

## LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 선량계적 특성

### The Dosimetric Properties of LiF:Mg,Cu,Na,Si TL Detector

이정일, 김장렬, 장시영, 김봉환, 김종수, 임길성  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요약

본 연구에서는, 개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 물질에 대한 선량계적 특성으로 방사선에 대한 감도, 선량 응답성, 에너지 반응도, 재사용성 및 선량 검출 하한을 IEC(International Electrotechnical Commission) 1066 표준에서 제시하는 실험방법에 따라서 조사하였다. 감도는 TLD-100의 약 30 배로 나타났고, 30 Gy까지 선형적인 선량응답성을 가지는 것으로 평가되었다. 에너지 반응도는  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -선 광자에 대한 상대적 에너지 반응도로 53 keV에서 최대값인 1.004를 보였고 20 keV에서 최소값인 0.825를 보여 LiF:Mg,Cu,P 물질에 비하여 73 keV 및 118 keV 에너지 영역에서 더욱 향상된 에너지 반응 특성을 나타내었다. 개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자는 부가적인 에너지 보상 필터 없이 선량 평가에 직접 적용할 수 있음을 확인하였다. 재현성은 10회 재사용시 동일선량에 대한 TL 발광량의 변동계수가 0.0054로 매우 우수하였다. 선량 검출 하한은 Harshaw 4500 TLD 판독기로 판독할 경우 70 nGy로 조사되었다.

#### Abstract

The dosimetric properties of the newly developed LiF:Mg,Cu,Na,Si TL detector was investigated by using the method which was presented in IEC 1066 International Standard "Thermoluminescence dosimetry systems for personal and environmental monitoring". The sensitivity of the TL detector was about 30 times higher than that of TLD-100 by the light integration. In the study of dose linearity of the detector, the dose response was very linear up to 10 Gy and sublinear response was observed at higher doses. The energy response of the detector was studied for photon energies from 20 keV to 662 keV. The results showed that a maximum response of 1.004 at 53 keV and a minimum response of 0.825 at 20 keV were observed. The reproducibility study for the TL detector was also carried out. The coefficients of variation for each detector separately did not exceed 0.016, and for all 10 detectors collectively was 0.0054. IEC Standard requires that the coefficient of variation shall not exceed 0.075. So, the reproducibility of this new TL detector sufficiently satisfied the IEC requirements. Lower limit of detection of the detector was investigated as 70 nGy by Harshaw 4500 TLD Reader.

## 1. 서 론

열발광선량계(thermoluminescence dosimeter: TLD)[1]는 열발광량이 흡수한 방사선의 선량에, 일정영역 범위내에서, 비례하는 특성을 이용한 방사선량 평가 도구이다. TLD는 국소영역 또는 동일시간에 넓은 영역에 걸쳐서 선량평가가 가능하며, 선량율에 의존하지 않고 장기간에 걸친 누적 선량 평가가 가능한 점, 또한 적절한 열처리를 통한 재사용이 가능한 점 등의 장점을 가지고 있다 [2].

이러한 장점으로 인하여 TLD는 1950년대 Farrington Daniels 등[3,4]에 의해 처음으로 제안되어 방사선량 평가에 적용된 이후 다양한 물질들이 개발되어 개인피폭선량, 환경방사선량 및 의료용 방사선량 측정 등에 널리 이용되고 있고, 또한 저선량 영역에서의 보다 높은 측정 정밀도를 가진 고감도의 새로운 TL 물질의 개발에 대한 연구가 계속되고 있다[5].

LiF:Mg,Cu,P가 1976년 Nakajima 등[6,7]에 의해 소개된 후 감도 및 발광곡선(glow curve)의 구조향상을 위한 연구가 지속되어 중국에서는 GR-200[8]이라는 상품명으로, 폴란드에서는 MCP-N[9]이라는 상품명으로 상용화되어 현재 가장 각광받고 있는 TL 물질로 많이 이용되고 있으며, 또한 성능향상 및 응용에 관한 많은 연구가 진행중이다[10-15]. 그러나 LiF:Mg,Cu,P 물질의 가능한 최고판독온도는 240 ℃로 제한되므로 트랩준위가 완전히 비워지지 못하여 판독후에도 2 ~ 3% 정도의 잔류선량이 남게된다. 이러한 잔류선량을 줄이기 위하여, 특별히 설계된 로(furnace)를 이용한 추가적인 열처리가 필요한 단점을 가지고 있다. 그 후 발광피크의 위치가 LiF:Mg,Cu,P와 거의 같으면서 최대판독온도가 이보다 약간 높은 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 물질이 1989년에 소개되었으며[16], 여러 연구자들에 의해 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자 개발을 위한 연구가 이루어졌고 [17-19], 최근 고형화된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자가 개발되었다[20].

본 연구에서는, 개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 물질에 대한 선량계적 특성을 IEC(International Electrotechnical Commission) 표준[21]에서 제시하는 실험방법에 따라서 조사하였다. 선량계적 특성은 개발된 TL 소자의 성능 평가와 동시에 현장선량계로 사용시 운용 조건의 기준이 된다.

## 2. 이론 및 실험

### 2.1 감도(sensitivity)

TLD 물질의 감도는 단위 흡수선량당 TL 광량으로 정의된다[5]. TL은 판독시스템의 필터, 시료고정자의 상태 및 가열율 등 여러 가지 파라미터에 의해 영향을 받으므로 이를 절대적인 광량으로 측정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 일반적으로 TLD 물질의 감도는 TLD-100(LiF:Mg,Ti)을 기준으로 한 상대적인 감도로 정의한다. 즉 특정 TLD 물질의 감도  $S(D)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$S(D) = \frac{F(D)_{material}}{F(D)_{TLD-100}} \quad (1)$$

여기서  $F(D)_{TLD-100}$  와  $F(D)_{material}$  은, 동일한 선량에 대한, TLD-100 및 특정 TLD 물질의 발광곡선의 적분량이다.

개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 상대감도를 조사하기 위하여, 먼저 TLD-100 소자 5개를 TLD-100의 고유한 열처리 조건인 400 ℃에서 1시간동안 유지시킨 후 곧바로 100 ℃에서 2시간동안 유지하는 열처리를 수행하였고, 또한 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자도 5개를 준비하였다.

TLD-100 소자와 LiF:Mg,Cu,Na,Si 소자에 한국원자력연구소의  $^{137}\text{Cs}$  v-선 조사장치를 이용하여, 동시에  $10^{-2}\text{Gy}$ 를 조사시켜, 동일한 판독기에서 초당 10℃의 선형가열율로 TL을 측정하고, 전

체 측정 온도영역에 대하여 적분하였다., 이 적분값을 각 소자의 질량값으로 나눈 후, (1)식에 의해 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 감도를 산출하였다.

## 2.2 선량 응답성(dose response)

선량 응답성  $F(D)$ 는 흡수선량에 대한 측정된 TL 광량으로 정의된다[5]. TLD 물질은 넓은 선량영역에서 선형적인 선량 응답성을 보이는 것이 이상적이나, 실제 TLD 물질의 경우 대부분 고선량 영역(TLD-100의 경우 10 Gy 이상)에서는 초선형(supralinear)-버금선형(sublinear)-포화(saturate) 양상을 보이거나 또는 버금선형-포화 양상을 보이는 것이 보통이다. 규격화된 선량응답성 함수  $f(D)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f(D) = \frac{(F(D)/D)}{(F(D_i)/D_i)} \quad (2)$$

여기서  $F(D)$ 는 선량  $D$ 에서의 선량 응답성이고,  $D_i$ 은 선량 응답성이 선형적인 영역내에 있는 임의 선량이다. 보다 넓은 영역에서  $f(D)=1$ 을 만족하는 TL 소자가 이상적이라 할 수 있다. 그러나 실제 TLD 물질의 경우 이 영역은 수 Gy 정도까지이다.  $f(D)>1$ 인 경우에는 초선형으로 정의하고,  $f(D)<1$ 인 경우에는 버금선형으로 정의한다.

개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 선량 응답성 실험을 위하여, 소자를 한 그룹에 10개씩 총 10개 그룹을 준비하고,  $^{137}\text{Cs}$  조사장치를 이용하여  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ , 1, 10, 20 및 30 Gy를 조사하였다. 이 때 전자평형을 유지하기 위해 재생물질(buildup material)로 2 mm 두께의 PMMA(polymethyl methacrylate)판을 사용하였다.

판독에는, 시간에 따른 감쇠가 심한 저온영역 발광 피크의 영향을 배제하기 위하여, 본 연구에서 결정한 최적 판독 조건이 적용되었다. 최적 판독조건은, 판독 이전 가열(preheating)을 135 °C에서 10초간 실시하여 감쇠가 심한 저온 피크를 먼저 소진시킨 후 245 °C까지 선형가열을 10 °C/sec로 가열하는 것이다.

선형성 평가를 위하여, 각 선량 영역의 판독값들에 대한 규격화된 선량 응답성 함수  $f(D)$ 를 산출하였다.

## 2.3 에너지 반응도(energy response)

TL의 강도는 TLD 물질이 흡수한 에너지의 양에 비례한다. 일반적으로 물질에 방사선을 같은 선량으로 조사하였을 경우 물질이 흡수하는 에너지의 양은 조사되는 방사선의 에너지에 따라 달라진다. 그러므로 방사선 에너지에 따른 흡수계수의 변화가 중요하게 된다. 광자 조사( $\gamma$ -선, x-선)일 경우 광자 에너지 반응도  $S(E)$ 는, 기준물질(공기 또는 인체조직)과 특정 물질에 대한 질량 에너지 흡수계수(mass energy absorption coefficient)들의 비로 정의된다[5].

$$S(E) = \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{ref}} \quad (3)$$

여기서  $\mu_{en}$ 는 선형 흡수계수(linear absorption coefficient)이고  $\rho$ 는 밀도이다. 물질이 여러 가지 원소로 구성된 복합물질일 경우 위의 질량 에너지 흡수계수  $(\mu_{en}/\rho)_m$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$(\mu_{en}/\rho)_m = \sum_i (\mu_{en}/\rho)_i W_i \quad (4)$$

여기서  $W_i$  는  $i$  번째 구성 원소와 전체 구성물의 무게비이다.

질량 에너지 흡수계수는 방사선 에너지가 물질에 의해 흡수되는 과정에 관계되는데, 그 과정은 주로 쌍생성(pair production), 콤프턴 산란(Compton scattering) 및 광전효과(photoelectric effect)에 의해 일어난다. 물질에 방사선의 에너지가 흡수될 때, 위의 과정들의 기여도는 방사선의 에너지와 물질의 원자번호  $Z$  에 따라 달라진다. 물질의 원자번호가 낮을 경우 15 keV 이하의 광자에 대해서는 광전효과가, 15 keV 이상 10 MeV 이하의 광자에 대해서는 콤프턴 산란이 주된 과정이다. 물질의 원자번호가 높아지면 대략  $10^2$  keV 까지는 광전효과가 주된 과정이다.

이러한 광자 에너지 반응도는, 보통 주어진 광자 에너지(1.25 MeV  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선 또는 662 keV  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -선)에 대한 상대적 에너지 반응도(relative energy response: RER)로 나타낸다.

$$(RER)_E = \frac{S_E(E)}{S_E(1.25\text{MeV } ^{60}\text{Co})} \quad (5)$$

환경 방사선이나 의료용 방사선의 에너지 범위는 대단히 넓으므로 선량계 목적으로는 넓은 에너지 영역에서 RER이 1에 가까운 것이 바람직하다. TLD 물질의 유효원자번호(effective atomic number)가 비교적 낮을수록 RER이 1에 가까우며, 유효원자번호가 큰 TLD 물질의 경우 RER이 매우 높아지는 에너지 영역이 존재하는데, 선량계로 이용할 경우 적합한 에너지 보상 필터(energy correction filter)를 적용하여 RER을 1에 가깝게 조정하여야 한다.

LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 상대적 에너지 반응도를 조사하기 위하여, 소자를 한 그룹에 9개씩 총 6개 그룹을 준비하였다. 광자에너지 20 ~ 118 keV 영역에 대한 조사는, ANSI 기준[22]에 의해 한국원자력연구소에서 제작된 기준 x-선장[23]을 이용하였다. 상대적 에너지 반응도에 대한 기준 광자선으로 662 keV  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -선을 사용하였다.

광자에너지 20, 35, 53, 73 및 118 keV의 x-선을 5개 그룹에 동일하게  $10^{-2}$  Gy를 공기중에서 조사하였고, 나머지 1개 그룹에는 662 keV  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -선을  $10^{-2}$  Gy 조사하였다. x-선 조사에 대해서는 전자평형을 보상하기 위한 재생(buildup)물질을 사용하지 않았으며  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -선 조사에 대해서는 2 mm 두께의 PMMA 물질을 재생물질로 덮어 조사하였다.

#### 2.4 재현성(reproducibility)

이상적인 TLD 물질은 조사, 판독, 열처리로 반복되는 재사용시 판독치의 변화가 없어야 한다. 그러나 TL 물질에 따라 조사, 판독이 반복되면 물질에 가해지는 열자극이 결정내의 불순물의 배위 상태 등에 영향을 주어 발광곡선의 구조나 TL 강도가 변할 수 있다. 이는 적합한 최대 판독 온도의 설정과 판독 후 적합한 열처리 과정에 의해, 어느 정도 회복될 수 있다. 열발광선량계에 대한 IEC 표준에서는 10회 재사용시 그 변동계수(coefficient of variation)가 0.075 이하일 것을 요구하고 있다[21].

본 소자의 재현성 평가를 위하여 10개의 소자들을 준비하여 동일한 조건에서 조사, 판독 및 열처리를 소자 각각에 대하여 10회 반복하였다.

조사는  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -선장을 이용하여  $10^{-2}$  Gy 조사하였으며, 판독 조건은 135  $^{\circ}\text{C}$ 에서 10초간 판독 이전가열을 거친 후 초당 10  $^{\circ}\text{C}$ 의 선형가열율로 최대 245  $^{\circ}\text{C}$ 까지 판독하였다. 이후 판독기내에서 245  $^{\circ}\text{C}$ 에서 10초간 유지하는 열처리를 하였다.

IEC에서는 소자 각각에 대하여(each dosimeter separately) 뿐만 아니라 10개의 소자 집합으로(all dosimeter collectively) 평가를 요구하고 있다.

먼저 각각의 소자에 대하여 판독치  $E_{ji}$  를 결정하였다. 여기서  $j$  는  $j$  번째 소자를 의미하고  $i$  는  $i$  번째 조사를 의미한다.

10개의 소자 집합으로 평가를 하기 위하여, 10회의 조사에 대하여  $E_i$  의 평균  $\overline{E}_i$  와 표준편차  $\sigma_{\overline{E}_i}$  를 계산하여 변동계수를 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\frac{\sigma_{\overline{E}_i} + I_i}{\sum_{i=1}^{10} \overline{E}_i / 10} \quad (6)$$

여기서  $I_i$  는  $\sigma_{\overline{E}_i}$  의 신뢰구간(confidence interval)이다.

소자 각각에 대한 평가를 위하여, 각 소자의  $E_j$ 의 평균  $\overline{E}_j = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} E_{ji}$  와 표준편차  $\sigma_{E_j}$  를 계산하고 변동계수를 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\frac{\sigma_{E_j} + I_j}{\overline{E}_j} \quad (7)$$

여기서  $I_j$  는  $\sigma_{E_j}$ 의 신뢰구간이다.

## 2.5 선량 검출 하한(lower limit of detection : LLD)

선량 검출 하한은 측정 가능한 최소 선량을 의미하는 것으로, 문턱 측정치(detection threshold)라고도 표현된다. 저선량 영역에서는 TLD의 TL 신호와 판독 장치 자체가 가지는 잡음(noise)과 구분하기가 쉽지 않으므로 실험을 통하여 선량 검출 하한을 직접 결정하기는 매우 어려우므로, 선량 검출 하한은 조사되지 않은 소자  $n$ 개를 판독하여 구한 판독치들의 표준편차와 Student's  $t$  분포값과의 곱으로 정의하고 있다[5]. 즉 선량 검출 하한은,

$$LLD = t_n \cdot \sigma \quad (8)$$

으로 정의된다. 여기서,  $n$  은 테스트에 사용된 소자의 개수이고,  $t_n$  은  $n-1$  의 자유도에 대한 Student's  $t$  분포값이다.  $\sigma$ 는 판독치들의 표준편차이다.

LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 선량 검출 하한을 조사하기 위하여, 조사되지 않은 소자 10개와  $^{137}\text{Cs}$  v-선으로  $10^{-3}\text{Gy}$  조사된 소자 5개를 준비하였다. 먼저 조사된 소자 5개를 판독하여 판독기 보정 인자(Reader calibration factor : RCF)를 구하였다. 이 후 조사되지 않은 소자 10개를 판독하고 이 판독치들에 대하여 RCF를 적용하여 선량단위 Gy로 환산하였다. 이 판독치들의 표준편차  $\sigma$  를 계산하고 식(8)에 적용하여 선량 검출 하한을 평가하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 감도(sensitivity)

개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 TLD-100(LiF:Mg,Ti)에 대한 상대적인 감도비교에 사용된 각 소자들의 평균질량은 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL소자는 30 mg, TLD-100소자는 26 mg이었다.  $^{137}\text{Cs}$  v-선으로  $10^{-2}\text{Gy}$  조사된 이들 소자에 대한 발광량을 단위질량당 발광량으로 환산하고 평균하여

TLD-100에 대한 상대적 감도를 (1)식에 따라 산출하였다. 산출된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 감도는 28.6이었다. Fig. 1에 TLD-100과 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 발광곡선을 비교하였다. TLD-100의 발광강도가 미약하여 그래프에는 강도를 10배 증폭하여 나타내었다.

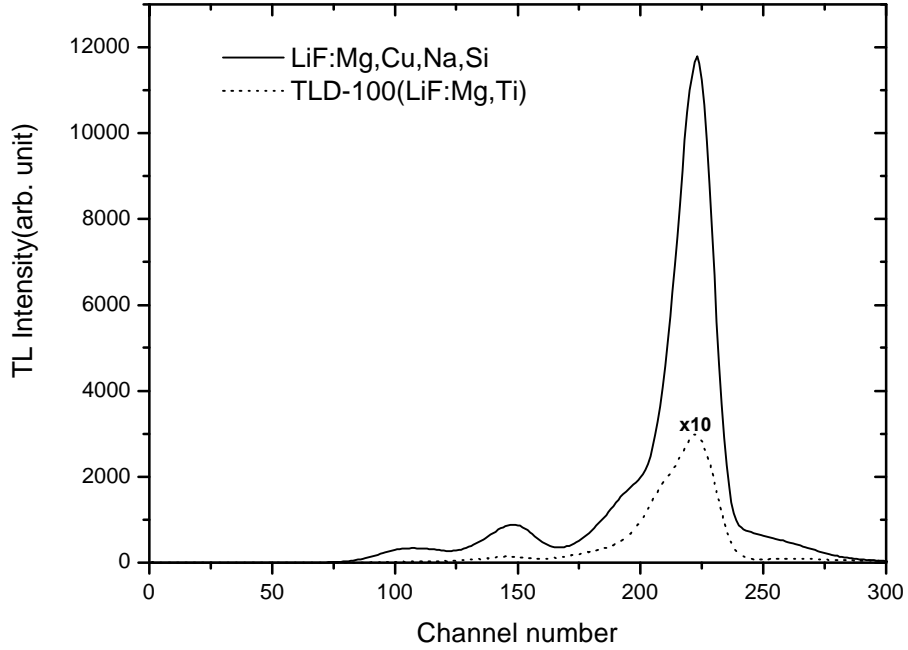


Fig. 1. The glow curves of LiF:Mg,Cu,Na,Si and TLD-100.

### 3.2 선량 응답성(dose response)

LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 선량 응답성 실험 결과를 선량에 따른 상대적 발광량 곡선으로 Fig. 2에 나타내었다.  $10^{-4}$  Gy 영역에서부터 선형성을 나타내는 것을 알 수 있으나, 더욱 정확한 선형성 평가를 위하여, 각 선량 영역의 판독치들에 대한 규격화된 선량응답성 함수  $f(D)$ 를 산출하여 Table 1과 Fig. 3에 나타내었다.  $10^{-4}$  Gy에서부터 10 Gy까지 매우 선형적이며, 10 Gy 이후 비급 선형성을 보였다.  $10^{-6}$  Gy 와  $10^{-5}$  Gy 영역에서는 선형성을 크게 벗어났다. 이것은 잔류선량 과 기기 및 소자의 백그라운드의 영향으로, 이러한 극저선량 영역에서 TL 소자를 적용하기 위해서는 CGCD(computerized glow curve deconvolution) 기법을 도입하여 주피크를 분리하거나 또는 백그라운드 및 잔류선량을 배제시키는 방법[24]이 적용되어야 한다.

Table 1. Relative dose response function  $f(D)$  of LiF:Mg,Cu,Na,Si TL detector.

Dose(Gy)	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	10	20	30
$f(D)$	1.03	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99	0.96	0.94

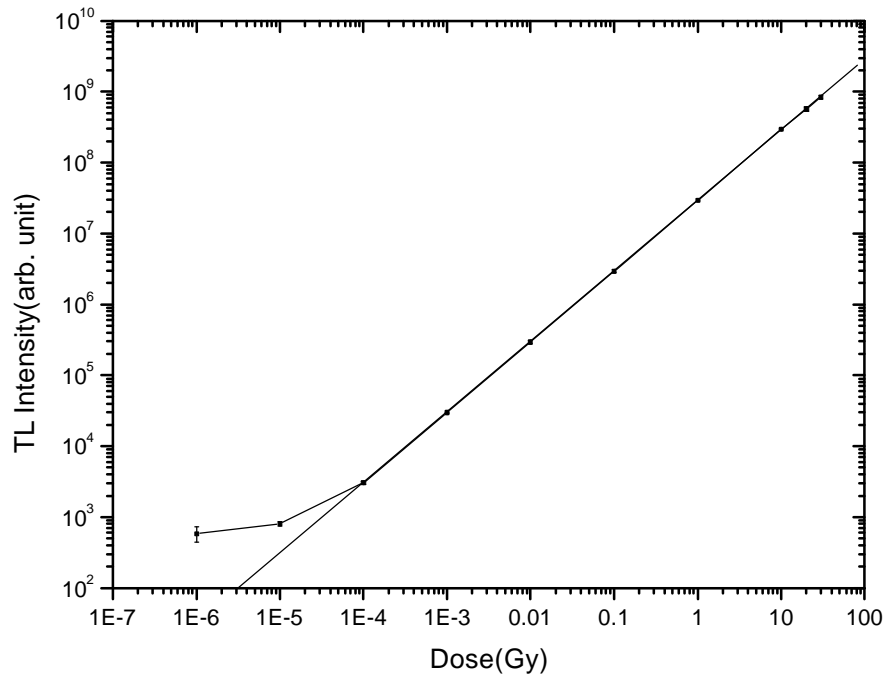


Fig. 2. Dose response of LiF:Mg,Cu,Na,Si TL detector as a function of absorbed dose.

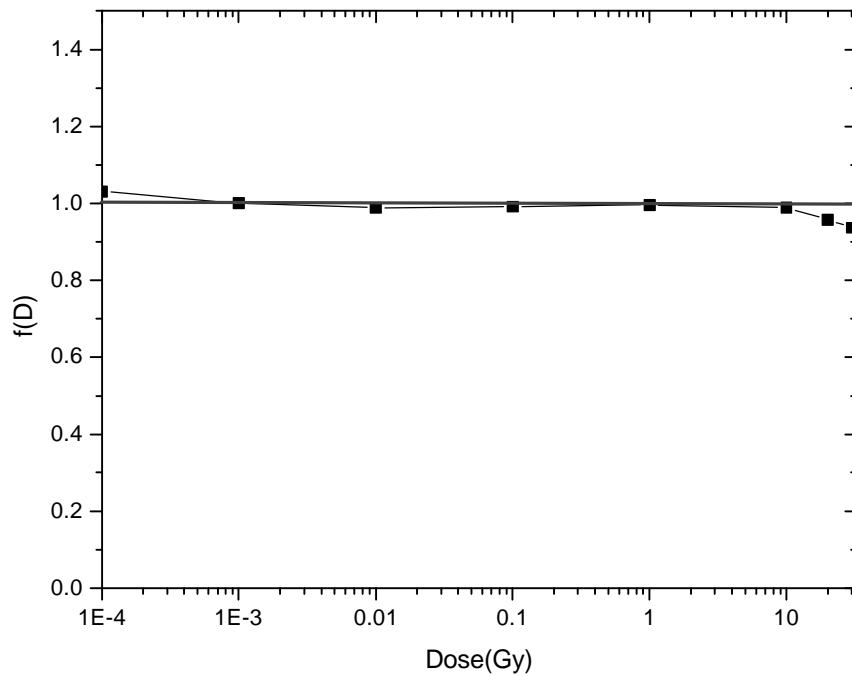


Fig. 3. Relative dose response function  $f(D)$  of LiF:Mg,Cu,Na,Si TL detector.

### 3.3 에너지 반응도(energy response)

LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 상대적 에너지 반응도를 조사한 실험 결과를 Table 2와 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구에서는 상대적 에너지 반응도의 기준 광자를 66 keV  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -선을 이용하여  $(RER)_E$ 을 산출하였다.  $(RER)_E$ 은 53 keV에서 최대값인 1.004를 보였고, 20 keV에서 최소값인 0.825를 보였다. 선량계 목적으로는 넓은 에너지 영역에서  $(RER)_E$ 이 1에 가까운 것이 바람직하나 이것은 이상적인 TLD 물질에 대한 것이다. IEC에서는  $^{137}\text{Cs}$  또는  $^{60}\text{Co}$  광자에 대한 상대적 에너지 반응도  $(RER)_E$ 이  $\pm 30\%$ 이내에 들도록 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자는 이 기준을 잘 만족하여 부파적인 에너지 보상 필터 없이 선량 평가에 직접 적용할 수 있음을 확인하였다. 한편 Fig. 4에서 비교한 것과 같이 TLD-100에 비하여 매우 우수한 에너지 반응도를 나타내었으며, LiF:Mg,Cu,P 물질에 비하여도 73 keV 및 118 keV 에너지 영역에서 더욱 향상된 에너지 반응 특성을 나타내었다.

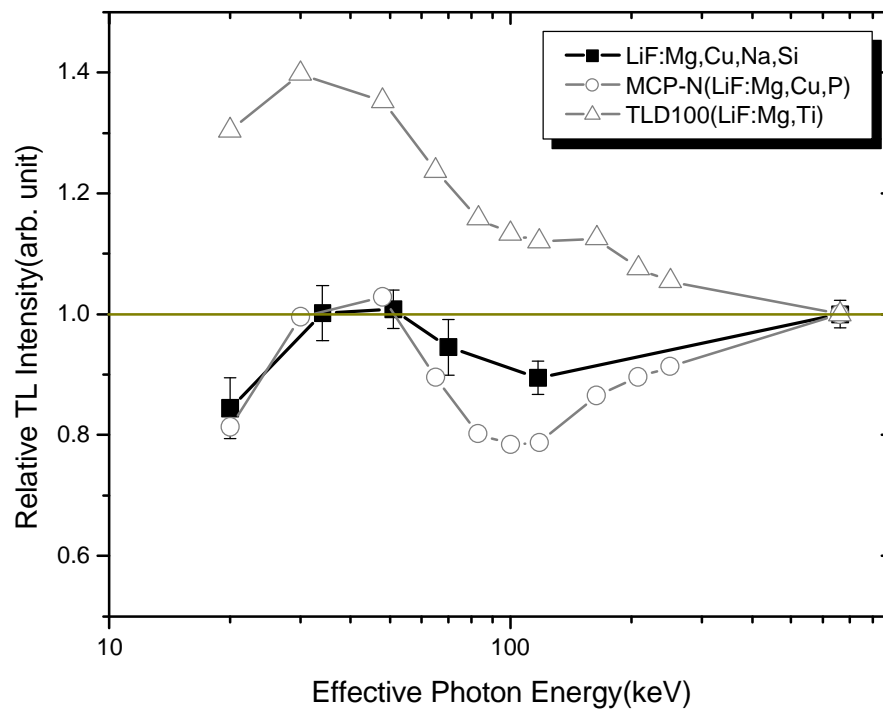


Fig. 4. Relative energy response of LiF:Mg,Cu,Na,Si TL detector.

Table 2. Relative energy response of LiF:Mg,Cu,Na,Si TL detector.

	Photon energy(keV)					
	20	35	53	73	118	662
$(RER)_E$	0.825	0.991	1.004	0.920	0.887	1.00



### 3.4 재현성(reproducibility)

본 연구에서 개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 재현성 평가를 위하여 10개의 소자들 각각을 10회씩 재사용하면서 측정치의 변화에 대한 변동계수(coefficient of variation)를, 소자 각각에 대하여(each dosimeter separately) 그리고 10개 소자 집합에 대하여(all dosimeters collectively) 계산하여 Table 3에 나타내었다. 본 소자는 소자 각각에 대하여 최대 0.01523이고 최소 0.00495였고, 소자 집합에 대하여는 0.0054로 IEC 표준을 여유 있게 만족하였다. Fig. 5에 소자 집합에 대하여, 재사용회수에 따른 TL 강도변화를 상대적으로 나타내었다.

Table 3. Reproducibility of LiF:Mg,Cu,Na,Si TL detector.

Each dosimeter separately	
Dosimeter ID	Coefficient of variation
D01	0.00894
D02	0.00497
D03	0.01523
D04	0.0046
D05	0.00731
D06	0.00866
D07	0.00859
D08	0.00891
D09	0.00495
D10	0.00964
All dosimeters collectively	
Coefficient of variation	
0.0054	

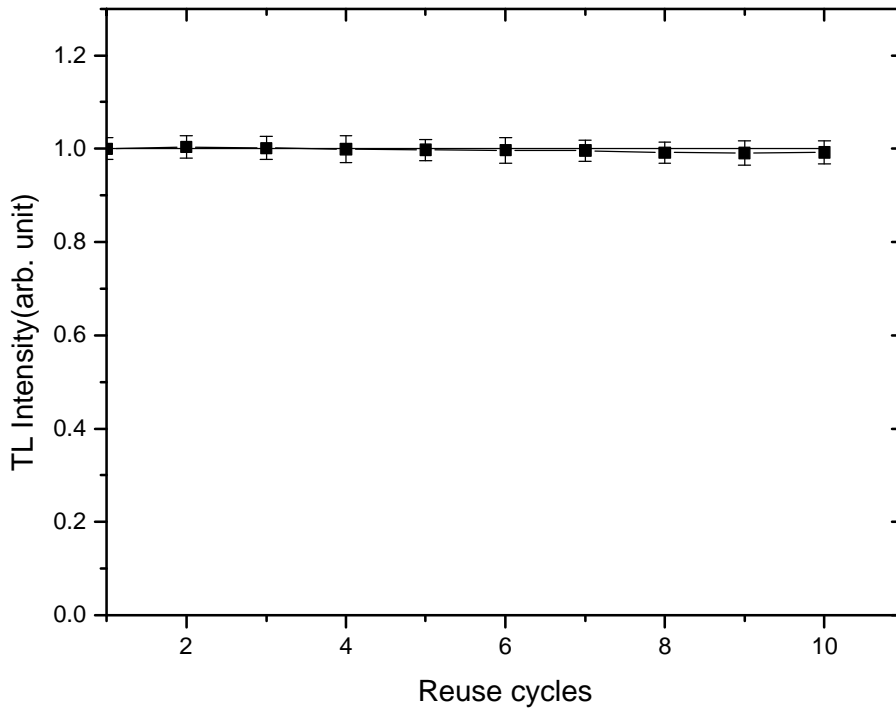


Fig. 5. Reproducibility of LiF:Mg,Cu,Na,Si TL detector.

### 3.5 선량 검출 하한(lower limit of detection : LLD)

판독기로 Harshaw 4500(Harshaw Bicon, USA)을 이용하였을 경우, (8)식 의거하여 산출된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 선량 검출 하한은 70 nGy로 조사되었다. 선량 검출 하한의 정의식인 (8)식에서, 실험에서 사용된 소자의 개수가 10개이므로  $t_n=2.26$ 이 적용되었으며,  $\sigma$  는 판독치들의 표준편차 31 nGy가 적용되었다.

최근 성능이 더욱 향상된 LiF:Mg,Cu,P TL 소자에 대한 연구[25]에 따르면, LiF:Mg,Cu,P(GR-200A) 소자의 LLD는 17 nGy로 평가되었다. 이때 사용된 판독기는 RGD-3(Solid Dosimetric Detector and Method Laboratory, China)였다. LLD는 판독기의 성능에도 매우 민감하게 작용하므로 저선량 영역에 대한 선량 평가시에는 잡음이 적고 안정된 판독기를 사용하는 것이 중요하다.

## 4. 결 론

한국원자력연구소에서 개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자의 선량계적 특성으로, 방사선에 대한 감도, 선량 응답성, 에너지 반응도, 재현성 및 선량 검출 하한을 조사하였다. 감도는 TLD-100의 약 30배로 우수한 특성을 보였으며, 선량 응답성은 저선량영역에서 잔류선량이나 백그라운드를 제거하는 방법이 적용되지 않은 상태에서  $10^{-4}$  Gy부터 선형성을 보여 10 Gy까지 매우 우수하였고 그 이상의 선량에서는 비급선형성(sublinearity)을 보였으나, IEC 표준에서 요구하는 선형성 기준에 의하면 30 Gy까지 선형적인 선량응답성을 가지는 것으로 평가되었다. 에너지 반응도는  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -

선 광자에 대한 상대적 에너지 반응도로 53 keV에서 최대값인 1.004를 보였고 20 keV에서 최소값인 0.825를 보여 LiF:Mg,Cu,P 물질에 비하여 73 keV 및 118 keV 에너지 영역에서 더욱 향상된 에너지 반응 특성을 나타내었다. IEC 표준에서는  $^{137}\text{Cs}$  또는  $^{60}\text{Co}$  광자에 대한 상대적 에너지 반응도가  $\pm 30\%$  이내를 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자는 이 기준을 충족하여 부가적인 에너지 보상 필터 없이 선량 평가에 직접 적용할 수 있음을 확인하였다. 재현성은 10회 재사용시 동일선량에 대한 TL 발광량들의 변동계수가 0.0054로 매우 우수하였다. 선량 검출 하한은 Harshaw 4500 TLD 관독기로 관독할 경우 70 nGy로 조사되어 환경선량 수준의 매우 낮은 선량 영역에서도 적용이 가능함을 확인하였다.

이상에서와 같이 본 연구에서는, 개발된 LiF:Mg,Cu,Na,Si TL 소자에 대한 선량계적 특성을 조사하여 개인피폭선량, 환경선량 및 의료용 방사선량 측정용으로 사용할 수 있는 수준의 기반을 마련하였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력실용화 연구사업의 일환으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- [1] S. W. S. McKeever, *Thermoluminescence of Solids* (Cambridge University Press, Cambridge, 1985)
- [2] K. Mahesh, P. S. Weng and C. Furetta, *Thermoluminescence in Solids and Its Applications* (Nuclear Technology Publishing, England, 1989)
- [3] Daniels, F., Boyd, C. A. and Saunders, D. F., *Science* **117**, 343 (1953)
- [4] J. R. Cameron, N. Suntharalingham, and G. N. Kenney, *Thermoluminescence Dosimetry* (Univ. of Wisconsin Press, Madison, 1968)
- [5] S. W. S. McKeever, M. Moscovitch and P. D. Townsend, *Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses* (Nuclear Technology Publishing, England, 1989)
- [6] T. Nakajima, Y. Murayama, T. Matsuzawa and A. Koyano, *Nucl. Instrum. Meth.* **157**, 155 (1978)
- [7] T. Nakajima, Y. Murayama and T. Matsuzawa, *Health Physics* **36**, 82 (1979)
- [8] Wang Shoushan, Chen Guolong, Wu Fang, Li Yuanfang, Zha Ziyong and Zhu Jianhuan, *Radiat. Prot. Dosim.* **14**, 223 (1986)
- [9] M. P. R. Waligorski, P. Olko, P. Bilski, M. Buzanowski and T. Niewiadomski, *Radiat. Prot. Dosim.* **47**, 53 (1993)
- [10] S. Wang, G. G. Cai, Y. Wang and S. Wang, *Radiat. Prot. Dosim.* **65**, 211 (1996)
- [11] S. S. Shinde, B. S. Dhabekar, T. K. Gundu Rao and B. C. Bhatt, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34**, 2683 (2001)
- [12] A. J. J. Bos, K. Meijvogel, J. Th. M. de Haas, P. Bilski and P. Olko, *Radiat. Prot. Dosim.* **65**, 199 (1996)
- [13] F. D. G. Rocha, L. V. E. Caldas, *Applied radiation and isotopes: including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry, and medicine* **50**, 769 (1999)

- [14] U. A. Fill, D. F. Regulla, Applied Radiation and Isotopes: Incorporating Nuclear Geophysics **49**, 791 (1998)
- [15] S. L. Dong, T. C. Chu, G. Y. Lan, T. H. Wu, Y. C. Lin and J. S. Lee, Applied radiation and isotopes: including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry, and medicine **57**, 883 (2002)
- [16] 도시홍, 추민철, 정운혁, 김현자, 김도성, 강영호, 응용물리 **2**, 425 (1989)
- [17] 강희동외, *TLD 방사선 센서 및 관독장치의 개발*, 센서기술연구소 (1994)
- [18] 남영미, 정운혁, 이대원, 도시홍, 이종환, 김기동, Sae Mulli, **37**, 319 (1997)
- [19] 남영미, 김장렬, 장시영, 김기동, Ungyong Mulli, **11**, 578 (1998)
- [20] 이정일, 김장렬, 양정선, 장시영, 김봉환, 남영미, 대한방사선방어학회 2002년 춘계학술발표회 논문집, (2002)
- [21] IEC(International Electrotechnical Commission) International Standard, *Thermoluminescence dosimetry systems for personal and enviromental monitoring* (IEC, 1991)
- [22] ANSI(American National Standards Institute), American National Standard for Dosimetry - Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing-Draft, ANSI N13.11 (1993)
- [23] 장시영외, *방사선 방어 및 측정기술 개발*, 한국원자력연구소 KAERI/RR-1739/96 (1996)
- [24] A. Delgado, J. M. Gomez Ros and J. L. Muniz, Radiat. Prot. Dosim. **60**, 147 (1995)
- [25] W. Shen, K. Tang, H. Zhu and B. Liu, Radiat. Prot. Dosim. **100**, 357 (2002)