

# 열형광선량계 및 화학선량계를 이용한 방사선 조사실의 방사선량 평가

문성애, 홍경애, 박재우

제주대학교 방사선응용과학연구소

## The radiation dose evaluation of the irradiation facility using the TLD and chemical dosimeter

Seong-Ae Moon, Kyung-Ae Hong  
and Jae-Woo Park

*Applied Radiological Science Research  
Institute, Cheju National University  
Jeju, Korea*

### Abstract

The radiation dose distribution of a panoramic irradiation chamber with Co-60 gamma source of 400 TBq(10,800Ci) was measured using the chemical dosimeter of  $Fe^{2+}$  solution and the  $CaSO_4:Dy$  thermoluminescence pallets. The measured data are absorbed doses at different exposed times and distances from the source. Both types of dosimeter have shown fairly good linearities between the dose and the exposed time as long as the dosimeter are within the measurable limits. The chemical dosimeter produced inaccurate results over 650 Gy because the Fricke solution had become saturated. In general, it produces higher values than the TLD. It is found with using the lead shield that the chemical dosimeter is more

reliable than the TLD below 30 Gy. By combination of placing the lead shields and increasing the difference between the source and the object being irradiated, it is found that the dose rate range of the irradiation chamber is 0.1~1,000 Gy/h.

**Key words** : Radiation dose distribution, Co-60 gamma source, TLD, Chemical dosimeter

### 서론

감마선 및 전자선 등 방사선조사는 다양한 분야의 유용한 수단으로 이용되어지고 있다. Co-60을 이용한 감마선조사의 경우에도 식품 살균, 식물의 돌연변이 유발을 통한 우수 품종 개발, 동·식물 유전자의 기능 규명, 농산물의 저장성 향상, 동물 세포의 방사선 생물학 및 방사선 면역체 개발 연구에 이용되고 있다<sup>1,2)</sup>.

다목적 방사선 조사시설인 경우 조사할 시료에 따라 처방할 방사선량이 매우 다르고 범위가 넓다고 볼 수 있다. 방사선 유발 돌연변이의 경우 1 Gy/h 미만으로 장시간 조사하는 경우와 100 Gy/h로 짧게 조사하는 경우가 있을 수 있다. 점선원(point source)으로 가정한 400 TBq의 Co-60인 경우 이론적인 선량율은 선원으로부터 1m인 위치에서 약 140 Gy/h이며 3 m 위치는 15.8 Gy/h이다. 따라서 제주대학교 방사선조사실의 경우 다양한 선량을 범위를 맞추기 위하여 선량조절을 위한 원통형태의 납 차폐체를 제작하여 필요에 따라 선원 주위에 2 겹까지 둘러쌀 수 있도록 하였다. 방사선조사실의 선량평가 결과는 일반적으로 선원이 점선원이 아닌 봉선원인 데다가 외부 차폐벽에서 산란되는 방사선의 영향이 상당하기 때문에 컴퓨터 코드를 이용한 계산결과와 실제로 측정된 결과간에 상당한 차이가 있을 수 있다.

본 연구는 제주대학교 방사선응용과학연구소는 400 TBq(10,800 Ci)의 Co-60 감마선 조사시설을 구축한 바 있다. 이 설치된 방사선조사실의 정확한 선량을 분포 지도를 작성하는 것으로 선량조절

용 납 차폐체, 선원과 조사지점의 이격거리를 변수로 하여 실제로 측정된 방사선량을 제시하였다. 선량측정에는 한국원자력연구소에서 개발한 KCT-300 소자와 화학선량계( $Fe^{2+}$ ) 용액으로 각각의 결과를 비교검토하여 선원으로부터 거리에 따른 선량변화 함수를 도출하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 방사선 조사시설의 구조

제주대학교 방사선응용과학연구소에 구축된 방사선조사시설은 선원을 차폐용 납용기에 저장하는 건식형으로 조사할 대상물을 선원 주위에 배치한 후 조사하는 파노라마형이다. 그림 1은 조사시설의 평면구조를 보인 그림이다. 조사실은 3200 x 4200 x 2700 mm (D x W x H)의 용적을 가지고 있으며 선원은 조사실의 중앙에서 세로방향으로 약 500 mm 정도 떨어진 곳에 위치한다. 선원 Co-60은 직경이 11 mm이고 길이가 400 mm인 스테인리스관에 봉입된 상태이고 이 선원봉은 plug 형태의 선원홀더에 수용되어 있다. 조사를 하지 않을 때 선원홀더는 선원저장용기에 삽입된 상태로 있고, 조사시는 선원 취급 cable을 통하여 저장용기로부터 인출되어 guide tube를 따라 상하측 방향으로 이동한다. 그림 2는 선원이 인출된 상태에서 선원 저장용기와 선원홀더 등의 수직단면을 보여주는 것으로 선원취급 케이블은 제어실에 있는 구동모터에 의해 제어된다.

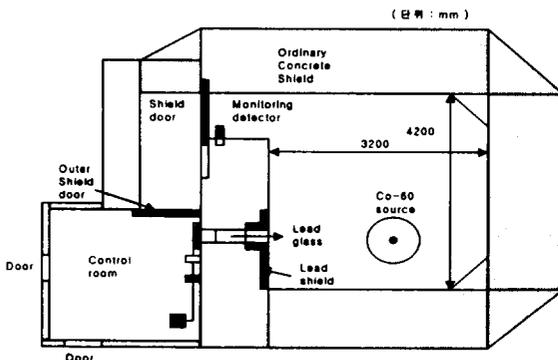


Fig 1. The flat of irradiation facility

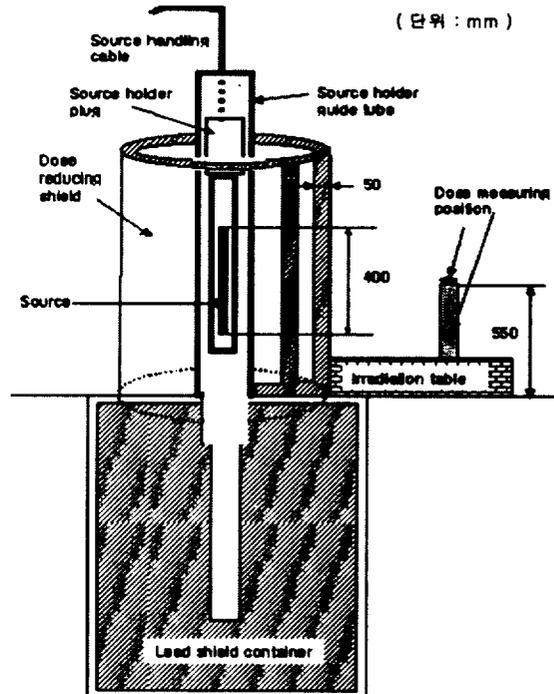


Fig 2. Vertical section of shield container

일반적으로 시료의 종류와 조사 목적에 따라 조사할 방사선량의 범위가 매우 넓으며 현재 조사실 내부의 선원으로부터의 최대 거리는 3 m 미만이다. 따라서 선원과 시료간의 이격거리만으로 선량률을 조절하는 데는 한계가 있기 때문에 낮은 선량 조사를 대비하여 선량감소를 위한 가변형 보조차폐체를 갖추었다. 선량조절용 보조차폐체는 납으로 된 반 원통형 조각 2개를 조립하여 원통형으로 선원주위를 둘러쌀 수 있도록 제작되었다. 보조차폐체는 두께가 50 mm인 납 원통으로 조립하여 2개가 제작되어 원하는 선량에 따라 보조차폐체를 1개 내지 2개 이용하여 선량을 감소시킬 수 있다.

### 2. 방사선량 측정 방법

선원 Co-60의 감마상수는  $1.32 R \cdot m^2/hr/ci$ 로 400 TBq 점선원으로부터 1 m 떨어진 곳의 이론적 최대 선량률은 약 140 Gy/h로 매우 높다. 따라서 일반적인 선량계로는 측정이 곤란하며 고선량 측정에 적합한 화학선량계나 특별히 제작된 열형광선량계(TLD)를 사용하는 방법이 가능하다.

본 연구에서는 한국원자력연구소가 개발한 TLD 소자<sup>3)</sup>와  $Fe^{2+}$  용액을 이용한 화학적 방사선량 측정법을 이용하여 측정하였다. 선량계의 위치는 선원봉의 중심 높이에서 측정한 경우와 선원봉의 하단 높이에서 측정한 경우 두 가지이다. 조사시 선원봉의 하단이 조사실 바닥면으로부터 35 cm 정도 상승하게 되어 그 중심에서 선량을 측정할 경우에는 250 mm 높이의 조사대(irradiation table) 위에 300 mm 높이의 선량계 받침대를 설치하고 그 위에 선량계가 위치하도록 하였다.

### 1) 열형광선량계(TLD)

열형광선량계는  $CaSO_4:Dy$  TL 계열의 소자<sup>3)</sup>를 바탕으로 인(P) 화합물을 접착매질로 사용한 KCT-300 이라 명명된 소자이다. KCT-300 소자는 소량의 P-화합물을 첨가하였기 때문에 이미 상용화 되어 쓰이고 있는 Teflon을 첨가한  $CaSO_4:Dy$  TL 소자에 비하여 감도가 높고 fading 특성이 좋으며 선량 의존성의 범위가 넓어 개인 선량계 및 환경 선량계로 매우 유망한 것으로 보고된 바 있다. 이 소자는 선량이 30 Gy 이상이 되면 선형영역에서 다소 벗어나 초선형 양상을 보이지만 포화되기 전까지는 선량에 비례하여 증가하므로 고선량 영역의 선량 측정도 가능한 것으로 보고되었다.

KCT-300 소자를 Co-60 선원으로 조사시킨 후 발생하는 열형광량으로부터 방사 흡수선량을 판독하기 위해서는 우선 KCT-300 소자의 열형광량과 흡수선량에 대한 특성 곡선을 얻어야 한다. 이를 위해 먼저 KCT-300 소자를 열처리(annealing) 한 후 한국원자력연구소의 Co-60 표준조사시설을 이용하여 1 Gy부터 1000 Gy 범위에 있는 선량을 조사시켰다. 조사시킨 소자는 fading 효과를 고려하여 24시간 이상 경과 후 판독하였다. 소자 판독에 이용된 TLD 판독기(Harshaw 4500)로 소자 판독시의 TTP(Time-Temperature Profile)는 125°C에서 6초간 pre-heating 후 20°C/sec의 가열율로 320°C까지 상승시키면서 판독 후 320°C에서 6초간 annealing 하였다. 여기서 125°C에서 6초간 pre-heating 하는 이유는 실제 선량 평가에는 적용되지 않는 저온 피크의 영향을 인위적으로 없애기 위함

이다. 그림 3은 KCT-300 소자의 특성곡선을 보인 것이다. 수직축은 발생한 열형광의 강도를, 수평축은 흡수선량을 가리킨다. 그림에 보인 바와 같이 30 Gy 부근에서 선량특성곡선의 기울기가 약간 변함을 알 수 있으며 그 이후에는 거의 선형적임을 볼 수 있다.

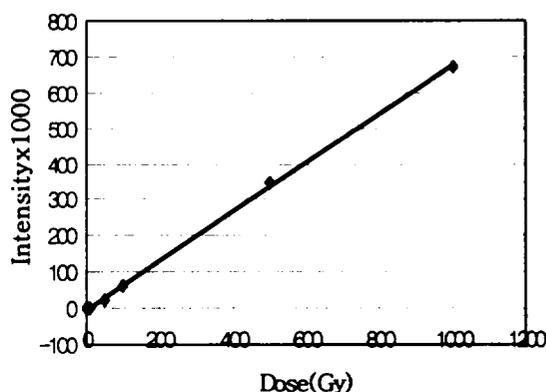


Fig 3. Dose characteristic curve of KCT-300 TLD pallets

### 2) $Fe^{2+}$ 용액 화학적 방사선량 측정법

화학선량계는 방사선이 물질을 통과할 때 물질 내 화학적 변화가 일어나게 되는데 이 화학 변화가 흡수 에너지에 비례하는 원리를 이용한다.  $Fe^{2+}$  (황산 제 1철) 용액 화학선량계의 경우 물의 방사선 분해에 의해 생성된  $H \cdot$  및  $\cdot OH$  등의 유리기와 이들의 반응생성물에 의해서  $Fe^{2+}$ 는 시간이 지남에 따라  $Fe^{3+}$  (황산 제 2철)로 산화되고 산화된 양은 용액의 흡수선량에 비례한다<sup>4)</sup>.

#### (1) $Fe^{2+}$ 용액 조제

화학선량계로 사용된  $Fe^{2+}$  용액은 0.8N인  $H_2SO_4$ , 0.001M  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 와 0.001M NaCl을 혼합하여 제조하였다<sup>5)</sup>. 이 용액을 5ml의 바이알에 봉입하여 선원 중심과 높이가 일치하도록 배치하였다.

#### (2) 흡수선량식

$Fe^{3+}$ 은 303nm 파장의 자외선을 흡수하지만  $Fe^{2+}$ 은 흡수하지 않기 때문에 생성된  $Fe^{3+}$ 의 양은 조사전후의 흡광도의 차이로부터 구할 수 있는데 이때 시료 용기 재질과 모양에 따른 오차도 고려되어야 한다. 방사선 조사 후  $Fe^{3+}$  생성량은

UV/vis spectrophotometer (HP 8453, UVIKON, France)로 판독할 수 있다. 단색화 장치를 통과해 나온 단색 파장의 빛은 석영 cuvette에 넣은 시료를 통과한다. 이 때 시료 용기를 통과한 빛의 복사세기는 광전자증배관 검출기에 의해 측정되고 흡광도는 투과된 빛에 대한 입사광의 광도로 나타내며 이 흡광도를 통해 이 수용액 속의 흡수 에너지를 알 수 있다. 물의 흡수선량은 다음의 식으로 표시된다.

$$D_w = \frac{\Delta OD_{25.25} \cdot R_w^F \cdot k_{vial} \cdot k_{dd} \cdot k_E}{\epsilon \cdot G(Fe^{3+}) \cdot \rho \cdot L} \quad (1)$$

여기서  $\Delta OD$ 는 방사선 조사시 25°C의 조사온도와 25°C의 측정온도에서  $Fe^{2+}$ 에서  $Fe^{3+}$ 로의 변화에 의한 흡광도를 차이를 나타내며,  $R_w^F$ 는 같은 가정하에서 대조위치에서 벽이 없는 용기에서 물에서의 흡수선량과 Fricke에서의 흡수선량 비,  $K_{vial}$ 는 Fricke vial의 벽에 의한 변동요소를 고려한 보정인자,  $K_{dd}$ 는 바이알의 직경을 지나는 조사 영역의 비일정함을 고려한 보정인자,  $K_E$ 는  $G(Fe^{3+})$ 의 에너지 의존성을 고려한 보정인자,  $\epsilon \cdot G(Fe^{3+})$ 는 열량계의 비교에 의해 결정된  $Fe^{3+}$ 의 화학적 산물과 분자 소멸계수의 생산,  $\rho$ 는 25°C에서 Fricke 용액의 밀도,  $L$ 는 spectrophotometer에서 측정 cuvette의 길이(cm)를 나타낸다.

### 결과 및 고찰

흡수선량변화를 측정하기 위하여 선원을 중심으로 동일한 간격의 동심원을 조사대에 표시하고 각 지점에 Fricke 선량계 바이알 3개 및 TLD 소자 5개를 배치하여 선량을 측정하여 평균을 취하였다. 이 과정은 선량조절용 차폐체를 설치한 상태에서도 반복하여 각 차폐체에 대한 흡수선량 분포를 측정하였다.

#### 1) 조사시간에 따른 흡수선량 변화

그림 4는 보조차폐체를 사용하지 않은 상태에서

선원봉의 하단 높이에서 선원으로부터 1m 거리에서 측정한 조사시간에 따른 선량의 변화를 측정하는 것이다. 이 경우 보조차폐체는 사용하지 않았지만 선원주위에 선원홀더, guide tube 및 50 mm 두께의 스테인리스 원통을 둘러싼 상태이기 때문에 이에 의한 차폐효과가 상당히 발생하였다. 열형광소자에 의한 측정결과는 시간에 따라 거의 비례하는 결과를 보여주고 있으나 화학선량계인 경우 조사시간이 20분이 지난 후부터 다소 과대한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 그 편차는 약 7%이내로서 비교적 근접한 편이다. 이 경우 측정 지점이 선원의 중심 위치가 아닌데다 선원홀더 guide tube 및 외부 원통에 의한 차폐효과가 상당히 발생하여 가능한 최대선량 보다 많이 감소하였다고 볼 수 있다.

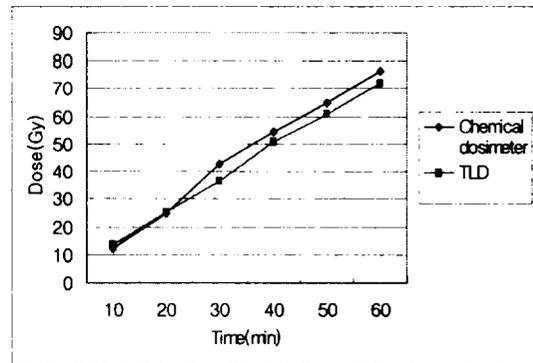


Fig 4. A comparison of radiation dose according to the time when supplementary shield is non-used (measurement point of dose : 1m from the source, bottom of the height)

#### 2) 거리에 따른 흡수선량 변화

그림 5는 선원과 선량계간의 이격거리에 따른 흡수선량의 변화를 나타낸 그림이다. 이 경우 선량계는 선원의 중심과 동일한 높이에 설치하였으며, 선량조절용 보조차폐체는 사용하지 않았지만 앞서 사용한 스테인리스 원통은 그대로 둔 채 측정하였고 조사시간은 1시간 이었다. 화학선량계의 경우 선량이 약 650 Gy 이상에서는 포화상태가 되어 정확한 값을 측정할 수 없었다. 열형광선량계에서는 약 1,200 Gy까지는 측정이 가능하였으나 그 이상에서는 곤란하였다. 두 종류의 선량계간에 저 선량에서는 큰 편차가 없었으나 선량이 증가함에 따라 화학선량계의 값이 열형광선량계의 값보다

다 훨씬 커짐을 볼 수 있다. 선량계로부터 얻은 자료에 의거하여 최소자승법으로 구한 거리(x)와 선량(y)간의 함수는 선원의 형태가 점선원이 아니기 때문에 정확하게 거리의 역자승의 법칙은 성립되지 않지만 비교적 거리의 제곱에 반비례하는 형태를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

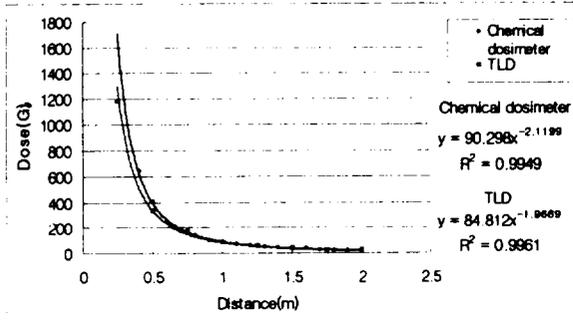


Fig. 5. A comparison of radiation dose of horizontal distance from the source

### 3) 보조차폐체 사용에 따른 흡수선량 변화

선량조절용 보조 차폐체를 사용하여 어느 정도의 선량요구에 부응할 수 있는 지 여부를 조사하기 위하여 5 cm 두께의 납으로 제작된 원통형 보조차폐체를 선원 주위에 1겹 또는 2겹 설치한 상태에서 흡수선량을 측정하였다. 선량을 측정한 지점은 선원으로부터 수평거리로 1 m 떨어진 선원봉의 중앙 위치 높이이다. 이 경우 guide tube 외부에 설치하였던 스테인리스 원통은 제거하였다. 따라서 선량감소효과는 선원홀더 및 guide tube의 벽과 보조차폐체의 납과 스테인리스 벽에 의해서 발생한다고 볼 수 있다. 선원홀더와 guide tube의 벽은 합하여 5 mm 이하이며, 보조차폐체 1개의 납 두께는 50 mm이고 스테인리스 벽두께는 총 10 mm이다. 따라서 보조차폐체를 2개 사용하는 경우 총 차폐두께는 납 100 mm 그리고 스테인리스 20 mm가 된다.

표 1은 보조차폐체를 사용하지 않은 경우, 1겹만 사용한 경우, 2겹을 사용한 경우에 대해서 1시간 동안 조사한 후 측정된 흡수선량을 나타내고 있다. 보조차폐체를 사용하지 않은 경우 선원으로부터 1m 거리에서 흡수선량은 화학선량계의 경우 118.5 Gy이고 열형광선량계인 경우 104 Gy로서

약 10% 정도의 편차가 있다. 보조차폐체를 1겹 사용한 경우 화학선량계는 12.2 Gy이고 열형광선량계는 14.6 Gy로 오히려 화학선량계보다 높은 결과를 보이고 있다. 보조차폐체를 1겹 사용한 경우 선량 감소비는 화학선량계의 경우는 약 1/9.7, 열형광선량계는 1/6.5를 보이고 있다. 점선원인 경우 50 mm 두께의 납에 의한 선량 감소비가 약 1/10 정도인 점을 감안 하면 열형광선량계가 지나치게 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 보조차폐체를 2겹 사용한 경우 화학선량계는 19 Gy, 열형광선량계는 0.16 Gy를 보였다. 이 경우 전체 선량 감소비는 화학선량계는 1/63이고 열형광선량계는 1/650이다. 보조차폐체를 1겹 사용한 경우와 2겹 사용한 경우의 선량감소비는 화학선량계는 1/7.1이고 열형광선량계는 1/91이다. 각 보조차폐체의 두께가 동일함에도 불구하고 열형광선량계의 경우 선량감소비가 이렇게 큰 편차가 발생한 것은 낮은 선량에서 흡수선량 측정 결과가 정확하지 못하였음을 알 수 있다.

Table 1. A comparison of radiation dose of using the shield

Shield	TLD	Chemical dosimeter
	Dose(Gy)	
non-used	118.5	104
1 slice	12.2	14.6
2 slices	1.9	0.16

그림 3에 보인 바와 같이 본 연구에 사용된 열형광 소자는 30 Gy 이하에서는 선량특성곡선의 기울기가 변함을 알 수 있다. 이 점을 고려할 때 열형광선량계의 경우 이번 선량판독 과정에서는 오차가 개입된 것으로 추정되며, 화학선량계의 측정결과가 보다 신빙성이 있는 것으로 여겨진다. 이러한 가정에 근거하여 판단할 때 보조 차폐체를 사용하고 동시에 선원과의 이격거리를 조절하면 본 방사선 조사시설에서 조사 가능한 선량을 범위는 적어도 0.1-1,000 Gy/h 정도가 됨을 알 수 있다.

## 결 론

화학선량계와 KCT-300 열형광 소자를 사용하여 400 TBq의 Co-60 선원을 장착한 제주대학교 방사선용융과학연구소의 방사선조사시설의 흡수선량을 평가하였다. 조사시간에 따른 방사선량을 평가한 결과 두 방법 모두 대체적으로 용인할 수 있는 정도의 오차범위 내에서 선형성을 유지함을 보였고, 거리에 따른 선량 변화를 측정된 결과 두 방법 모두 유사한 변화곡선을 예측하였으나 화학선량계의 경우 약 650 Gy 이상에서는 포화상태가 되어 정확한 값을 측정할 수 없었으며 전반적으로 열형광선량계보다 높은 값을 보였다. 선량조절용 보조차폐체를 설치하여 선량감쇠효과를 측정된 결과 화학선량계가 보다 신빙성이 있는 결과를 보였으며 열형광 선량계는 낮은 선량에서 매우 부정확한 결과를 보였다. 선량조절용 보조차폐체와 조사대상물과 선원과의 이격거리를 조절하면 본 방사선 조사시설에서 조사 가능한 선량률 범위는 0.1-1,000 Gy/h이었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 기반확충사업과 한국과학재단 지정 방사선안전신기술연구센터(ITRS)의 연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다.

## 참고문헌

1. C. M. Herring, and M. C. Saylor, "Sterilization with radioisotopes, In sterilization technology: A practical guide for manufacturers and users of health care products", Van Nostrand and Reinhold, New York, New York, USA, 1993.
2. S. G. Beck, S. O. Horn, H. Schmitt, M. Grew, A. Jahnke, J. P. Johnson, K. Briviba, H. Sies, and J. Krutmann, "Activation of transcription factor AP-2 mediates UVA radiation and singlet oxygen-induced expression of the human intercellular adhesion molecule 1 gene", Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 93, pp. 14586-14591, December 1996.
3. Jeong Sun Yang, Doo Young Kim, Jang Lyul Kim, Jung Il Lee, Bong Whan Kim, Si Young Chang, Jae Woo Park, "Development of Phosphorous-compound CaSO<sub>4</sub>:Dy (KCT-300) TL Pellets", J. Korean Nucl. Soc., Vol. 34, No. 2, 2002.
4. 고성진, 김승국, 노경석, 박명환, 안봉선, 방사선 계측학, 청구문화사, 2001.
5. A. Olszanski, N. V. Klassen, C. K. Ross and K. R. Shortt, "The IRS Fricke Dosimetry System", PIRS-0815, Ionizing Radiation Standards Institute for National Measurement Standards National Research Council, Ottawa, Ontario, 2002.