

차세대 CT/PET/MRI Gamma 線 융합 뇌 진단 치료기 - 개론과 전망

조장희, 황영은
고려대학교 녹색생산기술연구소 뇌과학융합센터

1. 서론

점증하는 고해상도 뇌 진단 기술의 발달은 정밀진단기기의 발전을 가능케 했으며, 이는 고해상도 양전자단층촬영(Positron Emission Tomography, PET) 개발 등으로 이어졌다. 1970년대에 개발되기 시작한 PET는 현재 1mm 이하의 고해상도 분자영상을 획득할 수 있을 만큼 기술력이 성장했으며, 알츠하이머 치매나 암 등의 조기진단을 위해 사용되고 있다. 이와 동시에, 치료기기 역시 빠른 발전을 보이며 Cyber-Knife, Gamma-Knife 등의 기기가 개발되었고, 고성능 뇌질환 치료 뿐 아니라 뇌 분야 외의 각종 암치료 등에 사용되어 의료계의 획기적인 발전을 이루었다.

본 논문은 최근에 이루어지고 있는 분자영상

기기 및 융합 뇌 진단 치료기기의 연구개발을 기술해보고, 이 분야의 궁극적인 목표인 컴퓨터 단층촬영(Computerized Tomography, CT)/양전자단층촬영(PET)/자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI) - Gamma Knife의 연구개발 동향을 살펴보고자 한다. 특히, 최근 급속히 발전하고 있는 고온 초전도(High Temperature Superconductor) 마그넷 연구개발과 발맞추어 HTS-MRI를 이용한 세계 최초의 CT/PET/MRI - Gamma Knife의 국내 연구개발 가능성을 기술적인 면에서 검토해보고자 한다.

2. 기본 개념 및 연구

1970년대부터 점차 뇌 진단 기술이 발달되

최근 발전하고 있는 Zoom-Wobble (CT + PET + MRI) - (Gamma Knife) Fusion System 연구 개발 기본과제	비고
I. CT: 고해상도 밀착형 CT High Resolution CT (Solid State)	Magnetic Field Free New Solid State X-ray Source
II. Zoom-Wobble PET: 세계 최초 고해상도 Brain-Body 경용 PET World's First, Sub-millimeter High Resolution - High Sensitivity Molecular Imaging based on Wobbling and Zooming	Wobbling and Zooming을 통한 Super-sampling
III. HTS MRI: HTS-Magnet 개발을 통해 세계 최초의 HTS-MRI 개발 Korea's superconducting magnet research succeeded in world's first Helium free superconducting magnet development for MRI application	세계 최첨단 수준의 국내 HTS 연구
IV. Z/W G-K : Wobbling을 통한 Micro-tracing Gamma Knife World's first, integrated "CT-PET-MRI Gamma Knife" utilizing the Zoom-Wobble PET concept with inserted multiple Co60 sources	세계 최초의 Zoom-Wobble Gamma Knife for Tumor Tracing
V. 융합 CT+PET - Gamma Knife Fusion System (+ HTS MRI) 본 융합진단 치료기기는 현재 새롭게 발전되고 있는 HTS MRI와 최종 융합 시키고자 함. HTS는 최근 발전하고 있는 無헬륨 초전도 자석으로, 차세대 MRI로 알려져 있음.	세계 최초의 CT-PET-MRI Zoom-Wobble Gamma Knife

- CT: Computed Tomography
- PET: Positron Emission Tomography
- HTS: High Temperature Superconducting (고온 초전도)
- MRI: Magnetic Resonance Imaging (핵자기공명기기)
- Z/W G-K: Zoom-Wobble Gamma Knife

표 1. 최근 발전하고 있는 첨단 진단 및 치료기기

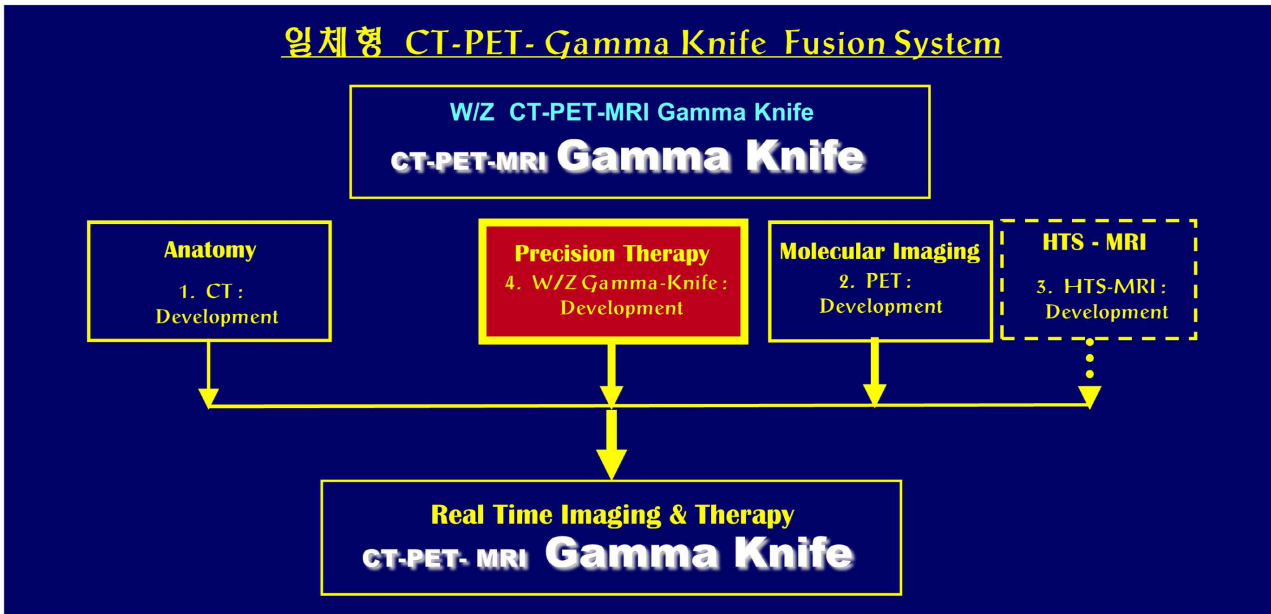


그림 1. 일체형 CT-PET-Gamma Knife Fusion System의 전체적인 계획도

면서 CT, PET, MRI 등의 진단기기가 개발되었다. 특히, MRI는 초전도 MRI 시스템 개발을 계기로 현대의학에 대변혁을 일으켰으며, 현재는 대부분의 의학 분야에서 요구하는 1mm 수준의 고해상도 영상을 충족시키고 있다. 분자영상 분야 역시 PET의 발전을 통해 뇌 질환을 비롯한 암 조기진단 등에 획기적인 발전을 이루었다.

Table. 1.에 보이는 것처럼 반도체 X-ray의 등장으로 monochromatic beam을 이용한 고해상도 밀착형 CT가 개발될 것이며, 또한, Zoom-Wobbling 기술을 이용한 고밀도 샘플링을 통해 고해상도 PET가 개발되었다. MRI 분야에서는 기존의 저온초전도(Low Temperature Superconductor, LTS) 시스템으로는 미래 MRI 시스템 운영에 여러 문제점이 예상되었으나, 최근 활발히 연구 개발되고 있는 HTS 마그넷 시스템을 통해 그 한계를 극복하고 있다. 특히, 이 부분은 한국 연구진이 기술력을 선도하고 있다는 점에서, 선진국이 독점하고 있던 MRI 산업에 우리나라의 기업의 세계진출이 청신호를 보이고 있어 상당히 고무적이다.

이러한 기술 개발은 고해상도 및 고정밀 Gamma-Knife 융합기기의 발전 가능성을 높이고 있다. 앞서 언급한 Wobbling 기술을 통해, 베드(bed)를 움직이면서 종양을 추적하던 기존 수술 형식에서 완전히 탈피하여, 새로운 방법으로 종양을 추적하는 고정밀 Gamma-knife 개

발 가능성을 제시하고 있다. 또한, CT, PET, MRI를 통해 얻은 영상을 완벽하게 융합시켜 접목시킬 수 있는 차세대 CT/PET/MRI - Gamma 線 융합 뇌 진단 치료기기 개발 역시 기대해본다.

그림 1이 전체적인 계획도를 나타낸다. 차세대 CT/PET/MRI Gamma-Knife 융합 진단-치료기는 (1) 반도체 X-ray source를 이용한 X-ray CT 개발, (2) Zooming-Wobbling 기술을 이용한 초고해상도 Zoom-Wobble PET 개발, (3) HTS MRI 개발, (4) Zoom-Wobble 기술을 이용한 Gamma-Knife 개발이 선행과제로 이루어져, 이 네 가지 시스템을 융합시킨 최종적인 CT/PET/MRI Gamma-Knife가 완성된다.

Gamma 線 치료 장치는 30여년에 걸쳐 발전되어 왔으나, 현재의 고정형 시스템으로는 유연성(flexibility)이 현저히 떨어지기 때문에, 영상을 획득하고 이를 활용하여 치료를 할 수 있는 시스템 구현이 불가능한 상황이다. 따라서 미래형 Gamma 線 치료기는 영상시스템과 결합한 새로운 개념의 기기가 개발되어야 한다. 이에 따라 진단기와 치료기의 정밀도를 서로 맞출 수 있는 최적화 작업이 이루어져야 할 것이다.

그림 2는 고해상도 영상으로 전이암(Metastatic cancer)을 본 모습이다. 그림에서 나타난 것과 같이, 1mm 이하의 작은 암에서부터 수 센티미터에 이르는 다양한 크

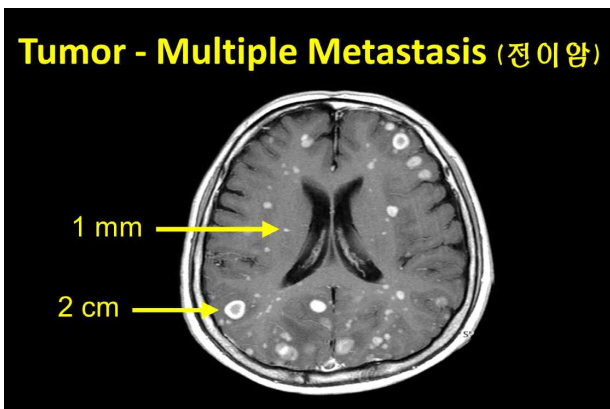


그림 2. 고해상도 영상의 필요성

기의 암들이 공존하고 있다. 따라서 이를 진단할 수 있는 고해상도 진단기기가 필요하며, 동시에 고정밀도의 방사선부터 대용량의 방사선까지 적절하고 다양한 암 치료를 할 수 있는 치료기기가 요구된다. 일반적인 암 진단 검사(screening)로는 CT가 많이 사용되며, 좀 더 정밀한 검사에는 MRI를 사용한다. 그리고 암의 조기발견을 위해서는 분자영상 시스템인 PET이 필수적으로 사용된다. 따라서 CT, PET, MRI는 질병 진단에 있어서 가장 이상적인 협력체(collaboration)라고 할 수 있다.

CT의 경우에는 여전히 전자가속형 X-ray 튜브가 많이 사용되고 있는데, 이 X-ray 튜브는 그 크기와 구조적 복잡성이 상당한 단점으로 여겨지고 있다. 그러나 새롭게 개발되고 있는 반도체(solid state) X-ray source는 작은 크기와 용도의 다양성 면에서 큰 이점을 보이고 있으며, 특히 이를 이용하여 이미지 해상도와 대조도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 전망된다. (Hounsfield et al., 1980; Radon et al., 1917; Lee et al., 2002)

PET는 최근까지 활발히 연구개발 되어 시스템 내 모든 소자가 기존의 전자관 형태에서 반도체로 바뀌었다. 또한 그림 3에서 소개되고 있는 Wobbling 등의 새로운 기술을 통해 데이터 수집 방식에서도 획기적인 발전을 이루었다. Wobbling은 PET의 고정되어 있는 검출기에서 최대한의 데이터 샘플링을 이루어 낼 수 있는 새로운 샘플링 방식으로, 이를 이용하여 데이터 샘플링이 핵심이라고 할 수 있는 PET에 혁신적인 발전을 이끌었으며, PET 외의 다른 영상 및 치료기기에도 이용할 수 있는 새로운 기술이다.

Wobbling 방식은 그림 4에서 보이는 것과 같이 원의 중심에서의 미소한 움직임에 맞춰 검출기 블록이 움직이면서 샘플링 포인트들을 줄여나가는 방법이다. 그림 4(a)는 중심점이 확대된 wobbling 궤도가 표현되었고, 그림 4(b)는 하나의 검출기 블록이 네 개의 포인트로 움직이면서 샘플링을 하고 있는 모습을 나타낸다. 이러한 데이터는 무작위로 샘플링되어 데이터 간 간격이 일정하지는 않으나, 고정되어 있는 경우(그림 4(c)-i)보다는 훨씬 고밀도의 샘플링 간격을 얻을 수 있다. 따라서 Wobbling을 통해 얻은 불균일한 데이터를 보간(interpolation)하게 되면 기본적인 샘플링 간격(d)보다 훨씬 작게 얻을 수 있으며, 따라서 나이퀴스트 샘플링을 만족할 수 있게 된다. (그림 4(c)-iii, iv) 이러한 Wobbling 방식을 이용하여 투사(projection) 데이터를 얻는 과정을 그림 5에서 보여주고 있다. Wobbling의 또 다른 장점은 wobbling 포인트 수를 늘릴수록 더욱 섬세한 샘플링이 가능하다는 점이다. 이러한 Wobbling 샘플링 방식은 PET 뿐만 아니라 Gamma-Knife의 중심점 추적(focal point tracing)에도 활용되어 보다 정밀한 방사선 조사(radiation) 및 치료에 사용될 수 있을 것이다.

(a) PET: Zoom-Wobble PET (밀착형)

그림 5는 영상 모드에서 Wobbling을 통해 PET의 한 view에서 투사(projection) 데이터를 얻은 모습을 나타낸다. 해당 데이터는 projection reconstruction 방법으로 영상을 재구성한다. Projection reconstruction과 라돈 변환(Radon transform)의 관계를

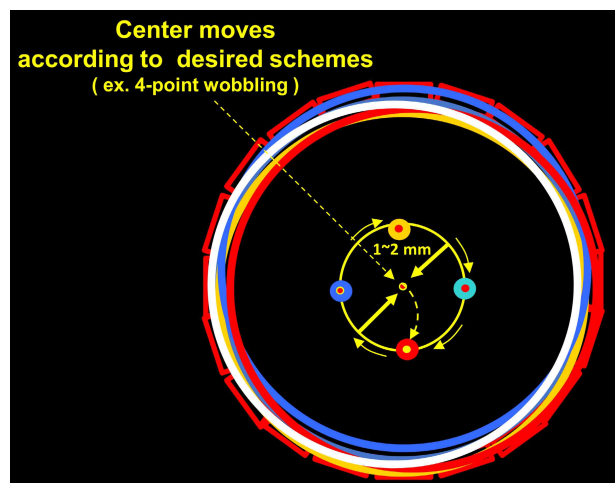


그림 3. 새로운 샘플링 기법 - Wobbling

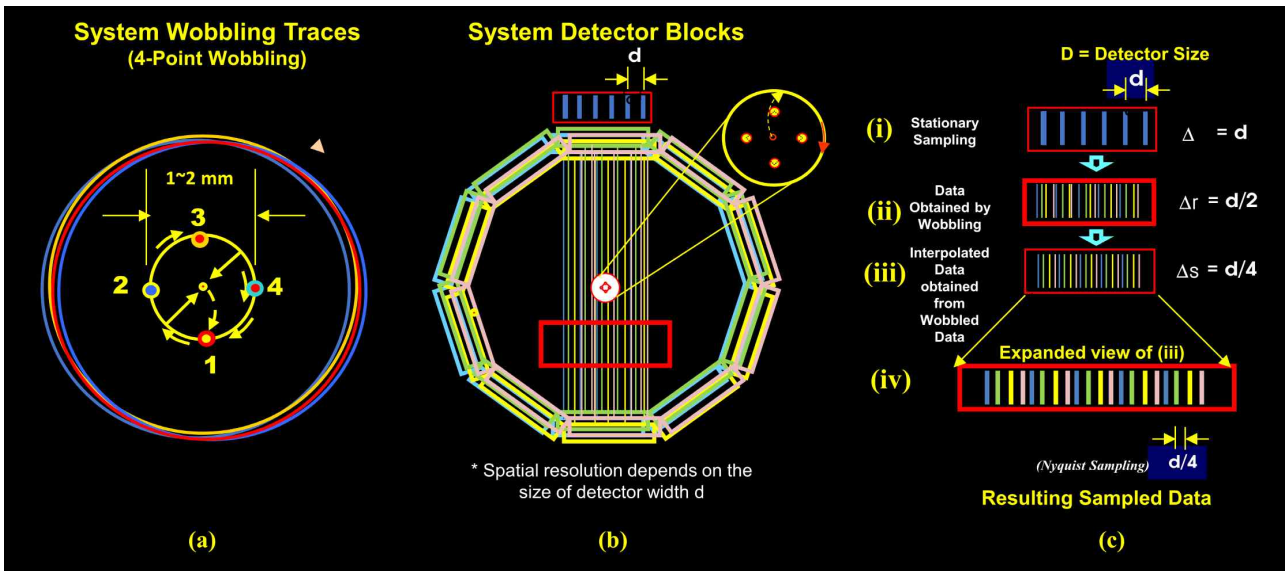


그림 4. Wobbling Technique for Fine Sampling: An example of 4-point wobbling concept and resulting data

간단히 정리하면, 2D 데이터 $f(x,y)$ 의 임의의 각도에서 2D 적분한 관계는 라돈 변환을 통해 얻어지며, 수식은 다음과 같다.

$$R(f(x,y)) = \iint (x,y)\delta(x\cos\theta + y\sin\theta - x')dx dy = p_{\theta}(x') \dots\dots Eq.1$$

이렇게 얻어진 라돈 변환 데이터는 역 라돈 변환(Inverse Radon Transform)을 통하여 재구성된 영상을 복원시킨다. (Brownell et al., 1953; Cho et al., 1976; Ter-Pogossian et al., 1975; A.C. Kak et al.,

1988; Cho et al., 2008, 2019)

(b) Gamma Knife (Wobbling Focusing)

그림 6은 치료(therapeutic) 모드에서 검출기 블록들이 방사선(Radiation beam)이 통과할 수 있게끔 바깥쪽에 위치한 링(Ring)으로 후퇴하여 영상을 얻고, 해당 영상을 기반으로 wobbling 작업을 통해 목표 부위에 방사선을 투사하는 모습을 나타내고 있다. 이 모드의 장점은 wobbling을 통해 Gamma 선의 초점(focal point)을 정밀하게 추적할 수 있다는 점이다. 또한, 같은 기기 내에서 영상과 치료가 함께 이루어짐으로써, 머리를 고정하는 부품(head holder 또는 fixation)에 의한 오차를 극소화 할 수 있다. (Leksell et al., 1968; Lindquist C. et al., 1989; Backlund

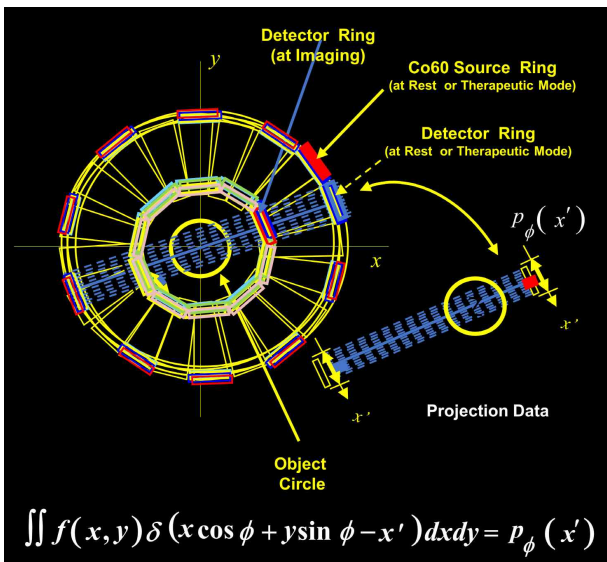


그림 5. 일체형 PET-Gamma Knife (영상모드)

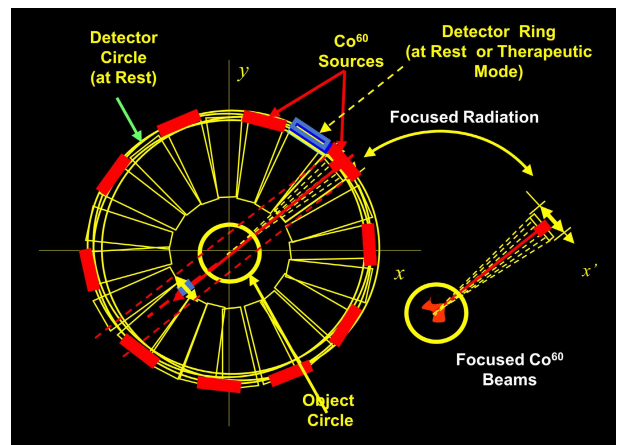


그림 6. 일체형 PET-Gamma Knife (치료모드)

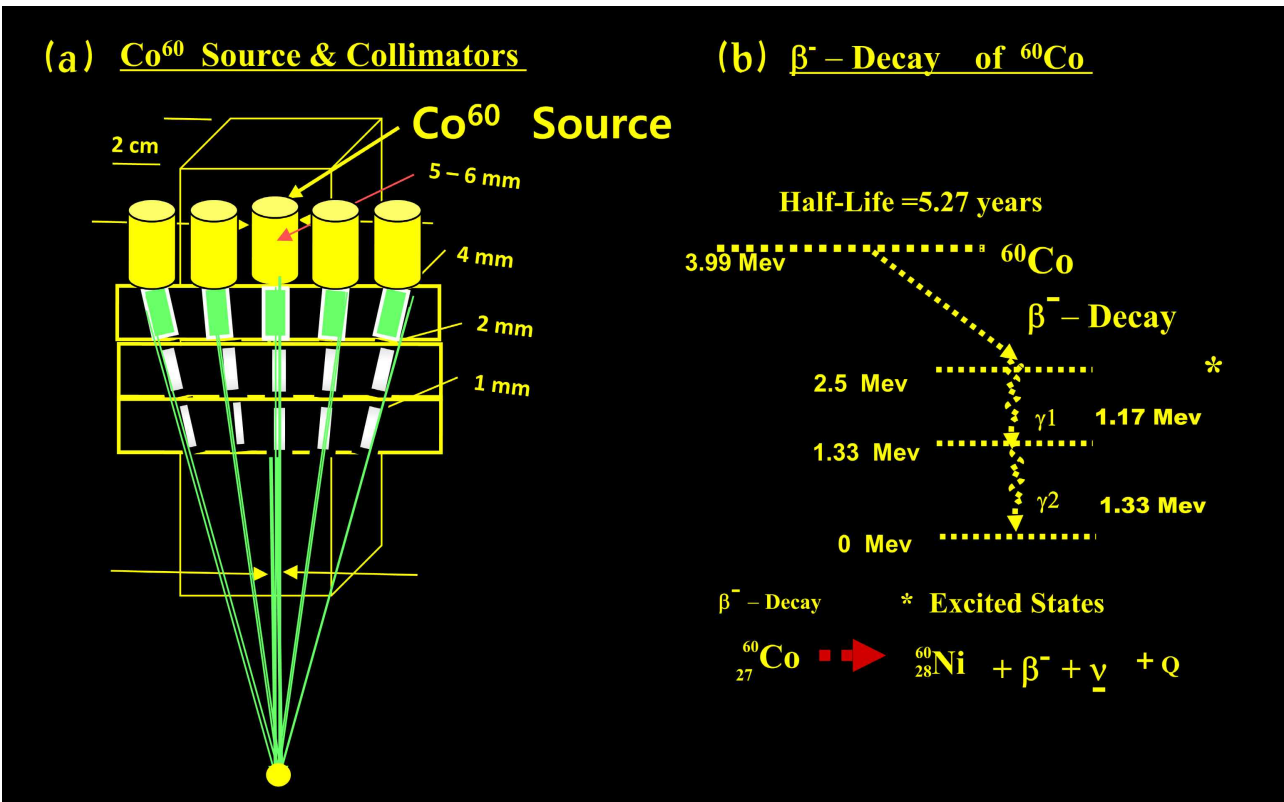


그림 7. Gamma Knife에서의 ^{60}Co source 위치 및 초점 콜리미터(focusing collimator)의 구조

EO. et al., 2007; Kann BN et al., 2017; Ganz et al., 2014)

그림 7에서는 Gamma Knife의 ^{60}Co source 위치와 초점 콜리미터(focusing collimator)의 구조를 보여준다. 한 개의 ^{60}Co source 블록에는 다섯 개의 ^{60}Co source가 위치하고, ^{60}Co 는 콜리미터(collimator)에 의해 중심으로 집중된다.

그림 7의 우측에는 ^{60}Co decay 방식을 보여주고 있다. ^{60}Co 는 5.27년의 반감기를 가지며, 두 개의 Gamma 선을 방출한다. 하나는 1.17 MeV의 에너지를, 또 다른 하나는 1.33 MeV의 에너지를 갖는다. 두 개의 Gamma 선 모두 에너지가 높기 때문에 인체 내에서 높은 투과력을 가져 방사선 치료에 적합하다. Beta decay로 두 개의 Gamma 선을 방출하는 ^{60}Co 는 다루기도 쉬울 뿐 아니라, 반감기도 길기 때문에 Gamma Knife에 사용하기 적합하다.

그림 8에서 보여주는 것 과 같이, Gamma source 블록과 PET와의 in-out 형 결합을 통해 최적의 융합 PET - Gamma Knife 치료기기를 만들 수 있을 것이다. 그 사이에 위치한 CT는 첨단 반도체 소자를 이용한

X-ray source를 사용하여 MRI로 인한 강한 자장에서도 영향을 받지 않을 수 있다. 이와 같은 새로운 미래형 융합기기는 의료계의 발전에 핵심 역할을 할 것으로 기대된다.

(c) HTS Magnet (미래 無헬륨 MRI)

마그넷 분야에서의 가장 핵심적인 발전은 최근 10여년에 걸쳐 연구 개발되고 있는 고온초전도(HTS) 시스템 개발이다. 1980년 초부터 개발되기 시작한 저온초전도 마그넷은 현재까지도 계속 이용되고 있다. 이러한 저온초전도 마그넷 시스템은 유지를 위해서 헬륨이 필수적으로 요구되는데, 점차 헬륨이 고갈됨에 따라 현대과학의 큰 문제점으로 떠오르고 있다. 최근에 발전되고 있는 고온초전도 마그넷 (HTS Magnet)은 이 문제점을 해결할 수 있는 강력한 해결책으로 여겨지고 있다. 또한, 국내 고온초전도 분야 연구팀과 MRI 분야의 활발한 협력이 우리나라 MRI 산업의 해외진출에 새로운 희망을 주고 있다. 잘 알려진 바와 같이, 현재 MRI 시장은 미국의 GE와 독일의 Siemens, 네덜란드의 Philips가 완전 장악하고 있으며, 우리나라 기업이 MRI 시장에 진입하기에 매우 어려운

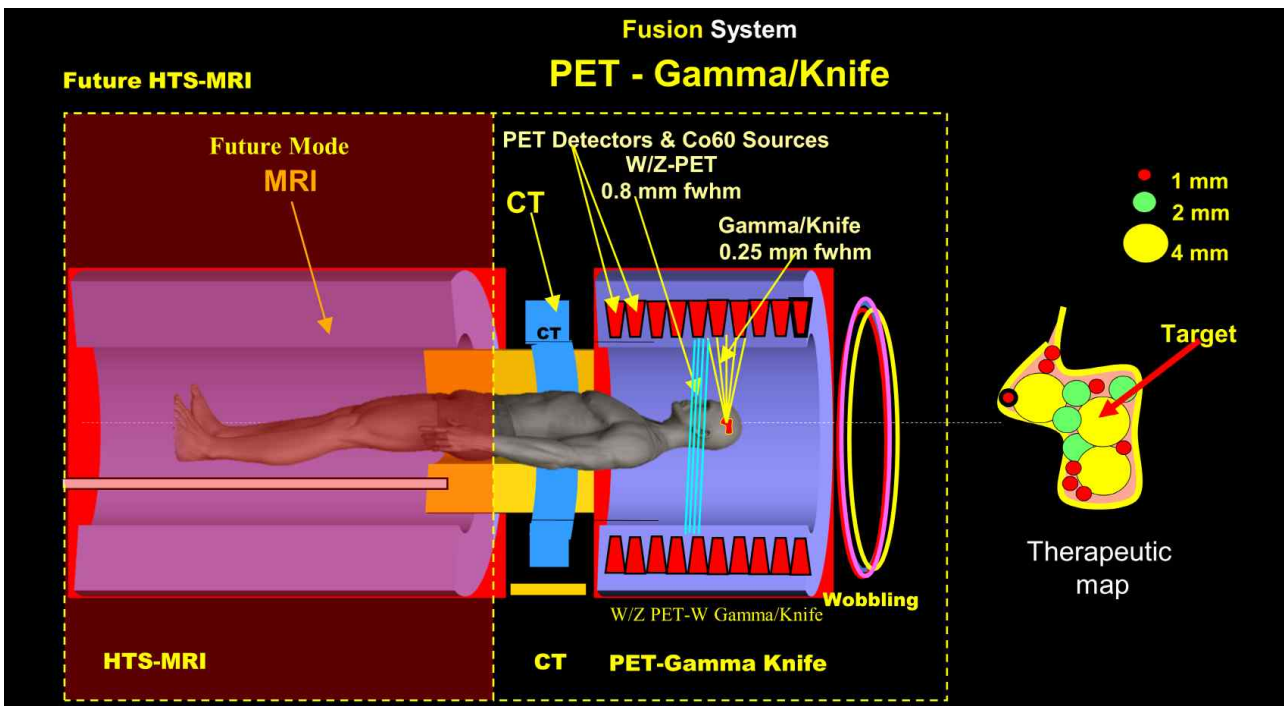


그림 8. Brain Zoom-Wobble PET-Gamma Knife with CT & MRI

실정이다. 이러한 상황에서, 고온초전도 마그넷의 적극적인 연구개발만이 우리나라 MRI 산업의 국제시장 진출의 유력한 가능성으로 기대된다.

3. 요약과 결론

그림 8에 보인 것과 같이, 완벽한 CT/PET/MRI/Gamma Knife 융합 시스템을 이루기 위해서는 고온초전도(HTS) 마그넷 개발이 필수적으로 요구된다. 그림의 오른쪽 끝에서는 PET/Gamma Knife가 영상 획득과 치료를 진행한다.

요약하면, 진단 및 치료를 위해 필요한 모든 영상 정보를 한 기기를 통해 얻을 수 있는 시스템으로, Wobbling을 통해 데이터 수집 시간과 오차를 최소화하고 치료의 효율을 극대화할 수 있는 최적의 기기가 될 것이다.

우리나라는 1980초 0.1T MRI, 1985년 세계 최초의 2.0T MRI, 그리고 2005년 7.0T MRI 개발 등, MRI 연구개발에 필요한 기술력은 물론, 최근에는 세계를 앞선 고온초전도 마그넷 시스템 개발을 통해 MRI 연구 분야를 선도하고 있다. 특히, 우리나라는 PET - Gamma Knife의 핵심요소가 되

는 Wobbling 기법을 개발한 바 있다. 따라서 제안하는 CT/PET/MRI - Gamma Knife와 같은 세계 최초의 복합 융합 의료기 연구개발을 충분히 주도할 수 있는 국가라고 판단된다.

의료기기 산업은 21세기의 인류의 복지와 건강에 가장 중요한 분야로서 구미의 선진 공업국가들의 독점으로 한국과 같은 신흥국 으로서는 그 진입장벽이 높았던 것으로 이 분야의 연구와 개발이 특별히 요구되고 있다. 특히, MRI 같은 분야는 그 높은 장벽을 뚫고 들어가기 힘든 현황이다. 한 대가 200만 불을 호가하는 MRI는 전 세계에 20여 만 대가 수십만 명의 건강과 삶을 위해 돌아가고 있고 물리, 화학, 수학, 생물학 등 기초과학의 융합체로서, 첨단 융합 팀의 구성이 촉구되며, 또한 미래 MRI의 핵심기술이 될 고온초전도 MRI의 (HTS MRI) 연구개발의 중요성도 점증하고 있다. 마침 우리나라 연구팀의 이 분야의 선점은 특기할 만 하다. (Jeong et al., 2016; Kim et al., 2018; Song et al., 2017; Jeong et al., 2016, Elayappan, et al., 2020)

의료기기 산업은 21세기 인류의 복지와 건강에 가장 중요한 분야로 여겨진다. 특히, 한대에 약 200만 달러에 달하는 MRI 장비는 전 세계에 20여 만 대가 상용화되어 수많은

인류의 생명과 건강, 그리고 삶에 공헌하고 있다. 또한, MRI와 PET, Gamma Knife 등은 물리, 화학, 수학, 생물학 등의 기초과학의 융합체로서, 첨단 융합 과학 연구 집단의 형성이 시급하다. 또한, MRI는 고온초전도(HTS)로의 시스템 전환 중요성이 점증하고 있다. 현재 세계 의료기기 산업은 선진국 기업이 독점하고 있으며, 우리나라와 같은 신흥국들에게는 그 진입장벽이 상당히 높다. 따라서 우리나라의 연구팀이 고온초전도 시스템을 이용한 융합 진단-치료 장비 개발을 통해 이 분야를 선점하여 국제 의료기기 시장 진출에 국가적인 노력을 했으면 하는 바이다.

참고문헌

- (1) Brownell, G.L., W.H. Sweet, "Localization of brain tumors with positron emitters", *Nucleonics* 1953, 11:40
- (2) Cho, ZH., Chan, JK. and Eriksson, L., "Circular ring transverse axial positron camera for 3-D reconstruction of radionuclides distribution", *IEEE Trans Nucl Sci*, NS-23, 613 - 622, 1976.
- (3) Ter-Pogossian, M.M., M.E. Phelps, E.J. Hoffman, and N.A. Mullani. "A positron emission transaxial tomograph for nuclear medicine Imaging (PETT)", *Radiology* 1975; 114:89-98.
- (4) A. C. Kak and Malcolm Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press, 1988.
- (5) Cho, Z. H., Son, Y. D., Kim, H. K., Kim, K. N., Oh, S. H., Han, J. Y., Hong, I. K. and Kim, Y. B. (2008), A fusion PET - MRI system with a high resolution research tomograph PET and ultra high field 7.0 T MRI for the molecular genetic imaging of the brain. *Proteomics*, 8: 1302-1323.
- (6) Cho ZH, Son YD, Kim HK, Kwon DH, Joo YH, Ra JB, Choi Y, Kim YB. Development of Positron Emission Tomography With Wobbling and Zooming for High Sensitivity and High-Resolution Molecular Imaging. *IEEE Trans Med Imaging*. 2019 Dec;38(12):2875-2882. doi: 10.1109/TMI.2019.2916326. Epub 2019 May 13. PMID: 31094686.
- (7) Leksell, L. CEREBRAL RADIOSURGERY. I. GAMMATHALAMOTOMY IN TWO CASES OF INTRACTABLE PAIN.. Country unknown/Code not available: N. p., 1968. Web.
- (8) Lindquist C. Gamma knife surgery for recurrent solitary metastasis of a cerebral hypernephroma: case report. *Neurosurgery*. 1989 Nov;25(5):802-4. doi : 10.1097/00006123-198911000-00018. PMID: 2586733.
- (9) Backlund EO. Gamma knife-Early story: Memoirs of a privileged man. *Progress in Neurological Surgery* 2007; 20: 21-32
- (10) Kann BH, Park HS, Johnson SB, Chiang VL, Yu JB. Radiosurgery for Brain Metastases: Changing Practice Patterns and Disparities in the United States. *J Natl Compr Canc Netw*. 2017 Dec;15(12):1494-1502. doi: 10.6004/jnccn.2017.7003. PMID: 29223987.
- (11) Ganz, Jeremy C., 1943- History of the gamma knife. Kidlington, Oxford : Elsevier, 2014 (OCoLC)900394486.
- (12) Seol-Hee Jeong, Jung-Bin Song, Kwang Lok Kim, Yoon Hyuck Choi, Haigun Lee, Enhanced thermal properties of epoxy composite containing cubic and hexagonal boron nitride fillers for superconducting magnet applications, *Composites Part B: Engineering*, Volume 107, 2016, Pages 22-28,
- (13) Kim, JC, Lee, J, Kim, J, Singh, RK, Jawali, P, Subhash, G, Lee, H & Arjunan, AC 2018, 'Challenging endeavor to integrate gallium and carbon via direct bonding to evolve GaN on diamond architecture',

- Scripta Materialia, vol. 142, pp. 138-142.
- (14) J.B. Song, Y.H. Choi, D.G. Yang, Y.G. Kim, K.L. Kim, H.G. Lee, Review of core technologies for development of 2G HTS NMR/MRI magnet: A status report of progress in Korea University, Results in Physics, Volume 7, 2017, Pages 3264-3276.
- (15) Seol-Hee Jeong, Jung-Bin Song, Yoon Hyuck Choi, Seong-Gyeom Kim, Byeong-Soo Go, Minwon Park, Haigun Lee, Effect of micro-ceramic fillers in epoxy composites on thermal and electrical stabilities of GdBCO coils, Composites Part B: Engineering, Volume 94, 2016, Pages 190-196.
- (16) Elayappan, V, Shanmugam, R, Chinnusamy, S, Yoo, DJ, Mayakrishnan, G, Kim, K, Noh, HS, Kim, MK & Lee, H 2020, 'Three-dimensional bimetal TMO supported carbon based electrocatalyst developed via dry synthesis for hydrogen and oxygen evolution', Applied Surface Science, vol. 505, 144642.
- (17) LAUTERBUR, P. Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance. Nature 242, 190 - 191 (1973).
- (18) Kumar A, Welti D, Ernst RR. NMR Fourier zeugmatography. 1975. J Magn Reson. 2011 Dec;213(2):495-509. doi: 10.1016/j.jmr.2011.09.019. PMID: 22152365.
- (19) Mansfield, P, Maudsley, AA & Bains, T 1976, 'Fast scan proton density imaging by NMR', Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 9, no. 4, 011, pp. 271-278.
- (20) Z. H. Cho, H. S. Kim, H. B. Song and J. Cumming, "Fourier transform nuclear magnetic resonance tomographic imaging," in Proceedings of the IEEE, vol. 70, no. 10, pp. 1152-1173, Oct. 1982, doi: 10.1109/PROC.1982.12447.
- (21) Hounsfield GN. Nobel Award address. Computed medical imaging. Med Phys. 1980 Jul-Aug;7(4):283-90. doi: 10.1118/1.594709. PMID: 6993911.
- (22) Radon, J. (1917), 'Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte ängs gewisser Mannigfaltigkeiten', Akad. Wiss. 69, 262-277.
- (23) Lee, CJ, Lee, TJ, Lyu, SC, Zhang, Y, Ruh, H & Lee, HJ 2002, 'Field emission from well-aligned zinc oxide nanowires grown at low temperature', Applied Physics Letters, vol. 81, no. 19, pp. 3648 - 3650. https://doi.org/10.1063/1.1518810

저자이력



조장희 (趙長熙)

1960년 서울대학교 전자공학과 학사
 1962년 서울대학교 전자공학과 석사
 1966년 스웨덴 옘살라대학교 응용물리학 박사
 1972-1978년 스웨덴 스톡홀름 대학 조교수 및 부교수 (핵물리), 미국 캘리포니아 대학 연구부교수 및 수석연구원 (방사선물리학)
 1979-1985년 미국 컬럼비아대학교 정교수
 1978-1995년 한국과학기술원 교수
 1995-1997년 한국과학기술원 초빙석좌교수
 1985-2006년 미국 캘리포니아 대학교 어바인 교수
 2004-2014년 가천의대 석좌교수 및 뇌과학연구소장
 2015년-현재 서울대학교 융합기술원 특임연구원
 2017-2019년 수원대학교 석좌교수 및 뇌과학연구소장
 2019년-현재 고려대학교 석좌교수 및 뇌과학융합센터장



황영은 (黃英恩)

2018-2019년 수원대학교 뇌과학연구소 방문연구원
 2019년 가천대학교 의용생체공학과 학사
 2019년-현재 고려대학교 뇌과학융합센터 방문연구원
 2021년 가천대학교 융합의과학과 석사