

## 지각 방사선에 의한 피폭선량측정 및 해석\*

전재식 · 오희필<sup>1)</sup>  
충남대학교 물리학과

하정우  
한국 원자력 연구소

### 요 약

자연환경 방사선의 주 요소의 하나인 지각 방사선에 의한 피폭선량을 정량적으로 측정 해석하기 위하여 24개월간에 걸친 TLD에 의한 연속 적산선량 측정과 주기적인 감마선 분광분석을 수행하였다. TLD로는 LiF PTFE disk형을 사용하였으며 감마선 분광분석에서는 3"φ×3"원주형 NaI(Tl) 섬광 검출기와 휴대형 다중과고 분석기(4096 ch)를 사용하였다. 측정된 선량은 모두 실효 선량당량으로 평가하였으며 부수적으로 우주선 전리 성분에 의한 선량당량도 평가할 수 있었다.

분산 가중 평균값을 취한 결과에 의하면 대전 지역의 측정점에서 지각 방사선과 우주선 전리 성분의 체외 피폭에 의한 연간 실효 선량당량은 각각  $564 \pm 4 \mu\text{Sv}$  ( $64.8 \pm 0.5 \text{nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 및  $300 \pm 2 \mu\text{Sv}$  ( $34.3 \pm 0.2 \text{nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ )로 나타났다.

Keywords : 자연방사선, G(E)연산, 에너지 띠 법, *In-situ* 스펙트로메트리, TLD.

### I. 서 론

자연 환경방사선 피폭의 근원은 지각방사선과 우주선 등 체외피폭 요인이 되는 것과 불활성 방사성 기체인 Rn과 그 동위원소 및 자핵종 등 체내(호흡기관)피폭의 요인등으로 나눌 수 있고 이들 선원에 의한 피폭조건은 육내와 육외에서 차이가 있다.

본 연구에서는 위에 적은 세가지의 자연 환경 방사선원 중 지각 방사선으로 부터 받게 되는 선량을 측정 평가하기 위하여 NaI(Tl) 섬광 검출기에 의한 감마선 분광 분석 및 LiF 열형광 선량계에 의한 적산선량 측정을 수행하여 실효 선량당량률과 연간 실효선량당량을 해석 평가하였다.

### II. 선량해석 이론

#### 2. 1. 스펙트럼-조사선량 환산

자연환경 방사선장에서 측정된 감마선 스펙트럼을 조사선량으로 환산하는 데에는 Moriochi의 환산인자 G(E) 사용법[1, 2]과 Beck 등의에너지띠 해석법[3, 4]을근간으로 하였는데 그 이론의 요점은 다음과 같다.

##### 2. 1. 1. G(E) 연산법

에너지  $E_0(\text{MeV})$ 인 입사 광자의 단위 선속 밀도 ( $\gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )에 의하여 생성된 에너지  $E(\text{MeV})$ 의 이차전자에 기인하는 출력 파고 분포를  $F(E, E_0)$ 라하고 동일 감마선장에서의 조사선량률을  $\dot{X}_C(E_0)$

\* 본 연구는 1986. 8. 7-1988. 8. 6 기간의 한국과학재단 연구비지원으로 수행되었음.

1) 현 : 대전대학교

라고 할때 임의의 에너지 구간에 있어서, 에너지 E<sub>0</sub>인 광자에 대하여 적분 방정식

$$\dot{X}_G(E_0) = \int_0^{\infty} F(E, E_0) G(E) dE \dots\dots(1)$$

를 만족시키는 G(E)가 존재한다면 측정된 스펙트럼으로부터 적절이 감마선장의 조사선량률을 구할 수가 있을 것이다. 이 G(E)가 이른바 스펙트럼-조사선량을 환산인자로서 입사광자의 에너지와 검출기 크기 및 입사 방향의 함수이다. G(E)가 존재한다는 이론적 사실과 그 값을 계산하는 실제적 방법 등은 문헌[2]에 자세히 기술되어 있다. X<sub>G</sub>에는 지각으로부터 주어지는 방사선 뿐 아니라 우주선에 의한 기여 (X<sub>CR</sub>)와 검출기의 구성 물질(유리 중의 <sup>40</sup>K등)에 의한 자체 방사능의 기여(X<sub>K</sub>)가 포함되어 있다. 뿐만 아니라 검출기 감응의 에너지 및 입사방향 의존성에 관한 보정(F)도 해 주어야 한다. 따라서 지각방사선에 의한 선량률은

$$\dot{X}_T = (\dot{X}_G \dot{X}_{CR} - \dot{X}_K) \times F \dots\dots(2)$$

로 수정되어야 한다.

그런데 본 연구에서 사용한 3°φ×3°NaI(Tl)의 경우 X<sub>CR</sub>은 0.23 μR·h<sup>-1</sup>로, X<sub>K</sub>는 K가 미량 함유된 유리나 석영을 썼을 경우 0.02 μR·h<sup>-1</sup>로 평가되어 있으며 F는 3MeV 이내의 감마선과 3°φ×3°NaI(Tl) 검출기에 대하여 0.94±5%로 평가되어 있다 [5]. 이 값들을 그대로 쓰면

$$\dot{X}_T = (\dot{X}_G - 0.25) \times 0.94 (\mu R \cdot h^{-1}) \dots\dots(3)$$

로 지각 방사선량률이 평가된다.

### 2.1.2. 에너지 띠 방법

이 방법에 의한 선량해석이론은 자연 감마선(주로 지각방사선)스펙트럼 중에서 선량에 기여

하는 주요 핵종(그 붕괴계열 핵종 포함)들의 광전흡수 피크에 주어진 “총 에너지”(또는 총 계수)와 그 각각의 피크에 대응되는 감마선의 조사선량 기여 사이의 관계가 근사적으로 일차 연립방정식으로 맺어진다는 사실에 근거하고 있는데 여기서 말하는 주요 핵종이란 <sup>40</sup>K 및 <sup>238</sup>U과 <sup>232</sup>Th 계열의 핵종을 말한다.

이들 핵종에 대응되는 에너지띠로 <sup>40</sup>K의 1.46 MeV를 포함하는 1.32~1.90 MeV 구간, U 계열의 <sup>214</sup>Bi의 1.76 MeV 피크를 포함하는 1.62~1.90 MeV 구간 및 Th 계열의 <sup>208</sup>Tl 2.61 MeV 피크를 포함하는 2.48~2.75 MeV 구간 등 세개의 에너지 띠를 취하고 각 띠의 “총 에너지”(띠의 총 계수치 × 평균 감마에너지)또는 총계수치를 E<sub>i</sub>라고 하면

$$E_1 = k_1K + u_1U + t_1T + I_1 \dots\dots(4)$$

$$E_2 = k_2K + u_2U + t_2T + I_2 \dots\dots(5)$$

$$E_3 = t_3T + I_3 \dots\dots(6)$$

가 성립한다. 여기서 K, U 및 T는 각각 <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U 및 <sup>232</sup>Th 계열 핵종에 의한 조사선량률이고 k<sub>i</sub>, u<sub>i</sub>, t<sub>i</sub>는 대응되는 띠의 단위 조사선량당 에너지 또는 계수 치이며 I<sub>i</sub>는 각 띠에 기여하는 우주선 성분을 나타낸다. 위의 방정식을 각 띠에 대응되는 조사선량률로 변환하면

$$K = aE_1 + bE_2 + cE_3 + d \dots\dots(7)$$

$$U = eE_1 + fE_2 + gE_3 + h \dots\dots(8)$$

$$T = jE_3 + m \dots\dots(9)$$

가 되는데 a~m까지의 계수는 각각 k<sub>i</sub>, u<sub>i</sub>, t<sub>i</sub>의 결합으로 나타난다. 우리가 사용한 3°φ×3°NaI(Tl)에 대하여는 다음의 연립방정식이 성립한다.

$$K = 0.024E_1 + 0.372E_2 - 0.272E_3 - 0.193 \dots\dots(10)$$

$$U=0.127E_1-0.099E_2-0.036E_3-0.159\cdots(11)$$

$$T=0.490E_1-0.583\cdots(12)$$

2.2. 열형광 선량측정 이론

고체 선량계로서의 열형광 물질이 상온에서 방사선에 피폭되면 그때 발생된 수많은 자유전자들이 그 결정체의 격자결함에 걸렸다가 이것을 적당히 가열하면 이들 전자가 함정에서 방출되어 안정준위로 돌아오면서 빛을 방출하게 되는데 이때 방출되는 빛의 세기가 앞서 피폭된 방사선량에 비례한다는 성질이 선량측정을 가능케한다. [6-8]

일반적으로 환경 방사선 측정용 TLD의 열형광을 판독하여 그 TLD에 피폭된 자연방사선의 선량을 측정 정량하기 위하여서는 다음과 같은 관계식이 적용된다.

즉,

$$X=I_i \frac{C_i}{C_0} \frac{X_1}{I_1-I_0} (mR) \cdots(13)$$

여기서 X는 필드에서의 조사선량(mR),  $I_i$ 는 필드 TLD의 판독치,  $I_1$ 는  $X_1$ mR의 미리 아는 선량에 조사한 교정 TLD의 평균 판독치,  $I_0$ 는 필드 TLD를 자연 방사선에 조사하는 동안 자연 방사선으로부터 차단된(우주선 경성분 제외) 납용기에 보관되었던 콘트롤 TLD의 평균 판독치이고  $C_i$ 는 개개 TLD의 교정인자,  $C_0$ 는 교정 TLD의 평균 교정인자이다.

본 연구에서는 필드 TLD의 교정인자를 구하는 대신 교정용 TLD를 따로 쓰고 TLD의 방사선에 대한 상대감도를 추정하여 이 인자를 고려하여 필드 선량을 결정하였다.

III. 측정기기 및 방법

지각방사선 측정은 방사선장의 에너지 스펙트럼을 얻음과 동시에 조사 선량율을 산출할 수 있는

*in-situ* 스펙트로메트리와 일정 기간의 적산선량을 측정하여 평균선량율을 얻을 수 있는 TLD 방법을 병행하였다.

3.1. *in-situ* 스펙트로메트리

본 연구 기간 중 *in-situ* 스펙트로메트리는 1986년 12월 부터 1988년 11월의 2년사이에 5~6개월 간격으로 6차 실시하였는데 각 차의 측정시 마다 2시간 간격으로 6회 내지 22회 실시하여 지각방사선 조사선량의 일변화 관측도 시도하였다.

1986년 12월과 87년 6월의 *in-situ* 스펙트로메트리에서 사용한 주요기기는 3"φ×3"원통형 NaI(Tl) 섬광 검출기(Bicron 3M3/3)와 ORTEC 6240 B 다중 파고 분석기(1024ch.)를 위시하여 ORTEC 456 고전압 전원, ORTEC 276 전단 증폭기 및 ORTEC 485 주증폭기 등 이었으나 그 이후에 수행한 *in-situ* 스펙트로메트리에서는 동일한 검출기를 주 증폭기와 고전압 전원을 내장한 4096 ch. 휴대형 다중파고분석기(EG&G ORTEC Model 7500A or Davidson Model 2056-4K)에 연결하여 사용하였다.

출력파고-에너지 직선성 교정에 사용한 감마선원과 교정과정은 이미 발표한 다른 논문[9]에 상세히 기술한 바와 같다. 측정지점으로는 인근 건물 등의 영향을 배제하기 위하여 건물로부터 최소 20m이상의 충분한 거리를 둔 비포장 개활지를 택하였으며 검출기의 원통 전면이 지면을 향하도록 설치하되 검출기의 중심 높이를 지면에서 1m가 되도록 하였다. 스펙트럼은 512 채널 구간에 0에서 3 MeV 사이의 감마선이 검출되도록 검출기 고전압과 증폭기의 이득을 조정하여 사용하였으며 매회의 측정시간은 live time 1000 초를 택하였고 매 측정시 마다 <sup>137</sup>Cs+<sup>60</sup>Co선원의 스펙트럼을 측정하여 채널 shift를 감시하는 한편 파고-에너지 교정 자료로 사용하였다. 측정한 스펙트럼으로부터  $X_G$ 를 산출하기 위한 G(E) 값은 3MeV이하의 광자에 대한 전자쌍 생성을 무시할

수 있는 정도이므로 광전피크와 콤프톤 연속부만을 고려하여 근사적인 방법으로도 구할 수 있는데[1]이와같이 구한 값은 Fig. 1과 같다.

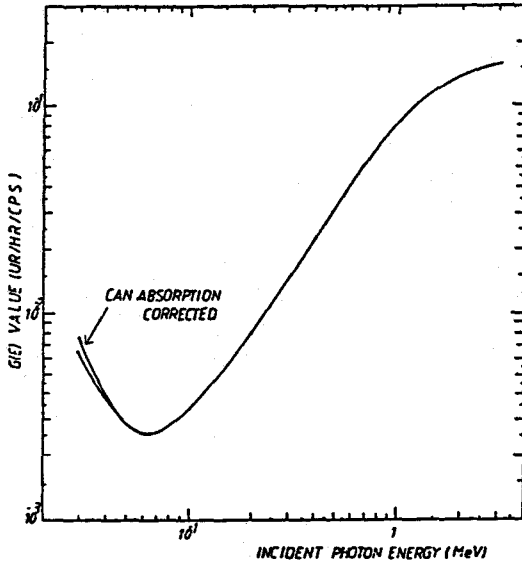


Fig. 1. G(E) values of 3" φ×3" cylindrical NaI (TI) scintillation detector as a function of incident photon energy.

이 G(E) 값은 위와 같은 근사방법을 써서 계산한 것이지만 3 MeV이하의 에너지 구간을 커버하는 표준 감마선 스펙트럼을 컴퓨터에 입력하여 보다 적응성이 높은 고차 다항식의 계수를

이 스펙트럼에 맞도록 반복 계산하여 결정하는 미정계수법으로 구한 G(E)값[2]과 매우 잘 일치하고 있다. 이 G(E) 값을 사용하여 실제로 스펙트럼으로부터 조사선량을 산출할 때에는

$$\dot{X}_G = \sum N(E)_i \cdot G(E)_i \dots\dots\dots(14)$$

방식으로 계산하였다. 여기서 G(E)<sub>i</sub>는 i번째 채널의 에너지에 대응되는 G(E) 값 이고 N(E)<sub>i</sub>는 그 채널의 계수율이다.

에너지 피 방법의 조사선량을 환산은 (10)~(12) 식을 사용하면 쉽게 이루어질수 있다.

3.2. TLD를 이용한 집적선량 측정

본 연구에 사용한 TLD는 <sup>7</sup>Li 및 <sup>6</sup>Li를 각각 주 성분으로 하는 두 종류의 LiF Teflon(Polytetrafluoroethylen-PTFE) 원판이었는데 그 크기와 두께 및 Li 함유성분과 양, 본 논문에서의 사용 기호 등은 Table 1에 정리된 바와 같다 [10]

이 TLD를 포장하여 적산선량을 측정하기 위한 케이스는 약 0.1mm 두께의 광선차단용 창을 가진 점은 플라스틱으로 만들어진 것인데 처음에 한 케이스 당 L-7 과 L-6 각각 2개씩 4개의 원판형 TLD를 내장하여 사용하였으나 3개월 간격의 5 주기 측정기간중 지각방사선 측정에 있어서 이 두 종류 TLD의 차이점과 장단점을 파악하게 되어 최종 2주기 동안에는 L-7 TLD 만을 사용하였다.

Table 1. Thermoluminescence dosimeters(TLDs) used[10].

Phospher	Symbol used here	Form	Phospher loading(%)	Dimension (mm)	Thickness (mg. cm <sup>-2</sup> )	Dose Range (rad)
<sup>7</sup> LiF (99.99% <sup>7</sup> Li 0.01% <sup>6</sup> Li)	L-7	PTFE* disk	30	φ12.7×0.4	~100	5×10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup>
<sup>6</sup> LiF (95.6% <sup>6</sup> Li 4.4% <sup>7</sup> Li)	L-6	PTFE* disk	30	φ12.7×0.4	~100	5×10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup>

\* PTFE : Polytetrafluoroethylene

한편 본 연구에서 사용한 TLD는 그 유효 원자 번호가 조직등가에 매우 가까울 뿐 아니라 저 에너지 영역에서의 에너지 의존성이 비교적 적으며, 자연 방사선장에서의 100 keV 이하 광자의 선량 기여는 5% 정도로 알려져 있어[11, 12] 에너지 의존성을 보상하기 위한 추가적인 필터는 사용하지 않았다. TL 출력과 조사선량율과의 교정인자는 케이스에 포장된 상태의 TLD를 0.5 mm Pt 포장의 100  $\mu\text{g}$   $^{226}\text{Ra}$  표준선원을 사용하여 선원-TLD 거리 25cm 및 50 cm에서 매 주기 초마다 결정하였다. 이 교정과정에서는 산란선의 기여를

퇴행 보정용(이는 양의 방사선을 미리 조사한 것) 2개를 설치하였으며 그 밖에 본 연구실에는 사방 15cm 두께의 납상자 안에 콘트롤 용 배지 3개를 내장하여 같은 기간 동안 보관하는 외에 2개의 퇴행 보정용 배지의 TLD는 방사선 조사후 즉시 판독을 실시하였다. 1986년 10월 부터 1988년 6월 사이에 5주기의 측정을 수행하였는데 이 과정에서 만족할만한 통계적 신뢰성을 확보할 수 있었다. TL 판독장치로는 Vinten사의 Universal Toledo TLD Reader Model 654를 사용하였으며, 판독 주기, 과정 및 방향 의존성과 퇴행 보정방법 등은 본 저자들의 다른 논문[9]에 기술되어 있는 바와 같다.

#### IV. 결과 및 검토

##### 4.1. 감마선 분광분석에 의한 선량 해석

*In-situ* 스펙트로메트리로 측정된 지각방사선의 조사선량율은 Table 2에 정리한 바와 같다. 이 표의  $\dot{X}_T$ 는 G(E) 환산인자 방법을 사용하여 (2) 식으로 산출한 값이며  $\dot{X}_K$ ,  $\dot{X}_U$  및  $\dot{X}_M$ 는 에너지피 방법인 (10), (11) 및 (12) 식으로 구한 성분별 평균 조사선량율이고  $\dot{X}_B$ 는 이들 각 성분선량의 합인 평균값이다. 본 논문의 다른 모든 데이터도 마찬가지로지만 전체 평균값들은 모두 분산 가중 평균치[13-15]이다.

한편 Table 2에서 볼수 있는 바와 같이 감마선 분광분석법에 의한 두가지 조사 선량 해석방법으로 평가된  $\dot{X}_T$  와  $T_B$  사이에는 오차범위 안에서 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 지역에 따라 선량율의 변동이 심할 경우 그것이 지각의 어떤 동위원소에 기인하는 것인가를 알아보는 데는 단연 에너지피 방법이 장점을 갖는다는 것은 쉽게 알 수 있다. 그 예로 우리나라 함량이 비교적 높은 지역으로 알려진[16]충북 괴산군 청천면 덕평리 지역에서의 측정치들을 들수 있는데 그 중 대표적인 것으로 1988년 11월에 측정된 선량값과 스펙트럼을 Fig. 3에서 보는 바와 같이 같은 시기에 충남대학교 대덕 캠퍼스에서 측정된 것과

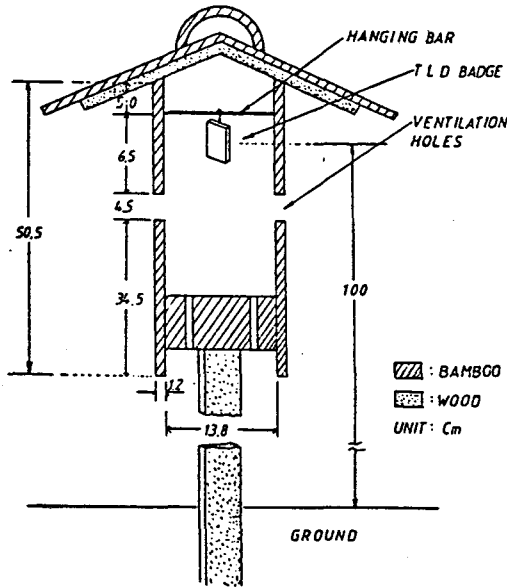


Fig. 2. TLD Post for environmental radiation measurement.

최소화하기 위하여 선원-실내벽 거리를 2m 이상 되도록 유지하였다. 옥외 자연방사선 측정을 위하여 포장된 케이스를 적산선량 측정기간(3개월 1주기)마다 지표면에서 1m 높이에 설치하였다가 회수하여 열형광을 측정하였는데 강수물 등의 침입을 방지하기 위하여 Fig. 2와 같이 대나무로 만든 포스트를 설치하고 그 안에 케이스 들을 걸어놓는 방법을 사용하였다.

매 주기마다 지각 방사선량 측정용 케이스 3개,

Table 2. Terrestrial gamma ray exposure rate ( $\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ ) determined by means of *In-situ* spectrometry (CNU Daedeok Campus).

Date & Time	Number of Measurement	$\dot{X}_T$	$\dot{X}_B$	$\dot{X}_K$	$\dot{X}_U$	$\dot{X}_{Th}$
86/12.24	6	$10.65 \pm 0.09$				
87/6.12-13	12	$10.16 \pm 0.24$	$10.34 \pm 0.10$	$3.44 \pm 0.12$	$1.89 \pm 0.13$	$5.06 \pm 0.27$
88/1.19-20	22	$11.43 \pm 0.27$	$12.25 \pm 0.27$	$3.74 \pm 0.07$	$2.51 \pm 0.24$	$6.06 \pm 0.11$
88/6.20-21	21	$10.72 \pm 0.45$	$10.78 \pm 0.66$	$3.74 \pm 0.18$	$2.27 \pm 0.41$	$4.77 \pm 0.75$
88/11.26	6	$10.40 \pm 0.25$	$10.42 \pm 0.55$	$3.20 \pm 1.10$	$1.68 \pm 0.18$	$5.55 \pm 0.82$
Variance	63	$10.64 \pm 0.08$	$10.57 \pm 0.09$	$3.23 \pm 0.05$	$1.95 \pm 0.09$	$5.89 \pm 0.10$
Weighted Mean						

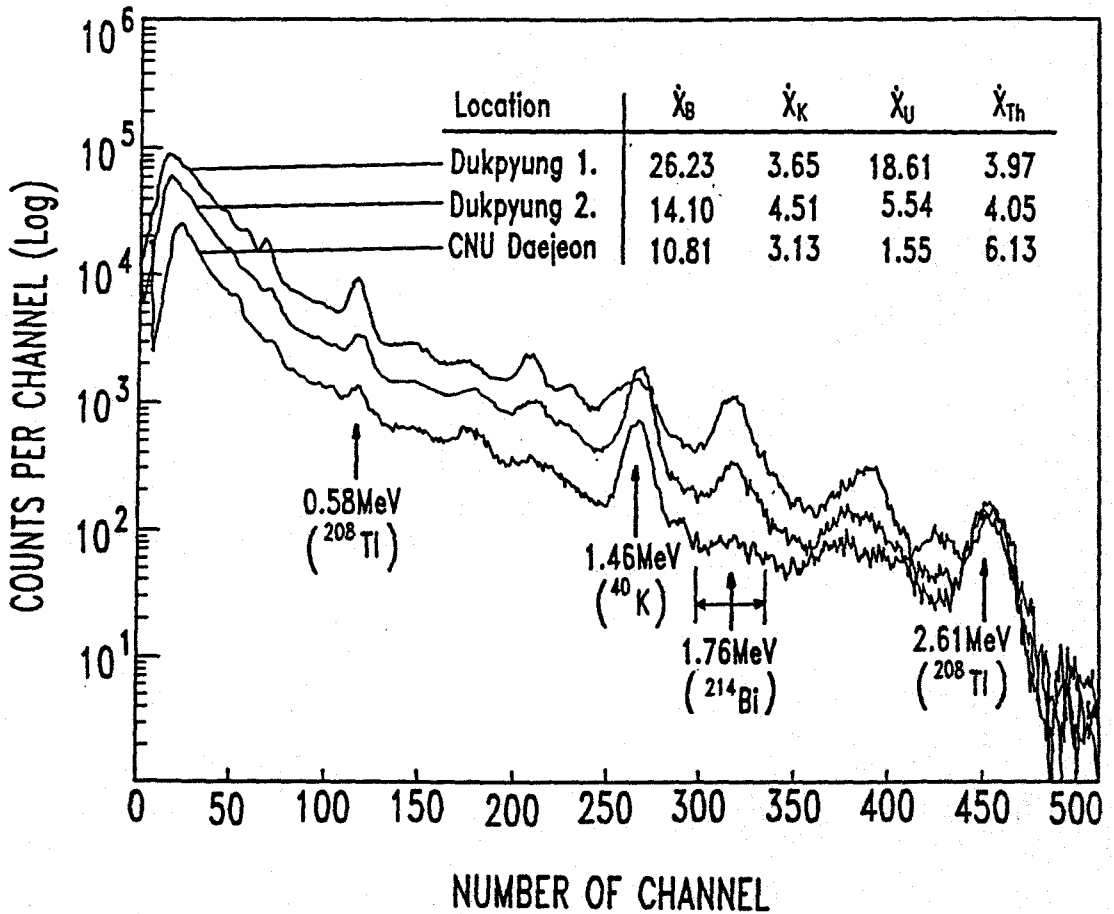


Fig. 3. Comparison of terrestrial gamma ray spectra measured in areas of various ground- $^{238}\text{U}$  contents using  $3''\phi \times 3''$  NaI(Tl) scintillation detector.

비교해 보면 높은 조사선량율로 나타나게 하는 원인성분이 무엇인가를 확실하게 알 수 있다.

즉,  $X_T$ 를 구하여 전체적인 조사선량률만을 본다면 세 스펙트럼의 경우 각각의  $X_B$ 와 비슷한 26.2, 14.1 및 10.8  $\mu R \cdot h^{-1}$ 의 선량율을 나타내어 덕평리에서의 측정치들은 지각방사선에 의한 조사선량률로서는 매우 높은 값으로 나타나 당황하게 될 것이다. 그러나 이 그림과 표에서 볼 수 있는 바와 같이 높은 조사선량률에 기여하는 주 성분은  $^{238}U$ 의 붕괴 생성물인  $^{214}Bi$ 의 1.76 MeV 감마선임을 곧 알아 볼 수 있어 그것이 타 지역의 토양에 비하여 우라늄 함량이 높는데 기인함을 쉽게 판정할 수가 있다.

그런데 본 연구의 궁극적 목적은 지각 방사선에 의한 유효선량당량을 구하는데 있으므로 조사선량 측정해석 결과를 일단 흡수선량으로 환산해야 한다. 여기서는 그것을 모두 “피 조사체 부재 조건”(receptor free condition)에서의 변환 인자 0.869를 사용하여 공기 흡수선량률( $nGy \cdot h^{-1}$ )로 환산하였는데 그 결과를 정리하면 Table 3과 같다.

이 표에서 “우주선 성분”으로 표시된 값은 다음과 같은 조건에서 측정 해석한 우주선 전리성분에 기인하는 선량율이다. 즉, NaI(Tl) 검출기를

우주선 입사방향으로 13cm의 시멘트 블럭, 24 cm의 철근 콘크리트 및 2.3mm의 납으로 차폐된 실내와 동일 실내에 설치한 좌우 밀면이 각각 10 cm이고 윗면이 15 cm 두께인 납 차폐상자 내 및 옥외 개방공간(지상 1m)에 설치하여 1024 채널 구간에서 100 MeV까지의 에너지 분포를 측정 후 Lin 등이 사용한 방법[17, 18]에 따라 해석한 우주선 전리성분의 선량기여인데 이 값의 해석평가에 관한 자세한 내용은 이미 발표한 본 저자들의 다른 논문[19]에 상술한 바와 같다.

NaI(Tl) 검출기로 얻은 스펙트럼에서 볼 수 없는 핵종들을 찾아보기 위하여 동일한 장소(충남대학교 대덕캠퍼스)의 동일한 높이에서 유효체적 74.5cc의 휴대형 고순도 Ge 검출기로 측정해석한 스펙트럼의 한 예는 Fig. 4와 같다.

이 스펙트럼의 에너지 교정은 59.5 keV 에서 2500 keV 범위를 커버하는 9개의 감마선원으로 이루어진 370 kBq(10  $\mu Ci$ )급의 표준선원 Set(Amersham QCR. 1)를 사용하여 수행하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Fig. 3에서 판별하기 어려웠던  $^{212}Pb$ (238 keV),  $^{214}Pb$ (352 keV) 및  $^{137}Cs$ (662 keV)과  $^{228}Ac$ 의 911 및 968 keV의 두 광전 피크를 뚜렷이 볼 수가 있는데 이들 핵종에 대한

Table 3. Air dose rate,  $D_a^*$ ( $nGy \cdot h^{-1}$ ), due to natural background radiation determined by means of *in-situ* gamma ray spectrometry.

Date & Time	Terrestrial Component (based on $X_T$ )	Cosmic-Ray Component <sup>(9)</sup>	Total
86/12.24	92.5±0.8		
87/6.12-13	88.3±2.1		
88/1.19-20	99.3±2.3		
88/6.20-21	93.2±3.9	34.3±0.2	127.5±3.9
88/11.26	90.4±2.2		
Variance			
Weighted Mean	92.5±0.7	34.3±0.2	126.8±0.7**

\*  $\dot{D} = 0.869 X_T$

\*\* corresponding to  $1,110 \pm 10 \mu Gy \cdot y^{-1}$  ( $111 \pm 1 mrad \cdot y^{-1}$ ).

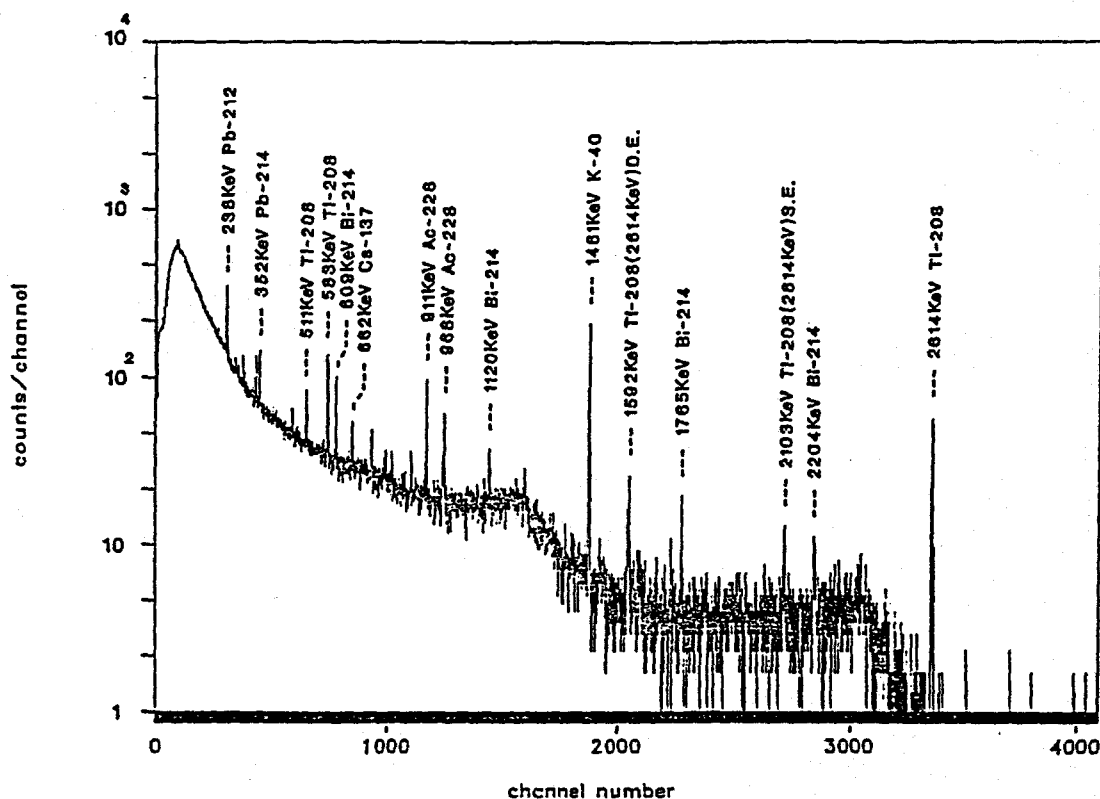


Fig. 4. Terrestrial gamma ray spectrum measured by HPGe semiconductor detector (CNU Dae-deok Campus, Sept. 29, 1988).

선량 평가에 관한 연구는 별도로 수행되어야 할 것이다.

한편 지각방사선에 의한 조사선량률의 일변화를 살펴보기 위하여 1988년 1월 19~20일과 동년 6월 20~21일 사이 등 두 차례의 24시간 동안을 2시간 간격으로 스펙트럼을 측정하여 G(E) 함수법으로 산출한 조사선량률의 변화 모양을 살펴 보았는데 그 결과를 도표로 나타낸 것이 Fig. 5이다.

이 그림에서 보면 최고치와 최소치의 차이가 1월의 경우는  $111 \mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ , 6월에는  $159 \mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 1월 보다는 6월의 변화폭이 크게 나타났고 이 두 측정 기간의 측정치의 차이는 20:00시에서 08:00시 사이의 야간에 크게 벌어져 있는 반면 09:00시에서 17:00시 사이의 측정치들은 큰 차이없이 비교적 만족할만한 일치를 보이고 있다. 요컨대

지각방사선에 의한 조사선량률의 일변화에서 규칙성을 찾기는 어려우나 그 변화의 폭은 주로 야간에 큰 것을 볼 수 있는데 이와같은 현상은 저자 등이 1983년 3월 19~20일 사이와 동년 10월 30~11월 1일 사이에 측정하였던 결과[20]나 1984년 10월 15~16일 사이, 1985년 5월 8~9일 사이 및 동년 10월 30~31일 사이에 측정하였던 결과[9]에서도 볼 수 있다. 여기서 강조해야 할 점은 이상에서 언급한 저자 등의 관찰 결과에서는 지각방사선에 의한 조사선량률의 일변화 모양을 일관성있게 설명할 만한 규칙성을 찾아볼 수 없었다는 점이며 그러한 규칙성을 찾기 위하여서는 적어도 1년 동안 지속적으로 변화를 관찰할 수 있는 연구가 별도로 수행되어야 할 것으로 생각한다.



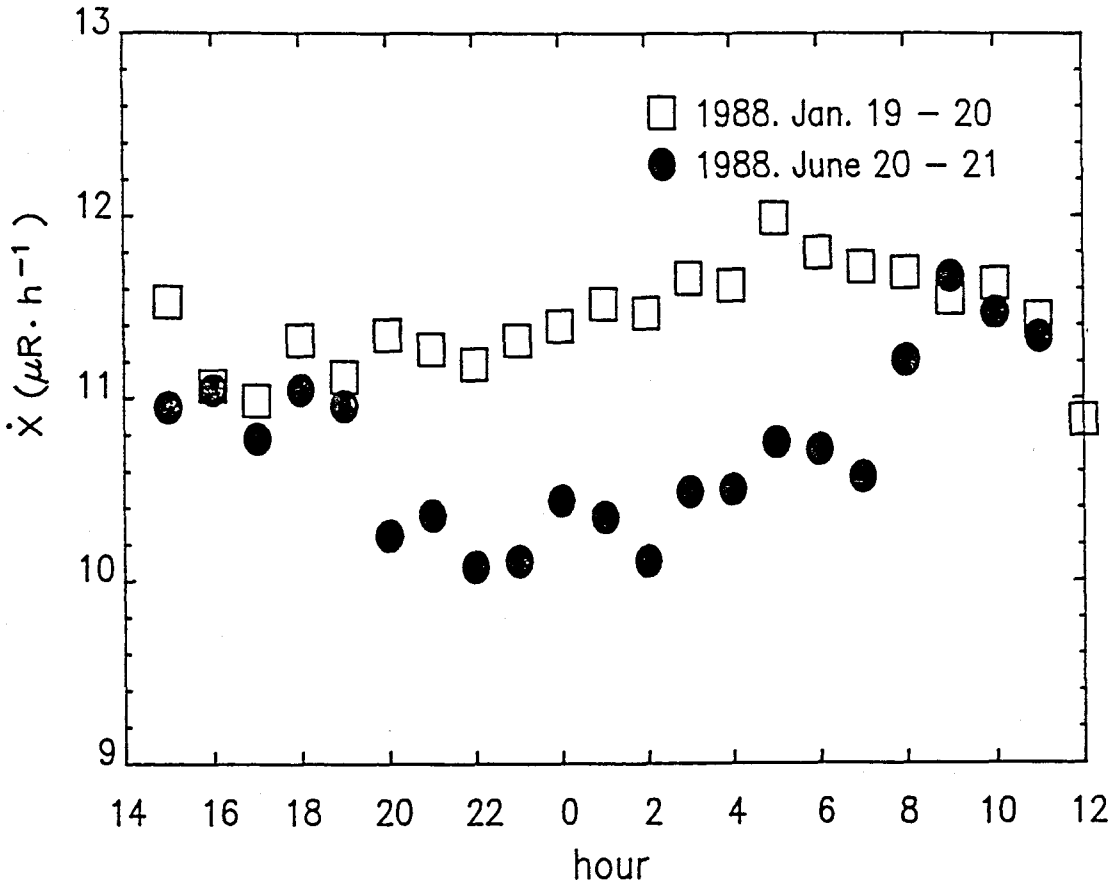


Fig. 5. Diurnal variation of terrestrial gamma ray exposure rate measured hourly using 3"  $\phi \times 3$ " NaI(Tl) scintillation detector.

#### 4. 2. TLD에 의한 선량해석

1986년 10월 부터 1988년 6월 사이에 3개월 간격의 5주기 동안에, Table 1에 기술한 L-7 및 L-6 TLD를 사용하여 측정된 지각방사선에 의한 선량을 피조사체 부재조건에서의 공기 흡수선량률로 환산하여 총정리한 결과는 Table 4와 같다.

다만 L-6 TLD를 동시에 사용한 기간은 전반 3주기이었음은 이미 3-2에서 그 이유와 함께 언급한 바와 같다.

이 표에는 지각방사선 성분에 의한 선량과 우주선 전리성분에 의한 선량을 구분하여 나타내었는데 전자는 퇴행을 보정한 총피폭선량에서

같은 보정을 한 콘트롤 선량을 빼준 값이며 후자 즉, 우주선 전리성분의 선량은 콘트롤 TLD에서 얻은 것인데 이 값들은 LiF TLD에 대한 조사선량-흡수선량 환산인자[21]와 TLD의 교정용 감마선 감응에 대한 우주선 감응의 비[21,22]를 모두 고려해 준 것이며 육의 우주선 전리성분의 육내 납 차폐상자에 의한 차폐효과를 모두 보정해준 값이다. 이와 같은 보정의 내용과 방법은 저자등의 다른 논문[19]에 자세히 기술되어 있다.

한편 표 4와 3에서 지각방사선에 의한 선량률을 비교하여 보면 각 측정지점에서의 TLD 측정 선량률(분산가중 평균치)과 스펙트로메트리에서 구한 선량률 사이에 3~17%의 차이가 있고 평균

Table 4. Air dose rate,  $D_n$ (nGy·h<sup>-1</sup>), due to natural background radiation determined by means of termoluminescence dosimetry.

Cycle	Duration	Terrestrial Component		Cosmic-Ray Component		Total	
		L-7	L-6	L-7	L-6	L-7	L-6
1	1986/10.13- 1987/1.12	92±11	87±17	40±5	61±10	132±12	148±20
2	1987/2.6-3.7	73±11	85±2	30±4	55±8	103±12	140±31
3	1987/7.23-10.21	86±14	85±2	36±2	43±3	122±14	128±28
4	1987/11.28- 1988/2.26	96±12		33±3		129±12	
5	1988/3.16-6.14	86±12		33±3		119±15	
	Variance						
	Weighted Mean	86±6	86±13	43±1	45±3	121±6	143±14

치에서는 7%정도 스펙트로메트리 값이 큰 것을 볼 수 있는데 이것은 일반적인 현상은 아니며 그 주요 원인이 측정치의 통계적요동(12~16%)이 심한 TLD 측정치에 있음을 쉽게 이해할 수 있다.

스펙트로메트리에서 구한 선량율( $\dot{D}_c$ )은 공기 흡수선량률로 환산하기 이전에 조사 선량율  $X_c$ 로 저위 조사선량 측정의 기준기 역할을 하는 구형 고압기체(25 기압 고순도 Ar 봉입) 전리함(Reuter/Stokes RSS-111)과 비교교정한 바 있으므로 [23, 24] 본연구에서의 선량해석의 기준으로는  $D_c$  값을 택하기로 하였다. 지각방사선에 의한 선량에서 TLD 측정치와 스펙트로메트리에서 얻은 값 사이에 차이가 있는 것과는 대조적으로 우주선 전리성분에 의한 선량율은 표3과4에서 보는 바와 같이 L-7 TLD로 측정할 경우 만족할 만한 일치를 나타내고 있다. 그런데 L-6의 우주선 성분 측정치는 그 평균치에서 이미 L-7 측정치보다 30% 이상의 높은 선량율을 나타내고 있다. 이것은 우주선의 중성자 성분기여가 일부 검출된 것임을 나타낸다. 그러나 nG·h<sup>-1</sup> 단위로 표시된 이들

수치의 차이가 곧 우주선 중성자성분이 주는 공기흡수 선량률을 나타내는 것이 아닌 점은 주의할 필요가 있다. 다만 <sup>6</sup>LiF TLD를 사용하여 우주선 전리성분을 측정할 때에는 이 정도의 중성자 성분의 기여가 추가된다는 점만을 말할 수 있을 뿐이다. L-6 TLD의 이와같은 성질을 이용하여 우주선 중성자 성분의 에너지 분포와 유사한 중성자장에서 교정을 수행할 수 있다면 L-7과 L-6를 동시에 사용하여 지표에서의 우주선 성분(전리 및 중성자 성분)이 주는 전체 선량을 측정해석할 수 있을 것이다. 우주선 전리성분의 선량은 비록 지표수준이라도 지자기 위도에 따라 증가하는 다소의 차이가 있으며 그 범위는 30~34 nGy·h<sup>-1</sup> 인 것으로 알려져 있는데 [25] 표 3과 4의 측정치는 이 값과 비교할만한 만족스러운 값이라 말할 수 있다.

#### 4.3. 선량 당량 해석

Table 2~4에 제시한 데이터는 결국 연간 실효선량당량을 평가하기 위한 것인데 이들 데이

타에 대하여서는 앞에서 충분히 다각도로 분석 논의하였다고 본다. 지각방사선과 우주선 전리성분의 두 경우 궁극적으로 흡수되는 방사선이 감마선과 전자이므로 선질인자는 모두 1이다. 다만 지각 감마선에 의한 공기 흡수선량을 선량당량으로 환산하는데는 그 에너지 분포범위(0~3 MeV)에서 0.748 Sv/Gy [26] 또는 0.7 Sv/Gy [27, 28]를 적용하는 것이 최신 동향인데 본 논문에서는 특히 보편적인 비교대상이 되고있는 UNSCEAR 보고서에서 나온 후자의 환산인자를 사용하였다. 이상의 여러가지 조건들과 인차들을 적용하여 본 연구에서 수행한 우주선 전리성분을 포함한 옥외 자연방사선으로부터 체외피폭에 의하여 일인당 받게되는 연간 실효선량당량을 정리해 보면 Table 5와 같다. 이것은 옥외 체재율(occupancy factor)을 1로 본 것인데 일반적으로 옥내 방사선량이 옥외보다 높으므로 여기에 제시한 선량당량은 체외피폭으로 인하여 불가피하게 받게되는 최소 선량당량이 되는 것이다.

이 데이터를 최근간(1988) UN보고서[28]의 데이터와 비교해 보기로 한다. UN 보고서에서 말하는 "정상적인 자연방사선 지역"(areas of normal background)에서의 연간 유효선량당량을 보면 지각방사선에 의한 외부피폭이 410  $\mu\text{Sv}$ , 우주선 전리성분에 의한 외부피폭이 300  $\mu\text{Sv}$ 으로 나와 있다. Table 5의 각 성분별 선량당량의 평균치를 보면 지각 방사선의 경우 UN 데이터보다 다소 높음을 알 수가 있다. 그러나 이것은 어디까지나 "정상적인 지역"에서의 평균 선량당량과의 비교에 지나지 않고 같은 보고서에 나와 있는 선량당량

값이 지각방사선의 경우 200~1000  $\mu\text{Sv}$ 의 변화 폭을 보이고 있는 것과 비교하면 본 연구에서 얻은 데이터는 오히려 연구 대상지역이 정상적인 자연방사선 지역에 속함을 입증하는 것이라고 볼 수 있다.

### V. 결론

이상에서 기술한 본 연구의 전 수행과정을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하게 되었다.

- 1) 감마선 분광분석법이 순간 선량율만을 주는 것이어서 어느 시기에 측정한 선량률이 곧, 변화가 심한 공간 자연방사선량률의 대표값이 될 수 없는 대신, TLD가 순간 측정치는 주지 못하나 장기간의 적산선량을 측정하여 그 지역 공간선량율을 대표할 수 있는 평균선량률 결정을 가능케 하는 상호 보완적인 관계에 있음을 감안하여 실용면에서 많은 장점을 가지는 TLD의 공간 선량측정시에 감마선 분광 분석법을 적절히 병행함으로써 지역 방사선을 보다 내용있게 파악하게 될 것이며 특히 인공 방사선 및 방사성 핵종에 의한 일시적 오염여부를 판단하는 데는 감마선 분광분석이 특히 결정적 역할을 하게 될 것이다.
- 2) 지질구성 성분의 차이에서 오는 지각 방사선의 선량 차이의 원인 규명에는 감마선 분광분석법 중에서도 에너지법 방법이 단연 그 장점을 나타내었으며 따라서 G(E) 함수법으로 선량해석이

Table 5. Effective dose equivalent rate( $\dot{H}_E$ ) and per caput annual effective dose equivalent( $H_{Ea}$ ) due to external exposure of natural background radiation (CNU Daedeok Campus)

$H_E^*$	Terrestrial gamma ray	Cosmic ray ionizing component	Total
$\dot{H}_E$ ( $\text{nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ )	64.8±0.5	34.3±0.2	99.1±0.5
$H_{Ea}$ ( $\mu\text{Sv}$ )	568±4	300±2	868±5

\* 0.7 Sv/Gy was used.

이루어진 경우라도 그 선량이 이상할 정도로 높아 그 원인 규명이 필요한 경우에는 에너지법 방법을 원용해야 할 것이다.

3) 지각방사선의 주요 구성성분은  $^{40}\text{K}$ 와  $^{238}\text{U}$  및  $^{232}\text{Th}$  붕괴계열의 붕괴 생성물들이지만 보다 확실한 지각방사선장의 파악을 위하여서는 NaI(Tl) 검출기로 측정할 이들 핵종의 감마선 스펙트럼에서는 판별되지 않거나 어려운  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ 나  $^{228}\text{Ac}$  등의 핵종과 미량의 핵분열 생성물에 의한 지각 오염의 지표가 되는  $^{137}\text{Cs}$  등의 판별을 위하여서는 역시 HPGe 검출기의 병용이 불가피하며 HPGe 스펙트럼에서의 선량환산 체계를 위한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

4) 지각방사선에 의한 선량의 일변화는 그 형태가 매우 불규칙하며 변화의 폭은 야간에 심한 것으로 나타나 있는데 이와같은 일변화의 어떤 규칙성을 찾아보려면 적어도 1년 이상의 기간 동안 지속적인 *in-situ* 스펙트로메트리 연구를 수행하되 그 지점에서의 온도, 습도, 기압의 변화 등이 기상학적 관측을 병행해야 할 것이다.

5) LiF TLD에 의한 지각방사선의 적산선량 측정과정의 하나로 개재되는 콘트롤 선량의 적절한 해석은 우주선 전리성분 기여선량의 정량적 평가를 가능하게 한다. 뿐만 아니라 LiF를 병용할 경우 우주선의 중성자 기여선량도 정량적으로 평가할수 있는 가능성을 보여주고 있다.

### 참고문헌

- [1] S. Moriuchi and I. Miyanaga, "A spectrometric method for measurement of low-level gamma exposure rate", *Health Phys.* 12, 541-551 (1966).
- [2] S. Moriuchi, *A New Method of Dose Evaluation by Spectrum-Dose Conversion Operator and Determination of the Operator*, JAERI-1209 (1971).
- [3] H.L.Beck, W.J.Condon and W.M. Lowder, *Spectrometric Techniques for Measuring Environmental Gamma Radiation*, HASL-150 (1964).
- [4] H.L.Beck, J. DeCampo and C. Gogolak, *In-situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-ray Spectrometry*, HASL-258 (1972).
- [5] S. Moriuchi, *A Dosimetric Instrument based on the Spectrum Weighting Function Method for Environmental Radiation Measurements*, JAERI-M7066 (1977).
- [6] Z. Spurny, "Thermoluminescent dosimetry", *Atom. Energ. Rev.* 3(3), 61-115 (1965).
- [7] K. Becker, *Solid State Dosimetry*, CRC Press, Clereland, pp. 27-33 (1973).
- [8] M. Bohm and A. Sharmann, in *Applied Thermoluminescence Dosimetry*, ed. by Oberhofer and Sharmann, Adam Hilger Ltd., Bristol, pp. 11-38 (1981).
- [9] 전재식, 오희필, 최철규, 오현진, 하정우, "감마선 분광분석 및 열형광 검출법에 의한 자연방사선의 선량측정연구", 방사선방어학회지 10(2), 96-108 (1985).
- [10] Vinten, *Dosimeter Material Information Sheet*, 1, Vinten Instruments Ltd., Surrey (1987).
- [11] G. de Planque and T.S.Gesell, "Thermoluminescence dosimetry-environmental applications", *J. Appl. Radiat. Isot.*, 33, 1015-1034 (1982):
- [12] H.L.Beck, in *Natural Radiation Environment II*, ed. by J.A.S.Adams et al., USERDA CONF 720805-P1, pp. 101-134 (1972).
- [13] P.C.Stevenson, *Processing of Counting Data*, NAS-NS 3109 (1966).
- [14] NCRP, *A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures*, NCRP Rept. 58 (1978).
- [15] G.F.Knoll, *Radiation Detection and Measurement* 2nd ed., John Willey & Sons, New York, pp. 92-94 (1989).
- [16] 노재식의 12명, 충북괴산군 덕평리지역의 자연방사선과 그 영향에 관한 예비조사 보고서, KAERI-35(77-1) (1977).

- [17] P. H. Lin, C. J. Chen, C. C. Huang and Y. M. Lin, "Measurement of Cosmic Ray Induced Ionisation Intensity", *Radiat. Prot. Dosim.* 15, 185-189 (1986).
- [18] P.H.Lin, C.J.Chen, C.C.Huang and Y.M.Lin, "Study of the Indoor Cosmic Radiation Ionisation Intensity", *Radiat. Prot. Dosim.*, 16, 329-332 (1986).
- [19] 전재식, 오희필, 하정우, 오헌진, 강인선, "자연방사선량중 우주선 기여성분 정량연구", 방사선방어학회지 13(2), 9-19 (1988).
- [20] 전재식, 오희필, 오헌진, "감마선 분광분석법에 의한 환경방사선의 선질 및 선량측정연구", 충남과학연구지 11(2), 25-38 (1984).
- [21] W.M.Lowder and G. de Planque, *The Response of LiF Thermoluminescence Dosimeters to Natural Environmental Radiation*, HASL-313 (1977).
- [22] K.O'Brien, "The response of LiF thermoluminescence dosimeters to the ground-level cosmic-ray background", *Intern. J. Appl. Radiat. Isot.* 29, 735-739 (1978).
- [23] 전재식, 오희필, 오헌진, 윤주용, "대덕지역 환경방사선에 대한 감마선 분광 분석연구", 충남과학연구지 10(1), 35-43 (1983).
- [24] 전재식, 오희필, 오헌진, "감마선 분광분석법에 의한 환경방사선의 선질 및 선량측정연구", 충남과학연구지 11(2), 25-38 (1984).
- [25] NCRP, *Environmental Radiation Measurements*, NCRP Rept. 50 (1976).
- [26] S. Moriuchi, M. Tsutsumi and K. Saito, "Examination on conversion factors to estimate effective dose equivalent from absorbed dose in air for natural gamma radiation", *Hoken Butsuri (J. Jap. Health Phys. Soc.)*, 25 121-128 (1990).
- [27] UNSCEAR, *Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects*, UNSCEAR 1982 Rept., UN, New York, pp. 43-81 (1982).
- [28] UNSCEAR, *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiations*, UNSCEAR 1988 Rept., UN, New York, pp. 49-134 (1988).

# Study on the Dosimetry and Assessment of Terrestrial Radiation Exposure\*

Jae - Shik Jun, Hi - Peel Oh<sup>1)</sup>  
*Department of Physics, Chungnam National University*

and

Chung - Woo Ha  
*Korea Atomic Energy Research Institute*

## ABSTRACT

For the quantitative evaluation and assessment of radiation exposure from terrestrial component of natural environmental radiation, successive thermoluminescence dosimetry and periodical *in-situ* gamma ray spectrometry were carried out for a period of 24 months. LiF PTFE disc TLDs and  $3^{\circ}\phi \times 3^{\circ}$  cylindrical NaI(Tl) scintillation detector in association of portable multichannel analyzer (4096 ch) were used in this study. The doses measured were evaluated and assessed in terms of effective dose equivalent. As a concomitant output, the dose equivalent due to ionizing component of cosmic ray was able to be evaluated. According to the results obtained in terms of variance weighted mean, the annual effective dose equivalents of terrestrial gamma ray and cosmic ray ionizing component in Taejeon area came out to be  $564 \pm 4 \mu\text{Sv}$  ( $64.8 \pm 0.5 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ ) and  $300 \pm 2 \mu\text{Sv}$  ( $34.3 \pm 0.2 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ ), respectively, which are reasonable comparably with that appeared in UNSCEAR Report[28] as per caput annual effective dose equivalent in "areas of normal background radiation".

*Keywords* : Natural radiation, G(E)factor, Energy band method, In-situ spectrometry, TLD

---

\* Research performed under the auspices of the Korea Science and Engineering Foundation funded for the period of Aug.7,1986 to Aug.6,1988.

1) Present address : Taejeon University, Taejeon Korea.