JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(4) : 391-396 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.391

PET-MRI에 대한 최적의 정보 제공에 대한 연구: 문헌 보고 중심으로

손동섭[1], 구은회[1,*]

[1]청주대학교 보건의료과학대학 방사선학과

A Study on the Optimal Information Provision for PET-MRI: Focused on Literature Article

DongSeob Son[1] and EunHoe Goo[1,*]

[1]Department of Radiological Science, Cheongju University, 298, Daeseong-ro, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do 28503, Republic of Korea

Abstract Currently, state-of-the-art devices such as SPECT, PET/CT, and PET/MRI are rapidly spreading nationwide, and the penetration rate of nuclear medical devices is also ranked fifth in the world. However, PET/MRI's system is slower and less common because it is more complex than PET/CT. The purpose of this study is to provide optimal information on PET/MRI according to the patient's disease. The subjects obtained information on head and neck cancer, pediatric patients, breast cancer patients, heart disease patients, lung cancer patients, and rectal cancer patients. We tried to accumulate protocols by obtaining a lot of information about each disease. In diagnosing head and neck cancer, it is believed that it is highly likely to be used in evaluating preoperative stage determination, recurrence and remote metastasis after treatment, and unclear primary cervical lymph node metastasis. Diagnosis and continuous follow-up of pediatric patients can increase patient benefits by minimizing radiation exposure. Breast cancer provides a comprehensive evaluation of the clinical need to determine the extent of disease in breast and local lymph nodes and the systematic stages of early diagnosis or recurrence. In diagnosing heart disease patients, MR-based PET motion correction helps to realize the full potential of PET images. For lung cancer patients, the clinical value and usefulness of the resolution and detection ability of integrated PET/MRI for soft tissues such as lung cancer will be sufficient. In diagnosing rectal cancer patients, the detection of missing residual diseases can change the clinical response evaluation for rectal cancer patients treated with TNT, and both the initial stage and treatment response evaluation are possible. Therefore, this literature study provided basic clinical data for PET/MRI tests.

Key words: PET/MRI, MRI

1. 서 론

PET/MRI (양전자 방출 단층 촬영/자기공명영상)는 양전자를 방출하는 방사선 의약품을 사용하여 3차원적인 영상으로 표현하는 양전자 방출 단층 촬영과 인체 내 수소 원자핵의 자기적 특성을 이용한 자기공명영상을 통합한 하이브리드 영상 장비이다. 양전자는 반전자라고도 불리며, 전자와 전하 켤레 대칭 관계에 있는 반물질 입자이다. 양전자는 불안정한 Carbon-11, Nitrogen-13, Oxygen-15, Fluorine-18 등이 붕괴할 때 방출된다. 기존의 영상 장비들

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author. EunHoe Goo
Tel. +82-43-229-7994 Fax. +82-43-229-7947 E-mail. gooeh@cju.ac.kr
Received 1 November 2023 Revised 30 November 2023 Accepted 6 December 2023

과 비교하였을 때, 최근 양전자 단층 촬영(Positron Emission Tomography)과 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging)은 일체형 시스템으로 개발되고 있고, 임상 적용에 관하여 다양한 연구들이 진행되고 있다[1-3]. 양전자 단층 촬영 검출기와 자기공명영상 코일을 일체형으로 제작하여 동시에 얻을 수 있는 데이터들을 신속하게 얻을 수 있게 되었다[4]. 양전자 방출 단층 촬영은 방사성 동위원소를 사용하여 인체의 생리·화학적, 기능적 영상을 3차원으로 구현하는 핵의학 검사 방법 중 하나이다. 양전자 단층 촬영을 이용해 뇌 질환과 심질환 평가를 위한 영상을 획득할 수 있다[5,6]. 이에 비하여 임상적으로 양전자 단층 촬영과 비슷한 역할을 하고 있는 컴퓨터 단층 촬영(Computed Tomography)이나 자기공명영상은 몸속에 구조적 변화가 나타나야 진단을 할 수 있게 된다. 그러나 대부분 질병은 기능적인 변화가 일어난 후 구조적인 변화가 일어나기 때문에 양전자 단층 촬영은 컴퓨터 단층 촬영이나 자기공명영상보다 먼저 진단할 수 있다. 이러한 이유로 어떤 사람들은 컴퓨터 단층 촬영이나 자기공명영상이 육안적 변화를 나타낸다면 양전자 단층 촬영은 현미경적 변화를 나타낸다고 말하기도 한다. 양전자 방출 단층 촬영의 감도는 일반적으로 단일 광자 방출 컴퓨터 단층 촬영(Single Photon Emission Computed Tomography)보다 높다. 하지만, 방사선에 의한 피폭이 있고, 이용할 수 있는 방사성 동위원소의 종류가 적다. 또한, 해상도는 낮은데 대조도가 높은 단점이 있다. 이러한 단점을 보안하기 위하여 해상도가 뛰어난 컴퓨터 단층 촬영이나 자기공명영상의 영상을 양전자 단층 촬영영상과 합치는 방법을 모색하게 되었다. 양전자 단층 촬영과 자기공명영상의 영상 장치를 결합하는 것은 양전자 단층 촬영과 컴퓨터 단층 촬영의 결합 시스템보다 복잡하여 느린 개발이 되었다. PET/MRI 기기는 양전자 단층 촬영과 자기공명영상의 두 시스템을 합쳐서 새로운 PET/MRI 시스템의 개발 및 더욱 더 신속한 영상 획득을 목표로 하고 있다[7]. PET/MRI 영상의 임상적 우위는 PET/MRI 시스템의 발달에 있어 중요한 문제이다. 자기공명영상은 양전자 단층 촬영이 제공하는 기능 및 생화학적 정보와 컴퓨터 단층 촬영이 가지고 있는 뛰어난 공간분해능의 장점을 갖춘 영상 진단 기기로서 방사선의 피폭이 없으며, 연부 조직에 대한 대조도가 우수하다[8-10]. 임상으로는 두경부 암 진단에 주로 활용되고 있다. 간 전이와 같은 특정 질병의 영상화는 PET/MRI로부터 고유한 이점을 제공한다[11]. PET/MRI에 관한 연구는 다른 방사선 장비들보다 더딘 개발에 있다. 현재 국내 PET/MRI 검사 기기가 매우 부족하고, 국내뿐만 아니라 해외의 자료마저 질환별 선행 연구 자료가 부족한 상황이다. 따라서 두경부암 환자, 유방암 환자, 소아 환자, 심장 질환 환자, 직장암 환자, 폐암 환자 총 6가지의 질환에 대한 자료를 조사하였으며, 본 논문은 문헌 조사를 통해서 검사 방법에 대하여 적립하고자 하였고, 향후 후속 연구자들에게 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 대상 및 방법

2.1. 감쇄 보정

PET/MRI에서 이용되는 기법에는 감쇄 보정 기법을 사용하고 있다. 'Atlas/Template 감쇄 보정법'과 'Segmentation MRI 감쇄 보정법'으로 크게 두 가지로 나뉘어진다. 'Atlas/Template 감쇄 보정법'은 피사체에 대한 자기공명영상의 영상을 얻으면 이를 기반으로 하여 표준화된 μ-map을 적용하여 감쇄 보정하는 기법이다. 이 기법은 각 부위별로 정확한 감쇄 보정이 가능하다. 하지만 단점으로는 피사체 간의 다양한 변화를 반영하지 못한다(Fig. 1).

'Segmentation MRI 감쇄 보정법'은 자기공명영상의 영상을 촬영하면 여러 가지 수학적 변환을 하여 μ-map을 직접 만들어서 감쇄 보정하는 기법이다. 이 방법은 다양한 체내 물질에 대한 μ-map이 설정되지 못하는 단점이 있다. 이 방법을 위해 Siemens사에서는 'VIBE-DIXON'이라는 Sequence를 사용하고 있고, Philips사에서는 'THRIVE-MDIXON', GE사에서는 'LAVA'가 사용되고 있다. 이 Sequence를 사용하면 네 가지 구획화된 구역의 영상을 가진다. In-phase, Opposite-phase, Fat-saturation, Water-saturation 영상들이 만들어지게 된다(Fig. 2).

2.2. 적용 분야의 대상

첫째, 두경부 암 환자는 5개의 논문을 적용하여 149명 환자를 선정하였다. 환자들의 평균연령은 57.34세, 남성 103명, 여성 46명으로 선정하였다. 둘째, 소아 환자는 2개의 논문을 적용하여 27명 소아 환자를 선정하였다. 소아 환자의 연령은 5~17세를 대상으로 하였다. 환자들의 평균연령은 13.9±2.9세였다. 셋째, 유방암 환자는 3건의 논문을 적용하여 61명의 유방암 환자를 선정하였다. 환자들의 평균연령은 51세, 여성 61명으로 선정하였다. 넷째, 심질환

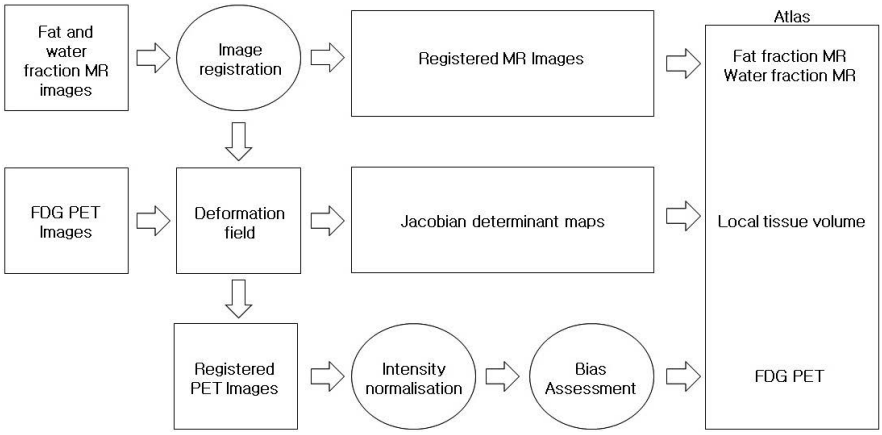

Fig. 1. Atlas/Template Attenuation Correction. Input and output image data and key processes for generating multi-parameter atlas.

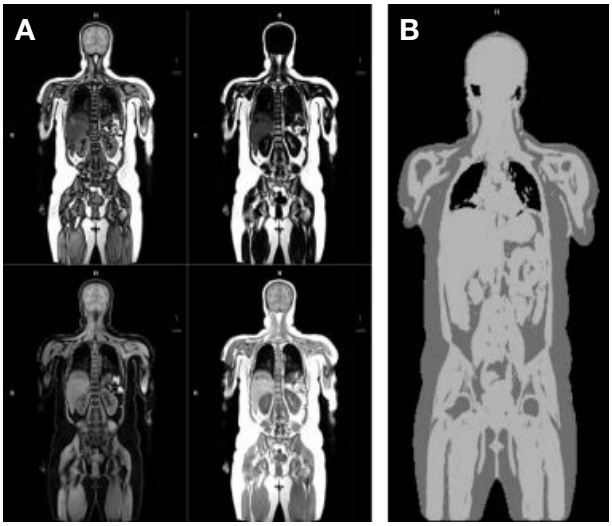

Fig. 2. In order to create a μ-map (B) image, a VIBE-DIX sequence including four regions, (A) is required.

환자는 3건의 논문을 적용하여 65명의 심질환 환자를 선정하였다. 환자들의 평균연령은 54.5세, 남성 39명, 여성 26명으로 선정하였다. 다섯째, 폐암 환자는 4건의 논문을 적용하여 165명의 폐암 환자를 선정하였다. 환자들의 평균연령은 67.1세, 남성 124명, 여성 41명을 선정하였다. 여섯째, 직장암 환자는 2건의 논문을 적용하여 14명의 직장암 환자를 선정하였다. 환자들의 평균 연령은 51.6세, 남성 7명, 여성 7명으로 선정하였다.

2.3. 적용 분야의 장비

첫째, 두경부 암 환자, 유방암 환자는 Biograph™ mMR 3T (SIEMENS, Munich)를 사용하여 실험하였다. 몸통 스캔은 Body TIM (Total Imaging Matrix) 코일을 장착한 후 VIBE (Volumetric Interpolated Breath-Hold Examination)-Dixon 시퀀스를 사용하였다. 둘째, 소아 환자는 PET/MRI 스캐너 (BiogrammMR Siemens Healthineers)를 사용하여 PET 및 MR 영상을 동시에 획득하였다. 셋째, 심장 질환 환자는 통합 3T 스캐너 (Signa PET/MR, GE Healthcare, Waukesha, WI)에서 수행되었다. 넷째, 폐암 환자는 Biograph™ mMR 3T (Siemens, Munich)를 사용하였다. 다섯째, 직장암 환자는 GE Healthcare의 Signa PET/MRI를 사용하였다.

2.4. 검사 방법

두경부 환자의 경우 PET 검출기 삽입물과 통합 스캐너를 사용하여 수행하였다. 획득 자체는 12개의 수신 채널이 있는 자기 공명 헤드 코일에서 PET 및 MRI 스캔을 동시에 수행하였다. 소아 환자의 경우 Siemens e7-tool을 사용하여 각 환자에 대해 6개의 시뮬레이션 이미지를 재구성했다. 유방암 환자의 경우 전신 PET/MRI는 환자가 표면 무선 주파수 코일을 사용하여 반듯이 누운 자세로 수행되고 전용 유방 PET/MRI는 전용 유방 코일을 사용하여 엎드린 자세로 수행되었다. 심질환 환자의 경우 동시에 획득한 PET 및 MR 데이터에서 호흡 유도 심장 운동을 보정하기 위해 비강성 호흡 운동 보상 CMRA (Cardiovascular Magnetic Resonance Angiography) 접근법을 사용했다. 폐암 환자의 경우 실험군의 CEA (Carcino-Embryonic Antigen)와 PET/MRI의 두 진단 정보를 판정 행렬의 각 항목에 기입하여 결과를 산출하였다. 직장암 환자의 경우 단기 방사선 치료와 통합 화학 요법 (mFOLFOX6, CAPOX)으로 구성된 TNT 기법을 이용하였다.

2.5. 매개 변수

Table 1. Parameters for head and neck cancer, breast cancer, and pediatric patients

	Head and Neck cancer	Breast cancer	Pediatric patients
Parameter	Condition	Condition	Condition
TR	3.60	3.60	3.60
TE 1	1.23	1.23	1.23
TE 2	2.46	2.46	2.46
Coil	Head and Neck TIM	Body TIM	Body TIM
Attenuation	UTE	VIBE-Dixon	VIBE-Dixon
Reconstruction	3D iterative	3D iterative	3D iterative
Iteration	5	2	2
Subset	21	21	21
Matrix	344	192	79
Filter	Gaussian	Gaussian	Gaussian
FWHM	4.0	6.0	4.0

The UTE technique was used for head and neck cancer patients, and the VIBE-Dixon technique was used for breast cancer and pediatric patients.

Table 2. Parameters for heart diesease, lung cancer, and rectal cancer

	Heart disease	Lung cancer	Rectal cancer
Parameter	Condition	Condition	Condition
TR	3.60	3.60	4.7
TE 1	1.23	1.23	1.9
TE 2	2.46	2.46	3.8
Coil	Body TIM	Body TIM	Endorectal
Attenuation	LAVA	VIBE-Dixon	LAVA
Reconstruction	3D iterative	3D iterative	3D iterative
Iteration	2	2	2
Subset	21	21	21
Matrix	172	192	256
Filter	Gaussian	Gaussian	Gaussian
FWHM	6.0	6.0	4.0

LAVA techniques were used for heart disease and rectal cancer patients, and VIBE-Dixon techniques were used for lung cancer patients.

3. 결 과

3.1. 두경부 암 환자에 대한 결과

PET/MRI 검사 결과에서 두경부 암 환자의 림프절 전이 양성 판정을 받은 경우는 49건, 음성 판정을 받은 경우는 51건이었다. 수술 전, 후 병리학적 결과를 통하여 림프절 전이 음성 및 양성 판정을 받은 경우는 각 54건, 46건으로 나타났다. 두 검사 모두 양성 판정을 받은 진양성은 45건, 두 검사 모두 음성 판정을 받은 진음성은 50건, PET/MRI 검사에서 음성이지만 병리학적 검사에서 양성 판정을 받은 위음성은 1건, PET/MRI 검사에서는 양성이지만 병리학적 검사에서 음성 판정을 받은 위양성은 4건으로 분석되었다. 두경부 암 환자의 PET/MRI 검사의 위음성률은 2.0%, 위양성률은 7.0%, 예민도는 95.7%, 특이도는 93.6%, 정확도는 96.2%의 수치로 계산되었다.

3.2. 소아 환자에 대한 결과

평균 부피가 14.2 mL인 FTA 영상에서 56개의 병변이 검출되었다. 볼륨이 5 mL 미만인 병변은 부분 볼륨 효과를 최소화하기 위해 분석에서 제외되었다. 따라서 총 27개의 병변이 분석에서 고려되었다(평균 볼륨 26.7±29.2 mL, 범위 5.2~135.1 mL).

3.3. 유방암 환자에 대한 결과

유방암이 확인되거나 의심되는 36명의 여성을 대상으로 한 연구에서 Moy 등은 유방 MRI만으로도 매우 민감하지만(96%) 엎드린 FDG PET과 유방 MRI를 결합하면 MRI만으로 77%에서 98%로 양성 예측값이 증가한다는 것을 발견했다. 또한 융합 PET/MRI는 MRI만으로도 53%에서 97%로 특이성을 높였다. 전체 정확도는 융합 PET/MRI로 89%, 유방 MRI로만 78%였다.

3.4. 심질환 환자에 대한 결과

FDG PET은 민감도 74%, 특이도 97%의 수치를 보였다. 심혈관 운동의 경우 MR 영상의 경우 제안된 기법을 적용했을 때 무동작 보정에 비해 오른쪽 관상동맥과 왼쪽 전방 하행동맥의 가시 길이가 평균 45.53%, 75.45%, 선명도가 각각 56.44%, 51.11% 증가했다. PET 이미지의 경우 제안된 기술은 노이즈 및 평균 SUV 측면에서 무동작 보정을 능가하고 노이즈 측면에서 게이트 접근을 능가했다.

3.5. 폐암 환자에 대한 결과

폐암 진단을 위해 시행한 핵의학 PET/MRI 검사는 음성 83건, 양성 83건, 혈액학적 암태아성항원 검사는 양성 84건, 음성 81건이었다. 암태아성항원 검사를 통하여 양성 판정을 받았지만, PET/MRI 검사에서 음성 판정을 받은 위

음성은 3건이었으며, 암태아성항원과 PET/MRI 두 검사에서 모두 음성 판정을 받은 진음성은 80건으로 나타났다. 두 검사를 통하여 모두 양성 판정을 받은 진양성은 78건, 암태아성항원 검사를 통하여 음성 판정을 받았지만, PET/MRI 검사에서는 양성 판정을 받은 위양성은 4건으로 나타났다. 암태아성항원 검사를 통하여 폐암 양성 판정이었지만, PET/MRI 검사에서 음성 판정을 받은 위음성은 3건이었으며, 암태아성항원과 PET/MRI 두 검사에서 모두 음성 판정을 받은 진음성은 80건으로 나타났다. 폐암 진단에 대한 PET/MRI 검사의 위음성률은 3.7%, 위양성률은 4.8%, 예민도는 96.3%, 특이도는 95.2%, 정확도는 95.8%로 분석되었다.

3.6. 직장암 환자에 대한 결과

7명의 피험자 중 3명은 MRI에서만 잔류 질병의 증거를 가지고 있었고, 7명의 피험자 중 5명은 FDG-PET/MRI에서 잔류 질병의 증거를 가지고 있었다. MRI 및 FDG-PET에 잔류 질환이 의심되는 모든 피험자에 대해 의심스러운 소견은 국소 림프절이 아닌 일차 종양 부위에 있었다. 7명의 피험자 중 3명만이 초기 재포장 시점에 내시경 검사(생검 유무에 관계 없이)에서 잔류 질환의 증거를 보였다. mrTRG 컨센서스 판독치의 경우, FN 2개, TN 2개, TP 3개가 있으며, 전체 정확도는 71%이다. 오후용 TRG 컨센서스 판독 결과, 총 100%의 정확도에 대해 2개의 TN과 5개의 TP가 있었다. 내시경 +/− 생검의 경우 FN 2개, TN 2개, TP 3개로 전체 정확도는 71%였다. FDG-PET/MRI가 질병 상태에 대한 합의 해석에서 단 두 가지 변화(즉, mrTRG 1-2에서 pmr)를 초래했음에도 불구하고(TRG 2-3)에서 두 독자 모두 FDG-PET 성분이 7건 중 6건에서 추가 가치를 제공했다.

4. 고찰 및 결론

현재 PET/MRI는 Philips사의 Ingenuity MR-PET과 Siemens사의 biograph mMR이 출시되어 있고, Philips사의 Ingenuity MR-PET은 PET과 MRI Gantry가 분리되어 순차적으로 검사를 진행하는 장비이고, biograph mMR은 하나의 Gantry 안에서 두 가지 검사를 동시에 시행할 수 있다[12,13]. Matrix coil을 사용하여 검사 준비가 기존 코일보다 훨씬 용이하고, 필요한대로 조합하여 원하는 기능을 만들 수 있다[14]. 또한, 정확하고 빠른 암 검진과 전신 영상에 유용하다. 자기공명영상의 영상과 양전자 단층 촬영의 영상을 동시에 얻을 수 있기 때문에 각 장비로 따로 검사하여 검사 시간을 반 이상 감소시킬 수 있다[15]. 암 환자의 경우, MRI 검사 전에 PET/CT 등의 검사를 진행하는 것이 일반적이었다[16]. PET/MRI는 성인 암 환자의 전신 영상 검사에 유용하다[17]. 동시에 획득하는 영상으로 실시간으로 병변의 상태와 위치를 방사능 피폭을 극소량으로 하여 촬영할 수 있게 되었다[18]. 이로 인하여 피폭에 대한 걱정 없이 동시에 획득하는 영상을 바탕으로 정확하고 신속하게 환자에 대한 진단을 할 수 있다. 따라서 PET/MRI의 두경부 암, 소아 환자, 유방암 환자, 심질환 환자, 폐암 환자, 직장암 환자에서 긍정적인 결과를 도출하였다. 두경부 암을 진단함에 있어 수술 전 병기 결정, 치료 후 재발과 원격전이의 발견, 불분명한 원발 경부 림프절 전이 등의 평가에 활용 가능성이 높을 것으로 판단된다. 소아 환자에 있어 PET/MRI는 어린이의 암 평가를 위한 안전하고 민감하며 효율적인 영상 기술로, PET/CT에 비해 방사선 노출을 줄이면서 높은 공간 분해능과 높은 연조직 대비를 가진 대사 정보를 결합한다. 통합 PET/MRI는 어린이의 고형 종양을 준비하는 데 유용하며 새로운 면역 치료법에 대한 반응을 평가하는 데 도움이 될 수 있다. 향후 방향은 작은 폐 결절의 감지, 전신 및 국소 스캔의 시간 및 비용 효율성 그리고 이에 대한 접근성을 개선해야 한다. 유방암 영상을 위한 PET/MRI는 진단, 병기, 예후, 종양 표현형 및 치료 반응 평가의 범위에 걸쳐 연구되었다. PET/MRI는 유방 및 국소 림프절의 질병 범위를 결정하기 위한 임상적 필요성과 초기 진단 또는 재발 시 체계적 단계를 위한 포괄적인 평가를 제공한다. 심질환 환자의 경우 말초 동맥과 같은 다른 혈관은 PET/MRI로 탐색할 수 있는 기회를 제공한다. MR 기반의 양전자 단층 촬영 모션 보정은 양전자 단층 촬영 이미지의 잠재력을 최대로 실현하는 데 도움이 된다. 폐암 환자의 경우 폐암과 같은 연부조직에 대한 일체형 PET/MRI의 분해능과 검출 능력의 임상적 가치와 유용성은 충분할 것이다. 직장암 환자의 경우, 누락된 잔류 질병의 감지로 인해 TNT로 치료된 직장암 환자에 대한 임상 반응 평가를 변경할 수 있다. FDG-PET/MRI는 소규모 환자 코호트에서 CCR (Creatinine Clearance) 상태에 대해 100%의 정확도를 보여준다. 따라서 초기 단계와 치료 반응 평가 모두에서 가능성을 보인다. 결론적으로 문헌 조사를 통하여 검사 방법에 대하여 적립하고 PET/MRI의

임상적인 기초 자료들을 향후 후속 연구자들에게 제공할 것이다. 문헌 조사를 통해서 검사 방법에 대하여 적립하여 PET/MRI의 임상적인 기초 자료를 향후 후속 연구자들에게 제공하였다.

참고문헌

1. Adams S, Baum RP, Stuckensen T, Bitter K and Hör G. 1998. Prospective comparison of 18F-FDG PET with conventional imaging modalities (CT, MRI, US) in lymph node staging of head and neck cancer. *Eur. J. Nucl. Med.* **25**(9):1255-1260. https://doi.org/10.1007/s002590050293.
2. Loeffelbein DJ, Souvatzoglou M, Wankerl V, Martinez-Möller A, Dinges J, Schwaiger M and Ambros JB. 2012. PET-MRI fusion in head and neck oncology: current status and implications for hybrid PET/MRI. *J. Oral Maxillofac. Surg.* **70**(2):473-483. https://doi.org/10.1016/j.joms.2011.02.120.
3. Castelijns JA. 2011. PET-MRI in the head and neck area: challenges and new directions. *Eur. Radiol.* **21**(11):2425-2426. https://doi.org/10.1007/s00330-011-2181-8.
4. Kim Jl, Jeon JH, Kim IS, Lee HJ and Kim JE. 2013. Comparison of SUV for PET/MRI and PET/CT. *KJMNT* **17**(2):10-14.
5. Kim KM, Lee BW, Lee DW, Kim JS, Jang YD, Chan SB, Baek JH and Lee IS. 2010. One-stop Evaluation Protocol of Ischemic Heart Disease: Myocardial Fusion PET Study. *KJMNT* **14**(2):33-37.
6. Ra YS. 2003. Clinical Application of SPECT and PET in Cerebro-Vascular Disease. *Nucl. Med. Mol. Imaging* **34**(1):1-12.
7. Park CS and Ju MS. 2019. Introduction to Nuclear Medicine (PET/MRI): *J. Korean Magn.* **29**(5):184-195. https://doi.org/10.4283/JKMS.2019.29.5.184.
8. Laubenbacher C, Saumweber D, Wagner-Manslau C, Kau RJ, Herz M, Avril N, Ziegler S, Kruschke C, Arnold W and Schwaiger M. 1995. Comparison of 18F-FDG PET, MRI and endoscopy for staging head and neck squamous-cell carcinomas. *J. Nucl. Med.* **36**(10):1747-1757.
9. Braams JW, Pruim J, Freling NJ, Nikkels PG, Roodenburg JL, Boering G, Vaalburg W and Vermey A. 1995. Detection of lymph node metastases of squamous-cell cancer of the head and neck with FDG-PET and MRI. *J. Nucl. Med.* **36**(2):211-216.
10. Platzek I, Beuthien-Baumann B, Schneider M, Gudziol V, Langner J, Schramm G, Laniado M, Kotzerke J and van den Hoff J. 2013. PET/MRI in head and neck cancer: initial experience. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* **40**(1):6-11. https://doi.org/10.1007/s00259-012-2248-z.
11. Stephen MB, Ajit HG, Bradley JK and Geoffrey BJ. 2018. Clinical PET/MRI: 2018 Update: Review. *AJR Am. J. Roentgenol.* **211**(2):295-313. https://doi.org/10.2214/AJR.18.20001.
12. Schramm G, Langner J, Hofheinz F, Petr J, Beuthien-Baumann B, Platzek I, Steinbach J, Kotzerke Jörg and van den Hoff J. 2013. Quantitative accuracy of attenuation correction in the Philips Ingenuity TF whole-body PET/MR system: a direct comparison with transmission-based attenuation correction. *MAGMA* **26**(1):115-126. https://doi.org/10.1007/s10334-012-0328-5.
13. Kraus R, Delso G and Ziegler SI. 2012. Simulation Study of Tissue-Specific Positron Range Correction for the New Biograph mMR Whole-Body PET/MR System. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59**(5):1900-1909. https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2207436.
14. Feng J, Sebastian L, Kelvin JL, Stefan K, Huijun Y and Maxim Z. 2017. Design of a shielded coil element of a matrix gradient coil. *J. Magn. Reson.* **281**:217-228. https://doi.org/10.1016/j.jmr.2017.06.006.
15. Lee JH, Ko SJ and Kim JH. 2016. TLD's Glow Curve and Radiation Exposure Amount Analysis at Environment with/without Magnetic Field Exposure as Time Passing. *Jour. of KoCon.a* **16**(8):419-426. https://doi.org/10.5392/JKCA.2016.16.08.419.
16. Claudio S, Herrmann K and Czernin J. 2016. 18F-FDG PET/CT and PET/MRI Perform Equally Well in Cancer: Evidence from Studies on More Than 2,300 Patients. *J. Nucl. Med.* **57**(3):420-430. https://doi.org/10.2967/jnumed.115.158808.
17. Gerard SK. 2021. PET/MRI Versus PET/CT for Whole-Body Staging. *J. Nucl. Med.* **62**(4):591. https://doi.org/10.2967/jnumed.121.261917.
18. Mannheim JG, Schmid AM, Schwenck J, Katiyar P, Herfert K, Pichler BJ and Disselhorst JA. 2018. PET/MRI Hybrid Systems. Semin. Nucl. Med. **48**(4):332-347. https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2018.02.011.