

초전도체 코일 활용 휴먼스케일 자기입자영상(MPI) 장치 개발, 맞춤형 뇌 질환 치료 기대

- GIST 윤정원 교수팀, 소동물에 한정하여 사용됐던 한 대 수십억 원에 이르는 MPI 장치를 초전도체 코일과 융합하여 인체에 적용 가능한 휴먼스케일로 개발
- 말초신경자극 발생 위험 낮추고, 인체 내 표적화 통해 안전한 치료 효과 극대화 가능, “나노입자 의료영상 차세대 기술로서 환자 맞춤형 난치성 뇌 질환 등 활용 기대”
- 국제학술지 「IEEE Transactions on Medical Imaging」 게재



▲ (왼쪽부터) 윤정원 교수, 박사후과정 Tuan-Anh Le 연구원

인체를 대상으로 생체영상을 고해상도로 획득할 수 있는 휴먼스케일 자기입자영상(MPI) 장치와 뇌 질환 치료를 위해 필요한 약물의 양과 부위를 정확히 특정하여 안전하면서 치료 효과를 극대화할 수 있는 기술이 국내 산학 공동연구를 통해 개발됐다.

이번 연구는 안전하면서 효과를 극대화할 수 있는 차세대 의료영상 기술로서 나노입자를 이용한 환자 맞춤형 난치성 뇌 질환 등 치료 등에 활용될 것으로 기대된다.

* 자기입자영상(Magnetic Particle Imaging, MPI): 생체에 무해한 산화철 나노입자만의 농도·위치를 영상화할 수 있는 비침습적 분자영상기기. 방사선 없이 작동 가능하며 3차원 분포 영상을 실시간으로 촬영할 수 있어 심혈관·뇌혈관 등의 진단, 세포 라벨링 및 추적, 표적 약물 전달 등 다양한 의료 분야에서 사용될 수 있다. MPI의 추적자로 사용되는 나노입자는 뇌혈관 장벽(Blood Brain Barrier, BBB) 통과가 가능할 뿐만 아니라, 뇌 병변 부위로의 표적화 및 진단을 위한 영상화, 발열 등의 치료 기능까지 제공하여 기존 뇌 질환 치료법의 한계를 극복할 수 있다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 융합기술학제학부 윤정원 교수 (뇌나노로봇연구센터장) 연구팀이 기존 전자기코일 대신 초전도체 코일을 활용하여 실시간으로 나노입자 분포도를 촬영할 수 있는 초전도체 코일 기반 휴먼스케일 3차원 자기입자영상(MPI) 장치를 세계 최초로 개발하는 데 성공했다고 밝혔다.

이 장치는 자성나노입자를 추적자로 사용하여 사람의 뇌 부위 영상에 필요한 높은 경사자기장을 고해상도로 획득할 수 있는 휴먼스케일 MPI 시스템이다.

MPI 기술은 미국·독일·일본 등 의료영상 선진국 일부 기업에 의해서만 개발돼 12cm의 구경을 갖는 전임상용(preclinical, 동물을 대상으로 한 임상시험) 장비가 수십억 원에 판매되고 있는 차세대 의료영상 기술로, 기존 MPI 장치는 말초 신경 자극을 일으키는 물리적 특성으로 **소동물에서의 고해상도 의료영상 촬영에만 활용**되었다.

인체 영상 촬영을 위해선 넓은 시야각이 확보되어야 하는데, 이를 위해 구경(bore)의 크기를 증가시키면 경사자기장*이 급속히 감소해 낮은 해상도의 영상을 얻게 된다. 따라서 **넓은 시야각(Field of View, FOV)을 확보하면서 높은 해상도를 제공하는 기술의 개발이 관건**이다.

* **경사자기장(magnetic gradient field, 단위:T/m)**: 자장의 변화(ΔB)를 거리(Δs)의 변화로 나눈 것으로 정의할 수 있다. MPI에서는 경사자기장 생성을 통해 자성나노입자가 여기 자기장(excitation field)에 반응하여 전기신호를 발생시키는 자기장제외구역(Field Free Point, FFP)을 발생시킬 수 있고, 경사자기장이 커질수록 자기장제외구역(FFP)의 크기가 작아져서 영상정밀도를 높일 수 있다.

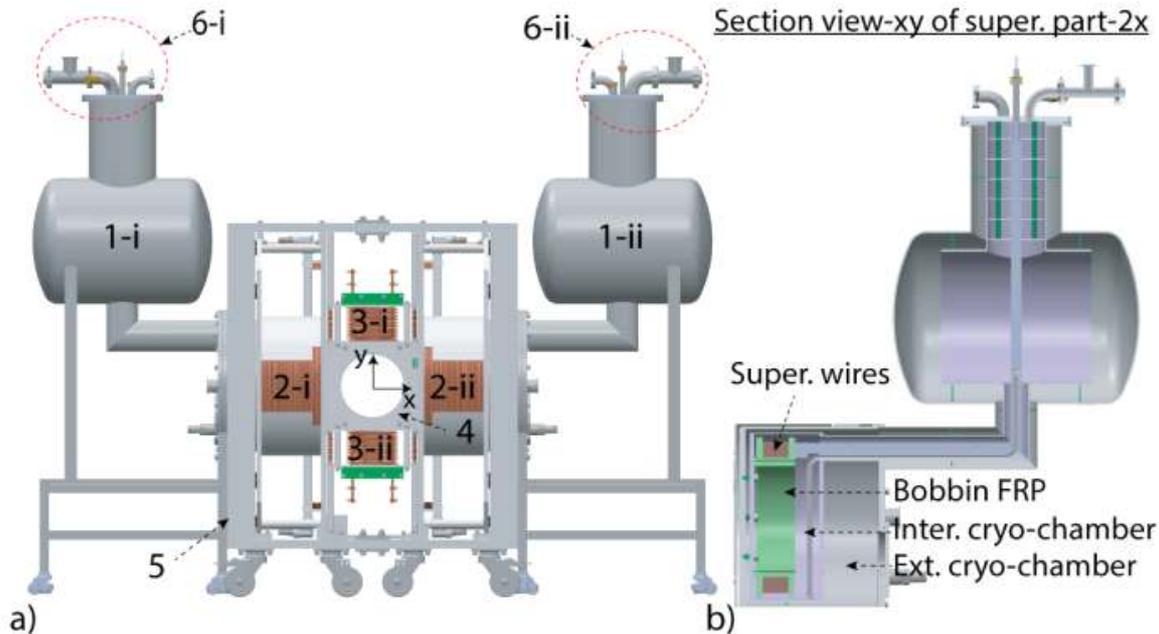
현재 세계적으로 개발된 휴먼스케일 자기입자영상(MPI) 장치는 유사한 보어 크기일 경우, 0.5T/m 이하의 경사자기장만을 생성할 수 있다. 영상복원 기법 및 자성 나노입자의 한계로 인해 인간에게 적용하려면 **2T/m 이상의 경사자기장이 필요하다**.

연구팀은 **200mm의 보어 크기에서 초전도체 코일을 이용하여 5배 증대시킨 최대 2.5T/m의 높은 경사자기장으로 고해상도를 유지하면서 인체에 사용 가능한 MPI 시스템을 개발**하였다.



▲ **인체에 적용가능한 초전도체 코일 기반 AM-MPI20 장치**: a) MPI 정면, b)MPI 장치와 냉각 장비 전체 구성, c) 직류파워서플라이장치(집중 코일, 초전도체 코일 충전용), d) 파형발생기(Function generator) 및 파워증폭장치, e) 컴퓨터 인터페이스장치, f) 냉각 장치 : 1, 2, 3 장비를 통해 초전도체 코일을 냉각시키고, 그 과정에서 진공상태를 유지하도록 함. 4, 5, 8, 9 장비를 통해 전자기코일을 충전하고, 6, 7 장비를 통해 초전도체 코일을 충전함. e, 10 장비를 통해 전체 과정을 모니터링하고, f 장비를 통해 전자기코일을 냉각시킴.

연구팀이 개발한 **진폭변조(Amplitude Modulation) MPI 방식**은 영상 스캐닝에 필요한 코일과 나노입자에서 신호를 생성하는 여기코일(Excitation coil)을 구분하여 **MPI의 크기·무게 및 전력 요구사항을 최소화**하고 **높은 경사자기장을 제공**하면서도 **말초신경자극(PNS) 발생의 위험을 낮출 수 있다.**



▲ **휴먼스케일 MPI 전체 구성도:** (a) 전체 MPI 시스템 구조, (b) 초전도체 코일 및 냉각 챔버 단면도 : 6번 구멍을 통해 초전도체 코일을 냉각시키는 액체 헬륨과 질소를 주입함. 2번 위치에 초전도체 코일과 MPI 구성 전자기코일이 포함되어 있으며, (b) 구조와 같이 초전도체 코일을 외부 전자기코일과 분리되도록 함.

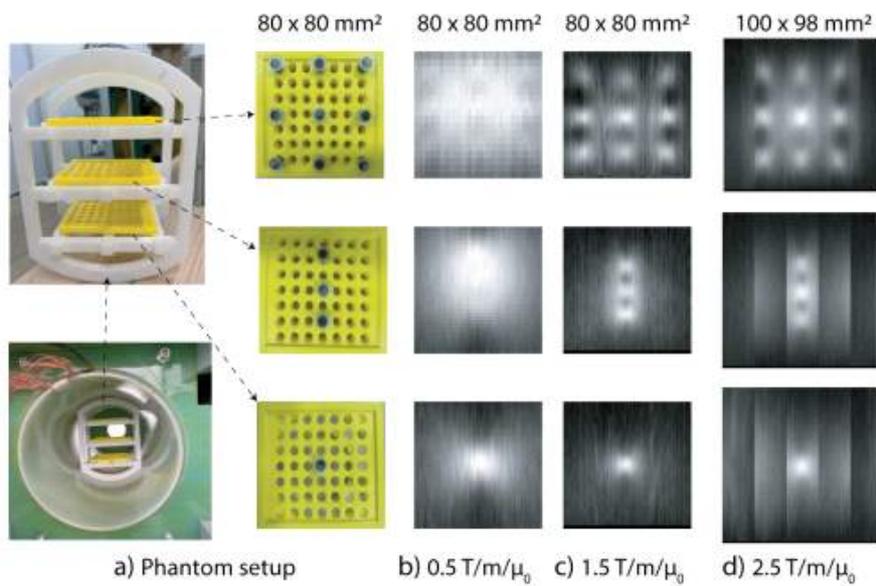
연구팀은 **NbTi 초전도체를 포함한 전선(구리:NbTi=4.5:1)을 사용하여 생성 코일을 제작**하였다. 초전도체는 전기저항이 0에 가까워 전력 손실을 최소화하고, 전력의 효율성을 크게 높일 수 있다.

넓은 시야각 확보를 위한 스캐닝코일의 높은 자기장, 주파수로 인해 시스템에 진동이 발생하여 초전도체 코일을 자기입자영상(MPI) 장치에 사용하는 것은 매우 까다로워 실제로 휴먼스케일에 사용된 사례는 없다.

연구팀은 전체 시야각(Whole Field of View, wFOV)을 9개의 작은 부분 시야각(Partial Field of View, pFOV)으로 나눠 스캐닝하는 **집중코일(Focus coil)을 통해 스캐닝코일의 진폭을 낮춰 켄칭* 발생 가능성을 현저히 낮춤으로써 시스템의 안정성을 확보**하였다.

또한, 스캐닝코일의 고주파 자기장에 의한 전력 손실을 COMSOL(다중 물리현상 해석 소프트웨어), ANSYS(구조 해석 소프트웨어)를 통해 검증하고, 발열 분포를 계산하여 초전도 물질의 임계 온도(4.2K = -268.95°C)를 넘지 않도록 안정적인 시스템을 설계하였다.

* **켄칭(Quenching)** : 초전도 상태 상실로 다량의 액체 헬륨이 외부로 기화되어 방출되는 현상



▲ **휴먼스케일 MPI로 측정된 3차원영상:** a) 실제 3D 팬텀, b-d) 2D MPI 영상 : 하얗게 빛나는 부분이 자성나노입자의 영상으로, 경사자기장이 높을수록 영상이 선명해짐을 알 수 있음. 9개 샘플 측정 결과를 보면, 기존 휴먼스케일 MPI에서 제공하는 0.5T/m 수준의 경사자기장으로는 각각의 샘플 식별이 불가능함.

윤정원 교수는 “전자기코일의 한계로 인해 휴먼스케일로 확장이 어려운 MPI 기술을 초전도체 기술과 융합하여 사람에게 사용할 수 있도록 하고, 이는 더 나아가 나노입자의 인체 내 표적화를 통해 안전하게 치료 효과를 극대화할 수 있다”며 “향후 난치성 뇌 질환에 대한 환자 맞춤형 치료법의 획기적 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대한다”고 말했다.

이번 연구는 GIST 융합기술학제학부 윤정원 교수와 Tuan-Anh Le 박사후과정 연구원이 주도하였으며, 서울대학교 연구팀과 공동연구를 진행하였다. 또한, 한미테크윈(주)이 공동 연구기관으로 참여한 산업통상자원부 로봇산업핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었다.

연구 결과는 의료영상 분야 국제학술지 '전기전자기술자협회 트랜잭션 온 메디컬 이미징(IEEE Transactions on Medical Imaging)'에 2024년 6월 26일자 온라인으로 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : IEEE Transactions on Medical Imaging (Impact Factor: 8.9)
*의료영상 분야 저명한 국제 학술지로 JCR 상위 3.2% 학술지(7/204)
- 논문명 : Toward Human-Scale Magnetic Particle Imaging: Development of the First System With Superconductor-Based Selection Coils

- 저자 정보 : Tuan-Anh Le(GIST 뇌나노로봇연구센터 박사후과정), Minh Phu Bui (GIST 뇌나노로봇연구센터 박사후과정), Yaser Hadadian(GIST 뇌나노로봇연구센터 박사후과정), Khaled Mohamed Gadelmowla (한미테크원㈜), Seungjun Oh(GIST 박사과정), Chaemin Im(서울대학교 박사후과정), Seungyong Hahn(서울대학교 교수), Jungwon Yoon(교신저자, GIST 교수)