Journal of Radiation Industry 14(3) : 213~218(2020)

수중 방사선 모니터링 시스템 제작 및 성능평가

문진호[1] · 박장근[1] · 정성희[1,*] · 김영석[2] · 강성원[2] · 오대민[2]

[1]한국원자력연구원 중성자 · 동위원소응용연구부
[2]한국건설기술연구원 환경 · 플랜트연구소

Development and Performance Evaluation of Underwater Radiation Monitoring System

Jinho Moon[1], Jang-Guen Park[1], Sung-Hee Jung[1,*], Youngsug Kim[2], Sungwon Kang[2] and Daemin Oh[2]

[1]*Radioisotope Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 Beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea*
[2]*Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea*

Abstract - A new underwater radiation monitoring system is developed and applied for measuring radioactivity using NaI(Tl) detector. The system consists of a detection module, a solar panel, and a bettery. The measurement data are tansmitted and received wirelessly. This apparatus is designed for qualitative and quantitative radionuclide detection in the water environment. To evaluate performance of the system, long-term operation test was performed. To offer volumetric activties in $Bq \cdot L^{-1}$, conversion factor of ^{137}Cs is obtained using Monte Carlo simulations. From bacground data and conversion factor of the system, the MDA of ^{137}Cs for system was obtained to be 1.78 $Bq \cdot L^{-1}$ for 5 minute measurement.

Key words : Underwater radiation monitoring system, Radioactive contamination, Minimum detectable activity

서 론

우리나라에 현재 24기, 중국과 일본에 80여 개의 원전이 운전 중으로 동북아시아는 세계적으로도 원자력 발전소 밀집지역이며, 그 한 가운데 위치한 우리나라는 방사능 재난의 위험으로부터 자유롭지 못하다. 체르노빌과 후쿠시마 사고에서 알 수 있듯이, 인근 국가 혹은 국내 원자력 발전소 등에서 사고가 발생하여 대량의 방사능 낙진이 발생되는 경우, 우리나라 대기가 오염되고, 중력 또는 강우 등에 의해 수원이나 토양에 낙하한 방사성물질이 수원으로 유입되어 수계가 오염될 수 있다(OECD-NEA 2002; NISA/METI 2011). 하지만 기존의 연구는 대부분 인근 국가 내 사고에 의한 대기/해양 이동예측 기술이나, 모바일 통신 기술이 접목된 휴대용 방사능 측정기술에 초점이 맞춰져 있으며, 음용수와 관련된 용수전용 하천/지천에 대한 방사선 모니터링 시스템에 관한 연구개발은 수행된 바가 없다(오 2017).

원전사고는 원전 주변과 해수 오염의 문제뿐만 아니라 상수원 및 수계 등 피해 범위가 매우 넓으며 상수원 및 수계의 오염 시 식수와 농업 · 공업용수의 공급중단으로 인한 수

* Corresponding author: Sung-Hee Jung, Tel. +82-42-868-8057, Fax. +82-42-868-8448, E-mail. shjung3@kaeri.re.kr

자원 이용에 치명적인 영향을 가져올 수 있다. 이에 수계 방사능 오염 상황이 발생하였을 때 초동 대응 조치가 필수적이며, 이를 위하여 수계 방사능 오염 상황이 발생하였을 때 즉각 인지하고 대처할 수 있는 수중 방사선 측정장치 및 이를 이용한 방사능 오염 대응 시스템의 필요성이 대두된다.

본 연구에서는 댐과 호수와 같이 사람이 접근이 어려운 지역의 수중 방사능 오염 상황이 발생하였을 때 방사성 물질을 신속하게 감지할 수 있는 고효율 수중 방사선 계측시스템을 개발하였다. 방사선 계측시스템은 스스로 전원을 공급할 수 있도록 태양광 패널과 배터리를 장착하고, 고효율의 NaI (Tl) 계측기를 장착하였다. 또한 무선으로 계측데이터를 송신할 수 있도록 제작하였으며, 장기간 그 성능을 테스트하였다. 또한 계측 시스템의 수중 내 농도환산인자 및 최저검출 농도를 산출하였다 (Tsabaris *et al*. 2008; Bagatelas *et al*. 2010; Zhang *et al*. 2015; Zeng *et al*. 2017; Part *et al*. 2019).

재료 및 방법

1. 수중 방사선 모니터링 시스템 제작

수중 방사선 모니터링 시스템은 Fig. 1과 같이 자체 전원 공급을 위한 태양광 모듈, 방사선 검출기 모듈, 데이터 획득 및 전송을 위한 데이터 수집처리 모듈, 배터리, 하우징 등으로 구성된다. 검출기 모듈은 NaI (Tl) 3×3 inch 검출기를 사용하며, 광전자증배관(photomultiplier tube, PMT)이 일체형으로 제작된 Amcrys사 제품을 사용하였다. 또한, 광전자증배관 구동을 위한 고전압 분배회로와 검출신호를 일차적으로 증폭시킬 수 있는 증폭회로가 포함된다. 데이터 수집 모듈은 방사선 검출기 신호를 에너지별로 수집하기 위한 회로로 다중채널분석기(multi-channel analyzer, MCA)를 포함하며, 검출기 신호를 바탕으로 스펙트럼을 생성하고, 데이터 패킷을 생성할 수 있다. 수면에 떠있을 수 있도록 부력재를 상부에 설치하고, 시스템 구조상 외부 충격에 가장 취약한 검출부를 보호할 수 있는 구조물을 설치하도록 하였다. 또한 FPGA 칩 기반의 디지털 회로를 구현하여 연산이 가능케 하였다. 통신모듈은 운영 컴퓨터로 데이터를 전송하기 위한 장치로 원거리 통신 중 가장 널리 쓰이는 LTE 모듈을 사용하였다. 전원회로는 태양광 패널을 이용하여 배터리를 충전할 수 있는 전원을 생성하고, 충전이 가능한 회로와 배터리 전원으로부터 각 모듈이 사용할 있는 저전압을 생성하는 회로로 구성된다.

수중 방사선 계측시스템은 수중 방사선의 상시 감시체계를 위하여 방수처리가 이루어져야하기 때문에 모든 부품을 내부에 넣고 외부의 연결 없이 단독적으로 전력 공급, 방사선 계측, 데이터 처리가 이루어지도록 제작하였다. 수중 방사선 계측시스템의 소비전력은 시간당 통신을 포함한 경우 최대 5 W 정도이므로, 중단 없이 하루 종일 작동을 위해서 필요한 최대 전력은 5 W × 24 h = 120 Wh이다. 이를 위하여 80 W급 태양광 패널의 하루 발전량을 조사하였다. 조사에 사용된 선솔라사의 SUN80M-12는 지름 0.9 m의 원형으로, 그 면적은 2.54 m^2이다. 우리나라의 평균 일조량은 3.84시간으로 효율 80 W 태양광패널이 생산할 수 있는 발전량은 80 W × 3.84 h · day^{-1} = 307 Wh · day^{-1}로 예상되나 실제 발전량은 태양광 패널의 수평 설치로 인하여 이보다 낮을 것으로 보이지만 계측시스템을 작동시키는 데는 충분할 것으로 예상된다.

또한, 계측시스템 내 침수를 감지하기 위한 침습센서를

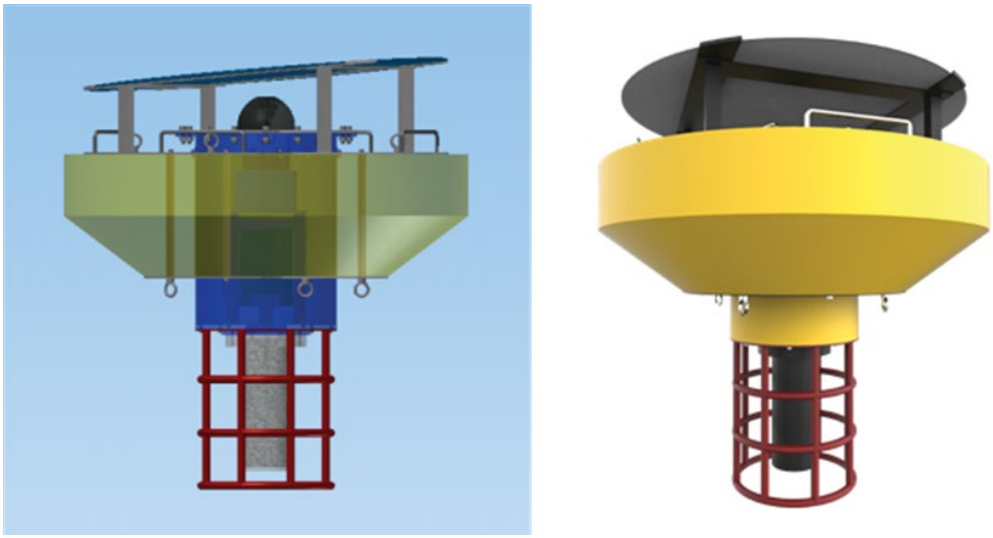

Fig. 1. CAD drawings of underwater radiation monitoring system.

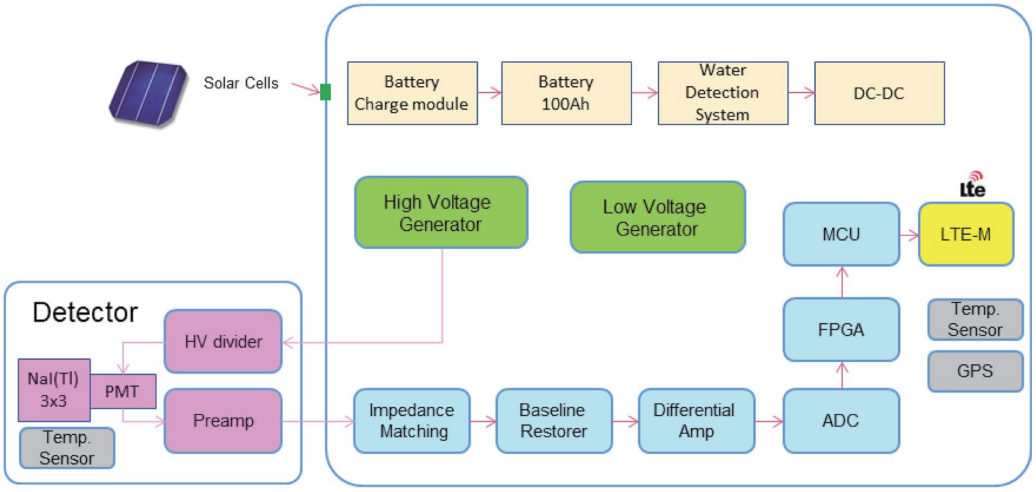

Fig. 2. system configuration diagram of underwater radiation monitoring system.

Table 1. Specification of underwater radiation monitoring system

Item	Specification
Radiation detector	NaI (Tl), 3 × 3 inch
Energy resolution	＜8% @ 662 keV ^{137}Cs
Energy range	30~3,000 keV - 4096 ch
Sensor	Temperature, GPS, moisture
Counting time	User configurable (5 sec. minimum)
Battery	$LifePO_4$ 70 Ah
Solar pannel	80 W
Comunication	LTE

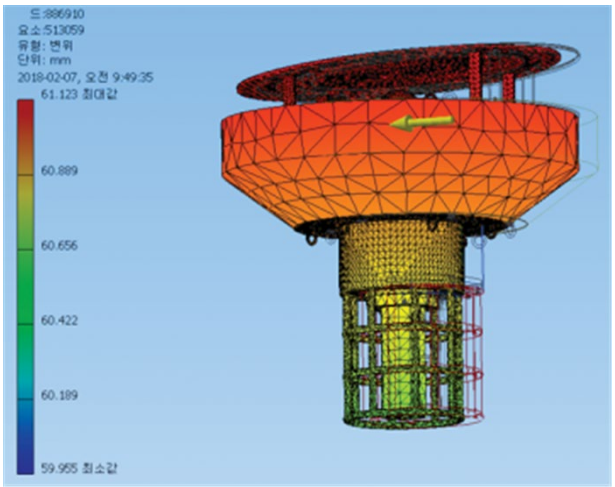

Fig. 3. 3D simulation for impulse calculation of underwater radiation monitoring system.

배치하고, 수분을 감지될 경우 시스템 보호를 위해 전원을 차단할 수 있는 기능을 탑재하였다. 장마기간이나 지속적으로 구름이 많아 발전량이 낮아 배터리의 전압이 10 V 이하가 되면 자동으로 작동을 멈추고, 다시 충전되어 10.5 V 이상의 전압이 되면 재가동될 수 있도록 제작하였다. 내부배터리는 가벼운 무게와 액체전해질을 사용하지 않는 리튬인산철($LiFePO_4$) 전지를 사용하였다. 리튬인산철 전지는 동일 용량의 납축전지에 대해 약 1/3 무게를 가지게 되며, 보다 광범위한 온도에서 사용이 가능하다. Table 1에 수중 방사선 계측시스템 사양을 요약하여 나타내었다.

계측시스템은 크게 검출부, 태양광 발전 패널, 방사선 계측 및 통신 보드로 구분되며, 이들의 구성도는 Fig. 2와 같이 표현된다.

수중 방사선 계측 시스템의 검출부는 3인치 NaI (Tl)에 광전자증배관을 접합한 형태의 검출기를 사용하고, 외부의 충격으로부터 검출기를 보호하기 위하여 완충재를 검출기 하우징 사이에 추가하였다. 또한, 에너지 및 효율 교정을 위하여 검출부 하단에 K-40을 포함한 KCl 파우더를 본체 내부에 장착하였다. 본체 내부는 배터리, 방사선 계측 및 통신 모듈, 태양광 충전 모듈 등이 장착된다. 본체 바닥면에는 리튬인산철 전지가 장착되는데, 이는 계측시스템의 전원을 공급할 뿐만 아니라 시스템 전체의 무게 중심을 수면보다 아래로 유지시켜주는 역할을 한다. 계측시스템은 별도의 전원 공급없이 독립적으로 24시간 동작해야 하므로 태양광 패널을 이용하여 내부에 장착한 배터리를 충전함과 동시에 장비 작동을 위한 전압을 공급하는 장치를 포함한다. $LiFePO_4$ 배터리를 채용하여 태양광 발전이 이루어지지 않는 상황에서도 장비는 배터리에서 공급되는 전압을 이용하여 데이터를 수집하게 된다. 방사선 계측 및 통신 보드는 데이터를 수집 및 연산을 담당하는 모듈, 서버와 통신하는 통신모듈(LTE-M), 전원을 생성하는 전원 모듈로 구성된다.

하천에 존재하는 물체로부터 계측시스템이 받는 충격량

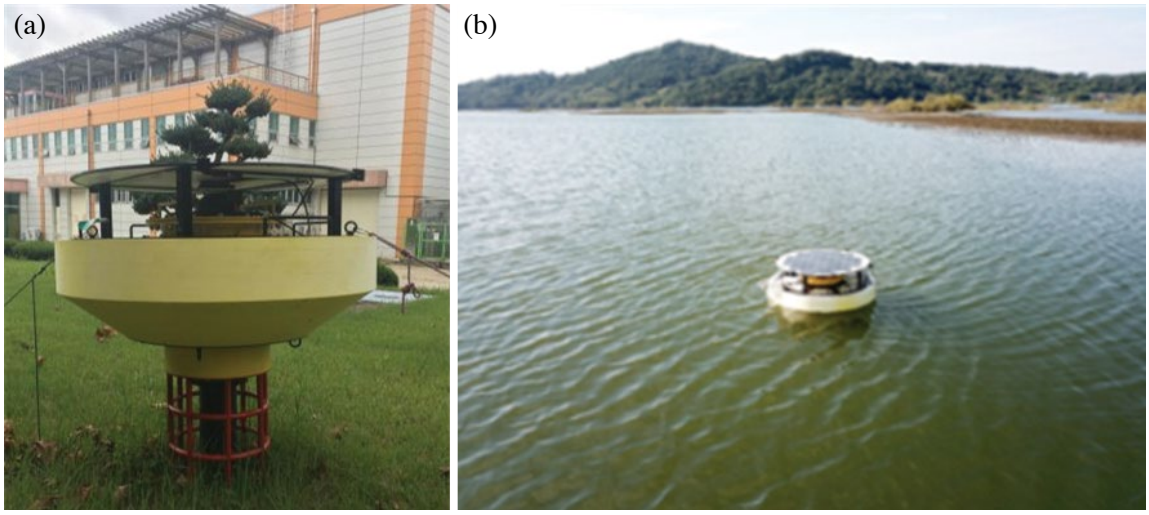

Fig. 4. photos of performance evaluation of underwater radiation monitoring system (a) ground (b) Tobjeong reservoir.

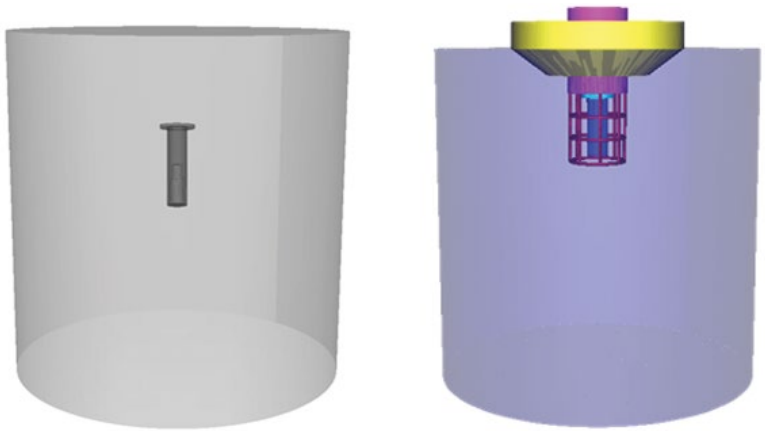

Fig. 5. MCNP simulation geometrys of (a) waterproof detector and (b) underwater radiation monitoring system.

과 안전성을 평가하기 위하여 3D 모사 프로그램인 invertor를 사용하였다(Fig. 3). 힘은 약 700 N으로 고정하고 충격 부위에 따라 계측시스템이 받는 충격량과 변위량을 계산하였다. 변위량은 검출기에 직접 충격을 받는 경우를 제외하면 위치에 따라 최대 0.2 mm로 나타났으며, 이를 기반으로 안정성이 확보된 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 700 N의 충격이 검출기에 직접 전해질 경우 계측기의 가장 약한 부분인 광증배관에 충격을 받아 작동이 되지 않을 것으로 예상되어 검출부를 보호하는 가이드를 추가로 장착하였다.

2. 수중 방사선 모니터링 시스템 성능 평가

계측시스템의 수중환경 내 성능 평가에 앞서, 대기 중에 장비를 배치하고 예비성능 평가를 수행하였다. 계측시스템은 수중에 단독으로 배치되고 장기간 작동될 예정이기 때문에 안정성 평가, 방사선 계측 신호 송수신 기능 평가 등이 필수적이다. 계측시스템의 장기간 안정성 평가를 위해 약 3개월간 Fig. 4a와 같이 지상에 설치하고 매 5분마다 방사선 계측신호를 획득하였다. 예비 평가 이후 수중 현장 내 성능 평가를 위해 논산 소재 탑정호를 실험 장소로 선정하였으며, 고무보트를 이용하여 지각에서 나오는 방사선의 영향을 최소화하기 위하여 뭍에서 충분히 멀리 떨어지고, 수심이 3 m 이상 되는 곳에 계측시스템을 설치하였다(Fig. 4b).

계측시스템의 가장 중요한 성능지표는 최저검출농도로써 이전 연구에서 방수형 3인치 원통형 NaI(Tl) 계측기에 대하여 이미 산정한 바 있다. 실제 계측 시스템의 경우 물 표면에 떠 있어 계측할 수 있는 범위가 축소되며, 시스템의 자체 효율보정을 위하여 내부에 장착한 미량의 K-40으로 인하여 배경방사선 준위가 높다는 차이가 있다(Fig. 5). 이를 감안하여 실제 계측시스템의 수중에서의 배경방사선을 측정하여 보정하였다.

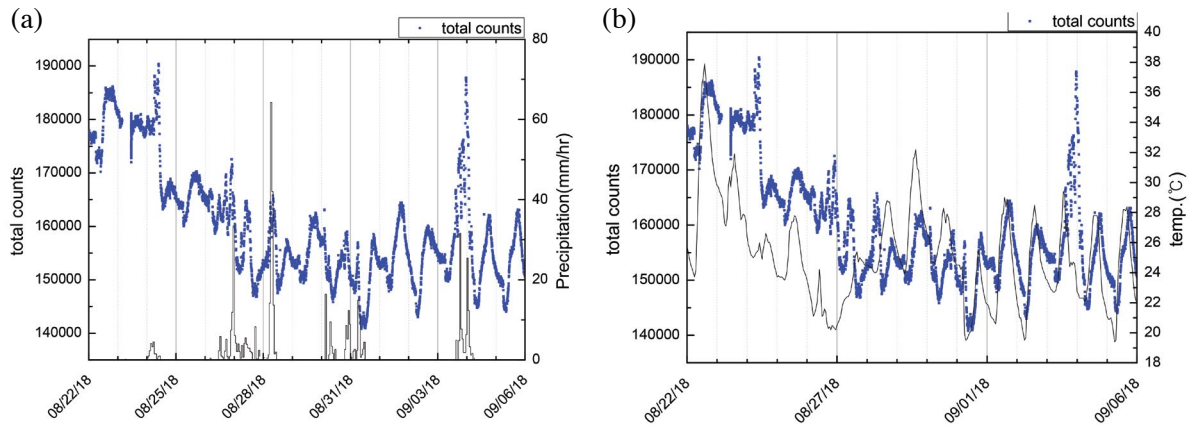

Fig. 6. radiation measurements and meteorological data obtained by preliminary performance evaluation (a: precipitation, b: temperature).

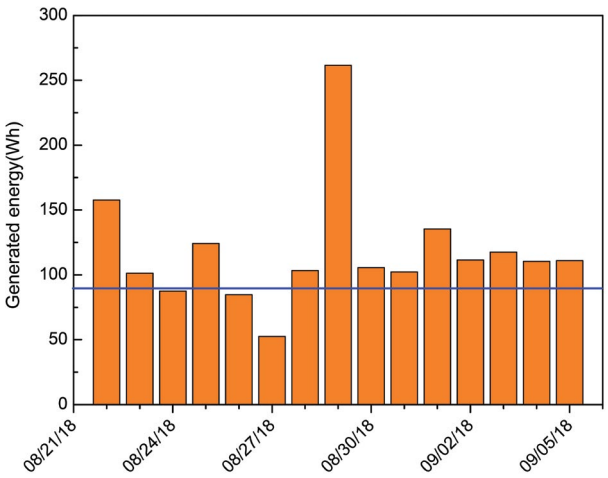

Fig. 7. Daily power generated by solar pannel.

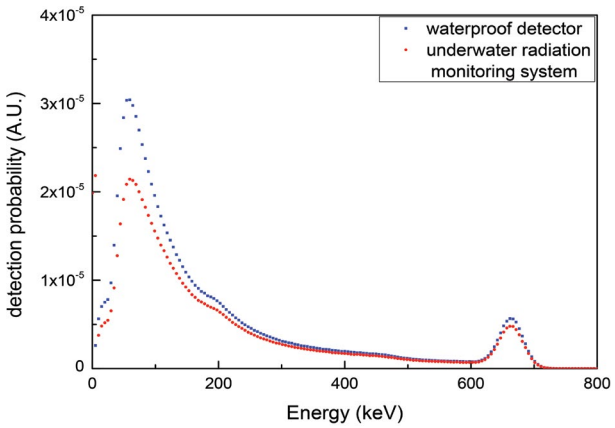

Fig. 8. Pulse height spectrum of ^{137}Cs by MCNP6 simulation.

결과 및 고찰

수중 방사선 계측시스템의 예비성능평가를 위하여 매 5분마다 방사선 계측 스펙트럼, GPS 위치, 내외부 온도, 태양광 발전량, 배터리 전압 등을 전송하였으며, 3개월간 지속적으로 모니터링하였다. Fig. 6은 예비성능평가 기간 동안 계측한 방사선 계측 신호의 일부를 보여준다. 계측 신호는 비가 오면 공기 중의 방사성 물질이 지면으로 떨어져 일시적으로 높아지며, 온도에 따라 지각에서 나오는 방사성 라돈에 의해 높아지는 경향을 보인다.

Fig. 7은 예비성능평가 기간 동안 태양광 패널로 생산한 전력량을 나타낸다. 수중 방사선 계측시스템을 운영하기 위해서는 하루에 평균 90 Wh의 전력량이 필요하며, 예비성능평가 기간 동안 생산된 전력량은 대부분 90 Wh를 넘는 것을 확인하였다. 수중 방사선 계측시스템이 설치될 장소인 호소나 댐의 경우 주변 지형지물이 없어서 그늘의 영향을 받지 않을 것이므로 태양광 패널에 의한 전력생산량은 이보다 더 높을 것으로 기대된다.

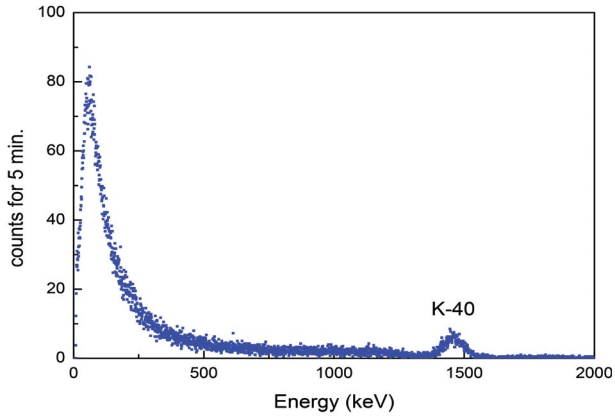

Fig. 9. Background gamma spectrum in water.

이전 연구에서 동일한 방사선 검출기를 사용하는 방수형 계측기의 농도환산인자를 구한 바 있으며, ^{137}Cs의 경우 1.74×10^{-2} (Bq·L^{-1})·count^{-1}로 나타났었다(Park *et al.*

2019). 하지만 실제 계측시스템의 경우 수면에 떠 있으므로 이를 보정해주어야 정확한 환산인자를 도출할 수 있다. 이를 위하여 MCNP6를 이용하여 전산모사를 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 광전 피크 영역만을 비교하여 보정한 결과 농도환산 인자는 2.07×10^{-2} (Bq·L^{-1})·count^{-1}로 나타났다(Pelowitz *et al*. 2013).

시스템의 ^{137}Cs의 최소검출농도를 산출하기 위하여 계측시스템을 5톤 물탱크에 띄우고 5분간 배경방사선을 계측하였으며, 이를 Fig. 9에 나타내었다. 배경방사선의 대부분은 계측시스템 내부에 존재하는 K-40에 의한 방사선의 영향이다. ^{137}Cs의 광전피크영역만을 관심영역으로 지정하였으며, 계측시스템의 에너지분해능을 고려하여 설정하였다. ^{137}Cs의 광전피크영역에 해당하는 배경방사선 계측값은 318 counts로 나타났다. 최소 검출 계측치는 Currie에 의해 제시된 식 1에 의해 계산되며, 그 값은 85.6 counts이다 (Currie 1968).

$$\text{최소검출계측치} = 4.65\sqrt{\text{배경방사선계측치}} + 2.71 \qquad (1)$$

여기에 앞서 획득한 농도환산인자 (2.07×10^{-2} (Bq·L^{-1})·count^{-1})를 곱해주면 최소검출농도가 계산되며, ^{137}Cs에 대한 해당 계측시스템의 최소검출농도는 1.78 Bq·L^{-1}로 나타났다.

결 론

본 연구는 수중 방사선 모니터링을 위한 계측시스템을 제작하고 그 성능을 평가하였다. 계측시스템은 태양광 모듈, 방사선 검출기 모듈, 데이터 획득 및 전송을 위한 데이터 수집 모듈, 배터리, 하우징 등으로 구성하였으며, 지상에서 3개월간 예비테스트 결과 태양광 패널과 내부 배터리로 상시 모니터링이 가능하다는 것을 확인하였다. 농도환산인자 계산을 위하여 MCNP6를 사용하여 계측시스템이 점유하고 있는 부피를 보정하였으며, 5분 계측으로 획득된 농도환산인자는 ^{137}Cs의 경우 2.07×10^{-2} counts·Bq^{-1}로 나타났다. 획득된 농도환산인자는 최저검출농도를 획득하는데 사용되었으며, 수중 내 배경방사선 데이터를 바탕으로 ^{137}Cs은 1.78 Bq·L^{-1}로 나타났다. 이는 수중 내 방사능 농도가 2 Bq·L^{-1}로 매우 낮은 경우에도 실시간 상시 모니터링이 가능하다는 것을 의미한다. 본 연구 결과는 국내외 테스트베드에서 복수의 수중 방사선 모니터링 시스템의 그룹화 운영에 사용될 예정이다.

사 사

본 연구는 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP-15-07-KICT)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

오대민, 강성원, 김영석, 정성희, 문진호, 박장근. 2017. 방사성 동위원소를 이용한 제염제 혼합확산장치의 유동특성분석. 대한환경공학회지. **39**(5):282-287.

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.

Currie LA. 1986. Limits for qualitative detection and quantitative determination application to radiochemistry. *Anal. Chem*. **40**(3):586-593.

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.

OECD-NEA. 2002. CHERNOBYL: Assessment of Radiological and Health Impacts.

Park JG, Jung SH, Moon J, Kim J, Oh D, Kang S and Kim Y. 2019. Determination of minimum detectable activity for underwater radiation detection system. *J. Instrum*. **14**:p10038.

Pelowitz DB. 2013. MCNP6^{TM} USER'S MANUAL Version 1.0. Los Almos National Laboratory, California U.S.A.

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.

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.

Zeng Z, Pan X, Ma H, He J, Cang J, Zeng M, Mi Y and Cheng J. 2017. Optimization of an underwater in-situ $LaBr_3$:Ce spectrometer with energy self-calibration and efficiency calibration. *Appl. Radiat. Isot*. **121**:101-108.

Received: 1 June 2020
Revised: 17 June 2020
Revision accepted: 14 July 2020