

# 전원특성을 고려한 고온 초전도 마그네트의 응력해석

## Stress Analysis of HTS Magnet Considering Electric Power Source Feature

\*김도형<sup>1</sup>, #안태길<sup>2</sup>, 박경우<sup>3</sup>, 이광연<sup>4</sup>, 차귀수<sup>4</sup>

\*D. H. Kim<sup>1</sup>, #T.K.Ahn<sup>2</sup>(tkahn@office.hoseo.ac.kr), K. W. Park<sup>3</sup>, K.Y. Lee<sup>4</sup>, G.S.Cha<sup>4</sup>

<sup>1</sup>호서대학교 메카트로닉스공학과, <sup>2</sup>호서대학교 자동차공학과, <sup>3</sup>호서대학교 기계공학과, <sup>4</sup>순천향대학교 전기통신시스템공학과

Key words :HTS, HTS Magnet, Electromagnetic Force, Power Feature

### 1. 서론

현재 고온초전도(HTS) 선재의 특성이 향상됨에 따라서 고온 초전도 선재를 이용한 초전도에너지 저장장치(SMES), 초전도 변압기, 한류기 및 각종 고 자장 실험용 마그넷이 개발되고 있다. 이와 같은 초전도 마그네트를 사용하는 장비들은 여자 시에 발생하는 Lorentz Force에 의하여 힘을 받게 되고 이 힘에 의하여 움직임이 생기는데 이것은 고자장과 대전류하에서 운영되는 고온초전도체의 안전성문제에 큰 영향을 주게 된다. 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 기존의 전원인가 방식인 Single Source Model과 마그네트의 자장증대를 위한 새로운 전원인가방식인 Multi Source Model로 분류하여 각각에 Radial응력과 Hoop응력을 유한 요소법을 이용하여 계산하였으며 계산된 두 모델의 응력 값은 전원특성에 따른 초전도 마그네트의 설계와 권선 시 장력인가에 대한 기초자료가 될 것이다.

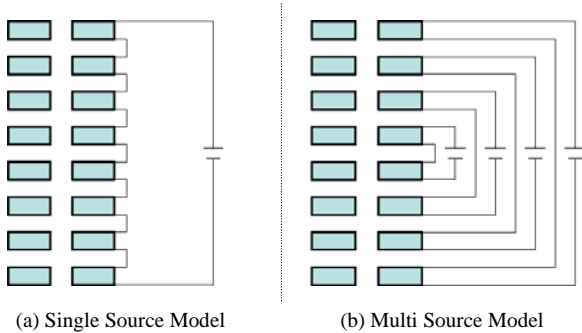


Fig. 1 Power Supply Method

### 2. 해석 모델

본 논문에서는 초전도 팬케이크 코일의 전류를 인가했을 때 전자기력에 의해 발생하는 응력만을 고려하였으며 Fig. 2와 같이 10개의 적층된 초전도 코일 중 1~5번의 팬케이크 코일에 걸리는 전자기력은 6~10번에 걸리는 전자기력과 대칭의 값을 이루기 때문에 모델을 2차원 1/4 축대칭 모델로 구현하여 1~5번의 밑 부분의 5개의 팬케이크 코일을 모델링 하였다.

Table 1 Specifications of HTS Wire & HTS Coil

HTS Tape				
Critical current @ sf, 77K	126 A			
Reinforcement	Soldered Stainless Steel			
Thickness(avg)	0.285 mm			
Width(avg)	4.4 mm			
Tensile Stress	250 MPa (Max)			
Module HTS Coil				
	Inner Radius (mm)	Outer Radius (mm)	Thickness (mm)	No. of Turn
Bobbin	15	63	5	
HTS Coil	25	60.81	4.4	93

모델 코일의 사용된 초전도 선재의 제원은 Table 1에 나타내었으며 77K, 자계 하에서 126A의 임계전류를 가지며 Stainless Steel로 선재의 양 끝을 덧댄 강화선재이다. 초전도 코일의 턴 수는

93턴으로 Multi Source를 이용한 코일의 중심자장이 0.5T가 나오도록 최적화 설계를 한 값이다. 초전도 선재와 선재 사이에는 두께 0.1mm에 폭이 4.4mm인 Kapton 테이프를 넣어서 절연을 유지하도록 하였다.

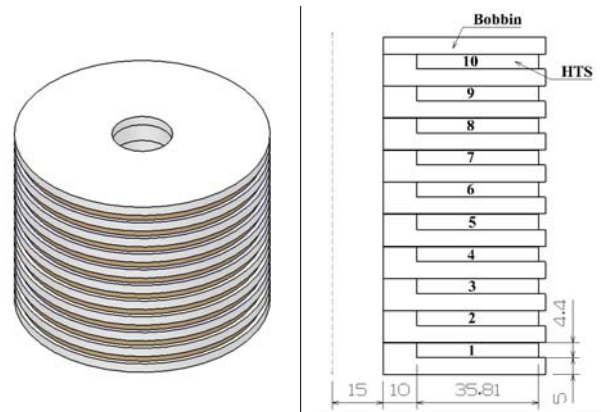


Fig. 2 Structure of Pancake Model (mm)

### 3. 초전도 코일의 전자기력 해석

두 모델은 전류인가 방식에 따라 인가할 수 있는 전류의 한계가 정해지며 이것으로 인하여 Fig. 3과 같이 서로 다른 자속밀도를 나타나게 된다. Table 2의 인가 전류와 중심자장은 계산된 값이다.

Table 2 Current and central magnetic field of Magnet

	No. of Pancake	Electric Current [A]	Central Magnetic Field
Multi Source Model	1,10	35.69	0.5019
	2,9	42.74	
	3,8	52.5	
	4,7	57.95	
	5,6	64.01	
Single Source Model	1~10	42.57	0.3931

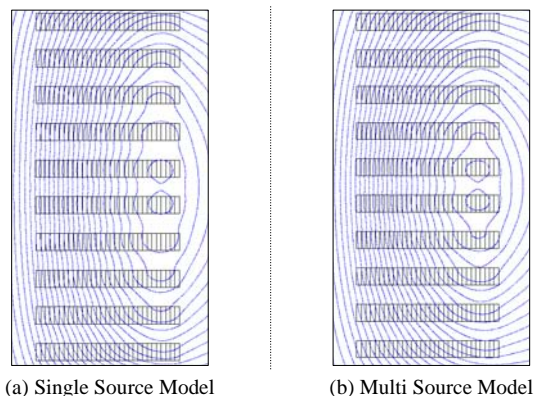


Fig. 3 Magnetic Flux Density

서로 다른 전류의 인가 시에 선재에 작용하는 Lorentz Force또한 달라지며 이것을 범용 유한요소 프로그램인 Flux 2D를 이용하

여 해석을 하였다.

#### 4. 초전도 코일의 응력해석

초전도 코일의 응력해석은 Pre-processor로는 HyperMesh7.0을 이용하였고 Solver로는 ABAQUS6.5의 내연적 시간 적분법을 이용하는 Post-processor인 ABAQUS/standard를 사용하였다. 초전도 코일의 여자 시에 발생하는 전류밀도와 자장 분포를 통하여 구해진 선재의 가해지는 Lorentz Force를 입력 값으로 하여 Load를 각 요소에 Edge입력하였다. 초전도 선재와 Kapton테이프의 물성은 Table 3과 같은 탄성계수와 포아송 비를 이용하였으며 요소는 Axisymmetric 요소를 사용하여 Pancake하나에 초전도 선재 요소의 개수를 4185개로 Kapton테이프의 요소 개수를 1395개로 나누었다. 경계조건은 Radial방향으로의 Fix조건은 없으며 단지 Pancake 윗부분을 Axial방향을 Fix하여 구속조건을 주었다.

Table 3 Material Properties

	Young's Modulus (Mpa)	Poisson's ratio
Superconducting	114100	0.37
Kapton Tape	2800	.034

결과를 보면 Single Source Model의 경우 Radial Stress는 Fig. 4와 같은 분포를 보이며 최대응력 값은 5번째 Pancake의 첫 번째 턴에서 발생하는 것으로 나타나며 Hoop Stress는 Fig. 5와 같은 분포를 보이고 최대응력은 Radial Stress와 같이 5번째 Pancake의 첫 번째 턴에서 발생하는 것으로 나타났다.

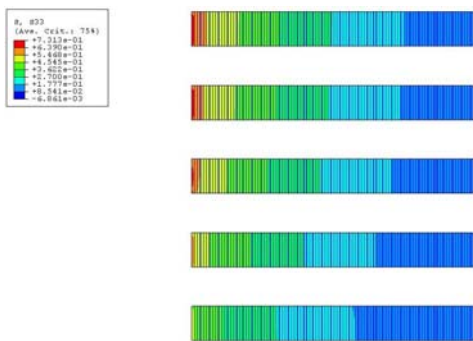


Fig. 4 Radial Stress of Single Source Model (MPa)

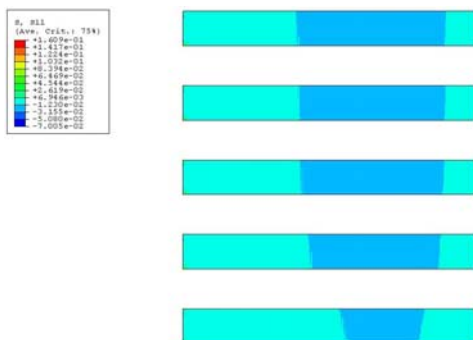


Fig. 5 Hoop Stress of Single Source Model (MPa)

Multi Source Model의 해석 결과를 보면 Radial Stress의 경우는 Fig. 8과 같은 분포를 보이며 최대응력은 5번째 Pancake의 첫 번째 턴에서 나타난다. Hoop Stress는 Fig. 9와 같은 분포를 보이며 최대응력은 5번째 Pancake의 첫 번째 턴에서 나타나고 있다. Multi Source Model의 응력 값과 변위는 Table 4에 표기하였다. Single Source Model과 Multi Source Model의 응력과 변위의 분포 형태는 동일하나 값의 차이를 보인다.

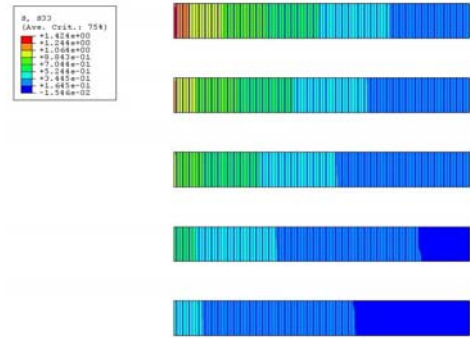


Fig. 8 Hoop Stress of Single Source Model (MPa)

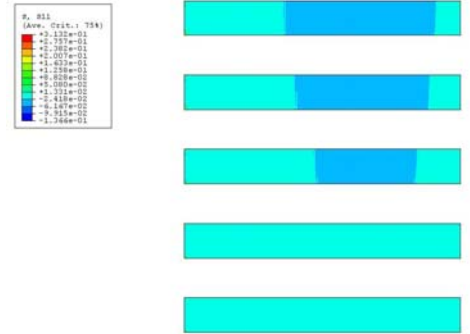


Fig. 9 Radial Stress of Multi Source Model (MPa)

Table 4 Result

	Single Source Model	Multi Source Model
Radial Stress (Max)	1.609E-1 MPa	3.132E-1 MPa
Hoop Stress (Max)	7.313E-1 MPa	1.424 MPa
Displacement (Radial)	1.32E-4 MPa	2.571E-4 MPa
Displacement (Axial)	7.744E-6 MPa	1.507E-5 MPa

#### 5. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 전원특성에 따른 고온 초전도 마그네트의 기계적 특성을 해석하였다. 동일한 턴 수의 두 모델은 전원특성에 따라 인가할 수 있는 전류용량에 차이가 있으며 이것으로 인하여 중심자장 또한 차이를 보이게 된다. 이차이로 인하여 두 모델은 선재에 각각 다른 힘이 발생하며 해석결과 동작전류 하에서 운영할 시에 응력과 변위는 약2배의 차이가 있는 것으로 나타났다. 해석 결과를 이용하여 고온초전도 마그넷 설계시의 안정성과 권선 시 인가 장력의 자료로 활용될 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2006-000-10499-0) 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Drew W. Hazelton, et al., "Development and Test of a BSCCO-2223 HTS High Field Insert Magnet for NMR," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.5, No.2, pp.234-237, 1995.
2. 강명훈, 이광연, 이용석, 차귀수, 이희준, "퀵케이크 권선의 권선수가 고온초전도 마그넷의 중심자장에 미치는 영향", 대한전기학회 춘계학술대회논문집, 732-738, 2007.
3. 유선규, 홍동표, 이기수, "유한요소법을 이용한 Thermo Plate의 응력해석", 공학연구, Vol.26, No.0, pp81-88, 1995