

## 심장핵의학 검사를 위한 영상장비 및 도구의 최신동향

화순진남대학교병원  
이병일

### State of the Art of Imaging Equipment and Tools for Nuclear Cardiology

Byeong-il Lee, Ph.D.

Department of Nuclear Medicine, Chonnam National Hwasun University Hospital, Jeonnam, Korea

Nuclear cardiology in Korea is less active, compared to nuclear oncology, but it has been specialized and ramified. Lately, sophisticated nuclear cardiac imaging methods provide more convenience for patients. It is necessary to accurately estimate the recent progress in the imaging devices for nuclear cardiology. Myocardial perfusion imaging is a well established study to evaluate heart function. Myocardial perfusion SPECT and PET have been used for assessment of coronary artery disease with various radiopharmaceuticals. And of late, the development of advanced imaging devices - multi-pinhole technique and high definition imaging technique - and software made the scanning time shorter and expanded the application field. Therefore, it is required to review the nuclear cardiology hardware/software for the clinical practice and research. In this review, the characteristics about recently-developed SPECT/PET and software for nuclear cardiology are described. It is hoped that this information would contribute to improving the activity of nuclear cardiac research in Korea where the research for the fusion imaging combining CT and nuclear imaging is drawing more attention. (Nucl Med Mol Imaging 2009;43(3):165-173)

**Key Words:** Nuclear cardiology, dedicated SPECT, PET, myocardial perfusion imaging, fusion imaging

## 서 론

최근 심장핵의학 분야는 미국과는 달리 국내에서는 활발하게 진행되고 있지는 않지만 심장질환에서 향후 이용이 증가될 수 있는 잠재적인 가능성을 충분히 가지고 있다. 핵의학에서의 심장검사 및 뇌검사 영역은 계속해서 전문화, 세분화 되고 있어 최신 동향 및 영상장비의 특징을 이해할 필요가 있다. 심장핵의학 영상검사는 크게 PET과 SPECT 검사로 나누어 볼 수 있다. PET을 이용한 검사에서는 암모니아와 류비듐을 사용한 검사가 세계적으로 많이 이용되고 있고, SPECT를 이용한 검사에서는 테크네슘과 탈륨을 이용한 검사가 주를 이루고 있다.<sup>1-5)</sup> 하지만 암모니아나 물을 이용한 PET검사는 사이클로트론의 운영에 대한 부담을 안고 있고, 류비듐을 이용한 검사는 국내에서 진행되기 어려운 실정이다. SPECT를 이용한 검사에서는 최근 동위원소

생산의 문제로 인해 원활한 검사가 어려움을 겪을 것으로 예상되고 있어서 향후 방사성의약품의 생산동향과 검사진행의 연관성도 중요한 흐름을 결정할 요인으로 생각된다. 최근 심장핵의학과 관련한 핵의학 물리분야 관심은 심장핵의학 영상 전용기기의 개발 및 기존의 임상기기에서 심장검사를 효율적으로 시행하도록 활용하는 기법이나 소프트웨어 분야의 변화이다. 많은 소프트웨어에서 dicom 파일의 표준화 및 성능향상의 도움으로 예전처럼 장비 호환성이 떨어지는 점이 없어지고 있다. 심장핵의학 영상은 영상자체 만으로도 의미가 있지만 1990년대 초반 이후 널리 알려져 있는 정량화 소프트웨어의 사용이 일반화가 되어 있으므로, 분석을 위한 소프트웨어의 활용방안도 중요한 부분이다.<sup>6-10)</sup> 따라서 이 종설에서는 심장핵의학 영상검사의 흐름과 영상장비의 최근 동향 및 특징, 그리고 관련 소프트웨어의 동향에 대해 고찰 하고자 한다.

• Received: 2009. 6. 22. • Revised: 2009. 6. 24.

• Accepted: 2009. 6. 25.

• Address for reprints: Byeong-il Lee, Ph.D., Department of Nuclear Medicine, Chonnam National University Hwasun Hospital, 160 Iljim-ri, Hwasun, Jeonnam 519-809, Korea  
Tel: 82-61-379-8482, Fax: 82-61-379-8455  
E-mail: dewpapa@hanmail.net

## 최근 영상장비의 특징

심장핵의학 영상검사를 위한 장비의 개발 방향은 검사시간의 단축과 해상도의 향상이다. 최근 개발되고 있는 심장핵의학 영상기기의 결과들이 말해 주듯이 검사시간의 단축은 괄목할 만한 성과이다. 2000년도 초반부터 진행이 되어

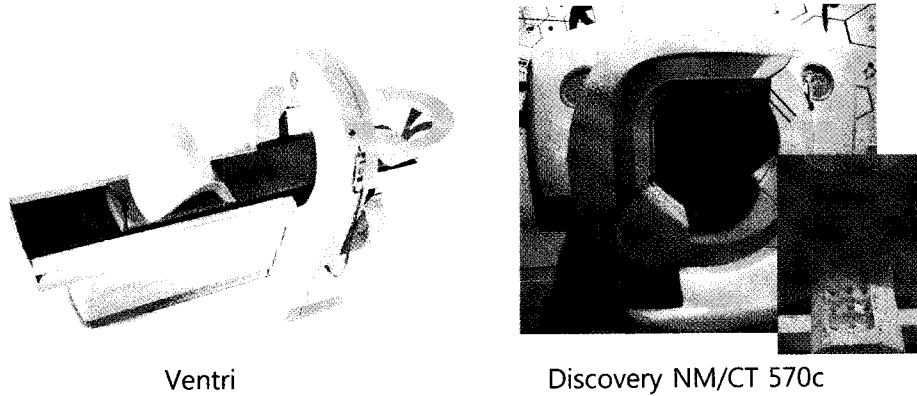


Figure 1. This image shows new nuclear cardiac imaging devices from GE healthcare. (left : ventri, right : NM/CT 570c)

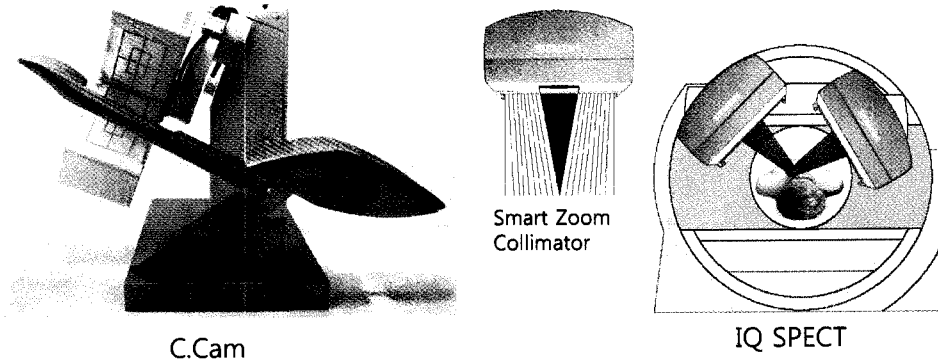


Figure 2. Nuclear cardiac imaging devices from Siemens focused on collimator design and new reconstruction technique. (left: C.Cam, right: IQ SPECT)

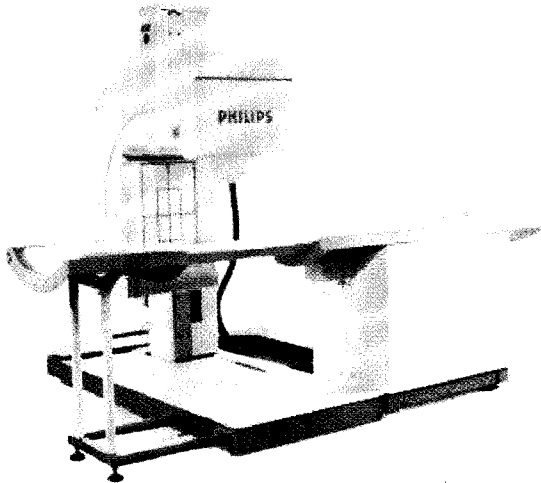
은 SPECT기기의 성능향상을 통한 심장핵의학 영상검사의 결과는 전임상기기의 개발로부터 시작되었다. 기존의 형식에서 발전된 형식인 다중바늘구멍조준기를 장착한 소동물 전용 SPECT는 이미 해상도가 급격히 향상되고 있으며, 새로운 검출기의 개발은 검사시간을 단축시켜오고 있다.<sup>11-13)</sup> 전임상기기의 개발결과는 임상기기에 반영이 되고 있는데, 새로운 형식의 조준기 및 새로 개발되는 검출기가 주요한 특징이다.<sup>13,14)</sup> 실제 임상검사에서 가장 많이 사용하고 있는 이중 헤드 감마카메라에서는 NaI(Tl) 섬광결정을 이용하여 심장검사를 수행하고 있지만 실제 검출기에서 심장으로부터 얻는 신호는 한 검출기에서 3분의 1가량 정도도 안 되는 영역의 섬광결정만 사용하고 있다. 따라서 검출기 수를 더 늘리고 실제 신호를 얻는 영역크기만큼 검출기를 작게 구성하는 방향으로 발전하고 있으며, 시스템의 전체적인 크기가 작아지면서 심장영상신호의 검출효율을 올릴 수 있는 전용시스템의 구축이 이루어지고 있다. 최근 개발되는 심장 전용 검사기기에서는 검사 시 환자의 자세도 대부분이 앉

아서 검사를 하는 형식이나 최대한 팔과 다리를 편하게 유지하는 방식을 채택하면서 검사의 효율성을 높이고 있다. 검사시간면에서도 새롭게 개발된 장비들은 기존의 2-3시간 걸리던 검사를 한 시간 이내로 줄이는데 크게 기여하고 있으며, 실제 촬영시간도 2-5분 이내로 기존의 약 15분에 비해 3-5배 빨라지고 있다.<sup>14)</sup>

주요 3개사의 심장검사 전용장비는 다음과 같다. 먼저 GE사에는 Ventri가 있다. 환자의 자세를 고려한 베드를 중심으로 두 개의 검출기가 90도로 놓여져 있으며, 지지대 역할을 하는 원형 통이 있는 구조이다. 최근 Alcyone 기술의 개발로 발전된 모델인 Discovery NM530c를 선보였는데, 이 장비에서는 바늘구멍조준기와 CZT (Cadmium Zinc Telluride, Cd-Zn-Te)를 이용한 검출기 27개를 다중으로 사용함으로써 에너지해상도 및 민감도를 향상시켜 검사시간을 단축시키고 해상도를 향상시켰다. 이 모델은 검출기가 움직이지 않고 고정된 형식을 취하고 있다. 또한 최근에는 CT를 장착한 모델인 Discovery NM/CT 570c를 출시하였

다(Fig. 1). Siemens사에는 전용장비로 C.Cam이 있었는데, 최근에는 IQ SPECT를 선보였다. 기존의 SPECT가 90도의 회전형 구조라고 한다면, IQ SPECT에서는 두 개의 검출기의 각도가 76도이고 서로 약 10cm가량 떨어져 있으면서 심장과 가까운 위치를 레이저를 이용하여 조절하며 영상을

얻는 것이 특징이다. 또한 회전각도도 90도나 180도가 아니고 104도와 208도로 심장의 구조 및 검출기 위치에 최적화시킨 형태를 보여주고 있다. 검출기는 기존의 장비와 동일하지만, Smartzoom 조준기 및 획득방식의 차이로 인한 부분이 모두 다르기 때문에 새로운 장비로 구분하고 있다(Fig. 2).



CardioMD

Philips사에는 심장핵의학 전용검사장비인 CardioMD가 있다. 두 개의 검출기가 90도의 각도로 검사를 시행하는 구조이다. 심장전용기기로는 계속 출시된 모델은 없는 상태이다(Fig. 3).

Digirad: X-ACT는 CSI(Tl) 섬광결정을 사용하면서 photodiodes를 사용하는 심장검사 전용기기이다. 세 개의 검출기를 사용하고 있으며, 최근 low dose CT를 장착하여 감쇄보정 기능을 추가하였다.

D-SPECT (Spectrum Dynamics사)는 CZT검출기를 사용하고 검출기의 수가 9개가 있는 심장검사 전용기기이다. 검출기가 개별적으로 각각 심장을 중심으로 바라보면서 좌우 회전을 약간씩 하는 구조로 기존의 장비에 비해 검출효율이 매우 뛰어나고 검사시간을 많이 단축시켜 호응을 얻고 있다. 기존의 검사시간이 부하기와 휴식기에 각각 15분이라면 이 장비는 부하기에 2분, 휴식기에 4분을 얻으면서 해상도는 더욱 향상시킨 결과를 제공하고 있다.<sup>15,16)</sup>

Figure 3. This image shows dedicated nuclear cardiac SPECT from Philips. (CardioMD)

CardiArc는 기존의 검출기를 180도로 둥글게 만들었고 긴 slit을 6군데에 내어서 6개의 검출기가 동시에 동작하는

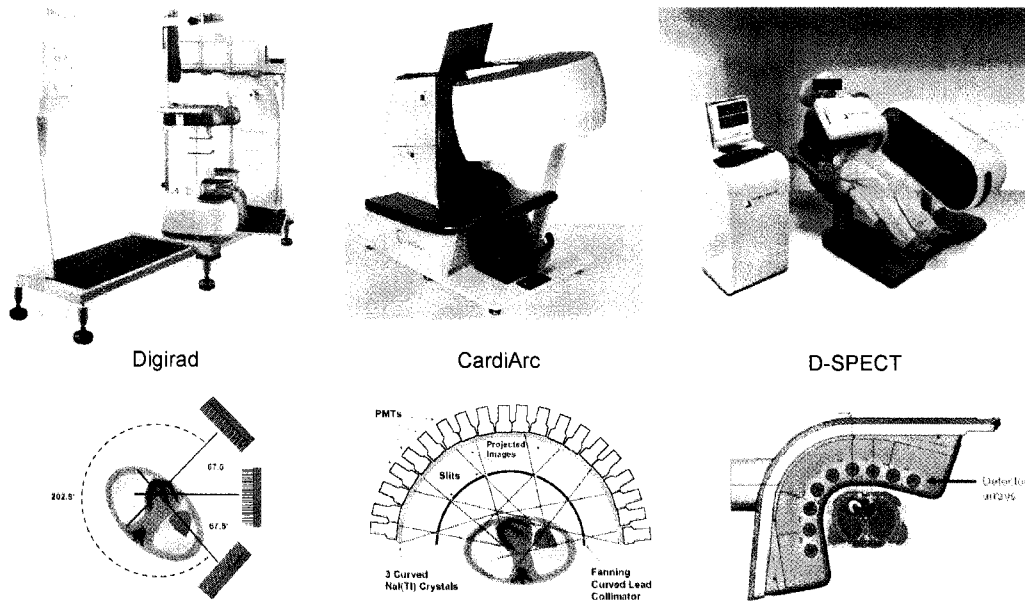


Figure 4. Recently developed dedicated cardiac scanners provide high image quality and high performance.

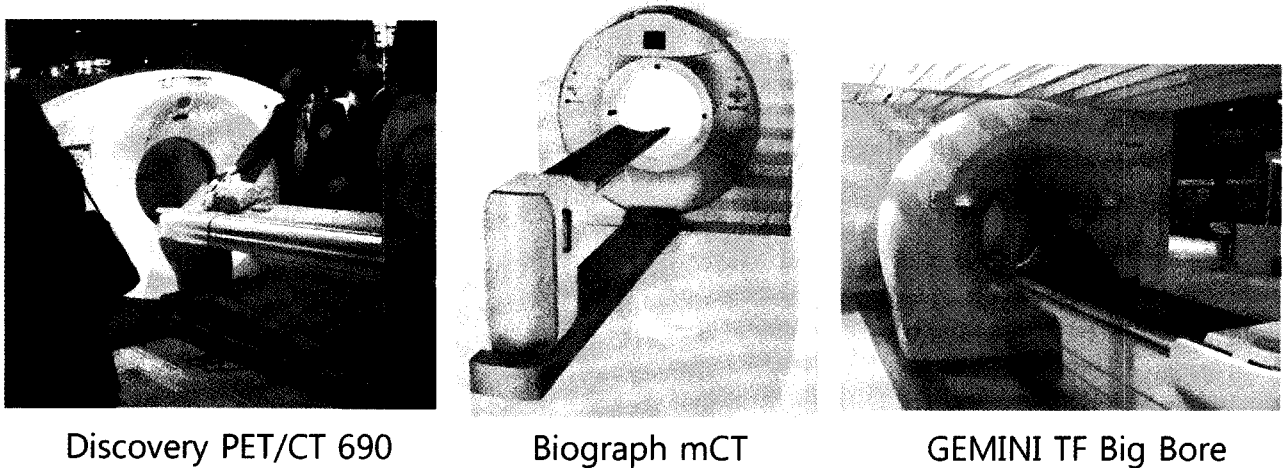


Figure 5. Three main vendors introduced newly developed PET scanner at 2009 SNM annual meeting.

Table 1. Summarized Information of Scanners

Company	GE	Siemens	Phillips
Dedicated cardiac SPECT	Ventri NM530c	C.Cam IQ SPECT	CardioMD
Recent developed PET	Discovery VCT Discovery PET/CT 600	Biograph TruePoint 64 Biograph mCT	GEMINI TF GEMINI TF Big Bore
Software engine	Evolution	Flash 3D	Astonish
PET technology	VUE point HD	High definition	Time of flight

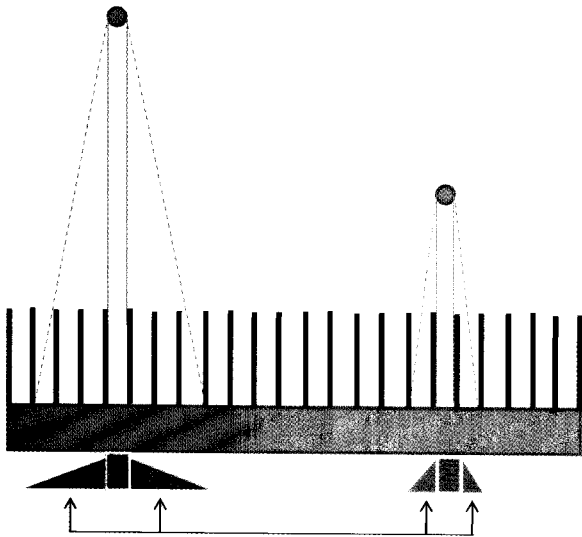
효과를 만들었다(Fig. 4).

PET은 특별히 심장검사 전용기기가 있는 것은 아니지만 심장검사를 고려하여 개발되는 기기들이 있다. Siemens사에서는 Biograph TruePoint 이후 Biograph mCT는 CT를 128 슬라이스까지 확장 가능하도록 하여 심장검사에 활용성을 고려한 모델을 선보였다. Philips사에서는 기존의 TOF (Time-of-Flight)모델의 3세대 모델인 GEMINI TF Big Bore를 최근 출시하였으며 3세대 모델은 495ps로 1세대의 650ps, 2세대의 575ps보다 더 짧은 시간으로 TOF 성능을 향상시켰다. GE사에서는 Discovery VCT가 심장검사에 좋은 것으로 알려져 있다. 최근에 발전된 기술을 반영한 Discovery PET/CT 600을 선보였다. 같이 소개하고 있는 Discovery PET/CT 690은 연구전용장비로 개발 중에 있는 모델이다. 2009년 미국핵의학회 전시장에 이상의 장비들이 전시되었다(Fig. 5)(Table 1).

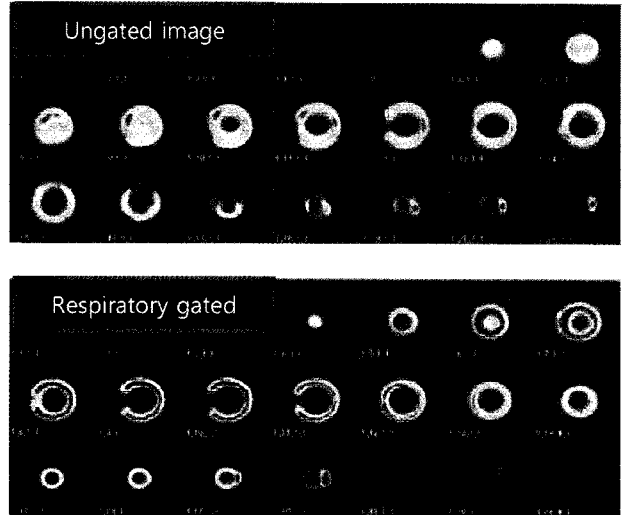
### 심장핵의학을 위한 소프트웨어의 동향

심장핵의학 영상검사를 위한 소프트웨어는 분석용으로 는 지금까지 알려져 있는 QPS/QGS, Emory tool box, 4D

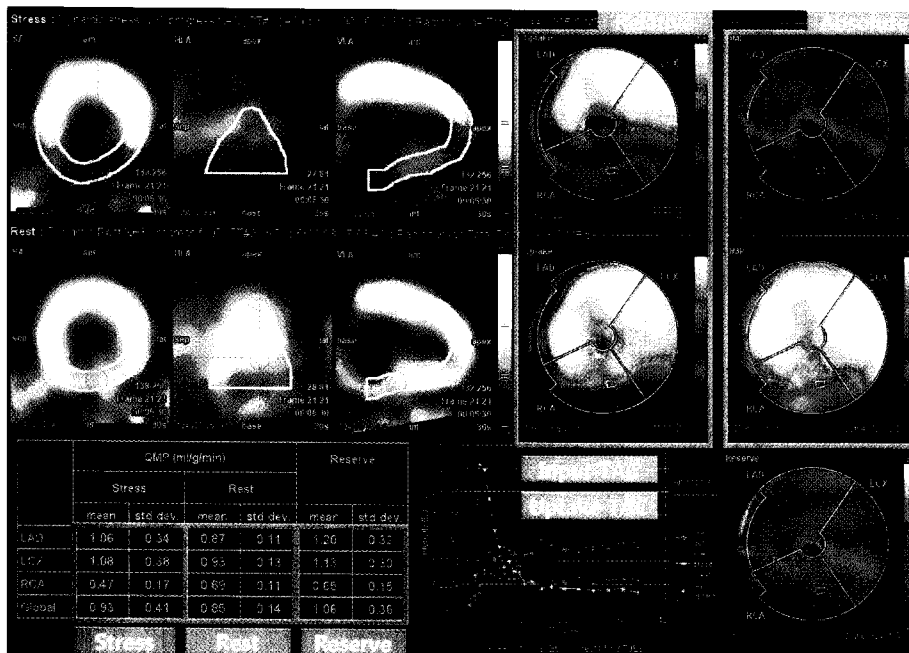
M-SPECT등이 있다. 대표적인 분석도구로 알려진 이 소프트웨어는 이미 많은 병원에서 사용하고 있고, 구혈률, 관류, 심근벽 움직임 등의 정량결과에 대해 임상적 유용성이 이미 오래 전에 평가되었다.<sup>6-8,23)</sup> 극성지도 등을 통하여 가시화 시킨 심근관류정보는 각 픽셀의 방사능 계수를 최대섬취 픽셀에 대한 백분율로 표현하여 분절별 평균값을 보여 준다. 자동화에 대한 처리는 심근을 얼마나 잘 분할 하는가 가 중요한 점이다. 국내에서도 심근의 분할 알고리즘을 개발하고 심기능을 평가하는 연구를 추진하였다.<sup>17,18)</sup> 소프트웨어의 또 다른 응용방법으로는 영상재구성 방법의 개선을 통한 검사시간을 단축하고자 하는 시도를 들 수 있다. GE Healthcare (Haifa, Israel)의 Evolution, Siemens Medical Solutions (Hoffman Estates, IL)의 Flash 3D, UltraSPECT (Haifa, Israel)의 Wide Beam Reconstruction (WBR), DIGIRAD Corporation (Poway, CA)의 nSPEED 그리고 Philips Medical Systems(Milpitas, CA)의 Astonish 등이 있다.<sup>14,19-22)</sup> 대부분 영상재구성 방법을 개선하여 영상질을 개선하고 속도를 개선하였다. SPECT에서 해상도는 방사선원의 위치에 따라 다르고 조준기의 납벽 사이 간격에 따라서도 달라진다. 기존의 영상재구성방법에서는 평행으로 들



**Figure 6.** Location of radionuclide source is important factor for resolution recovery. Arrows indicate additional signal which was not used in former method.



**Figure 7.** Respiratory gated heart images are clearer than ungated images.



**Figure 8.** Myocardial blood flow is measured from newly image processing software. Polar map of relative perfusion data is different from polar map of absolute myocardial blood flow value.

어오는 광자에 대해서만 고려하였지만 최근에는 좌우로 퍼져 들어가는 광자에 대해서도 신호를 수학적으로 계산하여 검출효율을 높였다. 이렇게 되면 예전에 잡음으로 해석되었던 부분이 신호로 고려되므로 잡음감소 효과도 생긴다. 해상도 회복(resolution recovery)이라고 하는 방법은 조준기의 물리적 요소를 다 계산하여야 하며 환자와의 거리 및 음

직입도 계산하여야 하므로 조준기에 따라 모든 정보를 저장하고 있어야 한다(Fig. 6).

따라서 기존 검사시간의 절반 정도의 짧은 시간에 얻은 신호양으로도 비슷한 영상을 얻을 수 있게 되었다. 이러한 소프트웨어를 이용하여 영상획득 시간을 단축하면서 해상도를 유지하게 되었다. 여러 가지 정량항목들을 측정하였을

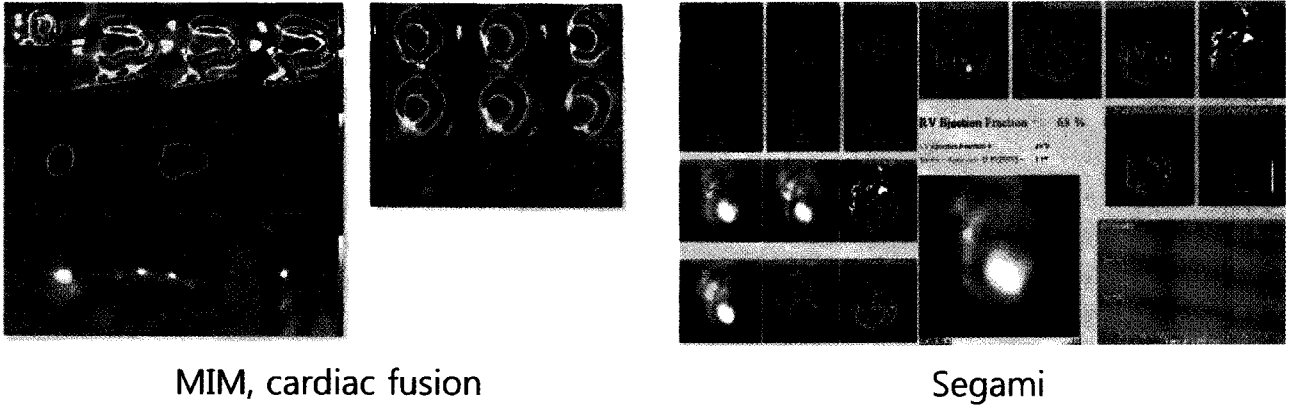


Figure 9. General purpose software for nuclear medicine includes cardiac image analysis tools.

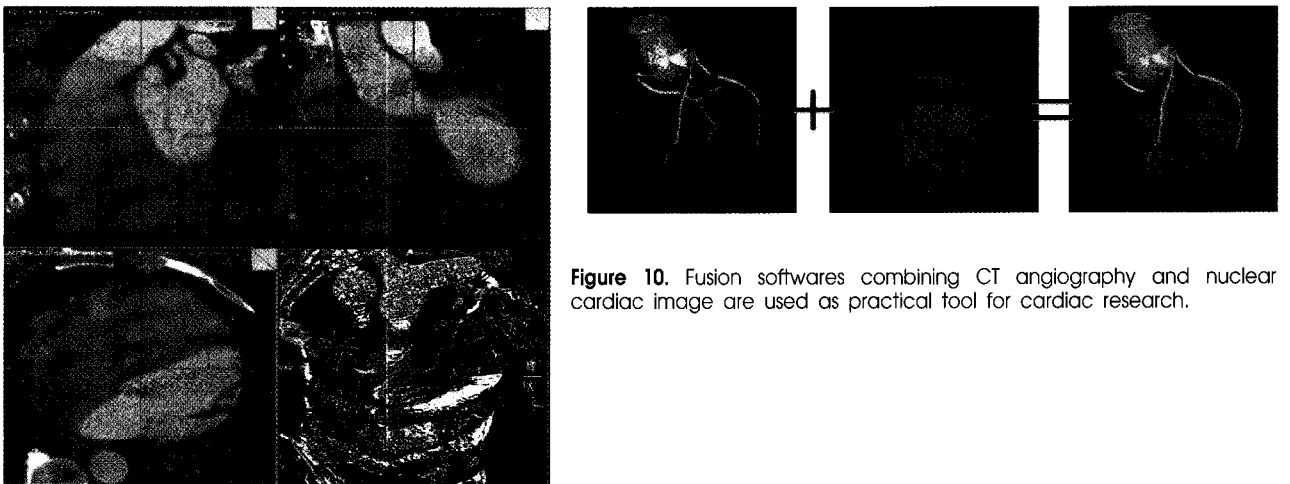


Figure 10. Fusion softwares combining CT angiography and nuclear cardiac image are used as practical tool for cardiac research.

때에도 기존의 방법으로 얻었을 때와 상관성이 높은 것으로 전반적으로 평가되고 있다.

PET을 위한 소프트웨어에는 최근에 움직임 보정에 관련한 부분에 관심이 많이 모아지고 있다. 움직임 보정은 오래 전부터 연구되어온 분야이다. 호흡으로 인한 움직임이나 검사시간이 길어지면서 생기는 환자의 움직임을 보정하는 기술을 연구해온 팀들이 있다.<sup>24,25)</sup> 심장은 대표적인 움직이는 기관이므로 호흡연동 움직임 보정기술을 이용하여 심장영상을 개선하는 보고가 있었다.<sup>26)</sup> CT와 phase 일치 방법을 통한 심장영상 움직임 보정을 연구한 발표도 있었다(Fig. 7).<sup>27,28)</sup>

PET 심장영상의 분석에는 대부분 SPECT에서 사용해오던 분석 소프트웨어를 같이 사용해 왔다. PET에서 필요로 하는 심근혈류는 연구자가 개발하여 결과를 만들어 왔기 때문에 전용소프트웨어를 일반적으로 구축하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이를 위해서는 동적 PET을 시행하고 추적자 역학 기법을 이용한 분석도구가 필요하기 때문에 장비와 인력의

조건에 따라 시행에 어려운 점이 있었다. 최근 Siemens사에서 심근절대혈류량 분석 소프트웨어인 Dynamic Quantitative MPI를 개발하였다(Fig. 8). 좌심실 풀에 대한 입력함수와 심근에 대한 변화량을 3구획모델로 분석하여 결과를 보여주고, 결과 값을 영상화하여 극성지도로 표현해 주어 심장핵의학 연구자들이 관류와 혈류 및 심기능의 상관성을 쉽게 파악할 수 있게 하였다.

심장핵의학 영상의 분석을 위한 소프트웨어로 범용적인 핵의학 영상소프트웨어 개발회사들이 판매하는 제품들이 있다. 심장뿐만 아니라 뇌영상, 전신영상 등에 대해 분석 및 융합영상, 가시화 기술 등을 다루고 있어서 기능적인 분석이 필요한 데이터를 이용하여 다양한 실험을 할 수 있도록 도와준다. MIM (MIMvista Corp.)은 심장영상에서 자동적 분할을 통해 심기능을 평가하고 CTCA 융합영상을 가시화해 준다. 특히 부하기와 휴식기간의 차이에 대한 부분을 영상으로 표현해 주고 그 결과를 차이값으로 보여주던지 백분율로 나타내 준다. Segami (Segami Corp.)는 구혈률 뿐

만 아니라 amplitude와 phase에 대한 영상을 제공해 준다. Hermes (Hermes medical solutions Inc.)는 여러 가지 소프트웨어를 선택적으로 사용할 수 있도록 하면서 자체 개발한 소프트웨어를 통하여 영상재구성 및 분석을 하도록 해 준다. 심장영상 재구성 소프트웨어로 PERFIT가 있으며, 분석 소프트웨어로 FUGA가 있다. 대부분의 핵의학 영상 기기 및 PACS를 서비시스템에 연결할 수 있도록 하여 클라이언트 터미널을 통해 작업을 하게 함으로써 큰 규모의 병원에서 사용하기에 적합하다(Fig. 9).

## 심장핵의학 연구의 방향

심장핵의학 검사는 기본적으로 검사 프로토콜의 안정성이 향상되어 진단의 정확도를 높이고 검사시간을 단축함으로써 환자의 편의성을 증대시키는 방향으로 발전되고 있다. 뿐만 아니라 심장의 다양한 병태생리를 평가할 수 있는 전용 방사성의약품의 개발과 CT를 포함한 타영상 기기와 연계하는 검사 방법의 개발 및 분석방법의 개발이 심장핵의학 검사에 중요한 방향이 되고 있다. 두 가지 방사성의약품을 사용한 동시검사 방법을 통한 심장의 여러 가지 기능을 동시에 평가하는 방법이나 정량화 결과를 이용하여 다른 진단기기와의 상관성을 분석하는 방법들이 지금까지 많이 연구되어 오고 있고, 감쇄보정을 위한 기술개발에 CT의 활용이 연구되었다.<sup>29)</sup> 최근에는 CT와 MR과 같은 영상장비 및 관련 소프트웨어의 발전으로 인해 심장핵의학 연구의 상당부분이 융합기술 기반으로 진행되고 있다. 그 중에서 최근 몇 년간 심근관류 SPECT와 CT 혈관촬영술을 융합시킨 영상을 통하여 영상기기간에 장점을 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Fig. 10).<sup>30,31)</sup> CT 뿐만 아니라 해부학적 정보를 잘 보여주는 MR이나 초음파 등도 핵의학 영상과 같이 심근관류정보가 진단성능향상에 도움이 된다고 보고되고 있다.<sup>32-35)</sup> 좌심실 분리를 위한 알고리즘의 개발 및 정량화 평가방법의 개발도 계속 발전하고 있으며, 자동 분할기능이나 위상분석(phase analysis), 그리고 결과값에 대한 방법론 비교연구가 보고되고 있다.<sup>36-42)</sup>

PET을 이용한 심장핵의학 검사는 심근관류의 정량화가 가능하면서도 심근혈류를 측정할 수 있고, 기존의 SPECT 영상에 비해 짧은 검사시간에 우수한 해상도의 영상을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 PET은 <sup>18</sup>F-FDG를 같이 이용함으로써 심근의 생존능 평가에도 이용되고 있어서 심장핵의학에서 유망한 검사방법이라고 할 수 있다. 다만 심장핵의학 영상에서 PET의 비용대비 검사효율에 대한 부분은 향후 다양한 방법으로 검증되어야 할 것이다.

## 고찰 및 결론

심장핵의학을 위한 최근 영상기기와 연구방법의 동향에 대해 고찰 하였다. 세계적인 추세를 볼 때 향후 뇌영상 검사와 함께 심장핵의학 검사는 관심이 증가 될 가능성이 높다. 하지만 우리나라에서 심장핵의학 검사 및 이에 대한 연구가 더욱 활성화 되기 위해서는 핵의학 임상과의 핵과학자간의 긴밀한 연계를 통한 심장핵의학 검사의 역할과 중요성을 재정립하는 것이 필요하다. 국내에서도 최근 몇 년간 심근관류 SPECT와 CT 혈관촬영술 융합연구가 심장핵의학 연구회를 통하여 활발히 진행되고 있다. 심근관류, 심근대사, 생존능평가, 새로운 심기능 평가방법의 개발과 함께 CT, MR의 장점을 활용한 융합연구에 대해 선도적인 심장핵의학 연구가 계속적으로 추진될 필요가 있다. 융합 연구를 통하여 관상동맥 및 그 분지영역의 관류 상태뿐만 아니라 해부학적 영상 소견에 따른 환자의 치료효과 및 예후가 어떻게 달라지는지에 대한 종합적이고 장기적이면서 다면적인 평가가 추진되어야 할 것이다. 하지만 아직은 환자의 본인 부담금이 높은 의료보험 수가체계의 문제가 있으며, 다양한 방사성의약품의 개발 및 도입 등 여러 가지 현실적인 문제를 병행하여 재정비 해야 하는 과제를 안고 있다.

현재까지 이렇게 심장핵의학 영상검사는 기능적 영상을 통하여 심장질환이 있는 환자의 평가에 유용하게 자리를 잡고 있다. 대한핵의학회에서는 심장핵의학연구회를 통하여 검사프로토콜이나 진단성능에 대한 연구를 추진해 오고 있다. 앞으로 심장핵의학 영상검사가 임상핵의학, 분자핵의학, 종양핵의학 등의 발전과 새로운 영상장비의 도입과 더불어 더욱 활발한 기초연구 및 융합영상 기술개발을 선도할 것을 기대한다.

## 요 약

국내에서 심장핵의학은 종양검사만큼 널리 사용되고 있는 검사는 아니지만 최근 들어 점점 전문화, 세분화되고 있다. 최근 새로운 영상장비의 개발로 인해 심장핵의학 검사는 환자에게 더욱 편의성을 제공하는 방향으로 발전 하고 있다. 심근관류영상은 심기능 평가에 이미 잘 알려져 있는 검사이다. 양전자방출단층촬영기와 단일광자방출단층촬영기는 방사성의약품을 사용하여 관상동맥질환의 평가에 오랫동안 사용되어 왔다. 하지만 최근 개발된 영상장비 및 소프트웨어는 다중핀홀 기술이나 고속영상 기법 등의 개발로 검사시간의 단축과 연구의 활용성도 항상 시켰다. 따라서 관련된 장비의 특징 및 관련된 하드웨어나 소프트웨어 그

리고 관심 있는 연구에 대한 검토가 필요하다. 이 종설에서는 심장핵의학 분야에 사용 가능하도록 개발된 전용 단일 광자방출단층촬영기와 양전자방출단층촬영기 그리고 범용 소프트웨어에 대한 최근 특징들을 설명하였다. 이러한 정보가 최근 융합영상 연구로 다시 활기를 띠고 있는 국내 심장핵의학 연구의 발전에 도움이 되길 기대한다.

## References

1. Keiichiro Y, Benjamin JC, Kathryn W, Li C, Robert AD, Linda G, et al. What is the prognostic value of myocardial perfusion imaging using rubidium-82 positron emission tomography? *J Am Coll Cardiol* 2006;48:1029-39.
2. Schelbert HR, Phelps ME, Huang SC, MacDonald NS, Hansen H, Selin C, et al. N-13 ammonia as an indicator of myocardial blood flow. *Circulation* 1981;63:1259-72.
3. Hutchins GD, Schwaiger M, Rosenspire KC, Krivokapich J, Schelvert H, Kuhl DE. Noninvasive quantification of regional blood flow in the human heart using N-13 ammonia and dynamic positron emission tomographic imaging. *Circulation* 1992;86:1004-17.
4. Choi Y, Huang SC, Hawkins RA, Kuhle WG, Dahlbom M, Hoh CK, et al. A simplified method for quantification of myocardial blood flow using nitrogen-13-ammonia and dynamic PET. *J Nucl Med* 1993;34:488-97.
5. Machac J. Cardiac positron emission tomography imaging. *Semin Nucl Med* 2005;35:17-36.
6. Germano G, Kiat H, Kavanagh PB, Moriel M, Mazzanti M, Su H-T, et al. Automatic quantification of ejection fraction from gated myocardial perfusion SPECT. *J Nucl Med* 1995;36:2138-47.
7. Germano G, Erel J, Jewin H, Kavanagh PB, Berman DS. Automatic quantitation of regional myocardial wall motion and thickening from gated technetium-99m sestamibi myocardial perfusion single-photon emission computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 1997;30:1360-7.
8. Germano G, Kavanagh PB, Waechter P, Areeda J, Van Kriekinge S, Sharir T, et al. A new algorithm for the quantitation of myocardial perfusion SPECT. I: technical principle and reproducibility. *J Nucl Med* 2000;41:712-9.
9. Cuocolo A, Acampa W, Imbriaco M, De Luca N, Iovino GL, Salvatore M. The many ways to myocardial perfusion imaging. *Nucl Med Mol Imaging* 2005;49:4-18.
10. Travin MI, Heller GC, Johnson LL, Katten D, Ahlberg AW, Isasi CR, et al. The prognostic value of ECG-gated SPECT imaging in patients undergoing stress Tc-99m sestamibi myocardial perfusion imaging. *J Nucl Cardiol* 2004;11:253-62.
11. James AP, David WT, Brian FH. Hybrid imaging technology: from dream and vision to clinical devices. *Semin Nucl Med* 2009;39:247-63.
12. Gambhir SS, Berman DS, Ziffer J, Nagler M, Sandler M, Patton J, et al. A novel high-sensitivity rapid-acquisition single-photon cardiac imaging camera. *J Nucl Med* 2009;50:635-43.
13. Frans H, Brendan V, Ruud MR, Woutjan B, Jens OK, Changguo J, et al. U-SPECT-II: An ultra-high-resolution device for molecular small-animal imaging. *J Nucl Med* 2009;50:599-605.
14. Ernest VG, Tracy LF. New trends in camera and software technology in nuclear cardiology. *Cardiol Clin* 2009;27:227-36.
15. Sharir T, Ben-Haim S, Merzon K, Prochorov V, Dickman D, Ben-Haim S, et al. High-speed myocardial perfusion imaging initial clinical comparison with conventional dual detector angler camera imaging. *JACC Cardiovasc Imaging* 2008;1:156-63.
16. Berman DS, Kang X, Tamarappoo B, Wolak A, Hayes SW, Nakazato R, et al. Stress thallium-201/rest technetium-99m sequential dual isotope high-speed myocardial perfusion imaging. *JACC Cardiovasc Imaging* 2009;2:273-82.
17. Lee BI, Lee DS, Lee JS, Choi HK. Development of gated myocardial SPECT analysis software and evaluation of left ventricular contraction function. *Korean J Nucl Med* 2003;37:1-10.
18. Lee BI, Lee DS, Lee JS, Kang WJ, Chung J-K, Lee MC, et al. Development of evaluation method of regional contractility of left ventricle using gated myocardial SPECT and assessment of reproducibility. *Korean J Nucl Med* 2003;37:355-63.
19. Ali I, Ruddy TD, Almgrahi A, Anstett FG, Wells RG. Half-Time SPECT myocardial perfusion imaging with attenuation correction. *J Nucl Med* 2009;50:554-62.
20. DePuey EG, Gadiraju R, Clark J, Thompson L, Anstett F, Shwartz SC. Ordered subset expectation maximization and wide beam reconstruction "half-time" gated myocardial perfusion SPECT functional imaging: a comparison to "full-time" filtered backprojection. *J Nucl Cardiol* 2008;15:547-63.
21. Maddahi J, Mendez R, Mahmarian JJ, Thomas G, Babla H, Bai C, et al. Prospective multicenter evaluation of rapid, gated SPECT myocardial perfusion upright imaging. *J Nucl Cardiol* 2009;16:351-7.
22. Steele PP, Kirch DL, Koss JE. Comparison of simultaneous dual-isotope multipinhole SPECT with rotational SPECT in a group of patients with coronary artery disease. *J Nucl Med* 2008;49:1080-9.
23. Faber TL, Cooke CD, Folks RR, Vansant JP, Nichols KJ, DePuey EG, et al. Left ventricular function and perfusion from gated SPECT perfusion images: an integrated method. *J Nucl Med* 1999;40:650-9.
24. Bai W, Brady M. Regularized B-spline deformable registration for respiratory motion correction in PET images. *Phys Med Biol* 2009;54:2719-36.
25. Lamare F, Ledesma MJ, Cresson T, Kontaxakis G, Santos A, Le Rest CC, et al. List-mode-based reconstruction for respiratory motion correction in PET using non-rigid body transformations. *Phys Med Biol* 2007;52:5187-204.
26. Livieratos L, Rajappan K, Stegger L, Schafers K, Bailey DL, Camici PG. Respiratory gating of cardiac PET data in list-mode acquisition. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2006;33:584-8.
27. Fin L, Daouk J, Morvan J, Bailly P, El Esper I, Saidi L, et al. Initial clinical results for breath-hold CT-based processing of respiratory-gated PET acquisitions. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2008;35:1971-80.
28. Santana CA, Garcia EV, Faber TL, Sirineni GK, Esteves FP, Sanyal R, et al. Diagnostic performance of fusion of myocardial perfusion imaging (MPI) and computed tomography coronary angiography. *J Nucl Cardiol* 2009;16:201-11.
29. Slomka PJ, Le Meunier L, Hayes SW, Acampa W, Oba M, Haemer GG, et al. Comparison of myocardial perfusion 82Rb PET performed with CT- and transmission CT-based attenuation correction. *J Nucl Med* 2008;49:1992-8.
30. Henneman MM, Chen J, Dibbets-Schneider P, Stokkel MP, Bleeker GB, Ypenburg C, et al. Can LV dyssynchrony as assessed with phase analysis on gated myocardial perfusion SPECT predict response to CRT? *J Nucl Med* 2007;48:1104-11.



31. Lalonde L, Ziadi MC, Beanlands R. Cardiac positron emission tomography: current clinical practice. *Cardiol Clin* 2009;27: 237-55.
32. Wang F, Zhang J, Fang W, Zhao SH, Lu MJ, He ZX. Evaluation of left ventricular volumes and ejection fraction by gated SPECT and cardiac MRI in patients with dilated cardiomyopathy. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2009; Apr 18. Epub
33. Petersen SE, Jung BA, Wiesmann F, Selvanayagam JB, Francis JM, Hennig S, et al. Myocardial tissue phase mapping with cine phase contrast MR imaging; regional wall motion analysis in healthy volunteers. *Radiology* 2006;238:816-26.
34. Henneman MM, Chen J, Ypenburg C, Dibbets P, Bleeker GB, Boersma E, et al. Phase analysis of gated myocardial perfusion single-photon emission computed tomography compared with tissue doppler imaging for the assessment of left ventricular dyssynchrony. *J Am Coll Cardiol* 2007;49:1708-14.
35. Nekolla SG, Martinez-Moeller A, Saraste A. PET and MRI in cardiac imaging: from validation studies to integrated applications. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2009;36(Suppl 1):S121-30.
36. Goernig M, Haueisen J, Schreiber J, Leder U, Hänninen H, Mäkelä T, et al. Comparison of current density viability imaging at rest with FDG-PET in patients after myocardial infarction. *Comput Med Imaging Graph* 2009;33:1-6.
37. Helen S, Joey FU, Martin U, Håkan A, Einar H. An improved method for automatic segmentation of the left ventricle in myocardial perfusion SPECT. *J Nucl Med* 2009;50:205-13.
38. Serge VK, Hidetaka N, Muneo O, Daniel SB, Guido G. Automatic global and regional phase analysis from gated myocardial perfusion SPECT imaging: application to the characterization of ventricular contraction in patients with left bundle branch block. *J Nucl Med* 2008;49:1790-7.
39. Daniela K, Oliver HW, Philipp TM, Mardjan R, Thomas K, Karl-Christian K, et al. Gated myocardial perfusion SPECT: algorithm-specific influence of reorientation on calculation of left ventricular volumes and ejection fraction. *J Nucl Med* 2008; 49:1636-42.
40. Ankit C, Michele B, Riikka L, Corina V, Jennifer M, Frank MB. Comparison of measures of left ventricular function from electrocardiographically gated <sup>82</sup>Rb PET with contrast-enhanced CT ventriculography: a hybrid PET/CT analysis. *J Nucl Med* 2008;49:1643-50.
41. Iskandrian AE, Garcia EV, Faber T, Mahmarian JJ. Automated assessment of serial SPECT myocardial perfusion images. *J Nucl Cardiol* 2009;16:6-9.
42. Suzuki Y, Slomka PJ, Wolak A, Ohba M, Suzuki S, De Yang L, et al. Motion-frozen myocardial perfusion SPECT improves detection of coronary artery disease in obese patients. *J Nucl Med* 2008;49:1075-9.