

# Design of a Badge Filter System for Measurement of Hp(10) with the New Type of TL Dosimeter CaSO<sub>4</sub>:Dy,P

H. K. Kim · J. W. Kwon · J. K. Lee and J. L. Kim\*

Dept. of Nuclear Engineering, Hanyang University  
\*Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI)

## 신형 TL 선량계인 CaSO<sub>4</sub>:Dy,P를 이용한 Hp(10) 측정용 배지의 필터체계 설계

김현기 · 권정완 · 이재가 · 김장렬\*

한양대학교 원자력공학과, 한국원자력연구소\*

(2002년 12월 27일 접수, 2003년 4월 18일 채택)

**Abstract** - This study was intended to estimate Hp(10) recommended by the ICRU using the CaSO<sub>4</sub>:Dy,P element developed in the KAERI. For the estimation of Hp(10), TL response should be compensated properly through the energy range using filter materials since CaSO<sub>4</sub>:Dy,P is of severe photon energy dependent response. Various experiments and computations using Monte Carlo Code were carried out for designing filter satisfying the performance requirements of the ISO related to TL dosimeter. Under the completed filter, the relative response of CaSO<sub>4</sub>:Dy,P showed 0.75~1.0 for photons in the range of 20~662 keV. Especially it was possible to reduce the thickness of front filter and simplify the filter combination with rear filter of larger diameter and to considerably improve angular dependence by introducing taper to the filter.

*Key words: thermoluminescence dosimeter, personal dosimeter, CaSO<sub>4</sub>, Hp(10), energy dependence, angular dependence*

**요약** - 한국원자력연구소에서 개발한 CaSO<sub>4</sub>:Dy,P를 이용하여 ICRU에서 권고하는 Hp(10)을 평가하고자 하였다. CaSO<sub>4</sub>:Dy,P는 광자에 대하여 높은 에너지 의존성을 지니므로 Hp(10) 평가를 위해서는 필터물질을 이용하여 모든 에너지에 대하여 반응도를 적절히 보상하여야 한다. ISO에서 권고하는 열형광선량계의 성능요건을 만족하는 필터설계를 위해 몬테칼로 코드를 이용한 이론적 계산과 검증 실험을 수행하였다. 완성된 필터 하에서 CaSO<sub>4</sub>:Dy,P 소자는 20~662 keV에 이르는 광자 에너지 범위에서 0.75~1.0의 상대반응도를 보였다. 특히 직경이 큰 후방필터를 설계함으로써 전방필터의 두께를 감소하고 필터 조합을 단순화하였으며 테이퍼를 도입하여 선량계의 방향의존성을 대폭 개선할 수 있었다.

중심어 : 열형광선량계, 개인선량계, CaSO<sub>4</sub>, Hp(10), 에너지 의존성, 방향의존성

## 서 론

국제방사선단위측정위원회(ICRU)[1,2]는 개인감시 목적의 실용량으로 심부선량 Hp(10)을 권고하고 있으며 이 양은 팬텀에 부착한 선량계를 이용하여 측정할 수 있는 양이다. 개인선량계로 사용되는 여러 유형의 TL(thermoluminescent) 물질들 중  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ 는 조직등가성 측면에서는 단점이 있으나 광자에 대하여 높은 민감도, 간단한 글로우 곡선 그리고 낮은 감응퇴행 특성으로 인해 종종 사용되는 TL 물질이다[3-10]. 최근 한국원자력연구소 김두영 등[11,12]은 인(P)을 접착매질로 사용한  $\text{CaSO}_4:\text{Dy,P}$ (KCT-300; KAERI calcium-sulphate thermoluminescence dosimeter)를 개발하였으며 민감도 등 선량계측학적 특성이 Teledyne 사의  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ 보다 우수한 것으로 평가되고 있다[11-13].

$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  기반 TL물질은 인체 조직과 비교할 때 상대적으로 높은 밀도와 원자번호를 지닌 물질로 구성됨에 따라 150 keV 이하의 저에너지 광자에 대하여 과대반응을 보인다[3-10]. 따라서 KCT-300 소자를 Hp(10)의 측정목적으로 사용하기 위해서는 적절한 보상수단을 통해 광자의 에너지에 대한 반응차이를 완화시킬 필요가 있다. 이러한 반응도 보상의 일반적인 기법은 필터를 장착하는 것으로서 필터의 재료, 두께 및 크기, 형태 등을 적절하게 선택하거나 조절할 필요가 있다[4-10,16]. 또한 입사방사선에 대하여 선량계가 전면에서 근사한 방향으로 노출되지 않더라도 선량계 반응도의 방향 의존성이 용인할 수 있는 범위에 있도록 하는 고려가 필요하다.

사용되는 TL 개인선량계 배지의 경우 통상 2개 내지 4개의 TL 소자와 적절한 필터 조합을 이용하여 심부선량 Hp(10)과 피부선량 Hp(0.07)을 측정하도록 설계되어 있다[4-10,14-16]. 선량계 배지의 설계과정은 필터는 물론 판독값을 개인선량당량으로 환산하는 알고리즘을 포함하므로 선량평가 알고리즘을 단순화할 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다. 본 논문은 몬테칼로 방사선 수송에 의한 해석과 실험을 통해 새로운 유형의 TL 물질인 KCT-300 선량계로 심부선량 Hp(10)을 용이하게 측정할 수 있는 배지를 개발하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### TL 소자

$\text{CaSO}_4:\text{Dy,P}$ 는  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ 에 기반한 신형 TL 물질로서 10 mol %의 P를 접착매질로 첨가한 것이며 KCT-300은 이를 직경 4.5mm, 두께 0.4mm인 원판으로 성형한 제품이다. KCT-300의 조성은 표1에 주었으며 글로우 곡선, 반응감도, 감응퇴행 등 소자의 선량계적 특성은 참고문헌[11-13]에서 찾아볼 수 있다.

Table 1. Composition and dimension of KCT-300 TL dosimeter.

TL Material	Composition	Properties
$\text{CaSO}_4:\text{Dy,P}$ (KCT-300)	Ca: 27.91 wt %	Diameter: 4.5mm
	S : 22.33 wt %	Thickness: 0.4mm
	O : 47.38 wt %	Density: 1.97mg/cm <sup>3</sup>
	P : 2.16 wt %	
	Dy: 0.23 wt %	

### 필터의 설계 절차

ISO는 Hp(10) 평가를 위해 15 keV~3 MeV의 광자 에너지 범위에서 TL 반응도는  $\pm 30\%$  이내의 요건을 만족할 것을 권고하고 있다[17]. 따라서 그림1과 같은 절차를 통해 제어 가능한 필터의 변수를 조절하여 KCT-300 소자의 반응도를 관찰함으로써 ISO의 요건을 만족하는 필터를 설계하고자 하였다. 설계과정에서 반응도는 계산과 실험을 통해 획득한 각 에너지에서의 흡수선량 및 TL 출력을 부여한 심부선량으로 나눈 다음,  $^{137}\text{Cs}$  감마선의 반응도에 정규화하였다. 필터의 재료로 고려할 수 있는 물질은 다양하나 양질의 재료 확보 및 가공 용이성, 가격, 상용 선량계에 사용 현황을 참조하여 납, 주석, 구리, 알루미늄, ABS 수지(배지 본체 소재이기도 함)만을 고려하였다. 현재의 선량평가 대상이 되는 방사선장은 광자와 전자에 한정되므로 카드뮴과 같은 중성자용 필터는 고려하지 않았다.

### 실험적 반응도 측정

KCT-300 소자의 광자 에너지에 따른 반응도 측정을 위한 방사선 조사는 한국원자력연구소의 기준 방사선장에서 소자를 자유공기 상태와  $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ 의 PMMA(polymethyl methacrylate) 팬텀에 부착한 상태에서 노출함으로써 이루어졌다. 이 방사선장은 ANSI-N13.11[18]에서 제공하는 표준 NIST X-ray 빔을 소급하는 X-ray와  $^{137}\text{Cs}$  감마선원으로 구성된다. 필터를 장착하지 않는 KCT-300 소자를 자유공기 상태에서 노출시킨 반응도와 팬텀에 부착하여 노출시킨 반응도의 비교

를 통해 후방산란 반응특성을 파악하였다. 이 결과는 필터설계 과정에서 해석을 돕고 소자의 후방 필터설계 시에 고려된다.

그림1의 절차를 진행하는 동안 이론적으로 잠정 설계된 결과에 따라 배지를 제작한 후 동일한 조사환경에 노출시킴으로써 반응도를 실험적으로 확인하였다. 조사된 KCT-300 선량계의 판독에는 Teledyne 300 수동식 판독기가 사용되었다.

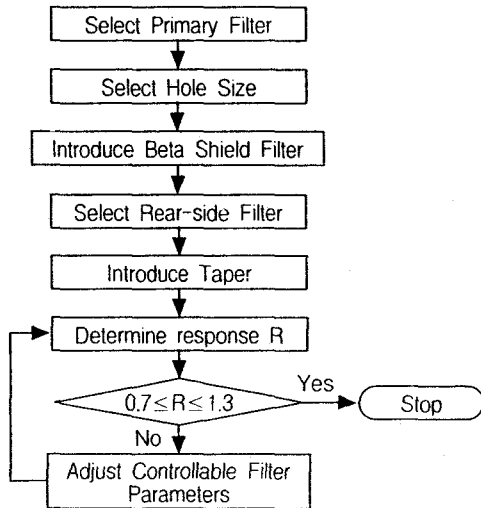


Fig. 1. Flow chart of filter design. Parameter adjustment stops when the response R is well within the test criteria.

**몬테칼로 모사**

변수의 변화에 따른 선량계 반응의 변화를 실험적으로만 얻고자 하는 것은 많은 시간과 비용을 초래하므로 몬테칼로 계산을 통해 변수조정

필요한 반응자료를 획득하였다. MCNP4B 코드 [19]가 ENDF/B-VI 단면적과 함께 사용되었으며 감응의 계상에는 MCNP 계산자(taiiy) \*F6를 이용한 커마 근사를 사용하였다. 여기에는 TL 출력이 선량계의 흡수선량에 비례한다는 가정이 내포된다.

**결과 및 분석**

**광자에 대한 KCT-300의 팬텀 후방산란인자**

KCT-300을 자유공기 상태와 팬텀에 부착한 후 4.38 mGy의 공기 커마에 조사하였을 때 광자의 에너지에 따른 TL 출력, 결정된 후방산란인자 그리고 ANSI에서 제공하는 평판형 PMMA 팬텀 [18]에서의 후방산란인자를 표2에 제시하였다. 표 2의 후방산란인자는 소자의 후방 필터를 조절함으로써 51~117 keV의 광자에 의한 반응도를 적절히 보상할 수 있음 암시한다. 또한 70 keV 이상의 광자의 경우 본 실험에서 획득한 후방산란인자 값이 ANSI에서 제공하는 값보다 높게 나타나는 것은 KCT-300의 유효원자번호가 PMMA보다 높음으로 인해 후방산란되는 광자를 보다 잘 흡수하기 때문이다.

**Hp(10) 평가를 위한 필터설계**

MCNP 계산값의 보정: 그림2에서 보인 것처럼 필터를 두지 않았을 때 KCT-300의 상대 반응도는 실험치와 몬테칼로 계산결과가 거의 일치하였으나, KCT-300의 앞뒤에 납이나 구리필터를 둔 경우(그림3)에는 에너지에 따라 차이를 보였다. 이러한 불일치의 원인은 실험과 모사환경에서 불가피하게 유발되는 필터와 소자간의 기하학적 배열의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구

Table 2. Response of KCT-300 to photons of different energies and the resulting backscatter factors.

ANSI Beam Code	Avg. Energy [keV]	TL Intensity		Backscatter Factor		ANSI
		Free-In-Air	On Phantom	This Study		
				Measured	Calculated	
M30	20	1131900	1186415	1.05±0.02	1.09	1.09
M60	34	1404840	1957795	1.39±0.05	1.36	1.37
M100	51	1338840	2206607	1.65±0.04	1.66	1.63
M150	70	898631	1655905	1.84±0.02	1.81	1.72
H150	117	334257	703425	2.10±0.05	1.99	1.55
<sup>137</sup> Cs	662	176183	195041	1.11±0.03	1.14	1.10

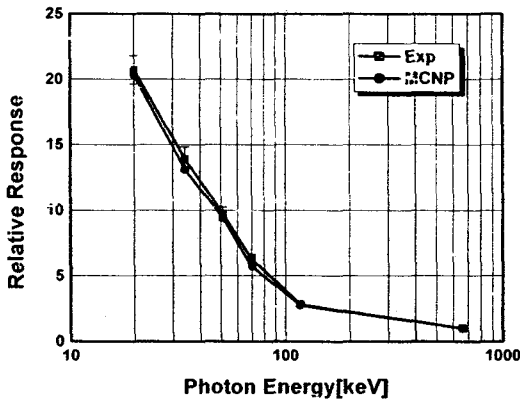


Fig. 2. Calculated and measured responses of bare KCT-300.

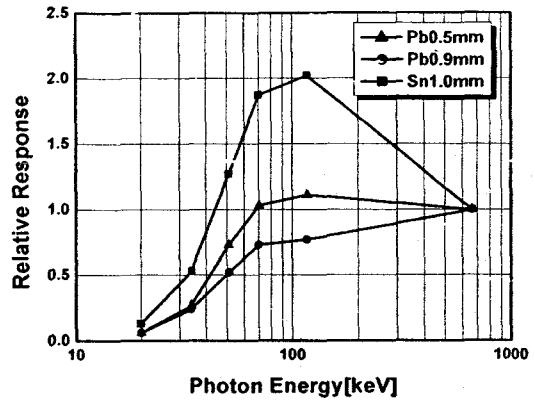


Fig. 4. Role of Pb or Sn filter. The rear filter is a Cu of 1mm thick and 10mm in diameter.

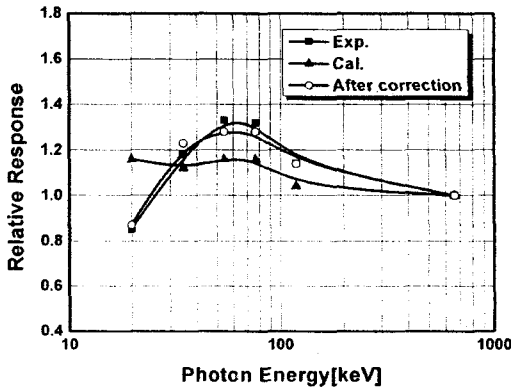


Fig. 3. Calculated, measured and corrected responses with some metal filters.

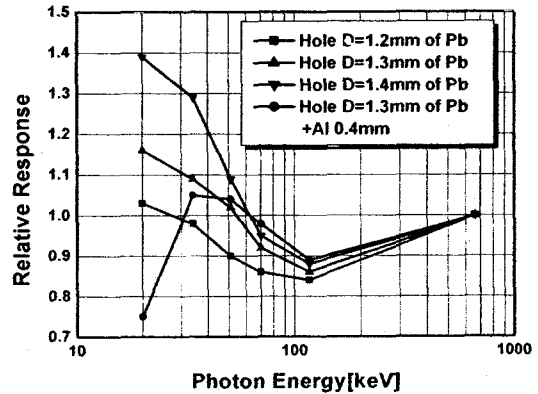


Fig. 5. Role of hole and Al filter. The primary filter is a 0.9mm Pb. The rear filter is the same as in Fig. 4.

에서는 적절한 보정인자를 계산값에 적용함으로써 이후 실험에서의 반응도를 예측하고자 하였다. 보정인자는 광자 에너지의 함수로서 납필터와 구리필터에 대한 평균값을 채택하였으며 교정을 수행한 후 계산값과 실험치는 그림3에 도시한 것 과 같이  $\pm 5\%$  이내에서 일치하였다.

주필터의 설계: 그림2에서와 같이 117 keV 이하의 에너지에서 KCT-300 소자의 과도한 과대반응을 보상하기 위해 주필터로 재질과 두께가 다른 여러 필터를 선택하여 상대 반응도를 계산하였다. 그림4에 회합하는 바와 가까운 상대 반응도를 보인 몇 경우를 도시하였다. 그러나 그림4에서 보듯이 주필터의 도입으로 60 keV 이하의 에너지에서 상대 반응도가 지나치게 감소하였다. 이러한 문제는 주필터에 작은 구멍을 설계하여 저 에너지 광자가 투과할 수 있도록 한 후 구멍의 직경 조정

을 통해 KCT-300 소자에 도달하는 저 에너지 광자의 양을 조절함으로써 해결할 수 있다. 주필터에 구멍의 도입은 보다 높은 에너지에서의 반응도 또한 약간의 증가를 의미하므로 그림4로부터 0.9mm 두께를 지닌 납을 주필터로 선정하였다.

주필터에 배치할 구멍의 크기를 결정하기 위한 몬테칼로 계산결과를 그림5에 보였다. 그림5에서와 같이 주필터에 도입된 구멍의 크기가 증가할수록 60 keV 이하의 광자의 상대 반응도는 대폭 개선되는 반면 그 이상의 에너지에서는 구멍의 크기에 상대적으로 영향을 덜 받음을 알 수 있다. 구멍의 직경이 1.2mm 또는 1.3mm일 때 전체적인 상대 반응도는 만족할만한 범위에 있으나 향후 베타-광자 혼합장에서의 선량계로서의 사용을 위해서는 베타선을 차단하기 위한 필터가 부가되어야 한다. 따라서 1.3mm의 직경을 지닌 구멍이 보다 적합하다.

베타-광자 혼합장에서 베타선의 기여분을 제거하여 KCT-300 소자가 순수하게 광자에만 반응도록 하기 위해 고안된 배지 전방부의 최고 2.7mm 두께의 ABS 수지와 0.4mm 두께의 알루미늄 필터는 <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y에서 방출되는 베타선을 98% 이상 차폐하는 것으로 계산되었다. 베타선 차폐를 위해 부가된 필터로 인해 변화된 KCT-300 소자의 반응도를 그림5에 보였다. 알루미늄 필터가 도입됨에 따라 34 keV 이하의 저 에너지 광자의 상대 반응도가 감소하였으며 20 keV 광자에 대한 상대 반응도는 0.75를 나타냈다.

후방 필터의 역할: 후방 필터는 표2에 보인 후방 산란선 기여분을 감소시켜 KCT-300 소자의 반응도를 보상하기 위해 설계되며 1차 광자의 에너지보다 낮은 에너지를 지닌 산란 광자에 대한 것이므로 구리를 필터로 선정하였다. 그림6에 직경이 서로 다른 1mm 두께의 구리 후방필터를 배치한 경우 상대 반응도의 변화를 도시하였다. 그림에서 보듯이 구리 후방필터의 크기가 직경 10mm 내지 13mm 일 때 51~117 keV 영역의 상대 반응도가 비교적 평탄해지고 있다. 이 결과를 검증하기 위해 직경 1.3mm 구멍을 지닌 0.9mm 납필터와 0.4mm 알루미늄 필터를 KCT-300 소자의 전방에 두고 후방에 두께 1mm, 직경 13mm의 구리 필터를 둔 설계에 대해 상대 반응도를 실험으로 측정하였다. 그 결과를 그림6에 점선으로 도시하였으며 계산을 통한 설계치와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

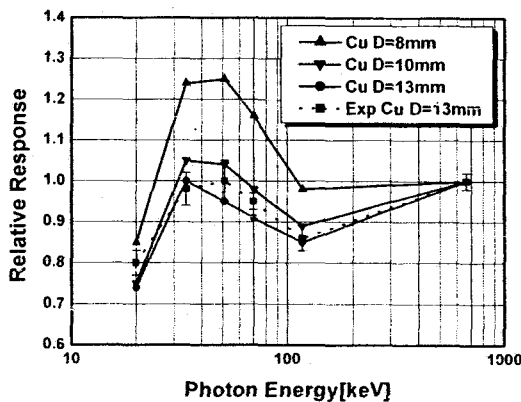


Fig. 6. Changes of relative responses by rear filter size. The primary filter is a 0.9mm Pb with a hole of 1.3mm diameter followed by a 0.4mm Al. The rear filter is a Cu of 1mm thick.

**선량계의 방향 의존성**

선량계의 방향 의존성을 개선하기 위해 앞서 결정된 납 주필터의 구멍에 45°와 60° 각도를 지닌 테이퍼(taper)를 도입했을 때 KCT-300 소자의 반응도를 테이퍼가 없을 경우와 함께 그림7에 보였다. 테이퍼를 도입함에 따라 주필터의 두께가 얇아지는 부분이 형성되므로 테이퍼의 각도가 커질수록 54~117 keV 영역의 광자의 반응도가 증가하게 된다. 그림4에서 관찰할 수 있듯이 51~117 keV 영역의 광자의 반응도는 납필터의 두께에 의존하는 반면 51 keV 미만의 광자의 반응도는 주로 구멍의 크기에 의존하므로 테이퍼 도입에 의한 영향을 거의 받지 않음을 그림7로부터

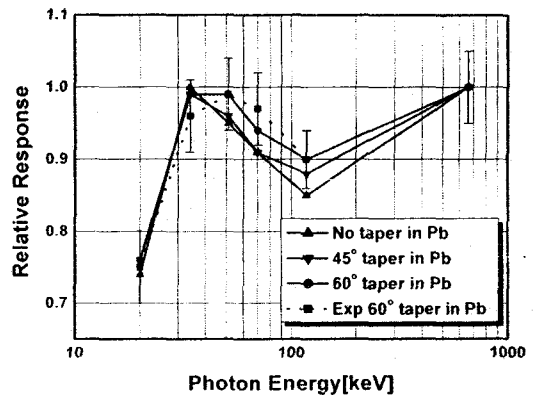


Fig. 7. Changes of relative responses according to taper introduction in the primary filter. The front filters are the same as in Fig. 6. The rear filter is a Cu of 1mm thick and 13mm in diameter.

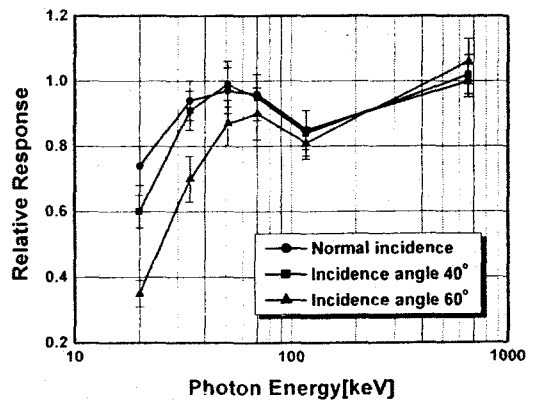


Fig. 8. Angular dependence with 45° tapered hole in the primary filter. The front and rear filters are the same as in Fig. 7.

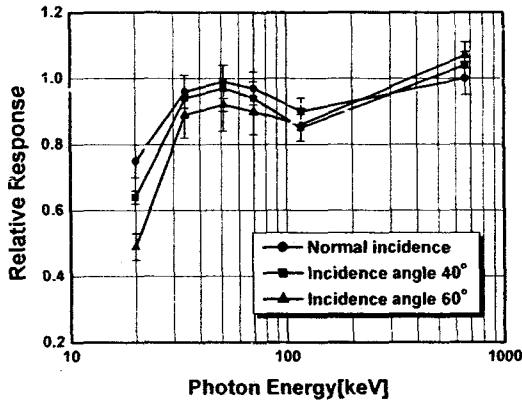


Fig. 9. Angular dependence with 60° tapered hole in the primary filter. The front and rear filters are the same as in Fig. 7.

알 수 있다. 또한 그림7에서 보듯이 60° 각도의 테이퍼를 둔 납 주필터를 사용한 경우, 상대 반응도의 측정치는 설계치와 상대오차 3% 내에서 일치하였다.

그림8과 9는 45°와 60° 각도의 테이퍼(taper)를 지닌 필터 조합에서 빔의 입사방향에 따른 KCT-300 소자의 반응도 측정치를 도시한 것으로, 특히 20~34 keV 광자의 방향 의존성이 테이퍼 각도가 60° 일 경우에 더욱 개선되고 있음을 알 수 있다. 이와 함께 고에너지 광자의 반응도 증가를 고려하여 60°의 테이퍼를 주필터에 도입하였다.

## 결론 및 논의

최근 개발된  $\text{CaSO}_4\text{:Dy,P}$  TL 선량계인 KCT-300 소자를 이용하여 ICRU에서 권고하는 Hp(10)을 평가할 수 있도록 에너지 보상을 위한 필터를 이론적으로 설계하고 실험을 통해 검증하였다. 본 연구를 통해 설계된 필터의 기하학적 배치와 개요를 그림10에 보였다.

완성된 필터 시스템에서 KCT-300 소자는 20~662 keV에 이르는 광자 에너지 범위에서 0.75~1.0의 상대반응도를 나타냈다. 이는 그림10의 완성된 필터 시스템에 장착된 KCT-300 소자의 성능이 ISO에서 권고하는 개인 선량계의 성능요건을 만족함을 의미하는 것이다. 특기할 사항으로 전방필터 보다 큰 직경을 지닌 후방필터를 설계함으로써 34 keV 이상의 에너지를 지닌 광자의 후방산란선 기여를 상당부분 감쇄하여 선량계의

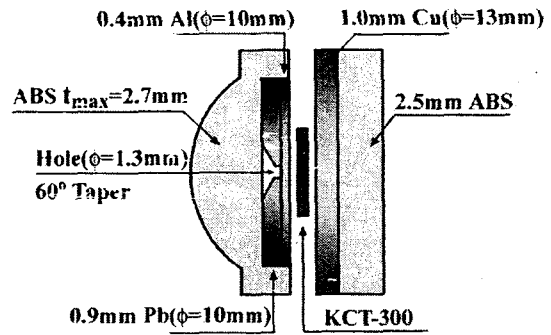


Fig. 10. A schematic diagram of the final filter combination for estimating Hp(10).

에너지 의존성을 개선할 수 있었다. 이로써 전방필터의 두께를 줄이고 필터조합을 단순화하는 결과를 낳았으며 부차적으로 선량계의 방향 의존성을 향상하고 보다 안정적인 반응도를 확보할 수 있었다. 또한 1차 필터에 60° 각도의 테이퍼(taper)를 지닌 구멍의 도입으로 60° 각도로 입사하는 빔에 대하여 34 keV 이상의 광자의 상대반응도를 0.85 이상으로 대폭 개선하였다. 필터 후방에서의 상대 반응도를 예측함에 있어서 몬테카를로 방사선 수송해석 기법은 교정인자를 도입하여 보완함으로써 다양한 설계에 대한 선량계 반응을 성공적으로 예측하는 수단이 되었다.

본 연구는 TL 선량계 배치에 배치되는 복수의 측정영역 중 가장 중요한 심부선량 Hp(10)을 측정하기 위한 필터 시스템의 설계에 한정하고 있다. 배타선 등 투과력이 약한 방사선 피폭에서는 피부선량, 즉 Hp(0.07)의 측정이 이루어져야 한다. 따라서 심부선량 측정용 TL 소자와는 별도의 소자를 도입하여 Hp(0.07)을 측정할 수 있는 필터 시스템을 추가하여야 한다. 여기서는 M30과 같은 연질X선과 고 에너지 광자의 혼합장으로부터 배타와 고에너지 광자의 혼합장을 효과적으로 구분할 수 있는 필터 설계가 요구된다.

## 참고 문헌

1. ICRU, *Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations*, International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 47(1992).
2. ICRU, *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*, International Commission

- on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 51(1993).
3. K. E. Luftschmid, "TLD Personnel Monitoring Systems-The Present Situation," *Radiat. Protect. Dosim.*, 2, 1, 3-12(1982).
  4. J. F. Boas, L. J. Martin, J. F. Mika, A. Murray and J. G. Young, "Development of an Austrian TLD Personal Monitoring Badge Based on CaSO<sub>4</sub>:Dy," *Radiat. Protect. Dosim.*, 6, 1-4, 290-292(1984).
  5. A. R. Lakshmanan, K. L. Popli and R. K. Kher "Photon Energy Dependence of CaSO<sub>4</sub>:Dy TLD under Different Metal Filters in Terms of the New ICRU Quantities," *Radiat. Protect. Dosim.*, 28, 4, 273-276(1989).
  6. K. G. Vohra, R. C. Bhatt, B. Chandra, A. S. Pradhan, A. R. Lakshmanan and S. S. Shastry, "A Personnel Dosimeter TLD Badge Based on CaSO<sub>4</sub>:Dy Teflon TLD Discs," *Health Phys.*, 38, 193-197(1980).
  7. A. S. Pradhan, S. P. Gambhir, P. H. Patel, R. C. Bhatt, and S. J. Supe, "Dose Equivalent Response of a TLD Badge-Influence of Body Backscatter," *Health Phys.*, 59, 2, 299-304 (1990).
  8. A. R. Lakshmanan, K. L. Popli and R. K. Kher "Estimation of Ambient Dose Equivalent from Environmental Radiation Using a CaSO<sub>4</sub>:Dy Thermoluminescence dosimeter," *Radiat. Protect. Dosim.*, 32, 2, 127-130(1990).
  9. I. M. Rayes and T. G. Stoebe, "Personnel Dosimetry Badge System for Mixed Radiation Fields Based on Teflon-embedded CaSO<sub>4</sub>:Dy TLD Material," *Radiat. Protect. Dosim.*, 32, 1, 5-13(1990).
  10. A. S. Klotz, C. R. Palmer and B. Kreiling, "Gamma and X-ray Response of the Teledyne Isotopes PB-3 Whole-Body Dosimeter," *Health Physics Society Annual Meeting, Baltimore, Maryland, June 19-24(1983).*
  11. 김두영, 양정선, 김장렬, 이정일, 김봉환, 장시영, "신 TL 물질 CaSO<sub>4</sub>:Dy,P(KCT-300) 소자의 개발," 2001 한국원자력학회 춘계학술발표회 (2001).
  12. 양정선, 김두영, 김장렬, 이정일, 남영미, 장시영, "CaSO<sub>4</sub>:Dy 분말의 제조 및 TL 특성," 2001 한국 원자력학회 춘계학술발표회(2001).
  13. 한국원자력연구소, 방사선방호 실용량 평가, KAERI/PR-2019/99, 47-74(1999).
  14. R. A. Tawil, T. Olhalber and B. Rathbone, "Experiences and Performance of the Harshaw Dosimetry System at Two Major Processing Centers". *Radiat. Protect. Dosim.*, 66, 1-4, 37-44(1996).
  15. M. Moscovitch, "Dose Algorithms for Personal Thermoluminescence Dosimeter," *Radiat. Protect. Dosim.*, 47, 1, 373-380(1993).
  16. J. C. Liu, C. S. Sims and A. B. Ahmed, "A Proposed Four-Element Neutron-Photon-Beta Thermoluminescence Dosimeter," *Health Phys.*, 63, 3, 316-323(1992).
  17. ISO, *Thermoluminescence Dosimetry for Personal and Environmental Monitoring*, International Organization for Standardization, ISO/DP 8034(1985).
  18. ANSI, *Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing*, American National Standards Institute, ANSI N13.11(1995).
  19. LANL Group X-6, *MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4B*, Los Alamos National Laboratory, LA-12625-M(1997).