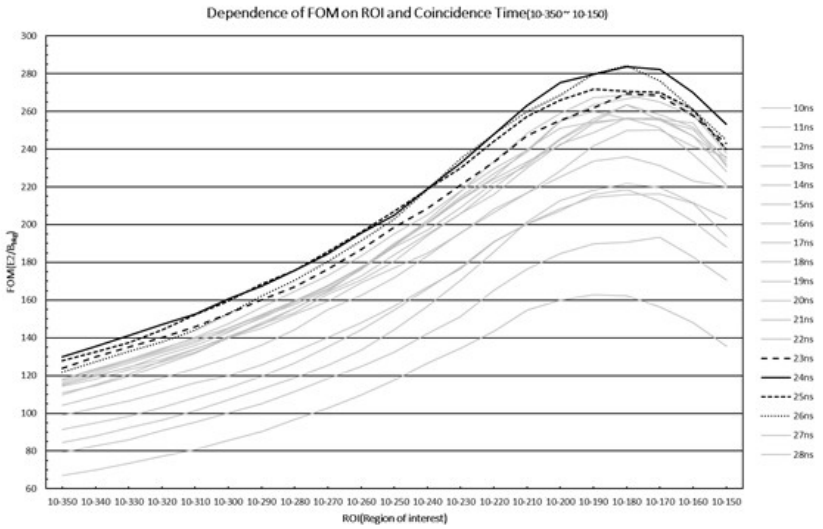

Fig. 2. Optimization of counting conditions for the HIDEX 300SLL LSC, showing FOM values as a function of various ROI settings (10-350 to 10-150 ch) and CT(10 ns to 28 ns)

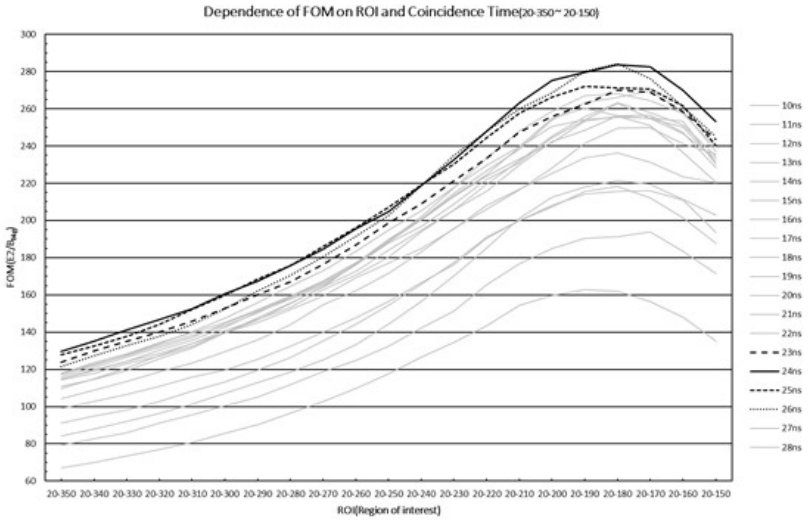

Fig. 3. Optimization of counting conditions for the HIDEX 300SLL LSC, showing FOM values as a function of various ROI settings (20-350 to 20-150 ch) and CT(10 ns to 28 ns)

다. 성능지수(FOM)가 E^2에 비례하므로 효율의 작은 손실도 성능지수(FOM) 값에 큰 영향을 미친다. 반대로, 동시계수 시간(CT)가 26 ns를 초과하여 너무 길어질 경우, 광전자 증배관(PMT)에서 각각 독립적으로 발생하는 열잡음(Thermal Noise)와 같은 배경 사건(Background Event)이 설정된 시간 창 내에 우연히 동시에 기록될 확률, 즉 우연 동시계수(Accidental Coincidence)가 급격히 증가한다. 이는 배경 계수율(B)의 상승을 유발하여 성능지수(FOM)($E^2 \cdot B^{-1}$)을 저하시킨다. 따라서 Fig. 1에서 관찰된 24-26 ns의 최적 범위는, 실제 삼중수소 신호는 대부분 수용하면서(높은 E) 우연성 노이즈는 효과적으로 제거하는(낮은 B) 최적의 균형점(Trade-Off)이 형성되는 구간임을 시사한다[7].

둘째, 관심영역(ROI) 설정의 영향이다. ROI를 0-350 채널처럼 매우 넓게 설정하면, 삼중수소의 최대 에너지(18.6 keV) 스펙트럼을 모두 포함하여 계측 효율(E)은 최대화될 수 있다. 그러나 이 경우, 삼중수소 신호와 무관한 우주선(Cosmic ray)이나 외부 방사선에 의한 컴프턴 산란(Compton Scattering) 영역, 그리고 광전자 증배관(PMT) 자체 노이즈 등 더 높은 에너지 채널의 배경 계수까지 모두 포함하게 된다. 이는 E의 증가분보다 B의 증가분이 훨씬 더 크기 때문에 성능지수(FOM)을 급격히 저하시킨다. 반대로 ROI를 10-150 채널처럼 매우 좁게 설정하면 배경 계수율(B)

Table 2. Comparison between Theoretical and Measured Values of Verification Samples

Reference Value ($Bq \cdot L^{-1}$)	Measured Value ($Bq \cdot L^{-1}$)	Relative Standard uncertainty (u)	Combined Standard Uncertainty (u_c)	Expanded Uncertainty (U) (Confidence level about 95%, k=2)	Deviation between Theoretical and Measured (%)	Evaluation
2.5	2.59	2.26%	3.69%	7.38%	3.5%	Accepted
3.5	3.55	1.72%	3.38%	6.77%	1.4%	Accepted
5	5.02	1.27%	3.18%	6.36%	1.5%	Accepted
10	10.2	1.92%	3.49%	6.98%	-1.8%	Accepted
15	14.7	0.83%	3.03%	6.06%	-0.2%	Accepted
20	19.5	1.96%	3.51%	7.03%	2.5%	Accepted
30	31.4	0.77%	3.01%	6.03%	-4.7%	Accepted
50	50.6	1.31%	3.19%	6.39%	-1.2%	Accepted

은 효과적으로 낮출 수 있으나, 삼중수소 베타 스펙트럼의 상당 부분, 특히 계수 효율에 크게 기여하는 고에너지 영역을 손실하게 된다. E^2에 비례하는 FOM의 특성상 이는 치명적인 손실이며, Fig. 2, 3의 상세 그래프에서 관심영역(ROI) 상한 채널이 약 170-190 채널 부근에서 정점을 찍고 그 이상에서는 성능지수(FOM)이 다시 감소하는 경향으로 명확히 확인된다.

결론적으로, Fig. 1의 열지도 결과는 동시계수 시간(CT) 24-26 ns와 관심영역(ROI) 0-210 채널(또는 10-180) 부근의 조합이 저에너지 영역의 노이즈와 고에너지 영역의 배경 방사선을 효과적으로 차단하면서 삼중수소 베타선의 주요 시그널 영역을 대부분 포함하는 최적의 계측 조건임을 입증한다[6,7].

3.2. 검증용 표준시료를 이용한 측정법 유효성 평가

3.1절의 성능지수(FOM) 최적화 결과는 장비의 상대적인 성능을 평가한 것이다. 따라서 이 조건이 실제 다양한 농도의 시료 측정에서 정확도(Accuracy)와 정밀도(Precision)를 보장하는지 실증적으로 검증(Validation)하는 과정이 필수적이다. 본 연구에서는 3.1절의 최적 영역 내에서 가장 안정적이고 높은 성능지수(FOM)을 보인 동시계수 시간(CT) 26 ns와 관심 영역(ROI) 20-180 채널을 최종 계측 조건으로 확립하였다. 이 조건의 유효성을 평가하기 위해, 2.1절에서 제작한 2.5 $Bq \cdot L^{-1}$부터 50 $Bq \cdot L^{-1}$까지 8개 농도의 검증용 표준시료(CRM 기반)를 10회 반복 측정한 결과를 Table 2에 나타내었다.

식 (4) Combined Standard Uncertainty (u_c), 식 (5) Expanded Uncertainty (U)를 이용하여 시료별로 각각 산출하여 평가하였다.

$$u_c = \sqrt{u_W^2 + u_{CRM}^2 + u_{Quench}^2 + u_{Net}^2} \quad (4)$$

u_W: 저울에 대한 상대표준불확도

u_{CPM} : 표준물질 방사능 농도에 대한 상대표준불확도

u_{Quench} : 소광 표준선원 방사능 농도에 대한 상대표준불확도

u_{Net} : 각각의 검증용 표준시료 순계수율 측정 반복성에 대한 상대표준불확도

$$U = u_c \times 2 \text{ (Confidence Level about 95\%, } k = 2) \quad (5)$$

측정법의 정확도는 '이론값(Reference Value)' 대비 '계측값(Measured Value)'의 오차(Deviation)로 평가하였다. Table 2에서 보듯이, 계측 오차는 15 $Bq \cdot L^{-1}$ 시료에서 −0.2%로 이론값에 거의 완벽하게 근접하였으며, 30 $Bq \cdot L^{-1}$ 시료에서 −4.7%로 가장 큰 편차를 보였다. 중요한 점은 2.5 $Bq \cdot L^{-1}$ (환경방사능 감시 기준 5 $Bq \cdot L^{-1}$ 이하)의 극저준위 영역에서 +3.5%, 50 $Bq \cdot L^{-1}$의 상대적 고농도 영역에서 −1.2%로, 연구 대상 전 농도 범위에 걸쳐 계측 오차가 일관되게 5% 미만으로 매우 낮게 유지되었다는 것이다. 특히 오차의 부호가 양(+)과 음(−)으로 고르게 분포하는 것은, 본 계측 시스템에 특정 방향으로 치우치는 계통 오차(Systematic Error)가 존재하지 않으며, 이론값과 계측값의 차이가 통계적인 변동(Random Fluctuation) 내에서 잘 관리되고 있음을 시사한다[6]. 측정법의 정밀도(Precision)는 'Relative Standard uncertainty (u)'로 평가하였다. 이 값은 10회 반복 측정의 표준편차를 평균값으로 나눈 A형 불확도로, 0.77% (30 $Bq \cdot L^{-1}$)에서 2.26% (2.5 $Bq \cdot L^{-1}$) 범위로 산출되었다. 모든 농도에서 3% 미만의 낮은 상대 표준불확도를 보인 것은, 확립된 최적 조건(CT 26 ns, ROI 20-180) 하에서 HIDEX 300SLL 장비가 매우 안정적인 계측 재현성을 제공함을 의미한다. 측정 결과의 최종 신뢰도는 '계측 오차(Deviation)'와 '확장불확도(Expanded Uncertainty)'를 비교하여 통계적으로 판정하였다. 확장불확도는 측정 반복성(A형 불확도)과 2.5절에서 산출한 B형 불확도(저울, 표준물질 인증서 등)를 모두 합성(Combined Standard Uncertainty)한 후, 약 95%의 신뢰수준($k = 2$)으로 확장한 값이다. Table 2의 모든 농도에서 |Deviation| < Expanded Uncertainty 관계가 명확하게 성립하였다[6,12]. 이는 측정된 값과 이론값의 차이(오차)가, 본 측정 시스템의 고유한 불확도 범위를 벗어나지 않았음을 의미한다. 즉, 관찰된 오차는 '잘못된 측정'이 아니라 95% 신뢰수준 하에서 통계적으로 충분히 발생 가능한, 유의미한 오차임을 검증한 것이다. 결론적으로, 2.5 $Bq \cdot L^{-1}$의 저준위 시료를 포함한 전 농도 범위에서 계측 오차가 확장불확도 이내로 관리됨을 확인하였다. 이는 본 연

구에서 확립한 HIDEX 300SLL의 최적화 조건(CT 26 ns, ROI 20-180)이, 단종된 Quantulus 1220을 대체하여 저준위 환경 시료 중 삼중수소 농도를 분석하는 데 통계적으로 유효하고(Valid) 신뢰할 수 있는 장비임을 입증한다[8,9,12].

4. 결 론

본 연구는 HIDEX 300SLL을 저준위 환경 삼중수소 분석에 활용하기 위한 계측 조건 최적화 및 유효성 검증을 목표로 수행되었다. HIDEX 300SLL은 차폐성능이 낮아 배경계수율이 높다는 한계가 있으나, 이는 최소검출농도(MDA)와 직결되는 성능지수(FOM)의 최적화를 통해 극복 가능할 것으로 판단하였다[6,7]. 이를 위해, 계측기의 주요 변수인 동시계수 시간(CT)과 관심영역(ROI)을 체계적으로 변경하며 FOM 값을 분석하였다. 그 결과, 동시계수 시간(CT)는 24 ns에서 26 ns 사이, 관심영역(ROI)는 상한 채널 170에서 190범위에서 가장 높은 성능지수(FOM) 값을 나타내는 최적 구간을 명확히 식별하였다. 이는 LSC의 기본 원리에 따라, 동시계수 시간(CT)과 관심영역(ROI)이 너무 좁으면 삼중수소 신호의 손실(E 감소)이 발생하고, 너무 넓으면 불필요한 노이즈 및 배경 계수(B 증가)가 포함되어 성능지수(FOM)가 저하된다는 고찰 내용과 정확히 일치하는 결과이다[7].

도출된 최적 조건 중 일부인 (CT 26 ns, ROI 20-180 ch)의 실증적 유효성을 검증하기 위해, KRISS 인증표준물질 기반의 2.5 $Bq \cdot L^{-1}$에서 50 $Bq \cdot L^{-1}$ 농도 범위의 검증용 표준시료 8종을 10회 반복 측정하였다. 첫째, 측정 정밀도(Precision) 평가에서 A형 상대표준불확도가 0.77%에서 2.26% 이내로 매우 낮게 나타나, 최적화된 조건에서 장비가 안정적인 계측 재현성을 제공함을 확인하였다. 둘째, 측정 정확도(Accuracy) 평가에서 이론값 대비 계측 오차는 –4.7%에서 +3.5% 사이로, 환경방사능 감시 기준(5 $Bq \cdot L^{-1}$) 이하의 저준위 시료를 포함한 전 농도 범위에서 5% 미만의 높은 정확성을 보였다. 마지막으로, 가장 중요한 통계적 신뢰성(Reliability) 평가에서, 8종의 모든 시료에서 관찰된 '계측 오차'가 측정 반복성(A형)과 시스템(B형) 불확도를 모두 포함한 '총 확장불확도' 범위 내에 존재함을 확인하였다. 이는 본 측정법이 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유효함(Valid)을 입증하는 것이다[6]. 또한, 60분 계측으로 2.5 $Bq \cdot L^{-1}$ 수준의 MDA를 달성하여 환경방사능 감시 기준을 충분히 만족시켰다[11].

다만, 본 연구에서 수행한 동시계수 시간(CT)과 관심영역(ROI) 조절은 특정 구간을 물리적으로 잘라내는 하드웨어적 최적화로, 신호 손실이나 노이즈 포함을 완전히 배제하기 어렵다는 근본적인 한계가 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 이러한 기계적 절삭 방식에서 벗어나, 잘리는 영역 없이 전체 에너지 스펙트럼 자체를 수학적으로 분석하고 활용하는 방향(Spectral Deconvolution 등)의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

결론적으로, 본 연구는 HIDEX 300SLL이 적절한 계측 조건 최적화를 통해 저준위 환경 시료 중 삼중수소 농도를 분석하는 데 통계적으로 유효하고 신뢰할 수 있는 방법론을 제공함을 입증하였으며[4,12], 이는 향후 관련 분야의 환경방사능 감시 및 분석에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Okada S and Momoshima N. 1993. Overview of tritium: characteristics, sources, and problems. *Health Physics* **65**(6):595-609. https://doi.org/10.1097/00004032-199312000-00001.
2. Eyrolle F, Ducros L, Le Dizès S, Beaugelin-Seiller K, Charmasson S, Boyer P and Cossonnet C. 2018. An updated review on tritium in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity* **181**:128-137. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
3. EcoMetrix Incorporated. 2009. Investigation of the Environmental Fate of Tritium in the Atmosphere. INFO-0792. Canadian Nuclear Safety Commission, Ottawa, Ontario.
4. Villa M and Manjón G. 2004. Low-level measurements of tritium in water. *Applied Radiation and Isotopes* **61**:319-323. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.03.027.
5. Erchinger JL, Orrell JL, Aalseth CE, Bernacki BE, Douglas M, Fuller ES, Keillor ME, Marianno CM, Morley SM, Mullen CA, Panisko ME and Warren GA. 2017. Background characterization of an ultra-low background liquid scintillation counter. *Applied Radiation and Isotopes*. **126**:168-170. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.01.032.
6. Lee MH, Shin HS, Hong KH, Cho YH and Lee CW. 1999. Determination of minimum detectable activity in environmental samples. *Journal of the Korean Association for Radiation Protection* **24**(3):171-184.
7. L'Annunziata MF, Tarancón A, Bagán H and García JF. 2020. Liquid scintillation analysis: principles and practice. In: L'Annunziata MF (ed.), *Handbook of Radioactivity Analysis*, 4th ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 575-801.
8. Kim H, Jung Y, Lee W, Choi GS, Chung KH and Kang MJ. 2016. Comparison of the Quantulus 1220 and 300SL Liquid Scintillation Counters for the Analysis of ^{222}Rn in Groundwater. *Journal of Radiation Protection and Research* **41**(4):395-401. https://doi.org/10.14407/jrpr.2016.41.4.395.
9. Kang KK and Lee HJ. 2025. Comparison and Analysis of Tritium Measurement Using a Liquid Scintillation Counter. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea.
10. JCGM. 2008. JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections). 1st ed. 134pp. Joint Committee for Guides in Metrology, Sèvres, France.
11. NSSC. 2017. Notice No. 2017-65: Regulations on the Radiological Environmental Survey and Dose Assessment around Nuclear Facilities. Nuclear Safety and Security Commission, Seoul, Korea.
12. Hofstetter KJ, Cable PR, Beals DM, Noakes JE, Spaulding JD, Neary MP and Peterson R. 1998. Field Analyses of Tritium at Environmental Levels. WSRC-MS-98-00042. Westinghouse Savannah River Company, Aiken, SC