

인가자장의 크기와 방향을 고려한 고온초전도 다중마그넷의 특성 해석

박주경¹, 차귀수^{1*}, 이희준²
¹순천향대학교 전기공학과, ²미르텍알앤디

Analysis of nested HTS magnets considering the magnitude and orientation of applied magnetic field

Ju-Gyeong Park¹, Guee-Soo Cha^{1*}, Hee-Joon Lee²

¹Dept. of Electrical Engineering, Soonchunhyang University

²MirtechR&D

요약 20T 이상의 높은 자장을 발생시키는 초전도마그넷은 다중 마그넷형태로 제작된다. 주로 저온초전도선재와 고온초전도선재를 혼합하여 제작되며 근래에는 고온초전도선재만을 이용하는 연구도 활발하게 진행되고 있다. 고온초전도선재는 외부자계의 방향에 따라 임계상태가 달라지고 임계전류가 달라지는 자계이방성 성질을 가지고 있다. 따라서 고자장용 다중마그넷의 임계전류를 계산할 때에는 적절한 해석기법을 사용해야 한다.

기존에 사용되어왔던 고자장용 다중마그넷의 임계전류 계산방법은 대부분 수직 및 수평각도만을 고려한 부하선 기법이 사용되어왔다. 이 계산방법은 외부자계의 최대수직자장에 의해서 임계전류가 제한되기 때문에 수평자장의 영향이 잘 고려되지 않는 단점이 있다. 본 논문에서는 마그넷의 임계전류를 정밀하게 계산하기 위하여 수직 및 수평각도뿐만 아니라 0 ~ 90° 사이 모든 각도의 $I_c-B(\theta)$ 데이터를 고려하였다.

본 논문에서 제시한 해석기법을 사용하여 두 가지 고자장용 다중마그넷 모델을 해석하고 임계전류를 계산하였다. 마그넷에 인가되는 자계분포를 해석하기 위해 전자계수치해석 프로그램을 사용하였으며 진화론적 최적화 알고리즘을 사용하여 중심 자장이 최대가 되는 임계전류를 계산하였다.

Abstract Most superconducting magnets which generate more than 20 T consist of nested magnets. A combination of LTS and HTS magnets is conventionally used, but high field magnets which use only HTS magnets have been developed recently. As HTS wires have very strong magnetic anisotropy, appropriate techniques should be used to consider this effect properly.

The load line method has been conventionally used to design nested magnets for high field generation. Because this method considers only parallel and perpendicular magnetic fields, the effect of their orientation is not taken into account. In this paper, the actual orientation of the magnetic fields from 0 to 90 degrees is considered.

The critical currents of the two kinds of high field nested magnets designed using the proposed method are calculated. The finite element method is used to calculate the distribution of the magnetic fields and the evolution strategy is used to find the critical current which maximizes the central magnetic field.

Keywords : Critical current, Evolution strategy, HTS, $I_c-B(\theta)$, Nested magnet, SCS4050

*Corresponding Author : Guee-Soo Cha(Soonchunhyang Univ.)

Tel: +82-41-530-1334 email: gsoocha@sch.ac.kr

Received August 3, 2017

Revised September 22, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

1. 서론

자장은 화학, 생물, 의학 등 광범위한 분야에서 사용되며 사용영역에 따라 균일한 고자장을 발생시키는 고자장 발생장치를 필요로 한다. 일반적으로 고자장 발생장치에서는 높은 자장을 발생시키기 위해 초전도선재가 사용되고 다중마그네틱의 형태로 제작된다. 초전도선재가 사용되는 초전도마그네틱은 발생시킬 수 있는 자장의 한계가 초전도선재의 임계전류에 의해 결정된다. 고온초전도선재의 연구가 진행됨에 따라 고자장에서 큰 전류를 흘릴 수 있는 것이 가능해졌고 고온초전도선재를 사용하여 마그네틱의 자장을 높이려는 연구가 진행되기 시작했다[1]. 고온초전도선재가 사용되는 고자장용 마그네틱은 저온초전도선재와 고온초전도선재를 사용한 마그네틱을 혼합하여 사용하는 하이브리드 초전도마그네틱이나 고온초전도선재만을 사용한 고온초전도마그네틱의 형태로 개발되고 있다[2,3].

고온초전도선재를 사용하는 마그네틱은 보다 높은 자장을 발생시키는 것을 목적으로 제작되기 때문에 마그네틱의 중심자장을 높이려는 것이 주된 관심사이다. 마그네틱의 중심자장을 높이는 방법으로는 다중마그네틱의 전원을 별도의 독립된 전원으로 사용하는 방법, 마그네틱의 각 코일을 폭이 서로 다른 선재로 제작하는 방법, 각 코일 사이의 공극을 변화시키는 방법 등이 있다[4-6]. 고온초전도선재는 주로 Tape 형태로 제작되기 때문에 외부자계의 방향에 따라 임계전류가 달라지는 자계이방성 특성을 가지고 있다[7,8]. 따라서 가해지는 자장의 크기와 방향에 따라 흘릴 수 있는 임계전류가 달라지고 이를 고려한 해석이 필요하다.

고자장의 영역에서 기존에 사용되어왔던 해석방법으로는 부하선기법이 있다[9]. 이 해석방법은 수평자장과 수직자장만을 고려하기 때문에 0 ~ 90° 사이방향의 자장을 고려하지 못하는 단점이 있다. 0 ~ 90° 사이의 각도를 고려하기 위해 중국의 CAS(Chinese Academy of Science)에서는 고자장용 마그네틱의 해석기법으로 I_c -B 식과 I_c - θ 식을 곁하여 I_c -B(θ) 식을 구하는 방법을 사용하였다[10]. 하지만 이 해석방법도 특정 자장에서의 I_c - θ 식을 모든 방향의 자장에 대입하였기 때문에 실제 I_c -B(θ)의 데이터와는 차이가 있다.

본 논문에서는 선재의 특성에 따라 보다 정밀한 해석을 위해 실제 측정된 I_c -B(θ) 데이터를 바탕으로 0 ~ 90°

사이의 모든 각도에서의 I_c -B(θ) 데이터를 보간법으로 구하여 다중마그네틱의 특성을 확인하고 임계전류를 계산하였다.

2. 선재의 I_c -B(θ) 관계

고온초전도체의 특성인 자계이방성을 고려하여 0 ~ 90° 사이 모든 각도에 따른 임계전류를 계산하기 위해서는 고온초전도선재의 I_c -B(θ) 데이터가 필요하다. 하지만 20T 이상의 고자장 영역에서 모든 각도의 I_c -B(θ) 데이터를 측정하기는 쉽지 않을뿐더러 구하기가 힘들다. 따라서 본 논문에서는 특정각도에서의 I_c -B(θ) 데이터를 이용하여 나머지 각도의 I_c -B(θ) 데이터를 보간법으로 구하여 사용하였다. 사용된 선재는 SuperPower사의 SCS4050으로 Fig. 1의 구조로 제작된 YBCO 선재이며 Table. 1에 선재의 사양을 표기하였다[7].

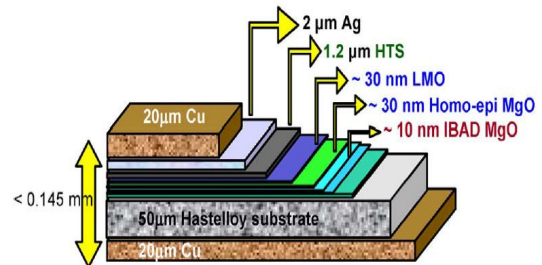


Fig. 1. Structure of high temperature superconducting (HTS) wire SCS4050

Table 1. Specifications of HTS wire SCS4050

	SCS4050	Unit
Min. I_c (77K, self-field)	106±1	A
Average thickness	0.143	mm
Average width	4.33	mm
Laminate material	Copper	
Laminate thickness	2 × 0.02	mm
YBCO layer thickness	1.2	µm
Min. bending diameter	20	mm
Max. rated tensile strain	0.45	%

고온초전도선재의 모든 각도에서 I_c -B(θ) 데이터를 얻기 위해서 보간법을 사용하였으며 보간법을 사용하기

위해서는 초기 $I_c-B(\theta)$ 데이터가 필요하다.

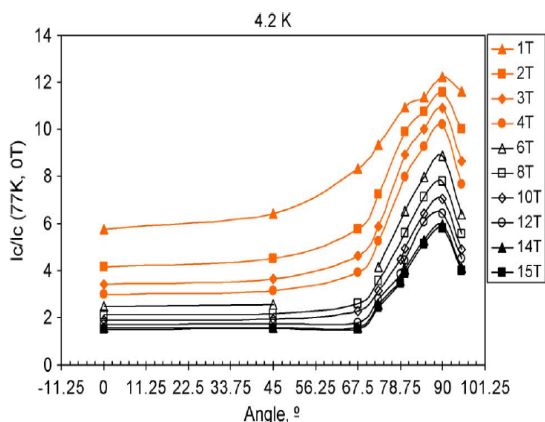


Fig. 2. Normalized critical current of SCS4050 according to magnetic field angle

본 논문에서는 Fig. 2와 같은 측정된 SCS4050의 임계전류를 바탕으로 모든 각도에서의 $I_c-B(\theta)$ 특성을 가정하였다. 임계전류는 자계를 1T에서 15T까지 변화시키면서 자계의 세기별로 0°, 45°, 67.5°, 73°, 80°, 85°, 90°에서 측정되었다[7].

우선, $I_c-\theta(B)$ 곡선을 $I_c-B(\theta)$ 곡선으로 변환하고 사용할 고자장 영역에 맞게 15T값 이상의 값을 외삽법으로 도출하였다. 15T 이상의 자장 영역에서 값을 도출하기 위해서는 각 각도별 자장에 따른 임계전류 데이터의 추세곡선을 알아내야 한다. 추세곡선의 식은 보편적으로 사용되는 식 중 Logistic 알고리즘을 사용하였으며 식 1과 같다.

$$I_c = \frac{C_1 - C_2}{1 + (B/B_0)^p} + C_2 \quad (식1)$$

위 식에서 I_c 는 외삽법으로 구한 값, B 는 측정된 자장 값이고 B_0 , C_1 , C_2 와 p 는 상수이다. 식(1)을 이용하여 측정된 데이터의 각 각도별로 필요한 변수 값을 계산하여 0 ~ 35T까지 $I_c-B(\theta)$ 곡선을 데이터화하였다. Fig. 3.은 보간법으로 확장한 선재의 4.2K에서의 $I_c-B(\theta)$ 관계를 표시한 것으로 진한 실선의 기호가 측정된 데이터이며 가는 실선의 알파벳이 식 1을 이용하여 보간법으로 확장한 $I_c-B(\theta)$ 데이터이다.

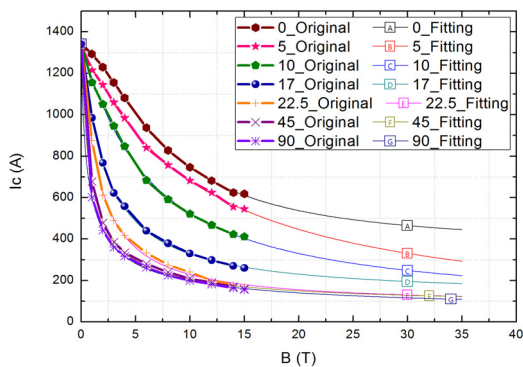


Fig. 3. $I_c-B(\theta)$ relation of wire at 4.2 K extended by using interpolation

하지만 Fig. 3의 $I_c-B(\theta)$ 특성은 측정된 특정각도에서의 $I_c-B(\theta)$ 데이터만 있으므로 모든 각도의 $I_c-B(\theta)$ 데이터를 얻기 위해서는 추가 보간을 필요로 한다. 이때는 내삽법을 사용해야하며 3D Fitting에서 보편적으로 사용되는 Renka Cline 알고리즘을 통해 0 ~ 90° 사이의 $I_c-B(\theta)$ 데이터를 행렬로 변환하였고 변환된 데이터는 Fig. 4와 같이 3D 그래프로 도시하였다. 0 ~ 20°의 구간과 0 ~ 10T의 구간에서 임계전류가 급격하게 변하는 것을 확인 할 수 있다.

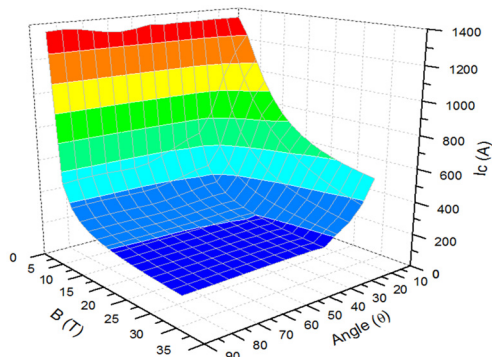


Fig. 4. $I_c-B(\theta)$ relation of SCS4050 wire converted into 3D graph

3. 임계전류 계산방법

고온초전도체의 임계전류는 앞서 언급한 바와 같이 외부자계의 크기 및 각도에 따라 달라지기 때문에 계산 사례에서 해석할 모델에 사용되는 고온초전도 선재의 특성에 대해 알아보았다. 이를 이용하여 고온초전도 마그

넷에서 고온초전도 선재의 각 턴 당 제한되는 임계전류를 계산할 수 있으며 반복계산을 통해 마그넷의 전체 임계전류를 계산할 수 있다. 반복계산 시에는 반복연산기법 중 하나인 진화론적 최적화 알고리즘을 사용하였다[11].

전자계 수치해석프로그램을 이용하여 외부자계를 계산하고 $I_c-B(\theta)$ 곡선과 비교하여 임계전류를 산정하는 과정은 Fig. 5의 진화론적 최적화 알고리즘 순서도를 따른다. 순서도를 따른 임계전류의 계산과정은 아래와 같다.

- 1) MagNet을 이용하여 모델을 그리고 고온초전도 다중마그넷에 임의의 초기전류를 인가하여 초기해석을 진행한다.
- 2) MagNet 상에서 분포된 자계를 확인한다. 고온초전도마그넷의 각 턴마다 인가되는 수평자계와 수직자계의 크기와 각도를 확인한다[6].
- 3) 각 턴의 계산된 자계의 크기와 각도를 이용하여 고온초전도선재의 $I_c-B(\theta)$ 데이터에서 제한되는 전류를 계산한다.
- 4) 각 턴의 계산된 임계전류를 비교하여 가장 낮게 제한되는 턴을 찾고 그 전류를 마그넷의 임계전류라고 정의한다.
- 5) 초전도마그넷에 인가되는 전류와 임계전류가 같거나 일정 오차 이내로 수렴하면 그 전류를 임계전류로 산정하며 프로그램을 종료한다. 만약 수렴하지 않는다면 마그넷에 인가되는 전류를 랜덤하게 변환하여 수렴할 때까지 위의 과정을 반복한다.

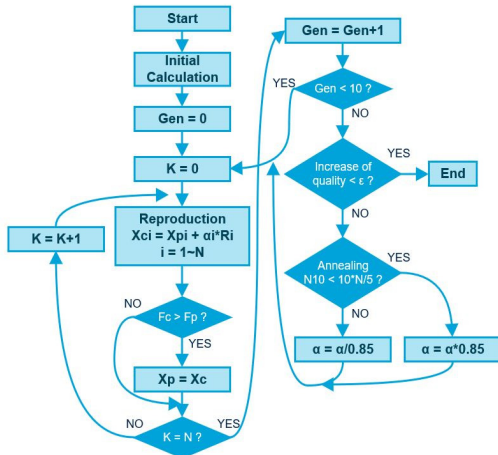


Fig. 5. Algorithm for evolution strategy

4. 계산사례

위에서 기술한 방법에 따라 실제 개발연구중인 두 가지 다중마그넷 모델에 대해서 임계전류를 계산하였다. 첫 번째 초전도 다중마그넷은 중국의 CAS에서 개발하고 있는 25T급 마그넷으로 10T의 내부마그넷과 15T의 외부마그넷으로 구성되어있으며 Fig. 6의 (a)에 모델의 형상을 나타내었다. 두 번째 초전도 다중마그넷은 미국 MIT의 FBML에서 개발하고 있는 30.5T급 마그넷으로 18.8T(800MHz)의 내부마그넷과 11.7T (500MHz)의 외부마그넷으로 구성되어있고 Fig. 6의 (b)에 모델의 형상을 나타냈다. 두 가지 모델 모두, 전자계수치해석 상에서 빠른 계산을 위해서 원점의 수평선을 기준으로 반 모델을 해석하였으며 수평선으로부터 싱글 팬케이크 번호를 1번으로 정의하였다. 다중마그넷의 임계전류 계산 시에는 내부마그넷만 있는 모델과 내부마그넷과 외부마그넷이 모두 존재하는 전체마그넷 모델의 해석을 실시하였다.

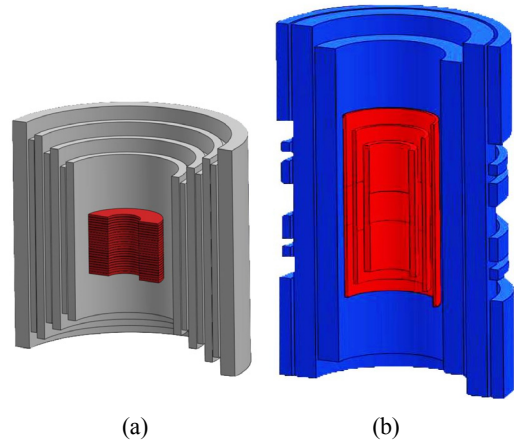


Fig. 6. Structure of nested magnets
(a) 25 T magnet, (b) 30.5 T magnet

4.1 25T급 초전도 다중마그넷

25T급 초전도 다중마그넷은 앞서 언급한바와 같이 10T의 중심자장을 만드는 내부마그넷과 15T의 중심자장을 만드는 외부마그넷으로 구성되어 있으며 내부마그넷은 고온초전도선재 YBCO(SCS4050), 외부마그넷은 저온초전도선재인 Nb₃Sn과 NbTi가 혼합되어 설계되었다[1,10].

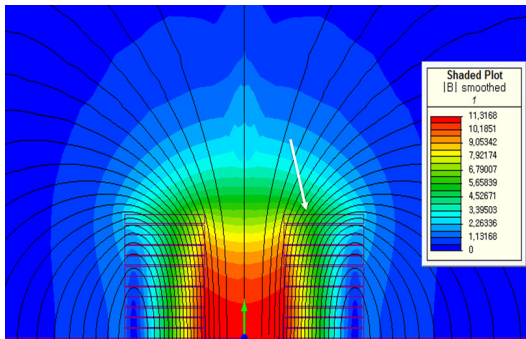


Fig. 7. Magnetic field distribution at the critical current operation of insert magnet, 25 T magnet

Fig. 7은 내부마그넷 모델의 임계전류 동작 시 자계분포를 나타낸 것이다. Fig. 8은 내부마그넷 모델의 각 싱글 팬케이크의 턴 당 계산된 임계전류를 나타낸 것으로 마그넷의 중심부터 시작되는 싱글 팬케이크 권선을 P1으로 정의하였다. 마그넷의 자계분포와 $I_c-B(\Theta)$ 데이터를 이용하여 계산한 임계전류는 최외각 싱글 팬케이크인 12번째 팬케이크의 20번째 턴에서 제한되었으며 계산결과로는 임계전류 : 259.6A, 중심자장 : 11.0T이다.

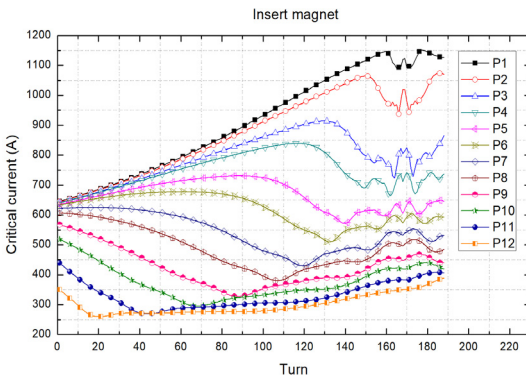


Fig. 8. Calculated critical current at insert magnet operation, 25 T magnet

25T급 전체마그넷 모델의 해석은 외부마그넷이 중심자장 15T를 만드는 상태에서 내부마그넷의 임계전류를 계산하였다. Fig. 9는 전체마그넷 모델의 임계전류 동작 시 자계분포를 나타낸 것이다. 내부마그넷을 기준으로 자계분포를 확인하면 외부마그넷에 의해 내부마그넷의 외각 팬케이크 권선에서 인가되는 자계방향의 수평성분이 증가한 것을 확인할 수 있다.

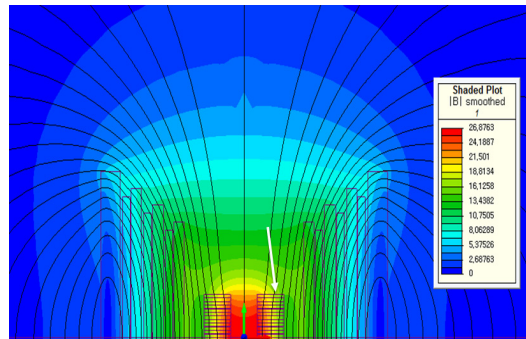


Fig. 9. Magnetic field distribution at the critical current operation of insert and outsert magnet, 25 T magnet

Fig. 10은 전체마그넷 모델의 각 싱글 팬케이크의 턴 당 계산된 임계전류를 나타낸 것으로 마그넷의 중심부터 시작되는 싱글 팬케이크 권선을 P1으로 정의하였다. 전체마그넷 모델은 외부마그넷에 의해 자계분포가 달라지고 Fig. 8과는 다르게 각 턴 당 임계전류가 분포되는 것을 확인할 수 있다.

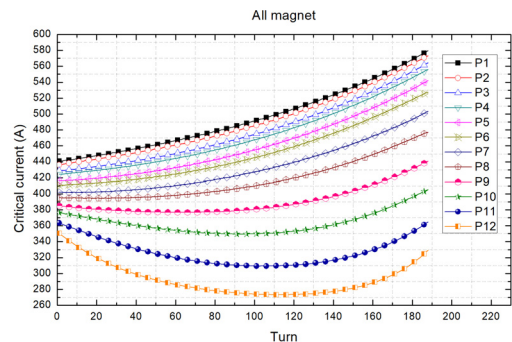


Fig. 10. Calculated critical current at insert and outsert magnet operation, 25 T magnet

내부마그넷 모델과 마찬가지로 최외각 싱글 팬케이크에서 임계전류가 제한되었지만 전체마그넷 모델에서는 114번째 턴에서 임계전류가 제한되었다. 계산결과는 임계전류 : 270.8A, 중심자장 : 26.5T이다. 내부마그넷의 기준으로 보면 내부마그넷 모델에 비해 전체마그넷 모델에서 임계전류가 약 4.48%, 중심자장이 4.56% 증가하였다.

이러한 결과는 자계분포의 변화에 의해 생긴 것으로 임계전류 동작 시 내부마그넷 모델의 20번째 턴에서 $B_{//}$: 6.2T, B_{\perp} : 2.7T가 계산되었으며 전체마그넷 모델의 114번째 턴에서는 $B_{//}$: 17.3T, B_{\perp} : 4.0T가 계산되었다. 전류가 제한되는 턴에서 외부인가자계는 증가하였지만

자계의 크기와 각도로 보면 20번째 턴에서는 6.8T, 23.8°로, 114번째 턴에서는 17.8T, 13.2°로 변환되었기 때문에 전체마그넷 모델에서 자계의 크기는 증가하고 각도는 수평방향 쪽으로 기울게 되었다. $I_c-B(\theta)$ 데이터로 임계전류를 계산하면 위에서 언급한 바와 같이 전체마그넷 모델에서 더 높은 임계전류를 흘릴 수 있다.

4.2 30.5T급 초전도 다중마그넷

30.5T급 초전도 다중마그넷은 미국 MIT의 FBML에서 제작중인 NMR용 초전도 마그넷이다. 초전도 다중마그넷의 구조는 고온초전도선재 YBCO(SCS4050)로 만들어진 18.8T급 내부마그넷과 저온초전도선재 Nb₃Sn, NbTi를 혼합하여 만든 11.7T의 외부마그넷으로 구성된다. FBML에서는 내부마그넷과 외부마그넷을 각각 H800과 L500으로 정의하였으며 L500은 이전에 제작되어 사용되던 JASTEC사의 저온초전도 마그넷을 사용하였고 H800은 총 3개의 코일로 구성되어 현재까지 가장 안쪽의 코일인 코일1이 제작되었다[12-14].

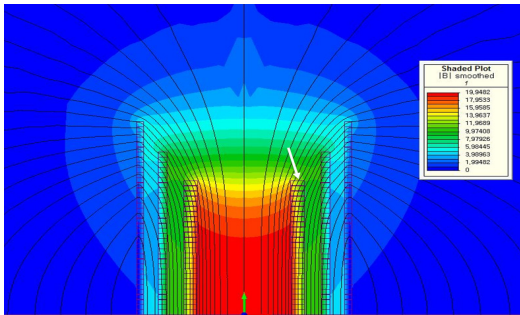


Fig. 11. Magnetic field distribution at the critical current operation of insert magnet, 30.5 T magnet

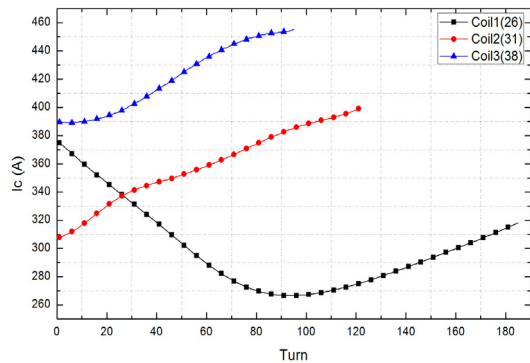


Fig. 12. Calculated critical current at insert magnet operation, 30.5 T magnet

Fig. 11은 30.5T급 내부마그넷의 임계전류 동작 시 자계분포를 나타낸 것이며 Fig. 12는 각 코일에서 전류가 제한되는 싱글 팬케이크만 따로 비교하여 턴 당 임계전류를 확인한 것이다.

코일1의 26번 싱글 팬케이크권선 92번째 턴에서 전류가 가장 낮게 제한되어 이 턴에서 제한되는 전류를 임계전류로 계산하였다. 이때의 계산 값은 임계전류가 264.4A, 중심자장이 19.7T이다.

전체마그넷 모델의 해석 시에는 L500의 외부마그넷에 의해 중심자장이 11.7T가 인가되고 있는 상태에서 H800 내부마그넷의 임계전류를 계산하였다. Fig. 13은 30.5T급 전체마그넷 모델의 임계전류 동작 시 자계분포를 나타낸다.

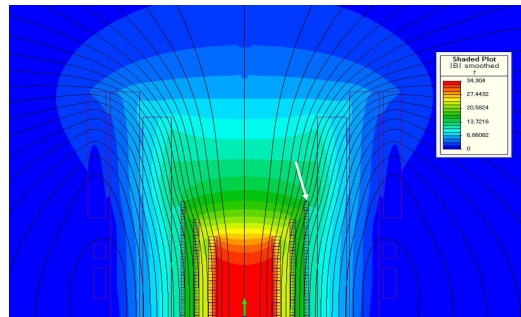


Fig. 13. Magnetic field distribution at the critical current operation of insert and outsert magnet, 30.5 T magnet

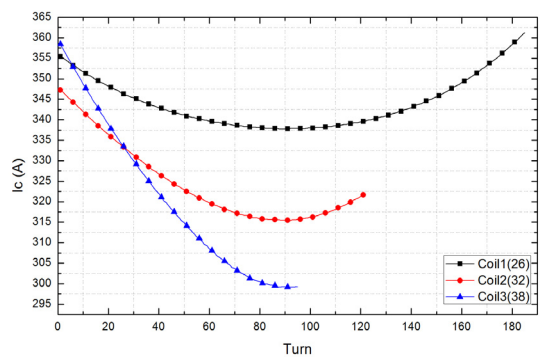


Fig. 14. Calculated critical current at insert and outsert magnet operation, 30.5 T magnet

Fig. 14는 전체마그넷 모델의 각 코일에서 전류가 제한되는 싱글 팬케이크만 따로 비교하여 턴 당 임계전류를 확인한 것이다. 외부마그넷의 영향으로 자계분포가 변화함에 따라 전류가 제한되는 부분이 코일1에서 코일

3으로 바뀌었다. 전류를 제한하는 부분은 코일3의 38번 싱글 팬케이크권선, 93번째 턴으로 계산되었으며 이때의 전류가 임계전류이다.

계산 값은 임계전류 : 299.1A, 중심자장 : 34.1T이며 내부마그넷 모델에 비해 전류와 자장 모두 약 13.11% 증가하였다. 이는 앞서 계산사례1과 같은 특성의 해석결과로 전류가 제한되는 턴에서 자계의 세기는 증가하였지만 각도는 수평방향 쪽으로 기울어 더 높은 임계전류가 계산된다.

5. 결론

본 논문에서는 고자장용 다중마그넷의 특성해석과 임계전류를 정밀하게 계산하기 위해서 $0 \sim 90^\circ$ 사이의 모든 각도를 고려한 $I_c-B(\theta)$ 데이터를 사용하여 고온초전도 마그넷의 임계전류를 계산하는 방법을 제시하고 두 가지 모델의 계산사례를 통해 초전도 다중마그넷의 임계전류 계산결과를 기술하였다.

논문에서 기술한 해석기법을 사용하여 실제 연구 중인 고자장용 초전도 다중마그넷 모델을 계산한 계산사례를 기술하였다. 계산사례는 25T급 다중마그넷과 30.5T급 다중마그넷 모델 2가지를 사용하였고 각각은 내부마그넷 모델과 전체마그넷 모델에 대해 임계전류를 계산하였다. 계산결과에 의하면 25T급 모델과 30.5T급 모델 둘 다 본래 설계되었던 중심자장보다 약 6%, 12% 높은 자장을 발생시킬 수 있다.

본 논문에서 제시한 해석기법을 사용하면 $0 \sim 90^\circ$ 사이 모든 각도의 외부자계를 고려하기 때문에 고온초전도 마그넷의 정밀한 해석이 가능하며 낭비될 수 있는 초전도 선재를 줄이고 마그넷에서 취약한 부분을 미리 파악하여 이를 보강할 수 있어 안정성을 높일 수 있다.

References

- [1] Q. Wang, J. Liu, S. Song, G. Zhu, Y. Li, X. Hu, L. Yan, "High Temperature Superconducting YBCO Insert for 25 T Full Superconducting Magnet", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, 4603505, June, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2365630>
- [2] W. D. Markiewicz, D. C. Larbalestier, H. W. Weijers, A. J. Voran, K. W. Pickard, W. R. Sheppard, J. Jaroszynski, A. Xu, R. P. Walsh, J. Lu, A. V. Gavrilin, P. D. Noyes, "Design of a Superconducting 32T Magnet With REBCO High Field Coils", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, 4300704, June, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2174952>
- [3] S. Yoon, J. Kim, K. Cheon, H. Lee, S. Hahn, S. Moon, "26 T 35 mm all-GdBa₂Cu₃O_{7-x} multi-width no-insulation superconducting magnet", Superconductor Science and Technology, Vol. 29, no. 4, March, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/4/04LT04>
- [4] M. Kang, M. Koo, H. Lee, G. Cha, "Increment of the Central Magnetic Field of an YBCO Magnet by Using Multiple Power Sources", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp. 1253-1256, June, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2017833>
- [5] M. Kang, Y. Kim, G. Cha, K. Paik, H. Lee, "Characteristics of Magnets Depending on the Width of High Temperature Superconducting Tapes Applied to the Outer Pancake Windings", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, 3900104, June, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2179690>
- [6] Y. Kim, M. Ku, G. Cha, S. Park, "Properties of High Temperature Superconducting Magnet With Optimized Air Gap Between Pancake Windings," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 21, no. 3, pp. 2267-2270, June, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2089034>
- [7] D. Turrioni, E. Barzi, M. J. Lamm, R. Yamada, A. V. Zlobin, A. Kikuchi, "Study of HTS Wires at High Magnetic Fields", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp. 3057-3060, June, 2009.
- [8] D. Turrionia, E. Barzia, M. Lamma, V. Lombardoa, C. Thiemeb, A. V. Zlobina, "Angular measurements of HTS critical current for high field solenoids", Advances in Cryogenic Engineering, AIP, vol. 54, pp. 451-458, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2900382>
- [9] F. Borgnolutti, A. Badel, T. Benkel, X. Chaud, F. Debray, P. Fazilleau, T. Lecrevisse, P. Tixador, "Design Study of a 10-T REBCO Insert Solenoid", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, June, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2518810>
- [10] J. Liu, S. Song, Q. Wang, Q. Zhang, "Critical Current Analysis of an YBCO Insert for Ultrahigh-Field All-Superconducting Magnet", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 26, no. 3, 4303405, April, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2532472>
- [11] M. Kasper, "Shape Optimization By Evolution Strategy", IEEE Trans. Magnetics, vol. 28, no. 2, pp. 1556-1560, March, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.123995>
- [12] J. Bascuñán, S. Hahn, Y. Kim, J. Song, Y. Iwasa, "90-mm/18.8-T All-HTS Insert Magnet for 1.3 GHz LTS/HTS NMR Application: Magnet Design and Double-Pancake Coil Fabrication", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 24, no. 3, 4300904, June, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2285781>
- [13] Y. Iwasa, J. Bascuñán, S. Hahn, J. Voccio, Y. Kim, T. Lecrevisse, J. Song, K. Kajikawa, "A High-Resolution 1.3-GHz/54-mm LTS/HTS NMR Magnet", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, 4301205, June, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2363496>

- [14] J. Bascunan, S. Hahn, T. Lecrevisse, J. Song, D. Miyagi, Y. Iwasa, "An 800MHz all REBCO Insert for the 1.3GHz LTS/HTS NMR Magnet Program - A Progress Report", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, 4300205, June, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2015.2512045>
-

박 주 경(Ju-Gyeong Park)

[준회원]



- 2015년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학석사)

<관심분야>

전기기계, 전자회로

차 귀 수(Guee-Soo Cha)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전기기계, 에너지변환

이 희 준(Hee-Joon Lee)

[정회원]



- 2001년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2010년 2월 : 순천향대학교 BK교수
- 2014년 2월 ~ 2016년 2월 : 경북전문대 부교수
- 2011년 2월 ~ 현재 : 미르텍알앤디 대표이사

<관심분야>

전기기계, 에너지변환, 반도체공학