

범부처전주기의료기기연구개발 사업 차세대 초고자기장 고온초전도 MRI 마그넷 개발 과제

심기덕, 한승용*, 손명현**
주)수퍼제닉스
*서울대학교
**한국전기연구원

1. 서 론

MRI 시스템은 2030년도에 153억 달러의 큰 시장이 예상되며, 연평균 성장률 또한 6%에 이르는 핵심 진단의료기기이다.

그러나, 국내의 MRI, PET 등 고가(高價)의 분자영상기기의 사용기 증가하고 있음에도 불구하고, 관련 핵심부품 기술의 부재로 향후 글로벌 시장에서 경쟁력 약화는 물론 심각한 무역역조가 우려되며 이에, 정부에서는 관련 부품·모듈 기술 개발을 추진하고 있다.

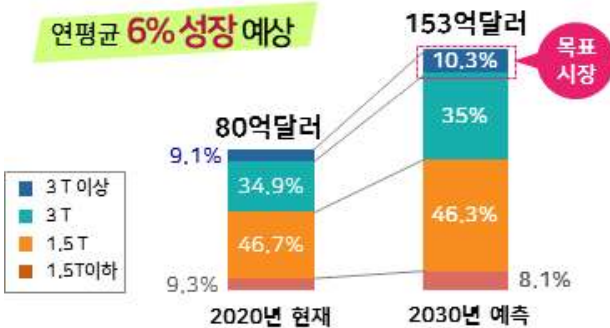


그림 1. 세계 MRI 시장 (Future MarketInsights, 'MRI Systems Market, Global Industry Analysis')

MRI 시스템은 영상을 생성하는 이미징 파트와 촬영 영상 부호화를 위한 Gradient 코일 그리고 MR 신호를 매개하는 전자파 송수신 RF 코일로 구성이 된다. 특히 MR 현상 구현을 위해서 주자기장을 발생시키는 초전도 마그넷이 MRI 시스템의 핵심 부품이다.

정부가 의료기기산업 혁신을 위해 추진하는 '범부처의료기기 기술개발 사업'에 (주)수퍼제닉스가 서울대학교, 한국전기연구원과 공동으로, MRI 시스템의 핵심 부품인 초전도 마그넷 기술을 진일보 시킬 수 있는 기술로 '차세대 초고자기장 고온초전도 MRI 마그넷 기술 개발' 과제를 신청하여 선정되었다.

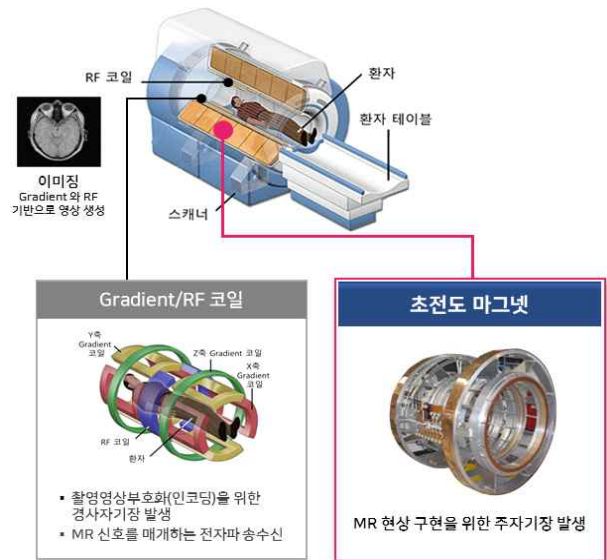


그림 2. MRI 핵심부품으로서의 초전도 마그넷 (Ref: Google Image의 'MRI: A guided tour - MagLab' 이미지 편집 사용)

2. 초고자기장 MRI의 필요성

고자기장의 MRI일수록 선명한 영상획득이 가능하고 영상 획득 시간도 단축할 수 있어서 그 수요가 크게 늘어나고 있다. 특히, 3테슬라급 이상의 고자기장 MRI 시장은 연 8% 이상의 높은 성장이 예상되며, MRI 시스템의 가격 중 마그넷이 차지하는 비중은 1.5 테슬라(T) 급에서는 전체 가격의 38% 정도 이지만 7 테슬라 이상 초고자기장의 경우에는 70% 이상을 차지한다.

따라서 초고자기장 MRI의 핵심부품 모듈인 초전도 마그넷의 개발은 기술적으로나 경제적으로 매우 중요하다.

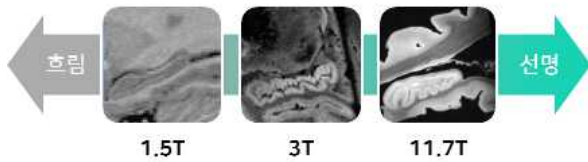


그림 3. 자기장 강도에 따른 MRI 영상 품질[1]

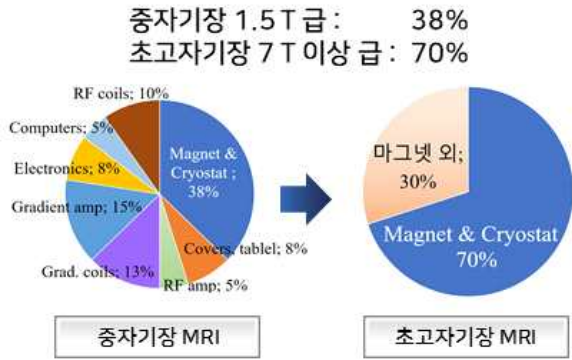


그림 4. 고자장 MRI의 초전도 마그넷 가격 비중

3. 저온 초전도 기술의 한계

저온 초전도 MRI에서 사용되는 NbTi 초전도 선재는 재료적 성능에 의해서 7 테슬라 이상의 성능을 발휘 할 수가 없다. 또한 저온 초전도 MRI의 냉매로 사용되는 액체헬륨 가격의 급등에 따른 수급 불안정으로 이미 의료 현장에서 MRI의 운전비용이 크게 증가하고 있다.

이에 따라 저온 초전도 기술을 적용한 초고자기장 MRI의 경우 그 개발 비용과 운전비용이 상당할 것으로 예상된다. 일례로, 유럽의 CEA에서 개발한 저온초전도 기반의 11.7 테슬라 MRI는 크기가 4 m x 4 m에 무게가 무려 130 ton에 이르고, 액체헬륨보다 더 낮은 온도인 Superfluid 헬륨을 사용하고 있다. 또한, 대형 부대시설이 필요하고 개발비 또한 2000억원이 소요되었다. 이 예에서 보듯 저온초전도 기술로는 향후 의료현장에 적용이 가능한 초고자기장 MRI의 개발이 사실상 불가능할 것으로 판단된다.

4. 무절연 고온초전도 기술을 이용한 한계 돌파

고온 초전도 선재는 자기장 성능이 우수하

여 고자기장 응용에 적합하다고 판단되어 왔다. 그러나 자기장 성능의 우수함에도 불구하고 초전도 성능이 깨지는 퀘칭현상이 발생하여 초전도 선재가 소손되는 문제로 응용 확대에 걸림돌이 되어 왔다.

무절연 고온 초전도 마그넷 기술은 이런 문제를 획기적으로 해결할 수 있는 기술로서 고온 초전도 선재의 우수한 자기장 성능을 100% 활용하면서 고안전성의 초고자기장 고온초전도 마그넷 구현을 가능케 한다.

앞에서 언급한 11.7 테슬라 저온초전도 MRI와 같은 사양의 마그넷 역시 무절연 고온초전도 기술의 적용으로 구현이 가능할 것으로 보인다.

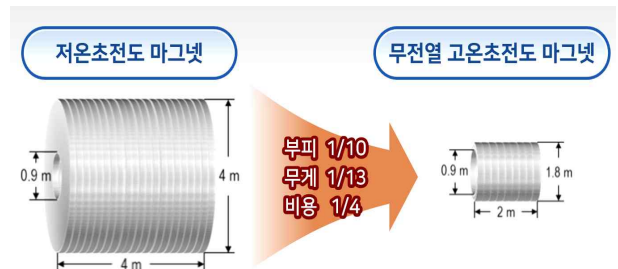


그림 5. 11.7 테슬라 MRI에 무절연 고온초전도 기술 적용시 효과(예상)

무절연 고온 초전도 기술은 본 과제에 참여하고 있는 서울대학교 한승용 박사가 2011년 창안하였다. 이 기술은 우선적으로 중/저 자기장 응용분야인 입자가속기 마그넷, 자기부상열차용 마그넷 개발에 활용되었으며, MRI 기술과 유사한 9.4 테슬라급 무헬륨 고온초전도 NMR 개발에도 적용됨은 물론 세계 최초로 판매된 18 테슬라급 마그넷에도 적용되어 세계적인 성과를 달성하였다.

특히, 한승용 박사의 지속적인 연구개발 결과 2019년에 45.5 테슬라라는 세계 최고의 자기장 기록을 수립하였으며, 그 결과가 네이처 분지에 게재되어 세계적으로 기술을 인정받게 되었다.

미국 MIT에서 파생된 CFS에서는 본 기술을 활용하여 차세대 초소형 핵융합장치 개발을 개시하였으며, 영국 물리학회에서는 2019년 break through 기술로 선정된 바 있다.

5. 초고자기장 고온초전도 MRI 마그넷 개발 목표

본 과제에서는 중심자기장 7 테슬라 이상, 상온 보어 100 mm 이상의 무절연 고온초전도 MRI 마그넷 기술을 개발하고자 한다. 또한 액체헬륨을 사용하지 않는 극저온 전도냉각 기술도 개발한다.

기술개발 목표를 상세히 살펴보면, MR 영상 촬영을 위한 균등자기장 발생 기술로서 상온 보어 100 mm 이상에서 자기장 균일도 10 ppm 이하를 달성하여 영상 촬영이 가능

및 제어기술 및 운전 프로토콜을 개발한다. 그리고 이 결과들을 모아서 차세대 전신/뇌 전용 7~14 테슬라급의 MRI 통합 시스템 설계 기술을 확보한다.

한국전기연구원은 1단계에서 마그넷 성능평가 방안을 표준화하고, 모듈 코일들에 대한 성능평가를 수행한다. 2단계에서는 모듈코일로 구성된 MRI 마그넷의 성능평가와 분석 및 장기운전 신뢰성 평가를 수행한다.

차세대 초고자기장 고온초전도 MRI 마그넷 개발

중심 자기장 7T 이상

상온보어 100mm 이상

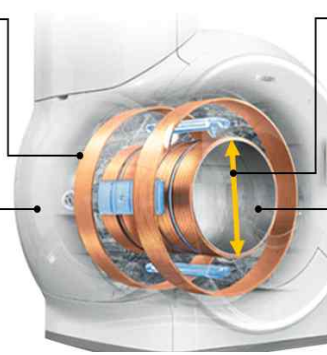
액체헬륨 미사용

무절연 고온초전도 마그넷 기술 적용

- 성능: 중심자기장 7T 이상
- Running target 설정: 중심 자장 상향
- 고안정성 초전도 마그넷
- 쉐일 보호기술 적용

무헬륨 전도냉각 기술 적용

- 성능1: 냉각온도 20K
- 성능2: 마그넷 온도구배 5K 이내
- 전도냉각 방식
- 극저온 냉동기 적용



MR 영상 촬영을 위한 균등 자기장 발생

- 성능1: 상온보어 100mm 이상
- 성능2: 자기장 균일도 10 ppm 이하
- 자기장 최적설계
- 고자장 MRI용 Passive shimming 기술 적용

자기장 고품질화 기술 적용

- 성능1: 와전류에 의한 파형변화 10% 이내
- 성능2: 시간에 따른 자기장 안정도 1ppm/hr 이하
- 고성능 Gradient 코일 기술 적용
- Screen current 저감 운전 기술 적용

그림 6. 연구개발 목표 및 주요 개발 사양 (ref : Google Image의 'Phillips Helium free MRI system' 이미지 편집 사용)

한 수준의 마그넷을 개발하고, 무헬륨 전도냉각 기술을 적용하여 냉각 온도 20 K 및 마그넷 내에서의 온도 구배를 5 K 이내로 제한하는 냉각 기술을 개발한다.

또한 고성능의 Gradient coil 및 Passive shim을 적용하여 와전류에 의한 영상 신호변화를 10% 이내로 제한하고 1 ppm/hr 이하의 시간에 따른 자기장 안정도를 갖는 MRI용 고온초전도 마그넷을 개발하고자 한다.

6. 단계별 기술 개발 계획

1단계에서 주관인 (주)수퍼제닉스는 초전도 마그넷의 모듈코일을 제작하고, 2단계에는 MRI용 고온 초전도 마그넷 시스템을 제작하고 통합한다. 서울대학교 중심의 대학 연합체는 1단계에서 마그넷 개발을 위한 설계 및 성능 예측을 수행하고 2단계에서는 마그넷 정

| | 1단계 (20.09~22.02) | 2단계 (22.03~23.12) |
|--------------|------------------------------|--|
| 수퍼제닉스 (주관) | 초고자기장 MRI용 고온초전도 마그넷 모듈코일 제작 | 초고자기장 MRI용 고온초전도 마그넷 제작 및 시스템 통합 |
| 서울대학교 (참여) | MRI 마그넷 설계 및 성능 예측 | 마그넷 정밀 제어기술, 운전프로토콜 개발 차세대 전신, 뇌전용 7~14T MRI 통합시스템 설계 확보 |
| 한국전기연구원 (참여) | 마그넷 성능평가 방안 표준화 및 모듈코일 성능평가 | 고온초전도 MRI 마그넷 성능평가/분석 장기 운전 신뢰성 평가 |

그림 7. 단계별 기술개발 내용

7. 연차별 기술 개발 내용

1차년도에는 초고자기장 MRI 성능의 요구조건을 상세 분석하여 핵심 구성별 설계 파라미터를 도출하고 기본 시스템 설계안을 도출한다. 이후 전자기, 열, 구조, 냉각 설계를 통해서 MRI 마그넷 통합시스템을 설계하고, 이것을 바탕으로 2차년도에 제작될 모듈코일의 형상 설계 및 보빈 설계를 수행한다.

2차년도에는 정밀권선기법, 조인트저항 최소화기법, 전기적/열적 연결구조를 적용하여

모듈코일들을 제작하고 성능평가를 수행한다. 또한, 안정성이 높은 마그넷 시스템 구현을 위한 보호회로의 설계, 열침입 최소화 설계, Gradient coil 설계를 수행하여 시스템 제작을 준비한다.

3차년도에는 모듈코일들을 조립하고 전도 냉각 극저온용기와 결합하여 MRI 마그넷을 제작한다. Ferro shim, current sweep reversal 기법 등의 자기장 고품질화 및 운전 안정성 향상 기술과 마그넷과 gradient 코일 간 간섭 완화기술을 적용하여 MRI 마그넷 통합시스템을 제작한다. 이후 운전 시퀀스에 따른 성능평가를 수행하여 자기장 균일도 등의 핵심 자기장 성능과 열적 성능을 평가한다.

4차년도에는 시스템을 개선/보완하고, 정상운전 프로토콜과 사고대응 프로토콜에 따른 장기운전시험을 수행하여 시스템의 신뢰성을 검증하며, 이 과정을 통해 7 테슬라 이상 초고자기장 마그넷 시스템을 개발을 완료한다. 또한 시험결과를 반영한 14 테슬라급 수준의 전신/뇌 전용 초고자기장 MRI 마그넷 시스템 설계 기술을 확보한다.

9. 연구개발 추진 전략

러닝 타겟 전략 - 제안한 목표인 7 테슬라급 개발에 국한하지 않고, 더 높은 목표의 달성을 시도한다. 국내는 물론, 해외에도 본 연구에 참조될 사례가 부족한 점을 감안하여, 사업 초기에 우리 자체적으로 기술성, 경제성, 시장성 등을 자세히 분석하여, 파급력이 더 큰 목표 사양을 검토한다. 그리고 제품의 최적 설계를 통해 선제 소요 비용을 최소화하고, 아껴 쓰는 사업 운영을 통해 마련된 예산을 투입하여, 상향된 목표 성능의 초고자기장 MRI용 마그넷 개발을 추진해 보고자 한다.

강점을 더욱 강화하는 전략 - 세계 최고 수준의 국내 고온초전도 마그넷 기술을 적극 활용하여, 효율적인 연구개발이 이루어지도록 한다. 또한, 광범위한 국제적 네트워크를 적극 활용한 최신 정보 수집을 통해, 선도적인 연구 과정에서 생길 수 있는 문제점들을 사전에 인식하고 방지하여, 실수를 최소화함으로써 단기간에 완성도 높은 성과를 도출하고자 한다.

8. 참여기관 협력체계

본 사업에는 초전도 마그넷 관련 국내 최고 전문가와 전문기관이 참여한다.

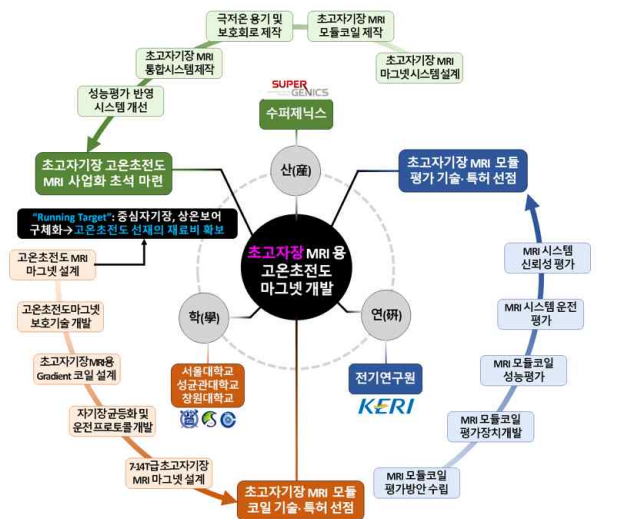


그림 8. 참여기관 협력 체계

10. 기대효과

본 사업의 성공을 통한 초고자기장 고온초전도 MRI 제품화를 통해서, 기술적으로는 MRI 핵심부품기술의 패러다임 전환을 이루게 될 것으로 기대된다. 특히 저온초전도 MRI 기술의 한계를 뛰어넘는 초고자기장 MRI용 고온초전도 마그넷 기술을 확보함으로써, 우리나라가 MRI 분야 및 고온초전도 기술 분야를 선도하게 될 것으로 기대된다.

경제 산업적으로는 MRI 3사의 독과점 체제를 극복하고, 글로벌 시장 점유율을 확보할 수 있는 계기가 될 것이며, 차세대 영상진단 의료기기 개발을 통한 의료기기 제조산업 활성화는 물론, 무헬륨 고온초전도 기술 기반의 한국형 MRI 진단 환경 구축도 가능할 것으로 기대된다.

사회적으로는 초고자기장, 초고성능 MRI 개발을 통한 최고급의 의료서비스 제공으로, 국민의 삶의 질 향상에 기여할 것이다.

본 사업을 통해 세계 최고의 고온초전도 마그넷 기술을 확보하게 됨으로써, 향후 의료,

환경, 에너지, 교통, 첨단과학, 국방 및 전력 시스템에 응용될 수 있는 혁신적 성능의 고온 초전도 기술 기반 자기장 응용 제품군 개발이 가능할 것이다.

참고문헌

[1] Justine Beaujoin et al., “ Post mortem inference of the human hippocampal connectivity and microstructure using ultra high field diffusion MRI at 11.7 T”, Brain Structure and Function, 223:2157 - 2179 (2018)

저자이력



심기덕
1991년-2010년 연세대학교 전기공학과
1999년-현재 한국전기연구원 책임연구원
2017년-현재 주)수퍼제닉스 대표이사



한승웅
1994년-2003년 서울대학교 전기공학과
2006년-2015년 Francis Bitter Magnet Laboratory Principal/Co-Investigator
2015년-2017년 Florida State University Associate Professor
2017년-현재 서울대학교 전기정보공학부 교수



손명환
1982년-1988년 부산대학교 물리학과(학사, 석사)
1993년-1998년 부산대학교 대학원 물리학과(박사)
1988년-현재 한국전기연구원 책임연구원