

## 10마력 전초전도 호모폴라 모터의 설계 및 제작

박상호\*, 김영일\*, 이세연\*, 정창수\*\*, 이지광\*\*\*, 박일한\*\*, 최경달\*, 한승엽\*\*\*\*  
 한국산업기술대\*, 성균관대\*\*, 우석대\*\*\*, 서울대\*\*\*\*

### Design and Manufacture of a 10 HP Homopolar Motor with Superconducting Windings

Sang Ho Park\*, Yungil Kim\*, Seyeon Lee\*, Changsoo Jung\*\*, Ji-Kwang Lee\*\*\*, Ilhan Park\*\*, Kyeongdal Choi\*, Songyop Hahn\*\*\*\*  
 Korea Polytechnic University\*, Sungkyunkwan University\*\*, Woosuk University\*\*\*, Seoul National University\*\*\*\*

**Abstract** - 고온 초전도 전력기기는 상전도 전력기기에 비해, 중량과 부피가 작고 전력손실이 거의 없어 효율이 높고 대용량기기에 많은 장점을 지니고 있으며 또한 환경 친화적이다. 대형화가 요구되는 선박추진용 모터를 초전도 모터로 사용할 경우 저속 및 고 토크의 모터를 제작할 수 있고, 계자 권선과 전기자 권선을 초전도 선재로 사용함으로써 높은 전류밀도와 고 자장이 가능하여 고효율 및 소형 경량화 등의 장점이 있다. 그러나 전초전도 모터의 경우 얇은 테이프 형태의 초전도 선재의 특성으로 인해 구리선처럼 가공이 힘들고, 선재를 초전도 상태로 만들기 위한 냉각이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 동기모터와 선형모터를 혼합하여 고정자에 위치한 racetrack type의 전기자 권선뿐만 아니라 회전자에 자기장을 발생시키는 계자 권선도 회전자가 아니라 고정자부분에 위치하므로 구조상 견고하고 냉각등에 장점이 있는 호모폴라 모터를 제안하였으며 자기저항의 변화가 작은 구조로 토크 리플이 작으므로 소음과 진동이 적은 모터를 설계하였다. 설계 결과로부터 호모폴라 모터를 제작하였으며 레이스트랙형과 팬케이크 권선의 임계전류등을 측정하였다. 추후 호모폴라 모터의 성능시험을 진행할 예정이다.

#### 1. 서 론

현재 초전도 전력기기 개발을 위한 연구로 사용되는 2종 고온초전도 선재는 1987년에 발견된 임계온도가 90 K대인 YBCO와 1988년에 개발된 임계온도가 110 K인 BSCCO계열의 산화물 초전도체를 이용하는 것이 대표적이다. 이러한 초전도선재를 대형화가 요구되는 선박추진용 모터로 사용할 경우 저속 및 고 토크의 모터를 제작할 수 있다. 고온초전도 전력기기는 상전도 전력기기에 비해, 중량과 부피가 작고 전력손실이 거의 없어 효율이 높으며, 대용량기기에 많은 장점을 지니고 있으며 또한 환경친화적이다. 대형화가 요구되는 선박추진용 모터를 초전도 모터로 사용할 경우 저속 및 고 토크의 모터를 제작할 수 있고, 계자 권선과 전기자 권선을 초전도 선재로 사용함으로써 높은 전류밀도와 고 자장이 가능하여 고효율 및 소형 경량화 등의 장점이 있다. 그러나 전초전도 모터의 경우 얇은 테이프 형태의 초전도 선재의 특성으로 인해 구리선처럼 가공이 힘들고, 선재를 초전도 상태로 만들기 위한 냉각이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Axial type의 모터도 제안되었고[1], 초전도 동기모터는 회전자에 계자권선이 위치하여 운전시 회전하므로 냉각 및 전류리드등의 문제점이 있다[2]. 또한 호모폴라 형태의 모터도 제안되었으나, 계자 권선부는 초전도 선재를 사용하나 전기자 권선부는 구리등의 상전도체를 사용하므로 전초전도 모터가 아니다. 본 연구에서는 동기모터와 선형모터를 혼합하여 고정자에 위치한 레이스트랙형의 전기자 권선뿐만 아니라 회전자에 자기장을 발생시키는 계자 권선도 회전자가 아니라 고정자부분에 위치하므로 구조상 견고하고 냉각등에 장점이 있는 호모폴라 모터를 제안하였으며 자기저항의 변화가 작은 구조로 토크 리플이 작으므로 소음과 진동이 적은 모터를 설계하였다. 또한 사용주파수가 5 Hz로써 교류를 사용하는 초전도전력기기의 문제점인 교류손실의 감소효과라는 장점도 있다.

#### 2. 호모폴라 모터 설계 및 제작

##### 2.1 호모폴라 모터에 적용할 초전도 선재 선정

현재 상용 제품으로 2G 초전도선재를 생산하는 기업은 AMSC, SuperPower, (주)서남의 3군데 업체에서 제작하여 판매중이다. AMSC의 344S, 344B, 344C가 있으며 344S는 안정화 층이 스테인레스 스틸이며, 344B는 안정화층이 브래시이며, 344C는 안정화층이 구리이다. SuperPower에서 생산중인 제품은 SF4050, SCS4050, SF6060, SCS6050, SF12050, SCS12050, SF100의 종류를 판매하고 있으며 SF는 안정화층이 없으며 SCS는 안정화층으로 구리를 사용한다. 앞의 4, 6, 12는 초전도 선재의 폭이고 050은 안정화층 구리가 50 $\mu$ m, 100은 안정화층으로 구

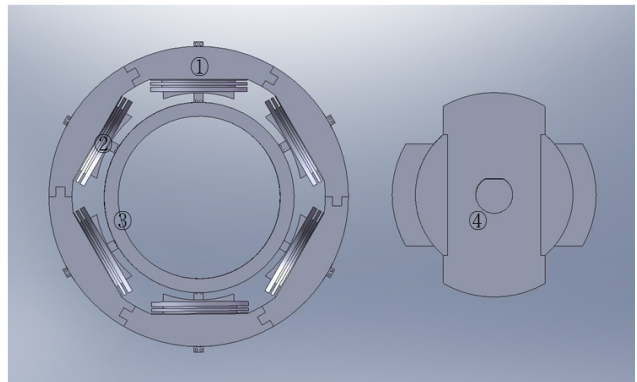
리가 100 $\mu$ m 증착되어있다. 서남에서 생산한 4 mm 초전도 선재는 lamination된 제품으로 안정화층이 0.02 mm의 구리로 되어있다. 위의 제품들을 비교한 결과, AMSC와 SuperPower의 경우는 전세계적으로 널리 사용되고 있으나 가격이 비싸고 납기 기한이 긴 문제점이 있다. 서남의 선재의 경우는 타사 제품과의 성능은 실험결과 차이가 없거나 더 우수한 것으로 나타났으며, 특히 가격경쟁력은 타사보다 우수하였다. 그리고 국내 업체이므로 납기등의 문제도 해결할 수 있고, 앞으로 모터의 안정적 제작을 위해서는 초전도선재의 안정적 공급을 위해서 (주)서남의 선재를 호모폴라 모터에 적용할 초전도 선재로 선정하였다. 표 1은 서남에서 제조한 초전도선재의 사양이다. 폭은 4mm이며 두께는 0.19 mm이다. 임계전류는 평균 133 A, 최소 104 A이다.

<표 1> 서남의 초전도선재 사양

Item	Data		
	Average	Max	Min
Width (mm)	4.1	4.12	4.1
Thickness (mm)	0.19	0.21	0.18
Copper Stabilizer Thickness (mm)	0.02	0.03	0.02
Silver Overlayer Thickness( $\mu$ m)	2		
Sbustrate Thickness (mm)	0.06		
Bare Substrate Magnetic Properties	non-magnetic		
R.T. on Ag surface		92.2	
Critical current (A)	133	167	104

##### 2.2 호모폴라 모터 설계

호모폴라 모터를 3차원 수치해석으로 인덕턴스를 구하기 이를 바탕으로 모터 설계를 진행하였다. 공극이 커지면 자기포화등은 줄어들어 시스템은 안정적이거나 공극이 클수록 효율은 나빠지고 소요 선재량은 증가한다. 공극의 작을수록 효율은 좋아지고 소요 선재량은 감소하지만 자기포화등으로 인하여 호모폴라모터의 부피가 증가하게 된다. 프로토타입의 모터이므로 공극을 3 mm로 설계하여 표 2와 같은 설계 사양으로 호모폴라 모터를 설계하였다. 그림 1은 호모폴라 모터의 개요도이다. ①은 고정자, ②는 전기자 권선, ③은 계자권선, ④는 회전자를 나타낸다. 고정자와 회전자는 자기장의 방향으로 인하여 주장을 사용하였으며, 전기자는 레이스트랙형 더블팬케이크 권선, 계자는 원형 싱글팬케이크 권선으로 설계하였다.



<그림 1> 호모폴라 모터 개요도

〈표 2〉 호모폴라 모터 설계 사양

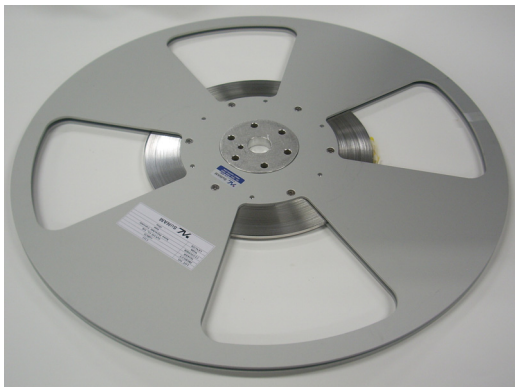
SPEC	고정자	회전자
권선방법	레이스트랙형 더블팬케이크 권선	원형 싱글팬케이크 권선
턴수	60 X 2	60
입력전류	$I_{ac,max} = 60 \text{ A}$	$I_{dc} = 60 \text{ A}$
내경	446 mm	
외경	646 mm	460 mm
중량	420 kg	425 kg

2.3 선재 및 권선의 전기적 특성 측정

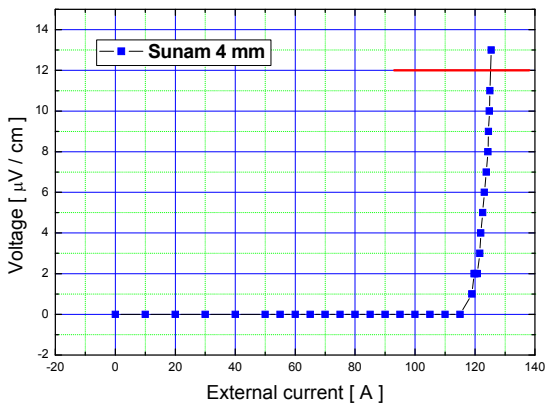
그림 2는 서남에서 공급받은 4mm폭의 184 m의 초전도선재이다. 사양은 표 2에 나타내었다. 임계전류가 최소 104 A이므로 설계치 60A이므로 충분히 적합하다고 생각하고 다음 실험을 진행하였다. 그림 3은 그림2의 초전도선재중 10 cm정도의 샘플을 임계전류 측정된 결과이다. 임계전류는 124 A정도로 측정하였다. 4 mm폭의 선재의 경우 80 A이상으로 상용제품을 판매하는데 124 A는 매우높은 수치라고 할 수 있다. 또 다른 전기적 특성시험으로는 자화손실 측정을 실시하였다. 비교대상은 SuperPower사의 SCS4050 모델과 비교하였다. 서남의 선재가 더 좋은 결과를 얻었다. 그림 4는 레이스트랙형 전기자권선을 직접 제작한 사진이다. 보통 샘플보다 권선으로 제작하였을 경우 초전도선재에 자기장이 가해지므로 임계전류는 감소하게 된다. 턴수는 120턴으로 더블팬케이크 권선으로 한쪽 팬케이크권선에 각각 60턴으로 제작하였다. 임계전류 측정결과 74 A정도의 값을 얻을 수 있다. 전기자권선의 최대치가 60 A이므로 실효치는 42.4 A이며 여유율은 보통 70 %정도로 선택하는데 정격전류 / 임계전류의 값이 57.3 %이므로 매우 안정적인 설계라고 할 수 있다. 또한 레이스트랙형의 외부에서 투자율이 높은 고정자로 인해 전기자 권선에 인가되는 자기장은 더욱 작아지므로 만족한 실험 결과라고 할 수 있다.

2.4 호모폴라 모터의 제작

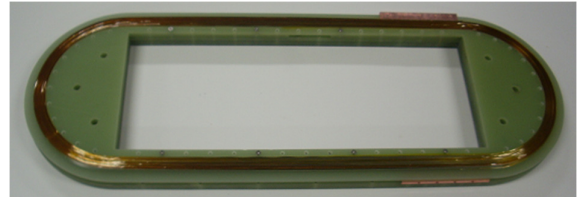
그림 6은 제작된 호모폴라 모터의 사진이다. 현재는 초전도선재를 적용하기 전에 구리선으로 상온에서 실험을 진행중이다.



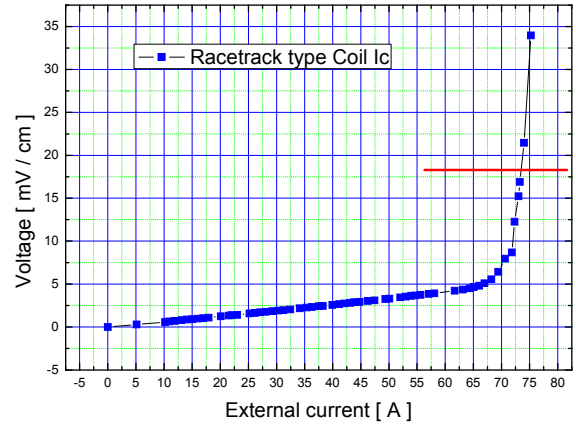
〈그림 2〉 서남 4mm폭 초전도선재 (184m)



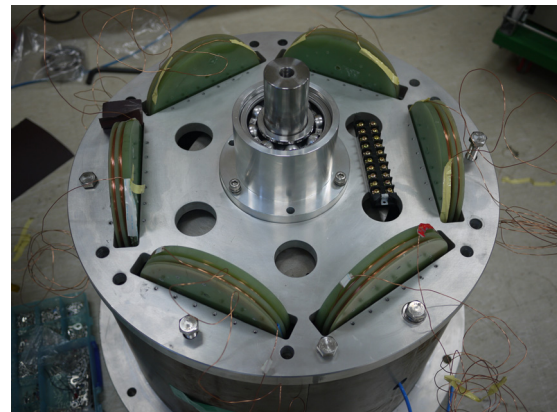
〈그림 3〉 서남 4mm폭 초전도선재 (184m) 임계전류 측정결과



〈그림 4〉 레이스트랙형 전기자권선 제작 사진



〈그림 5〉 레이스트랙형 전기자 권선 임계전류 측정 결과



〈그림 6〉 제작된 호모폴라 모터 사진

3. 결 론

10마력 전초전도 호모폴라 모터를 설계하고 제작하였다. 현재 시판중인 초전도 선재중에 성능, 가격, 국가 경쟁력등 모든 부분에서 우수한 (주)서남의 선재를 호모폴라 모터에 적용할 선재로 선택하였으며, 특성을 파악하기 위하여 임계전류 밀도, 자화손실 측정을 실시하였고, 제작 권선인 원형 싱글팬케이크 권선과 전기자 권선인 레이스트랙형 전기자 권선을 제작하여 임계전류를 측정된 결과 만족할 만한 결과를 얻었다. 현재 제작은 완료되었으며 권선을 초전도선재로 제작하기 전에 구리선으로 권선을 제작하여 모터의 특성을 측정하고 있으며, 추후 권선을 초전도선재로 제작하여 실험을 완료할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been supported by KESRI (2008T100100139), which is funded by MKE(Ministry of Knowledge Economy).

[참 고 문 헌]

[1] Michael J. Superczynsk, "Homopolar Motor with High Temperature Superconductor Field Windings" IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 7, pp. 513-518, 1997.  
 [2] S. H. Lee, J. P. Hong, Y. K. Kwon, Y. S. Jo, "Study on Homopolar Superconducting Synchronous Motors for Ship Propulsion Application," Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 9, pp. 31-34, 2007