

## 고온초전도동기모터의 자계분포해석에 따른 테이프선재의 안정도해석

### Stability Analysis Of High-Tc Superconducting Tape Through Magnetic Field Analysis Of The High-Tc Superconducting Synchronous Motor

송명곤\*, 윤용수\*\*, 홍계원\*\*\*, 이상진#, 고태국##

Myung Kon Song\*, Yong Soo Yoon\*\*, Gye Won Hong\*\*\*, Sang Jin Lee#, Tae Kuk Ko##

**Abstract:** The purpose of this paper is to find the magnetic field distribution inside the motor in order to find out if the high-Tc superconducting tapes operate stably in actual motor operation. With this goal, magnetic field distribution in a detailed model of the actual motor was analyzed through F.E.M.(Finite Element Method). As a result, it has been proved that the high-Tc superconducting tapes can withstand 4 A of current with stability. 4 A was the amount of current needed to achieve 600 A·turns which is required by the previous simulation aimed at developing this motor. Also, it has been observed that the flux damper reduces armature reactance during the motor operation and during load changes, helping the stable motor operation. But, it was observed that the flux damper generates loss by means of leakage flux and this decreases the output of the motor by about 5 %.

**Key Words:** magnetic field distribution, flux damper, high-Tc superconducting tape

## 1. 서 론

본 연구의 목적은 고온초전도동기모터의 운전 중에 자계에 의해 고온초전도 Tape선재가 안정적으로 동작하는지를 알아보기 위해 필요한 모터내부의 자계분포를 구하는데 있다. 이를 해석하기 위해 고온초전도동기모터의 구조 및 각 부분의 재질을 정확히 파악하여 해석 가능한 모델을 설정한 뒤, 이 모델에 F.E.M.(Opera)을 적용하여, 컴퓨터시뮬레이션을 통해 고온초전도동기모터의 내부자계 분포를 해석 할 것이다. 시뮬레이션에 의해 구한 자계분포를 살펴봄으로써 고온초전도 Tape선재가 실제 모터의 운전 중에 초전도 상태를 안정하게

유지하는지, 또한 액체질소 용기 및 외부자계침투를 막기 위해 설치한 flux damper가 모터의 내부자계분포 및 모터의 동작 특성에 미치는 영향을 해석하겠다.[1]

## 2. 본 론

### 2.1. 모델설정 및 특성해석

그림 1에 보이는 것과 같이 전기자는 일반 상전도동기모터와 같은 규소강판을 적층하고 그 내부에 슬롯을 만들어 동선을 넣은 구조를 가진다.

회전자는 가장 외측부터 냉각 및 시변자계 차단을 위해 1mm의 stainless-steel 및 2mm의 pure-copper를 1mm의 진공층을 사이에 두고 위치시켰다. 그리고 액체 질소가 유입되어 고온초전도Tape선재를 초전도상태로 유지하는 실린더 내부에 자로 형성 및 여자코일의 지지를 위해 bulk 형태의 iron core를 위치시켰다. Housing을 포함한 전체 외경은 290 mm 이며, stator의 외경은 190 mm이다. 그림 2는 회전자를 중간에서 단면으로 자른 모습이다. 전체 외경은 118 mm 이며, 각각의 부품의 치수들과 재질을 기입하였다. Simulation에 쓰일 model 또한 그림 2와 같은 형태와 치수를 사용하였다.

선재의 크기는 가로 11.8 mm, 세로 17.9 mm 인데, 이것은 가로 0.25 mm, 세로 2.5 mm 인 tape 선재를 한 pole 당 600 A·T를 얻을 수 있도록 감은 것의 크기이다.

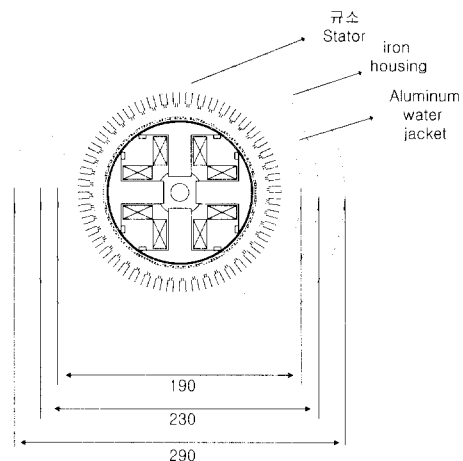


그림 1. 고온초전도동기모터의 구조  
Fig. 1. Structure of the high-Tc superconducting synchronous motor

\* 학생회원 : 연세대 대학원 전기공학과 박사과정  
\*\* 정 회원 : 안산공과대학 전기공학과 교수  
\*\*\* 정 회원 : 한국원자력연구소 초전도연구실 실장  
# 정 회원 : 위덕대 공대 전기공학과 교수  
## 정 회원 : 연세대 공대 전기공학과 교수  
원고접수 : 1999년 3월 30일  
심사완료 : 1999년 6월 17일

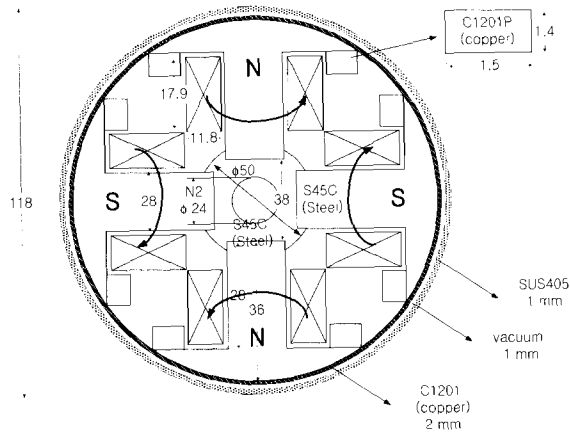


그림 2. 회전자의 단면도  
Fig. 2. Cross section of the rotor

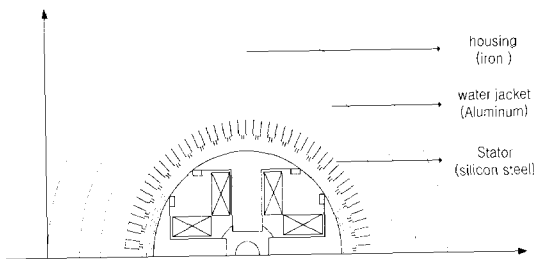


그림 3. 시뮬레이션에 사용된 모터  
Fig. 3. Motor used in the simulation

전기자는 3상 Y결선의 구조를 가진다. 상당전압으로 AC 220V가 인가된다. stator권선은 2층권으로 감겨 있고, 총 48slot이다. 권선은 11pitch로 감겨있다. 각 slot 당 동선은 132개가 위치한다. 전기자의 재질은 얇은 규소강판을 적용한 구조이며, 외경은 190 mm, 내경은 120 mm 이다. 그림 3은 실제 simulation에 사용될 모터의 모델을 보여준다. 이것은 모터를 이등분한 것으로, housing·water jacket·stator·rotor를 포함한 모델이다.

위의 모델을 유한요소법에 의해 2차원적으로 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 두었다.

고정자와 회전자는 z 축방향으로 무한히 연장되어 있고, 각 권선의 전류밀도는 z 축방향의 성분만 갖는다. 또한 축 중심에서의 자기포화는 무시하며, 투자율은 각 부분에서 등방성이고, 일정한 값을 갖고, 모터외부의 자계는 무시한다.[2]

표 1. 플럭스댐퍼 재원

Table 1. Specifications of the flux damper

공극 길이 (fluxdamper 포함)	6mm
동의 도전율	$2.5 \times 10^8 \text{ } \Omega \text{ m}^{-1}$
동의 투자율	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$
스테인레스강의 도전율	$2.4 \times 10^6 \text{ } \Omega \text{ m}^{-1}$
스테인레스강의 투자율	$12.67 \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$
알루미늄의 도전율	$1.0 \times 10^8 \text{ } \Omega \text{ m}^{-1}$

표 2. 입력값

Table 2. Input constants

부하	stator slot당 전류 (A/turn)	초전도선재 (A·turns)	부하각
무부하	0.3056	600	0
500W	0.8666		35

여기에 쓰인 플럭스댐퍼의 재질 및 재원은 다음의 표 1과 같다. 이 값들은 모두 100K 의 온도에서의 특성 값들이다.

설정된 모델을 살펴보면 다음의 두 가지 경계조건들을 적용해야 함을 알 수 있다. 우선 모터의 외부경계에 대해  $A=0$  인 고정경계조건(Dirichlet condition)을 주었고, x 축에 대해서는  $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ 인 자연경계조건(Neumann condition)을 주었으며, 또한 x 축상의 절점들은 주기성이 성립되는 점이므로 절점들에 대해서는 주기조건을 적용하였다.

## 2.2. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 4는 F.E.M.을 적용하기 위해 해석 영역을 mesh로 나눈 모습이다. simulation을 각 부하에 따라 전류값들을 바꾸어가며 수행하였다. 부하는 무부하와 500W 일 때로 나누어 수행하였고, 이 때 전기자 및 여자권선에 흐르는 전류값은 표 2와 같다. 이 값들은 simulation할 때에는 전류밀도로 바꾸어 넣어주었다.[3]

부하각을 맞추기 위해 우선 전기자 각 상에 120 도의 위상차를 준 60 Hz의 전류를 입력한 후, 전류 한 주기 동안의 자장 변화를 살펴보았다. 그 결과로부터, rotor의 pole에서 나오는 자장의 방향과 일치되는 방향의 자장 분포를 가진 때의 시간을 기준으로 부하각을 맞출 수 있다.

그림 5부터 8까지는 무부하와 500W 부하시의 모터 내부 자장분포를 보여준다. 자장이 가장 큰 곳은 각 그림에서 선들이 밀집되어 있는 곳으로, pole의 가장자리에서 그 값이 최대였다. 또한 자속의 분포도 부하각이 커지면서, 가운데 pole의 중심에서 갈라지는 자장의 위치가 점점 왼쪽으로 움직여간다.

flux damper는 공극에서 leakage flux에 의한 고온 초전도 tape 선재의 특성 약화를 막기 위한 것 외에 armature reactance를 감소시키는 역할을 해서, 부하 변동시에 또는 과도상태시에 안정적인 모터동작을 유지시켜준다. 이는 simulation 결과에서 보듯이 500W 시의 flux damper의 유무에 따라 flux damper가 없을 시의 자장이 더 왼쪽으로 움직여 있는 것을 발견할 수 있다.

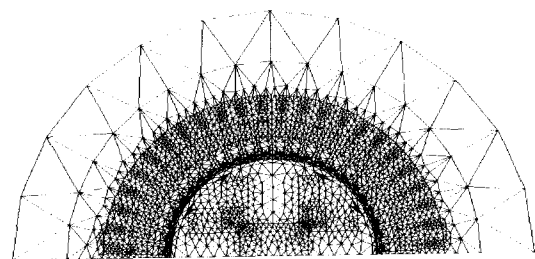


그림 4. 영역분할

Fig. 4. Mesh division

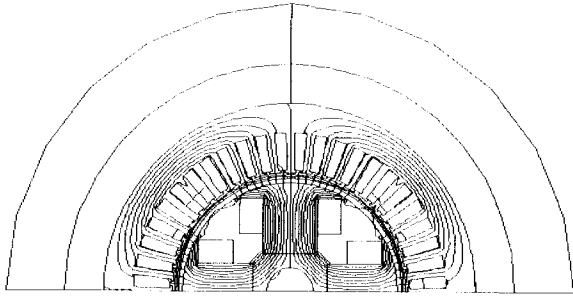


그림 5. 무부하시 자계분포  
Fig. 5. Magnetic field distribution at no load

이것은 flux damper가 pole에서 나온 자장이 전기자의 자장을 따라가는 것을 도와주는 역할을 해 준다는 뜻이 된다. 또한 flux damper에서 leakage flux에 의한 손실도 발생한다. 이것은 무부하시 및 500W 시의 자장의 최대값이 각각 0.039804T, 0.454931T로 flux damper의 유무에 따라 차이가 났다.

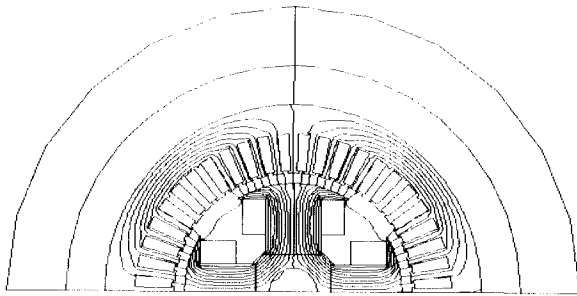


그림 6. 플럭스댐퍼없을시 자계분포  
Fig. 6. Magnetic field distribution at no load (without the flux damper)

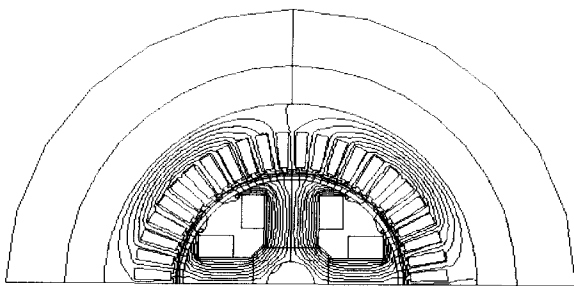


그림 7. 500와트부하시 자계분포  
Fig. 7. Magnetic field distribution at 500W load

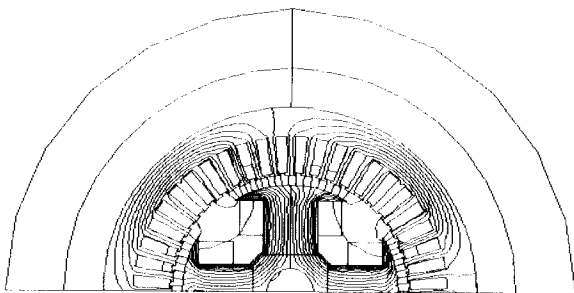


그림 8. 플럭스댐퍼없을시 자계분포  
Fig. 8. Magnetic field distribution at 500W load (without the flux damper)

그림 9에서 12까지는 0도에서 180도 사이의 공극에서 자장의 크기를 그래프로 나타낸 것이다. 공극 자장의 최대값은 pole의 중심에서 대략 0.14 T이다. 그 값은 flux damper가 있을 때, 부하에 별 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 그러나, flux damper가 없을 때의 그래프들을 살펴보면 500W부하시 flux damper가 없는 경우의 공극 최대값은 0.185T로 많이 증가하였다. 이는 flux damper에 의한 손실 때문인 것 같다. 또한 부하각에 따른 자속의 분포도 pole 중심에 대해 대칭적이지 않은 것을 볼 수 있다. 부하각이 0도인 무부하시에서는 flux damper가 없더라도 파형이 그리 변하지 않았으나, 부하각이 30도인 500W에서는 파형이 많이 일그러져 있음을 쉽게 볼 수 있다.

그림 14는 500W 부하시 모터(그림 2)의 오른쪽 상단에 위치한 사각형 모양의 선재 가장자리에서의 자장 분포를 보여준다. 선재에서의 자장 측정 위치는 그림 13에 표시해 놓았다. 자장이 가장 큰 곳에서의 값은 대략 0.075 T 정도이며, 부하에 따른 변화는 별로 없는 것으로 보인다. flux damper가 없을 때 자장 최대값은 0.08T 정도로 증가한다.

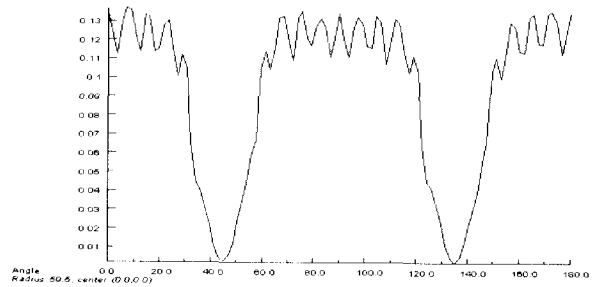


그림 9. 무부하시 공극에서의 자계  
Fig. 9. Air gap magnetic field at no load

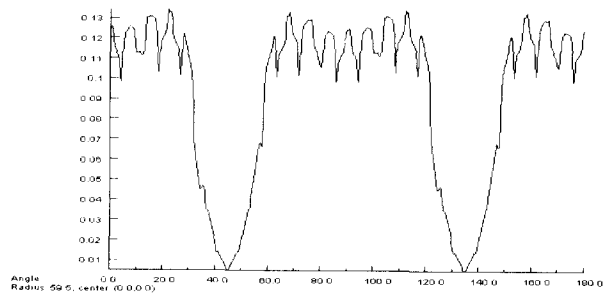


그림 10. 플럭스댐퍼없을시 공극의 자계  
Fig. 10. Air gap magnetic field at no load (without the flux damper)

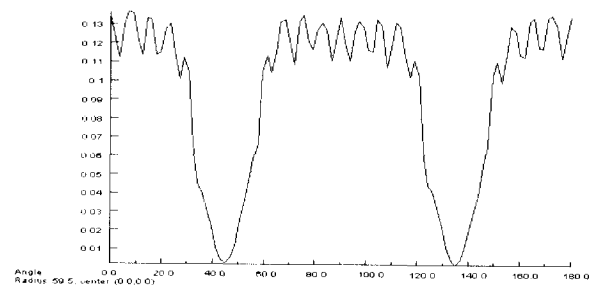


그림 11. 500와트부하시 공극의 자계  
Fig. 11. Air gap magnetic field at 500W load

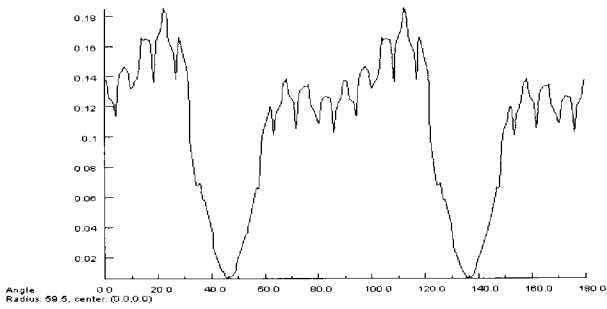


그림 12. 플럭스댐퍼없을시 공극의 자계  
Fig. 12. Air gap magnetic field at 500W load (without the flux damper)

F.E.M을 이용한 고온초전도동기모터의 내부 자계분포결과에 따라 고온초전도 tape 선재에 미치는 자장의 최대값이 0.08T라는 결과를 얻게 되었다. 이는 모터설계시 회전자측의 한 Pole에서 확보해야 하는 600A·Turns를 발생할 수 있는 여자전류값인 4A를 충분히 흘릴 수 있는 외부인가자장값이다.

### 3. 결 론

본 논문에서 얻은 결과는 다음과 같다.

첫째는 F.E.M을 이용한 고온초전도동기모터의 내부 자계분포결과에 따라 고온초전도 tape 선재에 미치는 자장의 최대값이 0.08T라는 결과를 얻게 되었다. 이는 회전자에 위치한 고온초전도Tape선재의 특성곡선을 참고한다면, 모터설계시 회전자측의 한 Pole에서 확보해야 하는 600A·Turns를 발생할 수 있는 여자전류값인 4A를 충분히 흘릴 수 있음을 뜻한다.[4]

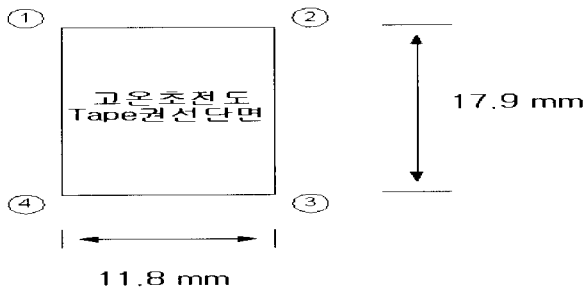


그림 13. 테이프선재상의 측정자계 위치  
Fig. 13. Location of magnetic field measurements on the tape

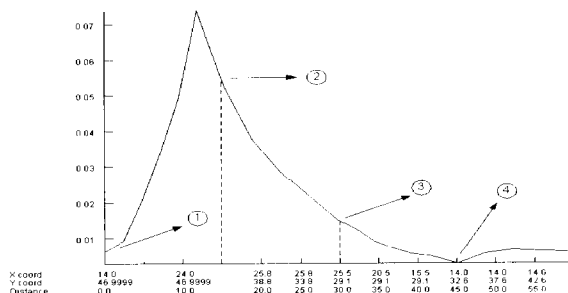


그림 14. 500와트부하시 선재의 자계분포  
Fig. 14. Magnetic field distribution of the superconducting tape at 500W load

둘째는 무부하 및 500W 부하시의 고온초전도동기모터의 내부 자계분포 해석에 있어서, 회전자 외부에 위치한 Flux damper의 역할은 부하변동시에 또는 과도상태시에 armature reactance를 감소시키는 역할을 하여 안정적인 모터동작을 도와주는 것을 알 수 있었지만 반대로 모터의 전체자계회로측면에서 본다면 Flux damper 쪽으로 Leakage Flux가 발생함으로 해서 모터의 출력을 약 5%정도 감소시킴을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지절약 기술개발 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 송명곤, 윤용수의 3인 “고온초전도동기모터의 부하변동시 Flux Damper의 특성해석”, 대한전기학회 전기기기연구회 춘계학술대회 논문집, pp24-27, 1998
- [2] Simon Foner and Brian B. Schwartz, Superconducting Machines and Devices, Plenum Press, New York, chap.5, 1974
- [3] 입달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 제 3, 9장, 1992
- [4] M. Oomen, J. Rieger, M. Legghissa & H. Kate, "Magnetic ac loss in multi-filamentary Bi-2223/Ag tapes", Physica C 290 pp.281-290, 1997

### 저 자 소 개



#### 송명곤(宋命坤)

1970년 04월 09일생, 1993년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정



#### 윤용수(尹庸銖)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1995년 연세대학교 공학석사, 1996년~현재 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 박사과정, 1985년 3월~1998년 2월 대우전자전장개발1팀장, 1998년 3월~현재 안산 공과대학 전기과 전임강사



**홍계원(洪啓原) (이력, 사진)**

1956년 4월 3일생, 1978년 서울대학교 요업공학과 졸업(학사), 1980년 한국과학원 재료공학과 졸업(석사), 1983년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(박사), 현재 한국원자력연구소



**이상진(李相鎭)**

1962년 3월 3일생, 1988년 8월 연세대학교 전기공학과 졸업(학사), 1991년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 위덕대학교 전기공학과 전임강사



**고태국(高太國)**

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업(학사), 1983년 case western university EEPA과 졸업(석사), case western university EEPA과 졸업(박사), 현재 연세대학교 전기공학과 교수