

## Determination of the exposure conversion coefficient for 3" X 3" NaI spectrum

M. S. Lee

Dept of physics, Chongju University

### 3" X 3" NaI 스펙트럼의 조사선량 변환계수 결정

이모성

청주대학교 물리학과

(2001년 3월 21일 접수, 2001년 5월 22일 채택)

**Abstract** - In order to find the exposure conversion coefficients for 3" X 3" NaI spectrum, we measured the exposure rates with the pressurized ion chamber at 29 different areas in the range of  $4\sim 23\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ , and also measured the gamma spectra with 3" X 3" and 4" X 4" NaI detectors, simultaneously. The exposure conversion coefficient of the total energy method was determined using the linear relation between the measured exposure rate and the gamma spectrum energy. In order to find the exposure conversion coefficients of the energy band method, we applied the exposure conversion coefficients recommended by NCRP to the 4" X 4" NaI spectra, and calculated the exposure rates due to  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{232}\text{Th}$  series respectively. Using the linearly proportional relation between the obtained  $^{232}\text{Th}$  series exposure rate and peak area of 2614 keV that represents the  $^{232}\text{Th}$  series, we obtained the exposure conversion coefficients for  $^{232}\text{Th}$  series. We also determined the conversion coefficients for  $^{238}\text{U}$  series and  $^{40}\text{K}$  using a similar method.

**Key words** : 3" X 3" NaI(Tl) detector, exposure rate, total energy method, energy band method, exposure conversion coefficient

**요 약** - 3" X 3" NaI 스펙트럼의 조사선량 변환계수를 구하기 위해, 조사선량률이  $4\sim 23\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$  인 29개 지역에서 가압전리함 검출기로 조사선량률을 측정하고, 동시에 3" X 3" 와 4" X 4" NaI 검출기로 스펙트럼을 측정하였다. 총에너지 방법의 조사선량 변환계수는 측정된 조사선량률과 스펙트럼 에너지의 선형적 비례관계를 사용하여 구하였다. 에너지대 방법의 조사선량 변환계수를 구하기 위해 NCRP에서 권고하는 4" X 4" NaI 검출기에 대한 에너지대 방법의 조사선량 변환계수를 4" X 4" NaI 스펙트럼에 적용하여  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량률을 계산하였다. 이렇게 계산된  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량률과  $^{232}\text{Th}$  계열을 대표하는 2614keV 피크 영역면적의 선형적 비례관계를 이용하여 3" X 3" NaI 검출기 스펙트럼에 대한  $^{232}\text{Th}$  계열 조사선량 변환계수를 구하였다.  $^{40}\text{K}$  및  $^{238}\text{U}$  계열의 조사선량 변환계수도 유사한 방법으로 구해졌다.

**중심어** : 3" X 3" NaI(Tl) 검출기, 조사선량률, 총에너지 방법, 에너지대 방법, 조사선량 변환계수

## 서 론

NaI 검출기 스펙트럼으로부터 조사선량을 평가하는 방법은 스펙트럼 측정의 용이성 및 에너지 스펙트럼을 얻을 수 있다는 이점 때문에 최근 한국원자력안전기술원 및 한국전력공사에서 환경 방사선 감시에 활용하고 있거나 채택할 계획이다.[1,2].

NaI 검출기 스펙트럼으로부터 조사선량을 계산하는 방법으로는 여러 가지가 있지만 NCRP[3]에서는 총에너지 방법과 에너지대 방법을 권고하고 있다. 이들 방법은 1970년대에 EML에서 개발한 것[4]으로, 4" X 4", 3" X 5" NaI 검출기의 조사선량 변환계수만 제시하고 있다. 따라서 3" X 3" NaI 검출기를 사용하기 위해서는 그 검출기에 적

용할 수 있는 조사선량 변환계수를 별도로 구하여야 한다. 그런데 NCRP에서 사용한 조사선량 변환계수 결정방법에 따르기 위해서는 여러 에너지의 감마선에 대해 검출기축에 평행하게 입사하는 감마선의 검출효율, 검출기축 방향으로 입사하는 감마선속이 측정될 계수와 그 감마선이 넓은 지면에서 입사하는 경우에 측정될 계수의 비 그리고 단위 조사선량 당의 감마선 속 등에 대한 자료 등이 필요한데 이를 위해서는 많은 실험과 복잡한 계산이 요구된다.

그래서 보다 간단하게 3" X 3" NaI 검출기의 조사선량 변환계수를 구하기 위해 대안의 방법으로 여러 지역에서 가압전리함 검출기로 조사선량을 측정하고 동시에 3" X 3" 및 4" X 4" NaI 검출기로 측정된 스펙트럼을 이용하고자 하였다. 즉 3" X 3" NaI 검출기에 대한 총에너지 방법의 조사선량 변환계수는 가압전리함 검출기로 측정된 조사선량과 스펙트럼 에너지의 선형적 비례관계로부터 구할 수 있다. 다음 에너지대 방법의 조사선량 변환계수는 4" X 4" NaI 스펙트럼을 이용하여 구할 수 있다. NCRP에서 4" X 4" NaI 검출기에 대해 권고하는 에너지대 방법의 조사선량 변환계수를 4" X 4" NaI 스펙트럼에 적용하여 각 지역의  $^{40}\text{K}$ 과  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량을 구한다. 이들 조사선량과 3" X 3" NaI 스펙트럼을 이용하면 3" X 3" NaI 스펙트럼에 대한 에너지대 방법의 조사선량 변환계수를 구할 수 있다. 예를 들어  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량 변환계수는  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량과  $^{232}\text{Th}$  계열을 대표하는 2614keV 피크 영역면적의 선형적 비례관계로부터 구해진다.  $^{40}\text{K}$  및  $^{238}\text{U}$  계열의 조사선량은  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열을 대표하는 1460, 1764, 2614keV 피크 영역면적의 선형 결합으로 쓸 수 있는데  $^{40}\text{K}$  및  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량을 이미 알고 있으므로 선형 결합의 계수 즉 조사선량 변환계수들도 구해진다.

따라서 이 연구에서는 위에서 제시한 방법으로 3" X 3" NaI 스펙트럼에 적용할 수 있는 조사선량 변환계수를 구하기 위해 조사선량률이 다른 29개의 지역 특히 토양 중  $^{40}\text{K}$ 의 농도를 아는 지역에서 가압전리함 검출기로 조사선량률을 측정하고 동시에 3" X 3", 4" X 4" NaI 스펙트럼을 측정하였다. 또한 위 측정기들로 동시에 한 지역에서 2주일 이상 연속으로 조사선량률과 스펙트럼을 측정하였다. 이들 측정 자료를 이용하여 3" X 3" NaI 스펙트럼에 대한 총에너지 방법과 에너지대 방법의 조사선량 변환계수들을 결정하고자 하였다.

## 방사선의 측정

NaI 스펙트럼의 조사선량 변환계수를 결정하기 위해 본 연구에서는 방사선 조사지점을 1997년 한국원자력안전기술원에서 전 국토를 대상으로 측정된 환경방사선 조사자료를 참고하였다. 이 조사자료로부터 조사지점의 지리정보, 그 지점에서의 조사선량률 그리고 일부지역에서 측정된 토양 중  $^{40}\text{K}$ 의 방사능농도를 참고할 수가 있었다.  $^{40}\text{K}$  방사능농도는 에너지대 방법으로 평가한 조사선량률 중  $^{40}\text{K}$ 에 의한 조사선량의 정확성을 평가하는데 참고하였다.

한국원자력안전기술원에서 수행한 전국토 환경방사선 조사자료를 검토한 결과 조사선량률은 강원도 영서지방이 높았는데, 우주선을 제외한 환경방사선의 조사선량률이  $25\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ 까지 되는 곳도 있었다. 방사선 측정의 통계적변동을 고려한다면 조사선량 변환계수 결정을 위한 스펙트럼은 환경방사선의 준위가 높은 지역에서 측정하는 것이 유리하다. 따라서 토양 중  $^{40}\text{K}$ 의 방사능농도를 알 수 있고 조사선량률이 비교적 높은 29개 지역을 선정하였다(표 1). 이 표에 제시한 조사선량률은 전국토 환경 방사선 조사 자료와는 별도로 NaI 스펙트럼을 측정할 때 가압전리함 검출기를 이용하여 측정된 것이다.

Table 1.  $^{40}\text{K}$  concentrations in soil and exposure rates at 29 survey areas selected for determination of exposure conversion coefficients of NaI spectrum.

$^{40}\text{K}$ concentrations ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	No. of survey area	exposure rates ( $\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ )	No. of survey area
1200 ~	1	20 ~	1
1100	2	18 ~ 19	-
1000	4	16 ~ 17	-
900	1	14 ~ 15	2
800	2	12 ~ 13	2
700	3	10 ~ 11	10
600	8	8 ~ 9	9
500	5	6 ~ 7	2
400	2	4 ~ 5	3
300	1		
Total	29		29

표 1의 지역에서 측정된 조사선량률과 스펙트럼을 조사선량 변환계수 결정에 이용한다면 스펙트럼으로부터 계산된 조사선량률을 외삽 없이  $25 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  까지 신뢰할 수 있을 것이다. 조사 지역의 토양 중  $^{40}\text{K}$ 의 농도는 표에서 보는 바와 같이  $300 \sim 1200 \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 으로 최대값이 최소값의 4배에 이르는 넓은 범위에 걸쳐 있어  $^{40}\text{K}$ 의 농도로부터 계산된 선량률과 스펙트럼으로부터 계산된  $^{40}\text{K}$ 의 선량률 비교가 적절할 것으로 판단되었다.  $^{40}\text{K}$ 의 농도와 조사선량률 사이의 상관관계는 0.38로 그림 1에서 보는 바와 같이 그리 높지 않은 편이다. 이것은 환경 방사선이  $^{40}\text{K}$ 에 의한 방사선 이외에도  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 방사성핵종으로부터 방출되는 방사선 영향이 크기 때문이다.

조사지점에서 조사선량률과 스펙트럼은 가압전리함 검출기 및 3" X 3", 4" X 4" NaI 검출기를 사용하여 30분간씩 측정하였다. 모든 검출기는 지표면으로부터 1m 위에 위치하도록 하였고, NaI 검출기는 급격한 온도 변화를 방지하기 위해 0.45mm 두께의 백클라이트로 둘러쌌다.

환경방사선의 변동자료는 청주의 한 민가에 검출기들을 설치하고 30분 간격으로 2주일간 측정하였다.

### 조사선량 변환계수 결정

총 에너지대 방법은 150keV 이상의 감마선에 대해 공기와 NaI 물질의 흡수계수 비가 일정하기 때문에[5] 조사선량이 NaI 검출기에 흡수된 에너지에 비례한다는 원리에 기초하고 있다. 즉 NaI 스펙트럼에서 우주선을 제외한 스펙트럼의 총에너지는 가압전리함 검출기로 측정된 조사선량에서 우주선 조사선량을 제외한 조사선량에 비례한다.

NaI 스펙트럼에 포함된 우주선 기여를 확인하기 위해 5000keV까지의 환경 방사선 스펙트럼을 측정 후 3000~5000keV 스펙트럼을 0keV까지 외삽하여 150~3400keV 영역의 우주선 스펙트럼을 구하였다.

29개 지역에서 측정된 4" X 4" NaI 스펙트럼에서 우주선 기여를 제외한 스펙트럼의 에너지에 대한 조사선량률 사이의 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 이 2가지 양은 좋은 선형 비례관계를 유지한다. 이 선형 비례관계로부터 계산된 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대한 조사선량 변환계수는  $0.026 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}/\text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ 이었다. 이 값은 NCRP에서 제시한  $0.027 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}/\text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ 과 4%의 차이가 있다. 한편 계산된 우주선 스펙트럼의 총 에너지는  $7.7\text{BeV} \cdot$

$20\text{min}^{-1}$ 이었으며, 앞에서 구한 조사선량 변환계수를 적용하여 조사선량률을 계산하면  $0.2 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$ 가 되어 NCRP에서 제시하는 값과 일치하였다.

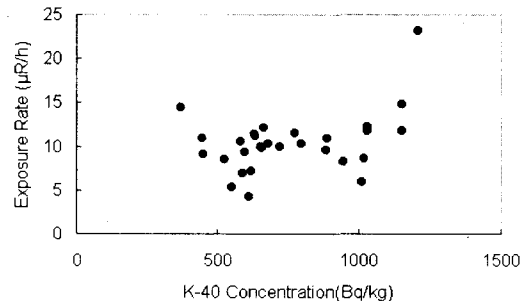


Fig. 1. Relationship between  $^{40}\text{K}$  concentrations and exposure rates at 29 survey areas.

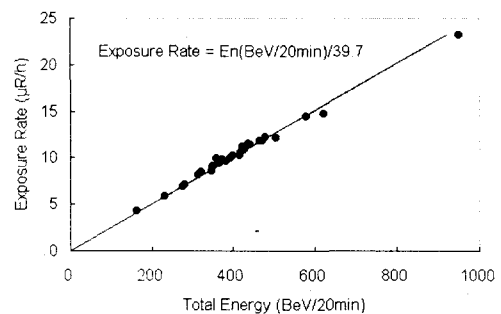


Fig. 2. Linear proportional relation between the total energies calculated from 4"X4" NaI spectra and the exposure rates measured by a pressurized ion chamber.

3" X 3" NaI 스펙트럼에 대한 조사선량 변환계수 및 우주선 기여도 4" X 4" NaI 스펙트럼에서의 경우와 같이 구하였다. 우주선 기여의 에너지는 150~3400keV까지의 스펙트럼에 대해  $3.9 \text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ 로 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대한 값의 0.51배이었다. 계산된 조사선량 변환계수는  $0.052 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}/\text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ 가 되었으며 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대한 값의 2.0배가 된다. 이 조사선량 변환계수는 3" X 3" NaI 검출기의 체적이 4" X 4" NaI 검출기 체적의 44% 수준임을 고려한다면 꽤 큰 값이다. 이에 대해서는 두 검출기의 기하학적 구조를 분석하는 추가적인 검토가 필요할 것이다.

에너지대 방법은 공간중의 자연방사선 대부분

이  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 핵종으로부터 방출되는 방사선과 우주선만으로 이루어졌다는 사실로부터 조사선량이 각 계열 대표핵종으로부터 방출되는 감마선피크 영역의 면적과 선형 결합될 수 있다는 원리에 기초하고 있다. 이 방법에서 사용하고 있는 각 계열 대표 핵종 및 감마선에너지는  $^{40}\text{K}$  핵종은 1460keV,  $^{238}\text{U}$  계열에 대해서는  $^{214}\text{Bi}$ 로부터 방출되는 1764keV,  $^{232}\text{Th}$  계열에 대해서는  $^{208}\text{Tl}$ 로부터 방출되는 2614keV로 하고 있다. 환경방사선 스펙트럼을 측정해 보면 그림 3에서 보는 바와 같이 이들 감마선은 스펙트럼에서 항상 뚜렷한 피크를 나타낸다. 따라서 이들 피크가 이루는 범위인 1320~1600keV, 1620~1900keV, 2480~2750keV에서 우주선을 제외한 계수율에 에너지를 곱한 값을 각각  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  라고 하고, 각 계열의 조사선량을  $K$ ,  $U$ ,  $T$  라고 하면

$$K = aE_1 + bE_2 + cE_3 \quad (1)$$

$$U = dE_2 + eE_3 \quad (2)$$

$$T = fE_3 \quad (3)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 1460keV 피크는 NaI 물질에서 1460keV 감마선의 광전효과 및  $^{232}\text{Th}$ 과  $^{238}\text{U}$  계열 핵종으로부터 방출되는 감마선의 콤프턴 산란효과가 있어,  $K$ 에  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  항이 포함된다. 그러나 1764keV 피크에는  $^{40}\text{K}$  핵종에 의한 감마선의 기여가 없어  $U$ 에서  $E_1$  항이 제외되었고, 2614keV 피크는 2614keV 감마선의 광전효과만 고려해도 되기 때문에  $E_3$  항만 포함된다.

1320~1600keV, 1620~1900keV, 2480~2750 keV 영역의 우주선 기여는 3" X 3" NaI 검출기의 3000~5000keV 스펙트럼을 외삽하여 계산하였다. 각 에너지 영역에서 우주선의 에너지는 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대해 NCRP에서 제시하는 0.40 0.35 0.30  $\text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ 의 1/2인 0.2, 0.17, 0.14 $\text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ 이었다. 이 값은  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ 의 1% 미만이었으며,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ 의 계산에 큰 영향을 미치지 않았다.

조사선량 변환계수  $a \sim f$  는 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대해 NCRP에서 권고하는 에너지대 방법의 조사선량 변환계수를 사용하여  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량을 계산하고, 29개 지역에서 측정된 3" X 3" 검출기의 스펙트럼에 대해 식 (1)~(3)을 이용한 최소제곱법을 이용하여 구하였다. 그 값들은 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대해

NCRP에서 권고하는 값과 비교하여 표 2에 게재하였다. 그러나 이들 계수는 적용될 스펙트럼을 측정하는 검출기의 크기가 다르기 때문에 직접적인 단순 비교는 곤란하다. 표에서 보는 바와 같이  $E_3$ 로부터  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량을 계산하는 계수  $f$ 만이 총에너지 방법의 조사선량 변환계수에서와 유사하게 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대해 NCRP에서 권고하는  $0.3 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}/\text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ 의 2.1배인  $0.63 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}/\text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ 이었다. 나머지  $d$ ,  $e$ 는 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대한 것보다 1.5배 큰 값이고,  $a$ ,  $b$ 는 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대한 것의 2.8배이다. 한편 계수  $c$ 는 4" X 4" NaI 스펙트럼에 대한 것의 4배나 크다.

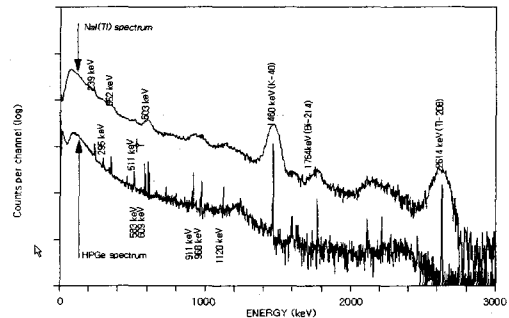


Fig. 3. Typical in-situ NaI(Tl) spectrum and HPGe spectrum.

Table 2. Exposure conversion coefficients recommended for 4" X 4" NaI spectrum by NCRP and calculated for 3" X 3" NaI spectrum from this study.

Exposure Conversion Coefficients	4" X 4" spectrum (NCRP) ( $\mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}/\text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ )	3" X 3" spectrum (this study) ( $\mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}/\text{BeV} \cdot 20\text{min}^{-1}$ )
a, b, c	0.08, -0.06, -0.02	0.23, -0.19, -0.09
d, e	0.4, -0.2	0.58, -0.3
f	0.3	0.63

### 결과 및 고찰

29개 지역에서 측정된 3" X 3" NaI 스펙트럼에 총에너지법의 조사선량 변환계수를 사용하여 계산한 조사선량률과 가압전리함 검출기로 측정된 조사선량률의 차의 평균은  $0.006 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$ 이었고 표준 편차  $0.47 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$ 이내에서 잘 일치하였다.

한편 에너지대 방법의 조사선량 변환계수를 사용하여 3" X 3" NaI 스펙트럼으로부터 계산한  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 선량률과 4" X 4" NaI 스펙트럼으로부터 계산한 각 계열의 선량률의 차의 평균은 모두  $0.03 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  이하이었고, 그에 대한 표준편차는 각각 0.09, 0.42,  $0.42 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  이었다.

NCRP에서 권고하는 토양중  $^{40}\text{K}$  방사능농도로부터 계산한 조사선량률과 에너지대 방법으로 계산한  $^{40}\text{K}$  조사선량률 사이의 관계를 그림 4에 표시하였는데, 두 조사선량률 차의 평균은  $0.2 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  이었으나, 그에 대한 표준편차는  $0.82 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  로 부분적으로 잘 일치하지 않는 경우가 있었다. 이것은 토양시료의 채취시점과 장소, 스펙트럼 측정시점과 장소의 차이에서 오는 요인, 그리고 스펙트럼 측정시 토양수분 함유량의 변화에 따른  $^{40}\text{K}$  핵종으로부터 방출되는 1460keV 감마선의 차폐 차이 등에 기인된 것으로 생각된다.

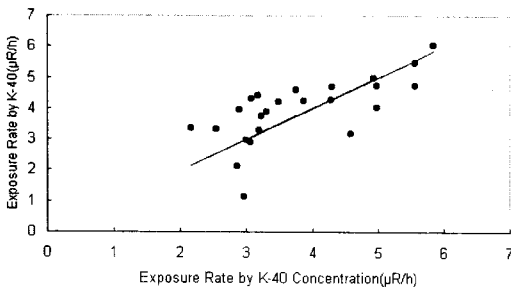


Fig. 4. Relationship between exposure rates by  $^{40}\text{K}$  calculated from  $^{40}\text{K}$  concentrations in soil and calculated by energy band method. The straight line is the exposure rate calculated from  $^{40}\text{K}$  concentrations in soil.

그림 5는 2000년 10월 1일 ~ 10월 14일까지 가압전리함 검출기로 측정된 조사선량률(A)과 총 조사선량률에 대한  $^{238}\text{U}$  계열이 기여한 조사선량률 사이의 관계(B)를 표시한 것이다. 이 기간 중 약간의 강우(10월 2일)가 있었으며, 강우시 조사선량률은 평균  $8.1 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$ 보다  $0.8 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  정도 상승하였다. 이 기간 중 가압전리함 검출기로 측정된 조사선량률과 3" X 3" NaI 스펙트럼으로부터 계산한  $^{238}\text{U}$  계열의 조사선량률을 보면 좋은 선형 비례관계를 나타내고 있다. 또한 이 2가지 방법으로 구해진 조사선량률의 시계열적 변화도 유사하게 나타났다. 이것은 가압전리함 검출기로 측정된 조사선량률의 시간적 변화는  $^{238}\text{U}$  계열의 조사선량률이 우세하게 작용하고 있다는 사실을 나타내며, 에너지대 방법에 의한  $^{238}\text{U}$  계열의 조사선량률 계산이 정확하다는 것을 나타낸다. 그림으로 나타내지는 않았지만  $^{40}\text{K}$ 이나  $^{232}\text{Th}$  계열에 의한 조사

선량률은 강우시에도 변화가 거의 없었다.

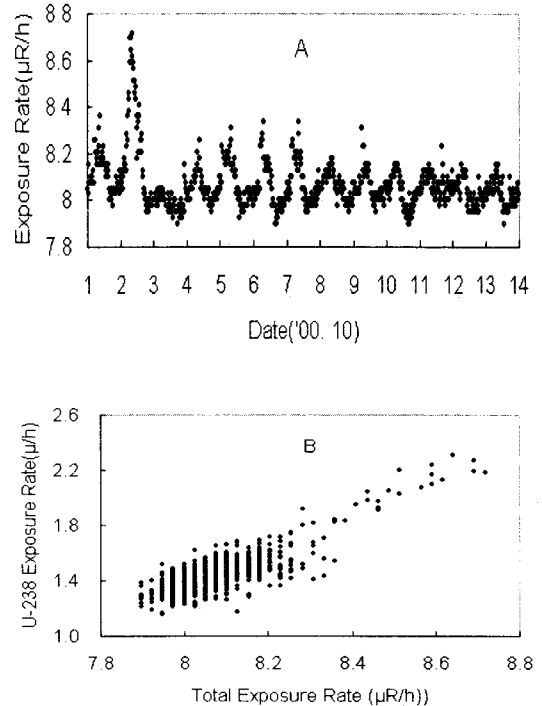


Fig. 5. Exposure rates by Pressurized Ion Chamber during Oct. 1. ~ Oct. 14. in 2000 (A). Relationship between total exposure rate and exposure rate by  $^{238}\text{U}$  series calculated from 3" X 3" NaI spectrum (B)

## 결론

이 연구에서는 29개 지역에서 가압전리함 검출기로 측정된 조사선량과 3" X 3", 4" X 4" NaI 스펙트럼을 이용하여 3" X 3" NaI 스펙트럼에 대한 총에너지 방법과 에너지대 방법의 조사선량 변환계수들을 구하였다.

3" X 3" NaI 스펙트럼에 대한 총에너지 방법의 조사선량 변환계수는  $3.9 \text{BeV} \cdot 20 \text{min}^{-1}$  이었으며, 29개 지역에서 측정된 스펙트럼에 이 계수를 적용하여 계산한 조사선량률과 가압전리함 검출기로 측정된 조사선량률 차의 평균은  $0.006 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  이었으며 표준 편차  $0.47 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  이내에서 잘 일치하였다.

에너지대 방법의 조사선량 변환계수를 사용하여 3" X 3" NaI 스펙트럼으로부터 계산한  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 선량률과 4" X 4" NaI 스펙트럼으로부터 계산한 각 계열의 선량률의 차의 평균은 모두  $0.03 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  이하이었고, 그에 대한 표준편차는 각각 0.09, 0.42,  $0.42 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  이었다

$^{40}\text{K}$  방사능농도로부터 계산한 조사선량률과 에너지대 방법으로 계산한  $^{40}\text{K}$  조사선량률 차의 평균은  $0.2 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$ 이었으나 그에 대한 표준편차는  $0.82 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 부분적으로 잘 일치하지는 않았다.

2000년 10월 1일 ~ 10월 13일까지 측정된 조사선량률과 스펙트럼으로부터 계산한 조사선량률을 비교하였는데, 환경방사선의 강우시 변화가  $^{238}\text{U}$  계열에 의한 조사선량률 변화 때문인 것으로 확인되어  $^{238}\text{U}$  계열에 의한 조사선량률 평가도 적절한 것으로 평가되었다.

### 참고문헌

1. KINS, "원자력발전소 주변의 환경 방사선 분포 및 특성 연구", KINS/HR-389,(2001).
2. KEPRI, Technical Report TR.95ZJ08.97.70, (1997).
3. National Council on Radiation Protection and Measurements, "Environmental Radiation Measurements", NCRP REPORT No. 50, p84-92(1976).
4. H.L.Beck, J.DeCamp and C.Gogolak, "In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometry", HASL-258,(1972).
5. J.H.Hubbel, "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20MeV", Int. J. Appl. Radiat. Instr 33. 1209-1290(1982).