

## 2.5 MJ SMES용 고온초전도 마그넷 설계

이세연\*, 곽상엽\*\*, 김영일\*, 김우석\*\*, 이지광\*\*\*, 박찬\*\*, 최경달\*  
 한국산업기술대학교\*, 서울대학교\*\*, 우석대학교\*\*\*

### Design of an HTS Magnet for a 2.5 MJ SMES

Se-Yeon Lee\*, Sang-Yeop Kwak\*\*, Young-Il Kim\*, Woo-Seok Kim\*\*, Ji-Kwang Lee\*\*\*, Chan Park\*\*, Kyeongdal Choi\*  
 Korea Polytechnic University\*, Seoul National University\*\*, Woosuk University\*\*\*

**Abstract** - 본 논문은 2.5MJ의 저장용량을 가지는 SMES 용 고온초전도 마그넷의 설계에 관한 연구 결과이다. 선재는 2세대 고온초전도 선재인 YBCO CC를 2단으로 적층하여 사용하였다. 운전전류는 전도냉각 방식을 사용하는 것을 가정해 22K의 운전온도에서 선재의 임계전류를 고려하여 600A 이상으로 결정하였다. 마그넷의 형상은 싱글 솔레노이드와 토로이드 형태로 각각 설계하였고 싱글 솔레노이드는 더블 팬케이크 모듈코일을 적용하여 구성 토로이드는 싱글팬케이크 모듈코일을 배열하여 모듈러 토로이드로 구성하였다. 각 형상별 설계결과를 통해 저장에너지와 선재사용량 그리고 누설자장의 크기를 각각 비교하였다.

#### 1. 서 론

현재 고온초전도 선재를 사용한 초전도응용기술에 대한 연구는 다양한 전기기기 분야에서 폭넓게 진행되고 있다[1]. 그중 초전도 자기에너지 저장기술은(Superconducting Magnetic Energy Storage System) 기존의 에너지 저장시스템들에 비해 높은 에너지 저장효율과 고속의 응답특성을 가지고 있다. 이러한 고속 응답특성은 공급 측에서는 계통의 안정화 및 대용량의 부하를 보상할 수 있고 부하 측에서는 순간정전 및 순간전압 강하와 같은 전력품질의 문제를 해결할 수 있으며 반복적인 충.방전에 의한 열화가 적기 때문에 사용빈도가 높은 변동부하를 보상하거나 태양광, 풍력 등 변동이 심한 전원의 안정화에 이용될 수 있다[2][3]. SMES 시스템은 초전도 마그넷과 초전도 마그넷을 수용하는 냉각기 그리고 마그넷의 단자를 외부로 인출하는 전류도입부 및 전력계통으로부터 전력을 변환시켜 공급하는 전력변환기로 크게 나눌 수 있는데 본 논문에서는 이러한 SMES 시스템을 구성하는 주요부들 중 2.5 MJ의 저장용량을 가지는 초전도 마그넷을 2세대 고온초전도 선재인 YBCO CC를 이용하여 설계하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 고온 초전도 선재

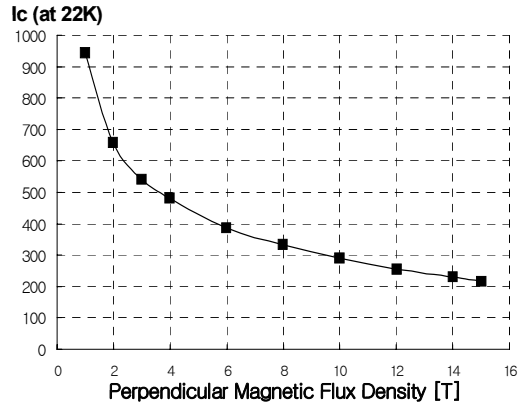
마그넷의 설계에 사용된 고온초전도 선재는 미국 IGC-Superpower사에서 제작된 YBCO CC로 선재의 제원은 표 1에 나타내었다. 마그넷의 운전온도는 전도냉각방식을 가정하여 22 K로 선정하였다. 22 K의 운전온도에서 초전도 선재는 보다 높은 임계전류를 가지므로 높은 저장에너지가 요구되는 마그넷의 설계에서 선재의 효율적인 사용이 가능하다. 설계 시에는 표 1의 선재를 2단으로 적층하여 사용하였고 22 K에서 2단으로 적층된 선재의 수직자장에 따른 임계전류의 감소특성은 그림 1에 나타내었다.

〈표 1〉 설계에 사용된 HTS 선재 사양

Critical current (at 77 K, self field)	125 [A]
Thickness (t, Kapton insulated)	0.25 [mm]
Width (w, Kapton insulated)	5 [mm]
One Peace of length	500 [m]

##### 2.2 마그넷의 형상선정

마그넷의 설계는 코일의 형상선정과 선택된 형상에 따른 최적설계로 진행하였다. 고온초전도 선재로 제작되는 SMES용 마그넷의 경우 YBCO CC의 가격이 고가이므로 선재 사용량이 시스템의 가격에 미치는 영향이 크기 때문에 설계 시 선재 사용량의 최소화를 고려하였다. 또한 수MJ급의 SMES 시스템이 건물내부나 주거지역의 근거리 등 일반적으로 부하단의 근처에서 설치, 운영되기 때문에 주변 기기들에 미칠 수 있는 영향의 최소화를 위해 누설자속의 크기와 마그넷 부피의 최소화를 함께 고려하였다[4].

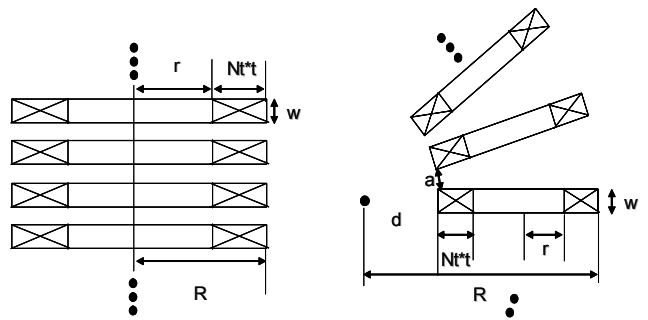


〈그림 1〉 적층된 선재의 수직자장에 따른 임계전류의 감소특성

일반적으로 SMES용 마그넷의 형상은 싱글 솔레노이드와 멀티폴 솔레노이드 그리고 토로이드의 형태이다. 솔레노이드는 세 가지 코일형태 중 제작이 가장 쉽지만 누설자속이 가장 크다. 따라서 추가적인 차폐가 필요한 경우 설치된 차폐물의 포화를 방지하기 위해 원거리에 설치해야 하고 이는 시스템의 부피가 늘어나는 원인이 된다. 멀티폴 솔레노이드는 싱글 솔레노이드의 병렬배치를 통해 누설자속을 감쇄시킬 수 있는 설계가 가능하지만 초전도선재의 사용량이 세 가지 코일 형태 중 가장 크고 낮은 에너지밀도를 갖는 단점을 가지고 있다. 토로이드의 경우 다른 두 가지 형태에 비해 기술적으로 제작이 어렵고 솔레노이드보다 선재사용량이 커질 수 있지만 누설자속이 매우 작고 부피가 작다는 장점을 가지고 있다[5]-[7].

〈표 2〉 마그넷의 설계 사양

Material	YBCO CC
Stored energy	> 2.5 [MJ]
Operating current	> 600 [A]
Perpendicular magnetic flux density	< 2 [T]
Max stray field (at 1 m)	< 60 [mT]



〈그림 2〉 마그넷의 설계 변수

마그넷의 형상은 선재 사용량과 마그넷의 부피 그리고 제작의 편의성과 누설자속의 크기를 고려하여 싱글 솔레노이드와 토로이드 형태 두 가지로 선정하였다. 설계에 사용된 YBCO CC는 단일장선의 길이가 최

대 500 m 이므로 팬케이크 모듈코일 당 선재 사용량은 500 m 이하로 제한하였고, 전도냉각방식을 사용하는 것으로 가정했기 때문에 마그넷의 근거리 냉각장치가 위치하게 되므로 냉각장치의 운용에 영향을 미칠 수 있는 자기장의 영향을 최소화하기 위해 누설자속의 크기를 마그넷으로부터 1 m 떨어진 거리에서 60 mT 이하가 되도록 제한하였다. 운전전류는 2 T 이하의 수직방향 자속밀도와 운전온도를 고려하여 600 A 이상으로 선정하였다. 설계사양과 설계변수는 표 2와 그림 2에 나타내었다.

### 2.3 솔레노이드 마그넷의 설계

솔레노이드 마그넷은 더블 팬케이크 모듈코일을 적층하여 구성하였다. 솔레노이드의 경우 일반적으로 최상단과 최하단의 모듈코일선재에 인가되는 수직 방향 자속밀도가 가장 크게 나타나기 때문에 2 T 이하의 수직방향 자속밀도를 갖는 설계사양을 만족시키기 위해서는 마그넷의 크기가 커져야 한다. 따라서 표 3의 설계결과 중 설계안 S2는 일반적으로 높은 수직방향 자속밀도가 인가되는 모듈코일 부분의 턴수를 줄이고 운전전류를 낮추어 수직자속의 크기와 마그넷의 부피를 줄일 수 있는 설계안이다. 설계 결과를 검증하기 위한 자장의 계산은 2차원 축대칭 유한요소해석을 이용하였고 최적화는 니칭 유전 알고리즘을 이용하였다[6]. 자세한 설계결과를 표 3에 나타내었고 설계안 S1에서의 거리에 따른 누설자속의 크기를 그림 3에 나타내었다.

### 2.4 토로이드 마그넷의 설계

초전도 선재를 이용해 토로이드형태로 권선하여 마그넷을 제작하는 것이 기술적으로 매우 어렵기 때문에 싱글 팬케이크 모듈코일을 배열한 모듈러 토로이드 형태로 설계하였다. 중심축에서 싱글팬케이크모듈까지의 거리  $d$ 는 100 mm 이상으로 싱글팬케이크모듈의 내 반경  $r$ 은 100 mm 이상으로 하고 팬케이크간의 간격  $a$ 는 5 mm 이상으로 각각 제한하였다. 토로이드의 자장계산은 비오사바르 법칙을 이용하였고 최적화는 진화 알고리즘을 이용하였다[7]. 설계결과 토로이드의 경우 비슷한 부피를 가지는 설계안 S2 솔레노이드의 수직방향 자속밀도 2.66 T와 비교해 선재에 인가되는 수직방향 자속밀도의 크기가 0.85 T로 작음을 확인하였다. 초전도 선재는 선재에 인가되는 수직방향 자속밀도가 낮을수록 임계전류는 높아지기 때문에 토로이드의 경우 솔레노이드에 비해 운전전류를 600 A, 700 A, 750 A로 각각 증가시키는 것이 가능해 초전도선재의 사용량을 14 Km 까지 줄일 수 있었다. 마그넷의 설계결과와 거리에 따른 누설자속의 크기는 표 3과 그림 4에 각각 나타내었다.

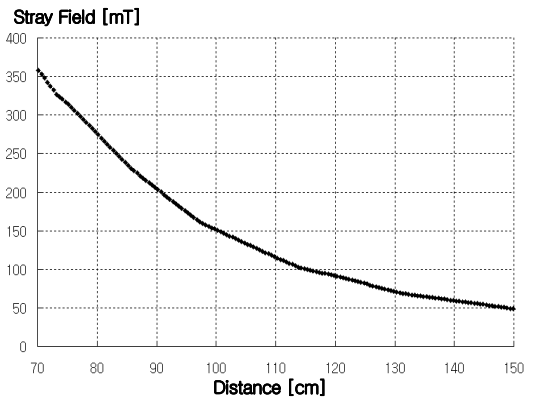
〈표 3〉 마그넷의 설계결과

Design number	S1	S2	T1	T2	T3
Type of magnet	Solenoid		Toroid		
Operating current [A]	600	400	600	700	750
Inner diameter (r) [mm]	1900	800	300	400	240
Outer diameter (2R) [mm]	1911	867	1274	1338	1116
Height [mm]	2516	896	537	559	458
Type of coil module	DPC	DPC	SPC	SPC	SPC
No. of turns (Nt)	11	67, 40, 24	237	159	218
No. of module coil (Nd)	168	6(56+4)	62	68	62
Max B in parallel [T]	0.77	3.56	8.17	8.05	9.82
Max B in perpendicular [T]	1.27	2.65	0.70	0.80	0.85
Stored energy [MJ]	2.61	2.55	2.64	2.64	2.64
Length of HTS wire [km]	22.1	20.3	19.3	16.3	14.8

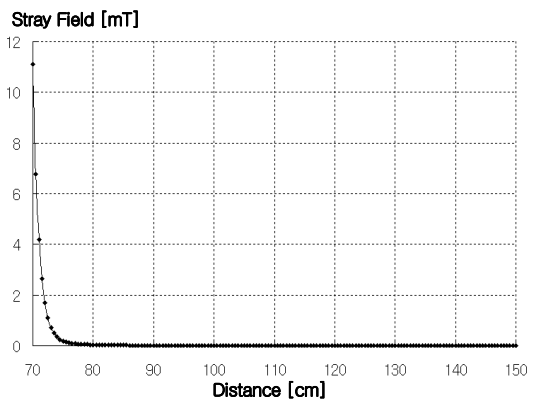
### 3. 결 론

본 논문에서는 2.5 MJ의 저장용량을 가지는 SMES용 마그넷을 2세대 고온초전도 선재인 YBCO CC를 이용하여 설계하였다. 마그넷의 형상은 솔레노이드와 토로이드로 설계하여 각각의 선재 사용량과 누설자속을 확인하였다. 설계결과 솔레노이드의 경우 설계에 제한된 크기보다 높은 누설자속을 가지기 때문에 추가적인 자장의 차폐가 필요해 차폐물을 포함한 실제 마그넷의 부피는 설계결과보다 더 클 것으로 예상된다. 토로이드 경우 선재에 인가되는 수직방향의 자속밀도 크기가 작아 운전전류를 높일 수 있기 때문에 선재 사용량을 줄일 수 있는 설계가 가능하였고 솔레노이드와 비교해 더 작은 누설자속의 크기와 마그넷의 부피를 가짐을 확인하였다. 수MJ급의 SMES가 전력품질 보상과 전압변동, 순간전력 보상 등을 위해 중요 부하 지점이나 소규모의 수용가에 설치된다는 점에서 누설자속의 크기와 마그넷의 부피가 작은 것은 토로이드의

장점이라고 할 수 있다. 본 논문의 연구결과는 2.5 MJ SMES시스템의 설계와 제작을 위한 기초자료로 활용될 것이다.



〈그림 3〉 솔레노이드 마그넷(S1)의 거리에 따른 누설자속 분포



〈그림 4〉 토로이드 마그넷(T2)의 거리에 따른 누설자속 분포

### 감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Kim,JH, Kim,WS, Hahn,S, Lee,JM, Rue,MH, Cho,BH, Im,CH, Jung,HK, "Characteristic test of HTS pancake coil modules for small-sized SMES", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 1919 - 1922, June 2005.
- [2] Seong Ki-Chul, "Superconducting Magnetic Energy Storage System" Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, vol.8, no.2, pp.5-9, July 2006.
- [3] C. A. Luongo, "Superconducting storage systems: an overview," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, no. 4, July 1996.
- [4] G. Schonwetter, "SMES solenoids with reduced stray field," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, pp. 2636 - 2639, July 1994.
- [5] G. Schonwetter, "SMES solenoids with reduced stray field," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, pp. 2636 - 2639, July 1994.
- [6] M. K. Abdelsalam, "Micro SMES magnet configuration for reduced stray field applications," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 5, pp.333 - 336, June 1995.
- [7] U. Brammer and H. W. Lorenzen, "Magnetic shielding of small high power SMES," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 5, pp. 329 - 331, June 1995.
- [8] Kim,WS, Kwak,SY, Lee,JK, Choi,KD, Jung,HK, Seong,KC, Hahn, S, "Design of HTS Magnets for a 600 kJ SMES", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, volume. 16, Issue 2, pp. 620-623, June 2006.
- [9] J.-H. Kim, S.-Y. Hahn, C.-H. Im, J.-K. Kim, H.-K. Jung, and S.-Y. Hahn, "Design of a 200 kJ HTS SMES system," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 5, pp. 329 - 336, 1995.