 http://dx.doi.org/10.7733/jnfcwt-k.2013.11.3.245

Determinations of the Exposure Rate Using a NaI(Tl) Detector of the Environmental Radiation Monitor

환경방사선감시기의 NaI(Tl) 검출기를 이용한 조사선량률 결정방법

Young-Yong Ji*, Wanno Lee, Sang-Do Choi, Kun Ho Chung, Mun Ja Kang and Geun-Sik Choi
Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989, Yuseong, Daejeon, Korea

지영용*, 이완로, 최상도, 정근호, 강문자, 최근식
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received May 2, 2013 / Revised July 19, 2013 / Approved September 5, 2013)

The energy band and the G-factor method were compared to determine the exposure rate from the measured spectrum using a NaI(Tl) scintillation detector. First, G-factors of a 3"ΦX3" NaI(Tl) detector mounted to a EFRD 3300, which means the environmental radiation monitor, in Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) were calculated for several directions of incident photons through the MCNP modeling, and the optimum G-factor applicable to that monitor was then determined by comparing the results both the energy band method and the G-factor method. The results for these spectrometric determinations were also compared with the dose rate from a HPIC radiation monitor around a EFRD 3300. The measured value at the EFRD 3300 based on a 3"ΦX3" NaI(Tl) detector was 7.7 μR/h and its difference was shown about 3 μR/h, when compared with the results from a HPIC radiation moditor. Since a HPIC is known to be able to measure cosmic rays with the relatively high energy, the difference between them was caused by cosmic rays which were not detected in a 3"ΦX3" NaI(Tl) detector.

Key words: Energy band, G-factor, Environmental radiation monitor, NaI(Tl), Dose conversion, MCNP

NaI(Tl) 섬광검출기로 측정한 에너지 스펙트럼으로부터 공간 감마 선량률을 계산하기 위하여 에너지밴드 방법과 G-factor 방법의 결과를 비교 검토하였다. 먼저 한국원자력연구원 내 운영 중인 환경방사선감시기 EFRD 3300에 장착된 3"ΦX3" NaI(Tl) 검출기의 G-factor를 MCNP 모델링을 통하여 입사 방사선의 방향에 따라 각각 구하였으며, 이로부터 계산된 선량률과 에너지밴드 방법으로 계산된 결과의 차이를 비교 검토함으로써 EFRD 3300에 적용 가능한 최적의 G-factor 값을 유도하였다. 그리고 EFRD 3300 방사선감시기가 운영되고 있는 지역 주변에 위치한 HPIC 방사선감시기의 선량률과 비교 검토를 수행하였으며, 3"ΦX3" NaI(Tl) 검출기 기반의 EFRD 3300에서 7.7 μR/h의 측정값을 얻어 약 3 μR/h 정도의 차이를 보였다. 일반적으로 HPIC 방사선감시기는 고에너지 우주방사선량도 측정할 수 있는 것으로 알려져 있으므로, 이 차이는 3"ΦX3" NaI 계측기로 측정되지 못하는 고에너지 영역의 우주방사선에 의한 영향으로 평가할 수 있었다.

중심단어 : 에너지밴드, G-factor, 방사선감시기, NaI(Tl), 선량환산, MCNP

*Corresponding Author. E-mail: yyji@kaeri.re.kr, Tel: +82.42.868.4958

1. 서 론

일반적으로 원자력시설 주변의 환경방사선량률을 감시하기 위한 검출기로는 가압 전리함(HPIC, high pressure ion chamber)이 널리 활용되고 있다. 이 검출기는 주변 방사선에 대한 안정적인 선량률 측정을 할 수 있는 장점이 있지만 감마선의 에너지를 구별하지 않고 일정 시간동안의 선량률을 제시하기 때문에 스펙트럼 획득을 통한 핵종 판별 등으로 인공 방사선에 대한 기여를 파악할 수 없는 단점이 있다. 그러나 NaI(Tl) 섬광검출기로 측정한 에너지 스펙트럼으로부터 선량률을 계산하는 분광분석 기반의 조사선량률 결정방법은 인공 감마핵종의 기여를 직접 확인하고 평가할 수 있다는 장점 때문에 환경 방사선감시기에 도입되고 있는 추세이다.

에너지 스펙트럼으로부터 조사선량률을 계산하는 방법으로는 이론적으로 계산된 에너지별 플루언스(fluence)와 스펙트럼 상에서 측정된 전에너지흡수 피크의 참면적(net area)과의 비교로부터 선량률을 계산하는 피크 방법(peak method)[1～4]과 검출된 피크들의 참면적을 결정하는 대신 임의의 에너지 영역대(band 또는 window)를 설정하여 그 영역대에서 측정된 계수율로부터 선량률을 계산하는 에너지밴드 방법[1～3], 그리고 사용하는 분광검출기에 대한 감마선 에너지별 반응함수를 이론적으로 계산하여 이로부터 에너지 스펙트럼상의 채널별로 계수율당 조사선량률 함수를 구하는 G-factor 방법[5～7]으로 나눌 수 있다.

효율적인 측정환경과 비용적인 측면을 고려하여 분광분석이 가능한 방사선감시기로는 계수효율이 높은 NaI(Tl) 섬광검출기를 주로 사용하기 때문에, 이 검출기의 분해능 특성상 피크 방법을 이용하여 선량률에 기여하는 주요 핵종들의 모든 에너지 피크들에 대한 정확한 참면적을 계산하기에는 한계가 있으며, 특히 스펙트럼 상의 피크들에서 컴프턴 연속부를 지정하는데 주관적인 판단이 크게 좌우된다. 이 단점을 보완하고자 특정 에너지 영역대를 설정하여, 이 영역대들에서만의 계수율로부터 자연방사성핵종들에 기인한 선량률을 계산하는 에너지밴드 방법이 주로 사용된다. 에너지 영역대는 자연방사성 핵종인 ^{40}K의 1461 keV, U 계열을 대표하는 핵종인 ^{214}Bi의 1764 keV 및 Th 계열을 대표하는 ^{208}Tl의 2615 keV 감마선 에너지 주위의 영역을 사용하는 경우와 측정된 스펙트럼 상에서 150 keV에서 3.4 MeV까지의 전 에너지 영역대 모두를 이용하는 경우로 나눌 수 있다. 그러나 에너지밴드 방법의 경우, 각 영역대에서의 계수율로부터 선량률을 유도하기 위해서는 여러 선량률 준위를 가지는 지표면에서 HPIC를 이용한 선량률 측정값과 사용하고자 하는 NaI(Tl) 검출기의 계수율의 비교로부터 복잡한 교정 절차를 거쳐야하는 단점이 있다. 반면에 G-factor 방법은 측정 검출기에 대한 몬테칼로 해석을 이용하여 감마선 에너지별 반응함수를 계산함으로써, 측정된 스펙트럼의 채널당 계수율을 바로 선량률로 환산할 수 있는 인자를 에너지별로 구할 수 있는 유용한 방법이다.

본 연구에서는 3"ΦX3" NaI(Tl) 검출기를 장착한 방사선감시기를 이용하여 약 15분 간격으로 측정되는 스펙트럼들로부터 에너지밴드 및 G-factor 방법을 각각 이용하여 공간 감마 선량률을 계산하였으며, 그 차이를 비교해 보았다. 그리고 NaI(Tl) 방사선감시기가 운영되고 있는 주변에 위치한 HPIC 방사선감시기의 결과로부터 NaI 계측기로 측정되지 못하는 고에너지 영역의 우주방사선 영향을 평가할 수 있었다.

2. 재료 및 방법

2.1 선량환산 방법

2.1.1 에너지밴드 방법

환경중의 방사선량률은 거의 ^{40}K, ^{238}U 계열, 및 ^{232}Th 계열의 핵종으로부터 방출되는 감마선과 해당 지역의 우주방사선으로 구성된다. 일반적으로 NaI(Tl) 검출기에 대한 에너지 측정범위를 3 MeV 이하로 설정하는 경우, 우주방사선의 직접적인 기여는 무시할 수 있으며, 산란된 우주방사선에 대한 반응도 상대적으로 작은 것으로 알려져 있다[2]. 따라서 NaI(Tl) 검출기로 측정할 수 있는 환경방사선량률의 원천은 크게 주위 지표면으로부터 방사되는 ^{40}K, ^{238}U 계열, 및 ^{232}Th 계열 핵종들의 방사선과 지표면에서 빠져나와 대기 중에 떠다니는 라돈과 그 자손 핵종들에 의한 방사선으로 나눌 수 있다.

이로부터 환경방사선량률의 원천 중에서 각 계열을 대표하는 핵종을 선정하고 그 핵종들로부터 방출되는 감마선 에너지 영역대의 계수율과 선량률과의 선형적인 관계를 수식화한 것이 에너지밴드 방법이다. 이 세 에너지 영역대에서 계산된 선량률이 ^{40}K, ^{238}U 계열, 및 ^{232}Th 계열에 있는 핵종들에 대한 총 선량률을 의미하며, 이들의 합이 해당 지역에서의 공간 감마 선량률이 된다. 뿐만 아니라, 에너지 영역대를 150 keV에서 3.4 MeV까지 설정하여, 해당 영역

Table 1. The specified energy band for four groups

Group	Representative nuclide	Energy Band (MeV)
^{40}K	^{40}K	1.32 ~ 1.60
^{238}U series	^{214}Bi	1.62 ~ 1.90
^{232}Th series	^{208}Tl	2.48 ~ 2.75
Total energy	-	0.15 ~ 3.4

에서의 계수율과 선량률과의 선형적인 관계를 수식화하여 바로 해당 지역의 공간 감마 선량률을 구할 수도 있다. 이상과 같은 에너지밴드 방법에서 정의하는 대표 핵종 및 에너지 영역대를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 3"ΦX3" NaI(Tl) 검출기를 장착한 방사선감시기로부터 측정된 네 가지 에너지 영역대에서의 계수율로부터 에너지밴드 방법을 이용한 해당 지역의 공간 감마 선량률을 구하기 위하여 제작사가 실험을 통하여 제시한 비례식[8]을 사용하였다.

2.1.2 G-factor 방법

G-factor 방법은 사용하고자 하는 검출기의 감마선에 대한 에너지별 반응함수를 몬테칼로 해석 등의 이론적인 방법으로 계산하고, 이로부터 측정된 스펙트럼의 채널당 계수율을 바로 선량률로 환산할 수 있는 인자를 에너지별로 구하는 방법이다. G-factor를 이용한 조사선량률($\dot{X}$) 계산 방법은 식 (1)과 같다.

$$\dot{X} = \int n(E)G(E)dE \quad (1)$$

여기서, n(E)는 에너지 스펙트럼에서 단위 에너지당 계수율, 그리고 G(E)는 선량률 변환인자인 G-factor(μR/h/cps)를 의미한다.

식 (1)의 단위 에너지당 계수율은 입사 감마선속(flux)에 대하여 검출기 반응함수로부터 식 (2)와 같이 이론적으로 계산할 수 있으며, 입사 감마선속은 식 (3)과 같이 조사선량률과 관계되는 양으로 표현할 수 있다.

$$n_i = R_{ij}\Phi_j \quad (2)$$

$$\dot{X} = C\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{air} E_j\Phi_j \quad (3)$$

여기서, n_i는 측정된 스펙트럼의 i번째 채널에서의 참 계수율(s^{-1}), R_{ij}는 검출기 반응함수로서 에너지 E_j의 입사 감마선속(Φ_j)당 기록된 에너지별 계수율을 의미한다. 그리고 C는 입사 감마선속으로부터 조사선량률로 변환하기 위한 상수, $(\mu_{en}/\rho)_{air}$는 공기중 질량에너지흡수계수를 의미한다.

식 (1)에서 (3)을 이용하여 채널당 계수율에 대한 선량률 변환 인자인 G-factor를 식 (4)와 같이 반응함수의 역행렬에 비례하는 형태로 표현할 수 있다. 따라서 검출기 반응함수로부터 G-factor를 계산하고, 이를 식(1)을 대입하여 전에너지에 걸쳐 측정된 에너지당 계수율로부터 조사선량률을 직접 계산할 수 있다. 본 연구에서는 3"ΦX3" NaI(Tl) 검출기를 장착한 방사선감시기에 대한 G-factor를 직접 계산하였으며, 이로부터 구한 선량률과 에너지밴드 방법을 이용하여 계산한 선량률 결과를 비교하였다.

$$G_i = C\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{air} E_j R_{ij}^{-1} \quad (4)$$

2.2 EFRD 3300

NaI(Tl) 검출기의 스펙트럼으로부터 공간 감마 선량률뿐만 아니라 인공 방사선의 존재 여부를 파악할 수 있는 장점으로 해당 검출기는 환경방사선 감시 목적으로의 활용이 증가하고 있는 추세이다. 원자력연구원에서는 Fig. 1과 같이 3"ΦX3" 크기의 NaI(Tl) 섬광검출기 기반의 방사선감시기(EFRD 3300)를 도입하여 성능 시험 중이며, 인접한 곳에 위치한 HPIC 방사선감시기의 결과와 비교 검토를 하고 있다.

일반적으로 NaI(Tl) 검출기는 우수한 계수효율을 가져 방사선감시기로의 장점이 있지만 주위 온도에 민감한 단점이 있어, 환경 중에 고정 설치하여 운영해야하는 방사선감시기의 특성상 이에 대한 해결이 반드시 동반되어야 한다. 주위 온도변화에 따라 NaI(Tl) 검출기로부터의 펄스파고가 변하여 채널 이동이 빈번히 발생하며[9], 따라서 측정되는 스펙트럼마다 에너지 교정을 수행해야 하는 단점이 있다. 이를 해결하고자 해당 감시기는 측정된 스펙트럼상의 자연핵종인 ^{208}Tl의 2614 keV에 대한 피크위치로부터 소프트웨어적인 에너지교정을 자체 수행하는 실시간 자동 채널이동 보정 기능을 장착하고 있다. 그리고 해당 감시기는 측정된 스펙트럼으로부터 선량환산 방법으로 에너지밴드 방법을 사용하고 있다.

Fig. 1의 설치 운영 중인 EFRD3300 방사선감시기에서 보듯이, 해당 감시기는 NaI(Tl) 검출기의 방향이 지표면이 아닌 위를 향하고 있는 것이 특징이다. 에너지밴드 방법에

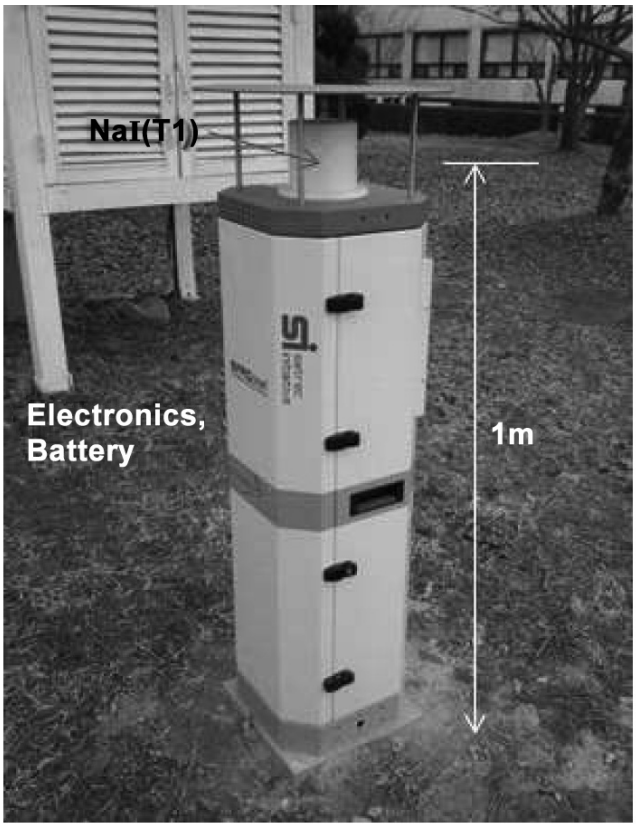

Fig. 1. ERM system based on a 3 ″Φ×3″ NaI(Tl) detector.

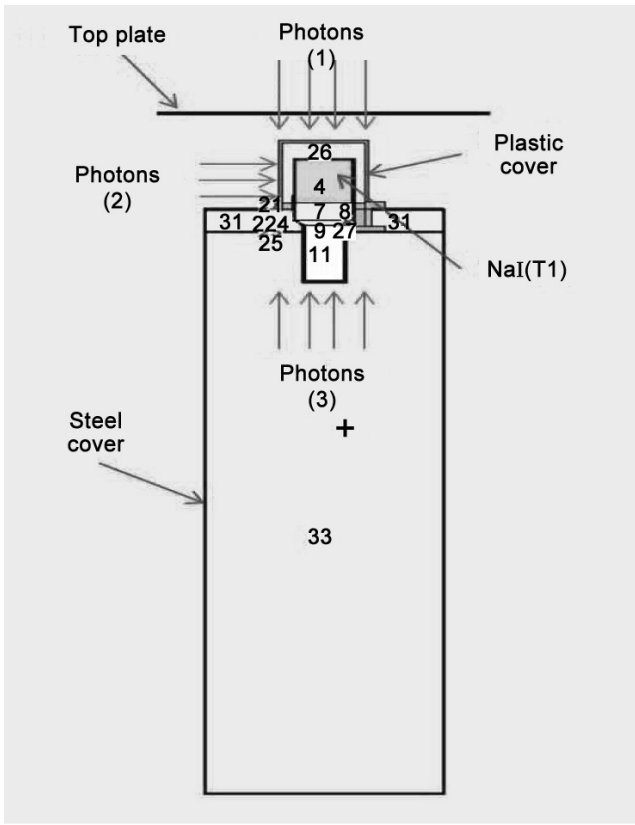

Fig. 2. MCNP modeling of a EFRD 3300.

의한 선량환산을 위해 3"ΦX3" NaI(Tl) 검출기의 변환계수를 구한 선행 연구자[4]의 절차는 검출기를 지표면을 보도록 설치한 후에 스펙트럼 상의 계수율과 HPIC에 의한 선량률 값을 비교한 것이기 때문에, 실제 운영중인 방사선감시기에 대한 이 변환계수들 재평가해야 한다. 이를 위해, 해당 제작사는 원자력안전기술원에서 운영중인 22 개 지역의 HPIC 결과와 같은 지역에 위치한 EFRD 3300의 결과 비교로부터 변환계수를 각각 유도하여 소프트웨어적으로 제시하고 있다[8].

2.3 EFRD 3300의 G-factor

에너지밴드 방법에 의한 EFRD 3300 결과 값과의 비교를 위하여, 3"ΦX3" NaI(Tl) 검출기에 대한 G-factor를 여러 입사 감마선의 각도에 대해 각각 구하였으며, 입사 감마선의 각도 변화에 따른 선량률 변화를 G-factor 방법으로 계산하여 그 값을 비교해 보았다. 먼저 Fig. 2에 EFRD 3300 방사선감시기의 G-factor를 구하기 위한 MCNP 모델링을 도식화 하였으며, 입사 감마선이 검출기 축의 수직방향과 위, 아래의 수평방향으로 각각 입사할 때를 가정하여 감마선 에너지 50 keV에서부터 3 MeV까지 에너지별 반응함수를 구하였다. 에너지별 반응함수를 50x50 행렬로 만들고 이에 대한 역행렬을 취한 후, 식 (4)를 이용하여 G-factor를 도출하였다.

Fig. 3의 입사감마선에 따른 G-factor 값의 변화에서 보듯이, 수직으로 입사할 때의 G-factor 값이 전 에너지에 걸쳐 가장 작았으며, 수평방향으로 위에서 아래로 입사하는 감마선을 가정하였을 때의 G-factor 값은 수직 방향보다 약간 큰 값을 보였다. 그리고 수평방향 아래에서 위로 입사하는 감마선의 경우는 다른 G-factor들에 비해, 특히 낮은 감마선 에너지에서 상대적으로 큰 G-factor 값들을 나타내었다. 이는 일반적인 NaI(Tl) 검출기의 방향의존성과 비교하여 Fig. 2의 2번 방향으로 감마선이 입사할 때, 검출기의 반응도가 최대이고 3번 방향으로 입사할 때, 반응도가 최소이며 크게 감소되기 때문에, G-factor는 검출기 반응함수의 역에 비례한다는 식 (4)에 비추어 타당한 결과로 판단된다.

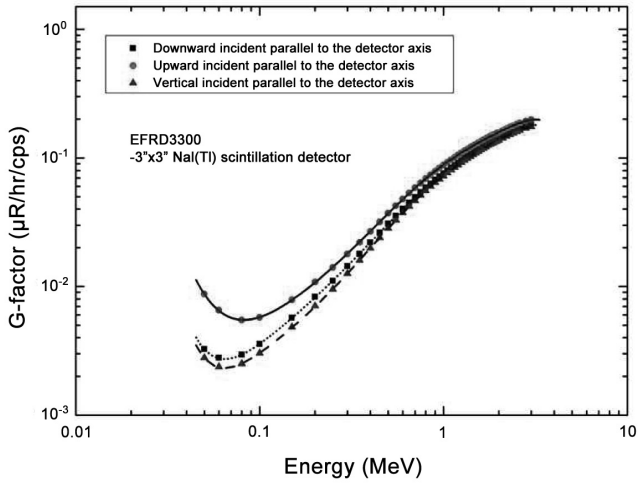

Fig. 3. G-factors of a EFRD 3300 depending on the direction of incident photons.

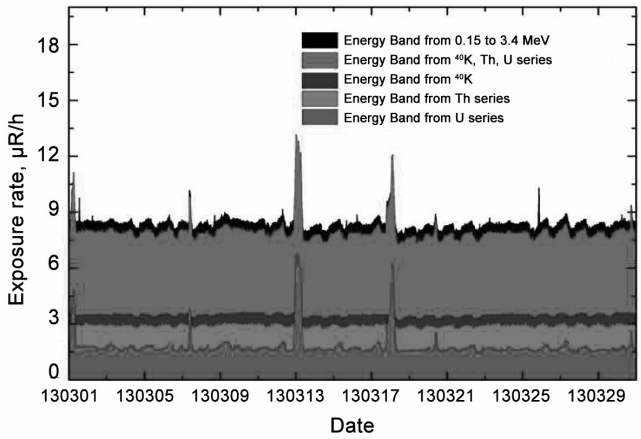

Fig. 4. Exposure rate from the energy band method.

3. 결과 및 고찰

EFRD 3300 방사선감시기로부터 매 15 분마다 측정되는 스펙트럼을 이용하여 에너지밴드 방법 및 G-factor 방법에 의한 조사선량률을 각각 계산하여 서로 비교해 보았다. 이때, Table 1에서와 같이 세 종류의 한정된 비교적 높은 에너지 영역대에서의 계수율로부터 선량률을 구하는 방법과 저에너지 150 keV 이상부터 3.4 MeV까지의 전 에너지 영역대의 계수율로부터 선량률을 구하는 두 가지 방법에 대한 결과를 비교 검토함으로써 EFRD 3300를 이용한 공간 감마 선량률 측정에 적용할 수 있는 최적의 방법을 도출하였다. 그리고 감마선의 입사방향에 따른 G-factor를 도출하여 측정된 스펙트럼으로부터 선량률을 각각 계산하였으며, 이를 에너지밴드 방법의 결과와 비교함으로써 적용 가능한 최적의 G-factor를 EFRD 3300에 대하여 도출하였다.

3.1 에너지밴드 방법에 의한 선량률

EFRD 3300 방사선감시기를 이용한 3월 한 달간의 모니터링 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 선량률의 일시적인 증가는 비에 의해 대기 중 자연방사성핵종들 특히 라돈 등이 씻겨 내림으로 인한 결과이다. 이런 경우, ^{40}K의 에너지 영역대와 Th 계열의 대표 핵종인 ^{208}Tl의 에너지 영역대에서의 계수율 변화는 크지 않으며 U 계열의 대표 핵종인 ^{214}Bi 핵종의 에너지 영역대에서의 계수율 변화가 뚜렷했다. 평균적으로 U 계열에 의한 선량률은 1.7 μR/h, Th 계열에 의한 선량률은 2.8 μR/h, 그리고 ^{40}K에 의한 선량률은 3.4 μR/h로 계산되었다. 그리고 이 들의 합에 의한 총 환경방사선량률은 약 7.9 μR/h로 평가되었으며, 전 에너지 영역대에서의 계수율로 평가된 총 선량률은 약 8.4로 비교적 고 에너지의 세 영역대에서 계산된 총 선량률에 비해 약 6.7 % 높은 결과로 조사되었다. EFRD 3300 방사선감시기에는 두 가지 방법에 따른 환경방사선량률을 각각 제시할 수 있는 기능이 있으며, 큰 차이는 없으나 적용한 에너지밴드 방법에서 두 결과가 서로 상이한 이유는 해당 방법의 변환 계수를 결정하기 위하여 EFRD 3300에서 측정된 선량률과 HPIC의 선량률 결과를 비교함에 있어서 HPIC의 우주방사선 측정부분을 배제하지 못한 채, 두 결과를 비교함에서 비롯되었다고 판단된다.

일반적으로 우주방사선의 영향은 지역마다 차이가 있으며, 선량 변환계수 결정시 NaI(Tl) 검출기의 스펙트럼에서 우주방사선을 제외한 스펙트럼의 총 에너지 계수율은 HPIC로 측정된 선량률에서 우주방사선을 제외한 선량률에 비례하기 때문에[9] 두 방사선감시기의 결과를 비교치로 사용할 때 우주방사선의 영향을 배제함이 바람직하다. 따라서 위 두 결과의 차이는 서로 다른 에너지 영역대에서 선량률을 환산하기 때문에 우주방사선의 영향이 다름으로 인한 결과로 판단되며, 150 keV부터 3.4 MeV의 전 에너지 영역의 계수율로부터 선량률을 계산하는 방법보다 산란 우주방사선의 영향이 비교적 적은 한정된 세 에너지 영역대에서만의 계수율로 평가하는 방법이 합리적일 수 있다. 결과적으로 EFRD 3300 방사선감시기는 해당 변환계수를 적용함에 있어서 우주방사선의 영향을 무시할 수 없

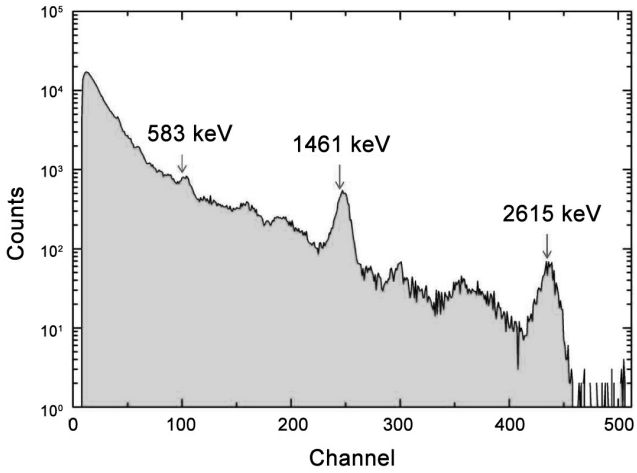

Fig. 5. Energy spectrum of EFRD 3300 for the environmental radiation (12:00 PM, 1st March).

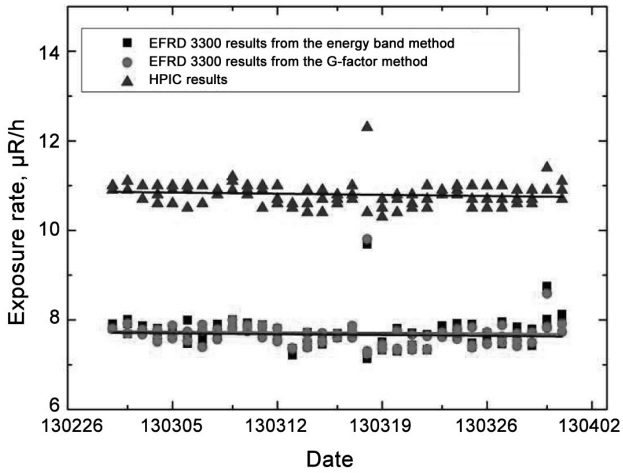

Fig. 7. The comparison between EFRD 3300 results and HPIC results.

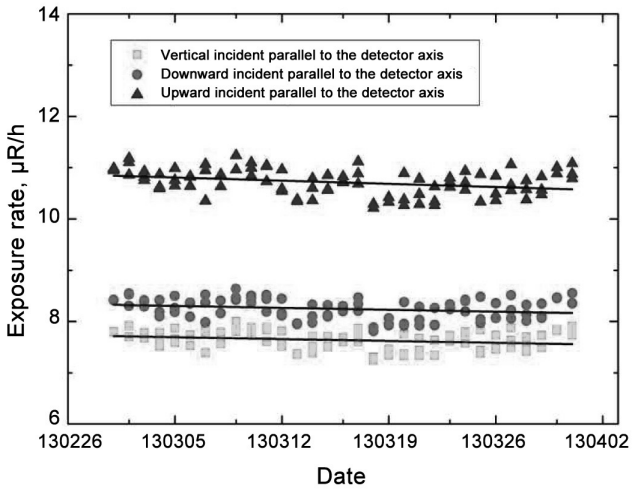

Fig. 6. Exposure rate from the G-factor method.

을 것으로 판단되며, 1.32 MeV 이상의 한정된 세 가지 에너지 영역대에서의 계수율로부터 선량률을 환산하는 방법은 그 영향이 작을 것으로 판단되어 세 에너지 영역대에서 계산된 선량률의 합인 평균 7.9 μR/h이 EFRD 3300으로 측정된 적절한 선량률로 판단된다.

3.2 G-factor 방법에 의한 선량률

EFRD 3300 방사선감시기로 3월간 측정된 매 15 분간의 스펙트럼 중 하루 당 3 개의 스펙트럼을 이용하여 G-factor에 의한 선량률을 계산하였다. 먼저, 스펙트럼의 에너지 교정을 위하여 Fig. 5와 같이 세 종류의 자연방사성핵종 피크들인 583 keV, 1461 keV, 및 2615 keV를 활용했으며, 계수가 시작되는 채널을 일정하게 유지시켰다. 에너지 교정이 끝난 스펙트럼에 Fig. 3의 입사 감마선의 방향에 따른 G-factor들을 각각 곱하여 식 (1)과 같은 방법으로 선량률을 계산하였다.

Fig. 6에 G-factor 방법에 의해 계산된 선량률을 나타내었다. 먼저 입사 감마선의 방향이 검출기 축에 평행하게 지표면으로부터 입사한다고 가정할 경우, 평가된 선량률은 10 μR/h 이상의 과대평가된 결과를 얻었으며, 감마선의 방향이 검출기 축에 수직한 방향으로 가정할 경우, 평균적으로 7.7 μR/h로 평가되어 에너지밴드 방법에서 계산된 결과와 거의 일치하였다. 일반적으로 무한 평면인 지표면에 분포된 자연방사성핵종들과 지표면에서 빠져나와 대기 중에 있는 자연방사성핵종들로부터의 감마선이 지상 1 m 높이에서 지표면과 반대 방향을 보고 있는 검출기에 입사할 때, 검출기 축에 대하여 수직한 방향으로 입사하는 감마선의 빈도가 수평 방향에 비해 클 것으로 예상되기 때문에, G-factor를 이용한 선량률 계산 방법에서 입사 감마선의 방향을 검출기 축에 수직한 방향으로 가정하고 계산한 G-factor를 활용하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

3.3 HPIC 측정 결과와의 비교

한국원자력연구원 내 EFRD 3300 방사선감시기가 설

치된 바로 인접 구역에 Reuter Stokes 사의 HPIC 방사선 감시기가 동시 운영 중에 있다. 이 HPIC는 약 25 기압의 아르곤으로 충전된 직경 10 인치 크기의 스테인리스 스틸구로 구성되어 있으며, 입사 감마선의 에너지에 대한 HPIC의 반응도는 약 8 MeV까지 일정한 것으로 알려져 있다[10]. Fig. 7에 같은 지역에서 HPIC와 EFRD 3300 방사선감시기를 이용하여 측정한 선량률을 나타내었다. 기본적으로 EFRD 3300의 결과는 15 분간 측정된 스펙트럼으로부터 계산한 하루당 3 개의 결과이며, HPIC의 결과는 EFRD의 15 분을 포함한 시간대의 1 시간동안의 평균값을 사용하였다. 평균적으로 HPIC로 측정한 선량률은 10.8 μR/h로 평가되었으며, EFRD의 결과와는 약 3.1 μR/h의 차이를 보였다. 이렇게 3"ΦX3" NaI(Tl) 검출기의 측정값이 HPIC에 비해 작은 원인은 NaI(Tl) 검출기로 측정한 감마선 에너지 스펙트럼의 범위는 3 MeV임에 반해 HPIC는 그 이상의 고에너지 방사선을 측정할 수 있기 때문이다. 일반적으로 ^{40}K, ^{238}U 계열, 및 ^{232}Th 계열의 핵종으로부터 방출되는 감마선의 에너지 분포는 대부분 3 MeV 이내에 있으며, 3 MeV 이상의 에너지 영역은 해당 지역의 우주방사선에서 기인된다고 할 수 있으므로 두 방사선감시기의 결과 차이는 이에 해당된다.

4. 결 론

NaI(Tl) 검출기 기반의 방사선감시기를 이용하여 한국원자력연구원 내 임의 지역에서의 환경방사선량률을 모니터링하였으며, 그 결과를 인접한 장소에서 측정된 HPIC의 결과와 비교하였다. 3"ΦX3" NaI(Tl) 검출기 기반의 EFRD 3300에서 7.7 μR/h의 측정값을 얻어, 두 측정 결과에서 약 3.1 μR/h의 차이가 발생하였으며, 이는 해당 지역에서의 고에너지 우주방사선에 기인한 값으로 판단할 수 있었다. 그리고 사용한 EFRD 3300 방사선감시기의 3"ΦX3" NaI(Tl)에 적용될 수 있는 다양한 선량환산 방법을 검토하였다. 종래에 적용되던 에너지밴드 방법 외에 G-factor 방법을 도입하기 위하여 MCNP 모델링을 통한 EFRD 3300의 G-factor를 입사 방사선의 방향에 따라 각각 구하였다. 그 결과 검출기 축에 수직한 방향으로 입사하는 감마선에 대한 반응함수로부터 유도된 G-factor를 EFRD 3300에 적용할 경우, 기존의 에너지밴드 방법으로 계산된 선량률 결과와 G-factor에 의한 선량률 결과가 거의 일치하였으며, 따라서 EFRD 3300에 적용 가능한 최적의 G-factor 값을 유도할 수 있었다.

REFERENCES

[1] H.L. Beck, W.J. Condon and W.M. Lowder, "Spectrometric techniques for measuring environmental gamma radiation", HASL-150 (1964).

[2] H.L. Beck, J. DeCampo and C. Gogolak., "In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectroscopy", HASL-258 (1972).

[3] NCRP, "Environmental radiation measurements", NCRP report no. 50, pp. 84-100 (1976).

[4] M.S. Lee, "Determination of the exposure conversion coefficient for 3"x3" NaI spectrum", J. Korean Asso. Radiat. Prot., 26(2), pp. 73-78 (2001).

[5] J.S. Jun, C.Y. YI, H.S. Chai and H. Cho, "Calculation of spectrum to dose conversion factors for a NaI(Tl) scintillation detector using the response matrix", J. of the Korean Physical Society, 28(6), pp. 716-726 (1995).

[6] G. Cho, H.K. Kim, H. Woo, G. Oh and D.K. Ha, "Electronic dose conversion technique using a NaI(Tl) detector for assessment of exposure dose rate from environmental radiation", IEEE transactions on nuclear science, 45(3), pp. 981-985 (1998).

[7] Y.Y. Ji, D.S. Hong, T.K. Kim, K.K. Kwak and W.S. Ryu, "Application of the dose conversion factor for a NaI(Tl) detector to the radwaste drum assay", Radiation Measurement, vol. 46, pp. 503-509 (2011).

[8] N.H. Seong, "Adaptive algorithm for calculation of dose conversion coeffieicient in 3"ΦX3" NaI(Tl) scintillator", ENG06A-EHC-2006-123, Satrec Initiative Inc. (2006).

[9] K.D. Ianakiev, B.S. Alexandrov, P.B. Littlewood and M.C. Browne, "Temperature behavior of NaI(Tl) scintillation detectors", Nucl. Instrum. Meth., A607, pp. 432-438 (2009).

[10] General Electric, "RSS-131-ER/RSS-131 user's manual", RSS-131-OM, N (2008).