수중 방사선모니터링 시스템의 성능평가를 위한 검출기의 수중 내 유효검측거리 및 최저검출농도 산출

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

[1]한국원자력연구원 동위원소연구부, [2]한국건설기술연구원 환경 · 플랜트연구소

Determination of Effective Detection Distance and Minimum Detectable Activity for Radiation Monitoring System in Water

Jang-Guen Park[1], Sung-Hee Jung[1,*], Jinho Moon[1], Daemin Oh[2], Sungwon Kang[2] and Youngsug Kim[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 - The concerns about the potential contamination of drinking water with accidental nuclear matter have been escalated as more nuclear power plants are being constructed in many countries. Radiation monitoring systems in water environment are basically the same as the conventional ones in principle, but its structure needs to be adapted and modified so as to be suitable to the aquatic operation conditions. As a result, its specifications should be investigated in terms of the minimum detectable activity (MDA) as well as the effective detection distance (EDD) because they determine the radiation level that the monitoring system initiates the emergency action to prevent the water source from being contaminated early enough to avoid serious social commotion. In this study, the EDD and the MDA of the monitoring system fabricated by the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) were measured with ^{68}Ga source. The ^{68}Ga source was mixed with water homogeneously in the experimental device, and detectable area was expanded gradually with detecting gamma emitted from ^{68}Ga source for EDD. Then, the gamma was also detected as a function of time for MDA, because the activity of ^{68}Ga decreases with its half-life. It turned out that the values were 29 cm and 5 Bq$\cdot l^{-1}$ in the experiments, respectively. Relatively short range of the EDD seems to be natural in water, but it suggests that multiple monitoring system need to be strategically installed in a body of water. the MDA value is far lower than the limitation for drinking water, which is 200 Bq$\cdot l^{-1}$ for ^{137}Cs.

Key words : Underwater radiation monitoring system, Radioactive contamination, Effective detection distance, Minimum Detectable activity

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

서 론

수자원은 매우 중요한 자연자원으로, 현행 법령을 통해 국가차원의 보전 및 관리의 필요성을 규정하고 있다(강 2012). 이에 국토교통부, 환경부, 농림축산식품부, 행정안전부, 기상청 등은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)을 함께 설립하여 수자원의 관리, 가뭄 · 홍수 · 오염 등의 재해에 대해 국가 차원의 대응 및 관리체계를 구축하고 있으며, 그 밖의 다른 기관에서도 재난 관련 시스템을 개발 및 운영하고 있다(이 등 2006; 차 2009; 이 2013; 심 2014; 이 등 2015; 김 등 2016; 국토교통부 2016). 하지만 우리나라는 후쿠시마 원전사고로 인한 방사성물질 노출 이후로 지진 빈도와 인접국들의 원전 건설량이 증가하고 있음에도 불구하고 수자원에의 방사능물질 노출에 대응하기 위한 시스템이 구축되어있지 않다(오 2017). 이에 한국원자력연구원, 한국건설연구원, 한국기초과학지원연구원은 수자원 내 방사성물질 노출을 신속하게 감지하고 대응하기 위하여 방사능 노출 초동대응 시스템을 개발하고 있다.

한국원자력연구원은 방사능 노출 초동대응 시스템의 기초가 되는 수중 방사선 모니터링 시스템 개발을 수행하고 있으며, 이를 위하여 계측기의 경제성 비교, 모니터링 시스템 배치 전략 등을 연구한 바 있다. 계측기 경제성 비교 연구에는 계측기의 가격, 계측 효율 등이 고려되었으며, 연구결과 NaI(Tl) 계측기(지름 3 inch, 높이 3 inch)가 경제성이 가장 높게 평가되었다.

본 연구에서는 수중 방사선 모니터링 시스템에 사용될 NaI(Tl) 계측기의 수중 내 유효검측거리와 최소검출농도를 평가하기 위하여 수행되었다. 계측기의 유효검측거리와 최소검출농도는 시스템의 성능을 평가할 수 있는 매우 중요한 정량적 인자로 수중에 존재하는 방사선을 검출할 수 있는 최대 거리와 검출이 가능한 방사선의 최소 농도를 의미하며 실험을 통한 평가가 필수적이다(김 등 2006; Tsabaris *et al*. 2008; Bagatelas *et al*. 2010; Zhang *et al*. 2015; Zeng *et al*. 2017). 이에 본 연구에서는 소형 수조에 방사성 선원을 주입하고 계측하여 수중 내 유효검측거리와 최소검출농도를 확인하였다.

재료 및 방법

Fig. 1은 3인치 12S12/3 NaI(Tl) 검출기(Amcrys, 우크라이나)의 수중 내 유효검측거리와 최소검출농도를 산출하기 위한 간이 수조이다. 수조 내에 배치되는 납 콜리메이터는 검출기가 한쪽 방향의 방사선만을 검측할 수 있도록 검출기의 반을 차폐할 수 있도록 설계되었다. NaI(Tl) 검출기가 포함되는 수중 방사선 모니터링 시스템은 본래 핵분열 선원인 ^{137}Cs (662 keV)을 감지하도록 설계될 예정이지만, 본 연구에서는 비슷한 감마선을 방출(511 keV)하고 반감기가 짧은(68분) ^{68}Ga 선원을 사용하여 수중 내 유효검측거리와 최소검출농도를 평가하였다(Knoll 2011). ^{68}Ga은 실제로 감마선 방출선원이 아닌 양전자 방출선원이지만 매우 짧은 거리 내에서 음전자와 반응하여 두 개의 511 keV 소멸감마선을 방출한다. ^{68}Ge/^{68}Ga 발생장치는 0.05 M의 HCl 용액을 주입하여 ^{68}Ga 선원을 간편하게 추출 및 이용할 수 있다. 발생장치에서부터 추출되는 ^{68}Ga은 ^{68}Ge의 반감기(271일)에 따라 방사능이 지속적으로 감소되며, 본 연구에서 추출된 ^{68}Ga의 방사능은 15 MBq이었다.

추출된 ^{68}Ga는 수조 내 17.5 l의 물과 균일하게 섞어주었으며(0.86 MBq$\cdot l^{-1}$), 4 cm부터 5 cm 간격으로 검측거리를 넓혀가며 방사선을 계측하였다. 방사선 계측에는 ^{68}Ga 선원으로부터 방출되는 511 keV 주변의 감마선만을 선택적으로 검출하기 위하여 Gamma Pro 1408 multi-channel analyzer (NuCare, 대한민국)가 사용되었다. 방사선 계측은 매 계측지점마다 120초간 수행되었으며, 증가비(식 1)가 1%가 되는 거리를 유효검측거리로 결정하였다(Nguyen *et al*. 2005; Viesti *et al*. 2008; Bagatelas *et al*. 2010; Zhang *et al*. 2015).

$$\text{증가비}(\%) = \frac{\text{Count} - \text{Count}_{\text{pre}}}{\text{Count}_{\text{pre}}} \times 100\% \quad (1)$$

식 1에서 Count와 Count$_{\text{pre}}$는 각각 현재 계측 값과 이전 계측 값을 의미한다. 증가비가 작을수록 계측 값 간의 차이가 작은 것이며, 즉, 계측 거리의 증가가 계측 값에 영향을

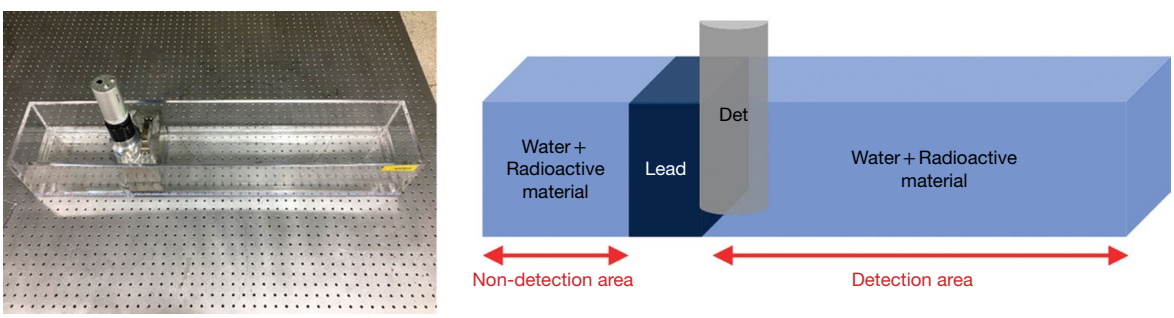

Fig. 1. Experimental measurement devices for effective detection distance and minimum detectable activity (left) and its schematic (right).

미치지 못한다는 것을 의미한다. 최소검출농도는 앞서 획득된 유효검측거리에 검출기와 납 콜리메이터를 고정시킨 뒤, 시간에 따라 감소되는 ^{68}Ga 방사능을 1시간마다 300초씩 측정하여 증가비가 1%가 되는 시점의 방사능으로 산출하였다. 최소검출농도의 증가비는 작을수록 방사능 농도 차이에 따른 계측 값의 변화가 없는 것을 의미하며, 결국 계측 값을 통해 방사성 농도의 변화를 더 이상 감지할 수 없는 것을 의미한다. 다만, 사용된 ^{68}Ga의 방사능 농도가 0.86 MBq·l^{-1}로 높기 때문에 약 12반감기가 지난 12시간 뒤부터 계측을 수행하였다.

결과 및 논의

Fig. 2는 3 inch 검출기의 수중 유효검측거리 산정 실험에서 획득된 계측 값의 그래프이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 거리가 늘어남에 따라 계측 값이 점점 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 거리가 늘어남에 따라 스펙트럼의 위치가 변하는 것을 볼 수 있는데, 이는 감마선 계측기의 특징으로 계측되는 감마선의 양이 크게 많아질 경우에 스펙트럼이 위치가 변하게 된다(Knoll 2011). Table 1은 계측거리에 따른 증가비를 나타내며, 계측거리가 증가함에 따라 증가비가 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다. 증가비 1%는 계측거리가 29 cm일 때 도달하였으며, 이를 수중 유효검측거리로 결정하였다. 본 결과에서 나타나듯이 수중 방사선 검출 시스템은 방사선의 수중 내 감쇄로 인해 대기중 방사선 검출 시스템에 비해 매우 짧은 유효검측거리를 가지게 된다. 이는 한 개의 시스템으로는 넓은 영역의 수중 방사선을 감시하는데 한계가 있음을 나타내며, 넓은 지역의 수중 방사선을 감시하기 위해서 다수의 시스템이 요구된다는 것을 증명한다. 현재 이를 위하여 다수의 수중 방사선 검출 시스템을 효율적으로 배치하기 위한 지속적인 연구가 진행되고 있다.

Fig. 3은 수중 최소검출농도 산정을 위해 획득된 계측 값의 그래프를 나타낸다. 12시간이 지난 뒤의 ^{68}Ga 방사능 농도는 483 Bq·l^{-1}이며, 1시간마다 300초씩 방사선 계측을 수행하였다. 시간이 지나 방사능 농도가 줄어듬에 따라 방사선 계측 값의 감소폭이 줄어드는 것을 볼 수 있었으며, 이 경우에는 Fig. 2와 달리 계측 값이 크지 않아 스펙트럼의 위치가 변하지 않았다. Table 2는 방사능 농도에 따른 계측 값들의 증가비를 보여준다. 방사능 농도가 5 Bq·l^{-1}일 경우에 6 Bq·l^{-1}인 경우와 증가비가 1%로 나타났기 때문에, 본 연구에서는 5 Bq·l^{-1}를 수중 최소검출농도로 산정하였다. 이는 방사성핵종 ^{137}Cs의 물 · 우유에 대한 음식물 섭취기준인 200 Bq·l^{-1}를 크게 밑도는 수치로 수자원 내 방사성물질 노출 감지를 위한 수중 방사선 모니터링 시스템에 매우 적합한 것으로 나타났다.

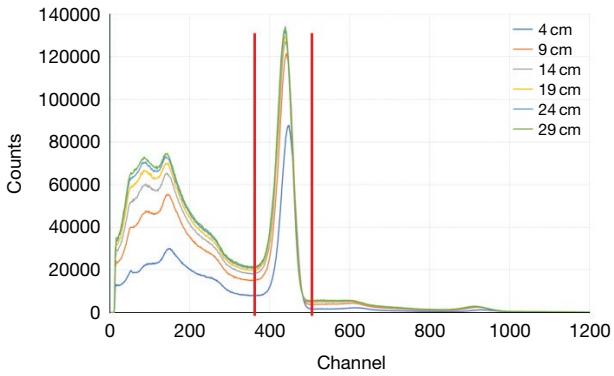

Fig. 2. Detection counts with change in detection area for effective detection distance. Data within red lines was only counted.

Table 1. Incremental ratio for effective detection distance

Distance	Counts	Incremental ratio
4 cm	4,382,313	
9 cm	6,542,493	49.3%
14 cm	7,096,755	8.5%
19 cm	7,322,455	3.2%
24 cm	7,493,400	2.3%
29 cm	7,567,616	1.0%

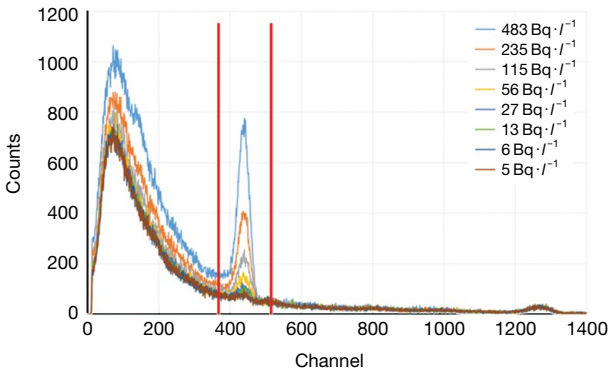

Fig. 3. Detection counts as a function of concentration of radioactive material for minimum detectable activity. Data within red lines was selectively recorded.

Table 2. Incremental ratio for minimum detectable activity

Concentration	Counts	Incremental ratio
483 Bq·l^{-1}	45,914	
235 Bq·l^{-1}	25,401	44.7%
115 Bq·l^{-1}	17,249	32.1%
56 Bq·l^{-1}	13,260	23.1%
27 Bq·l^{-1}	11,322	14.6%
13 Bq·l^{-1}	10,480	7.4%
6 Bq·l^{-1}	9,978	4.8%
5 Bq·l^{-1}	9,875	1.0%

결 론

본 연구는 수중 방사선 모니터링 시스템에서 사용될 NaI (Tl) 검출기의 수중 유효검측거리와 최소검출농도를 평가하기 위하여 수행되었다. ^{68}Ga 선원을 이용한 연구 결과, 수중 유효검측거리는 29 cm, 최소검출농도는 5 $Bq \cdot l^{-1}$로 확인할 수 있었다. 하지만 본 연구는 실제 검측대상 선원인 ^{137}Cs (662 keV)이 아닌 ^{68}Ga (511 keV)로 수행되었기 때문에 ^{137}Cs선원을 이용하여 보다 정확한 값을 도출하는 것이 필요하다. ^{137}Cs이 긴 반감기(약 30년)로 인해 사용이 어려울 경우에는 두 개 이상의 단반감기 선원를 이용한 실험과 전산모사의 병행을 통해 ^{137}Cs 선원에 대한 유효검측거리의 도출이 가능할 것이다(Tsabaris *et al*. 2008). 또한 보다 정확한 최소검출농도를 도출하기 위하여 유효검측거리보다 큰 반지름을 가지는 대형 수조 내와 ^{137}Cs 선원을 이용한 실험이 수행될 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

강일신. 2012. 수자원의 법적 성격에 관한 고찰. 저널 물 정책 · 경제. **19**:107-118.

국토교통부. 2016. 수자원장기종합계획(2001~2020) 제3차 수정계획. pp. 1-131. 국토교통부.

김용제, 조수영, 윤윤열, 이길용. 2006. 극 저준위 액체섬광계수기를 이용한 지하수 중 라돈(^{222}Rn) 측정법 연구. 한국지하수토양환경학회지. **11**(5):59-66.

김종학, 고용석, 김준기, 박종일. 2016. 모바일 빅데이터를 활용한 재난대앙방안. 국토정책 Brief. **563**:1-6.

심순보. 2014. 통합물관리 실현을 위한 물관리시스템 혁신방안. 한국수자원학회 수자원정책 비전. **4**:50-61.

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

이기영, 한송희, 김성준. 2015. ICT 기술 기반 물 재난 관리체계 도입 방안. 경기연구원 기본연구. **2015-04**:1-128.

이재응. 2013. 국가 홍수관리시스템 개발 및 활용방안. 한국수자원학회 수자원정책 비전. **2**:37-46.

이주헌, 이길재. 2006. 국가 가뭄관리 정보시스템 구축. 한국수자원학회지 물과미래. **39**(3):29-36.

차기욱. 2009. 가뭄재해관련 광동댐 운영 및 수자원확보방안. 한국수자원학회지 물과미래. **45**(6):31-36.

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.

Knoll GF. 2011. Radiation Detection and Measurement. Fourth Edition. pp. 321-364. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Nguyen VH, Peloquin S and Lacasses Y. 2005. Cost Effectiveness of Positron Emission Tomography for the Management of Potentially Operable Non-Small Lung Cancer in QueBec. *Can. Respir. J*. **12**(1):19-25.

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.

Viesti G, Cossutta L, Fabris D, Lunardon M, Moretto S, Nebbia G, Pesente S, Pino F and Sajo-Bohus L. 2008. Material Recognition by using a tagged ^{252}Cf source. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **593**(3):592-596.

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.

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.

Received: 24 October 2017
Revised: 29 December 2017
Revision accepted: 4 February 2018