

<원저>

3D 프린팅 팬텀의 섬광카메라 적용 평가

박훈희¹⁾·이주영²⁾·김지현³⁾¹⁾신구대학교 방사선과·²⁾송호대학교 방사선과·³⁾서울의료원 핵의학과

Evaluation of Scintillation Camera Applications of 3D Printing Phantom

Hoon-Hee Park¹⁾·Ju-young Lee²⁾·Ji-Hyeon Kim³⁾¹⁾Department of Radiological Technology, Shingu College²⁾Department of Radiological Technology, Songho College³⁾Department of Nuclear Medicine, Seoul Medical Center

Abstract 3D printing technology is an additive manufacturing technology produced through 3D scanning or modeling method. This technology can be produced in a short time without mold, which has recently been applied in earnest in various fields. In the medical field, 3D printing technology is used in various fields of radiology and radiation therapy, but related research is insufficient in the field of nuclear medicine. In this study, we compare the characteristics of traditional nuclear medicine phantom with 3D printing technology and evaluate its applicability in clinical trials. We manufactured the same size phantom of poly methyl meta acrylate(PMMA) and acrylonitrile butadiene styrene(ABS) based on the aluminum step wedge. We used BrightView XCT(Philips Health Care, Cleveland, USA) SPECT/CT. We acquired 60 min list mode for Aluminum, PMMA and ABS phantoms using Rectangular Flood Phantom (Biodex, New York, USA) ^{99m}TcO₄ 3 mCi(111 MBq), 6 mCi (222MBq) and ⁵⁷Co Flood phantom(adq, New Hampshire, USA). For the analysis of acquired images, the region of interest(ROI) were drawn and evaluated step by step for each phantom. Depending on the type of radioisotope and radiation dose, the counts of the ABS phantom was similar to that of the PMMA phantom. And as the step thickness increased, the counts decreased linearly. When comparing the linear attenuation coefficient of Aluminum, PMMA and ABS phantom, the linear attenuation coefficient of the aluminium phantom was higher than that of the others, and the PMMA and ABS phantom had similar the linear attenuation coefficient. Based on ABS phantom manufactured by 3D printing technology, as the thickness of the PMMA phantom increased, the counts and linear attenuation coefficient decreased linearly. It has been confirmed that ABS phantom is applicable in the clinical field of nuclear medicine. If the calibration factor is applied through further research, it is believed that practical application will be possible.

Key Words: 3D Printing, PMMA(Poly Methyl Meta Acrylate), ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene), Scintillation Camera

중심 단어: 3D 프린팅, PMMA(Poly Methyl Meta Acrylate), ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene), 섬광카메라

1. 서론

3D 프린팅 기술은 3차원 스캔이나 3차원 모델링을 통하여 획득된 디지털 데이터를 적층가공 방식으로 제작하는 가공기술이며, 현재까지 많은 파생기술이 개발되어 시제품 제작 수준에서의 활용을 넘어 각종 산업현장 및 의료분야

에서 다양하게 활용되었다[1]. 이는 디지털 데이터로부터 금형(mold)없이 직접적인 생산이 가능하고 실물 형상의 제품을 빠른 시간 내에 제작할 수 있다는 점에서 맞춤형 소량 생산 제품 활용에 매우 효과적이며, 의료 소재 및 팬텀 등으로 제작되어 의료분야에서 또한 다양한 용도로 활용되고 있다[2].

Corresponding author: Hoon-Hee Park, Department of Radiological Technology, Shingu College, 377 Gwangmyeong-ro, Seongnam, Gyeonggi-do, 13174, Republic of Korea / Tel: +82-31-740-1638 / E-mail: hzpark@shingu.ac.kr

Received 22 July 2021; Revised 4 August 2021; Accepted 13 August 2021

Copyright ©2021 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

국내에서 대표적인 의료 분야 활용 사례로 크가 없는 어린이의 인공 콧구멍과 기도를 만드는 수술에 이용하여 실리콘으로 제작된 인공 기관의 이식을 성공한 사례가 있다[3]. 또한, 전산화단층촬영(computed tomography; CT)나 자기공명영상(magnetic resonance imaging; MRI)같은 영상의학 기술을 기반으로 3D 프린팅 기술로 제작된 골절 모델을 이용하여 수술 전 시뮬레이션을 하고, 이를 통해 수술 계획을 세워 시간의 단축과 수술의 정확성을 높이는 등 폭넓게 활용되고 있다[4]. 이에 따라 3D 프린팅 기술과 영상의학 기술의 융합에 관련된 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다[5]. 방사선 치료 분야에서도 활발히 활용되고 있다. 최근 제작된 전립샘팬텀으로 생체 내 선량측정을 진행하였으며, 다양한 연구를 통해 확인되고 있다[6].

하지만 핵의학 분야에서의 활용은 현재까지 미비하여 관련 연구가 부족할 뿐만 아니라 최근 감마카메라나 SPECT/CT와 같은 의료영상장치의 정도관리 시행여부 및 적정한 관리가 의료기관 평가 및 여러 의료관련 인증에서 평가항목 요소가 되어 중요성이 높아지고 있다. 주변 선진국에서도 핵의학 영상기기의 정도관리를 위한 자체적 표준 구축을 위한 연구가 활발히 진행 중이며 일본, 유럽 등에서도 지침서를 서둘러 준비하고 있다[7].

그러나 현재의 국내 사정은 이를 뒷받침하기 위한 전문가가 절대적으로 부족할 뿐만 아니라 시간상의 제약과 정도관리에 대한 인식 부족 등으로 정도관리가 활발히 시행되고 있지 못한 것이 현실이다[8].

이에 따라 핵의학 장비의 정도관리 측면에서 기존 핵의학 팬텀과 비교하여 3D 프린팅 기술로 제작된 팬텀(Phantom)의 물질특성을 비교 연구한다면, 핵의학 분야에서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 기존 핵의학 팬텀과 3D 프린팅 기술로 제작된 팬텀의 물질 특성을 비교하고 유용성을 평가하는데 목적을 두었다. 더 나아가 향후 핵의학 분야에서의 활용에 기초 연구 자료로 활용하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 팬텀제작

재질에 따른 방사선의 투과도 변화를 측정하기 위해 알루미늄 계단썰기(Step Wedge)를 기준으로 실측(140 mm × 62 mm × 35 mm)하여 다음 도면을 제작하였다(Fig. 1).

설계 도면을 바탕으로 PMMA(Poly Methyl Meta Acrylate)

와 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)재질로 각각 동일한 크기의 팬텀을 제작하였다. PMMA 팬텀은 핵의학 분야에서 정도관리를 위해 사용되는 아크릴 성분의 주성으로 팬텀 성분과 동일한 소재인 PMMA를 적용하였으며, ABS 팬텀 제작은 3D 프린팅 기술의 대표적인 FDM(Fused Deposition Modeling), SLA(Stereo Lithography Apparatus), DLP(Digital Light Processing)기법 중 액체기반형의 SLA 기법을 사용하여 제작하였다(Fig. 2).

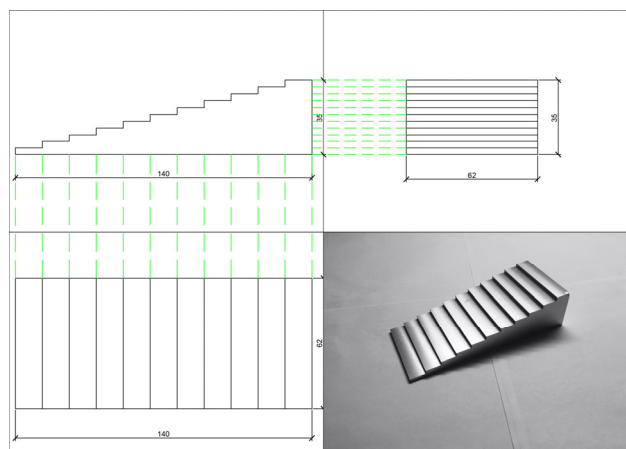


Fig. 1. Aluminum Step Wedge model(140 mm × 62 mm × 35 mm)

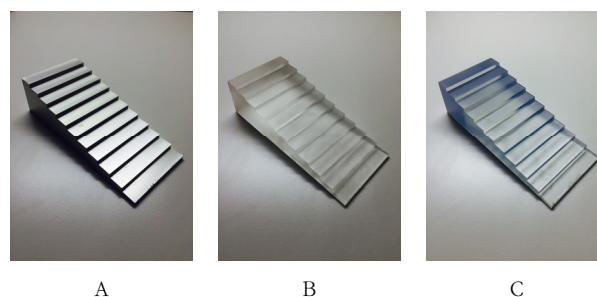


Fig. 2. PMMA phantom(B) and ABS phantom(C) are made in the same size and shape according to the Aluminum phantom(A).

2. 영상획득

본 연구는 SPECT/CT BrightView XCT(Philips Health Care, Cleveland, USA)를 이용하였다. 영상의 획득은 장선원 Rectangular Flood Phantom(Biodex, New York, USA) $^{99m}\text{TcO}_4$ 3 mCi(111 MBq), 6 mCi (222MBq)와 ^{57}Co Flood Phantom(Radqual, New Hampshire, USA) 20 mCi(740 MBq)로 제작 된 것으로 실험 기준 8.5 mCi(314.5 MBq)을 적용하였다. 장선원 위에 Aluminum, PMMA, ABS 팬텀을 각각 위치시킨 후 60분간 영상을 획득하였다(Fig. 3).

2) Rectangular Flood Phantom $^{99m}\text{TcO}_4$ 6 mCi(222 MBq)에 대한 물질별 계수치 비교

계단째기 1단계에서의 계수치는 Aluminum, PMMA, ABS 팬텀 순으로 52876, 57668, 56759의 값이 계수되었다. 단계가 증가함에 따라 계수치는 선형적으로 감소하였으며 11단계에서의 계수치는 1단계에서의 계수치에 비해 Aluminum, PMMA, ABS 팬텀 순으로 50.1%, 27.3%, 28.6%가 감소하였다(Fig. 6).

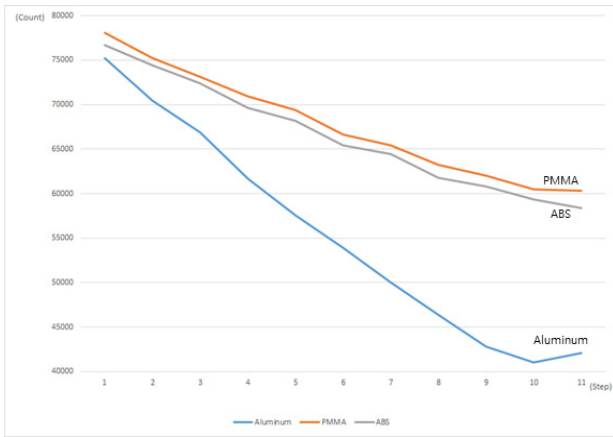


Fig. 6. Comparison graph of counts in each thickness for Rectangular Flood Phantom $^{99m}\text{TcO}_4$ 6 mCi(222 MBq).

3) ^{57}Co Flood Phantom에 대한 물질별 계수치 비교

계단째기 1단계에서의 계수치는 Aluminum, PMMA, ABS 팬텀 순으로 75266, 78305, 76683의 값이 계수되었다. 단계가 증가함에 따라 계수치는 선형적으로 감소하였으며 11단계에서의 계수치는 1단계에서의 계수치에 비해 Aluminum, PMMA, ABS 팬텀 순으로 44.2%, 22.8%, 24.0%가 감소하였다(Fig. 7).

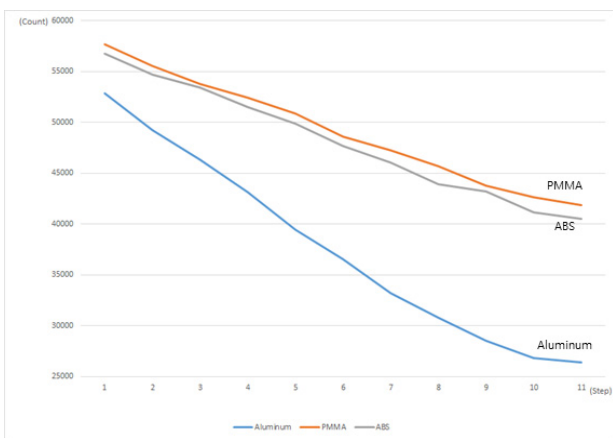


Fig. 7. Comparison graph of counts in each thickness for ^{57}Co Flood Phantom.

2. Aluminum 팬텀을 기준으로 한 물질별 계수치 차이 비교

1) Aluminum 팬텀과 PMMA 팬텀의 계수치 차이 비교

Aluminum 팬텀의 계단째기 1단계 계수치는 $^{99m}\text{TcO}_4$ 3 mCi(111 MBq), $^{99m}\text{TcO}_4$ 6 mCi(222 MBq), ^{57}Co phantom 순으로 26,347, 52,876, 75,266의 값이 계수되었으며, PMMA 팬텀의 1단계 계수치는 $^{99m}\text{TcO}_4$ 3 mCi(111 MBq), $^{99m}\text{TcO}_4$ 6 mCi(222 MBq), ^{57}Co phantom 순으로 28,469, 57,668, 78,035의 값이 계수되었다.

Aluminum 팬텀의 계단째기 11단계 계수치는 $^{99m}\text{TcO}_4$ 3 mCi, $^{99m}\text{TcO}_4$ 6 mCi, ^{57}Co phantom 순으로 13,084, 26,426, 42,064의 값이 계수되었으며, PMMA 팬텀의 11단계 계수치는 $^{99m}\text{TcO}_4$ 3 mCi(111 MBq), $^{99m}\text{TcO}_4$ 6 mCi(222 MBq), ^{57}Co phantom 순으로 20,382, 41,879, 60,321의 값이 계수되었다(Fig. 8).

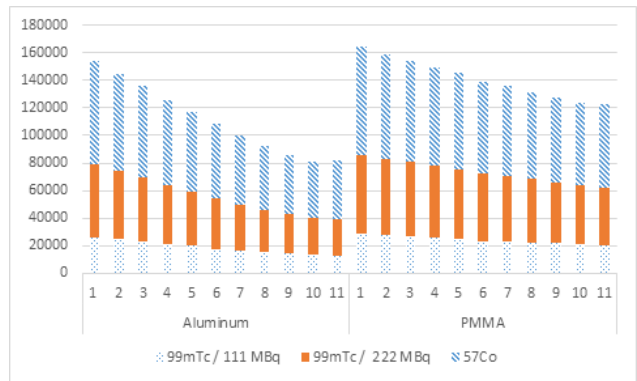


Fig. 8. Comparison diagram of counts in PMMA phantom and Aluminum phantom

Aluminum 팬텀과 PMMA 팬텀의 계단째기 1단계 계수치 차이는 $^{99m}\text{TcO}_4$ 3 mCi(111 MBq), $^{99m}\text{TcO}_4$ 6 mCi(222 MBq), ^{57}Co phantom 순으로 2,122, 4,792, 2,769이었으며, 계단째기 11단계 계수치의 차이는 $^{99m}\text{TcO}_4$ 3 mCi(111 MBq), $^{99m}\text{TcO}_4$ 6mCi(222 MBq), ^{57}Co phantom 순으로 7,298, 15,453, 18,257이었다(Table 1).

2) Aluminum 팬텀과 ABS 팬텀의 계수치 차이 비교

Aluminum 팬텀의 계단째기 1단계 계수치는 $^{99m}\text{TcO}_4$ 3 mCi(111 MBq), $^{99m}\text{TcO}_4$ 6 mCi(222 MBq), ^{57}Co phantom 순으로 26,347, 52,876, 75,266의 값이 계수되었으며, ABS 팬텀의 계단째기 1단계 계수치는 $^{99m}\text{TcO}_4$ 3 mCi(111 MBq), $^{99m}\text{TcO}_4$ 6 mCi(222 MBq), ^{57}Co phantom 순으로 27,747, 56,759, 76,683의 값이 계수되었다.

Table 1. The subtraction counts of PMMA phantom counts with Aluminum phantom counts

	PMMA counts - Aluminum counts		
	^{99m} TcO ₄ 3 mCi(111 MBq)	^{99m} TcO ₄ 6 mCi(222 MBq)	⁵⁷ Co phantom
Step 1	2,122	4,792	2,769
Step 2	3,022	6,341	4,787
Step 3	4,005	7,426	6,273
Step 4	4,412	9,325	9,188
Step 5	5,035	11,422	11,823
Step 6	5,581	12,062	12,734
Step 7	6,583	14,007	15,378
Step 8	7,219	14,884	16,848
Step 9	7,714	15,299	19,145
Step 10	7,668	15,819	19,519
Step 11	7,298	15,453	18,257

또한 Aluminum 팬텀의 계단째기 11단계 계수치는 ^{99m}TcO₄ 3 mCi(111 MBq), ^{99m}TcO₄ 6 mCi(222 MBq), ⁵⁷Co phantom 순으로 13,084, 26,426, 42,064의 값이 계수되었으며, ABS 팬텀의 계단째기 11단계 계수치는 ^{99m}TcO₄ 3 mCi(111 MBq), ^{99m}TcO₄ 6 mCi(222 MBq), ⁵⁷Co phantom 순으로 20,211, 40,482, 58,345의 값이 계수되었다(Fig. 9).

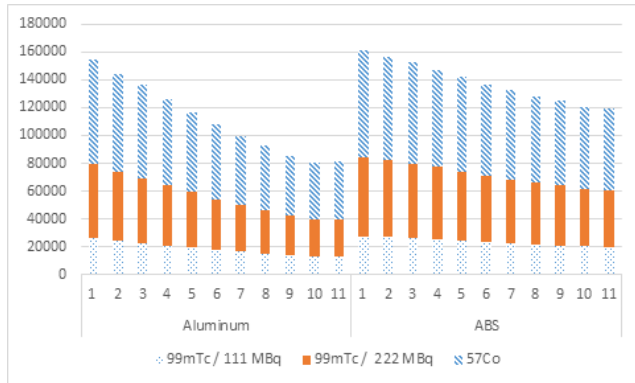


Fig. 9. Comparison diagram of counts in ABS phantom and Aluminum phantom

Aluminum 팬텀과 ABS 팬텀의 계단째기 1단계 계수치 차이는 ^{99m}TcO₄ 3 mCi(111 MBq), ^{99m}TcO₄ 6 mCi(222 MBq), ⁵⁷Co phantom 순으로 1,400, 3,883, 1,417이었으며, 계단째기 11단계 계수치 차이는 ^{99m}TcO₄ 3 mCi(111 MBq), ^{99m}TcO₄ 6 mCi(222 MBq), ⁵⁷Co phantom 순으로 7,127, 14,056, 16,281이었다(Table 2).

3. 물질별 선감약계수(μ) 비교

^{99m}TcO₄ 3 mCi(111 MBq)에서의 선감약계수 평균값은 Aluminum 0.26, PMMA 0.09, ABS 0.10으로 측정되었다. ^{99m}TcO₄ 6 mCi(222 MBq)에서의 선감약계수 평균값은 Aluminum 0.33, PMMA 0.16, ABS 0.17로 측정되었다. ⁵⁷Co phantom에서의 선감약계수 평균값은 Aluminum 0.21, PMMA 0.09, ABS 0.11로 측정되었다(Fig. 10).

각 선원에서 Aluminum의 선감약계수 평균값은 다른 두 물질에 비해 확연히 큰 값을 나타내었고, PMMA와 ABS팬텀의 경우 0.01~0.02의 오차를 확인하였다(Table 3).

Table 2. The subtraction counts of ABS phantom counts with Aluminum phantom counts

	ABS counts - Aluminum counts		
	^{99m} TcO ₄ 3 mCi(111 MBq)	^{99m} TcO ₄ 6 mCi(222 MBq)	⁵⁷ Co phantom
Step 1	1,400	3,882	1,416
Step 2	2,657	5,492	3,963
Step 3	3,708	7,103	5,503
Step 4	4,648	8,358	7,941
Step 5	4,669	10,394	10,587
Step 6	5,420	11,111	11,531
Step 7	5,810	12,791	14,381
Step 8	6,634	13,137	15,407
Step 9	6,845	14,728	17,989
Step 10	7,175	14,338	18,328
Step 11	7,127	14,056	16,281

IV. 고찰

1987년부터 2012년까지 3D프린팅 기술은 연평균 25.4%의 성장세를 보이며, 의료 분야, 특히 외과 수술의 사전 계획 수립 및 실제 연습 도구로써 효율적으로 활용되고 있다[9]. 실제로 2002년 미국 UCLA 병원에서 시행되었던 삼쌍둥이 분리수술은 3D프린팅 기술과 CT, MRI 등의 의료영상 기술을 활용하여 수술시간을 대폭 줄이고 수술을 성공적으로 완료한 사례이다[10]. 이러한 3D프린팅 기술과 의료영상 기술의 융합은 현재까지도 복잡한 외과 수술에 있어, 실수로 인한 의료 사고 등을 예방하고 수술 효율을 증대시키는 데에 유용하게 활용되고 있으며[11], 3D프린팅 기술과 영상의학 장비와의 기술 융합에 대한 선행연구 또한 활발히 진행되고 있다[5,12].

1990년대부터 미국 및 유럽에서는 방사선학회 및 핵의학회를 중심으로 의료영상 기기의 품질에 대한 관심이 높아져 각종 규약의 제정이 이루어졌고, 현재 학회 산하에는 의료영상품질인증기관이 설립되어 활동하고 있다[13]. 의료 영상 검사 건수의 증가와 건강검진 등의 의료영상비용의 지출이 전체 의료예산에서 비중이 커져 정부에서도 의료영상에 대한 품질관리를 중요한 의료정책으로 다루고 있다. 이는 국민에 대한 양질의 의료를 제공하기 위한 중요한 일이기도 하다[14,15].

하지만 의료영상 정도관리를 위한 기존 핵의학 팬텀은 제작 시 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 제한적인 형태만 가능하다는 한계를 가졌고, 이에 따라 3D 프린팅 기술을 팬텀 제작에 활용한다면 언급한 문제점을 해결할 수 있을 것이라 사료하였다. 또한, 비용적 측면에서 매우 고가의 해외 제작 팬텀이 국내에서 적용되고 있어 각 병원 및 기관에서는 비용에 대한 부담이 크기에 다양한 측면의 활용에 한계를 가져왔다. 이에 따라 기존 핵의학 팬텀과 비교하여 3D 프린터로 제작된 팬텀의 물질특성에 대한 연구가 이루어진다면, 핵의학 분야에서 3D 프린팅 기술이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단하였다.

따라서 본 연구에서는 기존 핵의학 분야에서 사용되는 PMMA 팬텀과 3D 프린터로 제작된 ABS 팬텀의 방사선 투과도 및 선감약계수의 비교평가에 목적을 두었다. 본 연구의 결과에서는 두께, 선원 및 선량 등의 변화에서 ABS 팬텀의 계수치는 PMMA 팬텀의 계수치와 유사한 값을 가지며 동시에 선형적으로 감소하였고, Aluminum 팬텀의 계수치를 기준으로 PMMA, ABS 팬텀의 계수 차이정도가 유사한 값을 가짐을 확인하였다. 또한, Aluminum, PMMA, ABS 팬텀의 선감약계수를 비교했을 때, Aluminum 팬텀의 선감

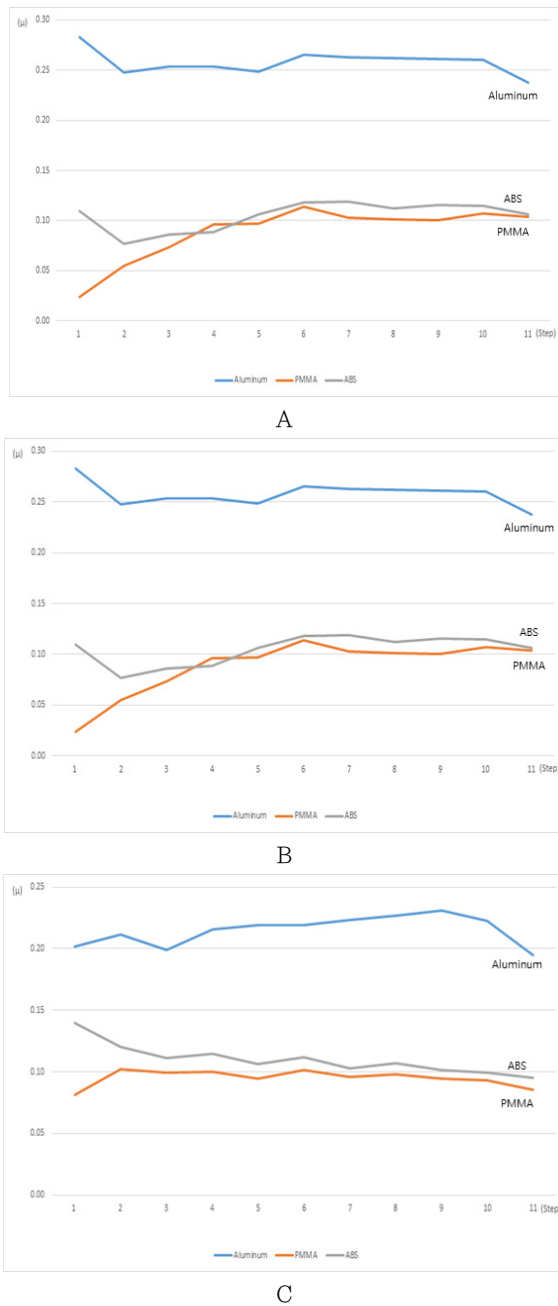


Fig. 10. Comparison graph of linear attenuation according to the quality and radiation sources.
 (A : ^{99m}TcO₄ 3 mCi(111 MBq), B : ^{99m}TcO₄ 6 mCi(222 MBq), C : ⁵⁷Co phantom)

Table 3. Comparison of Linear Attenuation Coefficient according to the quality of materials and radiation source.

	$\mu=(\text{Attenuation Coefficiency, AC})$		
	^{99m} TcO ₄ 3 mCi (111 MBq)	^{99m} TcO ₄ 6 mCi (222 MBq)	⁵⁷ Co phantom
Aluminum	0.26	0.33	0.21
PMMA	0.09	0.16	0.09
ABS	0.10	0.17	0.11

약계수는 나머지 두 팬텀보다 확연히 큰 값을 가졌고, 나머지 두 팬텀에서 근사치의 선감약계수(약 0.01~0.02의 차이)를 확인하였다.

하지만 본 연구에서는 3D 프린팅 기술의 비용적인 문제점과 기술적인 한계 때문에 ABS 팬텀만을 비교대상으로 하여 연구를 진행하였고, 현재 3D 프린터의 소재로 많이 사용되고 있는 PVA(Polyvinyl Alcohol)와 PLA(Poly Lactic Acid) 소재에 대한 연구를 진행하는데 한계를 가졌다[9]. 추후 3D 프린팅 기술의 비용적, 기술적인 문제점이 해결된다면 더 다양한 소재에 대한 후행 연구가 진행될 수 있을 것이라 사료된다.

이에 따라 근사치에 대한 교정치를 산출하여 적용한다면 제작의 편의성과 다양성 등의 측면을 고려하였을 때, 3D 프린터로 제작된 정도관리 팬텀은 기존 핵의학 분야에서 사용됐던 팬텀의 보완용 또는 더 나아가 대체용으로 사용될 수 있을 것이라 생각된다.

V. 결론

본 연구의 결과에 따르면 3D 프린팅 기술로 제작된 ABS 팬텀의 두께가 증가함에 따라 계수치는 선형적으로 감소하였고 선감약계수 또한 기존 핵의학 분야에서 사용되는 PMMA 팬텀의 선감약계수와 근사치를 나타내었다. 이에 따라 3D 프린팅 기술이 핵의학 분야 정도관리 측면에서 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 바탕으로 3D 프린팅 기술의 발전과 다양한 소재에 대한 유사연구가 진행된다면 국내 의료용 팬텀 시장이 해외에만 의존하는 상황에서 긍정적인 접근이 가능할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] Ahn DG, Yang DY. Principle of rapid prototyping and its trends. *J Korean Soc Precis Eng.* 2005; 22(10):7-16.
- [2] Wohler T. Wohlers report 2013. Wohler's Associates Inc; 2013.
- [3] Park SH, Yim SG, Yang SY, Kim Sh. 3D printing technology for biomedical applications. *Korean Industrial Chemistry News.* 2015;18(1):67-78.
- [4] Lee JP. 3D printing technology in medicine, CHA phantom production by using 3-dimensional printer and In-vivo dosimetry for a prostate cancer patient. *Ungbuk Medical Journal.* 2014;24(2).
- [5] Spottieswoode BS. Preoperative three-dimensional model creation of magnetic resonance brain images as a tool to assist neurosurgical planning. *Stereotact Funct Neurosurg;* 2013.
- [6] Seo JN, Na JE, Bae SM, et al. A Phantom production by using 3-Dimensional printer and In-vivo dosimetry for a prostate cancer patient. *The Journal of the Korean Society for Radiotherapeutic Technology.* 2015;27(1):53-60.
- [7] Choi JG. Research for establishment and implementation of standardized system for quality control of nuclear medicine imaging equipments. *National Institute of Food and Drug Safety Evaluation;* 2009.
- [8] Son HK, KIM HJ, Jung HJ, et al. A study of quality of nuclear medicine counting system and gamma camera. *Korean Journal of Medical Physics.* 2001; 12(2):103-12.
- [9] Comprehensive analysis to find new business strategies for 3D printing (printers, materials) that open the creative economy. *IRS Global;* 2015.
- [10] Turkcadcam, Medical Case Studies, Stratasys, Accessed 12 NOV. 2014.
- [11] Lim SY. Convergence of 3D printing technology in the medical field. *Science and Technology Policy.* 2015;204:10-3.
- [12] Gear JI. Development of patient-specific molecular imaging phantoms using a 3D printer. *Medical Physics.* 2014;41:082502.
- [13] Lee BI. Quality assurance and performance evaluation of PET/CT. *Nuclear Medicine Molecular Imaging.* 2008;42(2):137-44.
- [14] Choi Y, Chung JK. Report of research service project(Development of standard of evaluation of PET). *Korean Food and Drug Administration;* 2003.
- [15] Choi JG, Choi CW, Lee BI. Report of research service protect(Research for actual conditions of quality assurance of imaging system in nuclear medicine. *Korea Food and Drug Administration;* 2007.

구분	성명	소속	직위
제1저자, 교신저자	박훈희	신구대학교 방사선학과	부교수
공동저자	이주영	송호대학교 방사선학과	조교수
공동저자	김지현	서울의료원 핵의학과	방사선사