JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(3) : 219-224 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.3.219

수중 방사선 모니터링 시스템의 성능평가를 위한 수중 내 최소검출가능농도 산출

박장근[1], 정성희[1], 오대민[2], 문진호[1,*]

[1]한국원자력연구원 동위원소연구부, [2]한국건설기술연구원 환경연구본부

Evaluation of Minimum Detectable Activity for Underwater Radiation Monitoring System

Jangguen Park[1], Sung-Hee Jung[1], Daemin Oh[2] and Jinho Moon[1,*]

[1]Radioisotope Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero, 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea

[2]Department of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

Abstract A high-efficiency underwater radiation monitoring system, HydroGamma, has been developed for detecting ^{137}Cs and ^{131}I in the event of waterborne radiation contamination. The system consists of a 3-inch NaI (Tl) detector, solar panels for power supply, data acquisition and transmission modules, and batteries. HydroGamma also includes a ^{40}K calibration source for remote performance evaluation and energy calibration. In this study, some simulations and experiments were carried out to evaluate the minimum detectable activities (MDA) of HydroGamma. We installed the HydroGamma at Tapjeongho Lake in Nonsan-si and acquired background data since MDA is calculated based on the experimental background data. The results show that the minimum detectable activities for ^{137}Cs and ^{131}I were 1.78 Bq L^{-1} and 1.81 Bq L^{-1}, respectively even though the gamma rays emitted from ^{40}K (1,460 keV) affect the minimum detectable activities for them.

Key words: Underwater radiation monitoring, Radioactive contamination, Conversion factor, Minimum Detectable activity, HydroGamma

1. 서 론

우리나라는 매장되어 있는 자원이 매우 한정적이기 때문에 원자력 발전이 전력 생산에 필수적이며, 인근 국가에서도 원자력 발전을 통한 전력 생산이 활발하게 이루어지고 있다. 하지만 1986년의 체르노빌 사고와 2011년의 후쿠시마 사고에서 볼 수 있듯이, 우리나라 국내 혹은 인근 국가의 원자력 발전소에서 사고가 발생되는 경우 기류로 인해 방사능 낙진이 우리나라로 유입되고, 대기에 존재하는 방사능 낙진이 중력 혹은 비 등으로 낙하하여 수계가 오염될 수 있다[1-3].

물은 국가적 안보자원으로서 홍수·가뭄 등 자연재해와 지속적 오염에 대비하여 보호되고 있으나, 하천과 댐의 수계는 최근 점점 큰 위협으로 발전하고 있는 방사능 위험가능성으로부터 전혀 보호되지 못하고 있다. 특히, 우리나라는 취수원의 대부분이 하천표류수 및 댐으로 이루어져 있

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author. Jinho Moon
Tel. +82-42-868-8048 Fax. +82-42-868-8448 E-mail. jinhomoon@kaeri.re.kr
Received 12 May 2023 Revised 9 August 2023 Accepted 12 September 2023

으며, 여기에서 취수하는 비율이 97.8%로 다른 나라들에 비해 매우 높은 수준이기 때문에 방사능 오염 상황이 발생하였을 때 신속하게 이를 감지하고 대응하는 것이 필수적이다[3].

본 연구에서는 수계 방사능 오염이 발생하였을 때 ^{137}Cs과 ^{131}I의 신속한 감지가 가능한 고효율 수중 방사선 상시계측시스템인 HydroGamma의 개발을 위하여 수행되었다. HydroGamma는 수중에 배치되어 무선으로 운영이 가능한 시스템이기 때문에 교정용 선원으로 사용할 ^{40}K이 포함된 KCl을 제작하고, 이를 시스템 내부에 배치하여 정기적인 성능평가 및 에너지 보정이 원격으로 가능하도록 하였다. ^{40}K이 방출하는 고 에너지(1,460 keV)의 감마선과 매우 긴 반감기(1.2×10^{9}년)는 방사선 계측장비의 성능을 평가하는 데 매우 용이하다. 1,460 keV의 감마선은 다른 감마선으로부터 간섭받을 확률이 매우 낮기 때문에 이를 계측하여 방사선계측 효율의 지속적인 평가 및 보정이 가능하며, 매우 긴 반감기로 인하여 장기간 시스템을 운영하더라도 선원의 교체로부터 자유로워진다. 또한, ^{40}K은 방사선 계측 스펙트럼의 에너지 보정에도 사용된다. 방사선계측기는 기본적으로 채널을 기준으로 방사선을 기록하며, 이 채널은 미리 알고 있는 에너지의 감마선을 방출하는 선원을 이용하여 에너지로 보정이 된다. 하지만 이렇게 획득되는 에너지 보정인자는 방사선 계측기의 주변 온도, 인가 전압 등에 의해서 상시로 변화하기 때문에 이를 확인하고 수정하기 위하여 ^{40}K이 사용된다. 특히, ^{40}K은 자연에서 존재하여 방사선 안전규제에 적용되지 않기 때문에 사용이 매우 편리하여 이미 다양한 방사선계측 상용 장비에서 지속적인 성능평가에 활용되고 있다. 하지만 KCl이 HydroGamma에 장착될 경우 ^{40}K이 방출하는 1,460 keV의 산란 감마선이 계측 대상 선원인 ^{137}Cs (662 keV)과 ^{131}I (364 keV)의 광전피크 영역에서도 계측이 되기 때문에 시스템 최소검출농도에 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 KCl을 사용한 HydroGamma의 최소검출농도를 몬테칼로 전산모사와 실험을 통해 획득하였다[4-9].

2. 재료 및 방법

2.1. 수중 방사선 상시계측시스템(HydroGamma) 제작

HydroGamma는 Fig. 1과 같이 자체 전원 공급을 위한 태양광 모듈, 방사선 계측기 모듈, 데이터 획득 및 전송을 위한 데이터 수집 모듈, 배터리, 하우징 등으로 구성된다. 방사선 계측기 모듈에는 광전자증배관(photomultiplier tube, PMT)이 일체형으로 제작된 Amcrys사 3×3 inch NaI (Tl) 원통형 계측기가 되었다. 또한, 광전자증배관 구동을 위한 고전압 분배회로와 계측신호를 증폭시킬 수 있는 증폭회로가 포함된다[10]. 데이터 수집 모듈은 방사선 계측기 신호를 에너지별로 수집하기 위한 회로로 다중채널분석기(multi-channel analyzer, MCA)를 포함하며, 계측기 신호를 바탕으로 스펙트럼을 생성하고, 패킷을 생성할 수 있다. HydroGamma가 수면에 떠 있을 수 있도록 부력재를

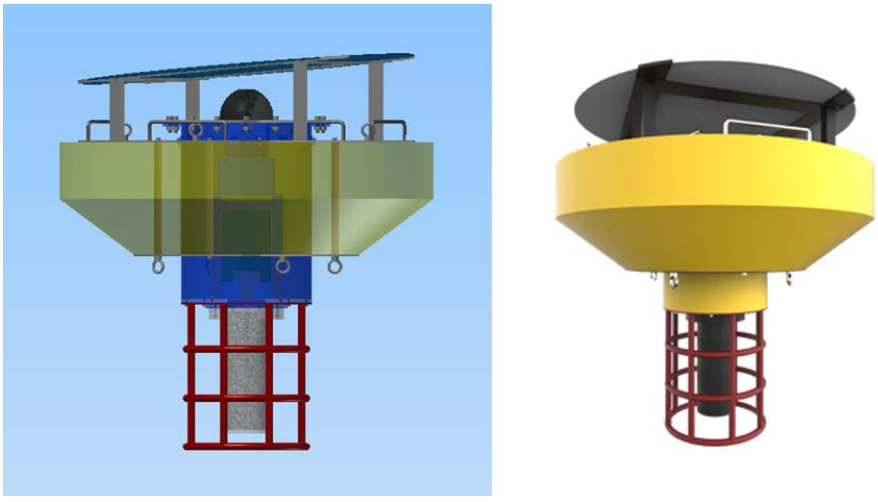

Fig. 1. Underwater radiation monitoring system (HydroGamma).

Table 1. Underwater radiation monitoring system HydroGamma specification

Item	Specification
Detector type and size	NaI (Tl) 3 × 3 inch 8 stage 14 Pin
High voltage	350~1,250 V
Energy range	20~3,000 keV
Energy resolution	< 8% @ ^{137}Cs 662 keV
Channels	2,048 ch
ADC	12 bit, > 60 MSPS
Sensors	Temperature and GPS
Data acquisition time	Minimum 3 sec interval
Communication	LTE-M or LoRa
Power	Input 12 V, 0.5 A
Batteries	Solar pannel: 80 W
	Lead-acid battery: 70 Ah

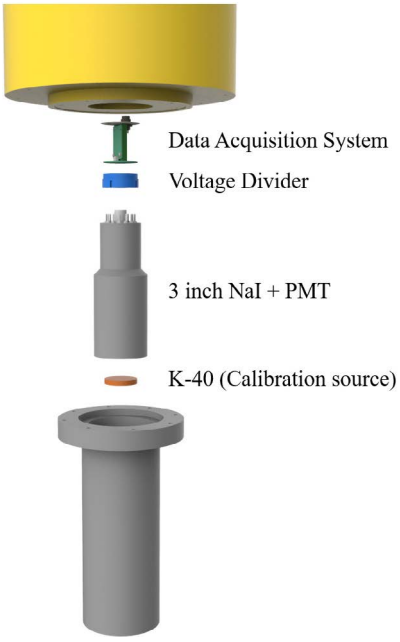

Fig. 2. HydroGamma with KCl for self-calibration and performance evaluation.

상부에 설치하고, 시스템 구조상 외부 충격에 가장 취약한 계측부를 보호할 수 있는 구조물을 설치하였다. Table 1은 HydroGamma의 세부 사양을 보여준다.

^{40}K이 포함된 KCl 30 g은 샬레 형태로 제작되어 Fig. 2와 같이 HydroGamma 시스템 최하단부에 방사선 계측기와 맞닿게 배치되었다. HydroGamma 시스템에 추가된 KCl은 시스템의 원격·상시 자체교정을 위하여 사용된다.

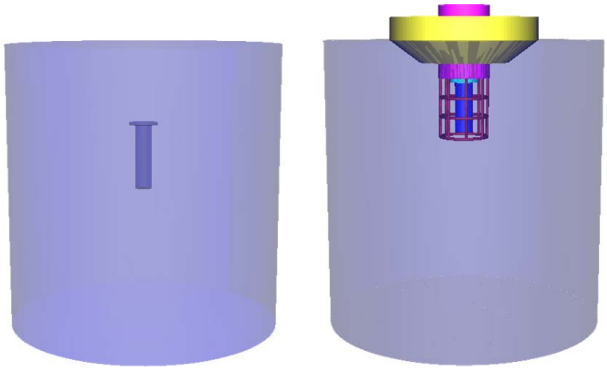

Fig. 3. Waterproof detector (left) and HydroGamma (right) for MCNP6.

2.2. 수중 내 ^{137}Cs 및 ^{131}I 농도환산인자 획득

기존에 실험과 MCNP6 전산모사를 통하여 수조 중심에 위치한 단순한 형태의 방수형 3인치 NaI(Tl) 계측기에 대한 농도환산인자를 획득한 바 있다[11]. ^{68}Ga (511 keV) 선원을 Ge/Ga 제너레이터로부터 획득하여 수조에 주입하고 물과 섞은 뒤에 방수형 3인치 계측기를 설치하고 계측 값을 획득하였으며, 이를 동일한 조건의 전산모사 데이터 (F8 tally)와 비교하여 보정 값을 산출하였다. 이렇게 산출된 보정 값은 ^{137}Cs과 ^{131}I 선원의 계측 값을 예측하는 데 사용되었으며, 이를 통해 농도환산인자를 각각 1.74×10^{-2} (Bq L^{-1}) count^{-1}, 1.30×10^{-2} (Bq L^{-1}) count^{-1}로 획득하였다. 하지만 방수형 3인치 계측기와 HydroGamma는 구조나 수중 내 위치가 Fig. 3과 같이 서로 상이하기 때문에 HydroGamma의 농도환산인자를 획득하기 위하여 MCNP6 전산모사를 수행하였다[12]. 전산모사에서 HydroGamma의 구조는 실제 구조와 동일하게 구현되었으며, ^{137}Cs과 ^{131}I 선원은 수조 내부에 균일하게 분포하도록 설정되었다.

2.3. 수중 내 방사선 최소검출가능농도 획득

최소검출가능농도는 식 1에서 볼 수 있듯이 계측시스템의 배경방사선으로부터 획득할 수 있기 때문에 실험을 통한 배경방사선 획득이 필수적이다[7,10,13]. 본 연구에서는 논산 탑정호에 HydroGamma를 설치하여 수중 내 배경방사선을 획득하고 최소검출가능농도를 산출하였다. 실험은 사전에 논산시청의 협조 및 허가를 받아 안전하게 수행되었다. Fig. 4는 탑정호 수중 위에 설치된 HydroGamma를 보여준다. 위치는 내부에 설치된 GPS를 통해 위도

Fig. 4. HydroGamma installed at Tapjeongho lake.

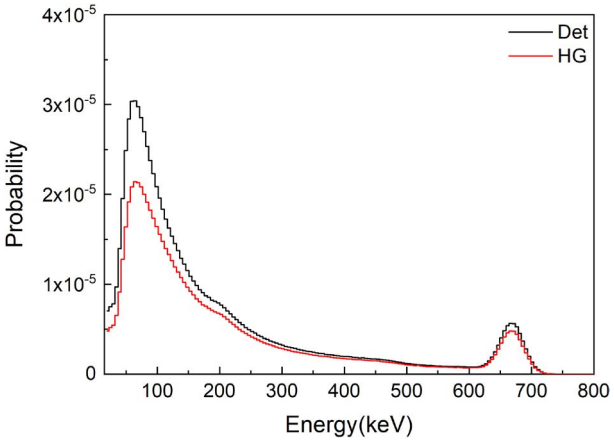

Fig. 5. Calculated energy spectrum for ^{137}Cs by MCNP6.

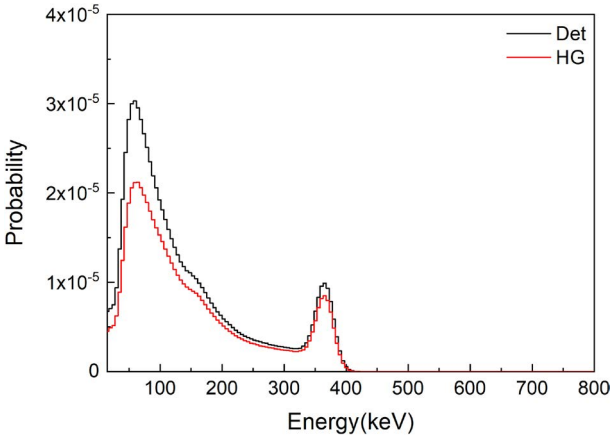

Fig. 6. Calculated energy spectrum for ^{131}I by MCNP6.

36.177532, 경도 127.162105로 나타났으며, 위치가 변하지 않도록 40 kg의 납을 강 바닥에 배치하고 장비와 줄로 연결하였다.

$$\text{최소검출가능계측치} = 4.65\sqrt{\text{배경방사선계측치}} + 2.71 \quad (1)$$

3. 결과 및 논의

3.1. 수중 내 ^{137}Cs 및 ^{131}I 농도환산인자 획득

MCNP6 전산모사를 통해 획득된 방수형 3인치 NaI(Tl) 계측기와 HydroGamma의 에너지 스펙트럼은 Fig. 5 (^{137}Cs)와 Fig. 6 (^{131}I)처럼 나타났으며, 선원별 광전피크 영역 내 총 계측 값의 차이는 ^{137}Cs과 ^{131}I 모두에서 약 1.2배로 나타났다. 기존 연구에서 방수형계측기의 ^{137}Cs과 ^{131}I에 대한 농도환산인자가 각각 1.74×10^{-2} (Bq L^{-1}) cnt^{-1}, 1.30×10^{-2} (Bq L^{-1}) cnt^{-1}였으며, 여기에 방수형계측기와 HydroGamma의 계측 효율 차이를 고려하면 HydroGamma의 농도환산인자는 ^{137}Cs이 2.07×10^{-2} (Bq L^{-1}) cnt^{-1}, ^{131}I이 1.56×10^{-2} (Bq L^{-1}) cnt^{-1}로 계산된다[11].

3.2. 수중 내 방사선 최소검출가능농도 획득

수중 내 배경방사선 계측을 위하여 논산 탑정호에 설치된 HydroGamma로부터 20분간 충분히 방사선 계측 데이터를 획득하였다(Fig. 7). 본 연구에서 광전피크 영역은 선

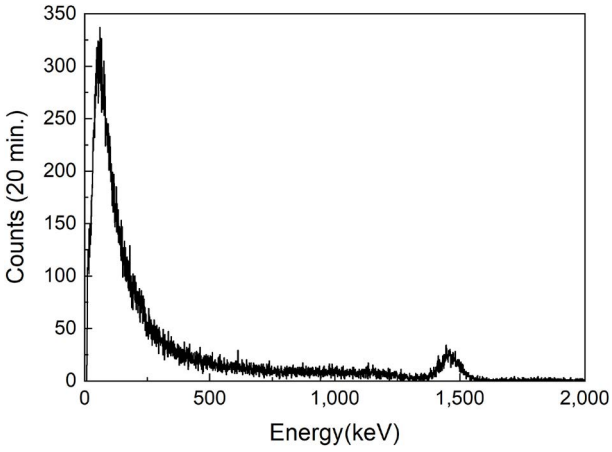

Fig. 7. Background energy spectrum measured by HydroGamma at Tapjeongho lake.

원이 방출하는 광전피크 에너지의 반치폭(Full width at half maximum, FWHM)을 고려하여 결정되었다. 즉, ^{137}Cs의 광전피크 영역은 662 ± 44.3 keV, ^{131}I의 광전피크 영역은 364 ± 32.8 keV로 계산되었다. ^{137}Cs과 ^{131}I의 광전피크 영역에 해당하는 배경방사선의 계측치는 5분간 각각 318 cnt와 596 cnt로 나타났다. 최소검출가능계측치(cnt)는 식 1을 통해 획득이 가능하며, ^{137}Cs의 경우 85.6 cnt, ^{131}I의 경우 116.3 cnt로 나타났다. 최소검출가능농도(Bq L^{-1})는 ^{137}Cs과 ^{131}I의 농도환산인자인 2.07×10^{-2} (Bq L^{-1}) cnt^{-1}, 1.56×10^{-2} (Bq L^{-1}) cnt^{-1}을 곱하여 농도 기반의 최소검출농도로 변환이 가능하며, 최소검출가능농도(Bq L^{-1})는 ^{137}Cs에 대해 1.78 Bq L^{-1}, ^{131}I에 대해 1.81 Bq L^{-1}로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 수중 방사선 상시계측을 위하여 HydroGamma를 제작하고 성능을 평가하였다. HydroGamma에는 수중 내 방사선계측 효율을 향상시키기 위하여 3인치 NaI(Tl) 계측기가 사용되었으며, 원격운영 및 자체 전원 공급을 위하여 태양광 모듈, 온도센서, GPS 센서, 침수감지센서, LTE 모듈 등이 탑재되었다. HydroGamma의 농도환산인자는 기존 연구를 통해 획득된 3인치 NaI(Tl) 방수형 계측기의 농도환산인자와 계측효율을 비교하여 획득하였으며, 최소검출가능농도는 탑정호 내 배경방사선 계측 실험을 통해 산출하였다. 실험을 통해 획득된 HydroGamma의 5분 계측 시 최소검출가능농도(Bq L^{-1})는 ^{137}Cs에 대해 1.78 Bq L^{-1}, ^{131}I에 대해 1.81 Bq L^{-1}로 나타났다. 이는 수중 내 방사능 섭취제한 농도인 100 Bq L^{-1}와 비교하였을 때 약 1/50에 해당하는 매우 낮은 수치로, HydroGamma가 수중 방사선을 감시하는 데 매우 적합한 것을 확인할 수 있었다. HydroGamma는 본 연구의 연구 결과를 바탕으로 취수원 등에서 수중 방사능 모니터링을 위하여 사용될 예정이다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국원자력연구원 주요사업(방사성동위원소 응용 표준화기술 개발, 524440-23), 공공수요 기반 혁신제품 개발·실증사업(NRF-2021M3E8A2100652), 국가과학기술연구회 창의형 융합사업(No. CAP-15-07-KICT)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. OECD-NEA. 2002. CHERNOBYL: Assessment of Radiological and Health Impacts.
2. NISA/METI. 2011. INES (the International Nuclear and Radiological Event Scale) Rating on the Events in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station by the Tohoku District - off the Pacific Ocean Earthquake.
3. Oh DM, Kang SW, Kim YS, Jung SH, Moon JH and Park JG. 2017. Flow Characteristics Analysis of the Decontamination Device with Mixing and Diffusion Using Radio-Isotopes Tracer. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* **39**(5):282-287. https://doi.org/10.4491/KSEE.2017.39.5.282
4. Lee KY, Kim YJ, Cho SY and Yoon YY. 2006. Optimal Method of Radon Analysis in Groundwater using Ultra Low-Level Liquid Scintillation Counter. *J. Soil Groundw. Environ.* **11**(5):59-66.
5. Tsabaris C, Bagatelas C, Dakladas T, Papadopoulos CT, Vlastou R and Chronis GT. 2008. An autonomous in situ detection system for radioactivity measurements in the marine environment. *Appl. Radiat. Isot.* **66**:1419-1426.
6. Bagatelas C, Tsabaris C, Kokkoris M, Papadopoulos CT and Vlastou R. 2010. Determination of marine gamma activity and study of the minimum detectable activity (MDA) in 4pi geometry based on Monte Carlo simulation. *Environ. Monit. Assess.* **165**:159-168. https://doi.org/10.1007/s10661-009-0935-4
7. Zhang Y, Li C, Liu D, Zhang Y and Liu Y. 2015. Monte Carlo simulation of a NaI(Tl) detector for in situ radioactivity measurements in the marine environment. *Appl. Radiat. Isot.* **98**:44-48. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.01.009

8. Zeng Z, Pan X, Ma H, He J, Cang J, Zeng M, Mi Y and Cheng J. 2017. Optimization of an underwater in-situ LaBr3:Ce spectrometer with energy self-calibration and efficiency calibration. *Appl. Radiat. Isot.* **121**:101-108. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.12.016
9. Park JG, Jung SH, Moon JH, Oh DM, Kang SW and Kim YS. 2018. Determination of Effective Detection Distance and Minimum Detectable Activity for Radiation Monitoring System in Water. *J. Radiat. Ind*. **12**(1):11-14. https://doi.org/10.23042/radin.2018.12.1.11
10. Knoll GF. 2011. Radiation Detection and Measurement. Fourth Edition. 321pp. John Wiley & Sons, Inc., New York.
11. Park JG, Jung SH, Moon JH, Kang SW, Oh DM and Kim YS. 2020. Determination of Activity Conversion Factor and Minimum Detectable Activity for Underwater Radiation Monitoring System. *J. Radiat. Ind*. **14**(2):173-177. https://doi.org/10.23042/radin.2020.14.2.173
12. Pelowitz DB. 2013. MCNP6^{TM} USER'S MANUAL Version 1.0. Los Almos National Laboratory, California, U.S.A.
13. Currie LA. 1986. Limits for qualitative detection and quantitative determination application to radiochemistry. *Anal. Chem.* **40**(3):586-593. https://doi.org/10.1021/ac60259a007