

고온초전도 사극자석 냉각 시스템

김 석 호

창원대학교 메카트로닉스대학 기계공학부

1. 서 론

2011년부터 2021년 건설을 목표로 한국의 기초과학연구원(IBS) 중이온가속기건설 구축사업단(RISP)에 의하여 RAON이라 불리는 중이온가속기 구축사업이 진행되고 있다. 중이온가속기를 구성하는 수많은 장치 중 IF(In-flight Fragment) separator는 Driver Linac으로 가속된 고에너지 (200MeV/u) 및 대전류(400 kW)의 중이온 빔을 입사하여 다양한 희귀동위원소를 생성/분리하고 순도 높은 희귀동위원소 빔을 제공하는 장치이다.

이 장치에는 이온빔을 집속하고 인출하기 위한 다양한 사극 혹은 이극의 전자석이 사용되는데 강한 자기장을 발생시키기 위해서는 저온초전도(LTS) 혹은 고온초전도(HTS) 자석을 사용하기도 한다. 특히 IF separator의 전단부에 위치하는 사극자석은 중성자 및 양성자와의 충돌로 인한 매우 큰 열복사가 발생하게 된다. 이때 발생하는 열복사는 가속기 사양 및 자석의 부피에 따라 달라지지만, 수백 와트 이상이 복사부하로 작용하게 된다.

6~13 T/m의 큰 자장경사(Field gradient)를 생성하기 위하여 초전도 자석이 사용될 경우 일반적인 초전도 자석과는 달리 열복사에 의한 냉각 부하를 반드시 고려해야 한다. 액체헬륨에 의해 냉각되는 저온초전도 자석의 경우 열복사에 의해 증발하는 헬륨을 4.2 K 부근에서 재응축해야 하므로 냉각시스템의 부하가 매우 커지게 된다. 따라서 초전도 자석의 운전온도를 높이고 냉각 부하를 저감하기 위해서 고온초전도(HTS)자석을 적용할 필요성이 있게 된다. 고온 초전도 자석을 적용하기 위해서는 기존의 고온초전도 사극자석의 냉각시스템과 달리 큰 복사 부하, 복사선에 의한 재료의 열화문제, 지지구조물 및 절연물 등의 재료 선택에 있어 기존에 쓰던 재료 이

외에 적합한 재료의 선정이 고려되어야 한다.

본문에서는 이러한 고온 초전도 자석이 적용된 IF 장치 전단부의 사극자석 개발과 관련하여 기체 헬륨에 의한 냉각 시스템의 기초연구, 국내외 연구현황, 그리고 전망에 대하여 기술하고자 한다.

2. 연구동향

Brookhave National Lab.에서는 HTS quadrupole magnet에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 실제 FRIB (Facility for Rare Isotope Beams)용 고온 초전도

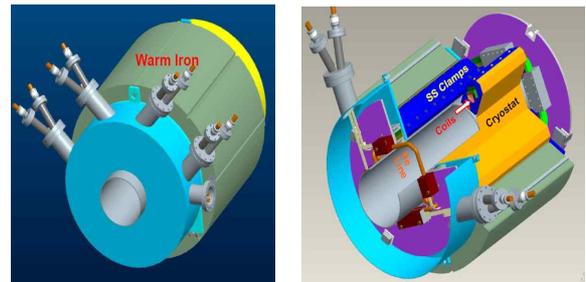


그림 1. Cryo-mechanical structure modeling of HTS quadrupole magnet, BNL [1].



그림 2. Fully assembled FRIB quadrupole HTS magnet, BNL [2].

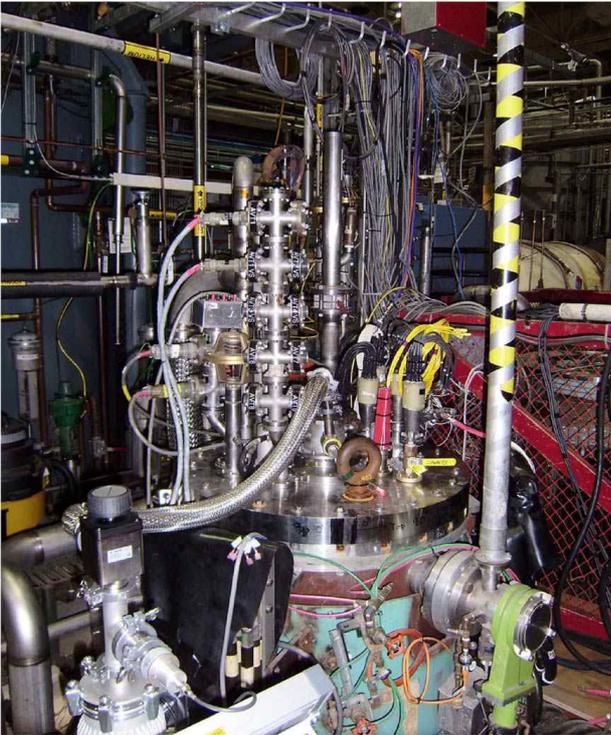


그림 3. RIB HTS quadrupole installed in vertical test facilities with a significant diagnostics instrumentation.[2].

사극 자석의 개발이 진행 중이며 Superpower사와 AMSC사의 고온초전도 선재를 이용한 시스템의 설계를 마치고, 액체 질소에서 임계전류 측정 등의 기초 성능 실험을 수행하였다 [1-2].

여기서도 복사부하 냉각을 위하여 전도 냉각 방식이 아닌 기체 헬륨의 강제 순환을 고려한 냉각구조를 채택하고 있다. 그러나 저온 기체 헬륨의 순환을 이용한 저온 실험(30~50 K)결과는 아직 보고되지 않은 상태이며, 기화된 헬륨에서 수행한 결과는 보고되고 있다.

3. 고온 초전도 사극자석 냉각 시스템 기초 연구

3.1 고온초전도 사극자석 냉각 방식

기초과학연구원, 한국전기연구원, 창원대학교는 공동으로 2016년까지 IF(In-flight Fragment)의 전단부에 설치 될 고온 초전도 자석을 이용한 사극자석 시제품 개발에 대한

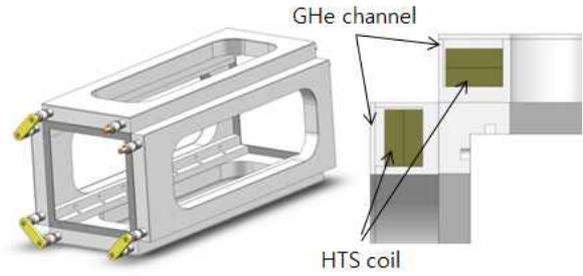


그림 4. 헬륨 직접 냉각 방식의 개념도.

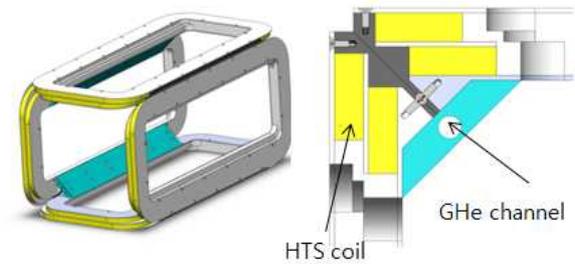


그림 5. 헬륨채널을 이용한 전도냉각방식의 개념도.

연구를 진행하고 있으며, 창원대학교는 주로 고온초전도 사극자석의 냉각 구조 및 기계적 설계를 담당하고 있다.

중성자 및 양성자에 의한 복사 열화 문제로 기존의 고온초전도 자석에서 많이 사용되는 GFPR (Glass Fiber Reinforced Plastic) 및 다양한 종류의 저온 에폭시와 절연 재료 등의 사용은 극히 제한되며, 대부분 금속 구조물과 세라믹 피막 등을 사용하여야 한다.

또한, 매우 큰 자장 경사를 요크를 통해 발생시키기 때문에 기계적으로 강한 구조를 필요로 하며, 이 또한 한정된 공간 안에서 큰 전도 열부하를 발생시키게 된다. 중성자 및 양성자에 의한 복사 열부하 및 전도 열부하를 고려하였을 경우 일반적인 전도 냉각방식은 효과적인 냉각이 어렵기 때문에 본 고온초전도 사극자석의 냉각에는 FRIB와 마찬가지로 기체 헬륨의 순환을 이용한 냉각 방식을 적용하였다.

기체 헬륨 냉각 방식을 사용하는 방법에는 크게 두 가지의 방법이 있다. 그림 4, 5와 같이 Internal gas cooling 방식과 Conduction from helium channel 방식이다. 내부 가스 냉각 방식의 경우 코일에 직접 헬륨이 접촉하여 냉각하게 되므로 접촉저항에 의한 문

제가 줄어들며 열이 직접 전달되어 냉각효율이 높다. 그러나 코일주변을 밀폐하도록 설계하여야 하므로 코일권선 이후 외부 헬륨채널을 용접하여 제작하여 하며, 전류리드의 부착이 힘들다. 또한 외부헬륨채널의 부피로 인하여 요크 형상을 수정하여야 하며 구조물이 늘어나 발열량이 늘어나게 된다. 그에 반해 헬륨채널을 이용한 전도냉각방식은 전체적인 구조는 단순하나, 코일과 보빈의 접촉이 좋지 않을 경우 열저항으로 인하여 냉각 효율이 떨어질 수 있다. 이 경우 어쩔 수 없이 보빈과 코일 사이에 제한된 용량의 에폭시 등을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 헬륨채널을 통한 전도 냉각 방식을 채택하였다.

먼저 기체 헬륨 순환 냉각을 위해서는 식 (1)과 같이 시스템의 발열(\dot{Q})과 허용 온도차(ΔT)를 바탕으로 기체 헬륨의 순환량(\dot{m})을 결정해야 한다.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \dots\dots\dots (1)$$

구해진 최소 필요 유량을 통해 헬륨 채널에서 압력강하를 계산하게 되며 이는 헬륨 순환을 위한 극저온 blower의 선정 기준이 된다. 압력강하는 식 (2)를 통해 구해진다.

$$h_2 = \left(f \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad [m] \dots\dots\dots (2)$$

실제 극저온 blower 및 극저온 냉동기를 이용한 저온헬륨 순환시스템 개발에 앞서 창원대학교에서는 상온 헬륨 압축기와 1단 GM 냉동기를 이용한 저온 헬륨 실험 장치를 제작하여 기초 실험에 활용하였다.

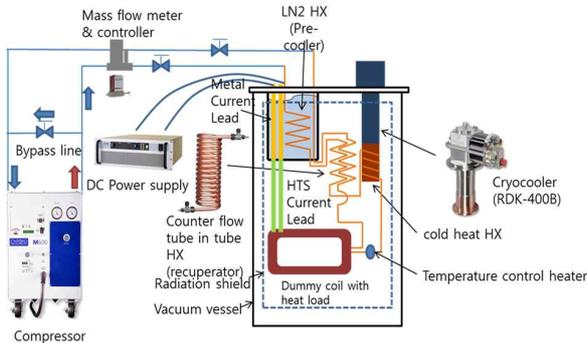


그림 6. 저온의 기체헬륨 냉각시스템 구성도.

시스템의 구성의 그림 6의 개략도와 같다. 상온의 기체헬륨은 액체 질소조를 통과하여 액체질소 온도인 77 K까지 냉각되어지며, 복열기에서 사극자석을 통과 나오는 저온의 기체헬륨을 통해 30 ~ 40 K의 기체헬륨은 냉각되고 최종적으로 극저온 냉동기에 의하여 목표로 하는 20 K의 온도 까지 냉각된다. 이를 통하여 상온의 기체헬륨을 저온으로 냉각하게 되며 이를 통해 저온의 헬륨 순환 시스템에 대한 기초 냉각 시스템의 연구를 진행하였다.

실제 시스템은 질소조, 복열기, 상온헬륨압축기를 필요로 하지 않으며 하나의 blower를 이용하여 순환하며 기체헬륨은 극저온 냉동기를 이용하여 냉각되는 형태로 되어 있다. 이러한 구조는 기체 헬륨 냉각 시스템의 전반적인 기본 구조이며 이러한 방법을 이용하여 기체 헬륨 순환 냉각 시스템을 구성 할 수 있다.

이 시스템에서 중요 요소는 누설의 발생방지, 냉각하고자 하는 장비의 열부하에 따른 질량 유량, 열접촉, 냉각유로에 따른 압력강하이다.

3.2 고온초전도 사극자석 열 및 구조 설계

그림 7는 사극자석의 설계 모델링으로서 Beam tube에 설치된 고온초전도 사극자석과 요크, 그리고 극저온 용기를 포함한 전체

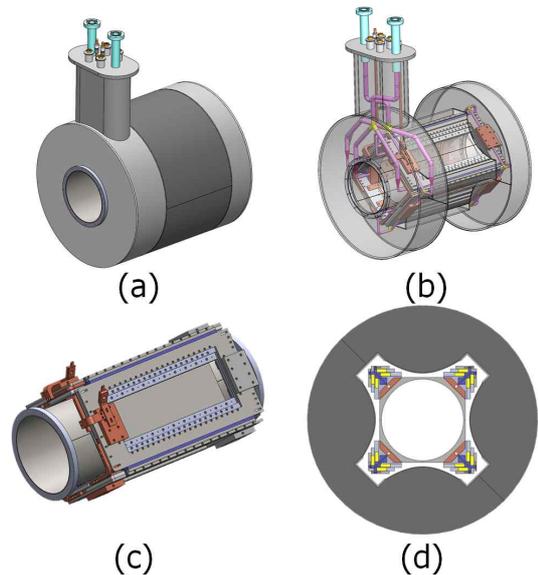


그림 7. 사극자석의 설계 모델링; (a) 전체형상, (b) 사극자석의 내부배치, (c) beam tube에 조립된 사극자석, (d) 사극자석 단면도.

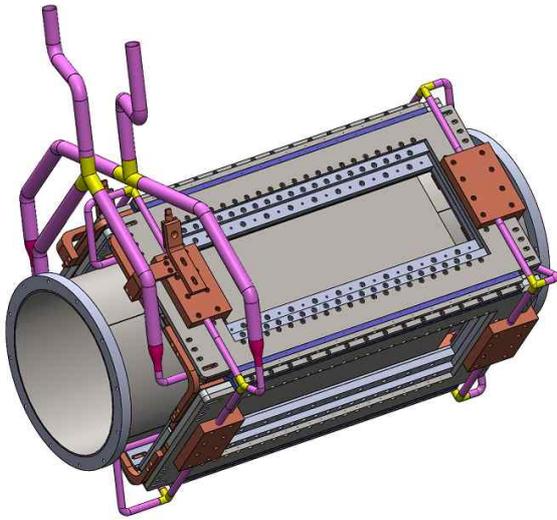


그림 8. 기체헬륨배관이 연결된 사극자석.

적인 모습을 보여준다.

그림 8은 사극자석의 헬륨공급용 배관의 형상을 나타낸다. 헬륨공급배관은 1/2 inch이며, 배관의 총 길이는 5 m이며 배관의 압력강하는 100 m 이다.

고온초전도 자석은 beam tube 위에 조립되는 형상이며, 각각의 자석은 볼트를 이용하여 조립된다. beam tube를 극저온영역으로 하여 기존에 코일 및 서포터에 작용하는 응력을 분산시켰으며, 열침입이 늘어난 부분은 beam tube 전, 후단의 두께를 얇게 하여 최소화하였다. 위의 모델링을 바탕으로 구조해석을 수행하였다. 해석은 1/8 모델을 작성하여 수행하였고, 전류통전에 의하여 발생하는 Lorentz force를 자석에 body load로 적용하였다. 그림 9는 1/8 모델의 구조해석결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 코일에 최대 23.5 MPa의 응력이 작용하며, beam tube에는 97 MPa의 응력이 작용한다. 이는 재질의 항복응력을 고려하였을 때 충분히 안전한

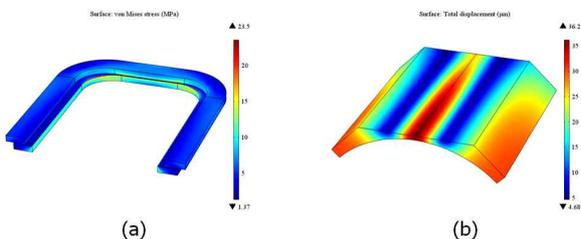


그림 9. 사극자석의 구조해석결과; (a) Coil, (b) Beam tube.

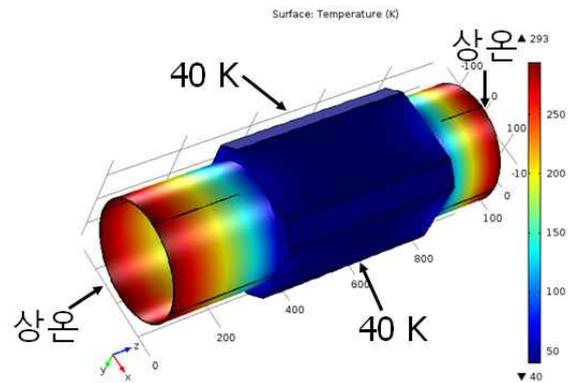


그림 10. Beam tube의 열해석 결과.

값이다.

beam tube를 극저온 영역으로 구성함에 따라 수정된 beam tube에 대한 열해석이 수행되었다. 본 시스템에서의 열부하는 전도에 의한 열침입과 양성자와 중성자가 부속품과 충돌하며 발생하는 복사 열부하가 있다. 이때 복사 열부하는 대략적으로 부피에 비례하여 계산할 수 있으며 그 값은 10 kW/m^3 극저온부에 위치한 부품은 사극자석, 냉각채널, beam tube등이 있으며 그 부피는 $40.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 이다. 이때의 복사 열부하는 406 W로 계산된다.

전도에 의한 열침입량은 beam tube의 형상에 의하여 결정되며, 이는 간단한 열해석을 통하여 쉽게 계산할 수 있다. 그림 10은 beam tube의 열해석 결과이다. 열해석을 통한 전도에 의한 열침입량은 69.6 W이다. 따라서 사극자석의 전체 열침입량은 476 W가 된다.

사극자석의 냉각에 필요한 극저온 기체헬륨의 질량유량을 계산하기 위하여 1-D유동해석을 수행하였다. 기체헬륨의 입구온도를 40 K, 입출구 온도차를 3 K으로 하였을 때 질량유량은 18 g/s이다. 해석모델은 1/4 모델로 하였으며, 그에 따라 헬륨의 질량유량도 모델의 양쪽에 2.33 g/s로 하였다. 그림 11은 사

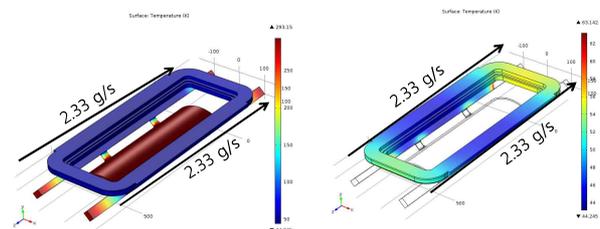


그림 11. 1/4모델에 대한 열해석 결과.

극저온 냉동시스템 개발 현황

극자석의 1-D 해석결과이다. 해석결과 코일의 온도가 50 K 이하로 냉각되는 것을 확인하였다.

3.3 저온 헬륨 순환 시스템 설계

고온초전도 사극자석의 냉각테스트를 위해서는 사극자석 냉각순환용 냉각시스템이 필요하다. 그림 12은 기체헬륨순환 및 냉각시스템의 설계 모델이다. 기체헬륨의 순환을 위하여 극저온 Blower를 사용하며, 극저온냉동기 3~4 대를 사용하여 기체헬륨을 냉각하게 된다. 냉각된 기체헬륨의 유량은 Coriolis 질량유량계를 이용하여 측정하며, 베이오넷구조를 이용하여 시스템의 열침입을 최소로 줄인다.

사극자석의 운전온도를 40 K으로 하였을 때 2단 냉동기를 사용하는 것 보다 1단 냉동기를 이용하여 냉각하는 것이 유리하며, 이때 사용가능한 냉동기는 표 1과 같다.

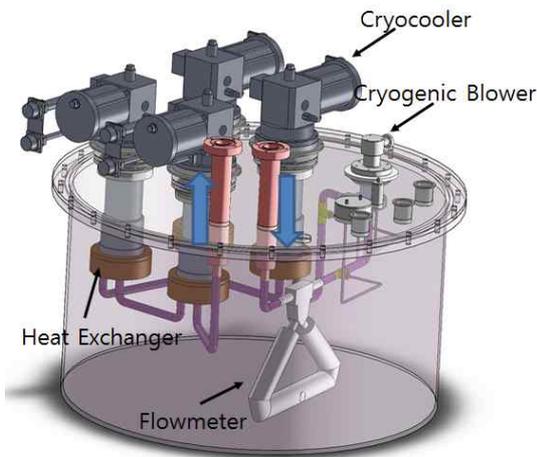


그림 12. 헬륨순환냉각시스템의 개략도.

표 1. 헬륨순환냉각시스템에 사용가능한 극저온냉동기.

Crocooler	RDK-500B	AL-325	AL-330	RSC-40T
	SHI	Cryomech		Ulvac
냉각용량 (@40 K)	122 W	197 W	135 W	110 W
필요수	4 EA	2 EA	3 EA	4 EA

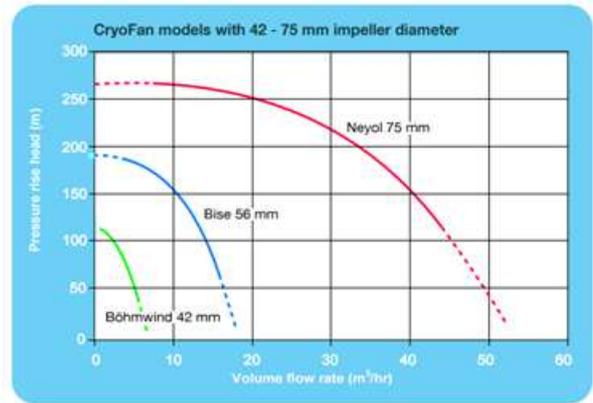


그림 13. 극저온 Blower의 성능곡선[3].

저온 Blower는 유체의 부피유량과 양정을 이용하여 결정할 수 있다. 부피유량의 경우 운전온도와 질량유량으로 결정되며, 양정의 경우 배관 및 열교환기의 손실수두로 결정된다. 본 시스템의 질량유량은 20 g/s이며 배관의 사이즈를 1/2 inch를 사용할 경우 부피유량은 12 m³/hr이다. 사극자석의 냉각배관의 손실수두가 100 m정도로 가정할 경우 본 시스템에는 Cryozone사의 Bise나 Neyol이 적합하다.

일반적인 유량계는 극저온시스템에서의 헬륨의 유량을 측정하기가 어렵다. 또한 본 시스템의 경우 다른 순환시스템에 비하여 냉매의 질량유량이 매우 크다. Coriolis 유량계는 유체의 전향력을 이용하여 질량을 직접 측정하는 장비로 극저온에서도 적용이 가능하며, 대용량의 유량도 측정이 용이하다.

위와같이 설계된 저온 헬륨 순환 시스템은 고온초전도 사극자석 시제품 평가에 필수적인 구성 요소이며, 2015년 말까지 시스템 제작을 완료하고 2016년 개발된 시제품 평가에 사용될 계획이다.

4. 고온초전도 사극자석의 기체헬륨 냉각 시스템의 전망

많은 고온초전도 자석이 사용의 편리성 때문에 전도 냉각 방식 채택하고 있지만, 외부로의 열침입이나 내부 발열이 매우 큰 특수한 경우는 전도 냉각에 의해 충분히 냉각되지 않는 경우가 발생한다. 본 냉각시스템의 적용을 통하여 외부로부터의 전

도 열침입이 큰 대용량 초전도 풍력발전기 및 교류 운전용 고온초전도 자석 등에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 IF system에 적용되는 고온 초전도 사극자석은 세계적으로 개발이 진행 중이며, 아직 기술의 안정화가 이루어지지 않음에도 외국 선진기관으로부터 기술을 도입하지 않고 선도적인 연구를 진행하고 있다. 앞서 기술한 냉각 시스템의 연구를 통해 고온초전도 사극자석 개발에 있어 선도적인 위치에 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 본 연구에서 사용되는 극저온 냉동기 및 헬륨 blower 등은 매우 고가의 부품들로서 전량 외국에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 향후 중이온가속기 뿐만 아니라, 항공우주 산업의 발전을 위해서라도 이러한 핵심 요소 부품에 대한 국내 개발이 필요할 것으로 판단된다.

저자이력



김석호(金錫鎬)

1993년 한국과학기술원 기계공학과, 1997년 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사), 1999년 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사), 2005년 한국전기연구원 선임연구원, 2010년 국립 창원대학교 기계공학과 조교수, 2014년 국립 창원대학교 기계공학과 부교수

참고문헌

- [1]R. Gupta et al., "Design, construction and Test of HTS Quad for FRI B", ASC 2012
- [2]R. Gupta et al., "SHTS Quadrupole for FRIB.Design, Construction and Test Results" IEEE TRANS. ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 25, NO. 3, JUNE 2015
- [3]<http://www.cryozone.nl/>