Journal of Radiation Industry 11(4) : 189~202(2017)

치료용 고에너지 X-선 장치의 산란선에 의한 개인 피폭 선량계의 방향 및 에너지 의존성에 관한 연구

김호성[1] · 김상현[1] · 류영환[2] · 김희근[3] · 신지윤[4] · 동경래[4,*]

[1]신한대학교 방사선학과, [2]서울의료원 영상의학과,
[3]위덕대학교 에너지전기공학부, [4]광주보건대학교 방사선과

A Study on the Direction and Energy Dependence of Personal Exposure Dosimeter by Scatter of High Energy Therapeutic X-ray Device

Ho-Sung Kim[1], Sang-Hyun Kim[1], Young-Hwan Ryu[2], Hee-Geun Kim[3], Ji-Yun Shin[4] and Kyung-Rae Dong[4,*]

[1]*Department of Radiological Science, Shinhan University, 95, Hoam-ro, Uijeongbu-si, Gyeonggi-do 11644, Republic of Korea*
[2]*Department of Radiology, Seoul Medical Center, 156, Sinnae-ro, Jungnang-gu, Seoul 02053, Republic of Korea*
[3]*Division of Energy & Electrical Engineering, UiDuk University, 261, Donghae-daero, Gangdong-myeon, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do 38004, Republic of Korea*
[4]*Department of Radiological Technology, Gwangju Health University, 73, Bungmun-daero, 419, Beon-gil, Gwangsan-gu, Gwangju 62287, Republic of Korea*

Abstract - Using high energy X-ray generators, the scattering lines generated by varying the distance and direction of MU·min^{-1}, which are widely used in the therapeutic radiology field, are measured and compared the direction and energy depending on the sensitivity of each dosimeter by dividing it into a Thermoluminescence dosimeter (TLD), radiophotoluminescence glass dosimeter (PLD) and optical stimulated luminescence dosimeter (OSLD). As a result of the analysis of the difference of dosimeters according to the distance, there was a statistically significant difference ($p < 0.001$). Experiments on the reproducibility of the therapeutic linear accelerator showed that the coefficients of variation were well within 2% (0.02). In addition, the sensitivity of the PLD is excellent when the surface dose measured by the dose rate and distance measurement is analyzed synthetically. Also, comparing the energy dependence of dose, it is found that the TLD with the pearson correlation coefficient close to 1 is superior. In the direction-dependence experiment, The surface dose at 0° to −90° of the TLD showed a reduction rate of 48%. In the PLD, the surface dose at 0° to 90° showed a reduction rate of 74%, In the OSLD, the surface dose of at 0° to 90° showed a reduction rate of 86%. Therefore, the direction dependence of the TLD is the least, and the direction dependence is larger in the order of the PLD and the OSLD. Therefore, in the high energy region, the PLD was excellent as a result of measuring the dose rate and

* Corresponding author: Kyung-Rae Dong, Tel. +82-62-958-7668, Fax. +82-62-958-7669, E-mail. krdong@hanmail.net

sensitivity of distance, and the TLD was excellent even in the direction dependence experiment. Based on these results, it is necessary to select a personal radiation dosimeter according to the characteristics of the place where the worker is working in the medical field. Accordingly, if it is possible to more accurately measure the effective radiation dose and to prevent the radiation exposure, It will help radiation worker to live a better life.

Key words : TLD, PLD, OSLD, Direction dependence, Energy dependence

서 론

방사선의 피폭은 크게 세 가지로 분류할 수 있는데 관리자의 제어하에 있는 피폭원으로 인하여 시설에 종사하는 모든 사람이 고용주가 누구이건 그들이 기관의 방사선 관계분야에 관여하든 아니든 관계없이 받는 피폭인 직업상 피폭, 자신의 진단이나 치료 목적으로 또는 직업상 피폭을 제외하고 그런 환자를 병원이나 가정에서 돌보고 안정시키는 가족과 친지가 알면서 자의적으로 받는 의료상 피폭, 기타의 모든 피폭으로 구성되는 공중의 피폭이 있다(Lee *et al*. 1987). 그중에서 국민의 인공방사선 피폭 중 거의 대부분을 차지하는 피폭원은 의료방사선이다. 소득 수준의 향상으로 진료의 빈도가 늘어나고 정교한 의료방사선 기술이 추가됨에 따라 환자가 진료과정에서 피폭하는 의료상 피폭은 증가하는 추세에 있다. 이런 선량의 증가는 의료용 방사선 사용에 의한 피폭선량 문제가 과거의 특정 소수에만 국한된 문제에서 방사선 관계 종사자나 피검자 모두가 가장 염두에 두어야 할 문제로 대두되게 하였다(Ha 1992).

현대의 방사선 의학은 날이 갈수록 발전해 가고 있으며, 이러한 발전과 비례하여 방사선 작업종사자들의 피폭선량 측정이나 방사선기기를 점검하는 데 다양한 선량계들이 이용되고 또한 개발되어 오고 있다. 필름선량계(Film dosimeter; FD)부터 시작하여 가장 많이 쓰이는 열형광선량계(Thermoluminescence dosimeter; TLD)와 최근 주목받고 있는 유리형광선량계(Radiophotoluminescence glass dosimeter; PLD) 및 광자극발광선량계(Optically stimulated luminescence dosimeter; OSLD) 등등 종류도 다양하다. 방사선계측기 중 TLD는 현재 개인피폭관리와 방사선 모니터링에 많이 이용되고 있으며(Pradhan 1981; Kim and Park 1998) 크기가 작고 방사선에 대한 감도가 높다는 장점이 있는 반면에 정확한 측정을 위해 각각 소자에 대한 교정이 필요하며 조사 후 퇴행(fading) 현상이 나타나는 문제점이 있으며(Dong *et al*. 2011) 최근 들어 새롭게 소개되고 있는 TLD는 판독과정 및 취급방법은 TLD에 비해 매우 간단하고 유효크기 또한 작아 소조사면에 대한 선량평가에 효과적이라고 알려져 있다(Mobit *et al*. 1998; Asahi Techno Glass Corporation 2000; Tsuda 2000; Araki *et al*. 2003; Rah *et al*. 2006). 또한, OSLD는 측정과 어닐링(annealing) 과정에서 모두 광학적 방법이기 때문에 열을 가하지 않으므로 재료의 특성 변화가 없고, 고감도이기 때문에 동일한 재료에 대하여 여러 번 판독이 가능하며 광자극 강도를 조절하여 판독과정을 매우 짧게 할 수 있기 때문에 다량의 선량계를 빠르게 판독할 수 있다(Huntley *et al*. 1985; Le Masson *et al*. 2001; Mckeever 2002; Lim *et al*. 2011). 우리나라에서는 국제 방사선 방호 위원회 ICRP Publication, 103의 권고안에 따라 작업 종사자의 연간 최대 선량 한도가 50 mSv를 넘지 않는다는 범위에서 5년간 200 mSv를 초과하지 못하도록 규정되어 있으며 현재의 개인선량계를 이용한 선량평가 체계는 방사선이 정면 또는 정면으로부터 정해진 각도 범위에서 입사(incident)함을 가정하고 인체를 대표하는 위치에 착용된 선량계의 판독 값은 유효 선량(effective dose)을 보수적으로 대표하도록 규정하고 있다(Table1) (ICRP 2007).

그러나 선원(source)의 기하학적 형태, 선원에 대한 작업자의 방향 및 거리 그리고 산란방사선에 의한 초기 방사선장의 스펙트럼 변화, 작업자의 움직임 등으로 작업자는 비균질 방사선장에 노출될 수 있다. 따라서 개인선량계로 평가된 값이 작업자의 피폭을 대표하지 못하는 경우가 발생한다(ICRP 1990; ICRU 1992; ICRU 1993; Kwon *et al*. 2004; ICRP 2007). 전체 방사선 검사 중 점유율은 낮지만 다른 검사에 비해 직업선량이 많은 투시 및 혈관조영검사

Table 1. According to the dose limit of ICRP 103

Division		Radiation workers	Resident visitors and transportation workers	General persons
Effective dose limit		100 mSv · five years^{-1} with exceeding 50 mSv · year^{-1}	12 mSv · year^{-1}	1 mSv · year^{-1}
Dose equivalent	Eye lens	150 mSv · year^{-1}	15 mSv · year^{-1}	15 mSv · year^{-1}
	Hands feet and skin	500 mSv · year^{-1}	50 mSv · year^{-1}	50 mSv · year^{-1}

Fig. 1. CLINAC 21IX.

Fig. 2. LINACHECK.

(angiography)는 방사선 작업종사자가 환자에게 근접한 상태에서 검사를 하기 때문에 산란선의 영향이 상대적으로 많고 검사 시간도 길 뿐만 아니라 여러 각도에서 움직이면서 환자의 상태를 점검하는 방사선 작업종사자들에게 정확한 피폭선량 측정이 불가피하다(Mobit *et al*. 1996). 실제 임상에서는 근무의 환경이나 검사의 특성에 따라 종사자의 피폭선량에서 차이가 있다. 하지만 그것이 선량계에서의 기하학적인 측정 문제인지 아니면 근무 환경에 따른 문제인지를 명확하게 설명할 수 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실제 고에너지(치료용) 방사선 작업 종사자들이 인체의 방사선 조사에 의한 산란선 발생 시의 근무 환경이나 작업 종사자의 행동 변화에 따라 발생할 수 측정의 오류를 파악하여 신뢰도 높고 체계적인 방사선기기 점검과 인체에서의 정확하고 보수적인 피폭선량 측정을 함으로써 방사선 종사자의 피폭에 관련된 위험 감소 및 예방의 필요성에 의해 본 연구를 시행하였다.

Fig. 3. RAN-110.

재료 및 방법

1. 실험기기

고에너지 영역에 사용된 장치는 치료용 엑스선 발생장치로 주로 암의 치료에 사용하는 치료용 선형가속기(CLINAC 21IX, Varian, USA) (Fig. 1)를 사용하였다. 그리고 인체모형의 팬텀은 미국의 Churchin사에서 제작한 인체모형 팬텀인 란도팬텀(Rando phantom, RAN-110, Churchin, USA) (Fig. 2)를 이용하여 고에너지 영역에서의 팬텀 조사에 의한 산란 선량을 측정하였다. 또한 치료용 발생장치에서 발생되는 방사선선량의 기준 선량 측정을 위하여 라이나체크(LINACHECK, PTWUNIDOS, PTW Freiburg GmbH, Germany) (Fig. 3)를 사용하였다. 그리고 개인피폭 선량계인 TLD (UD-802AT, Panasonic, Japan) (Fig. 4)와 판독을 위하여 TLD 자동판독장치(UD-710R, Panasonic)를 이용하였고, PLD (GD-450, Japan) (Fig. 5)와 판독을 위하여 PLD 자동판독창치(FGD-650) 및 OSLD (LANDAUER Inc., USA) (Fig. 6)와 판독장치인 OSLD 자동판독장치(Microstar reader, LANDAUER, USA)를 이용하였다.

2. 실험방법

2.1 재현성 평가

실험 전 한 달 동안 일일정도관리(Daily Quality Control)로 갠트리 각도는 0°, 조사면은 $10 \times 10\ cm^2$, 갠트리에서 전리함까지 거리는 100 cm (SSD)로 측정기 측정 중심점을 조사면 중심점에 정렬하였다. 1 cm 축적 판을 측정부위에 올려

Fig. 4. TLD (UD-802AT).

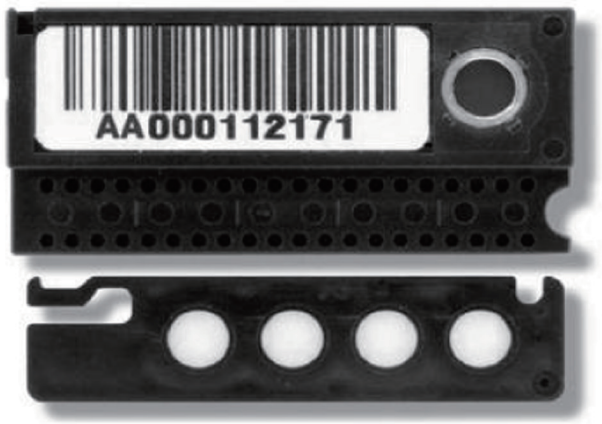

Fig. 5. PLD (GD-450).

두고 계기판의 숫자가 모두 0 (또는 -)인지 확인 후 측정을 시작한다. 이때, 폐회로텔레비전 (CCTV) 모니터를 클로즈업시켜 조정실에서 측정값을 판독하였다. 첫 번째로 6 MV X-ray 100 MU·min^{-1}으로 조사하는데, 기준값 1 Gy와 오차값을 기입하여 기록하였다. 두 번째로 10 MV X-ray 100 MU·min^{-1}으로 조사하는데, 기준값 1 Gy와 오차값을 기입하여 기록하였다.

2.2 에너지 의존성

실험환경은 선형가속기의 테이블에 란도팬텀을 올려두고 팬텀의 복부에 선원-축 거리 (source axis distance, SAD)를 100 cm로 고정시킨 상태에서 조사야를 10×10 cm^{2}로 설정한다. 동일한 높이의 지지대를 만들어주어 란도팬텀의 조사야 옆에 중심을 맞추어 설치한다. 설치한 지지대위에 거리와 각도를 표시해 놓는다. TLD, PLD 및 OSLD의 에너지 의존성 비교 측정을 위해 란도팬텀 복부의 조사야 끝에서

Fig. 6. OSLD.

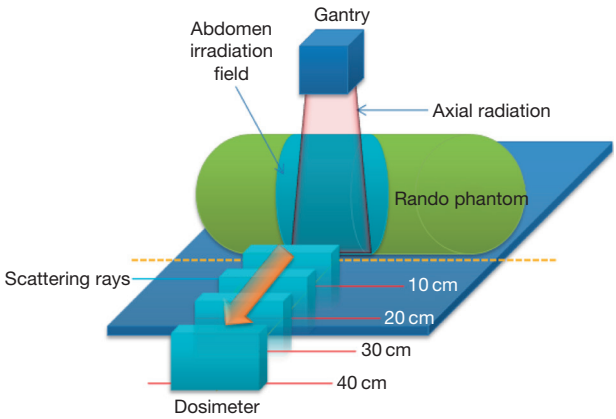

Fig. 7. Test method of energy dependence.

거리별로 10 cm 간격을 두고 40 cm까지 측정하였다. 선량률은 100~500 MU·min^{-1}까지 100 MU·min^{-1} 간격으로 변화시켜주고 1 Gy으로 고정시킨 상태에서 측정하였다. 선량은 1~5 Gy까지 1 Gy 간격으로 변화시켜주며 400 MU·min^{-1}으로 고정시킨 상태에서 측정하였다. 또한 신뢰도를 높이기 위해 각 선량계마다 10번씩 반복 측정하였다 (Fig. 7).

2.3 방향 의존성

실험 환경은 선형가속기의 테이블에 란도팬텀을 올려두고 팬텀의 복부에 선원-축 거리 (source axis distance, SAD)를 100 cm로 고정시킨 상태에서 조사야를 10×10 cm^{2}로 설정한다. 동일한 높이의 지지대를 만들어주어 란도팬텀의 조사야 옆에 중심을 맞추어 설치한다. 설치한 지지대위에 거리와 각도를 표시해 놓는다. TLD, PLD 및 OSLD의 방향 의존성 비교 측정을 위해 란도 팬텀 복부의 조사야 끝에서 40 cm 거리에서 측정하였다. 선량은 2 Gy 고정으로 0°~90°까지 왼쪽과 오른쪽 전방위를 15° 간격으로 측정하였다. 또한 신뢰도를 높이기 위해 각 선량계마다 10번씩 반복 측정하였다 (Fig. 8).

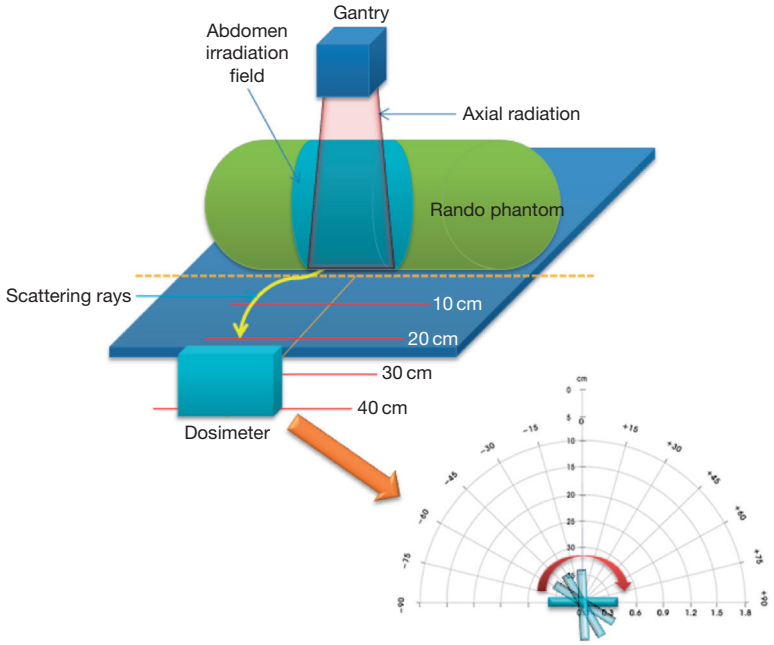

Fig. 8. Test method of Angular dependence.

3. 분석방법

통계학적 방법은 SPSS win Version 15.0 (Chicago, IL, USA)프로그램을 사용하였으며, 일원배치분산분석 one-way ANOVA를 이용하여 거리 및 각도에 따른 차이를 파악하여 방향 의존성을 비교 분석하였다. 또한 ANOVA분석에서 집단 간 유의한 차이가 파악되는 경우, 사후검정방법으로서 Scheffe의 사후분석을 적용하였다. 본 연구에서는 p값이 0.05 미만일 때 통계학적으로 유의한 것으로 판정하였다.

결 과

1. 재현성 평가

Fig. 9는 치료용 선형가속기의 재현성에 대한 실험 결과를 나타내었다. 이때 재현성은 실험 당일마다 1 Gy로 치료용 선형가속기의 중심선속에서 FC65P (IBA)로 31회 측정하여 조사하였고, 그 결과 변동계수가 오차허용 범위 2% (0.02)에 포함되어야 한다. 각각의 변동계수는 오차허용 범위 2% (0.02) 이내에서 일치하는 결과를 얻었다(Fig. 9).

2. 에너지 의존성 실험 결과

2.1 선량률 변화에 따른 10 cm 거리에서의 선량계 비교, 1 Gy 고정

$MU \cdot min^{-1}$ 변화에 따른 TLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=18.053$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 200 $MU \cdot min^{-1}$ (a)인 경우 제일 높았으며, 다음 100 $MU \cdot min^{-1}$ (a, b), 400 $MU \cdot min^{-1}$ (b, c), 500 $MU \cdot min^{-1}$ (c, d), 300 $MU \cdot min^{-1}$ (d) 순으로 분류되었으며, Table 2와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. $MU \cdot min^{-1}$ 변화에 따른 PLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=33.705$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 200, 300 $MU \cdot min^{-1}$ (a)인 경우 제일 높았으며, 다음 100, 400 $MU \cdot min^{-1}$ (a, b), 500 $MU \cdot min^{-1}$ (c) 순으로 분류되었으며, Table 2와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

$MU \cdot min^{-1}$ 변화에 따른 OSLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=923.361$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률이 500 $MU \cdot min^{-1}$ (a)인 경우가 제일 높았고, 다음 400 $MU \cdot min^{-1}$ (b), 100, 300 $MU \cdot min^{-1}$ (c), 200 $MU \cdot min^{-1}$ (d) 순으로 분류되었으며, Table 2와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

Table 2에서 TLD의 표층선량(surface dose)은 200 $MU \cdot min^{-1}$에서 4.05로 최고 선량값으로 측정되었고, 300 $MU \cdot min^{-1}$에서 3.46에서 최저 선량값으로 측정되었다. TLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.59이었다. PLD의 표층선량은 200 $MU \cdot min^{-1}$에서 3.22로 최고 선량값으로 측정되었고 500 $MU \cdot min^{-1}$에서 2.87에서 최저 선량값으로 측정되었다. PLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.35이었다. OSLD

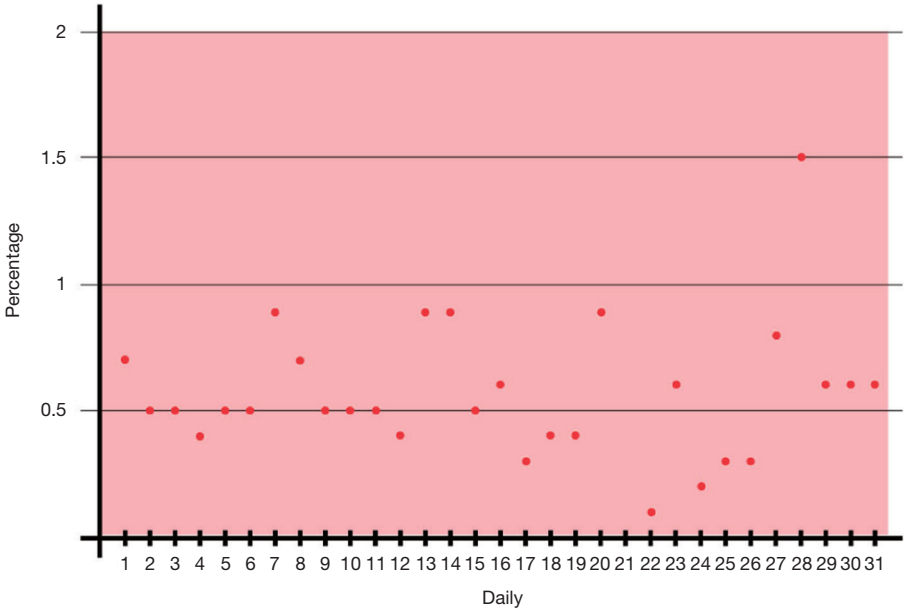

Fig. 9. Reproducibility evaluation.

Table 2. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 10 cm. But 1 Gy is fixed

MU	TLD				PLD				OSLD			
	N	Mean ± SD[a]	F	p	N	Mean ± SD	F	p	N	Mean ± SD	F	p
100	10	$3.85 \pm 0.14^{a,b}$			10	$3.09 \pm 0.07^{a,b}$			10	4.75 ± 0.12^{c}		
200	10	4.05 ± 0.19^{a}			10	3.22 ± 0.18^{a}			10	4.55 ± 0.06^{d}		
300	10	3.46 ± 0.23^{d}	18.053	0.000***	10	3.14 ± 0.05^{a}	33.705	0.000***	10	4.76 ± 0.03^{c}	923.361	0.000***
400	10	$3.73 \pm 0.23^{b,c}$			10	$3.08 \pm 0.04^{a,b}$			10	5.20 ± 0.53^{b}		
500	10	$3.52 \pm 0.21^{c,d}$			10	2.87 ± 0.13^{c}			10	5.46 ± 0.98^{a}		

Note: [a]Standard diviation. The interaction effect was determined using one-way ANOVA. Post-hoc test of Scheffe. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups. The unit is the number of mSv. **p < 0.01, ***p < 0.001.

의 표층선량은 500 MU·min^{-1}에서 5.46으로 최고 선량값으로 측정되었고 100 MU·min^{-1}에서 4.55에서 최저 선량값으로 측정되었다. OSLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.91이었다. 따라서 1 Gy를 고정하고 100 MU·min^{-1}씩 증가하였을 때 최대, 최저 선량값의 차이가 TLD 15%, PLD 11%, OSLD 17%로 차이가 가장 작은 PLD의 감도가 우수하다는 것을 알 수 있다.

2.2 선량률 변화에 따른 20 cm 거리에서의 선량계 비교, 1 Gy 고정

MU·min^{-1} 변화에 따른 TLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 7.189$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 300 MU·min^{-1} (a)이 높았으며, 다음으로 100, 400 MU·min^{-1} (b), 200, 500 MU·min^{-1} (c) 순으로 동일집단으로 분류되었으며, Table 3과 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. MU·min^{-1} 변화에 따른 PLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다 ($F = 6.131$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률이 300 MU·min^{-1} (a)인 경우가 제일 높았으며, 다음으로 200, 400, 500 MU·min^{-1} (a, b), 100 MU·min^{-1} (b, c) 순으로 분류되었으며, Table 3과 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. MU·min^{-1} 변화에 따른 OSLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 1106.103$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률이 400 MU·min^{-1} (a)인 경우가 가장 높았으며, 다음으로 100, 300 MU·min^{-1} (b), 200, 500 MU·min^{-1} (c) 순으로 분류되었으며, Table 3과 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

Table 3에서 TLD의 표층선량은 300 MU·min^{-1}에서 2.26으로 최고 선량값으로 측정되었고, 200 MU·min^{-1}에서 2.02로 최저 선량값으로 측정되었다. TLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.24이었다. PLD의 표층선량은 300 MU·min^{-1}에서 2.35로 최고 선량값으로 측정되었고 100 MU·min^{-1}

Table 3. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 20 cm. But 1 Gy is fixed

MU	TLD				PLD				OSLD			
	N	Mean ± SD[a]	F	p	N	Mean ± SD	F	p	N	Mean ± SD	F	p
100	10	2.16 ± 0.09[b]			10	2.18 ± 0.28[b,c]			10	2.38 ± 0.04[b]		
200	10	2.02 ± 0.10[c]			10	2.20 ± 0.05[a,b]			10	2.17 ± 0.07[c]		
300	10	2.26 ± 0.12[a]	7.189	0.000***	10	2.35 ± 0.09[a]	6.131	0.001**	10	2.32 ± 0.13[b]	1106.103	0.000***
400	10	2.17 ± 0.11[a]			10	2.25 ± 0.06[a,b]			10	2.53 ± 0.05[a]		
500	10	2.07 ± 0.09[c]			10	2.22 ± 0.15[a,b]			10	2.23 ± 0.09[c]		

Note: [a]Standard diviation. The interaction effect was determined using one-way ANOVA. Post-hoc test of Scheffe. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups. The unit is the number of mSv. **p < 0.01, ***p < 0.001.

Table 4. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 30 cm. But 1 Gy is fixed

MU	TLD				PLD				OSLD			
	N	Mean ± SD[a]	F	p	N	Mean ± SD	F	p	N	Mean ± SD	F	p
100	10	1.21 ± 0.05[a,b]			10	2.08 ± 0.50[c]			10	2.21 ± 0.21[b]		
200	10	1.21 ± 0.08[a,b]			10	2.23 ± 0.06[b]			10	2.34 ± 0.09[a]		
300	10	1.24 ± 0.07[a]	9.504	0.000***	10	2.21 ± 0.08[b,c]	6.131	0.02*	10	2.27 ± 0.11[a,b]	183.970	0.000***
400	10	1.10 ± 0.05[c]			10	2.31 ± 0.06[a]			10	2.05 ± 0.04[c]		
500	10	1.12 ± 0.06[c]			10	2.29 ± 0.15[b]			10	2.01 ± 0.06[c]		

Note: [a]Standard diviation. The interaction effect was determined using one-way ANOVA. Post-hoc test of Scheffe. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups. The unit is the number of mSv. **p < 0.01, ***p < 0.001.

에서 2.17에서 최저 선량값으로 측정되었다. PLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.29이었다. OSLD의 표층선량은 400 MU·min^{-1}에서 2.53으로 최고 선량값으로 측정되었고 200 MU·min^{-1}에서 2.17에서 최저 선량값으로 측정되었다. OSLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.36이었다. 따라서 1 Gy를 고정하고 100 MU·min^{-1}씩 증가하였을 때 최대, 최저 선량값의 차이가 TLD 11%, PLD 7%, OSLD 14%로 차이가 가장 적은 PLD의 감도가 우수하다는 것을 알 수 있다.

2.3 선량률 변화에 따른 30 cm 거리에서의 선량계 비교, 1 Gy 고정

MU·min^{-1} 변화에 따른 TLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 9.504$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 300 MU·min^{-1} (a) 높았으며, 다음 100, 200 MU·min^{-1} (a, b), 400, 500 MU·min^{-1} (c) 순으로 나타났으며, Table 4와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. MU·min^{-1} 변화에 따른 PLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 6.131$, $p < 0.05$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 400 MU·min^{-1} (a) 높았으며, 다음 200, 500 MU·min^{-1} (b)은 같은 집단이고, 300 MU·min^{-1} (b, c), 100 MU·min^{-1} (c) 순으로 나타났으며, Table 4와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. MU·min^{-1} 변화에 따른 OSLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 183.970$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 200 MU·min^{-1} (a)가 가장 높았으며, 다음 300 MU·min^{-1} (a, b), 100 MU·min^{-1} (b)이고, 400, 500 MU·min^{-1} (c)은 같은 집단으로 분류되었으며, Table 4와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

Table 4에서 TLD의 표층선량은 300 MU·min^{-1}에서 1.24로 최고 선량값으로 측정되었고, 400 MU·min^{-1}에서 1.10에서 최저 선량값으로 측정되었다. TLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.14이었다. PLD의 표층선량은 400 MU·min^{-1}에서 2.31로 최고 선량값으로 측정되었고 100 MU·min^{-1}에서 2.08로 최저 선량값으로 측정되었다. PLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.23이었다. OSLD의 표층선량은 200 MU·min^{-1}에서 2.34로 최고 선량값으로 측정되었고 500 MU·min^{-1}에서 2.01에서 최저 선량값으로 측정되었다. OSLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.33이었다. 따라서 1 Gy를 고정하고 100 MU·min^{-1}씩 증가하였을 때 최대, 최저 선량값의 차이가 TLD 12%, PLD 10%, OSLD 14%로 차이가 가장 적은 TLD의 감도가 우수하다는 것을 알 수 있다.

2.4 선량률 변화에 따른 40 cm 거리에서의 선량계 비교, 1 Gy 고정

MU·min^{-1} 변화에 따른 TLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 4.376$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 100 MU·min^{-1} (a)이 가장 높았으며, 다음 300, 400, 500 MU·min^{-1} (a, b), 200 MU·min^{-1} (c) 순으로 분류되었으며, Table 5와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있

Table 5. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 40 cm. But 1 Gy is fixed

MU	TLD				PLD				OSLD			
	N	Mean ± SDa	F	p	N	Mean ± SD	F	p	N	Mean ± SD	F	p
100	10	0.76 ± 0.01[a]			10	1.33 ± 0.05[a]			10	1.37 ± 0.05[a]		
200	10	0.71 ± 0.04[b]			10	1.36 ± 0.04[a]			10	1.24 ± 0.06[b,c]		
300	10	0.75 ± 0.03[a,b]	4.376	0.004**	10	1.31 ± 0.03[a]	1.356	0.264	10	1.27 ± 0.04[b]	192.828	0.000***
400	10	0.75 ± 0.02[a,b]			10	1.34 ± 0.05[a]			10	1.26 ± 0.04[b]		
500	10	0.74 ± 0.03[a,b]			10	1.34 ± 0.03[a]			10	1.26 ± 0.03[b]		

Note: [a]Standard diviation. The interaction effect was determined using one-way ANOVA. Post-hoc test of Scheffe. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups. The unit is the number of mSv. **p < 0.01, ***p < 0.001.

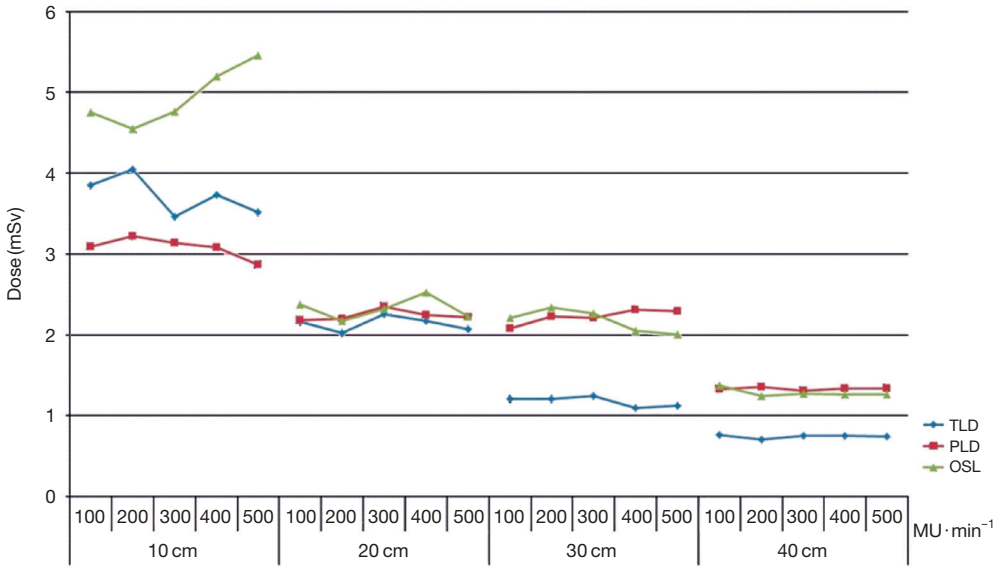

Fig. 10. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 10~40 cm. But 1 Gy is fixed.

다. MU·min^{-1} 변화에 따른 PLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(F = 1.356, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 모두 동일 집단으로 확인할 수 있다. MU·min^{-1} 변화에 따른 OSLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(F = 192.828, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 100 MU·min^{-1} (a)이 가장 높았으며, 다음 300, 400, 500 MU·min^{-1} (b)은 같은 집단이고, 200 MU·min^{-1} (b, c) 순으로 분류되었으며, Table 5와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

Table 5에서 TLD의 표층선량은 100 MU·min^{-1}에서 0.76으로 최고 선량값으로 측정되었고, 200 MU·min^{-1}에서 0.71에서 최저 선량값으로 측정되었다. TLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.05이었다. PLD의 표층선량은 200 MU·min^{-1}에서 1.36으로 최고 선량값으로 측정되었고 300 MU·min^{-1}에서 1.31에서 최저 선량값으로 측정되었다. PLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.05이었다. OSLD의 표층선량은 100 MU·min^{-1}에서 1.37로 최고 선량값으로 측정되었고 2000 MU·min^{-1}에서 1.24로 최저 선량값으로 측정되었다. OSLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.13이었다. 따라서 1 Gy를 고정하고 100 MU·min^{-1}씩 증가하였을 때 최대, 최저 선량값의 차이가 TLD 7%, PLD 4%, OSLD 9%로 차이가 가장 적은 PLD의 감도가 우수하다는 것을 알 수 있다(Fig. 10).

2.5 선량 변화에 따른 10 cm 거리에서의 선량계 비교, 400 MU·min^{-1} 고정

Gy 변화에 따른 TLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(F = 1765.889, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)일 때 가장 높았으며, 다음으로 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 측정되었으며, Table 6과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 PLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(F = 1286.919, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1

Table 6. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 10 cm. But 400 MU · min^{-1} is fixed

Dose	TLD[1]				PLD[2]				OSLD[3]			
	N	Mean ± SD[4]	F	p	N	Mean ± SD	F	p	N	Mean ± SD	F	p
1 Gy	10	3.42 ± 0.07^{e}			10	3.44 ± 0.25^{e}			10	4.10 ± 0.42^{e}		
2 Gy	10	6.59 ± 0.21^{d}			10	6.31 ± 0.24^{d}			10	7.52 ± 0.38^{d}		
3 Gy	10	10.31 ± 0.47^{c}	1765.889	0.000***	10	9.46 ± 0.22^{c}	1286.919	0.000***	10	13.51 ± 0.29^{c}	2329.850	0.000***
4 Gy	10	14.73 ± 0.45^{b}			10	11.89 ± 0.74^{b}			10	18.39 ± 0.31^{b}		
5 Gy	10	18.10 ± 0.72^{a}			10	16.38 ± 0.49^{a}			10	22.70 ± 0.86^{a}		

Note: [1]Thermoluminescent dosimeter, [2]photoluminescent dosimeter, [3]optically stimulated luminescence dosimeter, [4]standard diviation. The interaction effect was determined using one-way ANOVA. Post-hoc test of Scheffe. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups. Positive angle is the right rotation and Negative angle is the left rotation. The unit is the number of mSv. ***$p < 0.001$.

Table 7. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 20 cm. But 400 MU · min^{-1} is fixed

Dose	TLD[1]				PLD[2]				OSLD[3]			
	N	Mean ± SD[4]	F	p	N	Mean ± SD	F	p	N	Mean ± SD	F	p
1 Gy	10	2.16 ± 0.14^{e}			10	2.67 ± 0.51^{e}			10	2.27 ± 0.07^{e}		
2 Gy	10	4.33 ± 0.17^{d}			10	6.10 ± 0.19^{d}			10	6.49 ± 0.21^{d}		
3 Gy	10	6.17 ± 0.18^{c}	2356.028	0.000***	10	8.48 ± 0.30^{c}	992.321	0.000***	10	8.24 ± 0.39^{c}	1073.200	0.000***
4 Gy	10	8.37 ± 0.30^{b}			10	10.49 ± 0.18^{b}			10	12.21 ± 0.74^{b}		
5 Gy	10	10.63 ± 0.26^{a}			10	11.52 ± 0.46^{a}			10	13.67 ± 0.47^{a}		

Note: [1]Thermoluminescent dosimeter, [2]photoluminescent dosimeter, [3]optically stimulated luminescence dosimeter, [4]standard diviation. The interaction effect was determined using one-way ANOVA. Post-hoc test of Scheffe. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups. Positive angle is the right rotation and Negative angle is the left rotation. The unit is the number of mSv. ***$p < 0.001$.

Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 6과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 OSLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 2329.850$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음으로 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 6과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다 (Table 6).

Table 6에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, TLD는 $r = 0.996$ ($p < 0.001$), PLD는 $r = 0.991$ ($p < 0.001$), OSLD는 $r = 0.995$ ($p < 0.001$) 순으로 pearson 상관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 10 cm 거리에서는 TLD가 에너지 의존성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다.

2.6 선량 변화에 따른 20 cm 거리에서의 선량계 비교, 400 MU · min^{-1} 고정

Gy 변화에 따른 TLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 2356.028$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음으로 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 7과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 PLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 992.321$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 7과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 OSLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 1073.200$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a) 높았으며, 다음으로 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 7과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다 (Table 7).

Table 7에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, TLD는 $r = 0.995$ ($p < 0.001$), PLD는 $r = 0.975$ ($p < 0.001$), OSLD는 $r = 0.983$ ($p < 0.001$) 순으로 pearson 상관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 20 cm 거리에서는 TLD가 에너지 의존성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다.

2.7 선량 변화에 따른 30 cm 거리에서의 선량계 비교, 400 MU · min^{-1} 고정

Gy 변화에 따른 TLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 2598.816$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음으로 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 8과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 PLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F =$

Table 8. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 30 cm. But 400 MU · min^{-1} is fixed

Dose	TLD[1]				PLD[2]				OSLD[3]			
	N	Mean ± SD[4]	F	p	N	Mean ± SD	F	p	N	Mean ± SD	F	p
1 Gy	10	1.18 ± 0.10^{e}			10	2.20 ± 0.11^{e}			10	2.23 ± 0.09^{e}		
2 Gy	10	2.35 ± 0.13^{d}			10	5.04 ± 0.10^{d}			10	3.20 ± 0.17^{d}		
3 Gy	10	3.58 ± 0.11^{c}	2598.816	0.000***	10	7.57 ± 0.20^{c}	611.192	0.000***	10	4.95 ± 0.43^{c}	882.855	0.000***
4 Gy	10	4.73 ± 0.11^{b}			10	9.51 ± 0.54^{b}			10	6.43 ± 0.28^{b}		
5 Gy	10	6.26 ± 0.15^{a}			10	10.04 ± 0.72^{a}			10	8.66 ± 0.26^{a}		

Note: [1]Thermoluminescent dosimeter, [2]photoluminescent dosimeter, [3]optically stimulated luminescence dosimeter, [4]standard diviation. The interaction effect was determined using one-way ANOVA. Post-hoc test of Scheffe. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups. Positive angle is the right rotation and Negative angle is the left rotation. The unit is the number of mSv. ***p < 0.001.

Table 9. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 40 cm. But 400 MU · min^{-1} is fixed

Dose	TLD[1]				PLD[2]				OSLD[3]			
	N	Mean ± SD[4]	F	p	N	Mean ± SD	F	p	N	Mean ± SD	F	p
1 Gy	10	0.74 ± 0.09^{e}			10	1.28 ± 0.06^{e}			10	1.28 ± 0.07^{e}		
2 Gy	10	1.47 ± 0.09^{d}			10	2.65 ± 0.14^{d}			10	1.76 ± 0.49^{d}		
3 Gy	10	2.36 ± 0.20^{c}	659.217	0.000***	10	4.45 ± 0.18^{c}	1224.907	0.000***	10	4.63 ± 0.27^{c}	474.657	0.000***
4 Gy	10	3.12 ± 0.16^{b}			10	5.60 ± 0.18^{b}			10	5.07 ± 0.22^{b}		
5 Gy	10	3.67 ± 0.17^{a}			10	6.80 ± 0.34^{a}			10	5.56 ± 0.21^{a}		

Note: [1]Thermoluminescent dosimeter, [2]photoluminescent dosimeter, [3]optically stimulated luminescence dosimeter, [4]standard diviation. The interaction effect was determined using one-way ANOVA. Post-hoc test of Scheffe. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups. Positive angle is the right rotation and Negative angle is the left rotation. The unit is the number of mSv. ***p < 0.001.

611.192, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 8과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 OSLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(F = 882.855, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 8과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다(Table 8).

Table 8에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, TLD는 r = 0.996 (p < 0.001), PLD는 r = 0.967 (p < 0.001), OSLD는 r = 0.986 (p < 0.001) 순으로 pearson 상관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 30 cm 거리에서는 TLD가 에너지 의존성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다.

2.8 선량 변화에 따른 40 cm 거리에서의 선량계 비교, 400 MU · min^{-1} 고정

Gy 변화에 따른 TLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(F = 659.217, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 나타났으며, Table 9와 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 PLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(F = 1224.907, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 9와 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 OSLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(F = 474.657, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 선량은 5 Gy (a)에서 가장 높았으며, 다음으로 4 Gy (b), 3 Gy (c), 2 Gy (d), 1 Gy (e) 순으로 분류되었으며, Table 9와 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다(Table 9).

Table 9에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, TLD는 r = 0.989 (p < 0.001), PLD는 r = 0.992 (p < 0.001), OSLD는 r = 0.933 (p < 0.001) 순으로 pearson 상관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 40 cm 거리에서는 PLD가 에너지 의존성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다(Fig. 11).

3. 방향 의존성

방향성에 따른 TLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(F = 63.187, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 방향성 0° (a)가 가장 높았으며, 다음 15° (b), 30°, −15°, −30° (c), 45°, −45° (d), 60°, −60° (e), 75°, −75° (f), 90°, −90° (g) 순으로 집단이 구성되었다. 다음 방향성

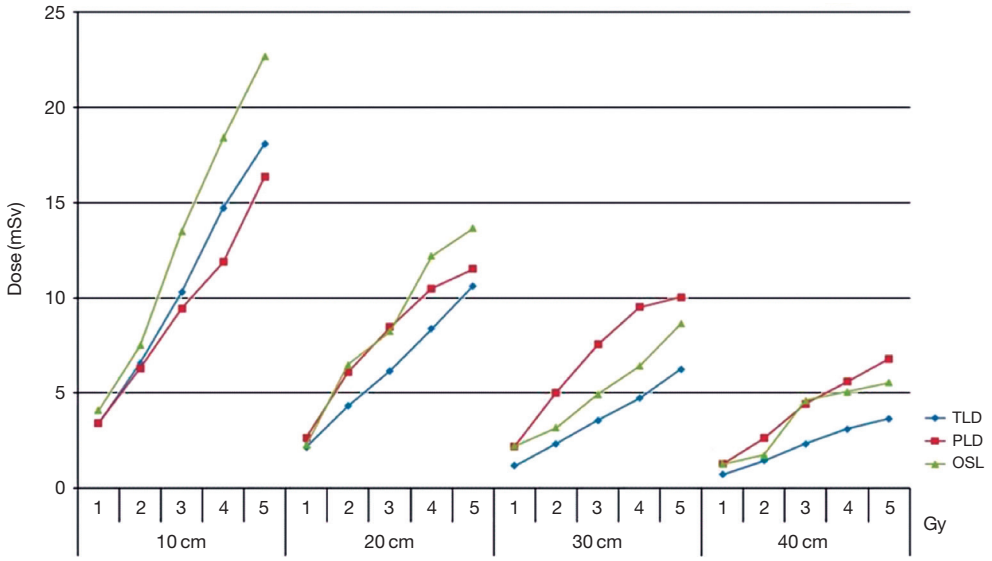

Fig. 11. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 40 cm. But 400 MU · min^{-1} is fixed.

Table 10. When exposuring X-ray, the evaluation of TLD, PLD and OSLD direction dependence by dosimeter angle

Angle	TLD[1]				PLD[2]				OSLD[3]			
	N	Mean ± SD[4]	F	p	N	Mean ± SD	F	p	N	Mean ± SD	F	p
+90°	10	0.88 ± 0.05[g]			10	0.82 ± 0.07[f]			10	0.53 ± 0.05[g]		
+75°	10	1.08 ± 0.03[f]			10	1.25 ± 0.12[e]			10	0.84 ± 0.04[f]		
+60°	10	1.15 ± 0.05[e]			10	1.71 ± 0.18[d]			10	0.94 ± 0.07[e]		
+45°	10	1.26 ± 0.02[d]			10	2.21 ± 0.09[c]			10	1.14 ± 0.11[d]		
+30°	10	1.33 ± 0.04[c]			10	2.81 ± 0.04[b]			10	1.79 ± 0.14[c]		
+15°	10	1.45 ± 0.03[b]			10	2.95 ± 0.07[b]			10	2.14 ± 0.23[b]		
0°	10	1.63 ± 0.05[a]	63.187	0.000***	10	3.12 ± 0.04[a]	174.287	0.000***	10	3.57 ± 0.14[a]	98.526	0.000***
−15°	10	1.32 ± 0.04[c]			10	2.84 ± 0.08[b]			10	2.35 ± 0.08[b]		
−30°	10	1.29 ± 0.02[c]			10	2.75 ± 0.05[b]			10	1.84 ± 0.12[c]		
−45°	10	1.23 ± 0.03[d]			10	2.44 ± 0.15[c]			10	1.27 ± 0.09[d]		
−60°	10	1.19 ± 0.02[e]			10	1.83 ± 0.21[d]			10	1.12 ± 0.03[e]		
−75°	10	1.02 ± 0.05[f]			10	1.31 ± 0.13[e]			10	0.98 ± 0.05[f]		
−90°	10	0.85 ± 0.06[g]			10	0.91 ± 0.09[f]			10	0.64 ± 0.07[g]		

Note: [1]Thermoluminescent dosimeter, [2]photoluminescent dosimeter, [3]optically stimulated luminescence dosimeter, [4]standard diviation. The interaction effect was determined using one-way ANOVA. Post-hoc test of Scheffe. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups. Positive angle is the right rotation and Negative angle is the left rotation. The unit is the number of mSv. ***$p < 0.001$.

에 따른 PLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($F = 174.287$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 0° (a)가 가장 높은 집단을 구성하였으며, 다음 30°, 15°, −15°, −30° (b), 45°, −45° (c), 60°, −60° (d), 75°, −75° (e), 90°, −90° (f) 순으로 집단이 구성되었다. 다음 방향성에 따른 OSLD 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($F = 98.526$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 방향성 0° (a)가 가장 높았으며, 다음 15° (b), −15° (b), 30°, −30° (c), 45°, −45° (d), 60°, −60° (e), 75°, −75° (f), 90°, −90° (g) 순으로 집단이 구성되었다(Table 10).

Table 10에서 TLD의 표층선량은 0°에서 1.63으로 최고 선량값을 보였고 −90°에서 0.85에서 최저 선량값을 나타내었다. TLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.78이었다. PLD의 표층선량은 0°에서 3.12로 최고 선량값을 보였고 90°에서 0.82에서 최저 선량값을 나타내었다. PLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 2.30이었다. OSLD의 표층선량은 0°에서 3.57로 최고 선량값을 보였고 90°에서 0.53에서 최저 선량값을 나타내었다. OSLD 표층선량 최고값, 최저값 차이는 3.04이었다. 따라서 방향 의존성 실험에서는 TLD가 0°에서 −90°의 표층선량은 48%의 감소율을 보였으며, PLD는 0°에서 90°의 표층선량은 74%의 감소율을 보였으며, OSLD는 0°에서 90°의 표층선량은 86%의 감소율을 보였으므로 TLD가 방향 의존성이 가장 적고 PLD, OSLD 순으로 방향 의존성이 커짐을 알 수 있다(Fig. 12).

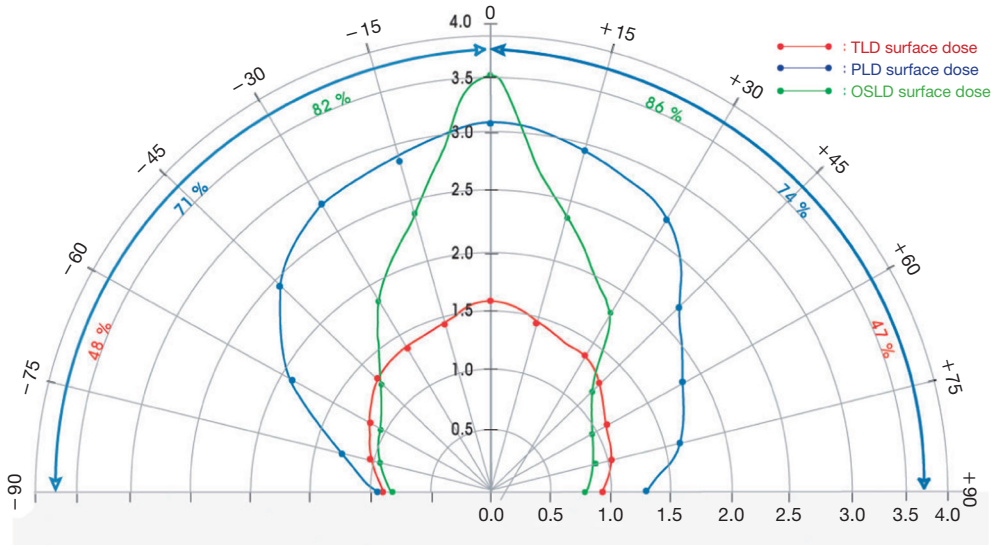

Fig. 12. When exposuring X-ray, the evaluation of TLD, PLD and OSLD direction dependence by dosimeter angle.

고 찰

X선의 발생은 먼저 필라멘트를 가열한 다음 교류고전압을 직류고전압으로 변환시켜 X선관의 양단에 인가시켜서 이루어진다. 진단용 X선관전압의 조정은 고전압 변압기 1차 전압 변동에 의존하며, 관전류의 조정은 가열변압기 1차 전압변동, 노출 시간은 고전압 1차회로가 폐쇄되는 시간에 의하여 결정된다(Ko *et al*. 1995). 일단 방사선이 발생되면 그것은 어떤 물질과 만나 상호작용을 일으키게 된다. 이런 상호작용의 결과로 방사선이 물질 속을 통과할 때 어떤 것은 흡수되고 어떤 것은 처음의 진행방향이 굴곡되어 이른바 산란을 일으키기도 하고 또 어떤 것은 처음의 진행방향을 일으키는 일이 없이 통과하는 것도 있다. 이들 중 흡수되는 방사선량을 피폭선량이라고 하며, 방사선은 흡수한 물질이 식물이나 동물 등의 생명체일 경우 여러 가지 방사선 장해를 수반하게 된다(Jeon *et al*. 2012). 그래서 방사선 작업종사자의 피폭선량을 정확히 측정할 수 있는 측정 방법을 통해 작업상에서 방사선 피폭에 따른 방사선 장해를 방지하고 허용선량 기준 내에서 방사선 피폭을 최소한으로 경감시키는 노력이 절대적으로 필요하다. 과거부터 개인의 피폭선량을 측정하는 기본 선량계로는 감광 또는 흑화작용 등 화학 작용을 이용한 FD와 형광 또는 섬광 등 여기 작용을 이용한 TLD에 의해 개인피폭 선량관리가 이루어졌다(Choi *et al*. 2012). TLD는 현재 개인피폭관리(personal exposure management)와 방사선 모니터링(radiation monitoring)에 많이 이용되고 있으며 크기가 작고 방사선에 대한 감도(sensitivity)가 높고 재사용이 가능하다는 장점이 있다(Dong *et al*. 2011). 한편, TLD 감도의 에너지 의존성의 이론

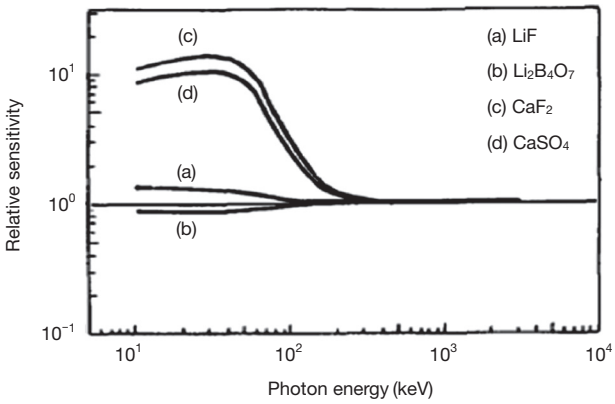

Fig. 13. The calculated energy dependence of some TL phosphors.

적 계산은 (a) TLD 물질이 전자평형 상태에 있고 (b) 검출기 자체에 의한 흡수를 무시할 수 있으며 (c) 단위선량당의 TL의 광량(light yieid/rad)이 LET (linear energy transfer)에 독립적이라 가정할 때 Bragg의 원리로부터 다음과 같이 계산할 수 있다. 즉 TLD의 에너지 의존성은 공기를 표준물질로 택할 때(공기에 대해서는 정의에 따라 조사선량을 정확히 측정할 수 있고 조사선량과 흡수선량의 비가 일정함으로 표준물질로서 적합함) 공기와 TLD 물질의 질량-에너지 흡수계수의 비로서 계산할 수 있다. 따라서 TLD 물질의 질량-에너지 흡수계수를 (μen/ρ)d, 공기의 질량-에너지 흡수계수를 (μen/ρ)air라 할 때 에너지 의존성 S(E)는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Eq. 1).

$$S(E) = \frac{[\mu en/\rho]d}{[\mu en/\rho]air} \quad (1)$$

TLD의 감도의 에너지 의존성을 계산할 때 TLD 물질 내에 원자번호가 큰 불순물이나 dopant가 있을 경우에는 이를 고려하여야 한다. 따라서 Fig. 13은 TLD로서 가장 많이 사용하는 열형광체에 대해서 Hub bell의 질량-에너지 흡수계수의 표를 이용하여 식에 의해서 이론적으로 계산한 에너지 의존성을 사용한다(Fig. 13) (Park *et al*. 1993).

또한 정확한 측정을 위해 각각 소자에 대한 교정이 필요하며 조사 후 퇴행현상(fading)이 나타나는 문제점이 있다. 이러한 기존선량계에 대한 문제점들로 인해 최근 들어 새롭게 소개되고 있는 것이 바로 형광유리선량계이다. 특히 PLD는 방사선에 조사된 유리소자가 자외선에 의한 여기로 주황색 형광을 발하는 현상(radiophotoluminescence: RPL)을 이용한 고체선량계로서 우편으로도 이송이 가능하며 판독과정 및 취급방법은 TLD에 비해 매우 간단하고 유효크기 또한 작아 소조사면에 대한 선량평가에 효과적이라고 알려져 있다. 그러나 기존의 다른 선량계에 비해 국내에서는 PLD의 특성 및 선량측정의 정확도 등 아직까지 알려진 연구가 미비하다(Dong *et al*. 2011). 광자극 발광은 결정내의 트랩준위에 포화된 전자가 광자극을 통하여 여기되고 재결합센터의 양공과 재결합하는 과정에서 빛이 방출되는 현상이며, 측정과 어닐링과정에서 열을 가하지 않으므로 물질의 특성이 변화가 없고, 동일한 물질에 대하여 반복적이 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. OSLD는 광자극 발광 광량이 흡수한 방사선의 선량에 일정영역 범위 내에서 비례하는 특성을 이용한 선량계이다(Pradhan *et al*. 2008; Lim *et al*. 2011). 전리함은 방사선량을 측정할 수 있는 대표적 가스형 방사선 검출기 중 하나이며, 구조가 단순하고 장기간 동작 성능이 안정적이며, 방사선량에 대한 선형성이 우수하므로 방사선 선량 측정을 위하여 가장 널리 쓰이는 검출기 중 하나이다. 이온 챔버는 방사선 각각의 에너지를 구분하여 측정하지 못하며, 자체 신호 증폭이 없기 때문에 출력 신호가 작아서 노이즈를 최소화하여야 하는 단점이 있다(Park *et al*. 2005; Park *et al*. 2010). Dong의 연구에서는 TLD가 PLD보다 감도가 우수하다고 하였으나(Dong *et al*. 2011), 본 연구에서는 OSLD의 감도가 가장 우수했다. 방사선 작업종사자는 엑스선 선속(beam)에 직접 노출되기도 하고, 환자에서 산란되는 상당한 양의 1차 산란 방사선과 상대적으로 적지만 촬영실 벽에서 산란되는 2차 산란 방사선에도 노출된다(Araki *et al*. 2003). 따라서 방사선 작업종사자는 불가피하게 방사선에 대한 피폭을 피할 수 없기 때문에 정확한 측정이 요구된다.

결 론

현재 널리 사용 되고 있는 TLD, PLD 및 OSLD의 방향의존성(Angular Dependence) 비교 분석을 통하여 기준이 되는 개인피폭선량계의 기초 근거 자료를 제시함으로써, 다양한 개인 피폭선량계의 특성을 파악하고, 작업 환경에 따른 선택적 적용의 가능성을 확인하고자 하였다. 그 결과를 요약하면 치료용 선형가속기의 재현성을 실험해 본 결과 변동계수가 모두 2% (0.02) 이내에서 잘 일치하는 결과를 얻어 보였다. 그리고 선량률, 거리에 따른 감도 측정결과 표층 선량은 종합적으로 분석하여 봤을 경우, PLD 감도가 우수하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 선량에 따른 에너지 의존성을 비교해 본 결과 종합적으로 분석하여 봤을 경우, pearson 상관계수 값이 1에 가까운 결과를 보여주었던 TLD가 우수하다는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 방향 의존성 실험에서는 TLD가 0°에서 −90°의 표층선량은 48%의 감소율을 보였으며, PLD는 0°에서 90°의 표층선량은 74%의 감소율을 보였으며, OSLD는 0°에서 90°의 표층선량은 86%의 감소율을 보였으므로 TLD가 방향 의존성이 가장 적고 PLD, OSLD 순으로 방향 의존성이 커짐을 알 수 있다. 연구를 시행하기 전, TLD가 방향 의존성이 좋지 않아 그 결점을 보완할 차세대 선량계의 발견에 초점을 맞추고 시작하였으나 위와 같은 결과를 종합해볼 때 TLD가 치료용 선형가속기의 고에너지 엑스선 에너지에서 감도와 방향성이 우수하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 고에너지 영역에서는 선량률, 거리에 따른 감도 측정결과 PLD가 우수하였고, 방향 의존성 실험에서도 TLD가 우수하였다. 또한 방향 의존성실험에서 각도에 따른 차이는 선량계의 구조와 기하학적인 원리에 의하여 차이가 있는 것도 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 기준으로 의료현장에서 근무하는 곳의 특성에 따라 개인피폭 선량계의 선택이 필요하며 그에 따라 좀 더 정확한 유효피폭선량의 측정과 함께 피폭 방지와 예방에 도움을 준다면 방사선 종사자의 건강관리 및 윤택한 생활에 도움을 줄 것이다.

참 고 문 헌

Araki F, Ikegami T, Ishidoya T and Kubo DH. 2003. Measurements of Gamma-Knife helmet output factors using a radiophotoluminescent glass rod dosimeter and a diode detector. *Med. Phys*. **30**(8):1976-1981.

Asahi Techno Glass Corporation. 2000. Explanation material of RPL glass dosimeter; Small element system. Tokyo. Japan.

Choi JH, Kang GJ and Jang SG. 2012. Comparison on the Dosimetry of TLD and PLD by Dose Area Product. *J. Korea Cont. Assoc*. **12**(3):244-250.

Dong KR, Kweon DC, Chung WK, Goo EH, Kevin D and Choe CH. 2011. Study on the angular dependence of per-

sonal exposure dosimeter - Focus on thermoluminescent dosimeter and photoluminescent dosimeter. *Ann. Nucl. Energy* **38**(2-3):383-388.

Ha HY. 1992. A Study for Reduction of Radiation Dose in the Field of Diagnostic Radiology - A point of Tube Voltage and Filtration. *J. Radiol. Sci. Technol.* **15**(1):89-97.

Huntley DJ, Godfrey-Smith DL and Thewalt MLW. 1985. Optical Dating of Sediments. *Nature* **313**:105-107.

ICRP. 1990. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Pergamon Press, New York.

ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Pergamon Press, New York.

ICRU. 1992. Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 47.

ICRU. 1993. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51.

Jeon ME, Lim CS, Jung HR, You IG, Hong DH and Kang BS. 2012. A Study on Radiation Exposure Dose of Operator During Interventional Radiology Procedure. *J. Radiol. Sci. Technol.* **35**(3):219-226.

Kim DS and Park MH. 1998. The light sensitivity and angular dependence of the Mg_2SIO_4:(MSO-S)TLD. *J. Korea Asso. Radiat. Prot.* **23**(1):59-63.

Ko SG, Ahn BS, Jang SS, Choi JW and Shin YS. 1995. A Study of X-ray Output for Diagnostic X-ray Equipment. *J. Radiol. Sci. Technol.* **18**(2):61-73.

Kwon JW, Kim HK, Yang JS, Kim JL and Lee JK. 2004. Design of a TL personal dosimeter identifiable PA exposure and development of its dose evaluation algorithm. *J. Korea Asso. Radiat. Prot.* **29**(3):179-186.

Le Masson NJM, Bos AJJ, Winkelman AJM and van Eijk CWE. 2001. Optically Stimulated Luminescence in $KMgF_3 : Ce^{3+}$ Comparison of Dosimetric Characteristics With Al_2O_3 : C. *IEEE Transactions Nucl. Sci.* **48**(4):1143-1147.

Lee HY, Park KJ, Shim SK and Kim CK. 1987. Radiation Doses from Occupational Exposure to the Radiological Workers. *Report of NIH Korea* **23**:831-832.

Lim CS, Lee SB and Jin GH. 2011. Performance of optically stimulated luminescence Al_2O_3 dosimeter for low doses of diagnostic energy X-rays. *Appl. Radiat. Isotop.* **69**(10):4186-1489.

Mckeever SW. 2002. New Millennium Frontiers of Luminescence Dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* **100**(1-4):27-32.

Mobit PN, Mayes P and Nahum AE. 1996. The quality dependence of LiF TLD in megavoltage photon beams: Mont Carlosimulation and experiments. *Phys. Med. Biol.* **41**(3):387-398.

Mobit PN, Nahum AE and Mayles P. 1998. A Monte Carlo study of the quality dependence factors of common TLD materials in photon and electron beam. *Phys. Med. Biol.* **43**(8):2015-2032.

Park MH, Lee JI and Kwon DM. 1993. The Compensation of the Energy Dependence of TLD. *J. Radiol. Sci. Technol.* **16**(2):51-60.

Park SH, Eom SH, Shin HS, Lim HI, Ha JH and Kim HS. 2010. Fabrication of Ionization Chamber to Measure the Burnup of Spent Fuel. *J. Radiat. Prot. Res.* **35**(1):21-25.

Park SH, Kim HS, Kim YK, Kang SM, KIM JC and Kim JK. 2005. Saturation characteristics of the ionization chamber at a low dose rate. *Radiat. Phys. Chem.* **73**(5):248-253.

Pradhan AS. 1981. Thermoluminescence Dosimetry and its applications. *Radiat. Prot. Dosim.* **1**(3):153-167.

Pradhan AS, Lee JI and Kim JL. 2008. Recent developments of optically stimulated luminescence materials and techniques for radiation dosimetry and clinical applications. *J. Med. Phys.* **33**(3):85-99.

Rah JE, Shin DO, Hong JY, Kim HS, Lim CI, Jeong HG and Suh TS. 2006. Study on dosimetric propertie of radiophotoluminescent glass rod detector. *J. Korea Asso. Radiat. Prot.* **31**(4):181-186.

Tsuda M. 2000. A few remarks on photoluminescence dosimetry with high energy x-ray. Japanese *J. Med. Phys.* **20**(3):131-139.

Received: 10 October 2017
Revised: 4 November 2017
Revision accepted: 16 November 2017