

MCNPX 프로그램을 통한 일반 X선 검사 시 검사실 내 공간선량분포

Spatial Dose Distribution for Diagnostic X-ray Examination within X-ray Room using the MCNPX Program

이동연*, 이진수**

동남권원자력의학원 방사선중양학과*, 인제대학교 해운대백병원 영상의학과**

Dong-yeon Lee(gymnist@naver.com)*, Jin-soo Lee(sonojinsoo@naver.com)**

요약

본 연구는 진단용 X선 검사 시 사용하고 있는 부가필터의 재질(Cu, Ni, CaWO₄, Gd+Ba)을 다양화하여 그에 따른 검사실 내의 공간선량을 평가 한 후 적합한 재질을 찾아 제시하고자 하였다. 실험은 몬테칼로 기법을 바탕으로 하는 MCNPX 프로그램을 사용하여 흉부와 복부검사를 선택하여 모의실험을 진행하였다. 그 결과 각 재질별 선량은 모의피폭체가 위치한 곳을 중심으로 반경 50 cm 인 지점의 평균 산란선량은 모의피폭체 표면선량의 약 62%, 반경 100 cm인 지점은 평균 약 47% 정도 측정되었다. 결과에 따라 현재 상용화 되어 있는 Al 재질을 Cu, Ni 재질이 충분히 대체가능 할 것으로 판단된다. 다만 원자번호와 밀도의 차이로 인하여 그 두께를 Al의 약 1/10 정도로 조정을 해서 사용하면 적합할 것이다.

■ 중심어 : | 진단용 X선 발생장치 | 공간선량분포 | 모의실험 |

Abstract

This study is the material of the additional filter(Cu, Ni, CaWO₄, Gd+Ba) being used when the diagnosis X-ray was varied to evaluate the spatial dose distribution accordingly. And it suggest to find a suitable material. Experiments using MCNPX program based on the Monte Carlo simulation method was carried out by selecting the chest and abdomen taken. As a result, each material per dose, the average scatter dose is approximately 62%, 100 cm radius of the point of the simulated body surface exposure dose and 50 cm radius centered on the point average about 47%. It is determined that an Al material is currently available in accordance with the result to be replaced by Cu, Ni material is sufficient. With just the thickness due to the difference in the atomic number and density adjusted to be about one-tenth of the Al it will be suitable.

■ keywords : | Diagnostic X-ray Unit | Spatial Dose Distribution | Simulation |

1. 서론

방사선은 현재 의료부분에서 가장 기본이며, 핵심적

인 학문분야로 이용되고 있다[1]. 특히 국민건강보험공단에서 발간한 2013 통계연보 자료에 의하면 일반검진 수검률이 2008년 65.3%에서 2013년 72.1% 증가하였다

접수일자 : 2015년 06월 01일

수정일자 : 2015년 06월 30일

심사완료일 : 2015년 07월 14일

교신저자 : 이진수, e-mail : sonojinsoo@naver.com

고 보고한 것처럼 의료방사선분야 중에서도 일반검사에서 가장 많이 시행되고 있다는 것을 알 수 있다[2]. 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP)에서는 의료피폭에 대하여 선량한도를 제한하지 않았지만, ALARA(As Low As Reasonably Achievable) 개념에 맞게 방사선방어에 있어서 정당화, 최적화를 적용하여 선량을 최소한으로 하도록 권고하고 있다[3-5]. 일반적으로 진단용 X선관에서 환자의 피폭을 줄이기 위한 방법으로 부가필터를 사용하도록 권장하고 있다[6]. 부가필터의 역할은 연속 스펙트럼을 갖는 X선 에너지에서 환자 피폭의 주원인이 되는 저에너지 부분을 제거하여 환자의 피폭선량을 낮추는 역할을 한다[7]. 하지만 눈에 보이지 않는 X선은 물체에 충돌하면서 산란선을 발생시키며, 부가필터로 인하여 검사실내 공간에 예상치 못한 공간선량이 발생하게 된다. 이러한 공간선량은 작업종사자 또는 그 외 관계자들에게 피폭 발생확률을 높일 수 있다[8]. 따라서 X선 검사 시 검사실 내 산란선으로 인한 공간선량의 분포는 의료인과 방사선 작업종사자의 피폭정도를 인지하는데 중요한 지표가 된다[9].

이에 본 연구는 X선 검사 시 부가필터에 따른 검사실내의 공간선량에 대한 평가와 부가필터의 재질을 다양화하여 식약청 권고사항과 비교 평가를 통해 환자 및 작업종사자 피폭을 감소할 수 있는 적절한 필터의 재질을 제시하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. X선관 및 모의피폭체

본 실험은 몬테카를로 기법을 바탕으로 하는 MCNPX 프로그램(Ver.2.5.0)을 사용하여 모의실험을 진행하였다. 먼저 타깃의 경우 각도는 일반적으로 사용하는 12°, 재질은 텅스텐(Tungsten, W_{74} , 밀도 19.26 g/cm³)을 사용하였으며, 타깃을 차폐하는 X-선관은 납(Lead, Pb_{82} , 밀도 11.34 g/cm³)을 사용하여 원통 모양으로 타깃을 둘러싼 형태로 모사하였다[10][Fig. 1]. 모의피폭체는 AAPM report No. 31(American Association of

Table 1. Configuration of the AAPM Phantom.

Region	Configuration	Material
Abdomen	25 × 25 × 17.78 cm	Plexiglass
Chest	25 × 25 × 2.54 cm	Plexiglass
	25 × 25 × 0.1 cm	Aluminum
	25 × 25 × 2.54 cm	Plexiglass
	5.08 cm	Air gap
	25 × 25 × 2.54 cm	Plexiglass
	25 × 25 × 0.2 cm	Aluminum
	25 × 25 × 2.54 cm	Plexiglass

Table 2. Filter thickness suggest in the Ministry of Food and Drug Safety.

Maximum rated voltage (kVp)	Total Filtration (mm)
60 kVp below	1.5 mm Al
60 ~ 110 kVp	2 mm Al
110 kVp over	2.5 mm Al

Physicists in Medicine; AAPM)에서 제공한 복부와 흉부 피폭체를 모사하였다[11]. 복부의 경우 인체등가물질인 아크릴(Plexiglass, $C_5O_2H_8$, 밀도 1.16 g/cm³) 재질을 사용하여 총 두께 17.78 cm으로 구성하였다. 흉부의 경우 아크릴 10.16 cm, 알루미늄(Aluminium, Al_{13} , 2.7 g/cm³) 0.3 cm을 사용하여 흉벽을 표현하였으며, 폐를 표현하기 위해 공기층을 5.08 cm 두었다. 모의피폭체의 구성과 모양을 [Table 1]과 [Fig. 2]로 나타내었다.

2. 필터

필터의 역할은 환자에게 피폭의 주원인이 되는 저에너지대의 광자를 제거하여 피폭선량을 줄이는 것을 목적으로 하며, 고유필터와 부가필터로 구분 된다[10]. 본 연구에서는 모의실험 프로그램 특성상 X선관 자체의 고유여과를 모사할 수 없기에 고유필터를 추가하였으며, 그 두께는 1 mm의 알루미늄 재질을 선택하였다[12]. 부가필터의 경우 식약청에서 제시한 알루미늄 재질을 사용하였으며, 각 에너지대별 권고하는 두께를 table 2로 나타내었다[13].

3. 측정위치

저에너지영역을 흡수하는 부가필터의 역할을 평가하

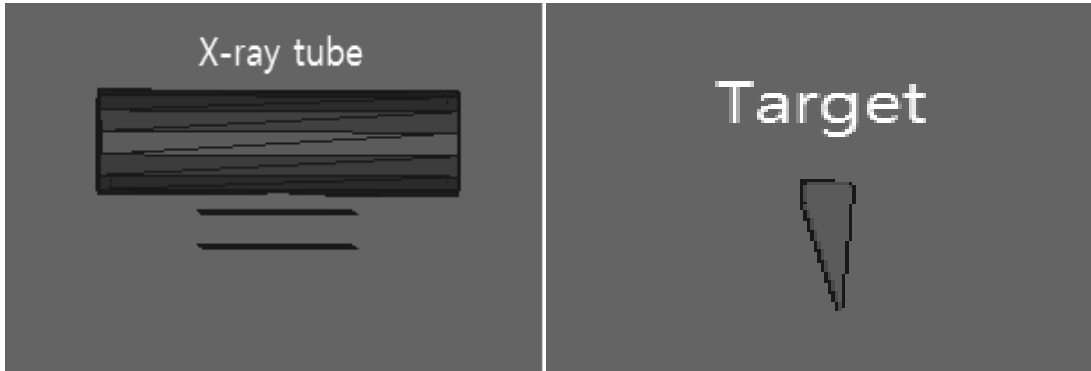


Fig. 1. Simulated X-ray tube and Target in MCNPX

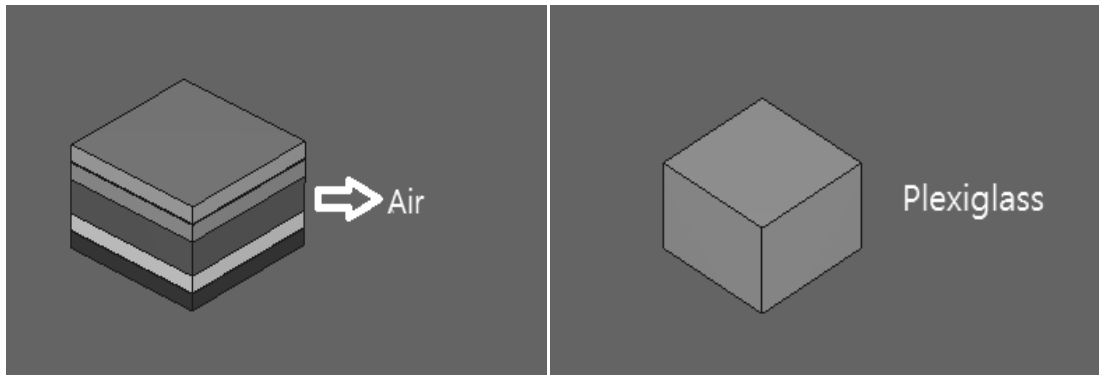


Fig. 2. Simulated Chest, Abdomen phantom in MCNPX

기 위해 피폭체의 표면선량을 스펙트럼으로 측정하였다. 이후 공간선량을 평가하기 위해 피폭체를 중심으로서 방향으로 거리 50, 100 cm 총 8 지점에 대하여 광자 플루언스율(Photon fluence rate)을 측정하였다.

표면선량 측정은 모의피폭체의 표면에서 면적(cm^2)당 광자의 수(N)를 측정하였으며, 스펙트럼은 1 keV 단위로 측정하였다. 공간선량 측정은 반지름 5 cm인 가상의 원형 검출기를 위치하여 면적(cm^2)당 광자 수(N)를 측정하였다. 이 때 사용한 tally는 15번으로 하였으며, 오차를 3% 이내로 하여 신뢰성을 확보하였다.

4. 실험방법

모사한 X선관, 모의피폭체 및 필터를 바탕으로 모의 실험을 진행하였다. 현재 일반검사에서 가장 횡수가 많은 검사로 전체 방사선 검사의 30 ~ 60%를 차지하고

있는 흉부검사와 인체 검사 부위 중 장기가 밀집되어 있는 복부를 선택하여 모의실험하였다[14]. [Table 3]은 본 실험에서 시행한 검사조건으로 식품의약품안전처에서 권고하고 있는 흉부와 복부의 검사조건을 참고하였다[13]. 마지막으로 본 연구에서 선택한 부가필터의 재질은 상용화 되어있는 알루미늄을 기본으로 일반검사에서 사용이 쉽고 쉽게 구할 수 있는 재질 구리(Cu), 니켈(Ni), 회중석(CaWO_4), 브롬산가돌리늄($\text{Gd}+\text{Ba}$) 4가지를 선택하였다. 각 재질별 원자번호와 밀도는 table 4로 나타내었으며, 본 실험에서 설정한 각 재질별 두께는 [Table 5]로 나타내었다. 식약청에서 권고한 AI을 기준으로 Cu, Ni의 경우 알루미늄의 약 1/10배, CaWO_4 , $\text{Gd}+\text{Ba}$ 의 경우 알루미늄의 약 1/4배를 선택하였다. 이는 기존 논문의 실험결과에서 각 재질별로 유사한 표면선량값을 보인 두께를 참고하였다[6].

Table 3. Exposure conditions suggest in the Ministry of Food and Drug Safety.

Region	Tube voltage(kVp)	FFD(cm)
Chest	120 kVp	180 cm
Abdomen	80 kVp	100 cm

Table 4. Material of Additional filter.

Material	Atomic number	Density (g/cm ³)
Aluminium (Al)	13	2.7
Copper (Cu)	29	8.94
Nickel (Ni)	28	8.908
Scheelite(CaWO ₄)	Ca - 20 (13.92%) W - 74 (63.85%) O - 8 (22.23%)	6.01
Gadoliniumbromat (Gd+Ba)	Gd - 64 Ba - 56	7.9

Table 5. Thickness of Additional filter.

Region	Material	Thickness
Chest	Al	1.5 mm
	Cu	0.15 mm
	Ni	0.15 mm
	Gd+Ba	0.3 mm
	CaWO ₄	0.3 mm
Abdomen	Al	1.0 mm
	Cu	0.1 mm
	Ni	0.1 mm
	Gd+Ba	0.25 mm
	CaWO ₄	0.25 mm

이를 바탕으로 부가필터 재질 변화에 따른 모의피폭체 표면과 검사실내 공간에 대한 광자플루언스율을 측정하여 평가하였다.

III. 결과

모사한 흉부와 복부 모의피폭체에 대하여 표면과 촬영실내의 공간에 대하여 전자 당 생성된 광자의 플루언스율을 측정하여 나타내었다.

1. 흉부 모의피폭체

1.1 표면에 대한 광자플루언스율과 스펙트럼

광자플루언스율(Photon fluence rate)을 보면, 식품의약품안전처에서 권고하는 알루미늄 재질의 부가필터 두께 1.5 mm에서는 3.38×10^{-8} 개/e의 값이 측정되었다. 그리고 Cu, Ni, Gd+Ba, CaWO₄ 순으로 2.91×10^{-8} 개/e, 2.97×10^{-8} 개/e, 1.26×10^{-8} 개/e, 1.74×10^{-8} 개/e의 값을 보였다. 생성된 광자에 대하여 에너지분포를 보기 위하여 스펙트럼을 측정하였으며, 각 재질별 스펙트럼을 [Fig. 3]으로 나타내었다. 이를 세부적으로 살펴보면, 각 재질별 평균에너지는 CaWO₄, Cu, Ni, Gd+Ba, Al 순으로 55.04 keV, 54.02 keV, 53.81 keV, 53.32 keV, 51.12 keV으로 나타났다.

1.2 검사실 내 공간 광자플루언스율

모의피폭체가 위치한 SSD 180 cm 지점에서 사 방향으로 50 cm, 100 cm 지점 8곳을 선정하여 광자플루언스율을 측정 후 표면에서의 광자플루언스율을 기준으로 백분율로 나타내었다. 먼저 Al의 경우 모의피폭체에서 50 cm 이격된 지점에서는 표면을 기준으로 평균 약 61.3%를 보였으며, 100 cm 이격된 지점에서는 평균 약 50.1%를 보였다.

Cu의 경우 50 cm, 100 cm 순으로 평균 61.4%, 47.4%를 보였다.

Ni의 경우 50 cm, 100 cm 순으로 평균 61.1%, 47.4%를 보였다.

Gd+Ba의 경우 50 cm, 100 cm 순으로 평균 64.8%, 48.7%를 보였다.

CaWO₄의 경우 50 cm, 100 cm 순으로 평균 63.3%, 46.5%를 보였다.

각 지점별 광자플루언스율의 백분율 값을 [Fig. 4]로 나타내었다.

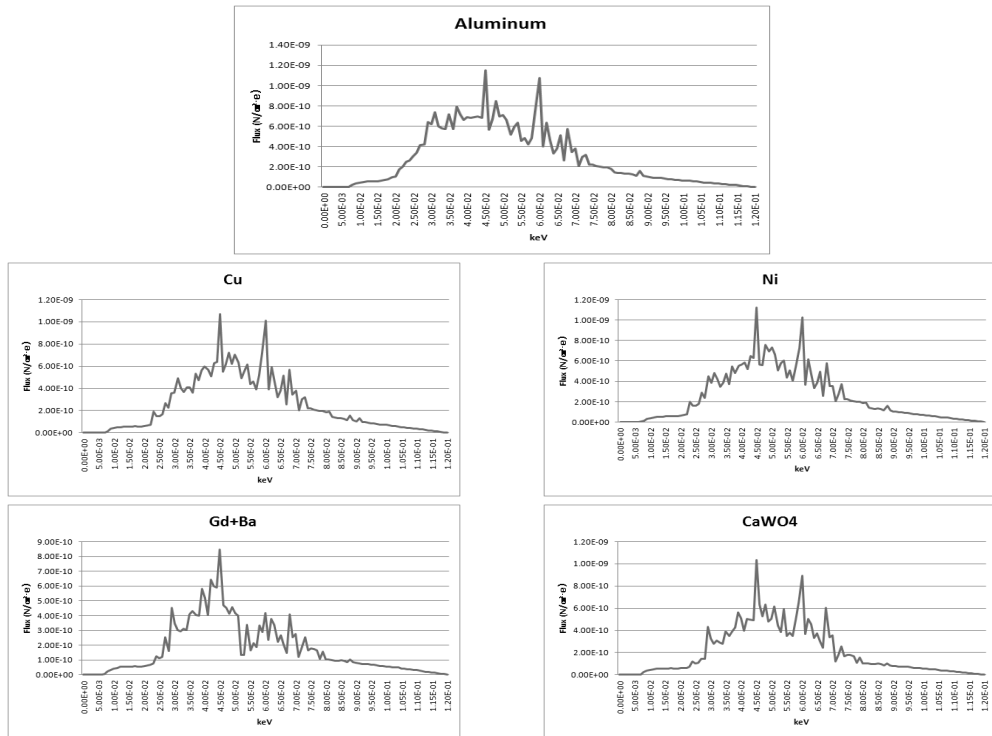


Fig. 3. Photon Spectrum of surface in Chest phantom.

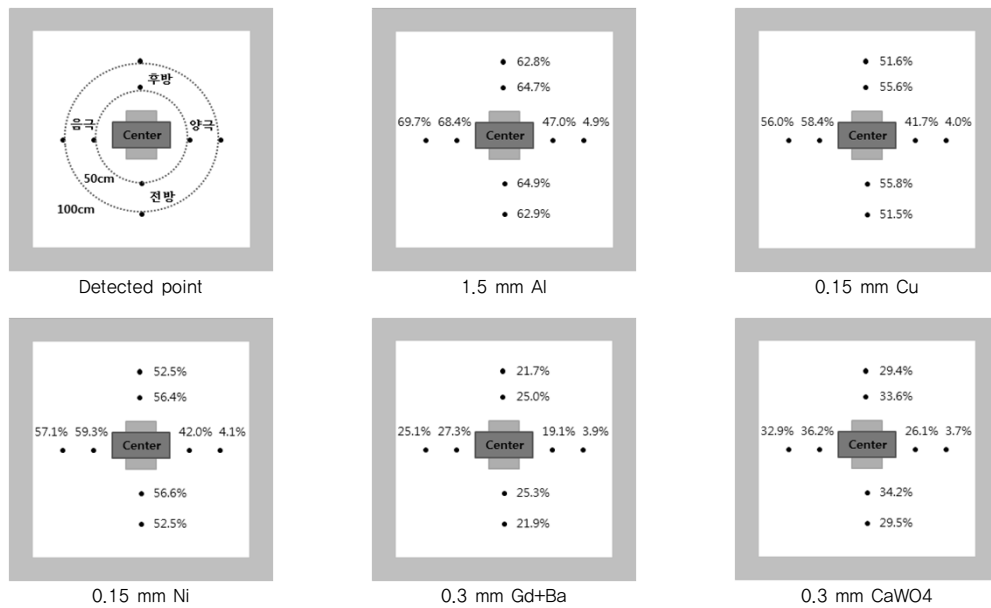


Fig. 4. Peripheral flux to the center of the flux in chest

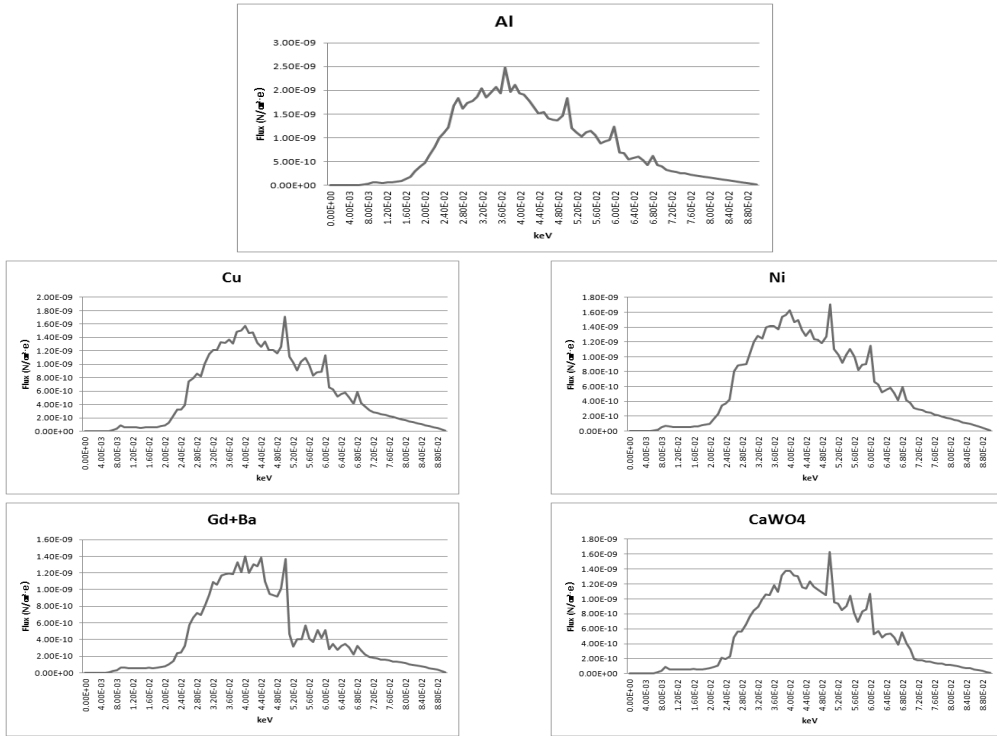


Fig. 5. Photon Spectrum of surface in Abdomen phantom.

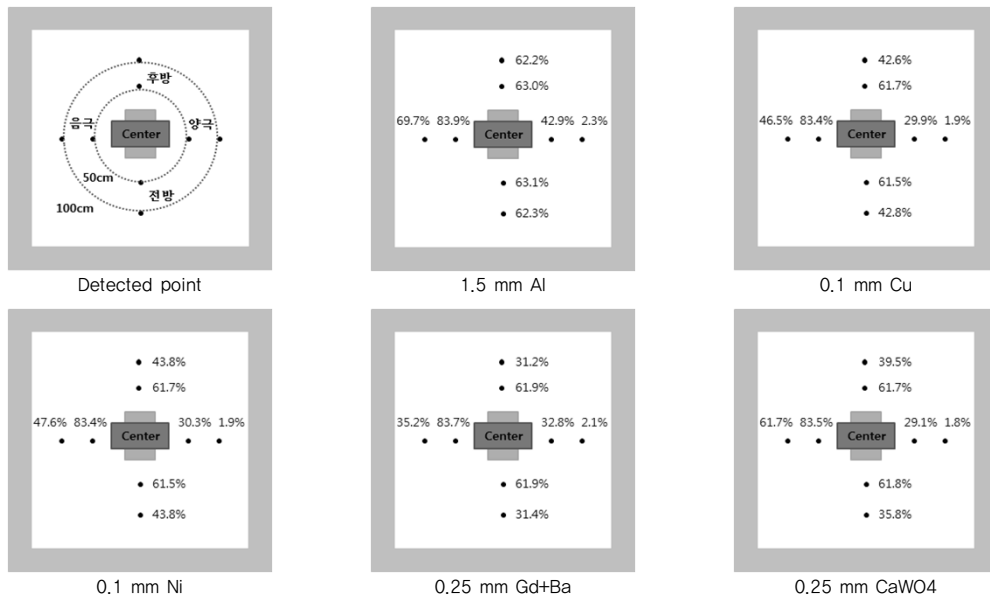


Fig. 6. Peripheral flux to the center of the flux in abdomen

2. 복부 모의피폭체

2.1 표면에 대한 광자플루언스율과 스펙트럼

광자플루언스율을 보면, 식품의약품안전처에서 권고하고 있는 알루미늄 재질의 부가필터 두께 1.0 mm에서는 7.10×10^{-8} 개/e의 값이 측정되었다. 다음으로 Cu, Ni, Gd+Ba, CaWO₄ 순으로 5.17×10^{-8} 개/e, 5.29×10^{-8} 개/e, 3.79×10^{-8} 개/e, 4.39×10^{-8} 개/e의 값을 보였다. 생성된 광자에 대하여 에너지분포를 보기 위하여 스펙트럼을 측정하였으며, 각 재질별 스펙트럼을 [Fig. 5]로 나타내었다. 이를 세부적으로 살펴보면, 각 재질별 평균에너지는 CaWO₄, Cu, Ni, Gd+Ba, Al 순으로 46.61 keV, 46.28 keV, 46.01 keV, 44.07 keV, 42.67 keV로 나타났다.

2.2 검사실 내의 공간 입자플루언스율

모의피폭체가 위치한 SSD 100 cm 지점에서 사 방향으로 50 cm, 100 cm 지점 8곳을 선정하여 광자플루언스율을 측정 후 표면에서의 광자플루언스율을 기준으로 백분율로 나타내었다. Al의 경우 모의피폭체에서 50 cm 이격된 지점에서는 표면을 기준으로 평균 약 53.6%를 보였으며, 100 cm 이격된 지점에서는 평균 약 49.2%를 보였다.

Cu의 경우 50 cm, 100 cm 순으로 평균 72.0%, 46.0%를 보였다.

Ni의 경우 50 cm, 100 cm 순으로 평균 70.3%, 46.0%를 보였다.

Gd+Ba의 경우 50 cm, 100 cm 순으로 평균 98.7%, 46.8%를 보였다.

CaWO₄의 경우 50 cm, 100 cm 순으로 평균 146%, 96.5%를 보였다.

각 지점별 광자플루언스율의 백분율 값을 [Fig. 6]으로 나타내었다.

IV. 고찰

본 연구는 진단용 X선 발생장치를 이용하여 흉부와 복부 검사를 시행할 때 환자의 피폭선량을 감소시키는 역할을 하는 부가필터 재질 변화에 따른 피부표면과 검

사실 내의 공간선량의 분포에 대하여 알아보았다.

그 결과, 모의피폭체 표면의 광자플루언스율은 Al, Ni, Cu, Gd+Ba, CaWO₄ 순으로 많은 양이 측정되었으며, 평균에너지는 반대로 CaWO₄에서 가장 높은 값을 나타냈다. 이는 각 재질마다 원자번호와 밀도가 다르기 때문에 광자의 감약 정도가 다르게 나타난 것으로 사료되며, 이에 따라 저에너지 광자에서 감약율이 높아 광자플루언스율이 낮은 재질에서 평균에너지가 높게 측정된 것으로 판단된다.

흉부와 복부 중 흉부검사에서 공간선량이 낮게 측정되었으며, 동일 검사에서 50 cm 보다 100 cm에서 선량이 낮게 측정되는 것을 알 수 있었다. 이는 기존의 이론인 거리역자승의 법칙에 따른 것으로 사료되며, 본 연구에서는 1차선이 아닌 2차선으로 역자승보다 더 높은 감약을 보인 것으로 사료된다[15]. 또한 본 연구의 결과 검사실 내의 거리에 따른 선량분포에 대하여 연구한 최 [16]의 논문결과와 유사한 경향을 보였다.

공간선량에서는 사 방향 중 양극방향에서 공간선량이 낮게 측정된 것을 알 수 있었다. 이는 양극의 경사각에 따른 X선 강도 분포에 대하여 연구한 기존의 논문결과와 유사하였으며, 많은 연구들에 의해 정립되어 있는 이론대로 타겟의 경사각 때문에 양극방향으로 발생하는 X선이 감약되는 Heel effect 현상으로 인한 것으로 사료된다[12][17].

부가필터의 재질별 피부표면과 공간선량을 보면, Cu, Ni의 경우 Al과 유사한 경향성을 보였다. 하지만 CaWO₄, Gd+Ba의 경우, 공간선량율이 상대적으로 높게 측정되었으며, 피부표면의 선량은 낮게 측정되었다. 특히 피부선량의 광자스펙트럼에서 영상획득의 주요부분인 고에너지 광자의 감약이 많이 발생하였다. 이는 기존의 이론대로 CaWO₄, Gd+Ba의 경우, 단일 재질이 아닌 합금형태로서 원자번호와 전자밀도가 높아 상대적으로 Cu, Ni 보다 광전효과와 콤프턴산란에 대한 상호작용 확률이 높아 표면선량은 적게 측정되었으며, 공간선량은 많이 발생한 것으로 사료된다[18].

V. 결론

모의실험을 통해 환자의 피폭선량을 감소시키고 검사실 내의 공간선량을 줄일 수 있는 재질을 찾고자 실험한 본 연구의 결론은 첫째, 흉부검사에서는 현재 권고하고 있는 Al의 재질을 Cu, Ni 재질이 충분히 대체 가능하다고 판단된다. 다만, 원자번호와 밀도가 다르기 때문에 두께의 보정이 필요하다고 생각되며, 그 두께의 정도는 Cu, Ni 모두 Al의 약 1/10정도 인 것으로 판단된다. 둘째, 사 방향에서 Heel effect 효과로 인하여 양극 방향에서 산란선이 낮게 나오는 것을 알 수 있었다. 따라서 부득이하게 보호자 또는 작업종사자가 검사 중 검사실 내에 위치해 있어야 할 경우 양극방향으로 위치해 있는 것이 피폭선량을 줄일 수 있는 방법으로 판단된다. 끝으로 본 연구는 X선 검사 중 검사실 내의 공간선량분포에 대하여 평가하였다. 하지만 환자를 제외하고는 검사 중 검사실 내에 위치해 있을 경우는 드물다. 추후 검사실 내부가 아닌 검사실 외부(콘솔룸, 복도 등)의 선량에 대한 실험을 추가한다면 방사선 관계종사자 및 X선 검사실의 방사선방어 측면에 있어서 좋은 자료를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 최대연, 고성진, 강세식, 김창수, 김정훈, 김동현, 최석운, "Portable X-ray 검사 시 주변 환자 피폭선량 감소 방안 연구," 한국방사선학회논문지, Vol.7, No.2, pp.113-120, 2013.
- [2] 국민건강보험공단, 2013 건강검진통계연보, 2015.
- [3] International Commission on Radiological Protection(ICRP), 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Publication 60, 1991.
- [4] 방사선보건관리학 교재편찬위원회, 방사선보건관리학 5th edition, 청구문화사, 2014.
- [5] 김성효, 진단목적의 DR 흉부촬영 시 관전압과 부가필터를 이용한 환자피폭선량 경감을 위한 연구, 고려대학교 의용과학대학원 의학물리전공, 석사학위논문, 2011.
- [6] 이민용, X선 여과기(Filter) 재질이 표면선량과 Tube Loading에 미치는 영향 분석, 고려대학교 의용과학대학원 의학물리전공, 석사학위논문, 2005.
- [7] 의료영상정보연구회, 의료영상정보학, 청구문화사, 2010.
- [8] 최성관, "X선 촬영에서 조사야 크기에 따른 산란선량의 변화", 한국콘텐츠학회, Vol.13, No.3 pp.198-203, 2013.
- [9] 은성중, 김성길, 민병운, "X선 촬영시 테이블 주변 촬영도움자의 피폭선량 측정", 한국방사선학회, Vol.5, No.6, pp.415-420, 2011.
- [10] 강세식, 최신 방사선기기학, 청구문화사, 2011.
- [11] AAPM report NO. 31, Standardized Methods for Measuring diagnostic X-ray Exposure, 1990.
- [12] 김기홍, 김성청, 김정민, 김창규 외 12인, 진단용 X선 장치의 QC, 신평출판사, 2005.
- [13] 식품의약품안전청, 영상의학 검사(일반촬영)에서의 표준 촬영기법, 방사선안전관리 시리즈 No.38, 2014.
- [14] 식품의약품안전청, 흉부엑스선검사에서의 환자선량 권고량 가이드라인, 2008.
- [15] 신귀순, 방사선 물리학, 신평출판사, 2008.
- [16] 최성관, "X선 촬영실 내 공간선량의 분포와 거리역자승 법칙와의 관련성," 한국콘텐츠학회논문지 Vol.13, No.8, pp.301-307, 2013.
- [17] 장근조, 김남훈, 이준행, 이상복, "양극의 경사각 표과에 따른 조사야 X-선 강도 분포," 한국방사선학회논문지, Vol.5, No.5, pp.223-229, 2011.
- [18] Herman Cember, Thomas E. Johnson, Introduction to Health Physics 4th edition, Mc Graw Hill Medical, 2006.

저 자 소 개

이 동 연(Dong-Yeon Lee)

정회원



- 2014년 2월 : 부산가톨릭대학교 방사선학과(이학석사)
 - 2014년 3월 ~ 현재 : 부산가톨릭대학교 방사선학과 박사과정
 - 2011년 3월 ~ 현재 : 동남권원자력의학원 방사선중양학과 재직
- <관심분야> : 방사선치료물리학, 선량평가, 방사화학

이 진 수(Jin-Soo Lee)

정회원



- 2011년 2월 : 부산가톨릭대학교 방사선학과(이학석사)
- 2014년 2월 : 부산가톨릭대학교 방사선학과(이학박사)
- 1998년 9월 ~ 현재 : 인제대학교 해운대백병원 영상의학과 재직

<관심분야> : 초음파영상학, 영상평가, CAD