

## 고온초전도동기모터의 교류손실에 따른 켄치 해석에 관한 연구

윤용수·송명곤\*·문창욱\*\*·홍계원\*\*\*·이상진\*\*\*\*·고태국\*  
 안산공과대학 전기과, \*연세대학교 전기공학과, \*\*삼성종합기술원, \*\*\*한국원자력연구소  
 ,\*\*\*\*위덕대학교 전기공학과

### A Study on the Quench characteristics Analysis considering Ac-Losses of High-Tc Superconducting Synchronous Motor

Yong Soo Yoon · Myung Kon Song\* · Chang Wook Moon\*  
 · Gye Won Hong\*\* · Sang Jin Lee\*\*\* · Tae Kuk Ko\*

Dept of Electrical Engineering, Ansan College of Technology · \*Dept of Electrical Engineering, Yonsei University · \*\*SAIT · \*\*\*Korea Atomic Energy Research Institute · \*\*\*\*Dept. of Electrical Eng...Uiduk Univ.

superlab@bubble.yonsei.ac.kr

**Abstract** - This paper deals with the quench characteristic analysis in high-Tc superconducting synchronous motor of five to six hundred watts capacity. First, the magnetic field distribution and ac losses of high-Tc superconducting motor with the additive flux damper circuit was derived and computer simulation was performed with the equivalent model using FEM. The simulation results show that the quench state lasts for about 0.3 seconds.

### 1. 서 론

고온초전도동기모터는 효율 향상을 위하여 회전자의 계자권선으로 고온초전도테이프선재를 사용한다. 모터의 기동시와 외부의 부하가 증감할 때 시변자계가 발생하여 고온초전도테이프선재에 교류손실이 발생한다. 이와 같이 외부에서 계자권선으로 침투하는 시변자계에 따라 발생하는 초전도테이프의 손실을 최소화하기 위해서 동과 스테인레스강으로 구성된 플럭스댐퍼를 설치하였다[1].

본 연구는 제작된 500-600W 출력의 소형고온초전도동기모터[2]의 실제 운전 중에서 부하가 변동할 때 발생하는 시변자계가 플럭스댐퍼를 투과하여 은피복Bi-2223테이프에 인가되었을 때 은피복에서 발생하는 손실인 와류손과 초전도코어에서 발생하는 손실인 히스테리시스손을 해석하였다[3]. 해석된 와류손과 히스테리시스손에 의하여 선재 내부의 온도 상승값을 컴퓨터시뮬레이션을 통해 해석하였으며, 또한 켄치가 발생하는 열량을 해석하여 실제 운전중의 발생열과 비교하므로 이에 따른 모터의 안정적 인 운전 조건을 제시하는데 목적이 있다.

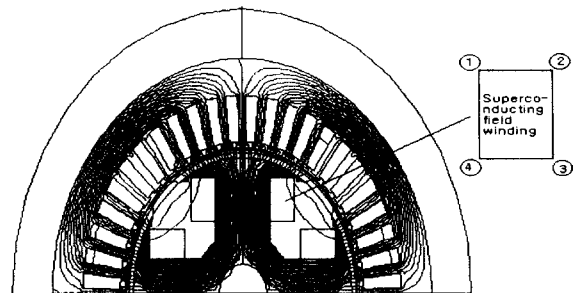


Fig. 1 Magnetic field distribution at no load

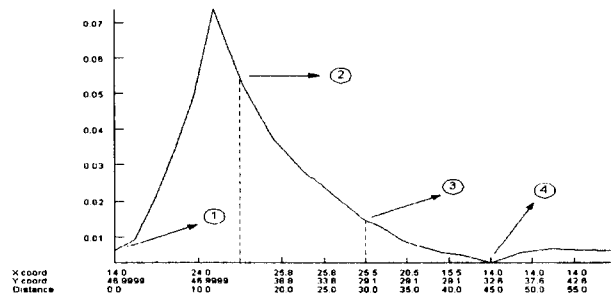


Fig. 2 Magnetic field distribution of the field winding

### 2. 계자 권선의 교류손실 해석

각 극에 설치된 선재의 턴수 및 성질 그리고 침투한 시변자계가 같다고 가정하고 그림 1에 나타난 것과 같이 2차원 자계를 분석한 결과 철심을 사용한 본 모터의 구조에서 철심의 자로를 벗어나 테이프선재에 인가되는 누설자계는 철심에서의 자계의 약 7%정도이다. 그림 2는 그림 1에서의 계자권선의 자계분포를 자세하게 보여주며 ①과 ②면 사이에서 최대 0.07T의 자계가 테이프선재에 인가되고 이때 켄치가 일어날 가능성이 큰 것을 알 수 있다. 초전도테이프 선재에 시변자계  $B_0$ 가 인가되고 계자전

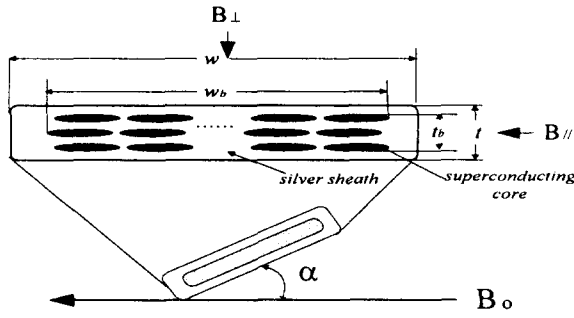


Fig. 3 Cross-sectional area and structure parameters of the superconducting taped winding applied time varying field

류  $i_f$  를 흘렸을 때 수송전류는 외부에서 정전류를 사용하여 인가하므로 일정한 값을 유지하며 자화전류는 시변자계에 의하여 변화한다고 할 수 있다. 그림 3에서 보여지는 계자권선에 Bean의 임계상태 모델을 도입하여 초전도코아에서 발생되는 4극의 전체 히스테리시스손을 구하면 다음과 같다[3,4].

$$W_{hys} = \frac{8B_o^2 \lambda_b w t l}{\mu_o} \left\{ \frac{1+i^2}{\beta} - \frac{2(1-i^3)}{3\beta^2} \right\} \quad \text{for } \beta > (1-i) \quad (1)$$

$$W_{hys} = \frac{8B_o^2 \lambda_b \beta w t l}{3\mu_o} \quad \text{for } \beta < (1-i) \quad (2)$$

$\lambda_b = w_b t_b / w t$ ,  $\beta = B_o / B_p$   
 $l = 1$ 극의 초전도테이프선재의 총길이  
 $i = i_f / i_c$  ( $i_f$ : 계자전류,  $i_c$ : 임계전류)

여기서  $B_p$  는 전체테이프에 침투된 자계이고  $B_p = \mu_o J_c t_b / 2$  이다. 테이프 폭에 비하여 두께가 상대적으로 얇으므로 수직으로 자계  $B_{\perp}$  가 인가되면 4극 전체의 히스테리시스손을 다음과 같다[5].

$$W_{hys} = 4B_o J_c \lambda_b w^2 t l \quad (3)$$

$J_c$  = 임계전류밀도  
 $z_b = w_b / t_b$  : 초전도테이프의 형상계수

고온초전도Bi-2223테이프에서 은피복에 손실이 발생하게 된다. 테이프 전체가 은피복이라고 가정하면 4극의 전체 와류손은 다음과 같다[5].

$$W_{ed} = \frac{4\pi^2 B_o^2 f w_{\perp}^2 w t l}{6\rho_{silver}} \quad (4)$$

$\rho_{silver}$  = 은의 고유저항  
 $w_{\perp}$  = 인가자계와 수직 방향의 테이프폭  
 $f$  = 인가자장의주파수

그림 3의 모델을 이용하여 여러 각도에서 침투하는 시변자계에 따른 손실  $W(B_o, \alpha)$  를 해석하는 식은 다음과 같다[5].

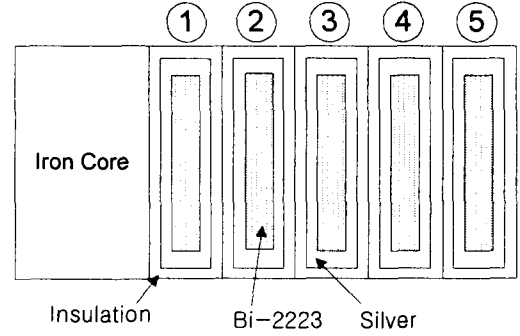


Fig. 4 The structure of the Field Winding

$$W(B_o, \alpha) = W_{\perp}(B_{\perp}, \alpha) + W_{\parallel}(B_{\parallel}, \alpha) \quad (5)$$

$$= W_{\perp}(B_o \sin \alpha) + W_{\parallel}(B_o \cos \alpha)$$

$W_{\perp}$  = 수평으로 가해진 자계로 인한 손실  
 $W_{\parallel}$  = 수직으로 가해진 자계로 인한 손실

따라서 전체 교류손실  $W_{ac}$  는 초전도코아의 손실인 히스테리시스손과 은피복에서 발생하는 와류손의 합으로 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

$$W_{ac} = W_{ed} + W_{hys} \quad (6)$$

### 3. 계자 권선의 온도 및 쿨지 해석

실제 계자권선은 130 turn이 권선 되어 있으나 본 해석에서는 그림 4의 모델을 도입하였다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 각 권선의 경계조건을 고려하면 각 초전도테이프의 사이 및 철심과 ①번 초전도테이프선재가 직접 접촉하므로 전도 조건을 사용하였으며, 나머지 경계면은 액체질소와의 대류조건을 적용하였다. 그림 4의 모델에 적용될 직교좌표계에서의 2차원 열전달 방정식은 다음과 같다[6,7].

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dot{q}(x, y) \quad (7)$$

$T$  = 온도  
 $k$  = 물질의 열전도도  
 $\dot{q}$  = 내부의 발생열  
 $C_v$  = 물질의 정적비열

액체질소면 경계조건은 대류조건이므로 면적  $A$  를 통한 열전달을  $q_{conv}$  은 다음과 같다[7].

$$q_{conv} = h_c A (T_s - T_{\infty})$$

$h_c$  = 액체질소의 대류열전달계수

$T_s, T_{\infty}$  = 전달면의 표면온도 및 냉매의 온도

열의 전도는 Bi-2223 → 은피복 → 절연체 → 액체질소 또는 철심의 순서로 이루어지고 절연체와 철심의

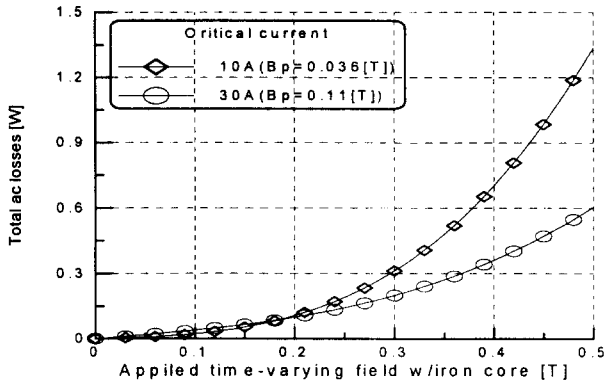


Fig. 5 Total ac loss in the field winding due to time-varying field

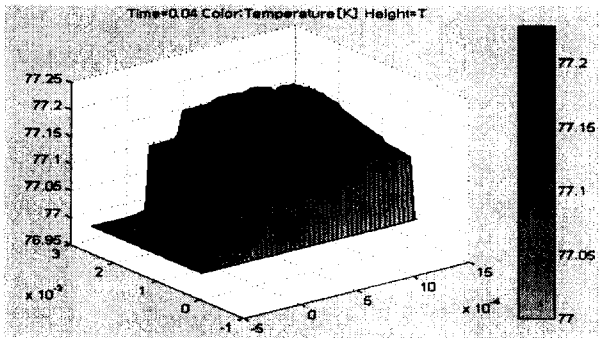


Fig. 6 Temperature distribution at 0.04sec after applying the actual ac losses

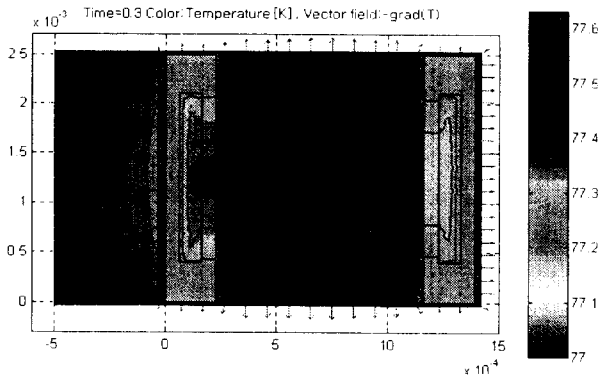


Fig. 7 Temperature distribution at 0.3sec after applied the actual ac losses

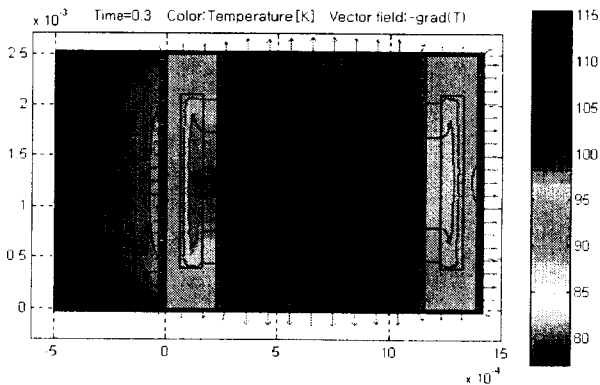


Fig. 8 Temperature distribution at 0.3sec after applying the 0.9W ac losses

Table 1 Basic parameter of the high-Tc superconducting Bi-2223 tape

재질	은피복55심Bi-2223	
치수	2.5×0.23 mm <sup>2</sup>	
초전도체의 비율	30%	
임계전류(I <sub>c</sub> )	10A @77K, 0T	
임계온도(T <sub>c</sub> )	110 K	
필라멘트 폭	0.1-0.3 mm	
필라멘트 두께	10-20 μm	
정적비열 [W/m <sup>3</sup> K] @77K	Bi-2223	0.75×10 <sup>6</sup>
	은피복	2.4259×10 <sup>6</sup>
	Insulation	1.1954×10 <sup>6</sup>
열전도계수 [W/m K] @77K	Bi-2223	0.75
	은피복	403.8
	Insulation	0.328

표면은 액체질소와의 대류가 일어나면서 열 교환이 이루어진다. 또한 내부 발생열은 Bi-2223에서는 히스테리시스손이 은피복에서는 와류손이 발생하므로 이를 각각의 내부 열원으로 하여 온도 상승을 구할 수가 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

고온초전도동기모터의 계자권선에 사용된 고온초전도테이프는 한국원자력연구소에서 제작된 선재를 사용하였으며 제원은 표 1에 나타나 있다. 그림 5는 플럭스맵퍼를 고려하여 계자에 4A의 정전원의 직류전류를 인가한 상태에서의 단위 길이당 전체 교류손실을 보여주고 있다. 본 모터에 사용된 임계전류 10A의 초전도테이프선재의 경우 Bp=0.036T이고 현재까지 개발된 수준급의 초전도테이프선재의 임계전류는 30A정도이며 이때 Bp=0.11(T)이다. 식(1),(2)에 따라 시변자계가 0.17T 이하에서는 30A급의 테이프선재 대비 10A의 테이프선재의 교류손실이 적으나 시변자계가 증가함에 따라 30A의 테이프 선재에서 발생하는 교류손실이 현저하게 적음을 알 수 있다.

본 모터의 계자권선으로 사용된 테이프선재의 임계온도가 110K이고 냉매로 액체질소를 사용하므로 이에 대하여 켈치 해석을 하였다. 온도분포에 대하여 해석을 한 결과 그림 2의 자계 분포를 고려하면 계자권선에 최대 0.07T가 인가되므로 이때 식(6)을 사용하여 전체 교류손실을 구하면 단위 길이당 15mW임을 알 수 있다. 그림 6은 실제 구하여진 15mW의 손실을 열원으로 하여 0.04초 경과후의 온도 분포를 보여주며 3번째 선재 Bi-2223의 중심에서 0.22℃가 상승함을 알 수 있으며 그림 8은 15mW의 손실을 인가한 후 0.3초 경과 후를 보여주고 있으며 0.62℃가 상승됨을 알 수 있었다. 따라서 본 모터와 같은 소형시스템에서는 켈치의 가능

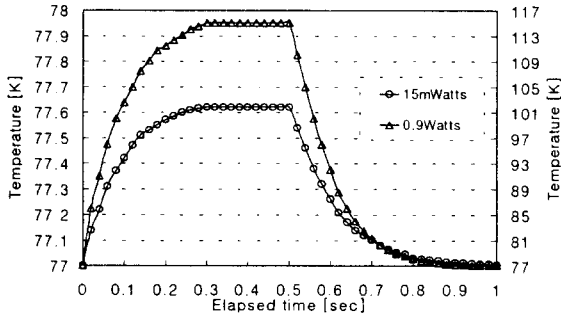


Fig. 9 Temperature response during the quench & recovery

성이 없이 시스템이 매우 안정된 것을 알 수 있다. 그림 8과 같이 퀀치가 발생하는 온도를 알아보기 위하여 0.9W의 열원을 인가한 결과 0.3초 후에 115℃까지 온도가 상승되어 임계온도가 110℃임을 감안하면 완전하게 퀀치가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 5를 보면 이때의 시변자계의 값은 0.42T임을 알 수 있다. 그림 9를 보면 실제 손실과 0.9W를 인가하였을 때 0.3초 경과후 퀀치가 발생하며 0.3초 이후에는 열원을 계속 인가하여도 온도가 포화됨을 알 수 있다. 시간축으로 0.5초 일 때 열원을 제거하고 다시 77K로 테이프선재 내부의 온도가 복귀되는 시간을 알아보면 경과시간을 고려하였을 때 0.5초가 소요됨을 알 수 있다.

따라서 상용화 급의 대용량의 시스템의 경우에는 전류 및 이에 따른 시변자계 등의 크기가 크게 증가하므로 이에 따라 효과 적으로 시스템을 안정시키기 위해서는 고온초전도테이프의 임계전류의 지속 적인 증가와 적절한 플럭스댐퍼의 설치가 필요하다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고온초전도동기모터의 시변자계에 따른 계자권선인 은피복Bi-2223테이프선재의 교류손실을 해석하였다.

해석 결과 4A의 계자전류 공급하고 시변자계에 의한 교류손실인 히스테리시스손과 와류손을 열원으로 하여 고온초전도테이프선재 내부의 상승온도를 해석한 결과 0.62℃가 상승함을 알 수 있었다. 또한 퀀치가 발생되는 교류손실을 알아보기 위하여 0.9W를 인가한 결과 0.3초 후에 퀀치가 발생되는 것과 0.5초 경과 후에 회복됨을 알 수 있었다.

본 연구의 결과에서 보여진 것과 같이 소용량의 모터에서는 시변자계에 따른 모터의 퀀치에 의해서 매우 안정된 것을 알 수 있으나, 상용화 급의 모터에서는 계자전류 및 시변자계가 상승되어 퀀치의 가능성이 있으므로 본 연구 결과의 파라메타를 이용하여 적절한 차단 장치의 설계와 고온초전도테이프선재의 성능 향상과 병행하여 기체헬륨 등의 냉매를 사용하여 임계자장 및 임계온도의 향상이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

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

## [참 고 문 헌]

- [1] 송명곤, 윤용수의 3인 “고온초전도동기모터의 부하변동시 Flux Damper의 특성해석”, 대한전기학회 전기기기연구회 춘계학술대회 논문집, pp24-27, 1998
- [2] 윤용수, 송명곤, 장안배, 고태국 “고온초전도동기모터의 전기적 손실에 따른 열전달 특성 해석”, 대한전기학회 논문집, pp1597-1604, 1998
- [3] M. N. Wilson, *Superconducting magnet*, Clarendon Press, New York, Chap.8, 1983
- [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
- [5] M. Sugimoto, A. Kimura, M. Mimura and Y. Tanaka, “Electromagnetic interfilament coupling of silver sheathed Bi-2223 multi-filamentary tapes in transverse AC magnetic fields”, *Physica C* 279 pp 225-232, 1996
- [6] A. Mills, *Basic heat and mass transfer*, Irwin Inc., Chicago, Chap3-5, 1995
- [7] 홍준표, *열전도·확산의 수치해석*, 반도출판사, pp 81-130, 1991