

Evaluation of the Usefulness of 3D Printed Shielding Materials Using Monte Carlo Simulation during Mammography

Yong In Cho*

Department of Radiology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center

Received: May 15, 2020. Revised: June 29, 2020. Accepted: June 30, 2020

ABSTRACT

Radiation exposure exposed during mammography, which is performed for early examination of breast cancer, has also been suggested as a cause of carcinogenesis in the past, and scattered rays generated during examination may cause unnecessary radiation exposure to surrounding organs. In this study, the Monte Carlo simulation was used to evaluate the human organ doses exposed during conventional mammography, and to estimate the dose reduction effect for each organ when using 3D printing materials for radiation protection by scattered rays. As a result of organ dose evaluation, the breast on the opposite side of the examination was about 22.0% of the breast on the test side and about 58.6% on the eye, which was highly influenced by the scattering-ray. When using the 3D printing shield to protect it, the breast on the opposite side of the test showed an effective dose reduction effect at a thickness of 1 mm.

Keyword: Mammography, Monte Carlo Simulation, Radiation protection, 3D Printing materials

I. INTRODUCTION

의료 방사선의 이용은 질병의 진단 및 치료를 위한 유익한 진단적 정보를 제공하지만, 방사선 피폭이라는 문제를 항상 수반하고 있다. 방사선에 의한 인체 영향은 결정적 또는 확률적 영향으로 구분할 수 있으며, 의료분야에서 사용되는 방사선의 경우 저 선량이지만, 지속적인 방사선 피폭으로 인해 암이나 유전적 변화를 유발할 수 있는 가능성이 항상 존재한다. 국제방사선방호위원회에서는 의학검사에서의 정당화를 통해 의료피폭의 주목적이 환자에게 방사선으로 인한 해보다 이익이 있을 때 시행하고, 의료피폭에 대해서는 선량한도를 적용하지 않도록 권고하고 있다.^[1]

의료분야 내 방사선학적 검사 중 유방촬영술(Mammography)의 경우, 주로 여성을 대상으로 하며, 유방암에 대한 조기검진의 목적으로 국내에서

는 40세 이상 무증상여성 경우 건강검진 시 검사를 받도록 권고하고 있다.^[2] 현재 일반적으로 시행되는 유방 X선 검사는 상하방향 촬영과 내외측사방향 촬영을 기본으로 필요에 따라 추가촬영이 시행되고 있다. 그러나, 검사 시 목적 장기인 유방 내 유선조직은 방사선 감수성이 높은 조직으로 검사로 인한 발암 위험성이 끊임없이 제기되고 있다.^[3,4] 또한 검사 시 발생하는 2차적인 산란선은 검사 목적 장기인 유방뿐만 아니라 주변부에 위치한 다른 장기에 대한 불필요한 방사선 피폭을 유발할 수 있다. 그러나 현재 유방촬영 검사 가이드라인에 따르면^[5], 검사 시 평균 유선선량을 3 mGy로 규정하고 있는 것 이외 주변 장기선량에 대한 내용은 언급되어 있지 않다. 또한 임상적으로도 유방촬영술을 시행하는 검사자 또한 검사 시 주변장기에 대한 산란선량의 영향에 대해 명확하게 인지하지 못하고 있는 상황이다.

최근 3D 프린팅 기술은 개인 맞춤형 제작이 요구

* Corresponding Author: Yong In Cho

E-mail: jy1280@gmail.com

Tel: +82-10-8725-9669

되는 의료분야에서 다양하게 활용되고 있으며^[6], 3D CAD 모델링을 통해 원하는 형태의 제작물의 출력이 가능한 장점이 있다. 이에 본 연구에서는 유방 X선 검사 시 3D 프린팅 기술을 이용한 환자 맞춤형 방사선 차폐기구의 제작 및 적용 가능성을 평가하기 위해 몬테카를로 기법을 이용한 전산모사를 수행하고자 한다. 첫 번째로, 일반적으로 시행되는 유방 상하방향 검사 시 검사 부위를 포함한 주변 장기에 대한 흡수선량을 평가하고, 두 번째로, 검사 시 발생하는 2차적인 산란선에 의한 주변 장기선량 저감화를 위해 3D 프린팅 차폐재료 사용 시 장기별 선량감소효과를 산정하고자 한다. 이를 통해 유방 X선 검사 시 3D 프린팅 차폐기구의 제작 및 활용을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHOD

1. 유방 X선 검사 시 인체 장기선량평가

유방 X선 검사 시 발생하는 1차선 및 산란선에 의해 노출되는 인체장기에 대한 선량평가를 수행하고자, 몬테카를로 방법 중 LANL(Los Alamos national laboratory)에서 개발한 MCNPX(Monte Carlo N-Particle eXtended, ver 2.5.0) 프로그램을 사용하였다.

본 연구에서는 유방검사 시 일반적으로 시행되고 있는 상하방향 검사(Cranio-Caudal, CC)을 선정하였다. 인체 장기에 대한 흡수선량 평가를 위해 과거 ORNL(Oak ridge national laboratory)에서 개발한 UF-revised MIRD형 혼성팬텀을 사용하여 환자를 모사했다. 유방검사 시 촬영조건은 식품의약품안전처에서 발간한 “유방 X선 검사에서의 환자선량 권고량 가이드라인”에 근거하여 임상에서 일반적으로 사용하는 촬영조건(28 kVp, 63 mAs)과 실제 촬영에 적용되는 target-filter 조합 중 Mo target(13°)/Mo filter (0.03 mm)을 참조하였으며, IPEM(Institute of Physics and Engineering in Medicine, York, United Kingdom)에서 제공하는 X선 스펙트럼 생성 프로그램인 SRS-78을 사용하였다.

이를 통해 유방 X선 검사 조건에 맞는 광자 스펙트럼을 Fig. 1과 같이 획득한 후 선원형(Source

specification)으로 지정했다.

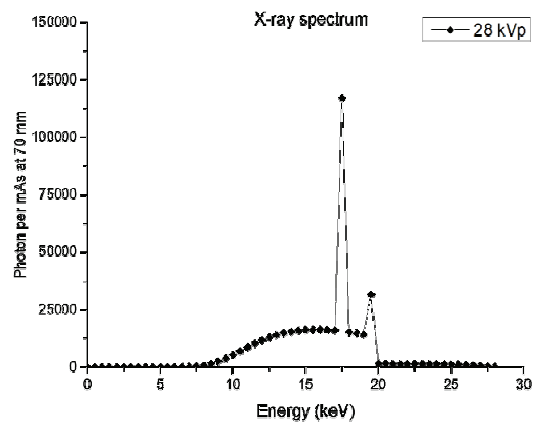
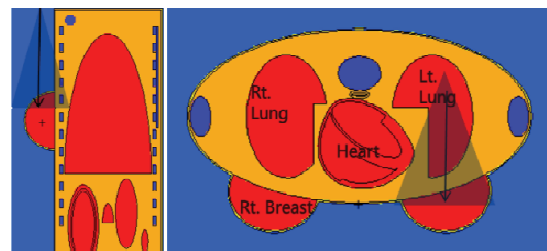
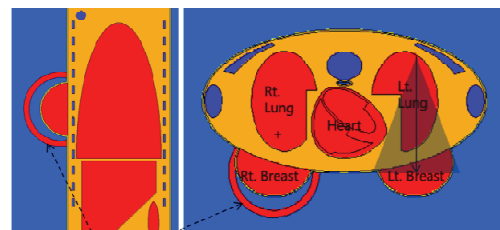


Fig. 1. Distribution of 28 kVp photon spectra generated by SRS-78 program.



(a) Lt. breast cranio-caudal projection



(b) Rt. breast shield model

Fig. 2. Simulation model for dose assessment during Lt. breast cranio-caudal(CC) examination.

다음은 실험에 대한 모델링으로 유방 상하방향 검사에 대한 기하학적 모사를 위해 현재 임상적으로 사용되는 유방 촬영장치(HOLOGIC DR Mammography)를 참조하였다. 먼저 MIRD 팬텀의 유방 아랫부분에 검출기를 포함한 지지대를 구성하였고, 윗부분에는 압박대(H 5.566%, C 79.25%, O 15.09%, density : 1.2 g/cm³)를 모사했다. 상하방향촬영을 위해 선원은 유방으로부터 높이 60.5 cm(SID : 60.5

cm)로 설정하였고, 유방 부위를 포함하는 조사야(Field size)를 고려하여 Fig. 2-(a)와 같이 방사형으로 X-ray를 조사했다.

검사 시 1차선 및 산란선에 의한 인체 장기 선량 평가를 위해 좌·우측 유방(Breast), 좌·우측 폐(Lung), 심벽(Heart wall), 갑상선(Thyroid), 식도(Esophagus), 난소(ovaries), 눈(Eyes)에 대해 관심지점(tally)를 지정하였고, Tally specification card는 f6 tally를 이용하여 선정된 장기의 단위 질량당 축적된 에너지 분포(MeV/g)를 획득했다. MCNPX 코드에서 산출된 결과값 환산을 위해 계산된 환산인자를 보정하여 장기별 흡수선량(mGy)으로 환산했다. 모의실험에 대한 신뢰성 확보를 위해 반복횟수(nps)는 10^8 번 이상 추정하였고, 통계적 불확도(uncertainty)는 3% 이내로 평가되었다.

2. 3D 프린팅 재료에 따른 선량감소효과 평가

앞서 평가한 유방 상하방향 검사 시 발생하는 1차선 및 산란선에 의한 인체 장기선량을 저감하기 위해, 범용으로 사용되는 FDM 3D 프린팅 재료에 대한 적용성을 평가하고자 하였다. 현재 FDM 방식의 3D 프린팅 재료는 필라멘트 형태로 PLA(Poly Lactic Acid), TPU(Thermoplastic Poly Urethane), ABS(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene), PVA(Polyvinyl Alcohol), Nylon(Nylon;Polyamides)와 PLA or ABS + 금속 혼합재질(PLA+Aluminum, PLA+Copper, PLA+Iron, PLA+Stainless steel, ABS+Bismuth, ABS+ Tungsten) 등이 있으며, 재료에 대한 구성성분 및 비중에 대한 정보는 Table 1과 같다.

차폐기구에 대한 모델링은 Fig. 2-(b)와 같이 검사부위(Lt. breast) 반대측 유방(Rt. Breast)을 덮는 구의 형태로 구성하였으며, 3D 프린팅 재료 및 두께에 따른 선량감소효과를 평가하고자, 프린팅 재료별로 각각의 유방 차폐기구를 구성한 후 두께를 1, 2, 3, 4, 5, 10, 10, 20, 25 mm 까지 증가시켜 주위 장기별 흡수선량 분포를 획득하였다. 차폐기구 미사용 시 평가한 장기별 흡수선량 분포를 기준으로 3D 프린팅 재료 및 두께별 선량감소효과(%)를 산정하였다.

Table 1. Information of FDM 3D printing materials

3D Printing Materials		Specific Gravity (g/cm ³)
Plastic type	PLA	1.24
	TPU	1.1
	ABS	1.04
	PVA	1.24
	Nylon	1.2
Mixture type	PLA + Copper(Cu)	2.46
	PLA + Aluminum(Al)	1.48
	PLA + Stainless steel	2.4
	PLA + Iron(Fe)	2.4
	ABS + Bismuth(Bi)	2.7
	ABS + Tungsten(W)	4.0

III. RESULT

1. 유방 X선 검사 시 환자의 인체 장기별 흡수선량 분포

현재 일반적으로 시행되는 유방 상하방향 검사 시 발생하는 1차선 및 산란선에 의해 노출되는 검사 목적 장기를 포함한 주변 장기에 대한 선량분포를 평가하고자 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 전산모사를 수행하였다. 그 결과, 좌측 유방 검사 시 장기별 흡수선량 평가 결과, Fig. 3와 같이 검사 목적부위인 좌측 유방의 경우, 1.3026 mGy으로 가장 높은 선량을 나타내었고, 우측 유방은 0.2872 mGy으로 검사측 유방 선량의 약 22.0% 정도의 흡수선량을 나타내었으며, 검사부위에 인접한 좌측 폐의 경우, 0.0292 mGy, 우측 폐는 0.0003 mGy으로 측정되었고, 그 외 장기의 경우 좌우 눈의 경우 0.7639 mGy으로 X선 발생지점과의 거리가 인접한 이유로 검사측 유방의 흡수선량의 약 58.6%의 흡수선량을 보였다.

그 외 기관별 선량은 타액선 0.0038 mGy, 갑상선 0.0033 mGy, 심벽은 0.0006 mGy, 식도 0.0002 mGy, 난소는 검사 시 산란선의 영향이 거의 나타나지 않는 것으로 평가되었다. 위 결과에 따라 유방 상하방향 검사 시 1차선 및 산란선의 영향은 선원발생 지점에 근접한 눈의 경우 가장 높은 영향을 나타내었고, 그 다음은 검사 반대측 유방, 검사 측 폐의

순서로 높은 영향을 보이는 것으로 평가되었다.

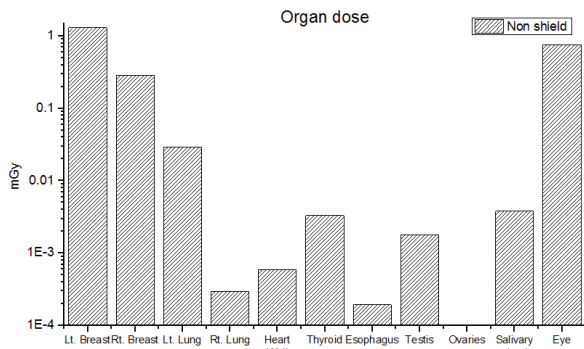


Fig 3. Absorbed dose distribution according to human organs during cranio-caudal(CC) projection examination.

2. 3D 프린팅 재료를 방사선 차폐기구 사용 시 주변 장기의 선량감소효과

현재 FDM 방식의 3D 프린터에서 제작 가능한 여러 가지 재료를 대상으로 유방 X선 검사 시 반대측 유방 및 주변 장기에 대한 방사선 차폐효과에 대해 평가하고자 모의실험을 수행하였다. 모사한 유방 차폐기구의 프린팅 재료 및 두께(1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25 mm)에 따른 각 장기별 흡수선량을 산정한 후 차폐기구 미사용 시 흡수선량을 기준으로 각 장기별 선량감소효과(%)를 산정하였다.

유방 상하방향 검사 시 목적 장기인 좌측 유방의 경우, 1 mm 두께에서 각 재질별로 약 15% 전후의 선량감소효과를 보였으며, 이후 두께에서는 거의 일정한 선량분포를 나타내었다. 이는 발생한 1차선과 유방에서 발생한 산란광자가 차폐체에 의해 줄어든 결과일 것으로 분석된다.

이에 비해 검사 반대측인 우측 유방의 경우에는, 플라스틱 계열(PLA, ABS, Nylon, PVA, TPU)의 프린팅 재료를 이용한 차폐기구 사용 시 Fig. 4와 같이 두께 증가에 따라 최소 -11.11 ~ 최대 77.34 %의 효과를 나타내었으며, 5 mm 이하의 낮은 차폐두께에서 오히려 3D 프린팅 재료와의 상호작용으로 발생한 산란선으로 인해 오히려 선량이 증가하는 결과를 보였으나, 이후 증가된 두께에서는 점차 선량이 감소되는 양상을 나타내었다. 이에 비해 혼합원료(PLA + Al, Cu, Fe, Stainless steel)의 경우 최소

33.86 ~ 최대 100.0 %에 근접한 선량감소효과를 나타내었으며, PLA+ Al 재질을 제외하고 1 mm 차폐 두께에서도 약 90% 이상의 선량감소효과를 나타내어, 산란선에 의한 검사 반대측 유방선량 저감에 유효한 것으로 평가되었다.

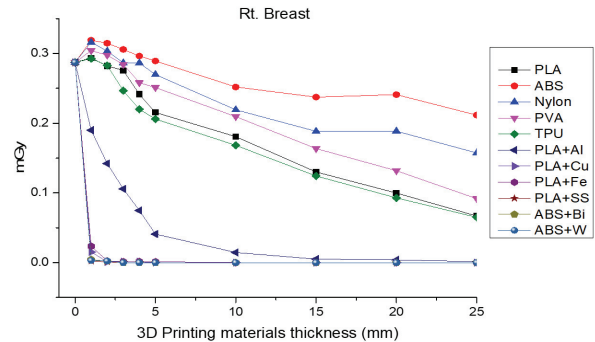


Fig 4. Dose reduction effect of right breast dose by using 3D printing shield.

다음은 유방 X선 검사 시 좌, 우측 폐의 흡수선량 평가 결과, 좌측 폐의 경우, 검사 부위와 인접하여 낮은 두께에서는 오히려 선량이 반대로 증가하는 경향을 보였으며, 프린팅 재료에 따라 다소 불규칙한 결과를 나타내었다. 반대로 우측 폐의 경우, 차폐기구를 사용하지 않는 경우에도 0에 근접한 흡수선량을 나타내어 차폐기구 사용 시에도 큰 선량 변화를 나타내지 않았다.

그 외 장기인 눈의 경우, 플라스틱 계열의 3D 프린팅 재료 사용 시, 최소 11.38 ~ 최대 40.43%의 선량감소효과가 나타났고, 혼합원료 사용 시 13.52 ~ 39.54%의 선량감소효과를 보여 재질별로 큰 차이를 보이지 않았다. 눈의 경우 X선 빔의 발생지점과 근접해 있으나, 1차선의 직접적인 영향을 받지 않아 다소 불규칙한 선량분포를 나타낸 것으로 분석된다.

IV. DISCUSSION

국제방사선방호위원회(ICRP)에 따르면, 각 나라별로 환자의 의료 방사선량 최적화를 위해 진단참조준위(DRL)를 설정하여 사용할 것을 권고하고 있다.^[7] 이에 따라 최근 질병관리본부에서는 의료분야 내 방사선학적 검사 시 진단참조준위(DRL) 가이드라인 개발을 통해 선량 최적화를 위해 실무에

서 활용할 것을 언급하고 있다.^[8] 그러나, 현재 영상검사에 관한 참고준위 이외 2차 산란선에 대한 주변 장기선량의 방호 연구에 대해서는 다소 부족한 상황이다. 또한 의료 방사선 피폭은 진료를 받는 피검자가 얻는 직접적인 이익이 있으므로, 추가적인 방사선 방호에 대한 필요성을 인지하지 못하는 실정이다. 현재 임상적으로 환자를 위한 방사선 방호기구의 사용은 기존 업무 절차에 비해 방사선 차폐기구 착용에 대한 추가적인 업무가 필요하므로 거의 이뤄지지 않고 있다.

국내에서 유방촬영술은 40대 이상 여성들의 건강검진을 통해 매년 시행되고 있으며, 가임기의 여성들도 포함된다. 또한 여성의 장기 중 유방 내 유선조직은 방사선에 민감한 인체조직으로, ICRP에서는 평균 유선선량(AGD, average glandular dose)를 지방조직 50%와 유선조직 50%의 유방 실질양상을 갖는 유방두께 4.2 cm에서 3 mGy 이하로 규정하고 있다.^[9] 본 연구에서 모의실험을 통해 유방 상하방향 검사 시 검사측 유방의 경우, 0.206 mGy으로 규정 선량에 비해 낮은 결과를 나타내었으며, 과거 이 등^[10]의 연구에서는 Geant4 시뮬레이션을 이용하여 유방촬영 시 평가된 선량은 5.95E-05 mGy 정도로 본 연구와 다소 상이한 결과를 나타내었다. 이는 시뮬레이션에 있어서 X선 발생에 기여하는 물리적 요인들의 차이에 의한 것으로 생각된다. 본 연구의 결과를 통해 일반적으로 시행되는 유방촬영 횟수를 고려하여 한쪽 유방에 2번 이상 검사를 한다고 가정하더라도 규정 선량수준을 초과하지 않는 것을 확인하였다. 또한 박 등^[11]의 연구에서는 유방의 유선조직의 증가에 따라 저 에너지의 광자의 흡수가 증가하여 평균 유선선량도 증가한다고 보고하였다. 이처럼 실제 검사 시 추가촬영과 환자의 유방 두께 및 실질양상에 따른 검사 조건변화에 의해 평균 유선선량이 달라질 수 있으므로 가능한 선량을 최소화할 수 있도록 지속적으로 모니터링 할 필요가 있다.

본 연구에서는 유방촬영 시 2차적으로 발생된 산란선에 의한 주변 장기의 흡수선량 분석을 통해 X선 발생지점에 근접한 눈과 검사 부위에 근접한 반대측 유방의 경우, 산란선에 영향이 가장 높은 것

으로 분석되었다. 이러한 산란선 방호를 위해 3D 프린팅 차폐기구 사용에 따른 선량감소효과는 검사부위에 인접한 우측 유방의 경우, 검사측의 유방에 의해 발생된 산란선의 영향이 3D 프린팅 재료와의 상호작용을 통해 대부분 차폐가 이루어져 유효한 선량감소효과를 나타낸 것으로 생각되며, 우측 폐의 경우 산란선의 영향이 피부 근처에서 폐 지점까지 도달하지 못해 거의 0에 근접한 선량을 나타낸 것으로 분석된다.

과거 홍 등의 연구^[12]에 의하면 유방촬영 시 AI face block 사용 시 60~65%의 갑상선의 피폭선량이 감소한다고 보고하고 있으며, 추후 모의실험을 통해 눈과 갑상선에 대한 방호를 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 구 등의 연구^[13]에서는 측정을 통해 유방촬영 시 방사선 방호 앞치마(Apron)를 변형한 검사 부위 외 산란선 차폐 효과에 대해 제시하고 있으며, 이처럼 산란선 방호를 위한 차폐기구의 사용은 불필요한 피폭선량 저감화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구의 한 가지 제한점으로는 몬테카를로 모사환경 내 유방촬영 시 팬텀의 유방 압박에 대한 부분을 고려하지 못한 점으로 실제 압박된 유방에 비해서 산란선의 영향이 보수적으로 평가된 것으로 생각된다. 추후 유방 두께에 따른 산란선 영향에 대한 추가적인 분석 또한 필요할 것으로 사료된다.

향후 본 연구를 기초자료로 하여 3D 프린팅 기술을 통해 환자의 유방에 적합한 개인 맞춤형 차폐기구를 제작한다면 검사 시 환자들의 방사선 피폭에 대한 인식 개선 및 불안감 해소에 도움 될 것으로 판단된다.

V. CONCLUSION

본 연구는 모의실험을 통해 의료분야 내 일반적으로 시행되는 유방 X선 검사 시 환자의 인체 장기별 흡수선량을 평가하고, 3D 프린팅 재료를 이용한 유방 차폐기구 사용에 따른 선량감소효과에 대해 분석하였다. 검사 반대측 유방의 경우, 플라스틱 계열의 프린팅 재료의 경우 약 5 mm 이상, 혼합재료의 경우 1 mm 이상의 두께 사용 시 유효한 차폐효과를 나타낸다는 것을 확인하였다. 또한 눈의 경우,

X선 발생지점과 근접해 있는 특성상 수정체에 대한 방사선 방호를 위해 추가적인 방사선 차폐방안이 필요할 것으로 사료된다. 이에 따라 각 의료기관별로 진단참고준위에 근거한 적절한 프로토콜의 사용뿐만 아니라 차폐기구 사용을 통한 적극적인 방사선 방호를 통해 피검자의 의료피해를 최소화하기 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

Reference

- [1] S. K. Na, S. H. Han, "A Study on the Factors of Spatial Scattered Ray Occurrence in the X-ray Radiography Room", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 32, No. 4, pp.393-399, 2009. <https://doi.org/10.15267/KESES.2013.32.4.393>
- [2] Ministry of Health and Welfare, National Cancer Center, "Quality guidelines of breast cancer screening (Secondary revision)", ISSN-2005-8497, 2008.
- [3] F. Bouzsrjomehri, A. Mostaar, A. Ghasemi, M. H. Eharmposh, H. Khosravi, "The Study of Mean Glandular Dose in Mammography in Yazd and the Factors Affecting It", *Iranian Journal of Radiology*, Vol. 4, No. 1, pp. 29-35, 2006.
- [4] M. Y. Kim, H. S. Kim, "The Evaluation of Radiation Dose by Exposure Method in Digital Magnification Mammography", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 35, No. 4, pp. 292-298, 2012.
- [5] Ministry of Food and Drug Safety, Guidelines for patient dose recommendations in mammography, Radiation Safety Management Series, No. 16, 2008.
- [6] Ministry of Food and Drug Safety, Understanding of medical device 3D printing technology Part. 1 3D printing technology for medical devices, 2018.
- [7] International Commission on Radiological Protection, The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37, 2007.
- [8] http://www.cdc.go.kr/board.es?mid=a20305050000&bid=0003&act=view&list_no=364868
- [9] Osborn, S. B., "Radiological protection for medical exposure to ionizing radiation: safety guide. Safety Standards Series No RS-G-1.5," IAEA, pp. 76, 2002 (International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria), € 14.50 ISBN 92-0-111-302-1. 2003.
- [10] S. H. Lee, J. S. Lee, S. H. Han, "Study on Absorbed Dose in the Breast Tissue using Geant4 simulation for Mammography", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 35, No. 4, pp. 345-352, 2012.
- [11] H. S. Park, H. J. Kim, C. L. Lee, H. M. Cho, A. R. Yu, "Standardization of the Method of Measuring Average Glandular Dose (AGD) and Evaluation of the Breast Composition and Thickness for AGD", *Medical Physics*, Vol. 20, No. 1, pp. 21-29, 2009.
- [12] E. A. Hong, I. J. Lee, "The Study of Aluminum Face Block Fabrication for Reducing Exposure Dose of Thyroid Glands and Crystalline Lens in Mammography and Its Usefulness", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 36, No. 1, pp. 11-17, 2013.
- [13] B. Y. Koo, J. W. Kim, "A Study on the Usefulness of Breast Shielding Apron for Reducing Exposure Dose in Mammography", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 42, No. 2, pp. 99-104, 2019. <http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2019.42.2.99>

유방 X선 검사 시 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 3D 프린팅 차폐재료의 효용성 평가

조용인

동남권 원자력의학원 영상의학과

요 약

유방암의 조기 검진을 위해 시행되는 유방 X선 검사 시 노출되는 방사선 피폭은 과거 발암의 원인으로도 제기되었으며, 검사 시 발생하는 산란선은 주변 장기에 불필요한 방사선 피폭을 유발할 수 있다. 이에 본 연구에서는 몬테카를로 방법을 통해 일반적인 유방 X선 검사 시 노출되는 인체 장기 선량을 평가하고, 산란선에 의한 방사선 방호를 위한 3D 프린팅 재료 사용 시 장기별 선량감소효과에 대해 산정하였다. 장기별 선량평가 결과, 유방 상하방향 검사 시 검사 반대측 유방은 검사측 유방의 약 22.0%, 눈의 경우 약 58.6%으로 산란선에 의해 높은 영향을 보였다. 이를 방호하기 위한 3D 프린팅 차폐기구 사용 시 검사 반대측 유방의 경우, 1 mm 이상의 두께에서 유효한 선량감소효과를 나타내었다.

중심단어: 유방 X선 검사, 몬테카를로 방법, 방사선 방호, 3D 프린팅 재료

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	조용인	동남권 원자력의학원 영상의학과	방사선사