Journal of Radiation Industry 14(4) : 359~366(2020)

진단용 일반촬영 영역에서 X-선 조사 시 산란선에 의한 개인피폭선량계의 비교 평가

김 호 성[1,*]

[1]신한대학교 방사선학과

Comparative Evaluation of Personal Exposure Dosimeters by Scattered Rays during X-ray Irradiation in the Diagnostic General Imaging Area

Ho Sung Kim[1,*]

[1]*Department of Radiological Science, Shinhan University, 95, Hoam-ro, Uijeongbu, Gyeonggi 11644, Republic of Korea*

Abstract - In this study, we assess the benefits and drawbacks of different dosimeters by dividing the scattered rays generated while manipulating the distance, kVp, and mAs into Ion chamber, Piranha, TLD, PLD, and OSLD dosimeters using a diagnostic X-ray unit that is widely used in the general imaging field. We then measured, compared, and analyzed the results. We determined the direction and energy dependence according to the sensitivities of dosimeters. Through analyzing the difference between dosimeters based on distance, we discovered that OSLD had the best sensitivity, and the PLD had the poorest sensitivity to a statistically significant degree. In the kVp fixed mAs change, when compared overall, the ion chamber and PLD had the lowest energy dependence, and the OSLD had the highest energy dependence. In the mAs fixed kVp change, when compared overall, the energy dependence of TLD was the lowest, and the energy dependence of OSLD was the highest. Based on our results, we determined that the ideal dosimeters were OSLD for sensitivity, TLD for kVp change in energy in dependence, and Ion chamber and PLD for mAs change.

Key words : Personal exposure dosimeters, Ion chamber, Piranha, TLD, PLD, OSLD

서 론

우리나라는 진단용「진단용방사선 발생장치의 안전관리에 관한 규칙」(보건복지부령 제3호, 1995년 제정)에 의해 처음으로 방사선관계종사자에 대한 안전관리가 국가관리체계가 시행되었으며, 방사선관계종사자의 수는 시행 초기인 1996년부터 매년 증가하여 2018년에는 약 7배 증가한 89,025명에 이르렀다(질병관리본부 2018) (Table1). 이와 같이 방사선관계종사자의 증가는 국민이 건강에 대한 관심과 건강검진 등의 진단방사선 검사 횟수의 증가로 판단되며, 이러한 증가 추세는 지속될 전망이다. 방사선의 피폭은 직업상 피폭, 의료상 피폭, 공중의 피폭이 있다(질병관리본부 2017). 그중에서 국민의 인공방사선 피폭의 주된 피폭원은 의료방사선이다. 소득수준의 향상에 따른 의료의 관심도가 높아지고 생명관리에 따

* Corresponding author: Ho-Sung Kim, Tel. +82-31-870-3412, Fax. +82-31-870-3419, E-mail. hskimsh@shinhan.ac.kr

Table 1. Radiation related workers from 2014 to 2018

Occupation	Year				
	2014	2015	2016	2017	2018 (%)
Radio-technologist	22,419	23,485	24,756	25,797	26,991 (30.32)
Medical doctor	14,950	16,330	17,292	18,251	19,539 (21.95)
Dentist	15,951	16,587	17,111	17,769	18,248 (20.50)
Dental hygienist	8,912	9,563	10,086	10,791	11,452 (12.86)
Radiologist	1,475	1,542	1,643	1,757	1,835 (2.06)
Nurse	4,891	6,265	6,819	7,441	8,374 (9.41)
Nursing assistant	1,081	1,294	1,408	1,491	1,594 (1.79)
Business assistant	329	381	235	211	206 (0.23)
Etc	1,088	1,046	765	765	786 (0.88)
Total	71,096	76,493	80,115	84,273	89,025 (100)

른 진료의 빈도가 늘어나고 첨단 의료방사선 기술이 추가됨에 따라 정확하고 신속한 진단과 효과적인 질병의 치료에 중요한 역할을 차지함으로 진료 및 치료 과정에서 방사선 노출이 증가됨에 따라 의료상 피폭 또한 증가하고 있다(UNSCEAR 2008; NCRP 2009; Park *et al*. 2012; Kim and Kim 2016; 질병관리본부 2018).

선량의 증가는 과거 의료용 방사선의 사용에 의한 피폭선량의 문제가 특정 소수에만 국한되었던 문제에서 현재에는 방사선관계종사자나 피검자 모두에게 염두에 두어야 할 문제로 대두되었다(이 1992). 진단과 치료를 위해 환자에게 조사된 방사선은 X선의 흡수 차이에 의한 영상을 구성하는 1차 방사선과 주변으로 산란되는 2차 방사선으로 구분되며(Carlon and Alder 2001; Back 2017), 2차 방사선이 환자 및 주변인의 주된 피폭의 원인이 된다. 따라서 방사선작업종사자는 방사선발생장치를 사용하거나 방사성물질을 다루는 것에 의해 업무상 방사선의 지속적 노출로 인한 인체 피폭 위험이 있기 때문에 방사선관리구역 출입 시 반드시 개인 피폭 선량계를 착용하도록 법적으로 규제를 하고 있고, 방사선관계종사자의 허용피폭선량을 관리하고 있다. 개인피폭선량계는 여러 종류가 있지만 법적으로 인정된 공식 선량계는 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD), 광자극발광선량계(OSLD), 필름배지가 있으며, 피폭선량을 수시로 확인할 수 있는 전자선량계와 포켓선량계는 보조 선량계로 일일 피폭관리에서 중요한 수단으로 사용되고 있다. 공식 선량계는 각각의 특징과 장단점이 있기 때문에 그에 따라 작업 환경에 따라 적절하게 사용되는 것이 중요하다. 따라서 본 논문은 진단용 일반촬영검사 시에 사용되는 방사선으로 인한 산란방사선의 피폭선량을 공식 선량계인 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD), 광자극발광선량계(OSLD)를 이용하여 거리, kVp, mAs 변화에 따른 산란선을 각각의 선량계로 측정하고 비교하여 방향 및 에너지 의존성의 특성에 따라 진단용 일반촬영 영역에서 근무하는 방사선작업종사자들의 방사선피폭선량 평가의 효율성을 높이고자 한다.

Fig. 1. Device: Digital diagnostic low energy X-ray device.

대상 및 방법

1. 실험장치

진단용 일반촬영검사 영역에 사용된 장치는 진단용 엑스선 발생장치(VIDIX_DR System, 중외메디컬, 서울, 한국) (Fig. 1)를 사용하였다. 인체모형의 전신팬텀(Whole Body Phantom PBU-10; KYOTOKAGAKU, Kyoto, Japan) (Fig. 2)을 이용하여 진단용 엑스선 발생장치에서 발생되는 X선에 의한 산란 선량을 측정하였으며, 진단용 엑스선 발생장치에서 발생되는 선량 측정은 다기능 QA 측정기(RTI Electronic, Sweden)인 Piranha 657 (Fig. 3)로 측정하고, 기준 선량 측정은 전리함(Ion Chamber, 4000M + X-ray test device, Victoreen, USA) (Fig. 4)을 이용하였다. 개인피폭선량계인 열형광선량계(TLD:

Fig. 2. Hole body phantom: PBU-10.

Fig. 3. Multifunctional QC X-ray detector: Piranha 657.

Fig. 4. Ion chamber: 4000M + X-ray test device.

Thermoluminescent dosimeter, UD-802AT, Panasonic, Japan)와 열형광선량계 자동판독장치(UD-710R, Panasonic), 유리형광선량계(PLD: Photoluminescent dosimeter, GD-450, Japan)와 형광유리선량계 자동판독창치(FGD-650, ASAHI GLASS CO. LTD., JAPAN), 광자극발광선량계(OSLD: Optically stimulated luminescence dosimeters, LANDAEUR CO. LTD., Germany)와 광자극발광선량계 자동판독장치(Auto

Fig. 5. Scattering measurement by distance change.

200 Reader, Microstar reader, LANDAEUR CO. LTD., Germany)를 사용하였다.

2. 실험방법

장비의 재현성 실험은 디지털 엑스선 발생장치 테이블에 인체 전신팬텀 PBU-10을 위치하고, 조사야 $20 \times 20\ cm^2$에 요추의 앞-뒤(Anterior-Posterior) 방향으로 FFD 100 cm, 85 kVp, 250 mA, 40 mAs의 조사 조건으로 전리함(Ion chamber), Piranha, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 및 광자극발광선량계(OSLD)를 각각 10번씩 조사하였다(Fig. 5).

2.1. 전리함의 정확도 시험

관전압과 관전류 및 조사시간 정확도 시험은 %평균오차로 아래와 같이 평가하였다(Eq. 1).

$$PAE = \frac{X_p - \bar{X}}{X_p} \times 100\,(\%) \qquad \text{(Eq. 1)}$$

X_p: 관전압의 설정치, $\bar{X}$: 측정치의 산출평균치

%평균오차는 설정치를 기준으로 관전압(kVp)은 ±10% 이내, 관전류(mAs)는 ±15% 이내이어야 하며, 관전류량 %평균오차는 인버터식 장치와 변압기 장치의 경우 ±15% 이내이어야 하며, 콘덴서식 장치는 10 mAs 미만인 경우 설정치에 대한 오차는 ±2 mAs이고, 10 mAs 이상의 경우에서는 ±20% 이내이어야 한다.

2.2. 거리 변화에 의한 선량의 변화

선량계의 감도 평가는 디지털 엑스선 발생장치를 이용하여 인체모형 전신팬텀에 조사야 $20 \times 20\ cm^2$으로 요추 Posterior-Anterior 방향에서 85 kVp, 250 mA, 40 mAs, FFD = 100 cm)의 조사 조건으로 전리함(Ion chamber), Piranha, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 및 광자극발광선량계(OSLD)를

복부 조사야의 끝에서 거리별 5 cm 간격으로 20 cm까지 변화해가며 각각 10번씩 측정하였다.

2.3. kVp 변화에 따른 선량 변화

에너지 의존성 평가는 디지털 엑스선 발생장치를 이용하여 인체모형 전신팬텀에 조사야 20×20 cm^2으로 250 mA, 25 mAs, FFD=100 cm 조건으로 고정시키고, 관전압을 60 kVp, 80 kVp, 100 kVp, 120 kVp, 140 kVp로 20 kVp씩 변화시키면서 조사하여 전리함(Ion chamber), Piranha, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 및 광자극발광선량계(OSLD)를 이용하여 각각 10번씩 측정하여 엑스선의 강도에 대한 선량 평가를 하였다.

2.4. mAs 변화에 따른 선량 변화

에너지 의존성 평가를 위하여 디지털 엑스선 발생장치를 이용하여 인체모형 전신팬텀에 조사야 20×20 cm^2으로 100 kVp, FFD=100 cm 조건으로 고정시키고, mAs를 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 조사하여 전리함(Ion chamber), Piranha, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 및 광자극발광선량계(OSLD)를 각각 10번씩 측정하여 엑스선의 양에 대한 선량 평가를 하였다.

2.5. 방향에 따른 선량 변화

방향 의존성 평가를 위하여 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 및 광자극발광선량계(OSLD)를 이용하여 방사선 작업종사자의 일반적인 착용 위치인 인체모형 전신팬텀 복부의 조사야 끝에서 40 cm 거리에서 측정하였다. 조사야는 20×20 cm^2, 요추 앞-뒤 방향으로 85 kVp, 250 mA, 40 mAs, FFD=100 cm으로 조사 조건을 고정하고 0°~90°까지 양쪽 전 방위에서 15° 간격으로 각각 10회 측정하였다(Fig. 6).

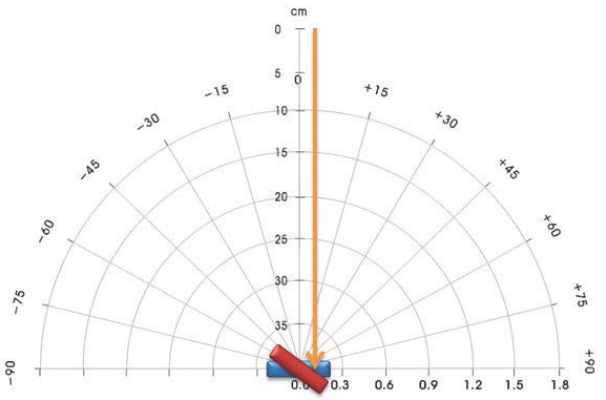

Fig. 6. Position of dosimeters (measure scattering rays by distance and angle).

3. 분석방법

분석은 통계학적 방법으로 SPSS win Version 25.0 (Chicago, IL, USA) 프로그램을 사용하였고, 거리 및 각도의 차이에 따른 방향 의존성을 비교 분석하기 위하여 일원배치분산분석 one-way ANOVA를 이용하였으며, ANOVA test에서 집단 간 유의한 차이가 확인되는 경우, Scheffe's의 사후분석을 적용하였다.

결 과

1. 정확도 시험

관전압은 0.1% 이하인 0.013%, 관전류는 0.15% 이하인 0.0002%, 관전류량은 0.2% 이하인 0.004%가 측정되었다(Table 2).

2. 재현성 평가

진단용 엑스선 발생장치의 재현성 평가는 전리함(Ion chamber), Piranha, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 및 광자극발광선량계(OSLD)에 각각 10번 조사하여 측정한 결과 가장 우수한 재현성을 보인 전리함의 경우 변동계수가 0.003이었고, 그 외 선량계들도 변동계수 0.05 이하로 대체적으로 우수한 재현성을 나타냈다(Eq. 2) (Table 3).

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

Table 2. Accuracy Test: kVp, mA, mAs

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±SD[a]	84.44±0.11	249.64±0.07	39.60±0.18
CV[b]	0.013	0.0002	0.004
PAE[c] (%)	0.65%	0.14%	1%

Note: [a]Standard diviation, [b]coefficient of variation, [c]percent average error.

SD: 조사선량 측정치 모집단에 대한 표준편차
$\bar{X}$: 조사선량 측정치의 평균치

3. 거리에 따른 선량 변화

거리와의 평균 선량의 감소율은 0~20 cm에서는 Piranha가 11.03%로 가장 작은 변화가 있었고 광자극발광선량계(OSLD), 전리함(Ion chamber), 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 순으로 변화의 추세를 보였다. 그리고, 0~15 cm에서는 광자극발광선량계(OSLD)가 2.333%로 가장 작은 변화가 있었고 Piranha, 유리선량계(PLD), 전리함(Ion chamber), 열형광선량계(TLD) 순으로 변화의 추세를 보였다. 0~10 cm에서는 광자극발광선량계(OSLD)가 1.71%로 가장 작은 변화가 있었고 Piranha, 전리함(Ion chamber), 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 순으로 측정되었다. 또한 0~5 cm에서는 전리함(Ion chamber)이 1.15%로 가장 작은 변화가 있었고 광자극발광선량계(OSLD), Piranha, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 순으로 측정되었다. 또한 기준 선원 측정기인 전리함(Ion chamber)과 비교하면, 전 영역에서 Piranha와 광자극발광선량계(OSLD)는 전리함(Ion chamber)보다 감도가 높게 측정되었고, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD)는 전리함(Ion chamber)보다 감도가 낮게 측정되었다(Fig. 7).

4. mAs 변화에 따른 선량 비교(100 kVp 고정)

표층선량을 기준 선원 측정기인 전리함(Ion chamber)을 기준으로 비교한 결과 유리선량계(PLD)가 근사한 값으로 측정되었고, 광자극발광선량계(OSLD)는 전리함(Ion chamber)보다 높은 감도로 측정되었다. 그리고 Piranha와 열형광선량계(TLD)는 전리함(Ion chamber)보다 낮은 감도로 측정되었다. 그리고 이변량 상관계수는 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮음으로 전리함(Ion chamber)에서 r값은 0.998 ($p<0.001$)이며 Piranha에서의 r값은 0.976 ($p<0.001$)이었고, 열형광선량계(TLD)에서의 r값은 0.980 ($p<0.001$)이며, 유리선량계(PLD)에서의 r값은 0.998 ($p<0.001$)이었고, 광자극발광선량계(OSLD)에서의 r값은 0.996 ($p<0.001$)으로 엑스선의 양인 mAs 변화에 따른 선량의 변화는 전리함(Ion chamber)과 유리선량계(PLD)가 에너지 의존성이 다른 개인피폭선량계에 비

Table 3. Dosimeter reproducibility evaluation

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

Note: [a]Standard diviation, [b]coefficient of variation. Ion chamber, Piranha units are the number of mGy and TLD, PLD, OSLD units are the number of mSv.

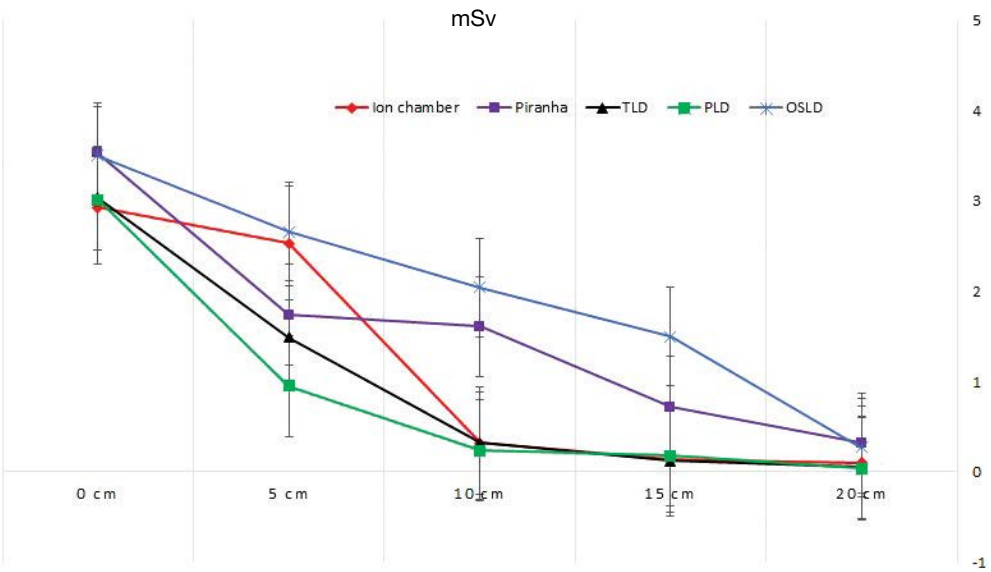

Fig. 7. Dosimeter comparison according to distance change.

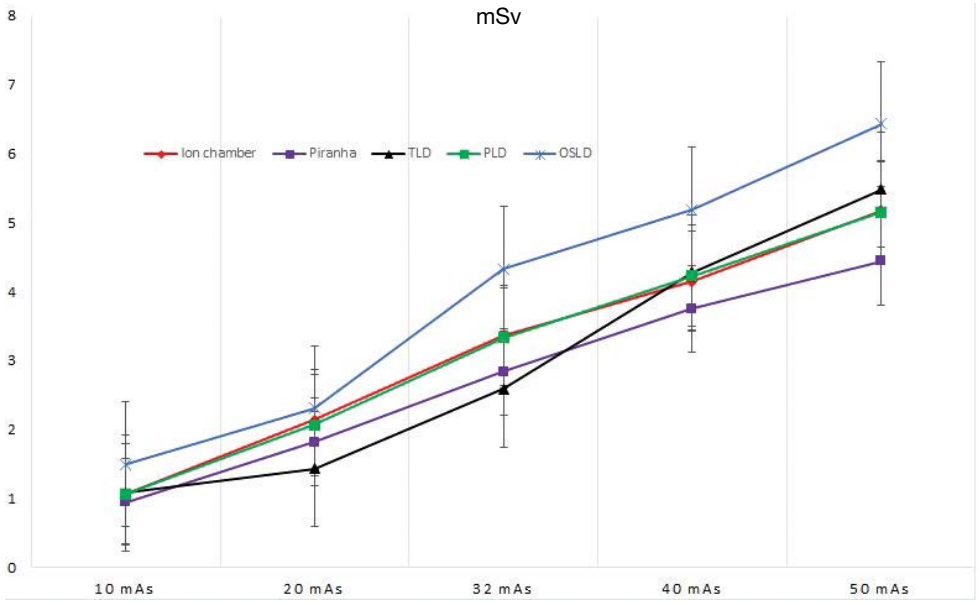

Fig. 8. Dosimeters comparison by different mAs.

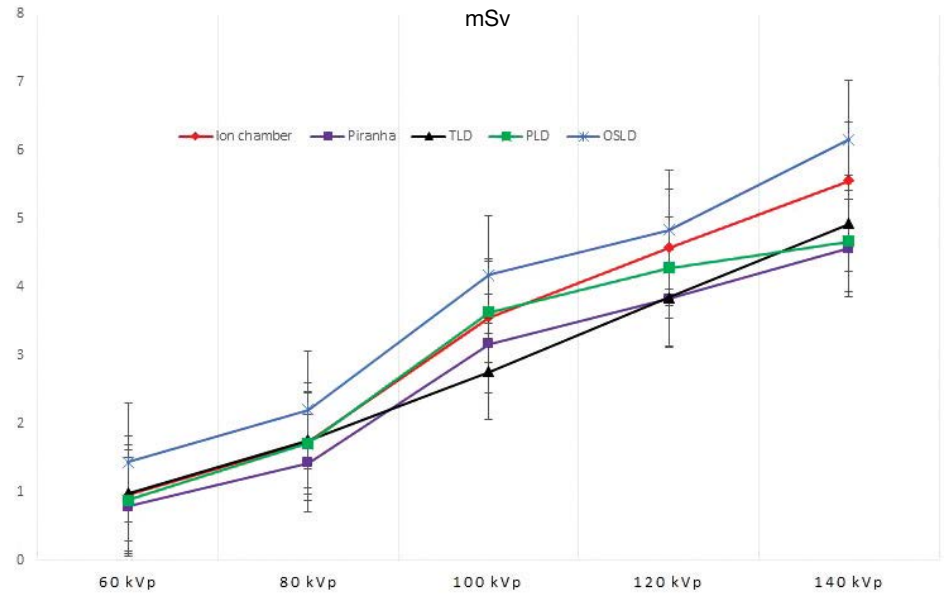

Fig. 9. Dosimeters comparison by different kVp.

하여 좋은 것을 알 수 있었다(Fig. 8).

5. kVp 변화에 따른 선량 비교(25 mAs 고정)

표층선량을 기준 선원 측정기인 전리함(Ion chamber)을 기준으로 비교한 결과 열형광선량계(TLD)가 근사한 값으로 측정되었고, 광자극발광선량계(OSLD)는 전리함(Ion chamber)보다 높은 감도로 측정되었다. 그리고 Piranha와 유리선량계(PLD), 열형광선량계(TLD)는 전리함(Ion chamber)보다 낮은 감도로 측정되었다. 또한 이변량 상관계수가 1에 가까울수록 에너지 의존성이 낮음으로 전리함(Ion chamber)에서의 r값은 0.992 ($p<0.001$)였고, Piranha에서의 r값은 0.984 ($p<0.001$)였으며 열형광선량계(TLD)에서의 r값은 0.993 ($p<0.001$)이고, 유리선량계(PLD)에서의 r값은 0.969 ($p<0.001$), 광자극발광선량계(OSLD)에서의 r값은 0.989 ($p<0.001$)로 엑스선의 강도인 kVp 변화에 따른 선량 변화는 전리함(Ion chamber)과 열형광선량계(TLD)가 다른 개인피폭선량계에 비하여 에너지 의존성이 우수한 것을 알 수 있었다(Fig. 9).

고 찰

본 논문은 진단방사선 분야에서 많이 사용되고 있는 진단용 X선 발생장치를 이용하여 거리, kVp, mAs를 변화시키면서 발생되는 산란선을 전리함(Ion chamber), Piranha, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD), OSLD로 나누어 측정하고 비교 분석하여 각각의 선량계들의 감도에 따른 방향 및 에너지 의존성이 우수한지를 평가하였다. 진단용 X선 장치에 대한 전리함(Ion chamber), Piranha, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 및 광자극발광선량계(OSLD)를 통한 재현성 실험 결과 모두 5% 이하로 허용범위를 벗어나지 않아 정밀도가 우수했으며, 거리별 감도 측정 결과에서는 거리 0 cm에서 5 cm씩 변화시키면서 20 cm까지, 조사 조건 40 mAs, 85 kVp, 250 mA로 조사하였을 때의 선량 감소를 비교한 결과 광자극발광선량계(OSLD), 전리함, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD) 순으로 측정되었다. 그리고 기준 선원 측정기인 전리함(Ion chamber)과 비교하면, 전 영역에서 Piranha와 광자극발광선량계(OSLD)는 전리함(Ion chamber)보다 높은 감도를 보였고, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD)는 전리함(Ion chamber)보다 감도가 낮게 측정되었다. 엑스선의 강도인 kVp 변화에 따른 에너지 의존성 실험에서 25 mAs로 고정하고 60 kVp에서부터 20 kVp씩 변화시켜 140 kVp까지의 조사선량의 증가를 비교한 결과 열형광선량계의 특징인 아주 넓은 범위의 선량측정이 가능하다는 점으로 인하여 열형광선량계(TLD)가 에너지 의존성이 가장 우수했고, 광자극발광선량계(OSLD)가 광자극의 광원에 따라 나노초에서 수초 이내의 측정이 가능하기 때문에 높은 에너지 의존성을 보였다. 또한 표층선량을 기준 선원 측정기인 전리함(Ion chamber)을 기준으로 비교하면, 유리선량계(PLD)가 가장 근접한 값으로 측정되었고, 광자극발광선량계(OSLD)는 전리함(Ion chamber)보다 높은 감도로 측정되었다. 그리고 Piranha와 열형광선량계(TLD)는 전리함(Ion chamber)보다 낮은 감도로 측정되었다. 엑스선의 양인 mAs의 변화에 따른 에너지 의존성 실험에서 100 kVp로 고정하고, 10 mAs에서부터 10 mAs씩 변화시켜 50 mAs까지의 선량 증가를 비교한 결과 전리함(Ion chamber), 유리선량계(PLD)가 에너지 의존성이 가장 우수했고, 광자극발광선량계(OSLD)가 높은 에너지 의존성을 보였다. 또한 표층선량을 기준 선원 측정기인 전리함(Ion chamber)을 기준으로 비교하면, 열형광선량계(TLD)가 가장 근접한 값으로 측정되었고, 광자극발광선량계(OSLD)는 전리함(Ion chamber)보다 높은 감도로 측정되었다. 그리고 Piranha와 유리선량계(PLD), 열형광선량계(TLD)는 전리함(Ion chamber)보다 낮은 감도로 측정되었다. 마지막으로 기준 선원 측정기인 전리함(Ion chamber)을 기준으로 거리 변화에 따른 감도는 광자극발광선량계(OSLD)가 가장 우수했고, 에너지 의존성은 kVp 변화에서는 열형광선량계(TLD)가 mAs 변화는, 유리선량계(PLD)가 우수하였다. 이는 Kim의 연구는 고에너지 영역에서 선량률의 변화와 거리에 따른 감도 측정 결과 유리선량계(PLD)가 우수하다고 한 연구와 비슷한 결과를 얻었다(Kim *et al*. 2017). 방향 의존성 실험에서는 열형광선량계(TLD)가 우수 개인피폭선량계들을 각도에 변화를 주어 실험한 방향 변화에 의한 감도는 15도 이상의 방향 변화에서는 선량계의 측면으로 입사되기 때문에 선량이 낮게 측정되어 평가가 어려웠으며, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD), 광자극발광선량계(OSLD) 모두 비슷한 값으로 측정되었다. Dong의 연구는 유리선량계(PLD)는 열형광선량계(TLD)보다 각도 의존성이 낮다고 보고하였지만(Dong *et al*. 2011), 본 논문에서 차이가 없는 것으로 나타난 것은 저선량으로 인한 산란선 발생의 양이 적기 때문으로 생각된다.

결 론

결과를 토대로 개인 피폭선량기의 측정 위치 및 방향에 따른 값의 차이와 에너지 사용에 따른 차이가 발생하기 때문에 각 기관의 선량관리자는 이 같은 특성을 고려하여 개인피폭선량계를 선택한다면 실무에서 보수적인 측정값을 얻을 수 있기 때문에 방사선작업종사자 및 방사선관련종사자의 피폭을 좀 더 객관적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

The Research has been conducted by the Research Grant of Shinhan University in 2020.

참 고 문 헌

이해룡. 1992. 방사선종사자의 개인피폭선량측정. 국립보건원보. **29**(2):460-466.

질병관리본부. 2018. 2018년도 의료기관 방사선관계종사자의 개인피폭선량 연보. 피폭선량관리센터.

Back CH. 2017. A study of scattered radiation effect on digital radiography imaging system. *J. Radiol. Sci. Technol* **40**(1):71-78.

Carlton RR and Alder AM. 2001. Principles of Radiographic Imaging: an art and a science, 3th Edition. Delma, CA: Delma Thomson Learning; 240-7.

Dong KR, Kweon DC, Chung WK, Goo EH, Kevin D and Choe CH. 2011. Study on the angular dependence of personal exposure dosimeter - Focus on thermoluminescent dosimeter and photoluminescent dosimeter. *Ann. Nucl. Energy*. **38**(2-3): 383-388.

Kim HS, Kim SH, Ryu YH, Kim HK, Shin YJ and Dong KR.

2017. A Study on the Direction and Energy Dependence of Personal Exposure Dosimeter by Scatter of High Energy Therapeutic X-ray Device. *J. Radiat. Ind.* **11**(4):189-202.

Kim JK and Kim JK. 2016. Evaluation on organ dose and image quality of lumbar spine radiography using glass dosimeter. *J. Radiol. Sci. Technol* **239**(1):1-11.

Korea Centers for Disease Control and Prevention. 2017. Publication of Medical Radiation Occupational Radiation Statistics Statistical Yearbook [Internet], KCDC.

National Council on Radiation Protection and Measurement. 2009. Ionizing Radiation Exposures of the Population of the United States. NCRP Publication 160.

Park HS, Lim CH, Kang BS, You IG and Jung HR. 2012. A study on the evaluation of patient dose in interventional radiology. *J. Radiol. Sci. Technol* **35**(4):299-308.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2010. Annex A Medical Radiation Exposures. UNSCEAR REPORT 2008.

Received: 9 November 2020
Revised: 16 November 2020
Revision accepted: 29 November 2020