

## 자연 방사선량 중 우주선 기여 성분 정량 연구\*

전재식 · 오희필 · 하정우\*\* · 오현진 · 강인선

충남대학교 물리학과

\*\*한국에너지연구소

### 요 약

자연 방사선 피폭선량 중 우주선 전리 성분의 기여를 정량하기 위하여 LiF TLD를 이용하여 약 1년반에 걸쳐 3개월 간격의 주기적 측정을 수행하였다.

TLD는 세 가지를 사용하였는데 그것은 칩과 PTFE원판형으로 된 두 가지의  ${}^7\text{LiF}$ 와 중성자 성분의 기여를 가려내기 위한 원판형의  ${}^6\text{LiF}$ 였다. 선량 측정은 뱃지에 넣은 TLD를 충남대학교 대덕 캠퍼스의 한4층 콘크리트 건물내 3층의 한 연구실에 설치한 10-15cm 두께의 납차폐 상자에 넣어서 90일 간격으로 다섯 주기 동안 수행하였다. 비교 연구를 위하여 3"φx3"원통형NaI(Tl) 섬광 검출기와 1024채널 MCA를 이용하여 3MeV 이상의 우주선 경성분에 대한 분광분석을 병행하였는데 그 결과 옥내 차폐체를 이용한 TLD 측정치는 옥외 우주선 전리 성분의 약 75%를 측정하고 있음이 밝혀졌다.

이와 같은 차폐 손실을 보정한 TLD측정 결과에 의하면 충남대 대덕 캠퍼스 옥외에서 우주선 전리 성분의 기여는  $34.3 \pm 1.1\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 나타났는데 이것은 이 측정 지점에서 예측할 수 있었던 선량 값과 매우 잘 일치하는 것이다.

### 1. 서 론

본 연구진은 자연 방사선의 선량 측정 및 피폭선량 해석에 관한 연구의 일환으로 감마선 분광 분석법과 열형광 검출법을 사용하여 지각 방사선의 선량 측정 및 해석에 관한 연구를 수행한 바 있다(1). 본 연구도 상기 연구의 일환으로 수행된 것이며 자연 방사선 피폭 선량의 약 30%를 차지하고 있는 것으로 알려진 (2) 우주선 기여 성분을 정량하기 위한 연구이다. 지구 환경에 도달하는 우주선은 은하 우주선과 태양 우주선의 두 종류로 대별되는데, 전자의 경우는 약 87

% 정도가 양성자(p), 11% 정도가 알파 입자이고 그 밖에 중입자나 전자(e)가 각각 1% 정도씩 차지하고 있으며, 그 에너지는 최고  $10^{11}\text{GeV}$ 에 해당하는 것도 있으나 대부분 0.1-100 GeV 정도의 것인데 지구대기의 흡수층을 거쳐 지표에 도달하는 것은 원래 10 GeV 이상 이었던 것들이다(3). 태양 우주선의 일차 성분도 수GeV에 이르는 에너지를 가진 입자들이 있으나 대부분은 1내지 100MeV 범위에 있는 것이어서 지표에서의 피폭 선량에 기여하는 성분은 무시할 수 있을 정도이다. 이들 입자들은 고층 대기권에서 공기구성 핵들과 핵반응하여 이차 양성자나 중성자(n) 또는 대전 및 비대전  $\pi$  중간자(파이온)를 생성시키며, 이들 이차 핵자들은 이어서 핵자 캐스케이드를 통하여 추가적으로 파이온을 발생시킨다. 수명이 짧은 이

\* 본 연구는 1986-87년도 문교부 기초과학 특성화연구 조성비의 지원으로 수행된 "방사선량 측정 및 해석연구(Ⅲ)"과제의 일부 연구임.

파이온들이 저층 대기권에 주로 존재하는 입자들의 선조가 되는데 대전 파이온은  $\mu$  중간자(뮤온)로 붕괴하고 비대전 파이온은 한쌍의 광자로 붕괴한다. 대부분의 이들 고에너지 광자는 고에너지 전자를 발생시키고 이 전자는 소멸과 제동복사 과정에 의하여 다시 많은 광자를 발생시켜 결국 전자기 캐스케이드라는 전자-광자 선속 밀도의 증폭을 유발하게 된다. 뮤온이 전자로 붕괴하는 과정에서 유사한 캐스케이드가 발생할 수 있다. 이상의 우주선 핵반응을 정리하여 보면 다음과 같다(4) ( $\nu$ 는 중성미자임).

- a)  $p + \text{공기} \rightarrow p + n + \pi^+ + \pi^-$ : 핵자 캐스케이드
- b)  $n + \text{공기} \rightarrow p + n + \pi^+ + \nu$ : 핵자 캐스케이드
- c)  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \gamma$ : 파이온 붕괴에 의한 뮤온 생성
- d)  $\pi \rightarrow 2\gamma + 4e^+ \rightarrow \dots$  등: 전자기 캐스케이드로의 파이온 붕괴
- e)  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + 2\nu (\rightarrow \gamma \rightarrow \dots)$  등: 전자기 캐스케이드로의 뮤온 붕괴

낮은 대기권에서의 이들 상호작용 중 가장 중요한 것은 작용 c)에서 생성되는 뮤온과, 작용 e)에서 생성되는 전자 및 이에 따른 광자들인데 약 80%를 점하는 뮤온과 20%를 차지하는 전자가 지표에서의 두 가지 주요 전리 성분을 이룬다.

한편 지표(해면수준)에서의 뮤온의 에너지 분포를 보면 그 선속 밀도는 90%가 0.2에서 30GeV 범위에 있으며 그 중앙값은 대략 2GeV 정도로 알려져 있다(3). 그래서 우주선에 의하여 지표 대기에 주어지는 흡수 선량의 대부분은 이 에너지 범위의 뮤온과 이에 수반되는 충돌 및 1내지 50MeV의 붕괴 전자들에 의한 것이다(3,4), 본 연구에서는 지표 우주선 전

리 성분의 이상과 같은 특성을 감안하여 지각 방사선이나 자연계의 방사성 동위원소에서 방출되는 감마선을 99% 이상 자체특수 설계된 납차폐 상자내에 일정 기간 저장한 TLD를 사용하여 우주선 전리 성분의 선량을 측정하는 한편 우주선의 지표에서의 에너지 분포를 알아보기 위하여 NaI(Tl) 검출기를 이용한 분광분석을 병행하였으며 여기서 산출된 선량을 TLD 측정값과 비교 검토하였다.

2. 측정 기기 및 방법

1) 열형광 선량 측정

지표 근처의 전형적 환경 방사선장에서 우주선 상호 작용으로 발생한 하전 입자가 자유 공기나 인체 기관에 주는 흡수 선량은 지각 감마선의 기여와 비견되는데 이와 같은 현상은 LiF TLD에 대하여서도 마찬가지로 적용된다(5). 고에너지 뮤온이 주를 이루는 지표 우주선 피폭 선량 측정에 TLD를 사용한 것은 바로 이와같은 사실에 기초를 두고 있다. 본 연구에서는 두가지의  ${}^7\text{LiF}$ 와 한 가지의  ${}^6\text{LiF}$  등 모두 세 가지의 TLD를 사용하였는데 그 사양은 표1에 정리해 놓은 바와 같다.

여기서  ${}^6\text{LiF}$ 을 병용한 이유는 중성자 성분의 기여를 어렵게 보기 위한 것이다. 이들 TLD중에서 칩은 넓이  $3.0 \times 4.3 \text{ cm}^2$  두께 1.5mm 이고 지름이 1cm인 4개의 구멍을 가진 금속판의 두개의 구멍에 각각 한 개씩 넣고 그 양측면에 0.02mm 두께의 플라스틱 박판을 대어 완전히 압착 밀봉한 것이다. 나머지 두 구멍중 한쪽에 두개의 PTFE  ${}^7\text{LiF}$  TLD (이하 PTFE-7로 표

Table 1. TLD used(6).

Phosphor	Form	% Phosphor Loading	Dimension (mm)	Thickness (mg·cm <sup>-2</sup> )	Dose Range (rad)	Symbol used here
${}^7\text{LiF}$ (99.99% ${}^7\text{Li}$ 0.01% ${}^6\text{Li}$ )	round chip	100	$\phi 5.0 \times 1.0$		$(1 \sim 5) \times 10^{-5} / 10^5$	Chip-7
${}^6\text{LiF}$ (95.6% ${}^6\text{Li}$ 4.4% ${}^7\text{Li}$ )	PTFE* disk	30	$\phi 12.7 \times 0.4$	~100	$5 \times 10^{-3} / 10^5$	PTFE-7
${}^6\text{LiF}$ (95.6% ${}^6\text{Li}$ 4.4% ${}^7\text{Li}$ )	PTFE* disk	30	$\phi 12.7 \times 0.4$	~100	$5 \times 10^{-3} / 10^5$	PTFE-6

\*PTFE : Polytetrafluoroethylene.

시험)를, 다른 한쪽에 한 개의  $^6\text{LiF TLD}$ (이하 PTFE-6로 표시함)를 넣고 이 금속판을 하나의 플라스틱 배지 케이스에 넣어 외부로부터의 접촉과 광선을 차단토록 하였는데, 이 케이스의 양면 창 두께는 0.06 mm로 거의 차폐 효과가 없도록 되어 있다. 칩의 경우는 여기에 1.25mm 두께의 테플론 필터가 양면에 추가로 부착되어 있으며 그 밖의 필터는 사용하지 않았다. 이와 같이 포장된 TLD 배지를 지각 감마선이나 자연계의 방사성 동위원소에서 방출되는 감마선을 99% 이상 차폐할 수 있도록 좌우 밀면이 각각 10cm이고 윗면이 15cm 두께로 된 납차폐 상자 내에서 일정 기간 노출시킨 후 그기간의 집적 선량을 평가하였다. 사용한 TLD는 1주기 당 칩과 PTFE-7은 각각 6개, PTFE-6은 3개씩 있었는데 이밖에 fading 보정을 위하여 같은 수의 TLD를 별도로 사용하였다. 이 납차폐 상자는 10cm 두께의 시멘트 콘크리트와 12cm 두께의 철근 콘크리트로 구성된 지붕의 4층 건물내 3층 한 방의 거의 중심 위치에 놓여 있으며 3층과 4층 사이는 12cm 두께의 철근 콘크리트와 3cm 두께의 보통 콘크리트에 2.3mm의 납판으로 시공된 층막이 되어 있어서 우주선 입사 방향으로 13cm의 시멘트 콘크리트, 24cm의 철근 콘크리트 및 2.3cm의 납 차폐가 추가로 되어 있는 셈이다. 우주선 피폭 선량의 측정은 1986년 10월 13일에 시작하여 1988년 6월 14일까지 20개월 사이에 90일 간격의 5주기를 수행하였다. 본 연구에서 사용한 TLD 판독 장치는 Pitman(Vinten) Toledo TLD Reader Model 654인데 그 기기적 특성과 판독 방법은 이미 본 저자들이 발표한 논문에서 언급한 바와 같다(1). TL 출력과 선량 교정은 0.5mm Pt에 밀봉된  $100\mu\text{g } ^{226}\text{Ra}$  표준 선원으로 수행하였으며 교정 선량 범위는 1.32~21.1mR 이었다.

## 2) NaI(Tl) 분광 분석

우주선 경성분의 에너지 분포를 알아보기 위하여 분광 분석을 수행하였는데 여기서는 3"φ x 3" 원통형 NaI(Tl) 섬광 검출기(Harshaw Type 905-4)와 4096 채널 휴대형 MCA(EG&G ORTEC Model 7500A)를 사용하였다. 스펙트럼 측정은 앞의 열형광 측정부분에서 언급한 납차폐 상자 내부와 실내 개방 공간 및

건물로부터 최소 30m 이상 떨어진 옥외 개활 평지에서 수행하였는데 실내나 옥외의 개방 공간 측정에서는 NaI(Tl) 결정체가 위로 향하게 하고 지표(실내는 바닥)에서 1m 높이에 설치하여 측정을 수행하였으나 납차폐체 내에서는 부득이 검출기를 수평으로 설치하여 측정하였다.

측정 에너지의 범위는 1024 채널 구간에서 100 MeV까지로 설정하였는데 200MeV 범위까지 측정된 Lin등(7)의 측정 결과에 의하면 우주선 경성분의 99.6%가 100MeV 이하의 범위 안에서 검출되고 있으며, 따라서 우리가 선정한 범위는 연구목적에 충분히 포함된다고 할 수 있다. 에너지 척도 교정에는  $^{40}\text{K}$ (1.46 MeV)와  $^{208}\text{Tl}$ (2.614 MeV)의 피크를 쓰는 방법과  $^{60}\text{Co}$ 의 1.17MeV, 1.33MeV 및 2.50MeV 합피크를 이용하는 방법을 병용하였는데 이 두가지 방법에 의하여 독립적으로 결정된 에너지 척도는 매우 잘 일치하였다. 비록 에너지 척도 교정 영역이 3MeV 이하에 머물러 있으나 NaI(Tl) 섬광체의 경우 400keV 이하에서 나타나는 약간의 비선형성을 제외하고는 감마선(전자)에 대하여 상당히 높은 에너지 영역까지 만족할만한 선형 감응을 보이고 있을 뿐 아니라 양성자와 같은 하전 입자에 대하여서도 0에서 20MeV까지 완벽한 선형성을 보이고 있어(8)본 연구에서 사용한 영역의 에너지 척도 결정에 큰 무리는 없는 것으로 보인다. 실제로 Lin등은  $^{40}\text{K}$ 과  $^{208}\text{Tl}$  감마선만으로 3"φ 구형 NaI(Tl) 검출기에 대하여 200MeV까지의 에너지 척도를 결정하였고(7), 5~50 MeV 영역의 감마선 측정용 NaI(Tl) 검출기를 4.4MeV 감마선으로 에너지를 교정한 경우도 있으며(9), 50~500MeV 범위의 감마선 측정용 NaI(Tl) 결정체 배열 검출기의 출력 파고 특성을  $^{137}\text{Cs}$  감마선으로 결정하여 사용한 실예가 있다(10).

스펙트럼 측정 시간은 모든 경우에 live time 20,000초로 정함으로써 3MeV 이상의 에너지 범위에서의 총계수치에 의한 계측 통계오차가 0.5% 미만이 되도록 배려하였다. cutoff 에너지는 50 keV 였다.

## 3. 결과 및 검토

### 1) 열형광 측정 결과

납차폐 상자 안에서 90일간 노출시킨 TLD는 매 주기마다 회수 직후 표준선원을 사용하여 그때마다 선량( $\mu\text{R}$ )/TL 교정 인자를 결정하였다. 출력 TL은 이미 본 저자들이 발표한 바와 같은 fading 보정 과정 [1]을 거친 후  $^{226}\text{Ra}$  표준 선원으로 결정된 교정 인자에 의하여  $\mu\text{R}$  단위의 선량으로 먼저 환산하고, 여기에 Lowder와 de Planque(5)가 실험적으로 구한, LiF에 대한 R에서 rad로의 전환인자 0.81과, 우주선 전리 성분에 대한 TLD 판독 전리치의 비(TLD의 감마 감응에 대한 우주선 감응의 비) 0.86(5,11)을 적용하여 구한 0.94의 환산 인자를 써서  $\mu\text{rad}$ 단위의 TLD흡수 선량으로 환산한후, 다시 nGy 단위로 고쳐 표시하였다. 환산 인자 0.81은 원래  $^{137}\text{Cs}$  감마선(0.662MeV) 1mR에 대하여 LiF TLD의 평균 흡수 선량이 0.81 mrad되는 데서 구한 값인데(5)본 연구에서 사용한 Pt캡슐에 밀봉된  $^{226}\text{Ra}$ 의 경우도 평형 상태에서 감마선의 평균 에너지가 0.7MeV 정도인 점을 감안하면 연구 목적에 비추어 이 환산 인자를 사용하는데 무리가 없다고 본다.

한편, TLD의 감마선 감응에 대한 우주선 전리 성분 감응비로 Lowder와 de Planque(5)는 8MeV뮤온 빔을 사용하여 실험적으로 구한 값  $0.86 \pm 0.5$ 를 제시하였고, O'Brien(8)은 Monte Carlo 방법으로 계산하여  $0.865 \pm 0.017$ 의 값을 얻었는데, 본 연구에서는 0.86을 채택하기로 하였다. 이와같이 하여 TLD로 측정된 우주선 경성분에 의한 TLD 흡수선량은 표2에 정리한 바와 같다. 여기서 다시 한번 주의를 환기시켜야 할 것은 이 값이 4층 철근 콘크리트 건물의 3층

중간의 한 연구실 내에 위치한 10-15cm 두께의 납차폐 상자 내부에서 측정된 값이라는 점이다.

이 측정치 중에서 대표 값은 통계적 신뢰도, TLD의 안정성과 균질성 등을 고려하여 PTFE-7의 측정치를 택하기로 하였다.  $^7\text{LiF}$ 을 사용한 chip-7과 PTFE-7의 측정치는 오차 범위 안에서 매우 잘 일치하고 있으나 PTFE-6의 측정치는 현저히 차이가 나고 있다. 그 이유는 물론 우주선 중성자 성분의 기여 때문인데 PTFE-6과 PTFE-7의 평균 측정치를 비교해 보면  $14.1 \pm 1.4 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ 의 차이가 남을 알 수 있다. 그러나, 이 값은 우주선의 전리 성분 선량에 등가한 중성자 성분의 기여가 있음을 나타내는 것일 뿐 이것이 곧 중성자 선량을 의미하는 것은 아니다. 우주선의 중성자 성분의 선량을 정량하려면 PTFE-6에 대한 중성자 선량 교정은 물론 우주선 중성자의 에너지 분포도 알아야 하므로 이에 관한 연구는 별도로 수행되어야 할 것이다. 다만 여기서 말할 수 있는 것은  $^6\text{LiF}$  TLD를 사용하여 우주선 전리성분의 선량을 측정할 때에는 측정값의 35%정도를 감산 처리해 주어야 될 것이라는 점이다.

한편, 표2 예나타넨 각 측정치들의 오차는 통계오차(random error)이며 계통 오차는 이미 발표된 논문(1)에서 언급한 바와 같이 상대 표준편차 0.2% 미만으로 무시할 수 있을 정도이다. 각기간 측정값의 통계 오차 범위는 최소 3%에서 최대 29%에 이르는 폭 넓은 분포를 하고 있으나 대부분은 7내지 15%에 머물러 있다. 총 측정 선량이  $50\mu\text{Gy}$  내외의 저선량 범위라는 점을 감안하면 이 정도의 통계 오차는 비

Table 2. Cosmic-ray absorbed dose rate in LiF TLD\*( $\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

Cycle	Duration of Exposure (90d)	TLD used		
		Chip-7	PTFE-7	TPFE-6
1	Oct. 13/86 - Jan. 12/87	$23.0 \pm 2.4$	$30.0 \pm 3.7$	$45.9 \pm 7.3$
2	Feb. 6/87 - May 7/87	$24.2 \pm 2.5$	$22.4 \pm 3.3$	$41.5 \pm 6.3$
3	Jul. 23/87 - Oct. 21/87	$22.7 \pm 2.7$	$27.0 \pm 1.2$	$32.1 \pm 2.2$
4	Nov. 28/87 - Feb. 26/88	$30.9 \pm 8.9$	$24.5 \pm 1.9$	$46.0 \pm 12.2$
5	Mar. 16/88 - Jun. 14/88	$29.0 \pm 6.9$	$24.7 \pm 1.9$	$42.5 \pm 1.3$
Grand Average		$23.6 \pm 1.3$	$25.9 \pm 0.8$	$40.0 \pm 1.1$

\* Measured in a lead castle of 10-15cm thick installed in a room of third floor of four-story reinforced concret building.

교적 만족스러운 것이라고 할 수 있다.

한편 표2에 나타낸 전체 평균값은 각 기간 측정값의 분산의 역수를 가중치로 하여 가중 평균 한 것으로, 전 평균치  $\langle X \rangle$ 와 전 표준 편차  $\sigma_{\langle X \rangle}$ 는 각각

$$\langle X \rangle = \frac{\sum_i x_i / \sigma_i^2}{\sum_i 1 / \sigma_i^2}$$

및

$$\sigma_{\langle X \rangle} = \left[ \sum_i 1 / \sigma_i^2 \right]^{-1/2}$$

로 계산한 값이다(12). 여기서  $x_i$ 와  $\sigma_i$ 는 각각, 각 기간 측정 평균값과 표준 편차이다.

그런데  $^7\text{LiF}$  테이터중 칩의 측정값과 PTFE의 값 사이에  $2.5\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 의 차이가 있어 이것이 전 표준 편차의 범위를 벗어 나므로 여기서는 칩의 측정값을 참고로 하고 PTFE의 것을 대표 측정값으로 취하였다. 왜냐하면  $^6\text{LiF}$  측정값과의 비교에 있어서 칩의 경우는 TLD의 형태, 성분 및 포장 상태 등에서 차이가 있기 때문이다.

PTFE-7의 측정값  $25.9\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 는 본 측정위치 [13]

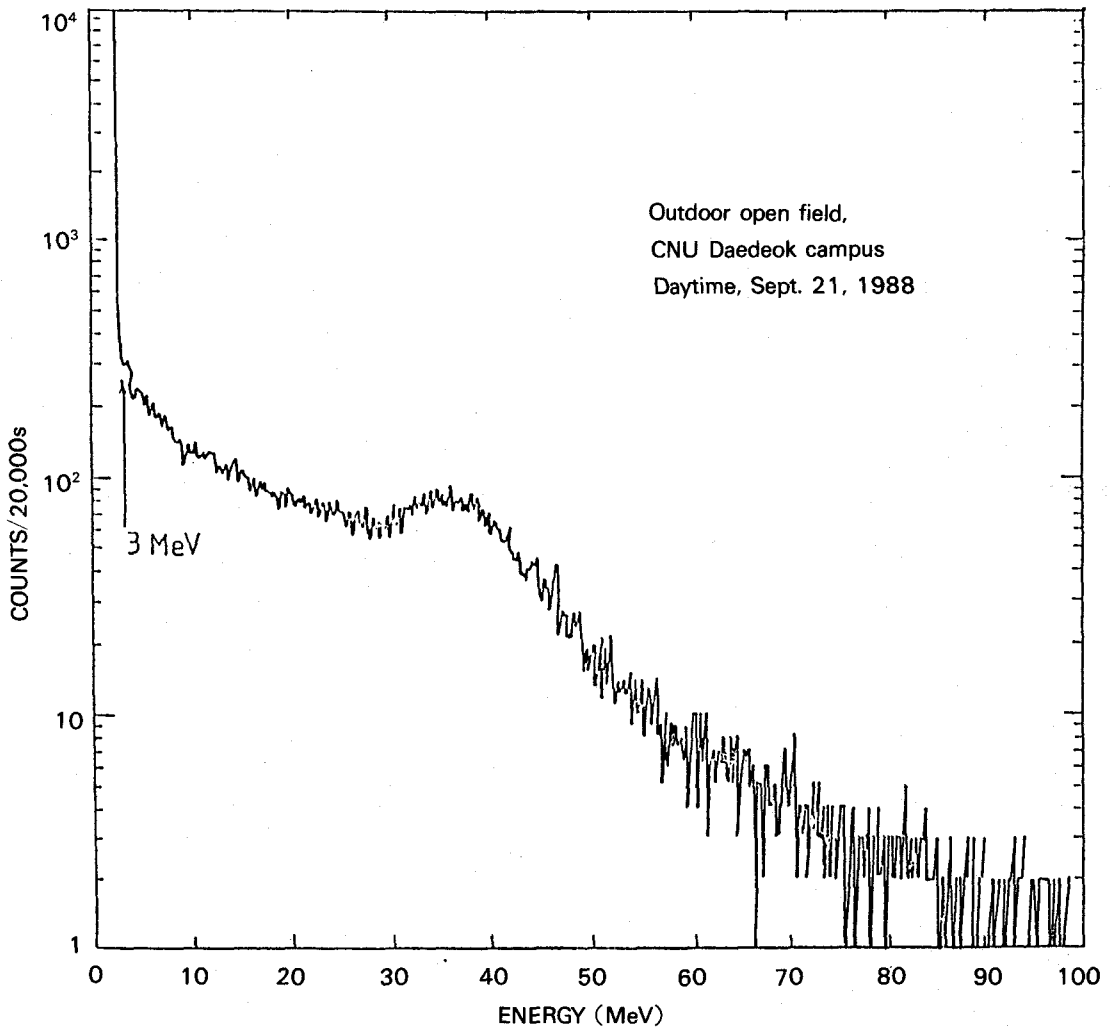


Fig.1. Pulse height distribution of cosmic-ray measured by 3"φx3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector.

의 위도(약 36°N)와 고도(약70m)에서 예상되는 32~36 nGy·h<sup>-1</sup>[4,14]보다는 낮은 값을 보여주고 있다. 그것은 물론 건물 지붕과 층간 천정에서 감쇠되고 더구나 15cm 두께의 납 차폐체에서 감쇠되었기 때문이긴 하지만 그 실체를 구체적으로 살펴보기 위하여 NaI(Tl) 섬광 계수관을 사용한 분광 분석을 수행하였다.

2) NaI(Tl) 분광 분석 결과

우주선 정성분에 대한 분광 분석 측정에서 얻은 스펙트럼 중 옥외 공간에서 얻은 것은 그림1과 같다.

이 스펙트럼을 보면 36MeV 근처에 하나의 피크를 볼 수 있는데, 이것은 3"φ구형 NaI(Tl) 검출기로 옥외에서 측정한 경우(7)나 동일 검출기에 대하여 이론적으로 계산한 스펙트럼(15)의 경우에 유사한 피크가 33MeV에 나타나는 것과 비교해 볼만하다. 3 MeV 정도의 피크 위치의 차이는 NaI(Tl) 결정체의 형태와 에너지 척도 교정의 차이에서 유래될 수 있다고 생각되며 그림과 같이 낮게 퍼진 피크의 경우에는 더구나 문제 될 것이 없다고 생각된다. 한편 동일한 방법으로 4층 철근 콘크리트 건물의 3층 옥내와

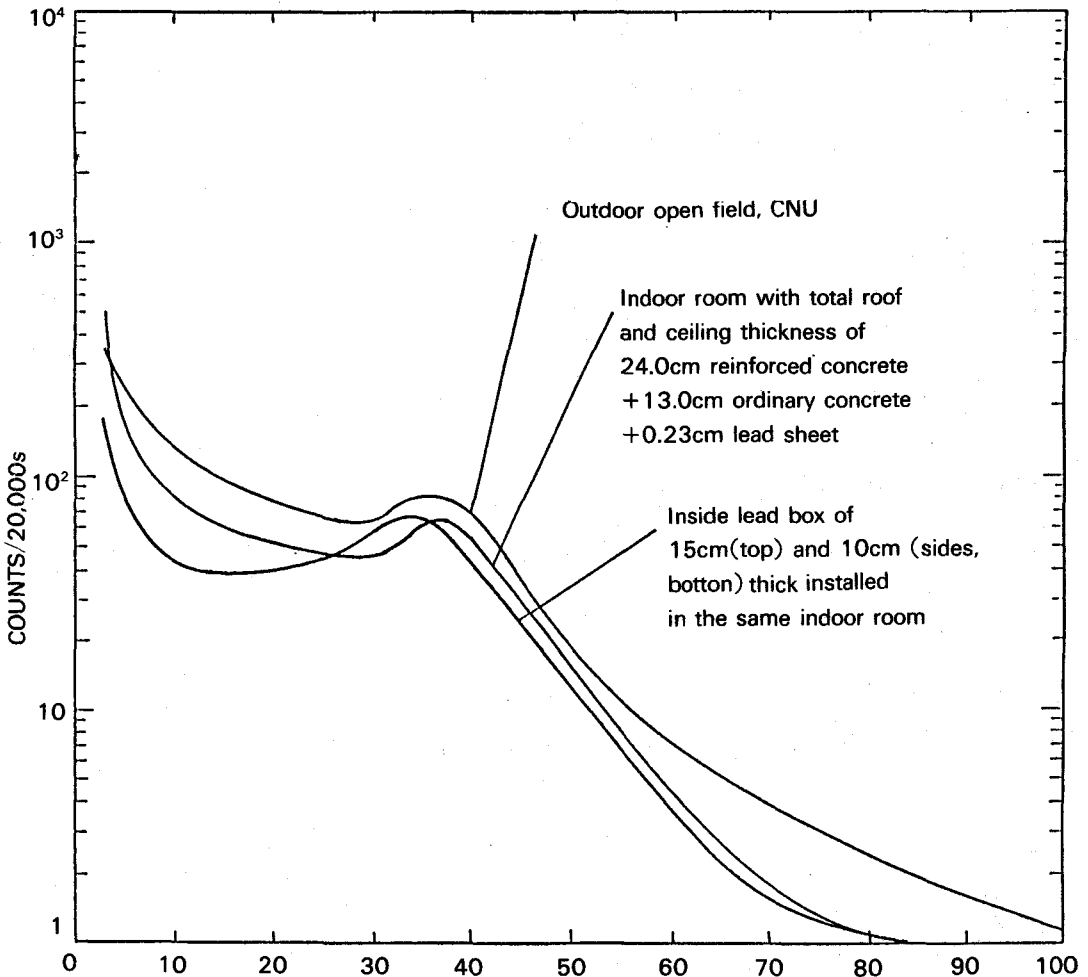


Fig.2. Shielding effects on the pulse height distribution of cosmic-ray.

이 옥내에 위치한 납 차폐 상자(TLD 우주선 측정 지점)내에서 측정된 스펙트럼들을 겹쳐보면 그림2와 같다.

이 그림은 눈대중으로 그 윤곽만을 매끄럽게 그린 것이다. 이 그림에서 보면 납상자 안에서 측정된 스펙트럼의 경우에 피크의 위치가 33MeV 쪽으로 이동하여 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 우주선 경성분이 15cm 두께의 납을 통과하는 동안 그 에너지가 전체적으로 하강 된 결과라고 생각된다. 그러나 이와 같은 두꺼운 차폐에도 불구하고 에너지 스펙트럼의 형이 크게 변형되지 않고 있음은 Lowder와 de Plan-

que(5)가 지적한 바와 일치하고 있다.

한편, 이들 겹쳐진 세 스펙트럼을 놓고보면 차폐체의 존재로 말미암아 계수치의 손실이 크게 나타나는 영역은 3MeV에서 30MeV사이임을 알 수가 있다. 실제로 Lin(7)등이 3'φ 구형NaI(Tl) 검출기로 측정 한 3MeV~200MeV 구간의 총계수율 X(cps)와 우주선 선량율 Y(nGy·h<sup>-1</sup>)과의 관계식을 실험적으로 구한 방정식

$$Y = 16.3 X + 2.7$$

을 이용하여 그림2의 스펙트럼에서 선량률을 계산할 수 있다. 그런데 본 연구에서 사용된 검출기는 3'φ X

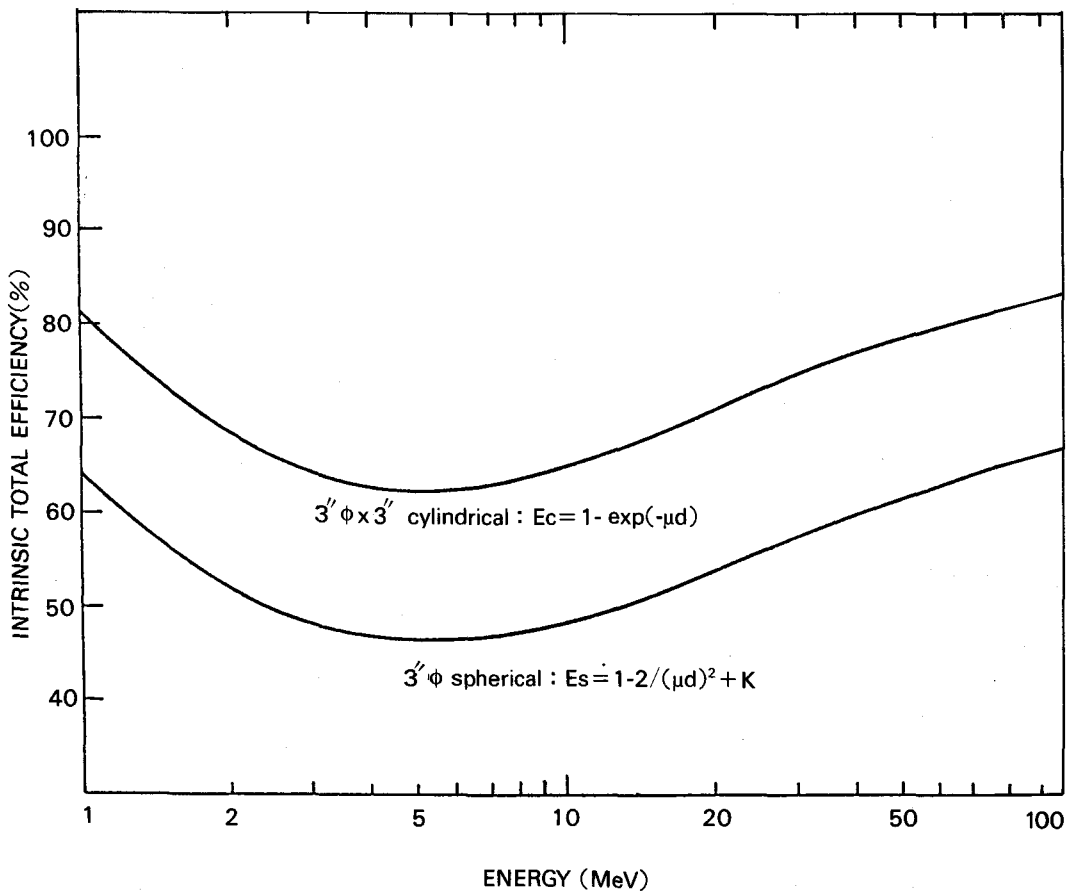


Fig.3. Intrinsic total counting efficiencies of 3'φ spherical and 3'φ x 3'φ cylindrical NaI(Tl) scintillation detectors.

3' 원통형이므로 이 형태 차이에서 오는 전 고유효율 보정을 먼저 해주어야 한다. M.Okano 등(16)의 해석적 계산에 의하면, 구형 섬광체의 전계수 효율Es는

$$Es = 1 - 2/(\mu d)^2 + 2 e^{-\mu d} (1/(\mu d)^2 + 1/\mu d)$$

로 주어지는데 여기서  $\mu$ 는 NaI(Tl)의 감마선 선형 감쇠 계수이고 d는 섬광체의 지름이다. 한편, 평행 선속에 대한 원통형 검출기의 전계수 효율 Ec는

$$Ec = 1 - e^{-\mu d}$$

로 주어지므로  $\mu$ 에 대한 Hubbell의 data(17)를 이용하여 1MeV에서 100MeV 사이의 이들 각각의 검출 효율을 구해보면 그림3과 같아진다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 원통형 검출기의 검출 효율이 구형 검출기의 것보다 약 16~17% 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

Lin등의 방정식으로 구한 우주선 선량률에 이 검출 효율 차이를 보정하여 최종적으로 산출한 우주선 전리성분 선량률은 표3에 수록한 바와 같다.

이 측정치들 중 옥외, 옥내의 개방 공간에서 측정된 경우는 모두 원통형 섬광체를 위로 향하게 하고 측정하였으나 납 상자 안에서는 이를 수평으로 놓고 측정하였으므로 앞의 두 경우와 90°의 방향 차이를 보이고 있다. 이에 대한 보정을 Moriuchi(18)의 실험 데이터를 이용하여 수행하였다. 표3에서 보는 바와 같이 옥외 측정치는 측정 지점의 위도나 고도에서 예측되는 선량률과 만족스러운 일치를 나타내고 있다. 그러나 4층 철근 콘크리트의 3층 옥내에서의 우

주선 선량률은 옥외의 값보다 약28% 정도 감소된 것으로 나타났으며, 더구나, 10-15cm 두께의 납 차폐 상자내에서의 측정치는 옥외 선량률보다 38.5% 정도 적게 측정되었고 옥내 공간에서의 우주선 선량률에 비해서는 약14%가 감소된 것으로 나타났다. 이와 같은 감소는 주로 3에서 30MeV영역의 성분들에서 이루어졌음을 그림2의 스펙트럼에서 알아볼 수 있다.

### 3) 열형광과 분광 분석 결과 비교

동일한 납 상자내에서 측정된 우주선 경성분의 선량률을 비교하여 보면 분광 분석 측정치가 TLD 측정치보다 4.8nGy.h<sup>-1</sup>(18.5%) 정도 적게 나타난 것으로 볼 수 있는데, 그것은 TLD 측정치중에는 3MeV 이하의 감마선 성분들의 기여가 포함되어 있지만 분광 분석 장치의 경우는 3MeV 이하의 것은 선량 계산에서 제외하였기 때문으로 설명할 수 있다.

이 사실을 확인하기 위하여 그림4에서 보는 바와 같이 납 상자 안에서 3MeV 이하의 감마선 스펙트럼을 측정하여 cutoff 에너지 이상에 대하여 조사 선량률을 계산해 보았더니 0.59μR.h<sup>-1</sup>였다. 여기에 앞에서 사용했던 환산 인자를 적용하여 흡수 선량률을 산출하면 5.5 nGy.h<sup>-1</sup>되어 표2에서 볼 수 있는 선량 오차 범위 안에서 위의 설명이 타당함을 입증하여 주고 있다. 이 그림에는 비교를 위하여 납 상자밖의 동일 실내에서 측정된 감마선 스펙트럼과 조사 선량률도 함께 나타내었다.

NaI(Tl) 분광 분석의 경우는 에너지 척도의 설정

**Table 3.** Cosmic-ray absorbed dose rate in air measured by NaI(Tl) scintillation spectrometry.

Location	Dose Rate*(nGy·h <sup>-1</sup> )
Outdoor open field, CNU Daedeok campus (36°22' N, 127°21'E, ~70m alt.)	34.3
In the center of a room in the same place with a total roof and ceiling thickness of 24.0cm reinforced concrete+13.0cm ordinary concret+0.23cm lead sheet.	24.6
In a lead castle of 15cm(top) and 10cm(sides & bottom) thick located in the same room	21.1

\*Uncertainty due to counting statistics is less than 0.5%.



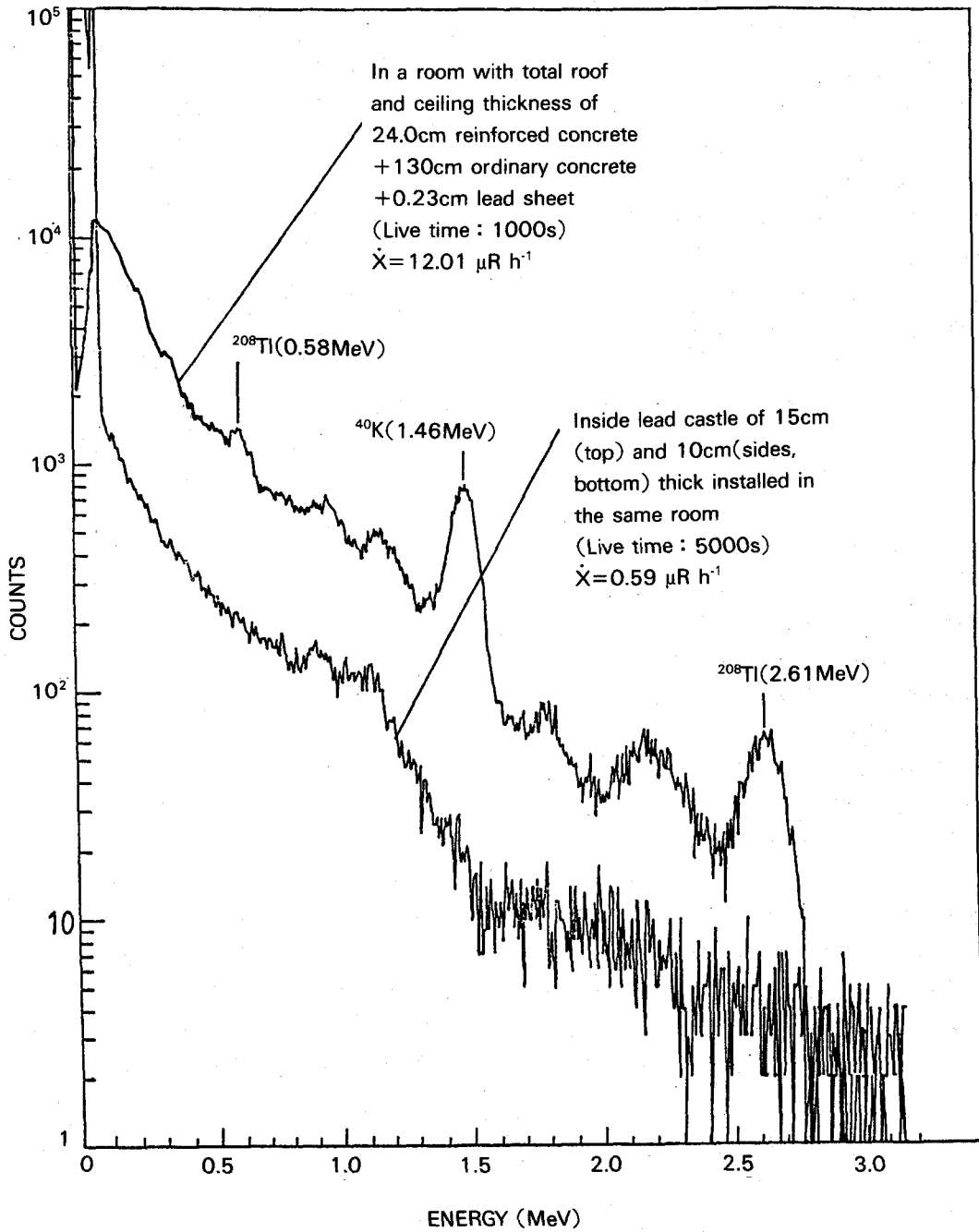


Fig.4. Inside and outside background gamma-ray spectra of a lead castle measured by  $3\phi \times 3\phi$  cylindrical NaI(Tl) detector.

에 따라 옥내, 옥외를 가림없이 우주선 경성분을 측정할 수 있으나 TLD의 경우에는 지각 방사선과 자연계 방사성 동위원소에서 방출되는 모든 감마선을 차폐하지 않는 한 우주선 경성분을 따로 측정할 수 없으므로 결국 본 연구에서 사용한 것과 같은 납 차폐 상자를 쓸 수 밖에 없다. 이 경우에 차폐 상자내에서 측정된 TLD 선량을 옥외 선량으로 환산하려면 차폐에 의한 감쇠분을 보정해주어야 한다. 본 연구에서 얻은 결과에 의하면 옥내 차폐체 내에서 얻은 우주선의 TLD 선량은 옥외 선량의 75.5%로 검출하고 있으므로 이값을 TLD 선량의 우주선 옥외 선량으로의 보정 인자로 사용하였다.

#### 4. 결 론

우주선 전리 성분 선량 측정을 위한 이연구를 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. TLD와 적절한 차폐체를 사용하여 지표에서의 자연 방사선 피폭 선량 중 우주선 전리 성분의 기여를 정량적으로 측정 해석할 수 있음을 알 수 있다. TLD 선량 해석에는 조사 선량-TLD 흡수 선량 환산 인자와 TLD의 교정용 감마선 감응에 대한 우주선 감응의 비가 반드시 고려되어야 한다.

2. 지표에서의 우주선 기여 성분의 대부분이 고에너지 뮤온이지만 NaI(Tl) 검출기를 사용하여 고에너지 감마선 스펙트럼에 등가한 에너지 스펙트럼을 얻을 수가 있으며 이것으로부터 정확도 높은 피폭 선량을 구할 수가 있어, TLD가 일정 기간 동안의 집적 선량을 측정하는데 비하여 어느 특정 시점에서의 선량을 측정에 이 방법이 유용하게 쓰일 수 있음이 판명되었다.

3. TLD로 우주선 기여 선량을 측정하여 그 지역의 우주선 선량을 나타낼 때에는 반드시 차폐 손실 보정을 해주어야 한다. 본 연구에서 얻은 결과에 의하면 4층 철근 콘크리트 건물의 3층 실내에 설치한 측면과 바닥 10cm, 윗면 15cm 두께의 납차폐 상자 안에서 측정된 TLD 선량은 옥외지표 공간에서의 우주선 전리 성분 선량의 약 75%의 값을 나타내었다.

4. 본 연구에서 설정한 측정 지점(36°22'N, 127°

21'E, 고도 약 70m)에서 <sup>7</sup>LiF TLD로 측정된 우주선 전리 성분의 흡수 선량은 34.2±1.1nGy.h<sup>-1</sup>로 판명되었는데 본 연구의 전 측정 기간 중에 관찰된 측정치들의 통계 오차는 극단적인 경우를 제외 한다면 대부분 7-15% 범위에 머물러 있었다. <sup>6</sup>LiF TLD를 이용할 경우에는 중성자 성분의 기여에 의하여 약 14 nGy.h<sup>-1</sup>, 즉 전리 성분 선량의 약 43% 정도가 더 많이 측정되므로 이점을 감안하여야 할 것이다.

그러나 14 nGy.h<sup>-1</sup> 라는 값이 곧 중성자 흡수 선량을 나타내는 것이 아니므로 우주선의 중성자 성분에 의한 선량을 측정하는 연구는 별도로 수행 되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. J. S. Jun, H. P. Oh, C. K. Choi, H. J. Oh and C. W. Ha, "Assessment of natural radiation exposure by means of gamma-ray spectrometry and thermoluminescence dosimetry", *J. Korean Assoc. Radiat. Prot.* 10(2), 96-108(1985).
2. P. H. Lin, C. J. Chen, C. C. Huang and Y. M. Lin, "Measurement of cosmic ray induced ionisation intensity", *Radiat. Prot. Dosim.* 15(3), 185-189 (1986).
3. NCRP, *Natura Radiation Background in the United States*, National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Rept 45(1975).
4. NCRP, *Environmental Radiation Measurement*, National Council on Radiation Protection and Measurements NCRP Rept. 50(1976).
5. W. M. Lowder and G. de Planque, *The Response of LiF Thermoluminescence Dosimeters to Natural Environmental Radiation*, Health and Safety Laboratory, HASL-313(1977).
6. Vinten Instr. Ltd., *Dosimeter Material Information*, Vinten Instr. Ltd., Weybridge(1987).
7. P. H. Lin, C. J. Chen, C. C. Huang and Y. M. Lin, "Study on the indoor cosmic radiation ionisation intensity", *Radiat. Prot. Dosim.* 16(4) 329-332

- (1986).
8. N. Tsoufanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, pp.250-206, Hemisphere Publ. Co. (1983).
  9. G. H. Share, J. D. Kurfess and R. B. Theus, "Pulse-shape discrimination of high-energy neutrons and gamma rays in NaI(Tl)", *Nucl. Instr. Meth.*, **148**, 531-533(1978).
  10. R. L. Ford, B. L. Beron, R. L. Carrington, R. Hofstadter, E. B. Hughes, G. I. Kirkbride, L. H. O'Neill and J. W. Simpson, "Performance of large, modularized NaI(Tl) detectors, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-24**(1) 264-269(1977).
  11. K. O'Brien, "The response of LiF thermoluminescence dosimeters to the ground-level cosmic-ray background", *Intern. J. Appl. Radiat. & Isotop.* **29**, 735 (1978).
  12. G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, pp. 137-139 John Wiley, New York(1979).
  13. H. I. Park, J. D. Lee and J. G. Cheong, *Explanatory Text of the Geological Map of Yuseong Sheet*, Korea Res. Inst. of Geoscience and Mineral Resources, Seoul(1977).
  14. UNSCEAR, *Ionizing Radiation : Sources and Biological Effects*, United Nations, New York(1982).
  15. S. Minato, K. Takamori and Y. Ikebe, *Indoor Cosmic-ray Dosimetry by means of a 3"  $\phi$  Spherical NaI (Tl) Scintillation Counter*, Rept. of Government Industrial Res. Inst., Nagoya **32**(1,2) (1983) (after reference 7)
  16. M. Okano, U. Izunco, H. Kumagai, T. Katou, M. Nishida, T. Hamada and M. Kodama, "Measurement of environmental radiation with a scintillation spectrometer equipped with a spherical NaI (Tl) scintillator", in *Natural Radiation Environment III*, T. F. Gesell and W. M. Lowder, eds., pp. 896-911, USDOE(1980).
  17. J. H. Hubbell, *Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10keV and 100GeV*, US National Bureau of Standards, NSRDS-NBS 29(1969)
  18. S. Moriuchi, *A Dosimetric Instrument based on the Spectrum Weighting Function Method of Environmental Radiation Measurements*, Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI-M 7066(1977).

## Study on The Quantification of Cosmic-Ray Component Contributed to Natural Background Radiation Exposure\*

Jae-shik Jun, Hi-Peel Oh, Chung-Woo Ha,\*\* Heon-Jin Oh, and In-Seon Kang

*Department of Physics, Chungnam National University*

*\*\* Korea Advanced Energy Research Institute*

### Abstract

In order to quantify the contribution of cosmic-ray ionizing component to the dose given by natural background radiation, a series of measurement has been carried out using LiF TLDs for about one and a half years on quarterly basis.

Three different types of LiF TLDs namely, chips and PTFE based disks of  $^7\text{LiF}$ , and the same disks of  $^6\text{LiF}$  for identifying possible contribution of neutron component were used. Measurements were made by placing badge-incased TLDs in a lead castle of 10 to 15cm thick installed in a room on the third floor of a four-story building in CNU Daedeok campus for 5 cycles of 90 days.

For comparison a series of spectrometric study was also performed for the energy region over 3 MeV using a  $3\phi \times 3\text{''}$  NaI(Tl) scintillation detector in association with an MCA of 1024 channels, and it was found that the data obtained by the TLDs placed in the lead castle indicate 75% of the dose given by outdoor cosmic-ray component.

The results obtained by the TLDs through correction for shielding loss show that the outdoor dose contribution of ionizing component of cosmic rays at this campus is  $34.3 \pm 1.1$  nGy/h which satisfactorily agrees with that expected for our particular location of measurement.

\* Research sponsored by the Ministry of Education as a program for the promotion and specialization of basic science in 1986-1987. This paper contains a part of the work performed under the title of "Research on Radiation Dosimetry and Assessment(III)."