

<원저>

임상적용을 위한 핵의학 동적 심장팬텀의 구현

이주영¹⁾·박훈희²⁾¹⁾송호대학교 방사선과·²⁾신구대학교 방사선과

Implementation of Nuclear Medicine Dynamic Cardiac Phantom for Clinical Application

Lee Joo-Young¹⁾·Park Hoon-Hee²⁾¹⁾Department of Radiological Technology, Shongho University²⁾Department of Radiological Technology, Shingu College

Abstract In the field of nuclear medicine, the various static phantoms of international standards are used to assess the performance of the nuclear medicine equipment. However, we only reproduced a fixed situation in spite of the movement of the cardiac, and the demands for dynamic situations have been continuously raised. More research is necessary to address these challenges.

This study used flexible materials to design the dynamic cardiac phantom, taking into account the various clinical situations. It also intended to reproduce the images through dynamic cardiac flow to confirm the usefulness of the proposed technique. The frame of dynamic cardiac phantom was produced based on the international standard phantom. A nuclear medicine dynamic cardiac phantom was produced rubber material and silicone implemented by 3D printing technique to reproduce endocardium and epicardium movement. Therefore we compared and evaluated the image of a cardiac phantom made of rubber material and a cardiac phantom made of silicone material by 3D printing technique.

According to the results of this study, the analysis of the Summed Rest Score(SRS) showed abnormalities in the image of a cardiac phantom made of rubber material at 10, 20, and 30 stroke rates, but the image of a cardiac phantom made of silicone material by 3D printing technique showed normal levels. And the analysis of the Total Perfusion Deficit(TPD) showed that TPD in the image of a cardiac phantom made of rubber material was higher than that of the image of a cardiac phantom made of silicone material by 3D printing technique at 10, 20, and 30 stroke rates.

The potential for clinical application of the proposed method was confirmed in the dynamic cardiac phantom implemented with 3D printing technique. It is believed that the objective information secures the reliability of inspection equipment and it contributes to improve the diagnostic value of nuclear medicine.

Key Words : 3D Printing, Nuclear Medicine, Dynamic Phantom, Cardiac Imaging, Summed Rest Score(SRS), Total Perfusion Deficit(TPD)

중심 단어 : 3D 프린팅, 핵의학, 동적팬텀, 심장영상, Summed Rest Score(SRS), Total Perfusion Deficit(TPD)

1. 서 론

최근 우리나라 사망원인으로 심혈관계 질환이 점차 증가

되고 있다[1]. 그에 따라 심장 질환과 관련된 검사도 함께 증가 되고 있으며, 그 중 핵의학 심장 검사는 관상동맥질환의 진단, 예후예측, 치료 효과 판정 등에 널리 이용되고 있다

This work was supported by the research fund of Songho University(SH-2018-A)

Corresponding author: Hoon-Hee Park, Department of Radiological Technology, Shingu College, 377, Gwangmyeong-ro, Jungwon-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13174, Republic of Korea / E-mail: hzpark@shingu.ac.kr

Received 07 February 2019; Revised 24 February 2019; Accepted 26 February 2019

Copyright ©2019 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

[2,3]. 핵의학 심장 검사는 대표적으로 3가지 검사가 있으며, 검사 목적에 따라 방법 또한 다르게 활용된다. 협심증(Angina pectoris)이나 심근경색(Cardiac infaction)과 관련된 관상동맥질환을 진단하는 목적으로 심근관류 SPECT가 활용되고 있으며, 심전도를 심장수축과 이완의 지표로 사용하여 일회 심박주기(Cardiac cycle)내 일정기간 동안의 혈액풀(Blood pool) 영상을 반복하여 모아서 심박주기동안 심장내의 혈액풀 변화를 영상화하는 방법인 게이트 심장 혈액풀 검사(Multigated blood pool scan), 선천성 심장질환을 진단하기 위해 순간주사로 방사성동위원소가 심장 내의 각 방 및 실내를 1회 순환하는 동안 영상을 얻어 심장의 형태를 관찰하는 동적심장검사(Single pass scan, First pass scan)가 대표적이다[4-6].

핵의학 심장검사를 통해 획득된 영상은 다양한 정보를 포함하고 있으며, 정량분석을 통해 객관적인 정보를 제공함으로써 예민도와 특이도가 높은 검사이다[7]. 이렇게 많은 정보와 우수한 영상의 질을 확보하기 위해서는 핵의학 장비를 신뢰할 수 있는 수준으로 유지하는 것이 무엇보다 중요하다[8]. 임상에서는 이러한 핵의학 장비의 객관적인 평가를 위해 국제기준의 정적 심장팬텀(Static cardiac phantom)을 활용하고 있다[9]. 획득된 팬텀 영상을 통해 장비의 정도관리(Quality control)를 목적으로 영상의 재구성법(Reconstruction)을 확인 및 심근의 섭취 상태를 확인하는데 주로 사용된다. 그러나 심장은 계속적으로 움직이는 장기로 혈액의 반복적인 수축과 이완을 하고 있으며, 정적 심장팬텀은 심장의 움직임을 재현하기에는 한계를 가지고 있으며, 현재 관련 연구 중에는 이와 관련 연구가 미비한 실정이다[10].

이에 본 연구에서는 심장의 움직임을 재현하기 위하여 다양한 재질로 심근의 움직임을 재현하고자 하였다. 심장의 움직임을 재현 가능한 고무 재질과 3D 프린팅 기법을 적용한 실리콘 재질을 심근 형태로 제작하여 국제기준의 정적 심장팬텀의 핵의학 영상과 비교하였다[11-13]. 이렇게 제작된 동적 심장 팬텀 시스템(Dynamic cardiac phantom system)을 적용하여 심장의 움직임을 유사하게 표현하는 팬텀으로 최적화하고자 하였으며, 영상을 평가함으로써 유용성을 확인하는데 목적을 두었다.

II. 대상 및 방법

1. 대 상

1) 심장팬텀 프레임

심장팬텀 프레임은 국제기준의 정적 심장팬텀을 기준으

로 제작하였다. 심장의 동적영상 획득을 목적으로 하므로 방사성의약품이 좌심실의 심근으로 들어가 심근의 박출 능력의 재현을 위하여 방사성의약품의 유입경로와 유출경로로 변형하여 제작하였다(Fig. 1).

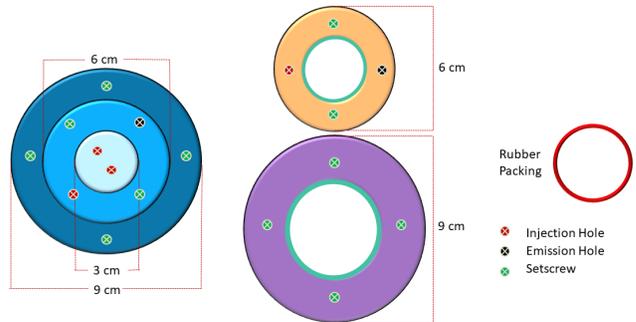


Fig. 1. Basic structure of phantom frame

팬텀의 하단프레임은 3단 구조로 재질은 아크릴로 하였다. 각 형성된 층에 따라 외경 3, 6, 9 cm, 두께 0.9 cm로 설계 및 제작하였다. 심장내막의 결속을 위한 심장내막 고정프레임은 내경 3 cm, 외경 6 cm, 두께 0.9 cm으로, 심장외막의 결속을 위한 심장외막 고정프레임은 내경 6 cm, 외경 9 cm, 두께 0.9 cm으로 설계 및 제작하였다. 그 외 심장내막, 외막 고정프레임을 누수가 발생하지 않고 고정할 수 있도록 스크류 방식의 나사로 고정할 수 있도록 설계 및 제작하였으며, 각각의 결속부위는 고무패킹을 통해 누수를 방지하였다(Fig. 2)



Fig. 2. Separation form of phantom frame(A: endocardium fixed frame, B: epicardium fixed frame, C: base frame and rubber packing ring)

2) 고무재질 심근 제작

심장의 내막(Endocardium)과 외막(Epicardium)의 움직임을 구현하기 위해 유연성이 우수한 고무재질로 이중 구조의 형태로 제작하였다. 심장팬텀은 하단 프레임에 고무재질의 내막을 결합하고 심장내막 고정프레임을 결속하였다. 이후 하단 프레임에 고무재질의 외막을 결합하고 심장외막 고정프레임으로 결속하여 심장의 이중막을 형성하였다(Fig. 3).

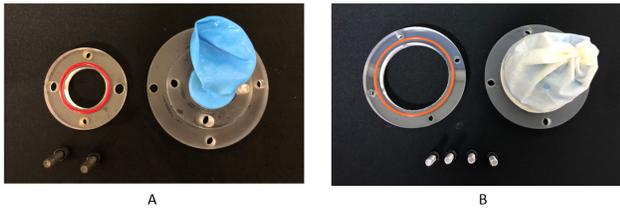


Fig. 3. Dynamic cardiac phantom using rubber materials (A: endocardium, B: epicardium)

3) 3D 프린팅 기법을 적용한 실리콘 재질의 심근 제작

3D 프린팅으로 제작된 팬텀의 심장막은 형태를 유지하며, 심장내막과 외막의 움직임을 재현할 수 있는 실리콘 재질의 팬텀을 적용하였다[14]. 심장팬텀의 내막과 외막은 국제기준의 정적 심장팬텀과 동일하게 설계하였다. 심장팬텀은 내경 3 cm, 높이 6 cm이며, 외막은 내경 6 cm, 높이 9 cm의 원기둥과 돔(dome)형태로 제작하였다(Fig. 4)

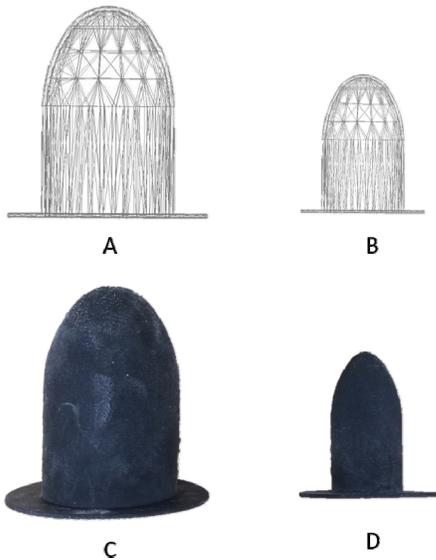


Fig. 4. Physical production by 3D printing technique (A: epicardium design, B: endocardium design, C: silicone epicardium, D: silicone endocardium)

4) 동적 심장팬텀 시스템

제작된 심장팬텀의 동적상황을 재현하기 위해 혈류의 속도를 조절할 수 있고, 심박동처럼 일정하게 유지할 수 있는 정량펌프(Iwaki Metering Pump, Japan)를 사용하였으며, 유속(Flow rate)이 38~420 ml/min까지 조절 가능하여 연구에 적용되었다(Fig. 5). 정량펌프는 방사성의약품이 팬텀으로 유입되었다가 압력을 통해 순환함으로써 심근 운동을 재현할 수 있도록 고안하였다.



Fig. 5. Iwaki Metering Pump

5) 방사성의약품

심장 핵의학검사에서는 ^{201}Tl 과 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 의 표지화합물이 주로 사용되고 있으며, 본 연구에서는 반감기와 에너지를 고려하여 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 에 표지화합물 없이 사용하였다. 동적 심장팬텀 시스템을 적용하기 위하여 500 cc의 물에 37 MBq에 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 를 충분히 교반하여 사용하였다.

2. 영상 획득 방법

1) 사용 장비 및 영상 획득 조건

SPECT/CT 장비는 Discovery NM/CT 670 Pro(GE Healthcare, Milwaukee, USA)를 사용하였다(Fig. 6).



Fig. 6. SPECT/CT(GE Healthcare)

동적 심장팬텀의 영상 획득 조건은 임상에서 일반적으로 사용되고 있는 심장검사의 조건으로 모두 동일하게 설정하였다. 스캔방향은 발방향 우선/바로 누운자세(Feet first/supine position)를 적용하였으며, 총 획득된 각도의 범위는 180° 로 반시계방향으로 설정하였다. 각각의 획득 영상 각도는 3° 로 설정하였으며, 총 획득 영상의 개수는 60 프레임으로 구성되었다(Table 1).

또한 동적 심장팬텀 시스템에서 정량펌프는 10, 20, 30 stroke rate(%)로 설정하여 임상검사와 유사하게 위치시켜 영상을 획득하였다(Fig. 7)[15].

Table 1. Image acquisition parameters

Discovery NM/CT Pro	
Description	Parameter
Scan location	Feet first supine
Direction	CCW(Counterclockwise)
Total angular range	180
View angle	3

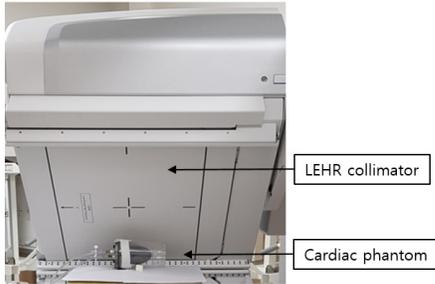


Fig. 7. SPECT/CT Image Acquisition

3. 영상 분석 방법

심근 관류 SPECT 검사를 통하여 획득된 영상은 Xeleris 4.0(GE Healthcare, Milwaukee, USA)을 사용하였다. 심근 관류 SPECT의 다양한 분석방법 중 미국 핵의학심장학회(American Society of Nuclear Cardiology)에서 사용이 권장되고 있는 표준화된 심근의 분절모형을 활용하고자 하였으며, 이에 획득된 영상의 정량적 분석을 위해 SRS(Summed Rest Score)와 TPD(Total Perfusion Deficit)을 통하여 분석하였다(Fig. 8).

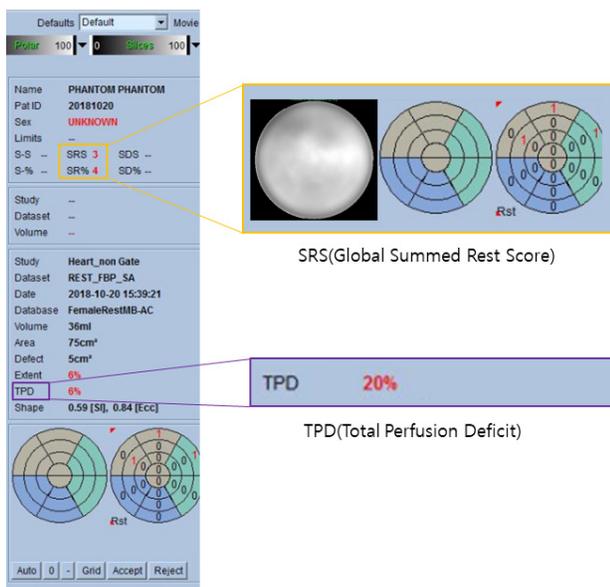


Fig. 8. SRS(Summed Rest Score) and TPD(Total Perfusion Deficit)

1) SRS(Summed Rest Score)

심근 관류 SPECT 검사 후, 심근을 극성지도(Polar map)로 표현한 영상에서 반정량적인 측정방법(semiquantitative measures)으로 사용되고 있다. 이때 점수가 관류결손 부위의 범위를 수치화하여 표시하는 방법으로 0점에서 5점까지의 범위로 나뉘며, 심근 결손 부위의 심각도가 높을수록 점수값이 높아지는 방식을 적용하였다.

2) TPD(Total Perfusion Deficit)

심근 관류 SPECT 검사 후, 심근을 극성지도(Polar map)로 표현한 영상에서 반정량적인 측정방법으로 사용되고 있다. 이 점수는 정상군 환자로 저장되어있는 데이터베이스와 비교하여 전반적인 관류결손 부위를 백분율(Percentage, %)로 수치화하는 값을 적용하였다.

III. 결 과

1. SRS(Summed Rest Score) 분석

고무재질 심장팬텀과 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질 심장팬텀의 정량적 지표를 위해 각각의 실험결과를 총 5회에 걸쳐 분석하였다(Fig. 9).

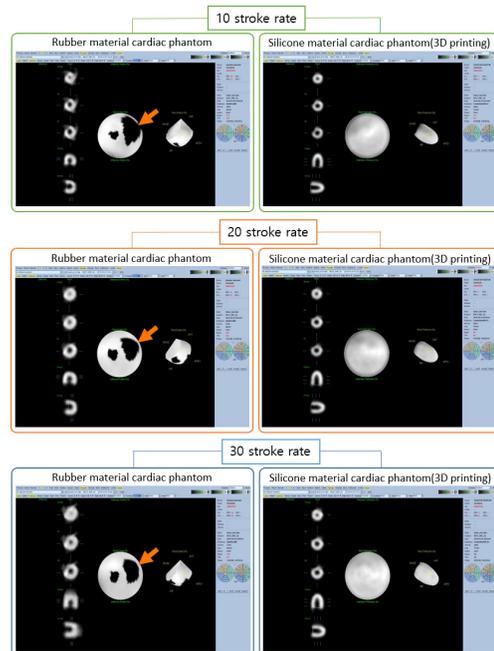


Fig. 9. Comparison of stroke rate between rubber material cardiac phantom and silicone material cardiac phantom implemented with 3D printing(the arrow : defect area)

SRS를 분석한 결과, 10 stroke rate일 때, 고무재질 심장팬텀은 18.4(±1.72)점, 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질 심장팬텀은 2.4(±1.02)점, 20 stroke rate일 때, 고무재질 심장팬텀은 14.8(±0.75)점, 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질 심장팬텀은 2.4(±1.80)점, 30 stroke rate일 때, 고무

재질 심장팬텀은 13.8(±1.17)점, 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질 심장팬텀은 0.4(±0.49)점으로 나타났다. 또한 고무재질 심장팬텀에서는 모두 비정상군의 수치를 나타냈지만, 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질 심장팬텀은 정상군의 수치를 나타냈다(Table 2), (Fig. 10).

Table 2. SRS(Summed Rest Score) according to the stroke rate (Unit: Score)

	10 stroke rate	20 stroke rate	30 stroke rate
Rubber material cardiac phantom	18.4 ± 1.72	14.8 ± 0.75	13.8 ± 1.17
Silicone material cardiac phantom(3D printing)	2.4 ± 1.02	2.4 ± 0.80	0.4 ± 0.49

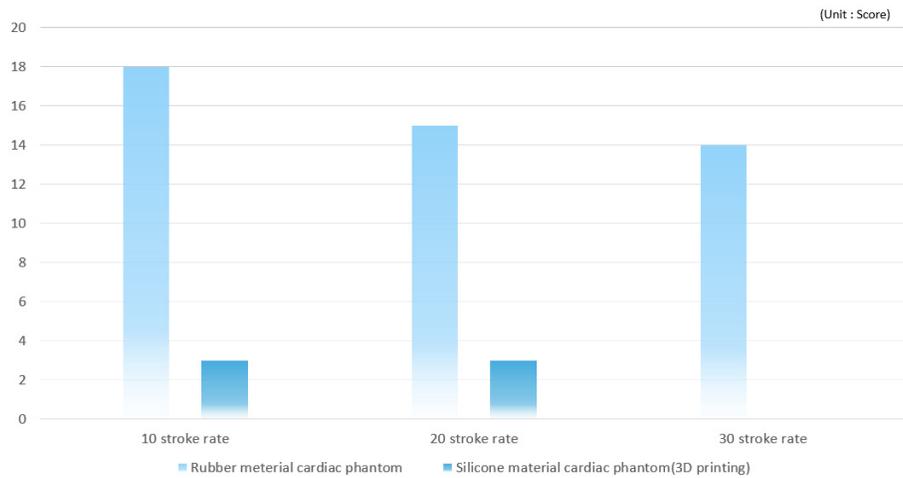


Fig. 10. SRS(summed rest score) according to the stroke rate

Table 3. TPD(Total Perfusion Deficit) according to the stroke rate (Unit: Percentage, %)

	10 stroke rate	20 stroke rate	30 stroke rate
Rubber material cardiac phantom	12.0 ± 0.89	14.0 ± 0.63	9.0 ± 0.44
Silicone material cardiac phantom(3D printing)	5.0 ± 0.48	6.0 ± 0.59	2.0 ± 0.22

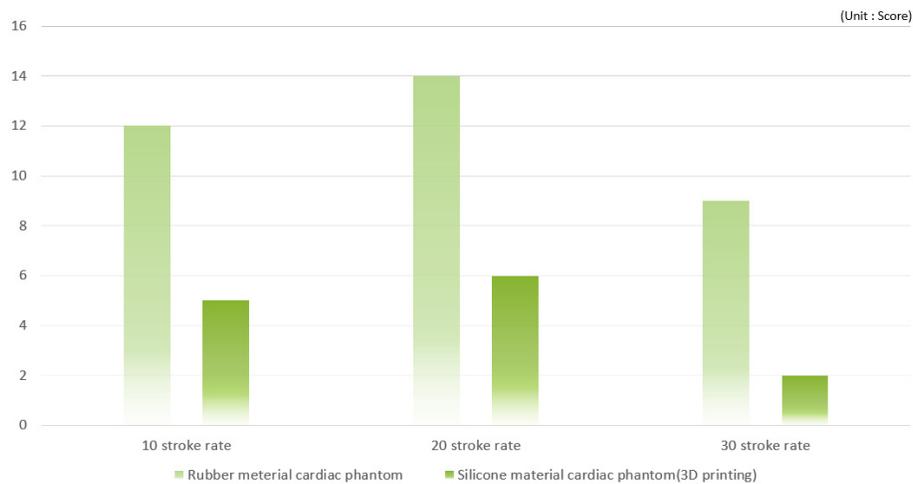


Fig. 11. TPD(total perfusion defect) according to the stroke rate

2. TPD(Total Perfusion Deficit) 분석

TPD를 분석한 결과, 10 stroke rate일 때, 고무재질 심장팬텀은 12.0(\pm 0.89)%, 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질 심장팬텀은 5.0(\pm 0.48)%, 20 stroke rate일 때, 고무재질 심장팬텀은 14.0(\pm 0.63)%, 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질 심장팬텀은 6.0(\pm 0.59)%, 30 stroke rate일 때, 고무재질 심장팬텀은 9.0(\pm 0.44)%, 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질 심장팬텀은 2.0(\pm 0.22)%으로 나타났다. 또한 고무재질 심장팬텀 영상에서의 TPD가 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질 심장팬텀 영상보다 높은 수치를 나타냈다 (Table 3), (Fig. 11).

IV. 고 찰

임상 핵의학분야에서의 심장검사는 감마카메라와 SPECT 장비를 활용한 검사방법이 적용되고 있으며, 그 중 허혈성 심장질환이나 심근경색증을 진단하기 위한 심근관류 SPECT 검사가 가장 널리 활용되고 있다. 수축과 이완을 반복하며 움직이는 심장의 정확한 진단을 위해서는 객관적인 영상이 획득될 수 있도록 장비의 정도관리가 우선시되어야 한다. 이러한 장비의 정도관리를 위해 국제기준의 핵의학 정적 심장팬텀이 보편적으로 사용되고 있으나, 심장의 움직임에 대한 고려가 없다[9]. 이에 본 연구에서는 임상적 상황을 고려하여 핵의학분야에서 활용될 수 있는 동적 심장팬텀 제작을 통해 장비의 정도관리에 활용하고자 하였다[10]. 또한 본 논문에서 앞서 동적 심장시스템에서 정량펌프 박출률의 분당 횡수를 확인하고, 실제 심장의 박출량과 비슷한지 확인하였으며, 이는 10, 20, 30 stroke rate의 기준이 되었다. 또한 국제기준의 정적 심장팬텀의 영상획득 및 SRS와 TPD를 선행 분석하여 정량적 정상수치의 기준이 되었다. 고무재질의 심장팬텀 영상과 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질의 심장팬텀 영상을 비교하고, SRS와 TPD로 분석하였을 때, 고무재질의 심장팬텀보다 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질의 심장팬텀이 우수한 정도관리 팬텀의 성능을 보였다. 이렇듯 본 연구에서는 임상에서 활용할 수 있는 동적 심장팬텀을 제작하고, 장비의 정도관리에 활용될 수 있다는 목적을 달성하였으나, 몇 가지 제한점을 확인 할 수 있었다.

임상에서 가장 많이 활용되고 있는 심근관류 SPECT 검사를 중점적으로 좌심실의 기능을 평가할 수 있는 심장 동적팬텀시스템을 구현하였으나, 동적심장검사, 게이트 심장혈액풀 검사와 같은 혈류 중심의 심장팬텀은 표현하지 못하

였다. 하지만 개발된 심장팬텀은 국제기준으로 적용하였기에 이에 대한 신뢰도가 높으며 핵의학 심장검사 장비의 정도관리에서 큰 활용도를 기대할 수 있다. 또한 제작된 심장 동적팬텀시스템은 정상심장이 적용된 팬텀으로 다양한 병변을 묘사하는데 한계가 있었다. 하지만 3D 프린팅으로 구현되었기 때문에 추후 다양한 병변뿐만 아니라 인공물에 대한 정보의 묘사가 가능하리라 여겨진다.

그러므로 이러한 제한점을 보완하여 향후 연구를 계획하고자 한다. 나아가 현재 국내에서는 대부분의 팬텀을 고비용의 외국 제품에 의존하고 있으므로 상대적으로 저비용으로 제작된 국제기준 팬텀의 활용이 가능해지며, 임상에서는 장비의 정도관리에 보다 쉽게 접근 가능해질 것이라 생각된다. 이는 비용의 절감뿐만 아니라 보다 우수한 핵의학영상의 구현이 가능하리라 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서는 핵의학 심장영상의 우수한 영상의 질을 유지하기 위한 필수 사항인 장비의 정도관리에서 활용될 수 있는 동적 심장팬텀 시스템을 설계·제작하였다. 이를 위해 기존의 국제기준으로 사용되고 있는 정적 심장팬텀을 기준으로 고무재질의 심장팬텀과 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질의 심장팬텀의 영상을 획득하여 평가함으로써 동적 심장팬텀의 유용성을 확인하는데 목적을 두었다. SRS와 TPD를 통한 정량적 분석 결과, 고무재질의 심장팬텀보다 3D 프린팅으로 제작된 실리콘재질의 심장팬텀에서 보다 우수한 심장의 움직임이 재현됨을 확인할 수 있었다.

따라서 3D 프린팅으로 제작된 동적 심장팬텀은 임상적용에 대한 가능성을 확인하였으며, 핵의학 검사 장비의 신뢰성을 확보하는데 객관적인 정보로 활용됨으로써 핵의학영상의 진단가치를 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] Korea national statistics. The results of the cause of death statistics in 2017. [Internet]2017; Available from: <http://kostat.go.kr/portal/korea/index.action>.
- [2] Ehman EC, Johnson GB, Villanueva-Meyer JE, Cha S, Leynes AP, Zufall Larson PE, Hope TA. PET/MRI: Where might it replace PET/CT?. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2017;46(5):1247-62.

- [3] Pichler BJ, Wehrl HF, Judenhofer MS. Latest advances in molecular imaging instrumentation. *Journal of Nuclear Medicine*. 2008;49:5S-23S.
- [4] Jacobson AF. Diagnosis of deep venous thrombosis. A review of radiologic, radionuclide, and non-imaging methods. *Quarterly Journal of Nuclear Medicine*. 2001;45(4):324-33.
- [5] Bernarducci MP. "Pathophysiologic mapping" of venous thromboembolism: opportunities for radio-labeled peptides. *Quarterly Journal of Nuclear Medicine*. 2003;47(4):292-320.
- [6] Hansen CL, Goldstein RA, Berman DS, Churchwell KB, Cooke CD, Corbett JR, et al. Myocardial perfusion and function : Single photon emission computed tomography. *Journal of Nuclear Cardiology*. 2007;14(6):39-60.
- [7] Schmidt MA, Chakrabarti A, Shamim-Uzzaman Q, Kaciroti N, Koeppel RA, Rajagopalan S. Calf flow reserve with H₂ 15O PET as a quantifiable index of lower extremity flow. *Journal of Nuclear Medicine*. 2003;44:915-19.
- [8] Simon TR, Walker BS, Matthiesen S, Miller C, Triebel JG, Dowdey JE, et al. A realistic dynamic cardiac phantom for evaluating radionuclide ventriculography: description and initial studies with the left ventricular chamber. *Journal of Nuclear Medicine*. 1989;30(4):542-7.
- [9] Begemann PG, van Stevendaal U, Koester R, Mahnken AH, Koops A, Adam G, et al. Evaluation of the influence of acquisition and reconstruction parameters for 16-row multidetector CT on coronary calcium scoring using a stationary and dynamic cardiac phantom. *European Radiology*. 2007;17(8):1985-94.
- [10] Park HH, Lee JY, Kim SW, Lyu KY, Jin GH. Development of dynamic kidney phantom system and its evaluation of usability of application in nuclear medicine. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2017;40:49-55.
- [11] Lee JY, Lee TS, Pakr HH. A study on effect of the image applying to breast implants in Breast Specific Gamma Imaging. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2018;41(1):33-8.
- [12] Park HH, Lee JY, Kim SU, Ryu KY, Jin KH. Development of dynamic kidney phantom system and its evaluation of usability of application in nuclear medicine. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2013;36(1):49-55.
- [13] Rybicki FJ, Grant GT. 3D Printing in Medicine. Springer International Publishing; 2017. Available from: Ebook Library.
- [14] Cohrs NH, Petrou A, Loepfe M, Yiruka M, Schumacher CM, Kohll AX, et al. A Soft Total Artificial Heart-First Concept Evaluation on a Hybrid Mock Circulation. *International Center for Artificial Organs and Transplantation and Wiley Periodicals*. 2017;41(10):948-58.
- [15] Tran-Gia J, Schlögl S, Lassmann M. Design and Fabrication of Kidney Phantoms for Internal Radiation Dosimetry Using 3D Printing Technology. *Journal of Nuclear Medicine*. 2016;57(12):1998-2005.