



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2013年 2月

博士學位 論文

의료용 X-선 조사 시
개인피폭선량계의 방향 및 에너지
의존성에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

金 鎬 成

의료용 X-선 조사 시
개인피폭선량계의 방향 및 에너지
의존성에 관한 연구

A study on the direction and energy dependency of personal
exposure dosimeter for medical x-ray irradiation

2013年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

金 鎬 成

의료용 X-선 조사 시
개인피폭선량계의 방향 및 에너지
의존성에 관한 연구

指導教授 鄭 運 官

이 論文을 原子力工學 博士學位申請 論文으로 提出함

2012年 10月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

原子力工學科

金 鎬 成

金鎬成의 博士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 金澤鉉 (印)

委員 朝鮮大學校 教授 李庚鎭 (印)

委員 信興大學校 教授 馬相哲 (印)

委員 江原大學校 教授 金泰亨 (印)

委員 朝鮮大學校 教授 鄭運官 (印)

2012 年 12 月

朝鮮大學校 大學院

목 차

표 목차	ii
그림 목차	iv
ABSTRACT	vi
I. 연구배경	1
II. 연구목적	4
III. 실험기기 및 실험방법	
A. X-선 발생장치의 에너지 영역과 영역별 실험기기	4
B. 실험방법	11
IV. 결과	
A. 저 에너지 영역	17
B. 중 에너지 영역	37
C. 고 에너지 영역	46
V. 고찰	
A. 선량계의 측정원리 및 구조	64
B. 선량계의 판독	76
C. 선형가속기	79
VI. 결론	91
참고문헌	96

표 목 차

표 1	According to the dose limit of ICRP*103	1
표 2	Comparison of Typical Doses in UK from CT and Conventional X-ray Examinations	5
표 3	Table 2. kVp, mA, mAs Accuracy Test	17
표 4	Repeatability Evaluation with Different Dosimeters	18
표 5	Dosimeters comparison at a distance of 0 cm	19
표 6	Dosimeters comparison at a distance of 5 cm	20
표 7	Dosimeters comparison at a distance of 10 cm	21
표 8	Dosimeters comparison at a distance of 15 cm	22
표 9	Dosimeters comparison at a distance of 20 cm	23
표 10	The comparison of dose in ion chamber with the change of mAs at 100kVp	25
표 11	The comparison of dose in Piranha with the change of mAs at 100kVp	26
표 12	The comparison of dose in TLD with the change of mAs at 100kVp	27
표 13	The comparison of dose in PLD with the change of mAs at 100kVp	28
표 14	The comparison of dose in OSLD with the change of mAs at 100kVp ..	29
표 15	The comparison of dose in ion chamber with the change of kVp at 25mAs	31
표 16	The comparison of dose in Piranha with the change of kVp at 25mAs ..	32
표 17	The comparison of dose in TLD with the change of kVp at 25mAs	33
표 18	The comparison of dose in PLD with the change of kVp at 25mAs	34
표 19	The comparison of dose in OSLD with the change of kVp at 25mAs	35
표 20	Reproducibility of X-ray Fluoroscopy Device	37
표 21	TLD and PLD Surface Dose of Distance	38
표 22	TLD and PLD Depth Dose of Distance	40
표 23	TLD and PLD Angular Dependence Surface Dose	42
표 24	TLD and PLD Angular Dependence Depth Dose	44
표 25	Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 10cm. But	

1Gy is fixed	47
⌘ 26 Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 20cm. But 1Gy is fixed	49
⌘ 27 Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 30cm. But 1Gy is fixed	50
⌘ 28 Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 40cm. But 1Gy is fixed	52
⌘ 29 Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 10cm. But 400MU/min is fixed	54
⌘ 30 Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 20cm. But 400MU/min is fixed	55
⌘ 31 Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 30cm. But 400MU/min is fixed	56
⌘ 32 Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 40cm. But 400MU/min is fixed	58
⌘ 33 When exposing X-ray, the evaluation of TLD, PLD and OSLD direction dependence by dosimeter angle	60
⌘ 34 The structure of device and filter of Carot dosimeter	65
⌘ 35 The structure of device and filter of UD-802 dosimeter	66
⌘ 36 Composition of UD-802AT, TLD	69
⌘ 37 The comparison of the principle of luminescence in various detectors	73

그림 목 차

그림 1	Digital diagnosis X-ray generator	6
그림 2	Whole body phantom (PBU-10)	6
그림 3	Multi function QA Operator (Piranha 657)	7
그림 4	Ion Chamber (4000M+X-ray test device)	7
그림 5	X-ray Fluoroscopy (DXG-550RF, Under tube)	8
그림 6	Radiation treatment linear accelerator (CLINAC 21IX)	9
그림 7	LINACHECK (PTWUNIDOS, PTW)	9
그림 8	Rando phantom (RAN-110)	10
그림 9	Thermoluminescent dosimeter (UD-802AT)	10
그림 10	Photoluminescent dosimeter (GD-450)	10
그림 11	Optically stimulated luminescence dosimeters (LANDAUER Inc.)	10
그림 12	Measure scattering rays by distance	11
그림 13	Position of dosimeters(measure scattering rays by distance and Angle)	13
그림 14	The experiment of direction dependency of photoluminescent glass dosimeter	14
그림 15	Test method of energy dependence	15
그림 16	Test method of Angular dependence	16
그림 17	Dosimeters comparison by different Distances	23
그림 18	Dosimeters comparison by different mAs	30
그림 19	Dosimeters comparison by different kVp	36
그림 20	TLD, PLD and OSLD Surface Dose of Distance	39
그림 21	TLD, PLD and OSLD Depth Dose of Distance	41
그림 22	TLD, PLD and OSLD Angular Dependence Surface Dose	43
그림 23	TLD, PLD and OSLD Angular Dependence Depth Dose	45
그림 24	Reproducibility evaluation	46
그림 25	Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 10-40cm. But 1Gy is fixed	53
그림 26	Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 40cm. But	

400MU/min is fixed	59
그림 27 When exposing X-ray, the evaluation of TLD, PLD and OSLD direction dependence by dosimeter angle	61
그림 28 The calculated energy dependence of some TL phosphors	63
그림 29 Thermoluminescent dosimeter principle	65
그림 30 The structure of Carot dosimeter	66
그림 31 The structure of UD-802AT dosimeter	67
그림 32 TL emission process	68
그림 33 Radiophotoluminescence phenomenon	70
그림 34 Photoluminescent dosimeter luminous principle	71
그림 35 GD-450 filter organization	73
그림 36 GD-450 metal filter	73
그림 37 Principle of Photoluminescent dosimeter	74
그림 38 Schematic diagram of OSLD Reader	75
그림 39 The relationship between incident radiation and the light generated on each filter	78
그림 40 The illustration of Percent Depth Dose (PDD)	80
그림 41 The change of Percent Depth Dose (PDD) with variations of changing SSD	82
그림 42 The definition of Tissue-air ratio(TAR)	84
그림 43 The relationship between TAR and PDD	85
그림 44 The definition of Tissue- phantom ratio(TPR)	87
그림 45 The definition of Collimator scattering factor	88
그림 46 Phantom Scatter factor(SCD = SAD)	89
그림 47 The definition of Tumor dose(TD) and the method of radiation exposure in SSD therapy and SAD therapy	90

ABSTRACT

A study on the direction and energy dependency of personal exposure dosimeter for medical x-ray irradiation

Kim, Ho-Sung

Advisor : Prof. Chung, Woon-kwan, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Purposes We measured the scattered radiation occurred when low, medium, high energy x-ray were radiated to a human body phantom respectively by using 3 types of personal dosimeter; TLD, PLD, OSLD under the clinical environment.

So that, we intended to understand the characteristics of the scattered radiation with different distances and directions and select the best dosimeter that has the lowest energy and direction dependency to present the basic information which can be the standards for the new personal dosimeter hereafter.

Methods An anthropomorphic phantom was irradiated by a general x-ray machine for low energy, a fluoroscopy for medium energy while for high energy is a linear accelerator of radiation therapy machine and scattered radiation was measured by an ion chamber to check traceability of the standard source.

We used 3 types of personal dosimeters including TLD, PLD, OSLD to test the sensitivity according to the direction and distance. For each experiment, we repeated the measurements more than 10 times to improve accuracy and comparatively analyzed the angular dependence by using the one way ANOVA method to understand differences on the distance and angle. And also, if there are any considerable differences between the groups from ANOVA methods, we applied SCHEFF'S method for further cause analysis.

Results In the low energy category, the OSLD was best in sensitivity depending on distance, amount of radiation and intensity. The TLD is most accurate with kVp

variance in energy dependency. The PLD is most superior with mAs variance in energy dependency. There are no differences in angular dependencies.

In the medium energy category, the TLD is most accurate in sensitivity and the PLD is most accurate in angular dependency.

In the high energy category, the PLD is most accurate from all of the dependencies.

Conclusion These three devices are universally used as individual radiation monitoring devices. Results of the three measuring devices' indicate that the OSLD is most accurate in determining low energies and the PLD is most accurate in determining the medium and high energy levels. And also the PLD is most accurate in angular dependencies in whole energy level.

Based on the results that were acquired in a clinical environment, it is important to select the appropriate monitoring device that is best suited for the energy level and type of equipment being used. This will ensure that the safety of health care workers is maintained.

key word: TLD, PLD, OSLD, ion chamber, Piranha, PBU-10, rando phantom, energy dependency, direction dependency

I. 연구배경

1895년 뢰트겐(W.C Röntgen)에 의해 X-선이 발견된 이후 방사선의 이용 가치는 급격하게 발전되어 의학·공학·이학 등의 분야에서 광범위하게 이용되고 있으며^[1] 그 중에서도 현대 의학에 있어서 방사선 분야는 건강 검진의 증가와 방사선 진단장치(Radiation diagnostic equipment)의 발달로 진단(diagnostic)에서 치료(therapy)까지 관련 분야에서 업무 확대 및 업무량의 증가로 인하여 방사선작업종사자(radiation workers)의 수가 증가하고 있어 종사자의 방사선피폭(radiation exposure) 관리가 중요하게 대두 되고 있다^[2]. 우리나라에서도 급속한 산업화와 더불어 방사선의 이용기관수는 전 산업분야에 걸쳐 매년 10% 이상 증가되고 있고, 방사선작업종사자수도 비례하여 늘어나고 있다. 이러한 증가 추세와는 다르게 방사선에 대한 허용피폭선량의 제한치는 더욱 더 낮아지는 경향이며, 이에 맞추어 방사선안전관리는 한층 더 중요시되고 있다.^[3](Table 1)

Table 1. According to the dose limit of ICRP* 103

Division		Radiation workers	Resident visitors and transportation workers	General persons
1. Effective dose limit		100 mSv/five years with exceeding 50 mSv/year	12 mSv/year	1 mSv/year
2.Dose Equivalent	Eye lens	150 mSv/year	15 mSv/year	15 mSv/year
	Hands, feet and skin	500 mSv/year	50 mSv/year	50 mSv/year

*국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection: ICRP)

방사선의 피폭은 크게 세 가지로 분류할 수 있는데 관리자의 제어 하에 있는 피폭 원인으로 인하여 시설에 종사하는 모든 사람이 고용주가 누구이건 그들이 기관의 방사선 관계분야에 관여하든 아니든 관계없이 받는 피폭인 직업상피폭, 자신의 진단이나 치료 목적으로 또는 직업상 피폭을 제외하고 그런 환자를 병원이나 가정에서 돌보고 안정시키는 가족과 친지가 알면서 자의적으로 받는 의료상 피폭, 기타의 모든 피폭으로 구성

되는 공중의 피폭이 있다.^[4] 그 중에서 국민의 인공방사선 피폭 중 거의 대부분을 차지하는 피폭원은 의료방사선이다. 소득 수준의 향상으로 진료의 빈도가 늘어나고 정교한 의료방사선 기술이 추가됨에 따라 환자가 진료과정에서 피폭하는 의료 상 피폭은 증가하는 추세에 있다. 이런 선량의 증가는 의료용 방사선사용에 의한 피폭선량 문제가 과거의 특정 소수에만 국한된 문제에서 방사선 관계 종사자나 피검자 모두가 가장 염두에 두어야 할 문제로 대두되게 하였다.^[5]

일반적으로 X선이 물체를 통과할 때, 입사한 X선과 방향이 다른 2차 X선이 나오는데 이러한 2차 X선을 산란선이라 하며, 산란의 결과에 따라서 톰슨(Thomson)의 산란과 콤프턴(Compton)의 산란으로 나누어지며 산란 방향에 따라서 후방 산란선과 전방 산란선으로 나뉜다. 후방 산란선(Back Scattered Radiation)이란 입사 방향에 대해 90° 이상의 산란각을 가진 산란선 방사선을 피사체에 조사했을 때, 방사선의 일부는 피사체를 투과하지만 산란선도 발생한다. 전방 산란선 (Forward Scattered Radiation)이란 산란각이 90° 미만인 산란선. 방사선이 피사체에 조사되면 방사선의 일부는 피사체를 투과하여 투과선이 되지만, 시험체로부터 산란선도 발생한다. 산란선 중 투과선 방향으로 산란되는 것을 전방 산란선이라 하며, 선원 쪽으로 산란되는 것은 후방 산란선이라 한다.^[6] 이러한 산란선은 거리역자승의 법칙에 적용이 되는데 거리 역자승 법칙이란 X-선, γ-선은 빛과 같은 전자파이기 때문에 방사선의 강도는 선원으로부터 거리의 제곱에 반비례하여 감소한다는 방사선 방호의 기본원리이다. 이 법칙은 방사선 투과검사에 노출의 계산 및 방사선 안전관리에 있어 고려해야 할 중요한 인자이다.^[7]

현대의 방사선 의학은 날이 갈수록 발전해 가고 있으며, 이러한 발전과 비례하여 방사선작업종사자들의 피폭선량 측정이나 방사선 기기를 점검하는데 다양한 선량계들이 이용되고 또한 개발되어 오고 있다. 필름선량계(film dosimeter)부터 시작하여 가장 많이 쓰이는 열형광선량계(Thermoluminescent dosimeter, TLD)와 최근 주목받고 있는 유리형광선량계(Photoluminescent dosimeter, PLD) 및 광자극발광선량계(Optically stimulated luminescence dosimeter, OSLD) 등등 종류도 다양하다. 방사선계측기 중 열형광선량계는 현재 개인피폭관리와 방사선 모니터링에 많이 이용되고 있으며^[8-10] 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^[11] 최근 들어 새롭게 소개되고 있는 열형광선량계는 관독과정 및 취급방법은 열형광선량계에 비해 매우 간단하고 유효크기 또한 작아 소조사면에 대한 선량 평가에 효과적이라고 알려져 있다^[12-16]. 또한, 광자극발광선량계는 측정과 어닐링(annealing) 과정

에서 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^[17~20]. 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. 그러나 선원(source)의 기하학적 형태, 선원에 대한 작업자의 방향 및 거리 그리고 산란방사선에 의한 초기 방사선장의 스펙트럼 변화, 작업자의 움직임 등으로 작업자는 비 균질 방사선장에 노출될 수 있다. 따라서 개인선량계로 평가된 값이 작업자의 피폭을 대표하지 못하는 경우가 발생한다^[21~24]. 전체 방사선 검사 중 점유율은 낮지만 다른 검사에 비해 직업선량이 많은 투시 및 혈관조영검사(angiography)는 방사선작업종사자가 환자에게 근접한 상태에서 검사를 하기 때문에 산란선의 영향이 상대적으로 많고 검사 시간도 길 뿐만 아니라 여러 각도에서 움직이면서 환자의 상태를 점검하는 방사선작업종사자들에게 정확한 피폭선량 측정이 불가피 하다^[25]. 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 방사선 작업 종사자들이 인체의 방사선 조사에 의한 산란선 발생시의 근무 환경이나 작업 종사자의 행동 변화에 따라 발생 할 수 측정의 오류를 파악하여 신뢰도 높고 체계적인 방사선 기기 점검과 인체에서의 정확하고 보수적인 피폭선량 측정을 함으로서 방사선 종사자의 피폭에 관련된 위험 감소 및 예방의 필요성에 의해 본 연구를 시행하였다.

II. 연구목적

실제 방사선 작업 종사자들의 근무 환경 및 행동 변화에 따라 측정값에 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 주로 개인 피폭 선량 측정에 이용하는 선량계 중에서 최근 가장 많이 사용되고 그 유효성이 입증된 개인 피폭 선량계인 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계를 이용하여 일반적인 X-선 의료용 영상 및 치료 장치로 검사 및 치료에 따른 인체 흡수선량을 기준으로, 에너지 영역을 구분하여 저에너지 영역에서 일반촬영기기, 중 에너지 영역에서의 투시조영장치, 고 에너지 영역에서의 치료용 선형 가속기의 진단방사선 및 치료 방사선에서 사용하는 X-선 에너지에 따른 인체 조사에서 발생하는 산란선에 의한 피폭선량을 에너지의 범위, 거리 및 방향의 변화에 따라 그 의존성을 측정하여 선량계의 특징을 파악하고 에너지의 범위, 측정 위치와 방향에 따른 값 차이를 통계처리 후 그 결과에 따라 비교하여 실제 측정에서 미치는 영향을 확인하고 각각의 선량계의 특성들에 대한 의존성이 낮은 우수한 선량계를 발견하고, 우수한 성능을 보이는 선량계를 선택함으로써 향후 새로운 개인피폭선량계의 기준이 될 수 있는 기초 근거 자료를 제시하고, 신뢰도 높고 체계적인 방사선 기기 점검과 인체에서의 정확하고 보수적인 피폭선량을 측정함으로써 궁극적으로 방사선 종사자의 피폭에 관련된 위험 감소 및 예방을 위한 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

III. 실험기기 및 실험방법

A. X-선 발생장치의 에너지 영역과 영역별 실험기기

1. 에너지 영역의 구분

에너지 영역의 구분은 진단용 엑스선 에너지의 구분에 관련한 자료를 얻지 못하여 일반적으로 검사에 사용되는 엑스선의 유효선량을 기준으로 구분하였다^[26](Table 2). 주로 일반 촬영 영역인 경우 복부의 유효선량이 10 mSv 이하로 저 에너지 영역으로 구분 하였고, 투시 및 컴퓨터단층촬영의 경우 조영제를 이용하여 장 시간동안 엑스선의 노출이 있는 경우 복부를 기준으로 한 유효선량이 10 mSv ~ 50 mSv 사이를 중 에너지 영역으로, 그리고 고에너지 엑스선을 이용하는 치료의 경우를 유효선량이 50 mSv 이상을 고 에너지 영

역으로 구분하였다.

Table 2. Comparison of Typical Doses in UK from CT and Conventional X-ray Examinations

Diagnostic Procedure	Typical Effective Dose (mSv)
• Conventional X-ray	
Limbs and joints	<0.01
Chest(single PA film)	0.02
Skull	0.07
Thoracic spine	0.7
Lumbar spine	1.3
Hip	0.3
Pelvis	0.7
Abdomen	1
• Fluoroscopy	
IVU	2.5
Barium swallow	1.5
Barium meal	3
Barium follow through	3
Barium enema	7
• CT	
Head	2
Chest	8
Abdomen	10
Pelvis	10

Philip W. Wiest, Julie A. Loeken, Philip H. Heintz, and Fred A. Mettler Jr, CT Scanning: A Major Source of Radiation Exposure, Seminars in Ultrasound, CT, and MRI, Vol 23, No 5 (October), 2002: pp 402-410

2. 저 에너지 영역에서의 장치

저 에너지 영역에 사용된 장치는 디지털 진단용 엑스선 발생장치로 주로 일반촬영에 사용하는 진단용 엑스선 발생장치(VIDIX, 중외메디컬, 서울, 한국)(Fig. 1)를 사용하였다. 그리고 인체모형의 팬텀은 인체모형 팬텀인 전신팬텀(Whole body phantom, PBU-10, Kyoto, Kagaku, Japan)(Fig. 2)를 이용하여 저에너지 영역에서의 팬텀 조사에 의한 산란 선량을 측정하였다. 또한 진단용 발생장치에서 발생하는 방사선선량 측정에 사용되는 다기능 정도관리측정기(RTI Electronic, Sweden)인 Piranha 657 (Fig. 3)의 내부 측정기로 측정

하였으며, 기준 선량 측정을 위하여 전리함(Ion Chamber, 4000M+X-ray test device, Victoreen, USA)(Fig. 4)를 사용하였다. 그리고 개인 피폭 선량계인 열형광선량계 (Thermoluminescent dosimeter, TLD, UD-802AT, Panasonic, Japan)(Fig. 9)와 판독을 위하여 열형광선량계 자동판독장치 (UD-710R, Panasonic)를 이용하였고, 유리형광선량계 (Photoluminescent dosimeter, PLD, GD-450, Japan)(Fig. 10)와 판독을 위하여 형광유리선량계 자동판독장치 (FGD-650) 및 광자극 발광 선량계 (Optically stimulated luminescence dosimeters, OSLD, LANDAUER Inc., USA)(Fig. 11)와 판독장치인 광자극발광선량계 자동판독장치 (Microstar reader, LANDAUER, USA)을 이용하였다.



Fig. 1. Digital diagnostic X-ray device for low energy area
(<http://www.cwm.co.kr/medical>)



Fig. 2. Hole body phantom, PBU-10
(<http://www.kyotokagaku.com>)



Fig. 3. Multifunctional QC X-ray detector, Piranha 657
(<http://www.rti.se>)



Fig. 4. Ion chamber (4000M+X-ray test device)
(<http://www.flukebiomedical.com>)

3. 중 에너지 영역에서의 장치

중 에너지 영역에 사용된 장치는 디지털 진단용 엑스선 발생장치로 주로 투시 영상 촬영에 사용하는 엑스선 투시 조영장치(DXG-550RF, Under tube, Listem, Gangwon-do, Korea)(Fig. 5)를 사용하였다. 그리고 인체모형의 팬텀은 인체모형 팬텀인 전신팬텀(Whole body phantom, PBU-10, Kyoto, Kagaku, Japan)(Fig. 2)를 이용하여 중 에너지 영역에서의 팬텀 조사에 의한 산란 선량을 측정하였다. 또한 진단용 발생장치에서 발생하는 방사선선량의 기준 선량 측정을 위하여 전리함(Ion Chamber, 4000M+X-ray test device, Victoreen, USA)(Fig. 4)를 사용하였다. 그리고 개인피폭 선량계인 열형광선량계 (Thermoluminescent dosimeter, TLD, UD-802AT, Panasonic, Japan)(Fig. 9)와 판독을 위하여 열형광선량계 자동판독장치 (UD-710R,

Panasonic, Japan)를 이용하였고, 유리형광선량계 (Photoluminescent dosimeter, PLD, GD-450, Japan)(Fig. 10)와 판독을 위하여 형광유리선량계 자동판독장치 (FGD-650) 및 광자극발광선량계 (Optically stimulated luminescence dosimeters, OSLD, LANDAUER Inc., USA)(Fig. 11)와 판독장치인 광자극발광선량계 자동판독장치 (Microstar reader, LANDAUER, USA)을 이용하였다.



Fig. 5. DXG-550RF
(<http://www.listem.co.kr>)

4. 고 에너지 영역에서의 장치

고 에너지 영역에 사용된 장치는 치료용 엑스선 발생장치로 주로 암의 치료에 사용하는 치료용 선형가속기(CLINAC 21IX, Varian, USA)(Fig.6)를 사용하였다. 그리고 인체모형의 팬텀은 미국의 Churchin사에서 제작한 인체모형 팬텀인 란도팬텀(Rando phantom, RAN-110, Churchin, USA)(Fig. 8)를 이용하여 고 에너지 영역에서의 팬텀 조사에 의한 산란 선량을 측정하였다. 또한 치료용 발생장치에서 발생하는 방사선선량의 기준 선량 측정을 위하여 라이나체크(LINACHECK, PTWUNIDOS, PTW Freiburg GmbH, Germany)(Fig. 7)를 사용하였다. 그리고 개인피폭 선량계인 열형광선량계 (Thermoluminescent dosimeter, TLD, UD-802AT, Panasonic, Japan)(Fig. 9)와 판독을 위하여 열형광선량계 자동판독장치 (UD-710R, Panasonic)를 이용

하였고, 유리형광선량계 (Photoluminescent dosimeter, PLD, GD-450, Japan)(Fig. 10)와 관독을 위하여 형광유리선량계 자동관독장치 (FGD-650) 및 광자극 발광 선량계 (Optically stimulated luminescence dosimeters, OSLD, LANDAUER Inc., USA)(Fig. 11)와 관독장치인 광자극발광선량계 자동관독장치 (Microstar reader, LANDAUER, USA)을 이용하였다.



Fig. 6. CLINAC 21IX

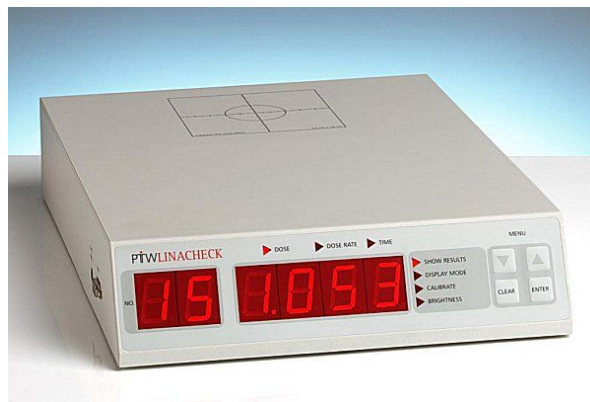


Fig. 7. LINACHECK
(<http://www.ptw.de>)



Fig. 8. RAN-110
(<http://www.phantomlab.com>)



Fig. 9. TLD(UD-802AT)
(<http://radin.kr>)



Fig. 10. PLD(GD-450)

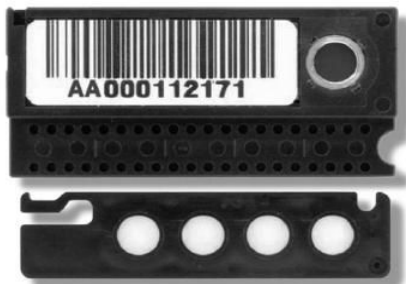


Fig. 11. OSLD (<http://www.osldosimetry.com>)

B. 실험방법

1. 저 에너지

재현성 실험은 디지털 방사선 발생장치에 전신팬텀을 올려놓고 조사야 (irradiation field) 20 X 20 cm²에 요추 앞-뒤 방향 조사의 조건(85 kVp, 250 mA, 40 mAs, FFD = 100 cm)으로 전리함 10번, Piranha 10번, 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계를 각각 10번씩 조사하였다.(Fig. 12)



Fig. 12. measure scattering rays by distance

a. 전리함의 정확도 시험

관전압, 관전류, 조사시간의 정확도 시험은 보건복지가족부령 제 349호에 의거 백분율평균오차의 값을 구하여 다음과 같이 평가하였다.(Eq.1)

$$PAE = \frac{X_p - \bar{X}}{X_p} \times 100(\%) \quad (1)$$

X_p : 관전압의 설정치

\bar{X} : 측정치의 산출평균치

관전압 (kVp)의 백분율평균오차는 설정치에 대하여 $\pm 10\%$ 이내 이어야 하며, 관전류 (mAs)는 $\pm 15\%$ 이내 이어야하고, 관전류량의 평균백분율 오차는 변압기장치와 인버터식장치의 경우 $\pm 15\%$ 이내이고, 콘덴서식장치인 경우

10 mAs 미만일 때 설정치에 대한 오차는 ± 2 mAs, 10 mAs 이상인 경우 $\pm 20\%$ 이내 이어야 한다

b. 거리 변화에 따른 선량값 변화

선량계의 감도를 알아보기 위하여 디지털 방사선 발생장치를 이용하여 전신팬텀에 조사야 20 X 20 cm²에 요추 앞-뒤 방향 조사의 조건(85 kVp, 250 mA, 40 mAs, FFD = 100 cm)으로 I전리함, Piranha, 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계를 복부의 조사야 끝에서부터 거리별로 5 cm간격을 두고 20 cm까지 각 10번씩 측정하였다.

c. 엑스선의 강도(kVp) 변화에 따른 선량값 변화

에너지 의존성을 알아보기 위하여 디지털 방사선 발생장치를 이용하여 전신팬텀에 조사야 20 X 20 cm²에 250 mA, 25 mAs, FFD = 100 cm 조건으로 고정시키고 60 kVp, 80 kVp, 100 kVp, 120 kVp, 140 kVp 로 변화시키면서 전리함 10번, Piranha 10번, 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계를 각각 10번씩 조사하였다.

d. 엑스선의 양(mAs) 변화에 따른 선량값 변화

에너지 의존성을 알아보기 위하여 디지털 방사선 발생장치를 이용하여 전신팬텀에 조사야 20 X 20 cm²에 100 kVp, FFD = 100 cm 조건으로 고정시키고 100 mA × 0.1 sec, 200 mA × 0.1 sec, 320 mA × 0.1 sec, 400 mA × 0.1 sec, 400 mA × 0.125 sec로 변화시키면서 전리함 10번, Piranha 10번, 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계를 각각 10번씩 조사하였다.

e. 방향에 따른 선량값 변화

열형광선량계와 형광유리선량계 및 광자극발광선량계의 방향 의존성 비교 측정을 위해 일반적인 방사선 작업종사자의 위치인 전신 팬텀 복부의 조사야 끝에서 40 cm거리에서 측정 하였다. 조사야 20 X 20 cm²에 요추 앞-뒤 방향 조사의 조건(85 kVp, 250 mA, 40 mAs, FFD = 100 cm)으로 고정하고

0°-90°까지 왼쪽과 오른쪽 전 방위를 15°간격으로 측정하였다. 신뢰도를 높이기 위해 각 선량계 마다 10번씩 반복 측정하여 주었다.

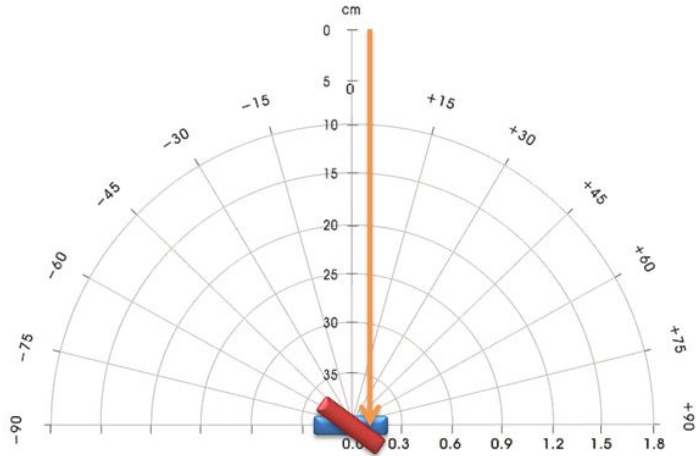


Fig. 13. Position of dosimeters(measure scattering rays by distance and Angle)

2. 중 에너지

엑스선 투시조영 장치의 재현성 실험은 투시조영촬영장치의 조사야 중심에 전리함을 올려놓은 후 일반적인 위장조영촬영조건(83 kVp, 1.2 mA)으로 10일 동안 측정하였다.

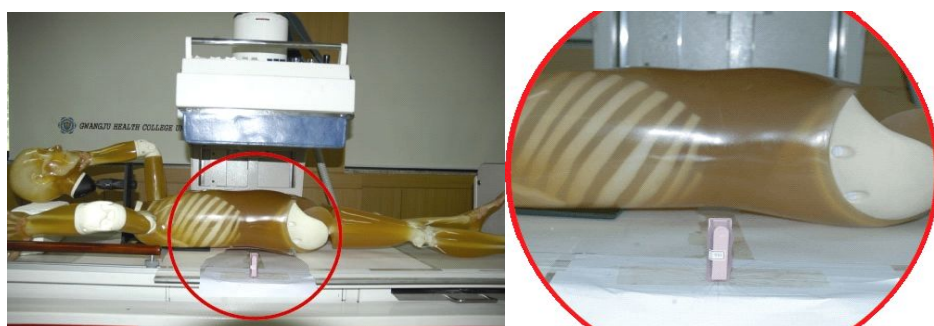
a. 감도 측정 비교

열형광선량계와 형광유리선량계 및 광자극발광선량계의 감도 비교 측정을 위해 중심 선속에서 거리별로 10 cm간격을 두고 40 cm까지 누적선량 측정하였다.

b. 방향 의존성 비교

전신팬텀을 테이블 위에 올려놓고 위장 조영 촬영조건으로 준비하였으며 일반적인 방사선 작업종사자의 위치인 중심에서 약 40 cm의 거리에서 $\pm 0^\circ$ 의 방향으로 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계를 고정시켰다 (Fig. 14). 이 과정을 10회 반복하여 각각의 선량계를 각각의 자동 판독 장치

를 이용해 누적선량(cumulative dose)을 판독하였다.



A.)

B)

Fig. 14. The experiment of direction dependency of photoluminescent glass dosimeter

A) Front Image B) Larger Image

3. 고 에너지

a. 재현성 평가

실험 전 31일 동안 일일정도관리(Daily Quality Control)로 갱트리 각도는 0° , 조사면은 $10 \times 10 \text{ cm}^2$, 갱트리에서 전리함까지 거리는 100 cm (SSD)로 측정기 측정 중심점을 조사면 중심점에 정렬하였다. 1 cm 축적 판을 측정부위에 올려두고 계기판의 숫자가 모두 0 (또는 -)인지 확인 후 측정을 시작한다. 이 때, 폐회로텔레비전(CCTV) 모니터를 클로즈업 시켜 조정실에서 측정값을 판독하였다. 첫 번째로 6 MV X-ray 100 MU/min으로 조사하는데, 기준값 1 Gy와 오차값을 기입하여 기록하였다. 두 번째로 10 MV X-ray 100 MU/min으로 조사하는데, 기준값 1 Gy와 오차값을 기입하여 기록하였다.

b. 에너지 의존성

실험환경은 선형가속기의 테이블에 란도팬텀을 올려두고 팬텀의 복부에 선원-축 거리(source axis distance, SAD)를 100 cm로 고정 시킨 상태에서 조사야를 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 로 설정한다. 동일한 높이의 지지대를 만들어주어 란도팬텀의 조사야 옆에 중심을 맞추어 설치한다. 설치한 지지대위에 거리와 각도를 표시해놓는다. 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계의

에너지 의존성 비교 측정을 위해 란도팬텀 복부의 조사야 끝에서 거리 별로 10 cm 간격을 두고 40 cm까지 측정 하였다. 선량률은 100 MU/min-500 MU/min까지 100 MU/min간격으로 변화시켜주고 1 Gy으로 고정시킨 상태에서 측정하였다. 선량은 1 Gy-5 Gy까지 1 Gy간격으로 변화시켜주며 400 MU/min으로 고정시킨 상태에서 측정하였다. 또한 신뢰도를 높이기 위해 각 선량계마다 10 번씩 반복 측정하였다.(Fig.15)

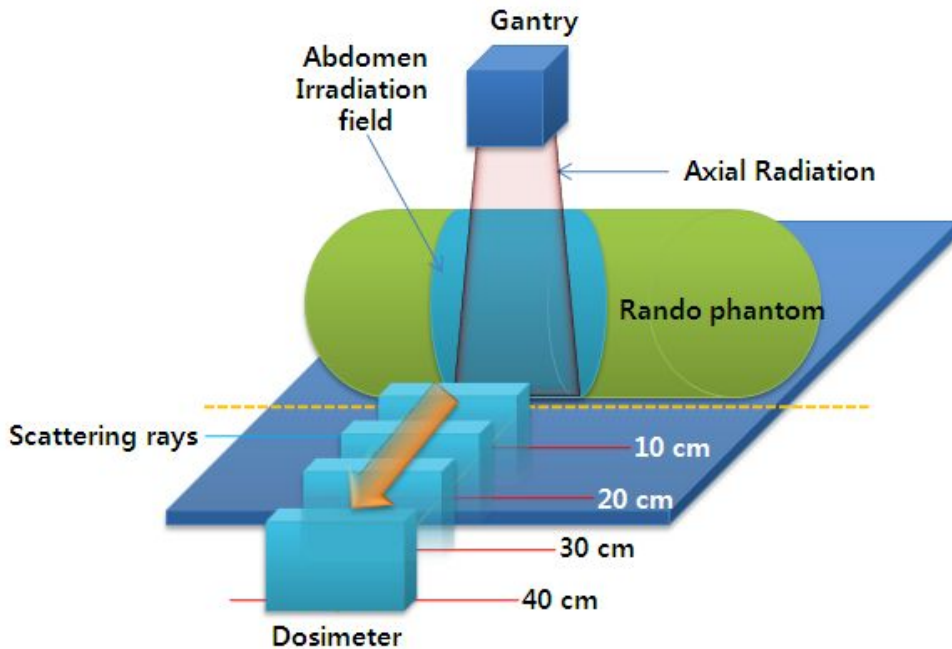


Fig. 15. Test method of energy dependence

c. 방향 의존성

실험 환경은 선형가속기의 테이블에 란도팬텀을 올려두고 팬텀의 복부에 선원-축 거리 (source axis distance, SAD)를 100 cm로 고정 시킨 상태에서 조사야를 10 x 10 cm²로 설정한다. 동일한 높이의 지지대를 만들어주어 란도팬텀의 조사야 옆에 중심을 맞추어 설치한다. 설치한 지지대위에 거리와 각도를 표시해놓는다. 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계의 방향 의존성 비교 측정을 위해 란도 팬텀 복부의 조사야 끝에서 40 cm거리에서 측정 하였다. 선량은 2 Gy 고정으로 0°-90°까지 왼쪽과 오른쪽 전방위를 15°간격으로 측정하였다. 또한 신뢰도를 높이기 위해 각 선량계 마다 10 번씩 반복 측정하였다.(Fig.16)

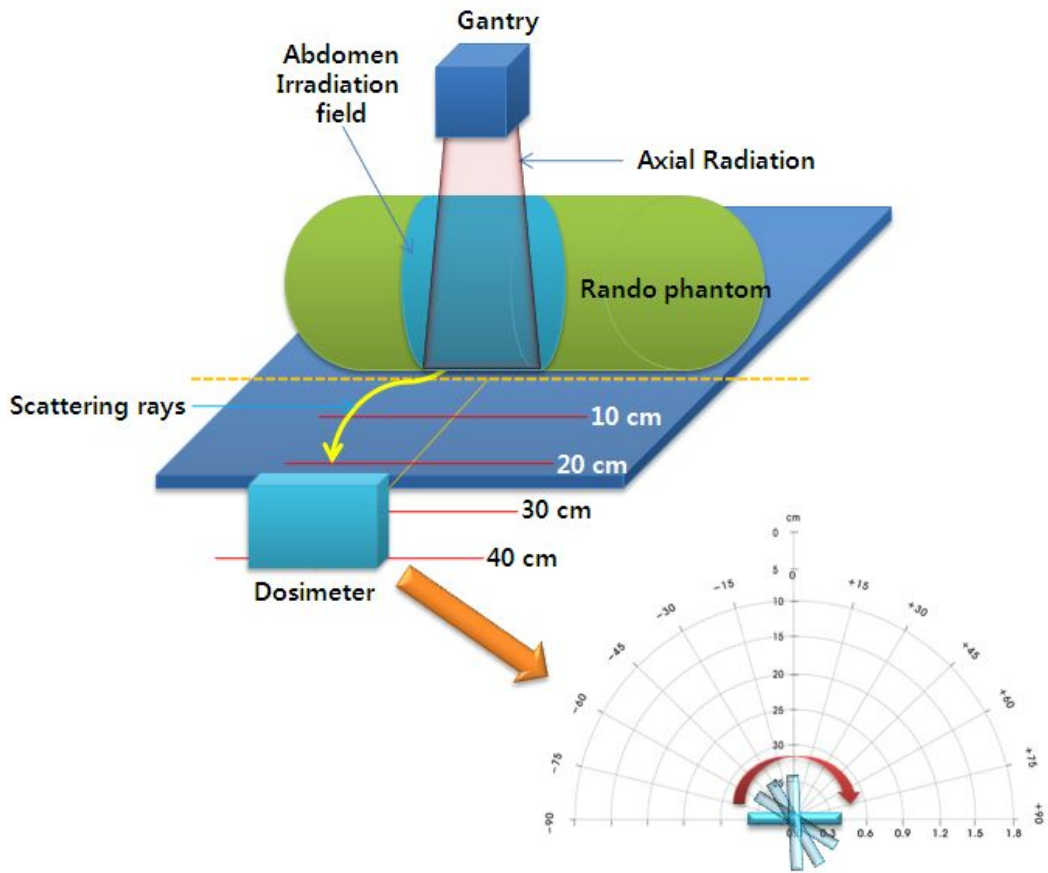


Fig. 16. Test method of Angular dependence

4. 분석방법

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

IV. 결과

A. 저에너지 영역

1. 전리함의 정확도 시험

관전압은 0.1%이하인 0.013%로 나왔고 관전류는 0.15% 이하인 0.0002%, 관전류량은 0.2%이하인 0.004%가 측정되었다.(Table 3)

Table 3. kVp, mA, mAs Accuracy Test

Times	Irradiation requirement		
	85 kVp	250 mA	40 mAs
1	84.58	249.76	39.86
2	84.62	249.54	39.41
3	84.48	249.63	39.42
4	84.51	249.63	39.50
5	84.42	249.65	39.48
6	84.35	249.58	39.52
7	84.39	249.59	39.52
8	84.37	249.65	39.95
9	84.32	249.69	39.68
10	84.31	249.72	39.61
Mean \pm SD ^a	84.44 \pm 0.11	249.64 \pm 0.07	39.60 \pm 0.18
CV ^b	0.013	0.0002	0.004
PAE ^c (%)	0.65%	0.14%	1%

Note : ^aStandard deviation, ^bcoefficient of variation, ^cpercent average error.

2. 선량계에 따른 재현성 평가

선량계 전리함, Piranha, 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계를 10번씩 조사하여 X선 진단발생장치의 재현성을 실험한 결과 전리함의 변동계수가 0.003으로 가장 우수한 재현성을 보였고, 모든 선량계들이 대체적으로 변동계수 0.05 이하로 우수한 재현성을 보였다.(Eq.2)(Table 4)

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \quad (2)$$

SD : 조사선량 측정치 모집단에 대한 표준편차

\bar{X} : 조사선량 측정치의 평균치

Table 4. Repeatability Evaluation with Different Dosimeters

Classification	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mean±SD ^a	CV ^b
Ion chamber	3.16	3.15	3.14	3.15	3.16	3.13	3.16	3.13	3.17	3.15	3.15 ± 0.01	0.003
Piranha	2.59	2.60	2.58	2.60	2.60	2.57	2.60	2.50	2.58	2.60	2.58 ± 0.03	0.011
TLD	2.95	3.11	2.91	2.96	2.97	2.99	3.01	3.07	3.08	3.04	3.00 ± 0.06	0.02
PLD	2.94	3.11	2.91	2.96	2.97	2.99	3.01	3.07	3.08	3.04	2.95 ± 0.02	0.006
OSLD	3.76	3.60	3.81	3.75	3.88	3.76	3.84	3.75	3.63	3.71	3.75 ± 0.08	0.021

Note: : ^aStandard deviation, ^bcoefficient of variation. The Ion chamber, Piranha unit is the number of mGy and the TLD, PLD, OSLD unit is the number of mSv.

3. 거리에 따른 선량값 변화

a. 선량계에 따른 0 cm 거리에서의 선량 비교

거리에 따른 선량계의 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($p < 0.001$). 사후검증 결과, 그룹a (Piranha, 광자극발광선량계)에서 비슷하고 그룹b (전리함, 열형광선량계, 유리형광선량계)가 비슷하게 측정되었다. 그 중에서 Piranha에서 감도가 제일 높고, 다음으로 자극발광선량계가 높았으며 전리함에서 제일 낮게 측정되었다.(Table 5)

Table 5. Dosimeters comparison at a distance of 0 cm

Dosimeter	N	Mean \pm SD	F	p
Ion chamber	10	2.93 \pm 0.02 ^b		
Piranha	10	3.53 \pm 0.030 ^a		
TLD	10	3.03 \pm 0.09 ^b	68.881	0.000***
PLD	10	3.01 \pm 0.04 ^b		
OSLD	10	3.50 \pm 0.22 ^a		

Note : 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 Ion chamber, Piranha unit is the number of mGy and the TLD, PLD, OSLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

b. 선량계에 따른 5 cm 거리에서의 선량 비교

거리에 따른 선량계의 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). 사후검증 결과, 감도가 광자극발광선량계 2.66 ± 0.05 로 가장 높게 측정되었으며 유리형광선량계 0.95 ± 0.04 로 가장 낮게 측정되었다.(Table 6)

Table 6. Dosimeters comparison at a distance of 5 cm

Dosimeter	N	Mean \pm SD	F	p
Ion chamber	10	2.53 ± 0.03^b	3767.789	0.000***
Piranha	10	1.74 ± 0.03^c		
TLD	10	1.49 ± 0.04^d		
PLD	10	0.95 ± 0.04^e		
OSLD	10	2.66 ± 0.05^a		

Note : 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 Ion chamber, Piranha unit is the number of mGy and the TLD, PLD, OSLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

c. 선량계에 따른 10 cm 거리에서의 선량 비교

거리에 따른 선량계의 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). 사후검증 결과, 감도가 OSLD 2.04 ± 0.05 로 가장 높게 측정되었으며 PLD 0.24 ± 0.01 로 가장 낮게 측정되었다.(Table 7)

Table 7. Dosimeters comparison at a distance of 10 cm

Dosimeter	N	Mean \pm SD	F	p
Ion chamber	10	0.32 ± 0.01^c	7798.563	0.000***
Piranha	10	1.61 ± 0.03^b		
TLD	10	0.32 ± 0.01^c		
PLD	10	0.24 ± 0.01^d		
OSLD	10	2.04 ± 0.05^a		

Note : 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 Ion chamber, Piranha unit is the number of mGy and the TLD, PLD, OSLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

d. 선량계에 따른 15 cm 거리에서의 선량 비교

거리에 따른 선량계의 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). 사후검증 결과, 감도가 광자극발광선량계 1.50 ± 0.03 으로 가장 높게 측정되었으며 열형광선량계 0.12 ± 0.01 로 가장 낮게 측정되었다.(Table 8)

Table 8. Dosimeters comparison at a distance of 15 cm

Dosimeter	N	Mean \pm SD	F	p
Ion chamber	10	0.14 ± 0.01^b	205.687	0.000***
Piranha	10	0.72 ± 0.02^a		
TLD	10	0.12 ± 0.01^b		
PLD	10	0.18 ± 0.02^b		
OSLD	10	1.50 ± 0.03^a		

Note : 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 Ion chamber, Piranha unit is the number of mGy and the TLD, PLD, OSLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

e. 선량계에 따른 20 cm 거리에서의 선량 비교

거리에 따른 선량계의 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). 사후검증 결과, 감도가 Piranha 0.32 ± 0.02 로 가장 높게 측정되었으며, 다음으로 광자극발광선량계 0.27 ± 0.05 이 높게 측정되었고, 유리형광선량계 0.04 ± 0.01 로 가장 낮게 측정되었다.(Table 9)(Fig.17)

Table 9. Dosimeters comparison at a distance of 20 cm

Dosimeter	N	Mean \pm SD	F	p
Ion chamber	10	0.10 ± 0.01^c	1806.715	0.000***
Piranha	10	0.32 ± 0.02^b		
TLD	10	0.05 ± 0.01^d		
PLD	10	0.04 ± 0.01^d		
OSLD	10	0.27 ± 0.05^a		

Note : 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 Ion chamber, Piranha unit is the number of mGy and the TLD, PLD, OSLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

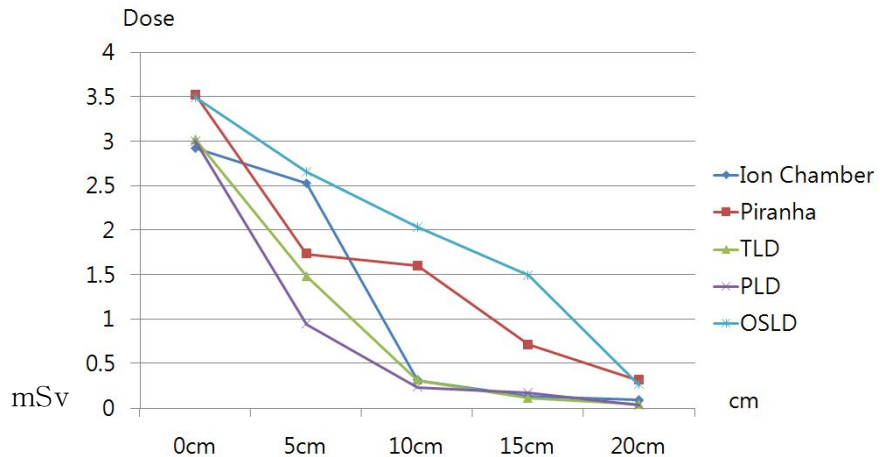


Fig. 17. Dosimeters comparison by different Distances

0 cm에서 5, 10, 15, 20 cm 각각 거리와의 평균 선량 값들의 감소율을 구하였더니 0 - 20 cm에서는 Piranha가 11.03%로 가장 작았고 광자극발광선량계, 전리함, 열형광선량계, 유리형광선량계 순으로 측정되었다. 0 - 15 cm에서는 광자극발광선량계가 2.333%로 가장 작았고 Piranha, 유리형광선량계, 전리함, 열형광선량계 순으로 측정되었으며, 0 - 10 cm에서는 광자극발광선량계가 1.71%로 가장 작았고 Piranha, 전리함, 열형광선량계, 유리형광선량계 순으로 측정되었다. 또한 0 - 5 cm에서는 전리함이 1.15%로 가장 작았고 광자극발광선량계, Piranha, 열형광선량계, 유리형광선량계 순으로 측정되었다. 마지막으로 기준 선원 측정기인 전리함과 비교하면, 전 영역에서 Piranha와 광자극발광선량계는 전리함 보다 감도가 높게 측정되었고, 열형광선량계, 유리형광선량계는 전리함 보다 감도가 낮게 측정되었다.

4. 100 kVp 고정, mAs 변화에 따른 선량 비교

a. 100 kVp 고정, mAs 변화에 따른 전리함의 선량 비교

mAs 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 평균선량 10 mAs(a) 높았으며, 다음 20 mAs(b), 32 mAs(c), 40 mAs(d), 50 mAs(e) 순으로 측정되었으며, mAs 가 증가함에 따라 평균선량이 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 10 에서 표층선량(surface dose)을 Bivariate Correlation 결과, 전리함은 $r = 0.998$ ($p < 0.001$) 으로 나타났다.(Table 10)

Table 10. The comparison of dose in ion chamber with the change of mAs at 100kVp

100 kVp	N	Ion Chamber dose Mean \pm SD	F	p
10 mAs	10	1.07 \pm 0.02 ^a	3221.570	0.000***
20 mAs	10	2.14 \pm 0.03 ^b		
32 mAs	10	3.37 \pm 0.02 ^c		
40 mAs	10	4.15 \pm 0.03 ^d		
50 mAs	10	5.18 \pm 0.04 ^e		

Note : 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 Ion chamber unit is the number of mGy. *** $p < 0.001$.

b. 100 kVp 고정, mAs 변화에 따른 Piranha의 선량 비교

mAs 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 50 mAs(e) 가장 높았고, 다음으로 40 mAs(d), 32 mAs(c), 20 mAs(b), 10 mAs(a) 순으로 높게 측정되었으며, mAs 가 증가함에 따라 평균선량이 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 11 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, Piranha는 $r = 0.976$ ($p < 0.001$) 으로 측정되었다.(Table 11)

Table 11. The comparison of dose in Piranha with the change of mAs at 100kVp

100 kVp	N	Piranha Mean \pm SD	F	p
10 mAs	10	0.95 \pm 0.02 ^a	2481.023	0.000***
20 mAs	10	1.82 \pm 0.02 ^b		
32 mAs	10	2.84 \pm 0.04 ^c		
40 mAs	10	3.75 \pm 0.06 ^d		
50 mAs	10	4.44 \pm 0.04 ^e		

Note : 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 Piranha unit is the number of mGy. *** $p < 0.001$.

c. 100 kVp 고정, mAs 변화에 따른 열형광선량계의 선량 비교

mAs 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 50 mAs(e) 가장 높았고, 다음으로 40 mAs(d), 32 mAs(c), 20 mAs(b), 10 mAs(a) 순으로 높게 측정되었으며, mAs 가 증가함에 따라 평균선량이 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 12 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 열형광선량계는 $r = 0.980$ ($p < 0.001$) 으로 측정되었다.(Table 12)

Table 12. The comparison of dose in TLD with the change of mAs at 100kVp

100 kVp	N	TLD Mean \pm SD	F	p
10 mAs	10	1.08 \pm 0.04 ^a	6729.561	0.000***
20 mAs	10	1.43 \pm 0.10 ^b		
32 mAs	10	2.59 \pm 0.03 ^c		
40 mAs	10	4.28 \pm 0.05 ^d		
50 mAs	10	5.48 \pm 0.10 ^e		

Note : 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 TLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

d. 100 kVp 고정, mAs 변화에 따른 유리형광선량계의 선량 비교

mAs 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 50 mAs(e) 가장 높았고, 다음으로 40 mAs(d), 32 mAs(c), 20 mAs(b), 10 mAs(a) 순으로 높게 측정되었으며, mAs 가 증가함에 따라 평균선량이 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 13 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 유리형광선량계는 $r = 0.998$ ($p < 0.001$) 으로 측정되었다.(Table 13)

Table 13. The comparison of dose in PLD with the change of mAs at 100kVp

100 kVp	N	PLD Mean \pm SD	F	p
10 mAs	10	1.07 \pm 0.02 ^a	2125.332	0.000***
20 mAs	10	2.07 \pm 0.04 ^b		
32 mAs	10	3.33 \pm 0.03 ^c		
40 mAs	10	4.23 \pm 0.04 ^d		
50 mAs	10	5.15 \pm 0.04 ^e		

Note : 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 PLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

e. 100 kVp 고정, mAs 변화에 따른 광자극발광선량계의 선량 비교

mAs 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량 50 mAs(d) 가장 높았고, 다음으로 32 mAs, 40 mAs(c)에서 동일한 집단으로 측정되었으며, 20 mAs(b), 10 mAs(a) 순으로 높게 측정되었다. Table 14 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 광자극발광선량계는 $r = 0.996$ ($p < 0.001$) 으로 측정되었다.(Table 14)(Fig. 18)

Table 14. The comparison of dose in OSLD with the change of mAS at 100kVp

100 kVp	N	OSLD Mean \pm SD	F	p
10 mAs	10	1.50 \pm 0.04 ^a	82.927	0.000***
20 mAs	10	2.31 \pm 0.05 ^b		
32 mAs	10	4.33 \pm 0.41 ^c		
40 mAs	10	5.19 \pm 0.02 ^c		
50 mAs	10	6.43 \pm 0.03 ^d		

Note : 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 OSLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

표층선량을 기준 선원 측정기인 전리함을 기준으로 비교하면, 유리형광선량계가 가장 근접한 값으로 측정되었고, 광자극발광선량계는 전리함 보다 높은 감도로 측정되었다. 그리고 Piranha와 열형광선량계는 전리함 보다 낮은 감도로 측정되었다. 또한 Bivariate Correlation 결과, 전리함은 $r = 0.998$ ($p < 0.001$), Piranha는 $r = 0.976$ ($p < 0.001$), 열형광선량계는 $r = 0.980$ ($p < 0.001$), 유리형광선량계는 $r = 0.998$ ($p < 0.001$), 광자극발광선량계는 $r = 0.996$ ($p < 0.001$) 순으로 이변량 상관관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 mAs 변화에 따른 선량 값 변화에서는 전리함, 유리형광선량계

가 에너지 의존성이 우수하다는 것을 알 수 있었다.(Fig.18)

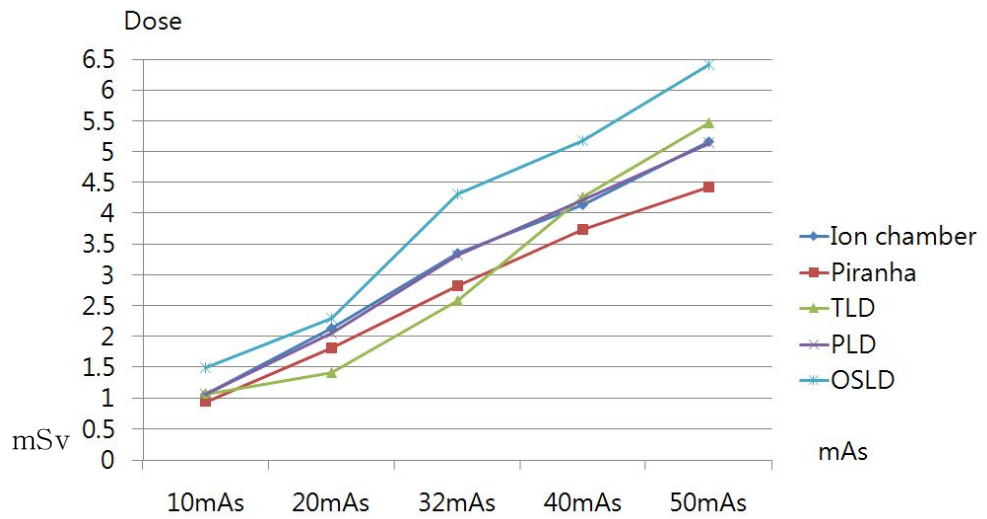


Fig. 18. Dosimeters comparison by different mAs

5. 25 mAs 고정, kVp 변화에 따른 선량값 비교

a. 25 mAs 고정, kVp 변화에 따른 전리함의 선량 비교

kVp 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). Scheffe 의 사후검증 결과, 관전압 140 kVp(e) 가장 높았고, 다음으로 120 kVp(d), 100 kVp(c), 80 kVp(b), 60 kVp(a) 순으로 높게 측정되었으며, kVp 가 증가함에 따라 평균선량이 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 15 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 전리함은 $r = 0.992$ ($p < 0.001$) 으로 측정되었다.(Table 15)

Table 15. The comparison of dose in ion chamber with the change of kVp at 25mAs

25 mAs	N	Ion Chamber Mean \pm SD	F	p
60 kVp	10	0.95 \pm 0.03 ^a	1676.106	0.000***
80 kVp	10	1.74 \pm 0.05 ^b		
100 kVp	10	3.56 \pm 0.04 ^c		
120 kVp	10	4.58 \pm 0.06 ^d		
140 kVp	10	5.56 \pm 0.05 ^e		

Note : 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 Ion chamber unit is the number of mGy. *** $p < 0.001$.

b. 25mAs 고정, kVp 변화에 따른 Piranha의 선량 비교

kVp 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). Scheffe 의 사후검증 결과, 관전압 140 kVp(e) 가장 높았고, 다음으로 120 kVp(d), 100 kVp(c), 80 kVp(b), 60 kVp(a) 순으로 높게 측정되었으며, kVp 가 증가함에 따라 평균선량이 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 16 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, Piranha는 $r = 0.984$ ($p < 0.001$) 으로 측정되었다.(Table 16)

Table 16. The comparison of dose in Piranha with the change of kVp at 25mAs

25 mAs	N	Piranha Mean \pm SD	F	p
60 kVp	10	0.78 \pm 0.02 ^a	1326.253	0.000***
80 kVp	10	1.42 \pm 0.03 ^b		
100 kVp	10	3.17 \pm 0.04 ^c		
120 kVp	10	3.83 \pm 0.07 ^d		
140 kVp	10	4.57 \pm 0.05 ^e		

Note : 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 Piranha unit is the number of mGy. *** $p < 0.001$.

c. 25 mAs 고정, kVp 변화에 따른 열형광선량계의 선량 비교

kVp 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). Scheffe 의 사후검증 결과, 관전압 140 kVp(e) 가장 높았고, 다음으로 120 kVp(d), 100 kVp(c), 80 kVp(b), 60 kVp(a) 순으로 높게 측정되었으며, kVp 가 증가함에 따라 평균선량이 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 17 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 열형광선량계는 $r = 0.993$ ($p < 0.001$) 으로 측정되었다.(Table 17)

Table 17. The comparison of dose in TLD with the change of kVp at 25mAs

25 mAs	N	TLD Mean \pm SD	F	p
60 kVp	10	0.98 \pm 0.03 ^a	1806.715	0.000***
80 kVp	10	1.76 \pm 0.31 ^b		
100 kVp	10	2.76 \pm 0.04 ^c		
120 kVp	10	3.84 \pm 0.05 ^d		
140 kVp	10	4.93 \pm 0.07 ^e		

Note : 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 TLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

d. 25 mAs 고정, kVp 변화에 따른 유리형광선량계의 선량 비교

kVp 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). Scheffe 의 사후검증 결과, 관전압 140 kVp(e) 가장 높았고, 다음으로 120 kVp(d), 100 kVp(c), 80 kVp(b), 60 kVp(a) 순으로 높게 측정되었으며, kVp 가 증가함에 따라 평균선량이 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 18 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 유리형광선량계는 $r = 0.969$ ($p < 0.001$) 으로 측정되었다.(Table 18)

Table 18. The comparison of dose in PLD with the change of kVp at 25mAs

25 mAs	N	PLD Mean \pm SD	F	p
60 kVp	10	0.88 \pm 0.04 ^a	1324.496	0.000***
80 kVp	10	1.71 \pm 0.04 ^b		
100 kVp	10	3.63 \pm 0.06 ^c		
120 kVp	10	4.28 \pm 0.05 ^d		
140 kVp	10	4.67 \pm 0.04 ^e		

Note : 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 TLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

e. 25 mAs 고정, kVp 변화에 따른 광자극발광선량계의 선량 비교

kVp 변화에 따른 평균선량의 차이분석 결과 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.001$). Scheffe 의 사후검증 결과, 관전압 140 kVp(e) 가장 높았고, 다음으로 120 kVp(d), 100 kVp(c), 80 kVp(b), 60 kVp(a) 순으로 높게 측정되었으며, kVp 가 증가함에 따라 평균선량이 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 19 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 광자극발광선량계는 $r = 0.989$ ($p < 0.001$) 으로 측정되었다.(Table 19)

Table 19. The comparison of dose in OSLD with the change of kVp at 25mAs

25 mAs	N	OSLD Mean \pm SD	F	p
60 kVp	10	1.43 \pm 0.05 ^a	1484.203	0.000***
80 kVp	10	2.20 \pm 0.06 ^b		
100 kVp	10	4.18 \pm 0.05 ^c		
120 kVp	10	4.84 \pm 0.06 ^d		
140 kVp	10	6.16 \pm 0.07 ^e		

Note : 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 TLD unit is the number of mSv. *** $p < 0.001$.

표층선량을 기준 선원 측정기인 전리함을 기준으로 비교하면, 열형광선량계가 가장 근접한 값으로 측정되었고, 광자극발광선량계는 전리함 보다 높은 감도로 측정되었다. 그리고 Piranha와 유리형광선량계, 열형광선량계는 전리함 보다 낮은 감도로 측정되었다. 또한 Bivariate Correlation 결과, 전리함은 $r = 0.992$ ($p < 0.001$), Piranha는 $r = 0.984$ ($p < 0.001$), 열형광선량계는 $r = 0.993$ ($p < 0.001$), 유리형광선량계는 $r = 0.969$ ($p < 0.001$), 광자극발광선량계는 $r = 0.989$ ($p < 0.001$) 순으로 pearson 상관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 kVp 변화에 따른 선량값 변화에서는 열형광선량계

가 에너지 의존성이 우수하다는 것을 알 수 있었다.(Fig.19)

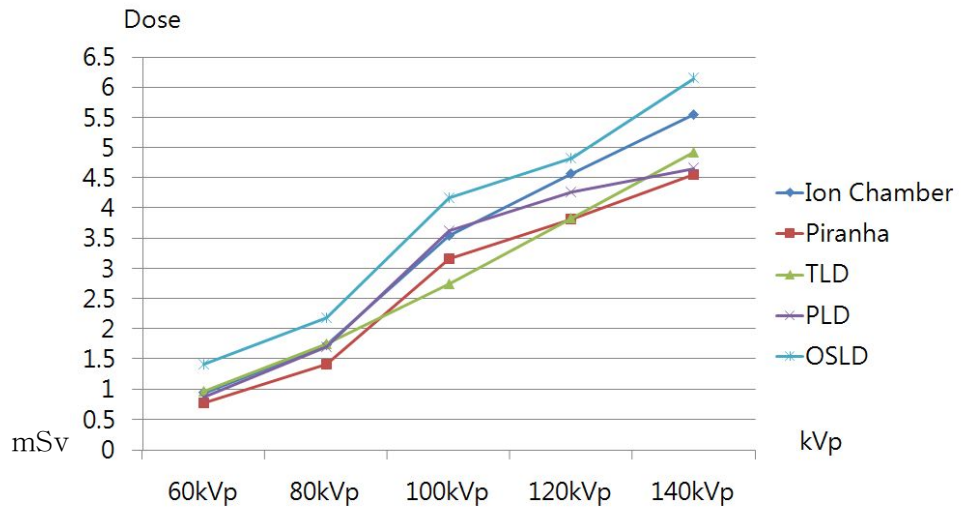


Fig. 19. Dosimeters comparison by different kVp

B. 중 에너지 영역

Table. 20는 엑스선 투시장치의 재현성에 대한 실험 결과를 나타내었다. 이때 재현성은 실험 당일마다 일반적인 위장조영촬영 조건인 83 Kvp, 1.2 mA, 5 min으로 X-선 투시장치의 중심선속에서 전리함으로 10회 측정하여 조사하였고, 그 결과 변동계수가 오차허용범위 5%(0.05)에 포함되어야 한다. 각각의 변동계수는 0.03, 0.02, 0.01로 오차 허용 범위 5%이내에서 일치 하였다.

Table 20. Reproducibility of X-ray Fluoroscopy Device

Day N	X-ray output dose (mGy/s)										GM	GSD	CV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	0.121	0.116	0.11	0.113	0.117	0.117	0.109	0.12	0.114	0.113	0.1139	0.003	0.03
2	0.116	0.116	0.11	0.113	0.117	0.116	0.109	0.12	0.114	0.113	0.1149	0.003	0.03
3	0.116	0.118	0.112	0.113	0.112	0.116	0.11	0.118	0.114	0.111	0.1111	0.001	0.01
4	0.114	0.118	0.112	0.109	0.112	0.111	0.11	0.118	0.114	0.111	0.1125	0.003	0.03
5	0.112	0.114	0.112	0.112	0.111	0.111	0.11	0.117	0.111	0.114	0.1123	0.003	0.03
6	0.112	0.114	0.112	0.112	0.111	0.111	0.112	0.117	0.111	0.114	0.1125	0.002	0.02
7	0.114	0.114	0.112	0.114	0.115	0.115	0.112	0.117	0.111	0.114	0.11	0.002	0.02
8	0.114	0.115	0.11	0.113	0.109	0.109	0.112	0.115	0.111	0.113	0.1172	0.002	0.02
9	0.11	0.115	0.11	0.113	0.109	0.109	0.108	0.115	0.111	0.113	0.1122	0.002	0.02
10	0.11	0.109	0.111	0.113	0.11	0.11	0.108	0.115	0.111	0.113	0.1129	0.001	0.01

거리에 따른 열형광선량계 표층 선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=48661.250$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 거리 0 cm(a) 높았으며, 다음 5 cm(b) 10 cm(c) 15 cm(d) 20 cm(e) 순으로 측정되었으며 25 cm~40 cm까지는 동일하게 가장 낮은 집단(f)으로 구성되었다.

거리에 따른 유리형광선량계 표층선량 차이분석 결과 역시 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=48967.839$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과에서도 열형광선량계 표층선량과 마찬가지로, 거리 0 cm(a) 높았으며, 다음 5 cm(b) 10 cm(c) 15 cm(d) 20 cm(e) 순으로 측정되었으며 25 cm~40 cm까지는 동일하게 가장 낮은 집단(f)으로 구성되었다.

거리에 따른 광자극발광선량계 표층선량 차이분석 결과 역시 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=36731.273$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과에서도 열형광선량계 표층선량과 마찬가지로, 거리 0 cm(a) 높았으며, 다음 5 cm(b) 10 cm(c) 15 cm(d) 20 cm(e) 순으로 측정되었으며 25 cm~40 cm까지는 동일하게 가장 낮은

집단(f)으로 구성되었다(Table 21).

Table 21. TLD, PLD and OSLD Surface Dose of Distance (Unit : mSv)

cm	TLD surface dose				PLD surface dose				OSLD surface dose			
	N	GM±GSD	F-value	p	N	GM±GSD	F-value	p	N	GM±GSD	F-value	p
0	10	61.25±0.72 ^a			10	26.95±0.32 ^a			10	35.51±0.42 ^a		
5	10	54.86±0.72 ^b			10	24.14±0.32 ^b			10	31.28±0.38 ^b		
10	10	8.29±0.20 ^c			10	3.65±0.09 ^c			10	5.31±0.12 ^c		
15	10	4.57±0.18 ^d			10	1.97±0.21 ^d			10	3.42±0.18 ^d		
20	10	1.44±0.13 ^a	48661.250	0.000*	10	1.05±0.06 ^a	48967.839	0.000*	10	1.21±0.09 ^a	36731.273	0.000*
25	10	0.35±0.02 ^f			10	0.15±0.01 ^f			10	0.22±0.09 ^f		
30	10	0.24±0.05 ^f			10	0.10±0.02 ^f			10	0.18±0.04 ^f		
35	10	0.13±0.00 ^f			10	0.06±0.00 ^f			10	0.09±0.01 ^f		
40	10	0.10±0.01 ^f			10	0.05±0.01 ^f			10	0.06±0.01 ^f		

Note : 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 TLD, PLD and OSLD unit is the number of mSv. ***p < 0.001.

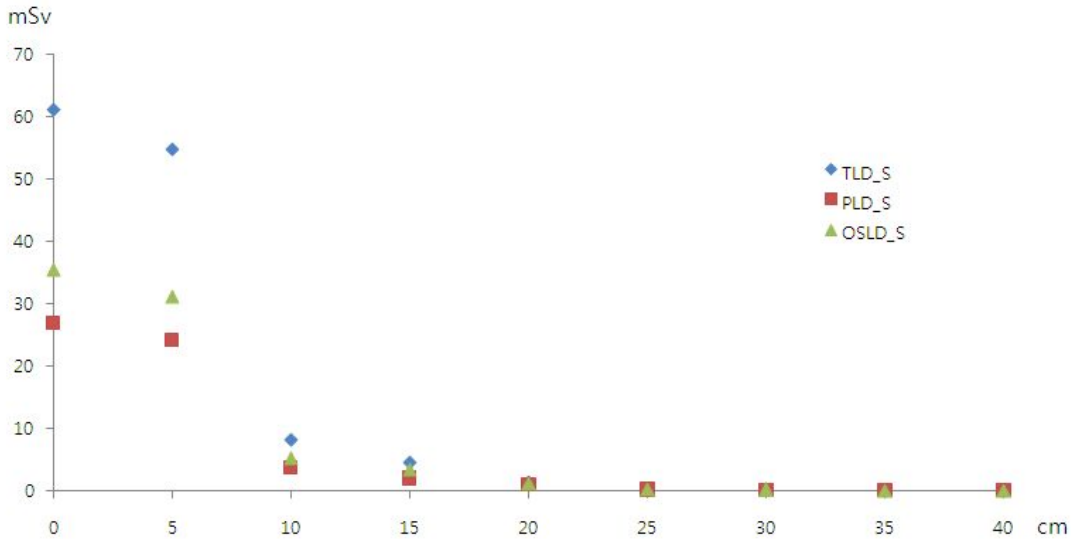


Fig. 20 TLD, PLD and OSLD Surface Dose of Distance

거리에 따른 열형광선량계 심부선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=27683.945$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 거리 0 cm(a) 높았으며, 다음 5 cm(b) 10 cm(c) 15 cm(d) 20 cm(e) 순으로 측정되었으며 25 cm~40 cm까지는 동일하게 가장 낮은 집단(f)으로 구성되었다.

거리에 따른 유리형광선량계 심부선량 차이분석 결과 역시 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=28327.314$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과에서도 열형광선량계 심부선량과 마찬가지로, 거리 0 cm(a) 높았으며, 다음 5 cm(b) 10 cm(c) 15 cm(d) 20 cm(e) 순으로 측정되었으며 25 cm~40 cm까지는 동일하게 가장 낮은 집단(f)으로 구성되었다.

거리에 따른 광자극발광선량계 심부선량 차이분석 결과 역시 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=2475.153$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과에서도 열형광선량계 심부선량과 마찬가지로, 거리 0 cm(a) 높았으며, 다음 5 cm(b) 10 cm(c) 15 cm(d) 20 cm(e) 순으로 측정되었으며 25 cm~40 cm까지는 동일하게 가장 낮은 집단(f)으로 구성되었다(Table 22).

Table 22. TLD, PLD and OSLD Depth Dose of Distance

cm	TLD depth dose				PLD depth dose				OSLD surface dose			
	N	GM±GSD	F-value	p	N	GM±GSD	F-value	p	N	GM±GSD	F-value	p
0	10	55.37±0.85 ^a			10	24.21±0.37 ^a			10	32.57±0.73 ^a		
5	10	48.96±0.52 ^b			10	21.55±0.21 ^b			10	26.53±0.49 ^b		
10	10	8.23±0.74 ^c			10	3.64±0.33 ^c			10	5.19±0.37 ^c		
15	10	3.19±0.23 ^d			10	1.59±0.10 ^d			10	2.01±0.16 ^d		
20	10	1.52±0.16 ^a	27683.945	0.000*	10	0.96±0.04 ^a	28327.314	0.000*	10	1.24±0.11 ^e	26475.153	0.000*
25	10	0.29±0.01 ^f			10	0.12±0.01 ^f			10	0.19±0.07 ^f		
30	10	0.22±0.06 ^f			10	0.11±0.03 ^f			10	0.13±0.02 ^f		
35	10	0.11±0.01 ^f			10	0.05±0.01 ^f			10	0.07±0.01 ^f		
40	10	0.09±0.01 ^f			10	0.04±0.01 ^f			10	0.05±0.01 ^f		

Note : 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 TLD, PLD and OSLD unit is the number of mSv. ***p < 0.001.

Table 21, 22에서 표층선량은 중심에서 열형광선량계 61.25±0.75, 유리형광선량계 26.95±0.32, 광자극발광선량계 35.51±0.42였고, 심부선량은 중심에서 열형광선량계 55.37±0.85, 유리형광선량계 24.21±0.37, 광자극발광선량계 32.57±0.73 이었다. 이로써 열형광선량계가 형광유리선량계 보다 감도가 더 우수하다는 것을 알 수 있었다.(Fig. 20, 21)

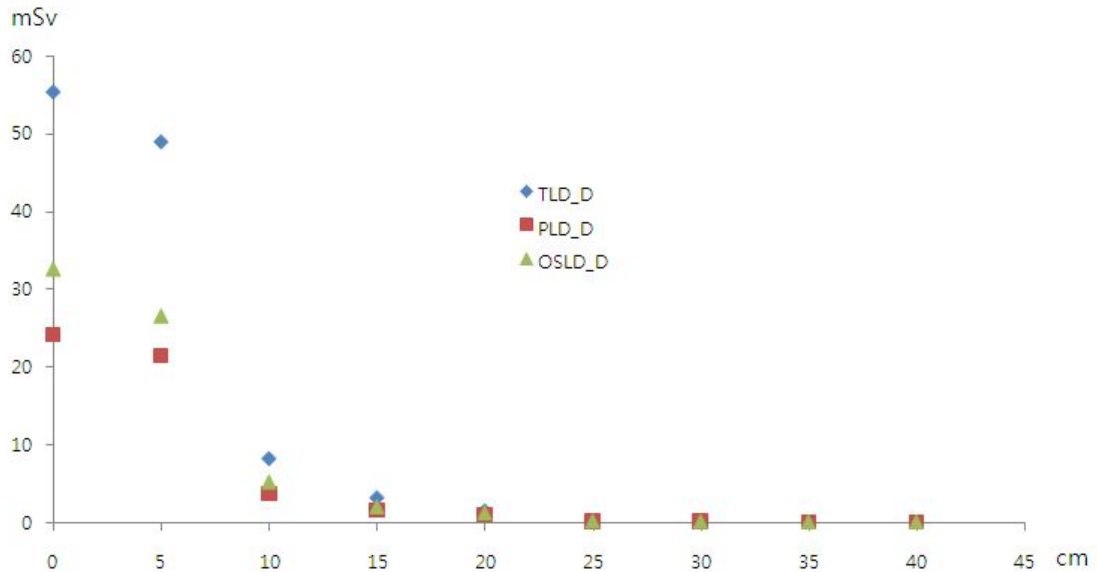


Fig. 21 TLD, PLD and OSLD Depth Dose of Distance

방향성에 따른 열형광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=41.448$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 방향성 0도(a)가 가장 높았으며, 다음 15도(b), -15도(c), 30도/-30도(d), 45도/-45도(e), 60도/-60도(f), 75도/90도/-75도/-90도(f) 순으로 집단이 구성되었다.

방향성에 따른 유리형광선량계 표층선량 차이분석 결과 역시 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=46.634$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 0도/15도(a)가 가장 높은 집단을 구성하였으며, 다음 30도/-15도/-30도(b), 45도/60도/75도/-45도/-60도(c), 90도/-75도(d), -90도(e)순으로 파악되었다.

방향성에 따른 광자극발광선량계 표층선량 차이분석 결과 역시 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=42.574$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 0도/15도(a)가 가장 높은 집단을 구성하였으며, 다음 -15도/-30도/30도(b), 45도/-45도/60도/-60도/75도(c), -75도/90도(d), -90도(e)순으로 파악되었다(Table 23, Fig. 22).

Table 23. TLD, PLD and OSLD Angular Dependence Surface Dose

Angle	TLD surface dose				PLD surface dose				OSLD surface dose			
	N	GM±GSD	F-value	p	N	GM±GSD	F-value	p	N	GM±GSD	F-value	p
90°	10	0.67±0.04 ^g			10	0.81±0.05 ^d			10	0.31±0.04 ^d		
75°	10	0.70±0.05 ^g			10	0.88±0.03 ^c			10	0.40±0.04 ^c		
60°	10	0.75±0.07 ^f			10	0.91±0.03 ^c			10	0.45±0.02 ^c		
45°	10	0.84±0.14 ^e			10	0.94±0.02 ^c			10	0.62±0.05 ^c		
30°	10	0.98±0.15 ^d			10	0.97±0.01 ^b			10	0.83±0.06 ^b		
15°	10	1.25±0.09 ^b			10	1.04±0.08 ^a			10	1.01±0.07 ^a		
0°	10	1.44±0.13 ^a	41.448	0.000*	10	1.05±0.06 ^a	46.634	0.000*	10	1.21±0.09 ^a	42.574	0.000*
-15°	10	1.18±0.15 ^c			10	0.98±0.02 ^b			10	0.99±0.11 ^b		
-30°	10	0.92±0.16 ^d			10	0.95±0.03 ^b			10	0.84±0.08 ^b		
-45°	10	0.83±0.15 ^e			10	0.91±0.02 ^c			10	0.61±0.04 ^c		
-60°	10	0.76±0.13 ^f			10	0.89±0.02 ^c			10	0.42±0.02 ^c		
-75°	10	0.70±0.07 ^g			10	0.84±0.03 ^d			10	0.39±0.04 ^d		
-90°	10	0.68±0.04 ^g			10	0.79±0.02 ^e			10	0.32±0.01 ^e		

Note : 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 TLD, PLD and OSLD unit is the number of mSv. ***p < 0.001.

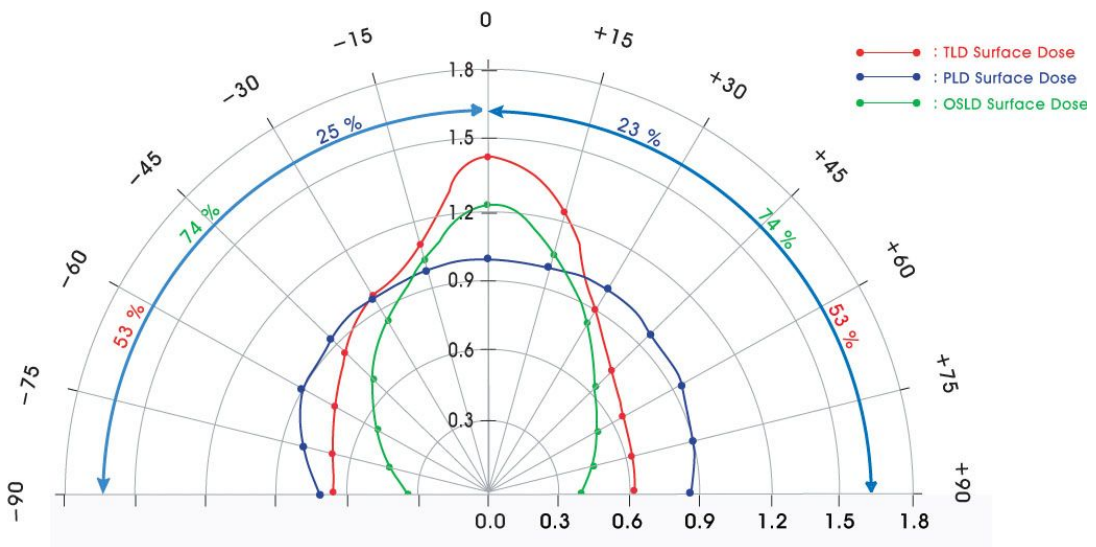


Fig. 22. TLD, PLD and OSLD Angular Dependence Surface Dose

방향성에 따른 열형광선량계 심부선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=36.694$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 방향성 0도(a)가 가장 높았으며, 다음 15도/-15도(b), 30도/-30도(c), 45도/-45도(d), 60도/-60도/-75도(e), 75도/90도/-90도(f) 순으로 집단이 구성되었다.

방향성에 따른 유리형광선량계 심부선량 차이분석 결과 역시 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=77.346$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 0도(a)가 가장 높은 집단을 구성하였으며, 다음 15도/30도(b), 45도/-15도/-30도(c), 60도/-45도(d), 75도/-60도(e), -75도(f), -90도/90도(g)순으로 파악되었다.

방향성에 따른 광자극발광선량계 심부선량 차이분석 결과 역시 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F=49,512$, $p<0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 0도/15도(a)가 가장 높은 집단을 구성하였으며, 다음 -15도/-30도/30도(b), -45도/45도/-60도/60도/75도(c), -75도/90도(d), -90도(e)순으로 파악되었다(Table 24, Fig. 23).

Table 24. TLD, PLD and OSLD Angular Dependence Depth Dose

angle	TLD depth dose				PLD depth dose				OSLD depth dose			
	N	GM±GSD	F-value	p	N	GM±GSD	F-value	p	N	GM±GSD	F-value	p
90°	10	0.61±0.05 ^f			10	0.72±0.02 ^g			10	0.37±0.04 ^d		
75°	10	0.63±0.05 ^f			10	0.82±0.03 ^e			10	0.45±0.06 ^c		
60°	10	0.65±0.12 ^e			10	0.87±0.03 ^d			10	0.51±0.05 ^c		
45°	10	0.83±0.20 ^d			10	0.90±0.03 ^c			10	0.63±0.06 ^c		
30°	10	1.0±0.18 ^c			10	0.93±0.03 ^b			10	0.82±0.11 ^b		
15°	10	1.20±0.15 ^b			10	0.93±0.04 ^b			10	0.99±0.04 ^a		
0°	10	1.52±0.16 ^a	36.694	0.000*	10	0.96±0.04 ^a	77.346	0.000*	10	1.24±0.11 ^a	49.512	0.000*
-15°	10	1.16±0.18 ^b			10	0.90±0.02 ^c			10	0.98±0.03 ^b		
-30°	10	0.90±0.21 ^c			10	0.89±0.03 ^c			10	0.84±0.04 ^b		
-45°	10	0.78±0.25 ^d			10	0.86±0.03 ^d			10	0.65±0.07 ^c		
-60°	10	0.67±0.14 ^e			10	0.82±0.03 ^e			10	0.52±0.03 ^c		
-75°	10	0.64±0.09 ^e			10	0.78±0.02 ^f			10	0.47±0.04 ^d		
-90°	10	0.59±0.04 ^f			10	0.72±0.02 ^g			10	0.34±0.03 ^e		

Note : 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 TLD, PLD and OSLD unit is the number of mSv. ***p < 0.001.

Table 23, 24에서 열형광선량계의 표층선량(surface dose)은 0°에서 1.44±0.13로 최고 선량값으로 측정되었고, +90°에서 0.67±0.04에서는 최저 선량값으로 측정되었다. 심부선량(depth dose)은 0°에서 1.52±0.16로 최고 선량값으로 측정되었으며, -90°에서 0.59±0.04로 최저 선량값(dose value)으로 측정되었다. 열형광선량계 표층선량과 심부선량의 최고값 최저값 차이는 각각 0.77±0.09, 0.93±0.12이었다. 유리형광선량계의 표층선량은 0°에서 1.05±0.06로 최고 선량값으로 측정되었고, -90°에서 0.79±0.02에서 최저 선량값으로 측정되었다. 심부선량은 0°에서 0.96±0.04로 최

고 선량값으로 측정되었으며, -90° 에서 0.72 ± 0.02 로 최저 선량값으로 측정되었다. 유리형광선량계 표층선량과 심부선량의 최고값과 최저값의 차이는 각각 0.26 ± 0.04 , 0.24 ± 0.02 이었다. 광자극발광선량계의 표층선량(surface dose)은 0° 에서 1.21 ± 0.09 로 최고 선량값으로 측정되었고, $+90^\circ$ 에서 0.31 ± 0.04 에서 최저 선량값으로 측정되었다. 심부선량(depth dose)은 0° 에서 1.24 ± 0.11 로 최고 선량값으로 측정되었으며, -90° 에서 0.34 ± 0.03 으로 최저 선량값(dose value)으로 측정되었다. 광자극발광선량계 표층선량과 심부선량의 최고값과 최저값의 차이는 각각 0.90 ± 0.05 , 0.90 ± 0.08 이었다. 따라서 방향의존성 실험에서는 열형광선량계가 0° 에서 -90° 의 심부선량은 61%의 감소율을 보였으며 유리형광선량계는 0° 에서 -90° 의 심부선량은 25%의 감소율을 보였고, 광자극발광선량계는 0° 에서 -90° 의 심부선량은 약 72%의 감소율을 보이므로 유리형광선량계가 열형광선량계, 광자극발광선량계 보다는 방향의존성이 적음을 알 수 있다.

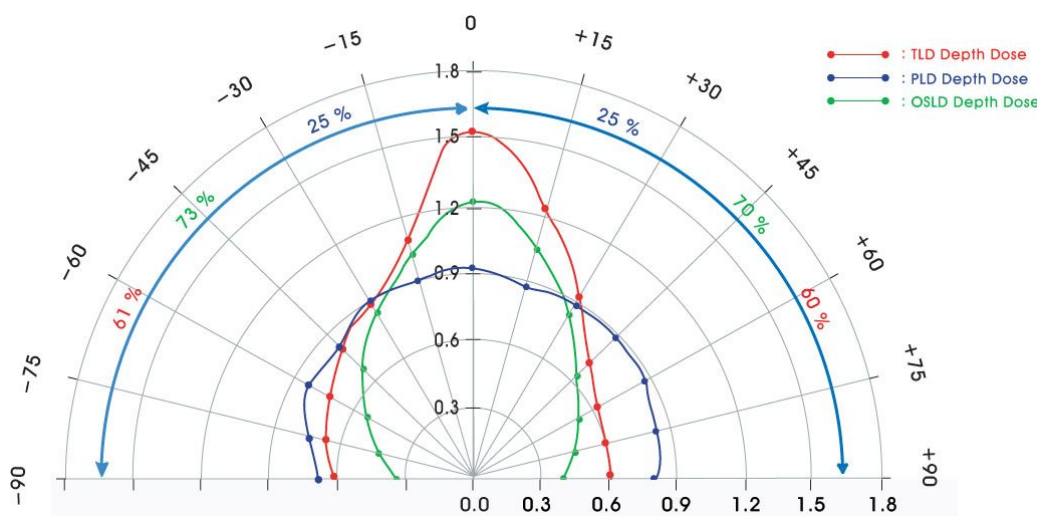


Fig. 23. TLD, PLD and OSLD Angular Dependence Depth Dose

C. 고 에너지

1. 재현성 평가

Figure 22 는 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. 24)

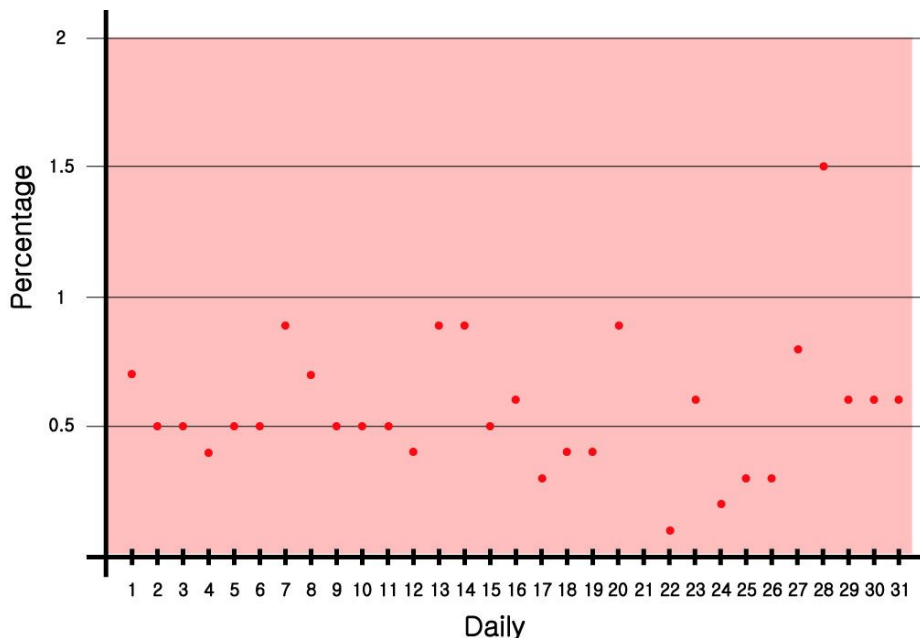


Fig. 24. Reproducibility evaluation

2. 에너지 의존성 실험결과

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

MU/min 변화에 따른 열형광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 18.053$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 200 MU/min(a)인 경우 제일 높았으며, 다음 100 MU/min(a,b), 400 MU/min (b,c), 500 MU/min(c,d), 300 MU/min(d) 순으로 분류되었으며, Table 25 와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는

것을 알 수 있다. MU/min 변화에 따른 유리형광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 33.705$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 200, 300 MU/min(a)인 경우 제일 높았으며, 다음 100, 400 MU/min(a,b), 500 MU/min(c) 순으로 분류되었으며, Table 25 와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

MU/min 변화에 따른 광자극발광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F = 923.361$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률이 500 MU/min(a)인 경우가 제일 높았고, 다음 400 MU/min(b), 100, 300 MU/min(c), 200 MU/min(d) 순으로 분류되었으며, Table 25 와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

Table 25. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 10cm. But 1Gy 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 ± 0.14 ^{a,b}			10	3.09 ± 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 ± 0.23 ^{b,c}			10	3.08 ± 0.04 ^{a,b}			10	5.20 ± 0.53 ^b		
500	10	3.52 ± 0.21 ^{c,d}			10	2.87 ± 0.13 ^c			10	5.46 ± 0.98 ^a		

Note : ^aStandard deviation. 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 25 에서 열형광선량계의 표층선량 (surface dose)은 200 MU/min 에서 4.05로 최고 선량값으로 측정되었고, 300 MU/min 에서 3.46에서 최저 선량값으로 측정되었다. 열형광선량계 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.59이었다. 유리형광선량계의 표층선량은 200 MU/min 에서 3.22로 최고 선량값으

로 측정되었고 500 MU/min 에서 2.87에서 최저 선량값으로 측정되었다. 유리형광선량계 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.35이었다. 광자극발광선량계의 표층선량은 500 MU/min 에서 5.46으로 최고 선량값으로 측정되었고 100 MU/min 에서 4.55에서 최저 선량값으로 측정되었다. 광자극발광선량계 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.91이었다. 따라서 1 Gy를 고정하고 100 MU/min씩 증가 하였을 때 최대, 최저 선량값의 차이가 열형광선량계 15%, 유리형광선량계 11%, 광자극발광선량계 17%로 차이가 가장 작은 유리형광선량계의 감도가 우수하다는 것을 알 수 있다.

b. 선량을 변화에 따른 20 cm 거리에서의 선량계 비교, 1 Gy 고정

MU/min 변화에 따른 열형광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 7.189$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률 300 MU/min(a)이 높았으며, 다음으로 100, 400 MU/min(b), 200, 500 MU/min(c) 순으로 동일집단으로 분류되었으며, Table 26 과 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. MU/min 변화에 따른 유리형광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다 ($F = 6.131$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률이 300 MU/min(a)인 경우가 제일 높았으며, 다음으로 200, 400, 500 MU/min(a,b), 100 MU/min(b,c) 순으로 분류되었으며, Table 26 과 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. MU/min 변화에 따른 광자극발광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F = 1106.103$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량률이 400 MU/min(a)인 경우가 가장 높았으며, 다음으로 100, 300 MU/min(b), 200, 500 MU/min(c) 순으로 분류되었으며, Table 26 과 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

Table 26. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 20cm. But 1Gy 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 : ^aStandard deviation. 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 26 에서 열형광선량계의 표충선량은 300 MU/min 에서 2.26으로 최고 선량값으로 측정되었고, 200 MU/min에서 2.02로 최저 선량값으로 측정되었다. 열형광선량계 표충선량 최고값, 최저값 차이는 0.24이었다. 유리형광선량계의 표충선량은 300 MU/min 에서 2.35로 최고 선량값으로 측정되었고 100 MU/min 에서 2.17에서 최저 선량값으로 측정되었다. 유리형광선량계 표충선량 최고값, 최저값 차이는 0.29이었다. 광자극발광선량계의 표충선량은 400 MU/min 에서 2.53으로 최고 선량값으로 측정되었고 200 MU/min 에서 2.17에서 최저 선량값으로 측정되었다. 광자극발광선량계 표충선량 최고값, 최저값 차이는 0.36이었다. 따라서 1 Gy를 고정하고 100 MU/min씩 증가 하였을 때 최대, 최저 선량값의 차이가 열형광선량계 11%, 유리형광선량계 7%, 광자극발광선량계 14%로 차이가 가장 적은 유리형광선량계의 감도가 우수하다는 것을 알 수 있다.

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

MU/min 변화에 따른 열형광선량계 표충선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(F = 9.504, p < 0.001). Scheffe의 사후검증 결과, 선량

를 300 MU/min(a) 높았으며, 다음 100, 200 MU/min(a,b), 400, 500 MU/min(c) 순으로 나타났으며, Table 27 와 같이 MU의 증가에 따른 선량 값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. MU/min 변화에 따른 유리형광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F = 6.131$, $p < 0.05$). Scheffe의 사후검증결과, 선량률 400 MU/min(a) 높았으며, 다음 200, 500 MU/min(b)은 같은 집단이고, 300 MU/min(b,c), 100 MU/min(c) 순으로 나타났으며, Table 27 와 같이 MU의 증가에 따른 선량 값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. MU/min 변화에 따른 광 자극발광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다 ($F = 183.970$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증결과, 선량률 200 MU/min(a)가 가장 높았으며, 다음 300 MU/min(a,b), 100 MU/min(b)이고, 400, 500 MU/min(c)은 같은 집단으로 분류되었으며, Table 27과 와 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

Table 27. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 30cm. But 1Gy 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 : ^aStandard deviation. 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 27 에서 열형광선량계의 표층선량은 300 MU/min 에서 1.24로 최고 선량값으로 측정되었고, 400 MU/min 에서 1.10에서 최저 선량값으로 측정되었다. 열형광선량계 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.14 이었다. 유리형광

선량계의 표층선량은 400 MU/min 에서 2.31로 최고 선량값으로 측정되었고 100 MU/min 에서 2.08로 최저 선량값으로 측정되었다. 유리형광선량계 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.23이었다. 광자극발광선량계의 표층선량은 200 MU/min 에서 2.34으로 최고 선량값으로 측정되었고 500 MU/min 에서 2.01에서 최저 선량값으로 측정되었다. 광자극발광선량계 표층선량 최고값, 최저값 차이는 0.33이었다. 따라서 1 Gy를 고정하고 100 MU/min씩 증가 하였을 때 최대, 최저 선량값의 차이가 열형광선량계 12%, 유리형광선량계 10%, 광자극발광선량계 14%로 차이가 가장 적은 열형광선량계의 감도가 우수하다는 것을 알 수 있다.

d. 선량을 변화에 따른 40 cm 거리에서의 선량계 비교, 1 Gy 고정

MU/min 변화에 따른 열형광선량계 표층선량 차이분석결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F = 4.376$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량을 100 MU/min(a)가 가장 높았으며, 다음 300, 400, 500 MU/min(a,b), 200 MU/min(c) 순으로 분류되었으며, Table 28 과 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. MU/min 변화에 따른 유리형광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F = 1.356$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 모두 동일 집단으로 확인할 수 있다. MU/min 변화에 따른 광자극발광선량계 표층선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F = 192.828$, $p < 0.001$). Scheffe의 사후검증 결과, 선량을 100 MU/min(a)가 가장 높았으며, 다음 300, 400, 500 MU/min(b)은 같은 집단이고, 200 MU/min(b,c)순으로 분류되었으며, Table 28 과 같이 MU의 증가에 따른 선량값이 비례적으로 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

Table 28. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 40cm. But 1Gy is fixed

MU	TLD				PLD				OSLD			
	N	Mean±SD ^a	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 : ^aStandard deviation. 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 28 에서 열형광선량계의 표충선량은 100 MU/min 에서 0.76으로 최고 선량값으로 측정되었고, 200 MU/min 에서 0.71에서 최저 선량값으로 측정되었다. 열형광선량계 표충선량 최고값, 최저값 차이는 0.05이었다. 유리형광선량계의 표충선량은 200 MU/min 에서 1.36으로 최고 선량값으로 측정되었고 300 MU/min 에서 1.31에서 최저 선량값으로 측정되었다. 유리형광선량계 표충선량 최고값, 최저값 차이는 0.05이었다. 광자극발광선량계의 표충선량은 100 MU/min 에서 1.37로 최고 선량값으로 측정되었고 2000 MU/min 에서 1.24로 최저 선량값으로 측정되었다. 광자극발광선량계 표충선량 최고값, 최저값 차이는 0.13이었다. 따라서 1 Gy를 고정하고 100 MU/min씩 증가하였을 때 최대, 최저 선량값의 차이가 열형광선량계 7%, 유리형광선량계 4%, 광자극발광선량계 9%로 차이가 가장 적은 유리형광선량계의 감도가 우수하다는 것을 알 수 있다.(Fig.25)

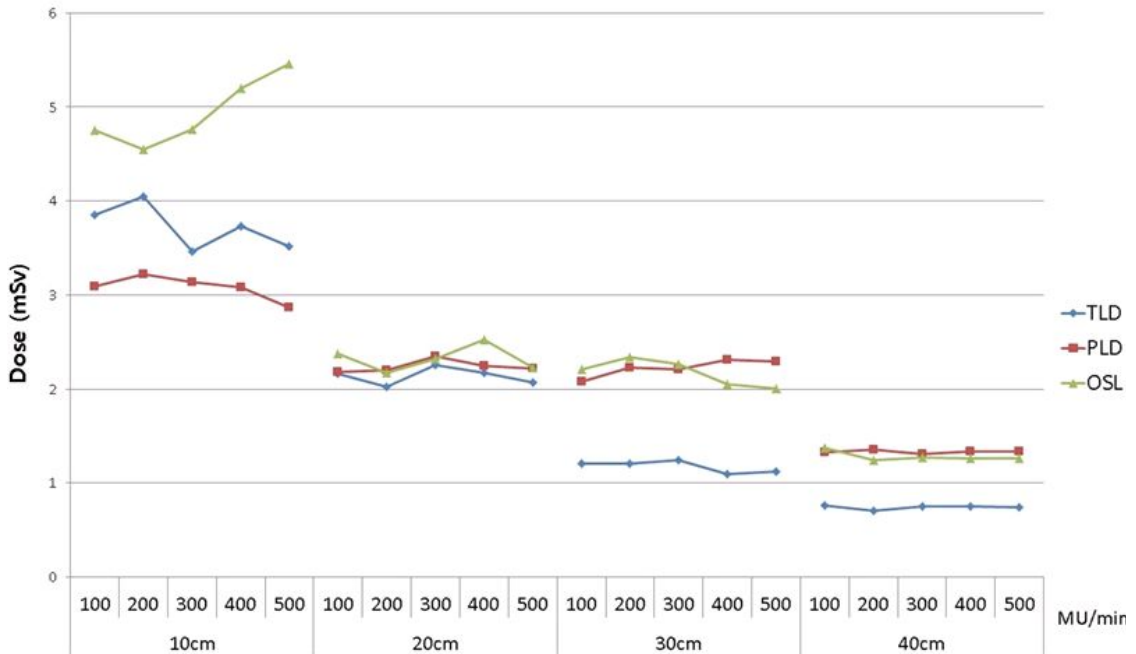


Fig. 25. Dosimeters comparison by the change of MU at a distance of 10-40cm. But 1Gy is fixed

e. 선량 변화에 따른 10 cm 거리에서의 선량계 비교, 400 MU/min 고정

Gy 변화에 따른 열형광선량계 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 29 과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 유리형광선량계 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 Gy(e) 순으로 분류되었으며, Table 29 과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 광자극발광선량계 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 29 과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다.(Table 29)

Table 29. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 10cm. But 400MU/min 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 ^c			10	3.44 ± 0.25 ^c			10	4.10 ± 0.42 ^c		
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 : ¹Thermoluminescent dosimeter, ²photoluminescent dosimeter, ³optically stimulated luminescence dosimeter, ⁴standard deviation. 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 29 에서 표충선량을 Bivariate Correlation 결과, 열형광선량계는 $r = 0.996$ ($p < 0.001$), 유리형광선량계는 $r=0.991$ ($p < 0.001$), 광자극발광선량계는 $r=0.995$ ($p < 0.001$) 순으로 pearson 상관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 10 cm 거리에서는 열형광선량계가 에너지 의존성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다.

f. 선량 변화에 따른 20 cm 거리에서의 선량계 비교, 400 MU/min 고정

Gy 변화에 따른 열형광선량계 표충선량 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 30 와 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 유리형광선량계 표충선량 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 30 과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 광자극발광선량계 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 30 과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다.(Table 30)

Table 30. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 20cm. But 400MU/min is fixed

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

Note : ¹Thermoluminescent dosimeter, ²photoluminescent dosimeter, ³optically stimulated luminescence dosimeter, ⁴standard deviation. 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 30 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 열형광선량계는 $r = 0.995$ ($p < 0.001$), 유리형광선량계는 $r = 0.975$ ($p < 0.001$), 광자극발광선량계는 $r = 0.983$ ($p < 0.001$) 순으로 pearson 상관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 20 cm 거리에서는 열형광선량계가 에너지 의존성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다.

g. 선량 변화에 따른 30 cm 거리에서의 선량계 비교, 400 MU/min 고정

Gy 변화에 따른 열형광선량계 표충선량 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 31과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 유리형광선량계 표충선량 차이분석 결과, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F = 611.192$, $p < 0.001$). 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 31과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 광자극발광선량계 표충선량 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 31과 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다.(Table 31)

Table 31. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 30cm. But 400MU/min is fixed

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

Note : ¹Thermoluminescent dosimeter, ²photoluminescent dosimeter, ³optically stimulated luminescence dosimeter, ⁴standard deviation. 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 31 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 열형광선량계는 $r = 0.996$ ($p < 0.001$), 유리형광선량계는 $r = 0.967$ ($p < 0.001$), 광자극발광선량계는 $r = 0.986$ ($p < 0.001$) 순으로 pearson 상관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 30 cm 거리에서는 열형광선량계가 에너지 의존성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다.

h. 선량 변화에 따른 40 cm 거리에서의 선량계 비교, 400 MU/min 고정

Gy 변화에 따른 열형광선량계 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 32와 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 유리형광선량계 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 32와 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다. Gy 변화에 따른 광자극발광선량계 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 32와 같이 Gy 증가 시 비례적으로 선량계의 선량이 증가하는 것을 알 수 있다.(Table 32)

Table 32. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 40cm. But
400MU/min is fixed

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

Note : ¹Thermoluminescent dosimeter, ²photoluminescent dosimeter, ³optically stimulated luminescence dosimeter, ⁴standard deviation. 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 32 에서 표층선량을 Bivariate Correlation 결과, 열형광선량계는 $r = 0.989$ ($p < 0.001$), 유리형광선량계는 $r = 0.992$ ($p < 0.001$), 광자극발광선량계는 $r = 0.933$ ($p < 0.001$) 순으로 pearson 상관계수 값이 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮으므로 40 cm 거리에서는 유리형광선량계가 에너지 의존성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다.(Fig. 26)

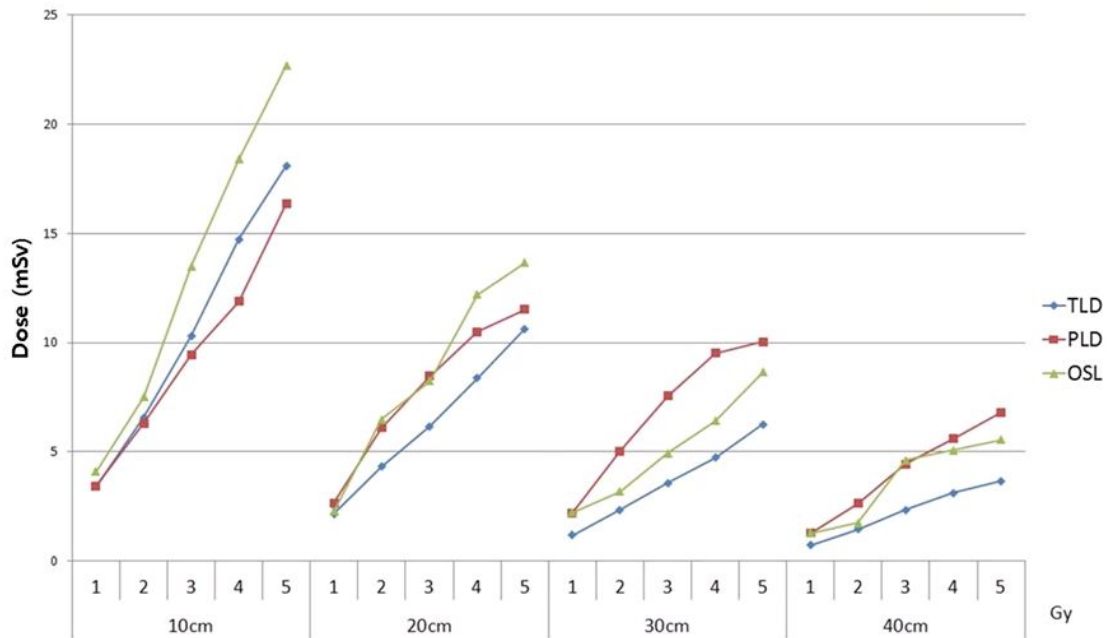


Fig. 26. Dosimeters comparison by the change of Gy at a distance of 40cm. But 400MU/min is fixed

3. 방향 의존성

방향성에 따른 열형광선량계 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 방향성에 따른 유리형광선량계 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 광자극발광선량계 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 33)

Table 33. When exposing X-ray, the evaluation of TLD, PLD and OSLD direction dependence by dosimeter angle

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

Note : ¹Thermoluminescent dosimeter, ²photoluminescent dosimeter, ³optically stimulated luminescence dosimeter, ⁴standard deviation. 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 33 에서 열형광선량계의 표충선량은 0°에서 1.63으로 최고 선량값을 보였고 -90°에서 0.85에서 최저 선량값을 나타내었다. 열형광선량계 표충선량 최고값, 최저값 차이는 0.78이었다. 유리형광선량계의 표충선량은 0°에서 3.12로 최고 선량값을 보였고 90°에서 0.82에서 최저 선량값을 나타내었다. 유리형광선량계 표충선량 최고값, 최저값 차이는 2.30이었다. 광자극발광선량계의 표충선량은 0°에서 3.57로 최고 선량값을 보였고 90°에서 0.53에서 최저 선량값을 나타내었다. 광자극발광선량계 표충선량 최고값, 최저값 차이는 3.04이었다. 따라서 방향의존성 실험에서는 열형광선량계가 0°에서 -90°의 표충선량은 48%의 감소율을 보였으며, 유리형광선량계는 0°에서 90°의 표충선량은 74%의 감소율

을 보였으며, 광자극발광선량계는 0°에서 90°의 표층선량은 86%의 감소율을 보였으므로 열형광선량계가 방향의존성이 가장 적고 유리형광선량계, 광자극발광선량계 순으로 방향의존성이 커짐을 알 수 있다.(Fig. 25)

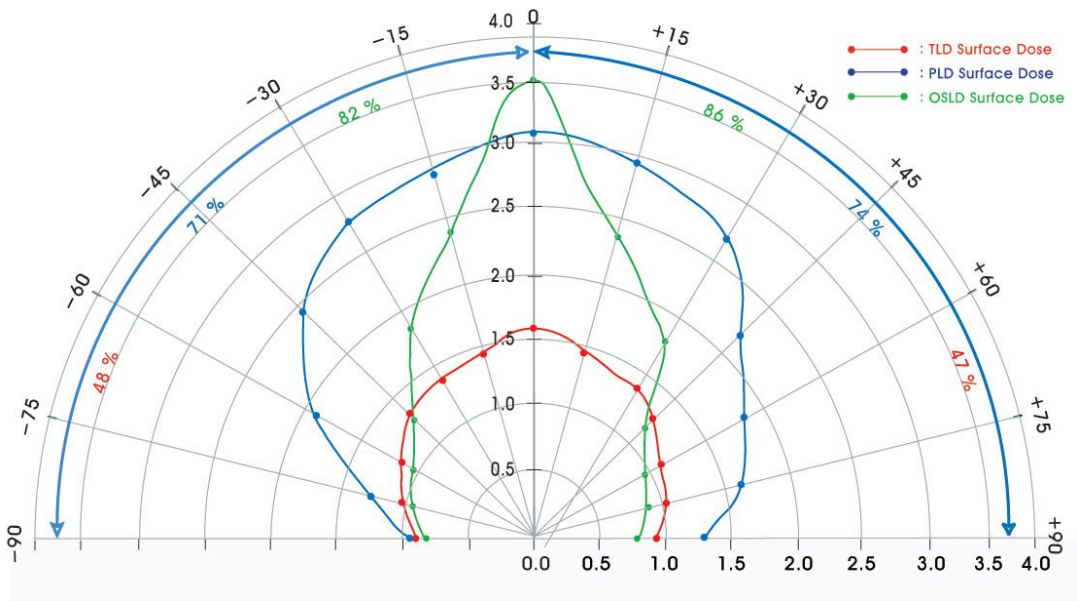


Fig. 27. When exposing X-ray, the evaluation of TLD, PLD and OSLD direction dependence by dosimeter angle

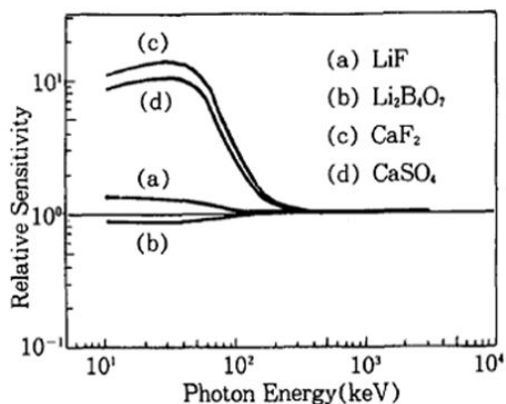
V. 고찰

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.^[27] 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 굴곡 되어 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 생명체 일 경우 여러 가지 방사선장해를 수반하게 된다.^[28] 그래서 방사선작업종사자의 피폭선량을 정확히 측정할 수 있는 측정 방법을 통해 작업장에서 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 필름선량계와 형광 또는 섬광 등 여기 작용을 이용한 열형광선량계에 의해 개인피폭 선량관리가 이루어졌다.^[29] 열형광선량계는 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.^[30] 한편, 열형광선량계 감도의 에너지 의존성의 이론적 계산은 (a) 열형광선량계 물질이 전자평형 상태에 있고 (b) 검출기 자체에 의한 흡수를 무시할 수 있으며 (c) 단위선량당의 TL의 광량(light yield/rad)이 LET(linear energy transfer)에 독립적이라 가정할 때 Bragg의 원리로부터 다음과 같이 계산할 수 있다. 즉 열형광선량계의 에너지 의존성은 공기를 표준물질로 택할 때(공기에 대해서는 정의에 따라 조사선량을 정확히 측정할 수 있고 조사선량과 흡수선량의 비가 일정함으로 표준물질로서 적합함) 공기와 열형광선량계물질의 질량-에너지 흡수계수의 비로서 계산할 수 있다. 따라서 열형광선량계 물질의 질량-에너지 흡수계수를 $(\mu_{en}/\rho)_d$,공기의 질량-에너지 흡수계수를 $(\mu_{en}/\rho)_{air}$ 라 할 때 에너지 의존성 $S(E)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

에너지 의존성(Energy Dependence)(Eq. 3)

$$S(E) = \frac{[\mu_{en}/\rho]d}{[\mu_{en}/\rho]_{air}} \quad (3)$$

열형광선량계의 감도의 에너지 의존성을 계산할 때 열형광선량계 물질내에 원자번호가 큰 불순물이나 dopant가 있을 경우에는 이를 고려하여야 한다. 따라서 Fig. 26는 열형광선량계로서 가장 많이 사용하는 열형광체에 대해서 J.H.Hub bell의 질량-에너지 흡수계수의 표를 이용하여 식에 의해서 이론적으로 계산한 에너지 의존성을 사용한



다.^[31](Fig. 26)

Fig. 26. The calculated energy dependence of some TL phosphors

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 형광유리선량계는 방사선에 조사된 유리소자가 자외선에 의한 여기로 주황색 형광을 발하는 현상(radiophotoluminescence: RPL)을 이용한 고체선량계로서 우편으로도 이동이 가능하며 판독과정 및 취급방법은 열형광선량계에 비해 매우 간단하고 유효크기 또한 작아 소조사면에 대한 선량 평가에 효과적이라고 알려져 있다. 그러나 기존의 다른 선량계에 비해 국내에서는 형광유리선량계의 특성 및 선량측정의 정확도 등 아직까지 알려진 연구가 미비하다.^[30] 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 대

하여 반복적이 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 광자극 발광 선량계는 광자극 발광 광량이 흡수한 방사선의 선량에 일정영역 범위 내에서 비례하는 특성을 이용한 선량계이다.^[32-33] 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.^[34-35] Dong 외 5명이 쓴 “Study on the angular dependence of personal exposure dosimeter - Focus on thermoluminescent dosimeter and photoluminescent dosimeter” 연구에서는 열형광 선량계가 유리형광선량계 보다 감도가 우수하다고 하였으나, 본 연구에서는 광자극발광선량계의 감도가 가장 우수했다.

방사선 작업 종사자는 엑스선 선속(beam)에 직접 노출되기도 하고, 환자에서 산란되는 상당한 양의 1차 산란 방사선과 상대적으로 적지만 촬영실 벽에서 산란되는 2차 산란 방사선에도 노출 된다^[36]. 따라서 방사선 작업종사자는 불가피하게 방사선에 대한 피폭을 피할 수 없기 때문에 정확한 측정이 요구된다.

A. 선량계의 측정원리 및 구조

1. 열형광선량계

a. 측정 원리

형광 물질의 결정에 방사선을 조사하면 여기된 전자는 원래의 자리를 벗어나 그 자리에 정공을 만들고, 정공과 전자는 결정 내를 자유로이 이동하다가 결정내의 결함 부분 등에 상당하는 포획중심이라는 특정정소에 포획되어 준안정상태(Quasi-state)가 된다. 이러한 준안정상태가 되는 격자결함을 포획중심(Trap)이라고 한다. 포획된 전자와 정공은 상온에서는 거의 움직이지 않다가 열에너지가 가해지면 포획중심에서 방출되어 재결합할 때 가시광영역의 광자 에너지에 상당하는 전자파를 방출하는데 이것이 바로 열형광이다. 이런 열형광물질의 특성을 이용한 선량계를 열형광선량계(Thermo Luminescence dosimeter)라 한다. 열형광은 넓은 선량 범위에서 흡수한 방사선량에 비례하기 때문에 이 열형광량을 측정하여 방사선량을 측정할 수 있다.

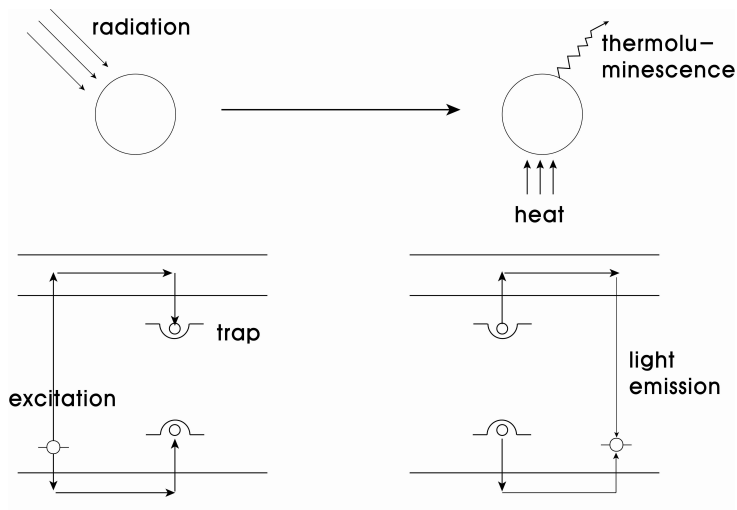


Fig. 29. Thermoluminescent dosimeter principle

- TLD 물질 : LiF , LiB_4O_7 , CaSO_4
- Annealing : 잔여 포획전자나 보관동안의 새 포획 전자의 방출 목적

b. 구조 및 측정 범위

1) Panasonic Carot 선량계 소자 구성

Table. 34. The structure of device and filter of Carot dosimeter

소자번호	Phosphor	필터
E1	없음	
E2	$\text{CaSO}_4(\text{Tm})$	Open window
E3	$\text{CaSO}_4(\text{Tm})$	Cu
E4	${}^n\text{Li}_2{}^n\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Cu

* 선량계 홀더의 두께는 포함되지 않았음.

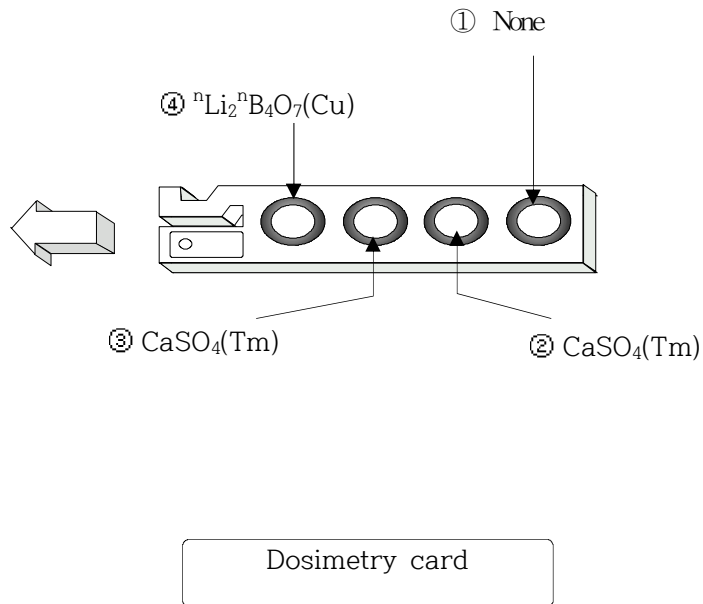


Fig. 30. The structure of Carot dosimeter

- 측정 범위

광자(10 keV ~ 10 MeV) = 1 mrem ~ 1000 rem (10 Sv)

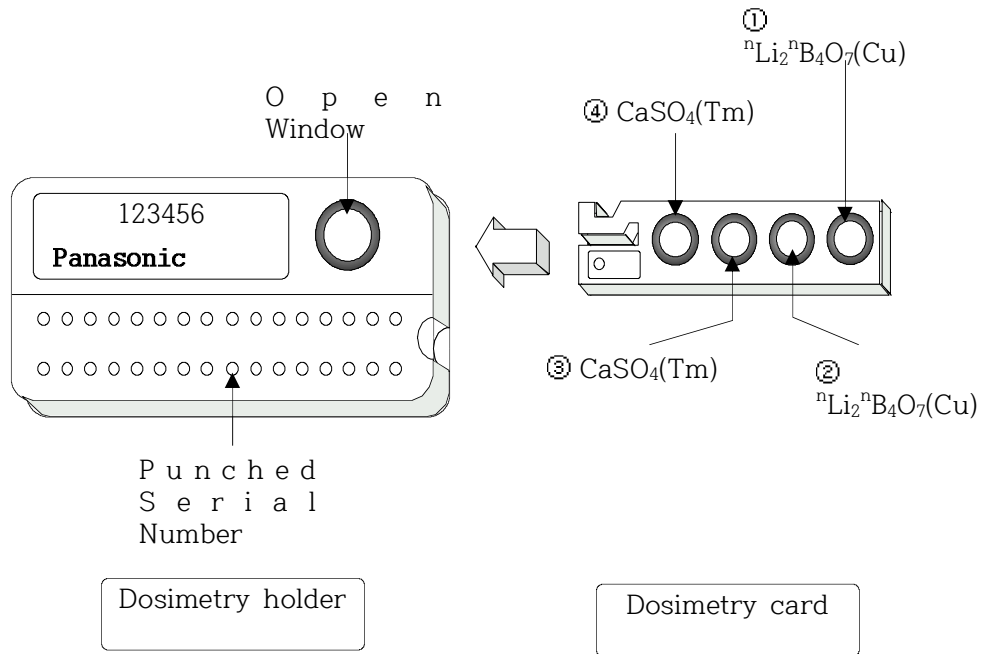
베타(0.5 MeV ~ 4 MeV) = 10 mrem ~ 1000 rem

2) Panasonic UD-802AT 선량계 구조도

Table. 35. The structure of device and filter of UD-802 dosimeter

소자번호	Phosphor	필터
E1	${}^n\text{Li}_2{}^n\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Plastics 14 mg/cm ²
E2	${}^n\text{Li}_2{}^n\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Plastics 160 mg/cm ²
E3	CaSO ₄ (Tm)	Plastics 160 mg/cm ²
E4	CaSO ₄ (Tm)	Lead 0.7 mm thick

* 선량계 홀더의 두께는 포함되지 않았음.



- 측정범위

광자(10 keV ~ 10 MeV) = 1 mrem ~ 1000 rem (10 Sv)

베타(0.5 MeV ~ 4 MeV) = 10 mrem ~ 1000 rem

중성자 : 열중성자 ~ 100 MeV

Fig. 31. The structure of UD-802AT dosimeter

열형광현상은 방사선에 의해 형광체에서 여기된 전자(electron)가 활성화제(activator)가 만드는 에너지 트랩(trap)에 포획되고 포획된 전자에 열을 가하게 되면 정공(electron hole)과 재결합(recombination)하여 빛이 방출되는 현상을 말하며 이때 포획전자(capture electron) 수는 조사선량(exposure)에 비례하거나 발광(luminescence Intensity)에 비례하기 때문에 이 발광량을 광전자증배관(photomultiplier tube)으로 측정함으로써 조사선량을 측정할 수 있다(Fig. 31).

열형광선량계는 엑스선이나 감마선과 같은 전리 방사선이 조사된 유전체시료를 가열할 때 시료로부터 가시광선이 방출되는 현상을 열형광이라 하며, 시료의 가열온도에 따라 TL 강도의 변화를 나타내게 된다. TL 현상은 금지대 내의 전자트랩과 재결합 중심을 가진 에너지대 모형으로 다음과 같이 설명할 수 있다. 전리 방사선의 조사에 의해 가 전자대의 전자는 전도대로 여기되고, 여기된 전

자의 대부분은 매우 짧은 시간 (약 10^{-8} sec)동안에 빛을 내면서 가전자대로 전이하지만 그 중 일부는 공격자, 격자간 원자, 불순물 등과 같은 격자결함에 기인하여 금지대 내의 국소화된 전자트랩에 포획되며 동시에 전자의 여기로 생긴 가전자대의 정공은 정공 트랩에 포획된다. 시료를 가열하면 포획된 전자가 전도대로 여기하여 이동하다가 정공 트랩의 재결합 중심과 재결합하면서 조사된 방사선의 선량에 비례하는 열형광을 내게 된다. 한편 전도대 아래에 있는 트랩의 깊이, 즉 활성화 에너지가 E 인 전자트랩에서 전자 한 개가 단위시간당 이탈할 확률은 (Eq. 4)

$$P = S \times e^{\left(-\frac{E}{kT}\right)} \quad (4)$$

로 주어지며 S 는 진동수인자 (Frequency factor), k 는 볼츠만 상수 (Boltzmann constant), T 는 절대온도이다. 따라서 시료의 온도를 높이면 처음에는 전자의 수가 감소함에 따라서 이탈할 확률, P 는 점차 감소하게 된다. 온도의 변화에 따른 TL 강도를 나타낸 곡선을 글로우 곡선 (Glow curve)이라 한다. 이 글로우 곡선은 몇 개의 피크를 갖게 되는데, 이는 활성화 에너지가 다른 트랩 준위에 의해 중첩되어 나타나는 것이다. Figure. 32는 TL 물질이 빛을 내는 과정이다.^[40](Fig. 32)

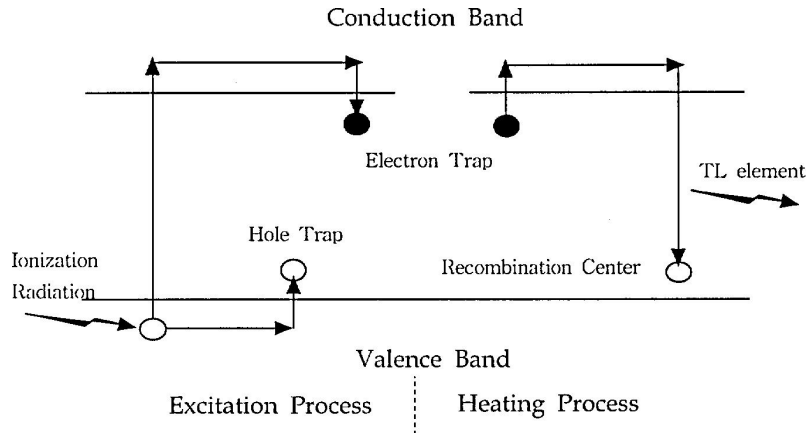


Fig. 32. TL emission process

열형광선량계의 장점으로는 방사선에 대한 감도와 안정성이 좋고, 측정 가능한

선량범위(dose range)가 넓다. 또한 재사용과 집적선량 (direct dose)의 측정이 가능해 환자 국내의 방사선작업종사자중 90% 이상이 개인 피폭 선량 측정에 열형광선량계를 사용하고 있다. 그러나 열형광선량계는 일정기간 경과 후 열처리 (heat treatment)가 필요하며 일단 측정하고 나면 측정치가 소실되어 반복측정치를 나타낼 수 없는 단점이 있다. Table. 36은 열형광선량계의 TL 물질의 구성이다.^[30]

Table. 36. Composition of UD-802AT, TLD

소자	조성 물질	필터	구성형태
#1	Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	19mg/cm ² of Plastic	지름 : 3mm
#2		320 mg/cm ² of Plastic	두께 : -0.1mm (monograinlayer)
#3	CaSO ₄ :Tm	320 mg/cm ² of Plastic	지지대 : carbon film
#4		220 mg/cm ² of Plastic 800 mg/cm ² of Lead	상부막 : 10mg/cm ² of Teflon

본 연구에서는 서론에서 명시하였듯이 앞으로 진단과 치료 방사선의학이 발전해가는 것에 비례하여 방사선 작업종사자의 피폭선량 측정이나 진단과 치료 장비의 기기관리를 위해 사용하는 선량계도 발전해 나갈 것이므로 열형광선량계, 유리형광선량계, 광자극발광선량계의 감도와 에너지의존성, 그리고 방향의존성을 비교하는 연구를 통하여 열형광선량계의 문제점을 보완하여 주고 대체할 수 있는 우수한 선량계를 발견하고 발견한 선량계의 상용화 여부를 평가하고자 하였다.

2. 유리선량계 (GD)

a. Radiophotoluminescence(RPL)

유리선량계에 사용된 형광유리소자는 은이온을 함유시킨 은활성인산염유리라고 불리는 것으로 fig. 33에 나타난 것처럼 방사선을 조사한 후에 자외선을 쏘이면 오렌지색 형광을 발생하는 성질을 지닌다.

이 형광을 Radiophotoluminescence(RPL)라고 하며 이 RPL 발광량이 입사한 방

사선량과 비례한다는 것을 이용하여 발생한 형광량을 광전자증배관에서 계수로 하여 방사선을 측정한다.

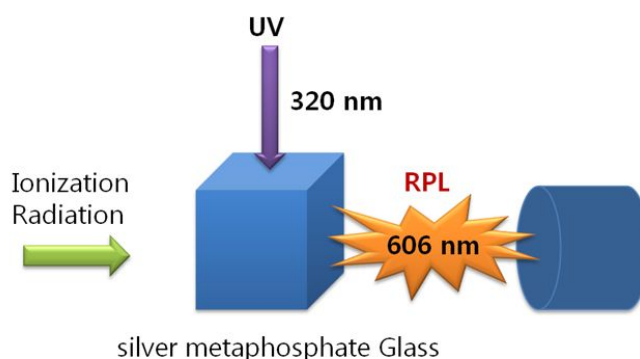


Fig. 33. Radiophotoluminescence phenomenon

b. 형광중심 형성

방사선을 조사한 형광유리는 Fig. 32에서 나타난 것처럼 전리한 전자 및 정공(홀)이 은 이온에 포획되어 형광중심을 형성한다. 자외선에 의해 이러한 형광중심이 자극을 받으면 RPL을 발광하게 된다. 형광유리에 의한 RPL 발생과정을 Fig. 31, 32에 모식적으로 나타내었다. 형광유리에 대한 형광중심은 자극을 받아도 소실되지 않고 반복 측정하여도 100% RPL 발광량을 측정할 수 있다는 점이 다른 루미네센스 선량계(열형광선량계, 광자극발광선량계 등)와 다른 큰 특징이다. 또한 RPL현상과 마찬가지로 형광량 측정을 통해 방사선을 측정하는 각 검출자의 발광 원리를 참고로 하여 Table. 37에 나타내었다.

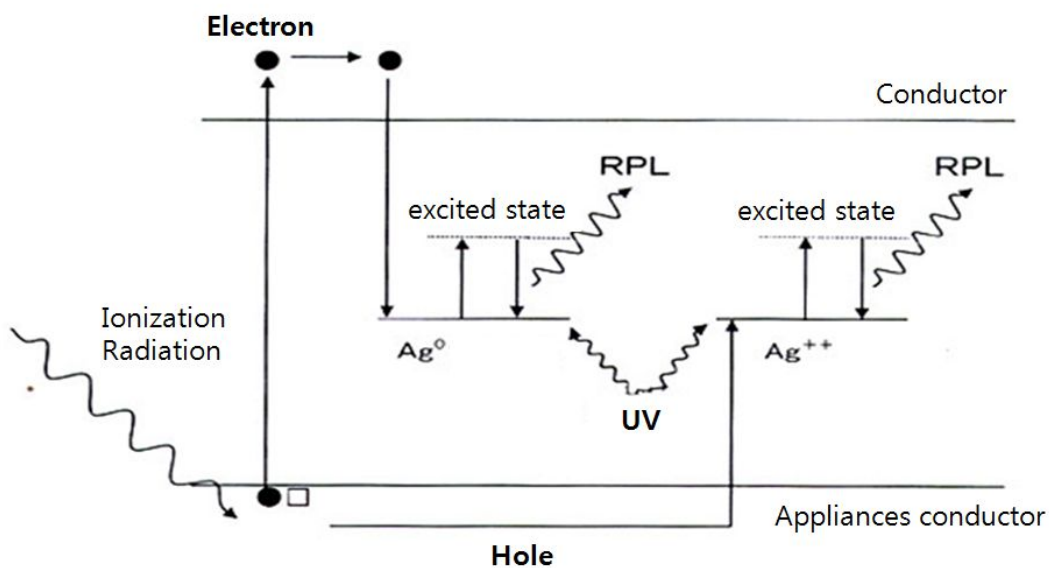
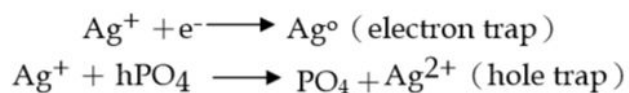
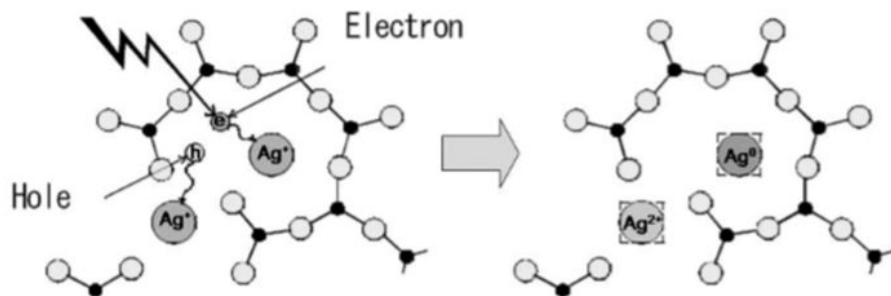


Fig. 34. Photoluminescent dosimeter luminous principle

Table. 37 The comparison of the principle of luminescence in various detectors

	광자극루미네센스		열루미네센스
	RPL	OSL	TLD
방사선 에너지 축적과정	방사선조사에 의한 전리작용으로 자유롭게 된 전자와 정공(홀)이 결정 내의 격자 결합 등에 포획되어 포획중심으로서 보존되다.		
발광과정	포획된 전자, 정공의 에너지 상태가 꽤 안정되었을 때, 빛에 의하여 여기되어도 기저상태에 떨어지지 않고 형광을 발하며 원래상태(방사선 조사 후 상태)에 돌아간다.	광에너지를 흡수하여 준안정상태인 전자, 정공이 발광과 함께 기저상태에 떨어진다. (방사선조사 전 상황)	가열하여 포획중심에서 전자, 정공이 해방되어 재결합하여 발광하면서 기저상태에 떨어진다. (방사선조사 전 상황)
방사선 에너지의 산재	방사선에너지를 분산은 일어나지 않는다.	방사선에너지를 빛으로서 방출하는 자극완화현상.	

2. 유리선량계의 특징

본 연구에 사용된 GD-450은 구조상 두께가 다른 2종류의 플라스틱 필터 및 Al, Cu 및 Sn 3종류의 금속필터(Fig. 35)를 가지고 있으며 10 KeV~10MeV의 X·γ선과 300 KeV~3 MeV의 β선을 측정하도록 설계되어 있으며 사용하는 각 금속 필터는 링 형태로 방향성을 고려한 것이다(Fig. 36). GD-450의 전체 형상은 43 * 13 * 5.5 mm³, 중량 5 g로 매우 작고 가볍다.^[39]

열형광선량계는 방사선에 대한 감도와 안정성이 좋고, 측정 가능한 선량범위가 넓다. 또한 재사용과 집적선량의 측정이 가능해 현재 국내의 방사선작업종사자 중 90% 이상이 개인 피폭 선량 측정에 TLD를 사용하고 있다^[37,38]. 그러나 열형광선량계는 일정기간 경과후 열처리(heat treatment)가 필요하며 일단 측정하고 나면 측정치가 소실 되어 반복측정치를 나타낼 수 없는 단점이 있다. 형광유리선량계의 원리는 은활성산염에 전리(ionization) 방사선이 조사되면 전자(electron)와 정공(electron hole) PO₄ 가 생성되고 이때 전자는 유리구조 내의 Ag⁺에 포획되어 Ag⁰가 되며 정공은 PO₄⁺ 포획되거나 시간이 경과함에 따라 Ag⁺ 이행되어 Ag⁺⁺ 형성한다.

이들 Ag° 와 Ag^{++} 보다 안정상태가 되고 이것을 Radiophotoluminescence(RPL) 중심이라고 부른다. 이들의 중심에 질소 기체에 의해 발생된 펄스화된 자외선이 조사되면 RPL 중심은 여기 상태가 되고 주황색의 형광이 방출되면서 유리선량계의 RPL 중심은 다시 안정 상태로 되돌아 오게 된다(Fig. 31). 이때 방출되는 RPL 중심의 수는 항상 일정하게 유지되며 유리선량계에서 방출되는 형광량의 정도는 조사된 방사선량과 비례한다^[10].

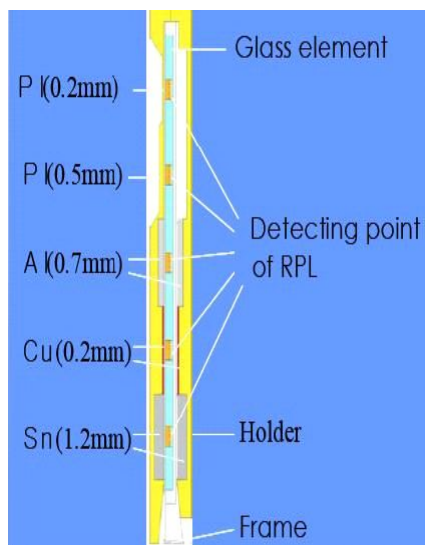


Fig. 35. GD-450 filter organization

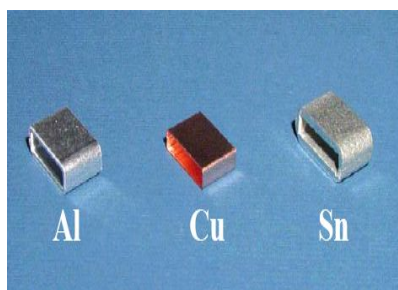


Fig. 36. GD-450 metal filter

형광유리선량계의 선량판독은 FGD-650판독기(panasonic)를 이용하여 실시하였다. 판독과정을 살펴보면 자외선 필터를 통과한 펄스화된 질소기체(nitrogen gas)는 반사경(reflecting mirror)에 의해 둘로 분리가 되어 하나의 빔은 기준 선량계

를 통과하고 다른 하나는 판독할 유리선량계를 통과하면서 동시에 측정을 하게 된다. 기준 유리선량계로부터 발생하는 RPL은 자외선차단(Cut-Off)필터를 통해 광다이오드(Photodiode)에서 수집되고 판독해야 할 유리선량계의 RPL은 광전자증배관(Photomultiplier tube)에서 수집된다. 형광유리선량계는 열형광선량계에 비해 RPL(radiophotoluminescence)중심이 비교적 안정되어 퇴행(fading)현상이 거의 보이지 않으며 주변 환경의 온도에도 크게 영향을 받지 않는 것으로 보고 된 바 있다.^[12,39] 또한 유리선량계는 판독과정과 주위환경의 영향으로 인해 소멸되지 않으므로 반복적으로 판독이 가능하며 소자 간 재현성이 우수하고 이로 인해 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 것이 가장 큰 장점이다. 또한 취급과정이 매우 간단하고 다이오드(diode)와 비교 하였을 때 광자선에 대한 에너지 의존성(energy dependence)도 낮으며 기존의 다른 선량계에 비해 유효체적이 작은 장점 등으로 인해 유리선량계가 소조사면(small irradiation plan)을 사용하는 방사선 수술 분야의 선량측정에도 적합하다^[12]. (Fig. 37)

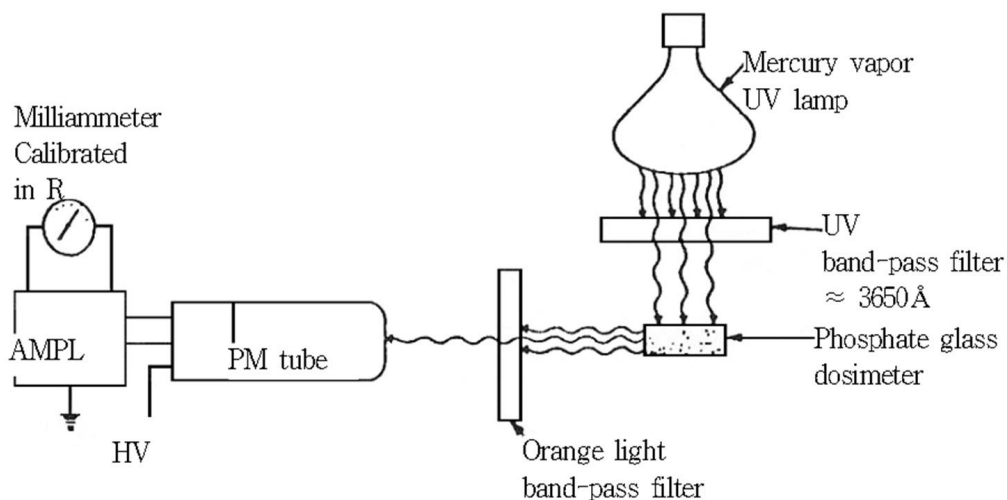


Fig. 37. Principle of Photoluminescent dosimeter

3. 광자극발광선량계(Optically stimulated luminescence, OSL)

광자극 발광 선량계는 결정내의 트랩준위에 포획된 전자가 OSL을 통하여 여기 되고, 재결합센터의 양공과 재결합하는 과정에서 빛이 방출되는 현상이다. TL이 트랩 준위의 전자들을 열로서 자극하는 것으로 시작된다면, OSL은 이들을 빛으로 자극

하는 것으로 시작된다고 할 수 있다. 이후의 발광과정들은 TL의 그것과 같다고 할 수 있다.^[17](Fig. 38)

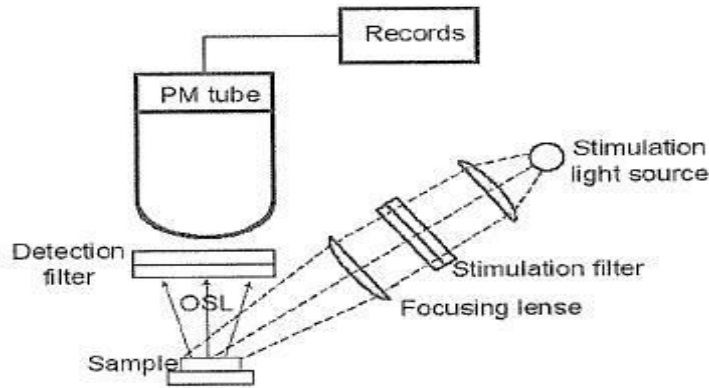


Fig. 38. Schematic diagram of OSLD Reader

이 때, 트랩준위의 전자를 빛으로 여기 시켜 재결합준위로 이동시키는 것으로 가정할 수 있으므로, 빛은 트랩준위의 전자 (전자농도 n)를 광자극률 f 로 자극하여 전도띠로 보내고, 이어 재결합 준위의 정공 (정공 농도 m)과 재결합하여 강도 IOSL의 빛을 방출한다. 이러한 일련의 과정은 다음과 같은 미분 방정식으로 표현할 수 있다.(Eq. 5)

$$\frac{dn_c}{dt} = -\frac{dn}{dt} + \frac{dm}{dt} \quad (5)$$

트랩내의 전자 점유는 그 물질에 조사된 방사선의 결과이므로, OSL 강도는 흡수선량과 깊이 관계 되어 있다. OSLD는 OSL광량이 흡수한 방사선의 선량에 일정영역 범위 내에서 비례하는 특성을 이용한 선량계이다. OSL의 TL에 대한 가장 큰 장점으로, OSL은 상온에서 측정한다는 것이다. 이것은 시료의 열적 변성을 근본적으로 막을 수 있는 것으로 중요한 장점이라 할 수 있다. 또한, OSLD는 동일한 시료에 대하여 반복적인 측정이 가능하여 선량계로 응용할 때 선량의 재평가가 가능하다. TL 측정에서는 트랩에 포획된 거의 모든 전자를 비우게 되어 정보를 읽게 되지만, OSL측정에서는 트랩에 포획된 전자의 일부만 여기 시킬 수가 있어 정보를 어느 정도 남길 수가 있게 된다. 시료의 온도를 가열하여야 하므로 일회 측정 시 최소

수십 초 이상이 소요 되고 특정 부분에 열자극을 가한다 하더라도 전도에 의해 주변부가 동시에 열자극을 받게 되므로 분해능 (resolution)이 현저하게 떨어지는 TL 측정에 비해 OSL은광자극 광원에 따라 나노 (nano) 초에서 수초 이내에 측정이 가능하다. 매우 빠른 시간 이내에 측정이 가능하며 자극 광 (stimulation)을 매우 작은 부분(직경 100 micron 이하)으로 집속할 수 있으므로 위치분해 OSL신호를 얻을 수 있다. 이러한 테크닉을 사용하여 OSLD는 방사선량 분포를 높은 분해능으로 측정할 수 있다. 이러한 장점으로 OSL 기법은 개인방사선 측정분야뿐만 아니라 환경방사선 측정, 의료분야 및 연대측정 등 방사선 계측의 모든 연구 및 응용분야에 활짝 길을 열어놓았다.^[18-20]

B. 선량계의 판독

1. 개인선량당량산출의 기본

개인선량당량($H_p(d)$)은 인체상의 특정한 부위의 깊이 d 에 있어서 연조직 중 선량당량(단위계는 $J\text{kg}^{-1}$)으로 정의되어 일반적으로 특별명칭 시버트(Sv)단위로 나타낸다. 또한 선량당량은 그 측정지점에 대한 흡수선량과 선질계수의 곱으로서 정의할 수 있지만 그 선질계수는 선에너지 부여의 관계수이며 방사선의 종류나 에너지에 의해 달라지는 수이다. 개인선량당량은 실용량이긴 하지만 인체내부의 선량을 나타내는 것이며 입사한 방사선의 조건으로 인해 크게 수치가 달라지기 때문에 일반적으로 이것을 직접 측정할 수 없다. 그러므로 실제 모니터링(측정)에 있어서 실용량을 구하고 방호량에 대비하기 위해 실측하기 쉬운 물리량에서 각 실용량을 구하기 위한 환산계수가 계산되어 ICRP74 등에 설정되어있다. 이러한 물리량은 방사선 종류에 따라 달라지는데 X · γ 선(광자)에 대해서는 공기커머가, 전자와 중성자에 대해서는 플루언스가 각각 기준의 물리량이다. 따라서 GB에서는 이러한 기준이 되는 물리량을 구하고 거기에 필요한 환산계수를 곱하여 개인선량당량을 산출하는 것을 기본으로 하고 있다.

2. 입사방사선 판정

X · γ 선과 β 선에 관한 선량당량을 측정하지만 서로 기준이 되는 물리량이 다르다는 점, 또 방사선검출자(형광유리소자)가 조직등가물질이 아니기에 연조직의 에너지 흡수특성과 다르다는 점에 의해 각각의 방사선을 분리하여 각 개인선량당량을

산출한다. GD-450에는 Fig. 28.에서 나온 것처럼 5종류의 필터가 들어 있다. 따라서 각종의 방사선이 입사하였을 때 각 필터부분에 발생한 형광량은 각 필터와 입사한 방사선의 상호작용의 차이로 다음과 같이 된다.

수백 keV정도의 에너지를 가진 γ 선은 투과력이 강하여 GB의 필터 두께 정도로는 감약의 차가 생기지 않는다. 이처럼 γ 선이 입사하였을 때 각 필터부분에서 생긴 형광량이 같아져 필터사이에 차이가 생기지 않는다. (단, 필터 물질의 차이에 의해 발생하는 콤프턴 전자의 상황 등이 다소 다르기 때문에 실제 형광량은 필터에 따라 다소 다르다. 또한 γ 선의 에너지가 100 keV보다도 낮아지면 다음으로 나타나는 X선의 입사상태와 같은 경향을 보인다. 또한 γ 선의 에너지가 1~2MeV 이상이 되면 전자대생성 등에 의하여 금속필터 부분의 형광량이 많아진다.)

수십 keV를 에너지를 가진 X(γ)선은 플라스틱 필터의 감약에서는 차가 없지만 금속필터 부분에서는 차이가 난다. (단 10 keV의 에너지에는 플라스틱 필터 사이에도 다소 차가 있을 수 있다. 또 에너지가 높은 X선이 입사하였을 때에는 앞에서 서술한 γ 선과 같은 모습을 보인다.)

2~3 MeV 이하 에너지를 가진 β 선은 X · γ 선에 비해 투과력이 매우 약하므로 플라스틱 필터 두께 차이로도 감약의 차이가 생긴다. 따라서 필터 두께의 증가와 함께 형광량이 작아져 질량 두께가 큰 금속필터 부분에서는 형광발생이 거의 일어나지 않는다.

방사선 종류나 에너지와 각 필터 부분에서 생긴 형광량의 관계를 정리하여 그림 11에 차트로 나타내었다. GB에 의한 선량당량산출은 이러한 각 필터 부분에 존재하는 형광량의 차이를 이용하고 각 필터 부분의 응답비율과 대소관계의 밸런스 등에서 입사한 방사선의 종류를 판정하고 후에 서술할 방법을 통해 각 방사선에 관련된 선량당량을 산출한다.

3. X · γ 선의 선량당량 산출방법

X · γ 선에 관한 개인선량당량으로서는 1cm와 70 μ m의 깊이에 대한 선량당량을 산출해야 한다. X · γ 선에 대한 실용량의 측정은 공기커머를 기준량으로 하고 여기에 각 깊이에 대응하는 산출계수를 곱하여 개인선량당량을 산출한다. 이러한 환산계수는 광자 에너지에 따라 그 수치가 달라진다. 그러므로 입사한 X · γ 선(광자)의 에너지를 파악해야 선량당량을 산정할 수 있다.

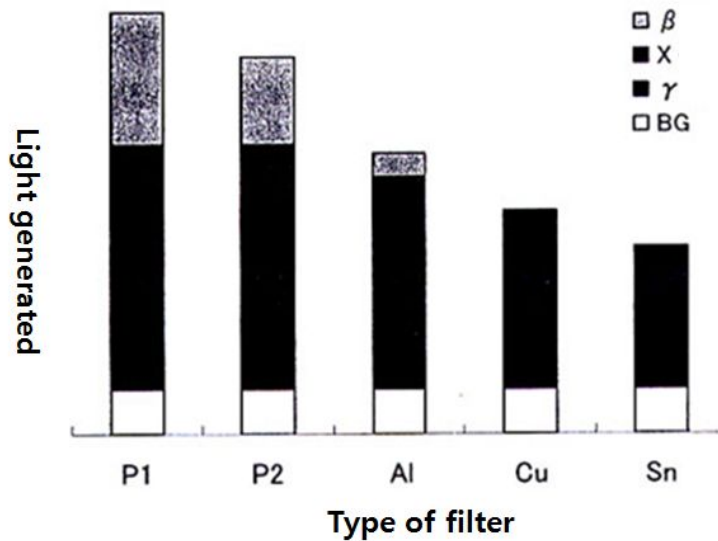


Fig. 39. The relationship between incident radiation and the light generated on each filter

하지만 GB처럼 일정 기간 같은 모니터를 연속하여 사용하는 적산형 선량계의 경우, 이러한 모니터에서 얻을 수 있는 형광량은 에너지가 다른 X · γ 선이 개별적으로 입사하여 누적될 수 있다. 이 때 각 필터 부분이 나타내는 형광량의 응답비율 등은 입사한 방사선의 평균적인 것이므로 입사할 때마다 X · γ 선 에너지를 각각 파악할 수 없다.(Fig. 37) 특히 저에너지 X선과 고에너지 γ 선이 혼합하여 들어오게 되면, 에너지를 추정해야하는 선량산출 알고리즘에서는 저에너지 영역에 대한 1 cm와 70 μ m 깊이의 환산계수의 큰 차이를 반영하기 어려우며 결과적으로 산출정도가 나빠질 우려가 있다. 따라서 GB의 선량산출 알고리즘은 입사한 X · γ 선의 에너지를 필요로 하지 않고 각 깊이의 개인선량당량이 산출할 수 있도록 하며 항상 안정된 산출정도를 유지한다.

GB에 채용된 각 깊이의 개인선량당량에 대한 산출식의 기본형은 다음 식과 같다.(Eq. 6)

$$Hp(d)_i = \sum (NAD_j \cdot C_{ij}) \quad (6)$$

$Hp(d)_i$: 1cm 혹은 $70\mu\text{m}$ 깊이의 개인선량당량(mSv)

NAD_j : 필터 위치 j의 정미외관의 선량(mGy)

C_{ij} : 각 깊이와 필터에 설정된 정수(mSv/mGy)

또한 정미외관의 선량으로는 각 필터 위치의 형광량(판독기 표시치 : 판독기의 정미기준인 ^{137}Cs γ 선 등가선량)

에서 컨트롤용 GB의 외관 선량(판독기 표시치)를 뺀 수치를 말한다.

C. 선형가속기

선형가속기란 외부 빔 치료법으로서 Co-60 치료기를 대체한 장치이다. 선형가속기는 마이크로웨이브 기술에 의해 4-24 MV까지 가속된 전자빔 또는 이 전자가 금속 표적과 충돌할 때 방출하는 고에너지 X-선 빔으로 종양을 치료하는 기기이다. 하지만 선형가속기는 에너지와 강도가 높아 산란선이 많이 발생하므로 사용 중 치료실의 방사선 준위가 높아 방사선에 대한 피폭을 피할 수 없기 때문에 정확한 측정이 요구된다.

방사선이 팬텀에 입사되면 흡수선량은 깊이에 따라 변하게 된다. 이 변화는 방사선의 에너지, 측정 깊이, 조사면, 선원으로부터의 거리, 선속의 정형(Collimator) 방법 등 많은 조건들에 의해 좌우될 수 있다. 따라서 선량을 계산함에 있어 영향을 미치는 여러 가지 인자를 고려하여야 한다. 선량을 계산함에 있어 가장 기본적인 내용은 방사선속의 중심축을 따라 심부선량 분포(Depth Dose Distribution)를 설정하는 것이며 심부선량 분포를 좌우하는 인자로는 크게 심부선량백분율(PDD, Percentage Depth Dose), 조직 공중 선량비(TAR, Tissue Air Ratio), 조직 팬텀 선량비(TPR, Tissue Phantom Ratio), 조직 최대 선량비(TMR, Tissue Maximum Ratio)이며 이러한 인자들은 물 팬텀(Water Phantom)을 이용하여 측정하며 열형광선량계(TLD, Thermoluminescence Dosimeter)와 다이오드 그리고 필름을 이용하여 측정하지만 최근 정밀성이 좋고 에너지 의존성이 적은 이온함(ion Chamber)

를 사용하여 측정한다.

1. 심부선량백분율(Percent Depth Dose)

방사선의 입사부위의 선량분포를 특성화하는 한 방법은 기준깊이의 선량에 대해 임의의 깊이의 선량을 나타내는 것이고, 심부선량 백분율은 선속의 중심축을 따라 고정기준깊이 d_0 에서의 흡수선량에 대해 임의의 깊이 d 에서의 흡수선량을 백분율로 나타낸 것으로 정의한다.(fig. 40) 즉, 심부선량 백분율(P)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.(Eq. 7)

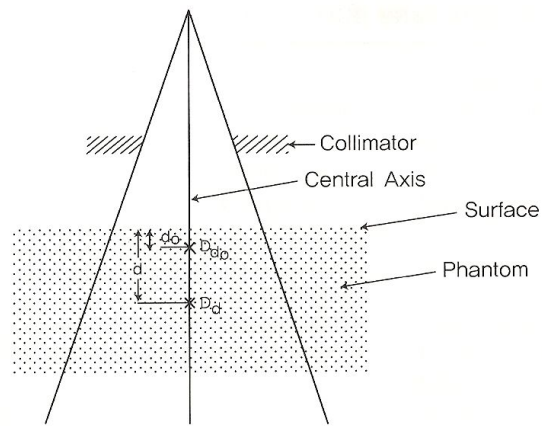


Fig. 40. The illustration of Percent Depth Dose (PDD)

심부선량 백분율을 $(D_d/D_{d0}) \times 100$ 으로, d 는 임의의 깊이이고 d_0 는 최대선량의 기준 깊이이다.

$$P = \frac{D_d}{D_{d_0}} \times 100 \quad (7)$$

입사되는 방사선의 에너지가 400kV 정도의 저에너지 엑스선의 경우 기준깊이는 보통 표면 ($d_0 = 0$)이고, 고에너지의 경우 기준깊이는 최대흡수선량($d_0 = d_m$)의 위치가 된다.

임상에서는 주로 중심축상의 최대선량을 단순히 D_{\max} 로 하여,(Eq. 8)

$$D_{\max} = \frac{D_0}{P} \times 100 \quad (8)$$

의 식으로 나타내며 이는 에너지의 종류, 측정깊이, 조사면의 크기와 형태, 선원-표면간의 거리, 선속 조사야의 정형으로 달라질 수 있다.

a. 방사선의 선질과 에너지에 따른 심부선량 백분율의 변화

심부선량백분율은 최대선량 깊이 이상에서 선속의 에너지에 따라 증가하는 경향을 보인다. 고에너지를 가진 엑스선은 저에너지 엑스선보다 큰 투과력을 가지며 더 높은 심부선량율을 보인다. 거리역자승의 법칙과 산란을 고려하지 않으면 깊이에 따른 심부선량백분율 변화는 대체로 지수함수적으로 감약한다.

즉, 선질은 평균감약계수 μ (불균질선속에 대한 평균감약계수)에 의해 심부선량백분율에 영향을 준다. μ 가 감소함에 따라 선속은 투과성이 더욱 커지며 결국 Build-up 범위 이상의 깊이에서 심부선량 백분율이 더 커지게 된다.

b. 조사면의 크기와 형태의 효과

작은 조사면에 대해 한 점에서의 심부선량은 상호작용 없이 중첩된 물질을 투과한 광자들인 1차 방사선의 결과임을 가정할 수 있다고 하면, 이런 경우 산란광자의 심부선량에 기여는 무시할 수 있을 정도로 작거나 0으로 간주 할 수 있다. 하지만 조사면의 크기가 증가함에 따라 흡수선량에 대한 산란선의 영향은 증가하므로 산란선량의 증가는 D_{\max} 깊이보다 더 깊을수록 커지므로 심부선량 백분율은 조사면의 크기와 함께 증가 하게 된다.

대부분 임상에서는 직사각형과 불규칙한 형태의 조사야를 사용하므로 불규칙한 조사야, 즉 장방형 조사야를 같은 수준의 정방형조사야, 혹은 원형조사야로 바꿔줄 필요가 있다. 장방형 조사야를 정방형조사야로 바꾸어 줄 수 있는 식은 다음과 같다.(Eq. 9)

$$\frac{A}{P} = \frac{a \times b}{2(a+b)} \quad (9)$$

여기서 a 는 조사면의 폭이고, b 는 조사면의 길이이다. 또한 장방형조사야를 원형조사야로 바꾸어 줄 수 있는 식은 다음과 같다.(Eq. 10)

$$r = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot A/P \quad (10)$$

c. 선원 표면간 거리의 의존

심부선량 백분율은 거리역자승의 법칙의 효과 때문에 SSD에 따라 증가한다. 이는 기준점에 대해 상대적인 심부선량을 나타내는 심부선량백분율이 선원으로 부터 멀리 떨어진 경우보다 선원 가까이에서 더 급격하게 감소한다는 것을 의미한다.

심부선량 백분율은 표면이나 D_{max} 에 대한 상대적인 깊이에서 얼마나 많은 선량이 전달될 수 있는가를 결정하기 때문에 SSD는 가능한 커야 할 필요가 있다. 하지만 선량률(Dose Rate)은 선량률과 심부선량백분율 둘 다 만족할 수 있는 거리로 정해진다.

주로 방사선치료분야의 깊게 위치한 병변을 치료하는 경우 최소 SSD는 80 cm를 유지하고 현재 임상에서는 주로 100 cm 를 기준으로 한다.

심부선량 백분율이 SSD가 증가함에 따라 증가하는 것은 다음 Mayneord F계수에 의해 증명할 수 있다.(Fig. 41)

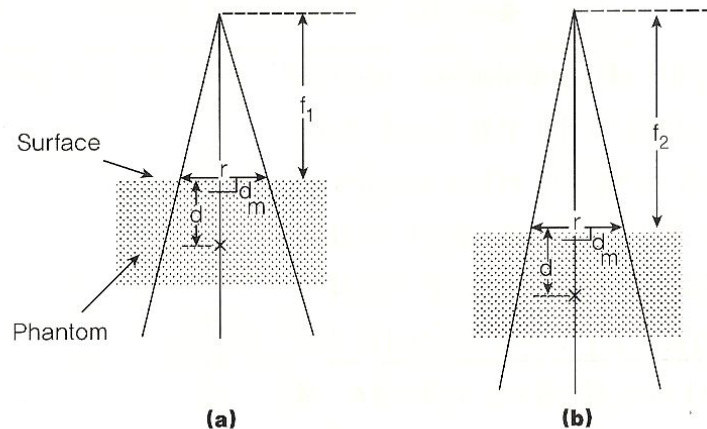


Fig. 41. The change of Percent Depth Dose (PDD) with variations of changing SSD

(a)는 $SSD=f_1$ 을 갖고 (b)는 $SSD=f_2$ 를 갖는다. 두 조건의 경우 팬텀표면상의 조사면, $r \times r$ 과 깊이 d 는 같다.

$P(d, r, f)$ 를 $SSD = f$, 조사면 r 일 때(예, $r \times r$ 의 정사각형 조사면), 깊이 d 에서의 심부선량 백분율이라고 하면 깊이에 따른 선량의 변화는 세가지 효과(역제곱법칙과 지수함수적 감약 그리고 산란)에 의해 좌우되므로,(Eq. 11)

$$P(d, r, f_1) = 100 \cdot \left(\frac{f_1 + d_m}{f_1 + d} \right)^2 \cdot e^{-\mu(d - d_m)} \cdot K_s \quad (11)$$

μ 는 1차선에 대한 선감약계수이고 K_s 는 산란선량의 변화를 나타내는 함수이다. SSD가 변화함에 따른 SSD의 K_s 의 변화를 제외하면,(Eq. 12)

$$P(d, r, f_2) = 100 \cdot \left(\frac{f_2 + d_m}{f_2 + d} \right)^2 \cdot e^{-\mu(d - d_m)} \cdot K_s \quad (12)$$

식 (11)을 식 (12)로 나누면,(Eq. 13)

$$\frac{P(d, r, f_2)}{P(d, r, f_1)} = \left(\frac{f_2 + d_m}{f_1 + d_m} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1 + d}{f_2 + d} \right)^2 \quad (13)$$

Eq. 13의 우변을 Maynerod F factor라고 한다.

따라서,

$$F = \left(\frac{f_2 + d_m}{f_1 + d_m} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1 + d}{f_2 + d} \right)^2 \quad (14)$$

F계수는 $f_2 > f_1$ 인 경우 1보다 크고 $f_2 < f_1$ 인 경우 1보다 작은 것을 알 수 있다.(Eq. 14) 따라서 심부선량 백분율은 SSD 증가에 따라 증가한다고 할 수 있다. 하지만 이는 극단적인 조건(저에너지, 큰조사면, 깊이가 깊을 경우 SSD가 큰 경우)와 같은 극단적인 조건 아래에서는 심각한 오차를 발생시킬 수 있다.

2. 조직공중선량비(TAR, Tissue Air Ratio)

조직공중선량비는 체내의 중앙치료를 위하여 고안된 값이다. SSD는 표면의 윤곽과 요철로 인하여 변화할 수 있으나 선원-회전 축간의 거리는 일정하다.

심부선량 백분율은 SSD에 의해 좌우되므로 임상에서 적용하기 불리한 반면 TAR은 SSD에 의존하지 않기 때문에 적용하기 용이하다.

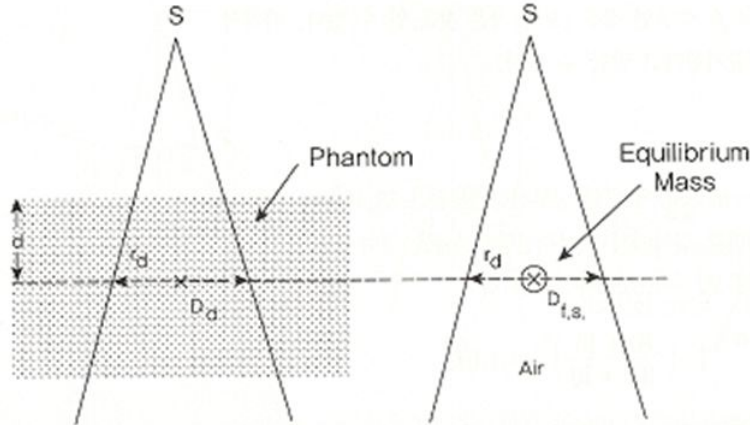


fig. 42. The definition of Tissue-air ratio(TAR)

$$TAR(d, r_d) = D_d / D_{fs}$$

조직 공중 선량비는 Fig. 42.에서 보이는 바와 같이 팬텀 안의 임의의 점에서의 선량(D_d)과 같은 지점에서의 공중선량(D_{fs})의 비로 정의된다. 선질에 대해 TAR은 깊이 d 와 그 깊이에서 조사면 r_d 에 의존한다.(Eq. 15)

$$TAR(d, r_d) = \frac{D_d}{D_{fs}} \quad (15)$$

조직 공중 선량비는 심부선량백분율과 같이 에너지와 깊이 그리고 조사면의 크기에 따라 변한다. 고에너지 방사선의 경우 조직 공중 선량비는 최대선량 깊이 (d_m)까지 증가하고 그 이후에 깊이에 따라 지수함수 적으로 감소한다. 선속이 좁은 경우 선량에 대한 산란선이 무시되어 0×0 의 조사 면과 가까워 질 경우 d_m 이상에서의 TAR은 대체로 깊이에 따라 지수함수 적으로 변하며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.(Eq. 16)

$$TAR(d, 0) = e^{-\mu(d-d_m)} \quad (16)$$

3. TAR과 심부선량백분율과의 관계

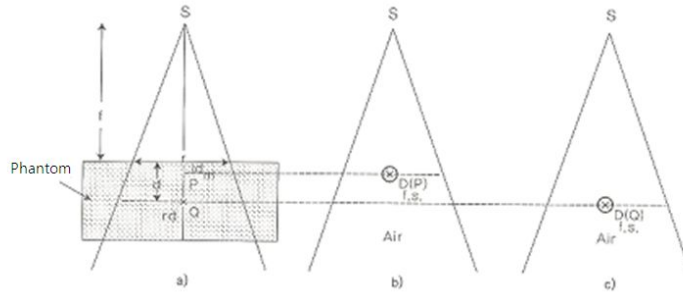


Fig 43. The relationship between TAR and PDD

Fig. 43과 같이 $TAR(d, r_d)$ 을 깊이 d , 조사면 r_d 에 대한 점 Q 에서의 조직 공중 선량비라 가정한다. 이때 r 은 표면에서의 조사면, f 는 SSD, 그리고 d_m 은 점 P 에서의 최고선량지점 깊이이다. $D_{fs}(P)$ 와 $D_{fs}(Q)$ 는 각각 점 P 와 Q 에 대한 공기중의 선량이다. $D_{fs}(P)$ 와 $D_{fs}(Q)$ 는 거리 역제곱의 관계에 있다.(Eq. 17)(fig. 43)

$$\frac{D_{fs}(Q)}{D_{fs}(P)} = \left(\frac{f + d_m}{f + d} \right)^2 \quad (17)$$

조사면 r 과 r_d 의 관계는 다음과 같다.

$$r_d = r \cdot \frac{f + d}{f} \quad (18)$$

TAR의 정의에 의해

$$TAR(d, r_d) = \frac{D_d(Q)}{D_{fs}(Q)} \quad (19)$$

또는,

$$D_d(Q) = TAR(d, r_d) \cdot D_{fs}(Q) \quad (20)$$

이므로,

$$D_{\max}(P) = D_{fs}(P) \cdot BSF(r) \quad (21)$$

그리고 심부선량 백분율 $P(d, r, f)$ 는 정의에 따라,

$$P(d, r, f) = \frac{D_d(Q)}{D_{\max}(P)} \cdot 100 \quad (22)$$

Eq. 20, 21, 22로부터,

$$P(d, r, f) = TAR(d, r_d) \cdot \left(\frac{1}{BSF(r)} \right) \cdot \frac{D_{fs}(Q)}{D_{fs}(P)} \cdot 100 \quad (23)$$

Eq. 17과 Eq. 23로부터

$$P(d, r, f) = TAR(d, r_d) \cdot \left(\frac{1}{BSF(r)} \right) \cdot \left(\frac{f + d_m}{f + d} \right)^2 \cdot 100 \quad (24)$$

을 구할 수 있다.(Eq. 24)

또한 SSD가 변화할 경우 심부선량 백분율의 변화를 살펴보면 f_1 은 심부선량백분율을 알고 있는 SSD이고 f_2 는 심부선량백분율을 결정하고자 하는 SSD라고 가정하고 두 경우에 대하여 r 은 표면에서의 조사면, d 는 깊이라고 하고 r_{d,f_1} 과 r_{d,f_2} 를 fig. 34.에서의 각각에서의 깊이에 대한 조사면 이라고 가정하면

$$r_{d,f_1} = r \cdot \frac{f_1 + d}{f_1} \quad (25)$$

$$r_{d,f_2} = r \cdot \frac{f_2 + d}{f_2} \quad (26)$$

Eq. 24에서

$$P(d, r, f_1) = TAR(d, r_{d,f_1}) \cdot \left(\frac{1}{BSF(r)} \right) \cdot \left(\frac{f_1 + d_m}{f_1 + d} \right)^2 \cdot 100 \quad (27)$$

그리고

$$P(d, r, f_2) = TAR(d, r_{d,f_2}) \cdot \left(\frac{1}{BSF(r)} \right) \cdot \left(\frac{f_2 + d_m}{f_2 + d} \right)^2 \cdot 100 \quad (28)$$

Eq. 27과 Eq. 28로부터 변환계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P(d, r, f_2)}{P(d, r, f_1)} = \frac{TAR(d, r_{d,f_2})}{TAR(d, r_{d,f_1})} \cdot \left[\left(\frac{f_1 + d}{f_2 + d} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_2 + d_m}{f_1 + d_m} \right)^2 \right] \quad (29)$$

위 식의 우변의 마지막 괄호는 Maynerod 계수이다. 따라서 TAR 방법은 두 SSD의 깊이에서 투영된 조사면에 대한 TAR의 비로 Mayneord F 계수를 보정한다.

또한 다양한 조사면에 대한 후방산란계수와 함께 표준 SSD에서의 심부선량 백분율을 사용할 수 있는 경우에 이용할 수 있는 식은 다음과 같다.(Eq. 30)

$$P(d, r, f_2) = P\left(d, \frac{r}{\sqrt{F}}, f_1\right) \cdot \left(\frac{BSF(r/\sqrt{F})}{BSF(r)} \right) \cdot F \quad (30)$$

여기서 F는 Maynerod 계수이다.

4. TPR과 TMR

조직 팬텀 선량비(TPR, Tissue Phantom Ratio)는 다음과 같이 SCD가 일정한 상태에서 임의의 깊이(d)에서의 흡수선량과 기준깊이(d_0)에서의 흡수선량의 비로 정의된다.(Eq. 31)

$$TPR(d, r_d) = \frac{D(d, r_d)}{D(d_0, r_d)} \quad (31)$$

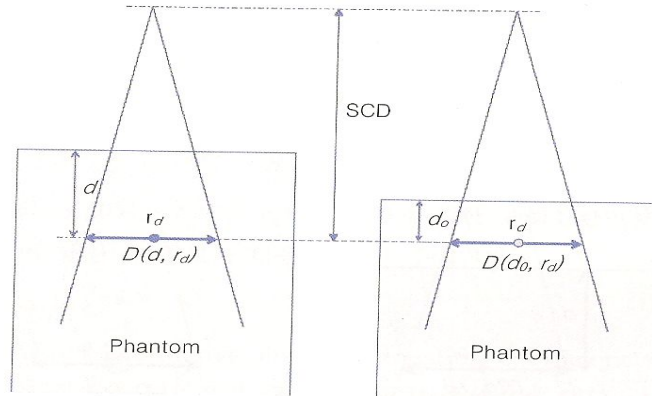


Fig. 44. The definition of Tissue- phantom ratio(TPR)

TPR은 SSD에 의존하지 않으며 깊이, 조사면, 에너지에 의존하며 TPR은 조사면과 에너지에 따라 증가한다. TPR의 깊이에 따른 변화는 기준깊이(d_0) 및 최대선량깊이(d_m)의 정의에 따라 다르다. Fig. 44는 TPR의 측정방법을 나타낸 그림이다. TPR에서 기준깊이를 최대선량깊이로 즉, $d_0 = d_m$ 으로 정의하는 경우에 TMR(Tissue Maximum Ratio)이라고 한다. 따라서 TMR은 다음과 같이 정의된다.(Eq. 32)

$$TMR(d, r_d) = \frac{D(d, r_d)}{D(d_m, r_d)} \quad (32)$$

5. 콜리메이터 산란계수 (Sc, Collimator Scatter Factor)

조사야의 크기가 증가함에 따라 1차 선속에 추가된 콜리메이터 산란의 증가는 측정되는 방사선의 출력을 변동시킬 수 있다.

이를 콜리메이터 산란계수(Sc , Collimator Scatter Factor)라고 하며 콜리메이터

산란인자는 공기 중에서 측정되며 일반적으로 SAD 위치에서 임의 조사면의 흡수선량(공중선량)에 대한 기준조사면(예, 10×10)의 흡수선량의 비와 같다.

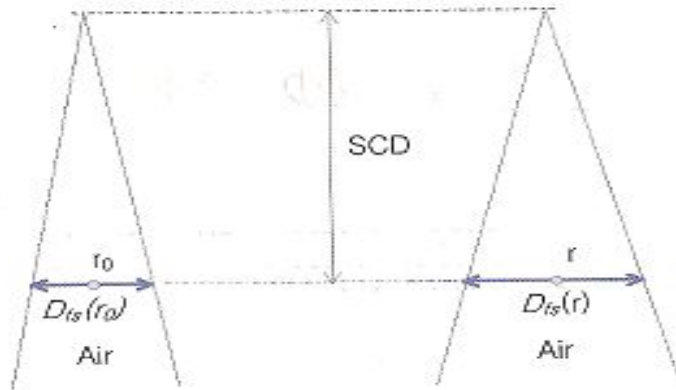


Fig. 45. The definition of Collimator scattering factor

Fig. 45는 콜리메이터 산란인자를 설명하고 있는 그림이며, 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.(Eq. 33)

$$S_c(r) = \frac{D_{fs}(r)}{D_{fs}(r_0)} \quad (33)$$

6. 팬텀 산란계수 (Sp, Phantom Scatter Factor)

팬텀 산란인자는 팬텀에 조사되는 면적의 차이에 따른 팬텀속 산란선의 차이로 인한 흡수선량의 변화를 나타낸 값이다. 팬텀 산란인자는 팬텀 속 d_{max} 에서 정의되며, 일반적으로 SAD 위치에서 임의 조사면의 흡수선량에 대한 기준조사면의 흡수선량의 비와 같다. 팬텀 산란인자는 팬텀에서의 조사면의 크기만을 고려하므로 Fig. 46과 같이 콜리메이터 크기는 일정한 상태에서 측정된다.

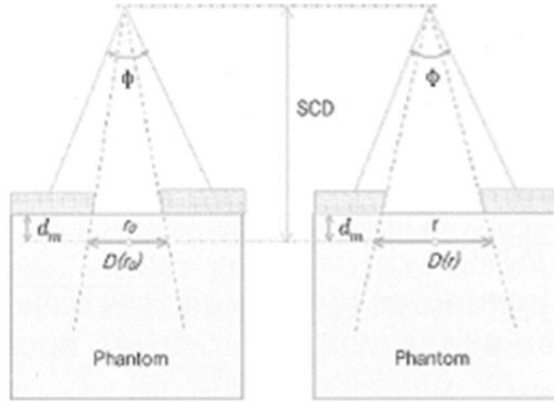


Fig. 46. Phantom Scatter factor(SCD = SAD)

팬텀 산란인자는 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.(Eq. 34)

$$S_p(r) = \left(\frac{D_r}{D_{r_0}} \right)_\Phi \quad (34)$$

7. MU 계산

치료용 가속기에서 방사선의 출력을 교정할 경우 크게 2가지 방법을 사용하여 출력을 교정할 수 있다.

- 기준 SSD, 기준 조사면은 $10 \times 10 \text{ cm}^2$, 최대선량깊이 d_{\max} 에서 1 MU(Monitor Unit)에 대하여 흡수선량이 1 cGy가 되도록 하는 것
- 기준 SAD, 기준 조사면은 $10 \times 10 \text{ cm}^2$, 최대선량깊이 d_{\max} 에서 1 MU(Monitor Unit)에 대하여 흡수선량이 1 cGy가 되도록 하는 것

위의 2가지로 분류되어 계산할 수 있으며 Fig. 47는 SSD 치료와 SAD 치료에서 종양선량의 정의와 조사방법을 나타낸다.

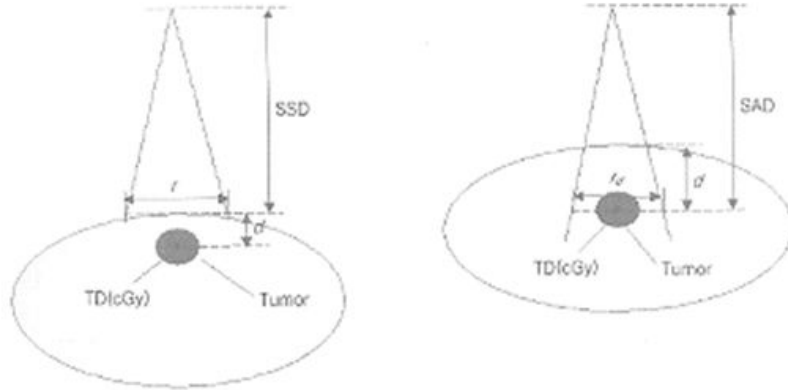


Fig. 47. The definition of Tumor dose(TD) and the method of radiation exposure in SSD therapy and SAD therapy

1) 의료용 선형가속기를 이용한 SSD 법 MU 계산의 방법

임의의 SSD(Source Skin Distance)에서 깊이 d에 위치한 종양에 종양처방선량(TD, Tumor Dose, cGy)를 조사하기 위한 MU의 값은 다음과 같이 계산한다.(Eq. 35)

$$M = \frac{TD}{K \cdot (PDD/100) \cdot S_c(r_c) \cdot S_p(r) \cdot WF \cdot TF \cdot SSDFactor} \quad (35)$$

여기서 K는 가속기의 교정조건(SSD₀, r₀, d_{max})에서의 선량률로서 단위는 cGy/MU이다.

r_c는 콜리메이터 조사면이며, r은 치료 SSD에서의 조사면으로서 $r = \frac{SSD}{SAD}$ 와 같다. 따라서 치료 SSD가 가속기의 SAD와 같다면 r=r_c이다.

WF는 쐐기투과인자(Wedge Transmission Factor)로 사용되지 않으면 1로 하며, TF는 음영반인자(Tray Factor)로서 사용되지 않으면 1로 계산한다. SSD Factor는 현재 계산에서의 SSD+d_m이 K를 정의하는 SCD와 다른 점을 보정하는 인자로 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.(Eq. 36)

$$SSD Factor = \left(\frac{SCD}{SSD + d_m} \right)^2 \quad (36)$$

2) 의료용 선형가속기를 이용한 SAD 법 MU 계산의 방법

임의의 SAD(Source Axis Distance)에서 깊이 d 에 위치한 종양에 종양처방선량(TD, Tumor Dose, cGy)를 조사하기 위한 MU의 값은 다음과 같이 계산한다.(Eq. 37)

$$M = \frac{TD}{K \cdot (TMR(d, r_d) \cdot S_c(r_c) \cdot S_p(r) \cdot WF \cdot TF \cdot SADFactor)} \quad (37)$$

여기서 K 는 가속기의 교정조건(SSD_0, r_0, d_{max})에서의 선량률로서 단위는 cGy/MU이다.

r_c 는 콜리메이터 조사면이며, r_d 은 깊이 d 에서의 조사면이다.

WF 는 쉐기투과인자(Wedge Transmission Factor)로 사용되지 않으면 1로 하며, TF 는 음영반인자(Tray Factor)로서 사용되지 않으면 1로 계산한다. SAD Factor는 현재 계산에서의 SAD가 K 를 정의하는 SCD와 다른 것을 보정하는 인자이다.(Eq. 38)

$$SADFactor = \left(\frac{SCD}{SAD} \right)^2 \quad (38)$$

VI. 결 론

현재 널리 사용 되고 있는 열형광선량계와 형광유리선량계, 광자극 형광선량계의 방향 의존성(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 다음과 같다.

A. 진단용 엑스선 발생장치로 엑스선을 조사할 때 거리, kVp, mAs 변화에 따른 산란선의 비교(저에너지 영역)

1. 진단용 X선 장치, 전리함, piranha, 열형광선량계, 유리형광선량계 및 광자극발광선량계의 재현성을 실험해 본 결과 가 모두 5%이하로 허용범위를 벗어나지 않았다.
2. 거리에 따른 감도 측정 결과에서 거리를 0 cm 에서 20 cm 까지 5 cm 씩 변화시키면서 85 kVp, 250 mA, 40 mAs 로 조사하여 선량값의 감소를 비교하였더니 광자극발광선량계, 전리함, 열형광선량계, 유리형광선량계 순으로 측정되었다. 그리고 기준 선원 측정기인 전리함과 비교하면, 전 영역에서 Piranha와 광자극발광선량계는 전리함 보다 감도가 높게 측정되었고, 열형광선량계, 유리형광선량계는 전리함 보다 감도가 낮게 측정되었다.
3. 방사선의 강도에 따른 에너지 의존성 실험에서는 mAs 를 25 mAs 로 고정하고 kVp 를 60 kVp 에서 140 kVp 까지 20 kVp 씩 변화시켜 조사하여 선량값의 증가를 비교하였더니 열형광선량계가 에너지의존성이 가장 우수했고, 광자극발광선량계가 높은 에너지 의존성을 보였다. 또한 표층선량을 기준 선원 측정기인 전리함을 기준으로 비교하면, 유리형광선량계가 가장 근접한 값으로 측정되었고, 광자극발광선량계는 전리함 보다 높은 감도로 측정되었다. 그리고 Piranha와 열형광선량계는 전리함 보다 낮은 감도로 측정되었다.
4. 방사선의 양에 따른 에너지 의존성 실험은 kVp 를 100으로 고정하고 mAs 를 10 mAs 에서 50 mAs 까지 10 mAs 씩 변화시켜 선량값의 증가를 비

교하였더니 전리함, 유리형광선량계가 에너지의존성이 가장 우수했고, 광자극발광선량계가 높은 에너지 의존성을 보였다. 또한 표층선량을 기준 선원 측정기인 전리함을 기준으로 비교하면, 열형광선량계가 가장 근접한 값으로 측정되었고, 광자극발광선량계는 전리함 보다 높은 감도로 측정되었다. 그리고 Piranha와 유리형광선량계, 열형광선량계는 전리함 보다 낮은 감도로 측정되었다.

5. 기준선원 측정기인 전리함을 기준으로 거리변화에 따른 감도는 광자극발광선량계가 가장 우수했고, 에너지 의존성은 kVp 변화에서는 열형광선량계가 mAs 변화는, 유리형광선량계가 우수하였다.
6. 방향에 따른 감도는 저 선량의 산란선으로 15도 방향의 변화에도 배후 방사능 수준으로 선량이 감소하여 측정이 어려웠다. 따라서 열형광선량계, 유리형광선량계, 광자극발광선량계 모두 비슷한 값이 측정되었다.

B. 투시용 엑스선 발생장치로 엑스선을 조사할 때 산란선의 비교(중 에너지 영역)

1. X-선 투시조영장치의 재현성을 실험해 본 결과 변동계수가 모두 $\pm 5\%$ 로 선량이 허용 범위를 벗어나지 않았다.
2. 거리에 따른 감도 측정결과 중심에서 열형광선량계 표층선량(surface dose)은 61.25 ± 0.72 심부선량(depth dose)은 55.37 ± 0.85 이며 40 cm에서의 표층선량(surface dose)은 0.10 ± 0.01 심부선량(depth dose)은 0.09 ± 0.01 으로 측정되었다. 또한 중심에서 유리형광선량계 표층선량(surface dose)은 26.95 ± 0.32 심부선량(depth dose)은 24.21 ± 0.37 이며 40cm에서의 표층선량(surface dose)은 0.05 ± 0.01 심부선량(depth dose)은 0.04 ± 0.01 으로 열형광선량계가 유리형광선량계 보다 감도가 우수하였다.
3. 방향의존성 실험에서는 열형광선량계가 0° 에서 -90° 의 심부선량은 52%의 감소율을 보였으며 유리형광선량계는 0° 에서 -90° 의 심부선량은 23%의 감소율을 보였으므로 유리형광선량계가 열형광선량계 보다 방향의존성이 적음을 알 수 있다.

C. 치료용 엑스선 발생장치로 엑스선을 조사할 때 산란선의 비교(고 에너지 영역)

1. 치료용 선형가속기의 재현성을 실험해 본 결과 변동계수가 모두 2%(0.02) 이내에서 잘 일치하는 결과를 얻어 보았다
2. 선량률, 거리에 따른 감도 측정결과 표층 선량은 종합적으로 분석하여 봤을 경우, 유리형광선량계 감도가 우수하다는 것을 알 수 있었다.
3. 선량에 따른 에너지 의존성을 비교해 본 결과 종합적으로 분석하여 봤을 경우, pearson 상관계수 값이 1에 가까운 결과를 보여주었던 열형광선량계가 우수하다는 것을 알 수 있었다.
4. 방향의존성 실험에서는 열형광선량계가 0°에서 -90°의 표층선량은 48%의 감소율을 보였으며, 유리형광선량계는 0°에서 90°의 표층선량은 74%의 감소율을 보였으며, 광자극발광선량계는 0°에서 90°의 표층선량은 86%의 감소율을 보였으므로 열형광선량계가 방향의존성이 가장 적고 유리형광선량계, 광자극발광선량계 순으로 방향의존성이 커짐을 알 수 있다. 연구를 시행하기 전, 열형광선량계가 방향의존성이 좋지 않아 그 결점을 보완할 차세대 선량계의 발견에 초점을 맞추고 시작하였으나 위와 같은 결과를 종합해 볼 때 열형광선량계가 치료용 선형가속기의 고에너지 엑스선 에너지에서 감도와 방향성이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

위의 세 경우를 종합해 볼 때, 저에너지 영역에서는 거리에 따른 감도는 광자극발광선량계가 가장 우수했고, 에너지 의존성에서 방사선의 강도 변화는 열형광선량계가 방사선 양의 변화는 유리형광선량계가 우수하였다. 그리고 방향의존성 실험에서는 차이가 없었다. 중 에너지 영역에서는 거리에 따른 감도 측정결과와 열형광선량계가, 에너지 의존성 실험에서는 유리형광선량계가 우수하였다. 마지막으로 고에너지 영역에서는 선량률, 거리에 따른 감도 측정결과 유리형광선량계가 우수하였고, 방향의존성 실험에서는 열형광선량계가 우수하였다. 또한 방향 의존성실험에서 각도에 따른 차이는 선량계의 구조와 기하학적인 원리에 의하여 차이가 있는 것도 알 수 있었다.

종합적으로 보수적인 측면에서의 평가를 하자면, 감도의 경우 유리형광선량계가 우수하다는 것을 알 수 있었고, 에너지 의존성의 경우 열형광선량계가 우수하다는 것을 알 수 있었다. 또한 방향 의존성 비교 분석을 통하여 열형광선량계가 방향의존성이 가장

적이고 유리형광선량계, 광자극발광선량계 순으로 방향의존성이 커짐을 알 수 있다. 따라서 세 종류의 선량계 실험을 토대로 비교 분석하면 현재 널리 사용 되고 있는 열형광선량계, 유리형광선량계, 광자극발광선량계는 저에너지 영역에서는 광자극발광선량계가 중에너지에서는 열형광선량계, 고에너지에서는 유리형광선량계 가 우수하다는 것을 알 수 있었다. 전 에너지 영역에서는 열형광선량계가 에너지 및 방향의존성이 가장 우수한 선량계였고 방향의존성이 가장 뛰어난 선량계는 유리형광선량계임을 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.

참고문헌

- [1] Lim BS. Radiation exposure dose on persons engaged in radiation -related industries in Korea. Journal of radiological science and technology 2006; 29(3): 185-195.
- [2] Jung HR, Lim CH, Lee MK. A review of personal radiation dose per radiological techmologists working at general hospitals. Journal of radiological science and technology 2005; 28(2): 137-144.
- [3] 과학기술처, 방사선작업종사자에 대한 피폭선량 종합관리에 관한 연구, 제 1차년도, 1991: pp 47-49
- [4] 이해룡 등, “방사선종사자의 개인피폭선량측정. 국립보건원보”. 제 29권 제 2호, 1992: pp.460-466
- [5] 하호영, “진단방사선 영역에서 피폭선량 감소를 위한 기술적 연구”, 대한방사선기술 학회지, 제 15권 제 1호, 1992: pp 89-97
- [6] “비파괴 검사 용어사전”, 한기수, 2008, 도서출판 노드미디어
- [7] “간호학 대사전“, 대한간호학회편, 1996, 한국사전연구사
- [8] Kim DS, Park MH. The light sensitivity and angular dependence of the $Mg_2SiO_4:(MSO-S)TLD$. J.KoreaAsso.Radiat.Prot.1998;23(1):59-63.
- [9] A.S.Pradhan. Thermoluminescencedosimetry and its applications.Rod. Protec. Dosim 1981;1(3):153.
- [10] Lee JG. β , γ and X-ray outside the exposed surveillance system for the selection of personal dosimeter. Radiosotope news 1994; 9(2): 58-64.
- [11] Dong KR, Kweon DC, Chung WK, Goo EH, Kevin Dieter, Choe CH. Study on the angular dependence of personal exposure dosimeter - Focus on thermoluminescent dosimeter and photoluminescent dosimeter. Annals of Nuclear Energy 2011; 38: 383-388.
- [12] Rah JE, Shin DO, Hong JY, Kim HS, Lim CI, Jeong HG, Suh TS. Study on dosimetricpropertie of radiophotoluminescent glass rod detector. J. Korea Asso. Radiat.Prot 2006;31(4) 181-186.
- [13] Mobit PN, Nahum AE, and Mayles P. A Monte Carlo study of the quality dependence factors of common TLD materials in photon and electron beam. Phys. Med. Biol 1998;43:2015-2032
- [14] Asahi Techno Glass Corporation. Explanation material of RPL glass dosimeter; Small element system. Tokyo. Japan 2000.
- [15] Araki F, Ikegami T, Ishidoya T, and Kubo DH. Measurements of Gamma-Knife helmet output factors using a radiophotoluminescent glass rod dosimeter and a diode

detector. Med. Phys 2003;30:1976-1981.

[16] Tsuda M. A few remarks on photoluminescence dosimetry with high energy x-ray. Jpn. J. Med 2000;20:131-139.

[17] S. W. S. McKeever. New Millennium Frontiers of Luminescence Dosimetry. Radia. Prot. Dosim. 2002;Vol. 100:27-32

[18] D. J. Huntley, D. L. Godfrey-Smith and M. L. W. The walt. Optical Dating of Sediments. Nature 1985;313:105-107

[19] V. V. Antonov-Romanovskii, I. F. Keirum-Marcus, M. S. Poroshima and Z. A. Trapeznicova, USAEC Report AEC 1956;tr-2435;pt. 1

[20] Lim CS, Lee SB, Jin GH. Performance of optically stimulated luminescence Al₂O₃ dosimeter for low doses of diagnostic energy X-rays. Appl. Radiat. Isotopes 2011.

[21] ICRP Report 60. Recommendation of International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press 1990.

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

[23] ICRU Report 51. Quantities and units in Radiation Protection Dosimetry. International Commission on Radiation Units and Measurements 1993

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

[25] Mobit PN, Mayes P, and Nahum AE. The quality dependence of LiF TLD in megavoltage photon beams: Monte Carlo simulation and experiments. Phys. Med. Biol 1996;41:387-398.

[26] Philip W. Wiest, Julie A. Loeken, Philip H. Heintz, and Fred. A. Mettler Jr, CT Scanning: A Major Source of Radiation Exposure, *Seminars in Ultrasound, CT, and MRI*, Vol 23, No 5 (October), 2002: pp 402-410

[27] Shin Gwan Ko, Bong Seon Ahn, Sang Sup Jang, Jong Woon Choi, Young Soon Shin, A Study of X-ray Output for Diagnostic X-ray Equipment, KSRS 1995; Vol 18:No. 2, 62

[28] 전미은, “방사선 중재적 기술시 피폭선량에 대한 연구”, 석사학위논문, 2007: pp. 10-40

[29] 최재호, 강구준, 장서구 “DAP(Dose Area Product)를 이용한 TLD와 PLD의 선량 측정 비교” pp.249

[30] Kyung-Rae Dong, Dae cheol kweon, Woon-kwan chung, Eun-Hoe Goo, Kevin Dieter, Chong-Hwan Choe, Study on the angular dependence of personal exposure

- dosimeter - Focus on thermoluminescent dosimeter and photoluminescent dosimeter,
- [31] Park MH, Lee JI, Kwon DM. The Compensation of the Energy Dependence of TLD. Korea Radiation Technology Association Journal 1993; 16,2: 51-60.
- [32] Chang Seon Lim, Sang Bock Lee, Gye Hwan Jin, Performance of optically stimulated luminescence Al₂O₃ dosimeter for low doses of diagnostic energy X-ray, Applied Radiation and Isotopes, October 2011, 69 (10), pg. 1486-1489
- [33] 김장렬, “광자극 발광선량계(OSLD)의 새로운 개념과 원리” 한국원자력연구소 방사선안전관리실 책임연구원 pp.77~78
- [34] 박세환 외, 사용 후 핵연료 연소와 측정을 위한 이온 챔버 제작, 방사선방어학회지, 2010년 3월, 제35권 1호 , pp.21-25
- [35] 김정복, 감마선 측정용 이온 챔버 및 신호 증폭회로 개발, (A) Development of Ion-Chamber and Amplifier for Gamma-ray Measurement, 석사학위논문, 2004
- [36] Araki F, Ikegami T, Ishidoya T, and Kubo DH. Measurements of Gamma-Knife helmet output factors using a radiophotoluminescent glass rod dosimeter and a diode detector. Med. Phys 2003;30:1976-1981.
- [37] Park MH , Park KS. Fabrication of Li₂ B₄ O₇series single crystal TLDs and their TL properties. Journal of radiological science and technology 200528(1): 1-7.
- [38] Jang SY. TL measurements personal radiation dosimeter Radiosotope news 199813(4): 56-61.
- [39] Seoul Radiology Services. Monitoring by the glass dosimeter 2003: 1-26.
- [40] Lee GS. Deviation of TL Dosimeter Responses in Photon Radiation Fields From the Effective Doses. Graduate School of Hanyang University 2000: 4-5.

감사의 글

멀고도 먼 길을 돌아서 느지막이 논문을 마쳤습니다.

처음 시작할 때 좀 더 넓은 세상을 보기 위하여 시작한 도전.

‘과연 마칠 수 있을까?’ 하는 마음에 시작한 하였지만 먼 곳, 타지에서 쉽게 적응하기란 좀 힘들었습니다. 하지만 모든 것이 ‘마음먹기 달려있다’는 말을 기억하며 주위에 계신 분들의 끊임없는 아낌과 도움으로 무사히 마칠 수 있게 되어 너무 기쁩니다. 학위를 마치면서 학문의 깊이와 함께 인간으로서의 성숙미도 함께 배울 수 있어서 더 큰 보람을 느낍니다.

이런 저에게 힘들어 할 때 마다 힘과 용기를 주셨던 분들께 이 지면을 통해 감사의 마음을 전해드리고자 합니다.

먼저, 처음 학위를 시작할 때 적응할 수 있도록 많은 도움과 아낌없는 사랑을 주시고 본 논문의 시작부터 완성이 되기까지 세심한 지도와 많은 격려로 이끌어주신 아버님과 같은 인덕을 베풀어 주셨던 지도교수이신 정운관 교수님께 감사드립니다. 또한 논문의 심사과정에서 아낌없는 지도로 많은 가르침을 주신 김택현 교수님, 이경진 교수님 감사드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 심사를 허락해주신 존경하는 신홍대학교 마상철 교수님과 서울아산병원에서 직장 생활하면서 부터 항상 멘토 역할을 해주셨던 강원대학교 김태형 교수님께 감사드립니다.

학위의 시작과 끝의 중심에 서 있었던, 고마움을 말로는 표현하기 힘든 사랑하는 동생이자 인생 친구인 광주보건대학교 동경래 교수님과 최은진 사모님께 감사드립니다.

어려운 학교생활을 쉽게 풀어나갈 수 있게 항상 도움을 주셨던 조선대학교 원자력 공학과 열수력 실험실 주용진 선생님 및 학위를 위해 열심히 선·후배들께 감사드립니다.

직장생활과 함께 학업을 할 수 있도록 관심 있게 지켜 봐주신 서울아산병원 핵의학과 문대혁 교수님, 류진숙 교수님, 김재승 교수님 감사드립니다.

부족한 제가 대학원에 진학하기로 결심 했을 때 물심양면으로 도움 주신 조시만 팀장님, 신상기 UM 선생님 감사드립니다.

학업에 충실 할 수 있도록 배려해주시고 업무에 도움을 많이 주신 정우영 선생님 감사드립니다.

실험과 자료정리에 고생하신 김정선, 고현수 선생님, 마지막까지 논문 정리를 함께 도와주신 이정은 선생님을 비롯한 학업과 업무에 도움을 많이 주신 박승용, 김경식, 남궁창경, 김우현, 박순기, 성지혜 PET 검사실 식구들과 유희재, 이영희, 최우준, 장정찬, 심동오 선생님 및 서울아산병원 핵의학과 식구들께 감사드립니다.

인생의 올바른 길로 인도해 주시며 정신적인 지주이신 박창현 선생님, 김찬민 선생님 감사합니다.

항상 곁에 있으면서 칭찬과 격려 아끼지 않았던, 오랫동안 변하지 않는 친구인 김정

일, 멀리 캐나다에 있는 보고싶은 친구 천금룡, 가까운 곳에 있어서 든든한 임근호, 그 외 모든 친구들. 고맙다.

처음부터 지금까지 변함없는 믿음과 사랑으로 응원 해주신 장인, 장모님, 어머니, 아버지님 감사합니다. 그리고 누나, 매형, 처남, 처남댁에도 감사의 마음 전합니다.

마지막으로, 아빠를 그리워하는 아들 김태영, 아빠가 독립군인줄 아는 딸 김여원. 잘 자라주어서 고맙고 미안하다. 그리고. 아이들 키우느라, 남편 뒷바라지하느라 고생이 많은 아내 이소연. 사랑한다.

이외에 제가 미처 언급하지 못한 분들이 너무나 많습니다. 그 분들의 이름 하나하나를 되새기지 못함을 죄송하게 생각하며, 지금부터 인생의 선·후배로서 그리고 친구로서 많은 관심과 애정을 가지고 저를 지켜 봐주셨던 모든 분들께 부끄럽지 않은 모습으로 다시 뵈 수 있도록 어디에서든 최선을 다하겠습니다.