

초전도 자화손실 측정을 위한 다극 자석 설계

이건준*, 윤미연*, 박상호*, 김병주*, 최경달*, 이지광**, 김우석*
한국공학대학교*, 우석대**

Design of a Multipole Magnet for Measuring Magnetization Loss in Superconductors

Geonjun Lee*, Miyeon Yoon*, Sang Ho Park*, Byeong-Joo Kim*, Ji-Kwang Lee** and Woo-Seok Kim*
Tech University of Korea*, Woosuk University**

Abstract - 본 논문에서는 교류 자기장 조건에서 초전도 도체의 자화손실을 측정하기 위한 다극 자석 구조를 제안하였다. 기존 교류손실 측정 시스템에서는 외부 자석을 이용하여 교류 자기장을 인가하고, 픽업코일과 캔슬코일을 통해 자화 신호와 배경 유도 신호를 측정 및 보상한다. 본 연구에서는 제안한 다극 자석 구조의 타당성을 평가하기 위해 목표 자기장 0.2~0.25 T를 기준으로 이극 자석을 설계하고, 이를 비교 기준으로 설정하였다. 해석 결과 이극 자석은 측정 공간에서 약 0.22 T의 자기장을 형성하였다. 이후 동일한 설계 조건의 외부 자석 2개를 역방향으로 배치하여 다극 자석 구조를 구성하였으며, 측정 공간에서 약 0.26 T의 자기장이 형성됨을 확인하였다. 또한 누설자속은 이극 자석의 0.0123 T에서 다극 자석의 0.0112 T로 감소하여 약 8.9%의 저감 효과를 보였다. 이를 통해 제안한 다극 자석 구조가 측정 공간의 자기장 형성 및 외부 누설자속 저감 측면에서 유효함을 확인하였다.

1. 서 론

초전도 도체가 교류 환경에서 운전될 경우 초전도체의 반자성 특성에 의하여 히스테리시스 손실인 자화손실이 발생하며, 이는 시스템 효율과 열적 안정성에 영향을 미치므로 정확한 손실 평가가 필요하다. 자화손실을 측정할 때 얻어야 할 손실성 전압신호는 외부자장 인가용 배경 자속(Background Magnet) 내 측정 공간에서의 자기장 균일도, 외부 자기장에 의한 배경 신호 보상, 누설자속의 크기가 측정 정확도에 중요한 영향을 미친다. 지금까지 사용되고 있는 자화손실 측정 시스템에서 외부자장 인가용으로 사용되는 배경 자석은 하나의 마그네트로 구성된 단일 구조로 되어 있다. 이 경우, 하나의 자석 내에 픽업코일과 캔슬코일이 배치되고 샘플의 신호가 캔슬코일에는 영향을 주어서는 안되므로, 서로의 영향을 최소화하기 위해 두 코일 사이에 일정거리를 두어야 한다. 이는 공간적으로 비효율성을 키우게 되고 측정에서 요구되는 자기장의 균일도를 얻기 위해서 더욱 배경자석의 길이와 길어져서 전체적으로 체적이 커지는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 초전도 도체의 자화손실 측정을 위한 다극 자석 기반 측정 구조를 제안하였다. 목표 자기장 0.2~0.25 T를 기준으로 이극 자석을 설계하고, 동일한 설계 조건의 자석 2개를 역방향으로 배치한 다극 자석 구조와 비교하였다. 이를 통해 측정 공간의 자기장 형성 특성, 자기장 균일도 및 누설자속 저감 효과를 해석적으로 검토하였다.

2. 본 론

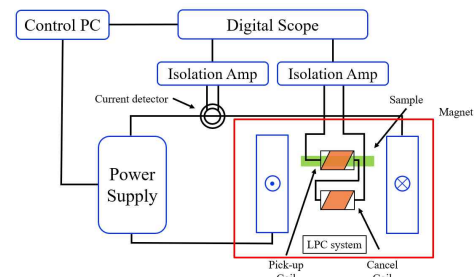
2.1 교류손실 측정 원리 및 시스템 구조

초전도 도체의 자화손실을 측정하기 위해서는 외부자기장을 만들어 주기 위한 배경 자석(Background magnet)에 교류전류를 흘려 샘플에 교류 자기장을 인가하게 된다. 배경 자석이 만드는 자기장 내에 동일한 사양의 픽업코일과 캔슬코일을 두게 되며 두 코일을 역결선하여 얻어진 측정 전압 신호와 배경 자석에 흐르는 전류 신호로부터

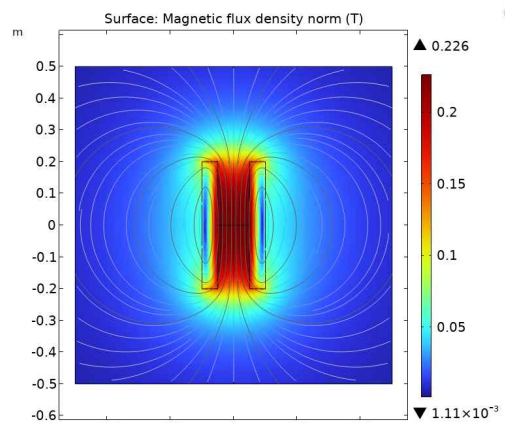
자화손실을 측정 값을 얻을 수 있다. 초전도 시편을 포함하고 있는 픽업코일에서는 외부자기장에 의해 시편에서 발생하는 저항성(손실성) 기전력과 외부자기장에 의한 유도기전력이 합해진 신호가 측정되고, 캔슬코일에서는 외부자기장에 의한 유도기전력만 측정되므로 두 코일의 유도기전력은 서로 상쇄되어 저항성 전압신호를 측정하고 전류 신호와 곱하여 적분함으로써 자화손실을 얻을 수 있다. 측정 오차를 줄이기 위해서는 측정 시편에 인가되는 교류 자기장의 크기와 공간적 균일도, 측정 환경의 전자기적 안정성이 중요하므로 자기장 인가 장치의 성능과 외부 영향 최소화가 필수적으로 요구된다.

2.2 이극 자석

다극 자석 설계의 타당성을 정량적으로 평가하기 위해 비교 기준 모델로 이극 자석을 설계하였다. 그림 1은 이극 자석 기반 교류손실 측정 시스템의 구성을 나타낸다. 해당 시스템은 초전도 도체에 교류 자기장을 인가하는 이극 자석, 자화 신호를 검출하는 픽업코일, 외부 자기장에 의한 배경 신호를 보상하는 캔슬코일, 그리고 전원 장치 및 커패시터 뱅크로 구성된다. 이극 자석은 목표 자기장을 0.2~0.25 T로 설정하여 설계하였으며, 그림 2의 자기장 분포 해석 결과 측정 공간에서 약 0.22 T의 자기장이 형성되는 것을 확인하였다.



〈그림 1〉 이극 자석 기반 교류손실 시스템 구성도

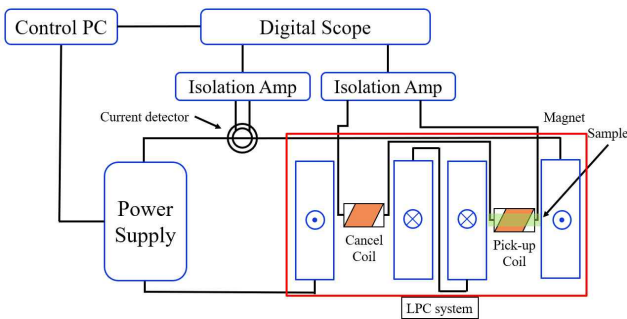


〈그림 2〉 이극 자석의 자기장 분포

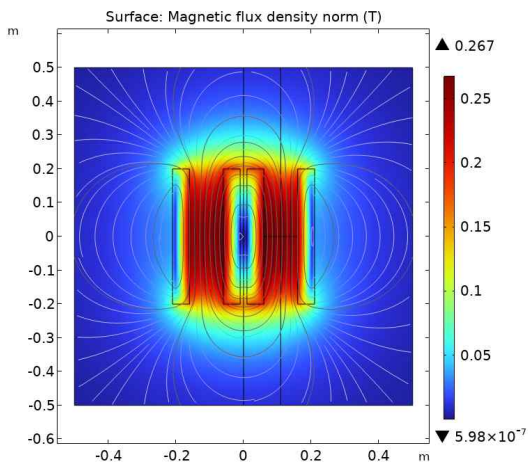
이는 목표 자기장 범위를 만족하는 결과이며, 측정 공간에서의 자기장 균일도는 0.519 %로 나타났다. 또한 자석 중심으로부터 0.5 m 떨어진 위치에서의 누설자속은 0.0123 T로 산출되었으며, 해당 결과를 다극 자석과의 비교 기준으로 활용하였다.

2.3 다극 자석

설계된 이극 자석과 동일한 설계 조건을 갖는 외부 자석 2개를 이용하여 다극 자석 기반 자화손실 측정 구조를 구성하였다. 두 자석은 직렬로 연결하고 서로 역방향으로 배치하였으며, 각 자석 내부에 픽업코일과 캔슬코일을 독립적으로 배치할 수 있도록 설계하였다. 그림 3은 다극 자석 기반 교류손실 측정 시스템의 구성을 나타낸다. 제안한 구조는 픽업코일과 캔슬코일을 각 자석에 독립적으로 배치 및 조정할 수 있으므로, 외부 자기장에 의해 유기되는 배경 신호 보정과 코일 정렬 측면에서 유리하다. 또한 두 개의 자석을 이용하여 측정 영역을 구성하므로, 향후 일정 길이 이상의 초전도 도체에 대한 자화손실 측정 구조로 확장할 수 있다. 그림 4는 다극 자석의 자기장 분포를 나타낸다. 해석 결과, 측정 공간에서 약 0.26 T의 자기장이 형성되었으며, 이극 자석 대비 자기장이 증가하였다. 또한 다극 자석 구조의 중심으로부터 0.5 m 떨어진 위치에서의 누설자속은 0.0112 T로 산출되었다.



〈그림 3〉 다극 자석 기반 교류손실 시스템 구성도



〈그림 4〉 다극 자석의 자기장 분포

2.4 이극 자석과 다극 자석의 특성 비교

설계된 이극 자석과 다극 자석의 주요 해석 결과를 표 1에 비교하였다. 비교 항목은 측정 공간에서의 자속밀도, 수평 및 수직 방향 자기장 균일도, 그리고 외부 누설자속으로 설정하였다. 이를 통해 동일한 설계 조건의 자석을 이용하였을 때, 자석 배치 구조 변화가 측정 공간의 자기장 형성과 누설자속 특성에 미치는 영향을 비교하였다. 비교 결과, 측정 공간에서의 자속밀도는 이극 자석의 경우 약 0.22 T, 다극 자석의 경우 약 0.26 T로 나타났다. 이는 다극 자석 구조에서 두 자석 간 상호 작용에 의해 측정 공간의 자기장이 증가한 결과로 판단된다. 누설자속의 경

우 이극 자석은 0.0123 T, 다극 자석은 0.0112 T로 나타났으며, 다극 자석 구조 적용 시 약 8.9% 감소하였다. 이를 통해 다극 자석 구조가 측정 공간의 자기장 형성과 외부 누설자속 저감 측면에서 유효함을 확인하였다.

〈표 1〉 이극 자석과 다극 자석의 자기장 특성 비교

비교 항목	이극자석	다극자석	변화율
측정 공간 자속밀도	0.2229 T	0.26 T	약 16.6% 증가
수평 방향 자기장 균일도	0.5190 %	0.9058 %	약 74.5% 증가
수직 방향 자기장 균일도	0.5200 %	0.1386 %	약 73.3% 감소
누설자속	0.0123 T	0.0112 T	약 8.9% 감소

한편, 자기장 균일도는 이극 자석과 다극 자석에서 각각 수평 방향 0.5190 %, 0.9058 %, 수직 방향 0.5200 %, 0.1388 %로 나타났다. 다극 자석 구조에서는 두 자석의 상호 작용으로 인해 측정 공간의 자기장 분포가 변화하므로, 향후 코일 배치 및 자석 간 거리 조정을 통해 자기장 균일도 개선이 필요할 것으로 판단된다. 이를 통해 설계 수준에서 다극 자석의 누설 자속 저감 및 자기장 형성 특성에 대한 유효성을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 초전도 도체의 자화손실 측정을 위한 교류 자기장 인가 시스템을 구성하고, 이극 자석과 다극 자석 구조의 자기장 특성을 비교하였다. 이극 자석은 목표 자기장 0.2~0.25 T를 기준으로 설계하였으며, 해석 결과 측정 공간에서 약 0.22 T의 자기장이 형성됨을 확인하였다. 동일한 설계 조건의 외부 자석 2개를 역방향으로 배치한 다극 자석 구조에서는 측정 공간의 자기장이 약 0.26 T로 증가하였으며, 누설자속은 이극 자석의 0.0123 T에서 0.0112 T로 감소하였다. 이는 두 자석 간 상호 작용에 의해 측정 공간의 자기장이 증가하고, 외부 누설자속이 일부 상쇄된 결과로 판단된다. 제안한 다극 자석 구조는 픽업코일과 캔슬코일의 독립 배치가 가능하여 배경 신호 보정 및 측정 구조 확장 측면에서 장점을 가진다. 다만 측정 공간의 자기장 균일도 측면에서는 추가적인 개선이 필요하므로, 향후 다극 자석 구조에 적합한 자석 형상 및 자석 간 거리 조건을 최적화할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 (No.2023R1A2C1005911)과 고온초전도자석기술개발사업(RS-2022-NR068576)의 지원을 받아 수행된 연구임

[참 고 문 헌]

- [1] Rosner, C.H, "Superconductivity: star technology for the 21st century", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 11, no. 1, 2001.
- [2] Gubser, D.U, "Superconductivity: an emerging power dense energy efficient technology", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14, no. 4, pp. 2037-2046, 2004.
- [3] Takayasu, M., et al., "Cabling Method for High Current Conductors Made of HTS Tapes", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.21, 2011.