

고온초전도동기모터의 전기적 손실에 따른 회전자의 유로 설계에 관한 연구

윤용수 · 송영근* · 장원갑* · 장인배** · 이상진*** · 고태국*

안산공업전문대학 전기과, *연세대학교 전기공학과, **강원대학교 정밀기계공학과, ***위덕대학교 전기공학과

A Study on the Analysis for Fluid Path Design of the Rotor considering Electrical Losses of High-Tc Superconducting Synchronous Motor

Yong Soo Yoon · Myung Kon Song* · Won Kap Jang* · In Bae Chang** · Sang Jin Lee*** · Tae Kuk Ko*

Dept of Electrical Engineering, Ansan Technical College · *Dept of Electrical Engineering

Yonsei University · **Dept of Precision Mechanical Engineering, Kangwon National University ·

***Dept of Electrical Engineering, Uiduk University

Abstract - This paper presents the fluid characteristics simulation and design guide line of the fluid path inside the rotor, which has an high-Tc superconducting field winding using Ag sheathed BSCCO-2223. The analysis was conducted with an equivalent model of the high-Tc superconducting synchronous motor under transition condition that occurs during the load varying from 250watt to 500watt. The results show that the designed fluid circulation system performs adequately in maintaining the superconducting state in the winding.

1. 서 론

고온초전도모터는 효율의 향상, 소형화 등에서 기존의 모터의 큰 변형 없이 대처할 수 있으며 효율을 1-2% 정도 향상시킬 수 있는 점에서 경제적인 효과가 크다.

본 연구는 고온초전도동기모터의 실제운전 중에서 부하가 변동할 때 발생하는 외부의 시변자계 및 전기자손실에 따른 열 침입에 의한 내부의 온도 상승을 억제하기 위해 투입되어야 할 액체질소가 기체질소로 원활하게 방출되는 것을 예측하기 위하여 실제 제작된 고온초전도 모터의 치수 및 진공 층의 진공도를 고려하여 컴퓨터시뮬레이션을 통해 결과를 예상하고 이에 따른 효과적인 질소의 유로 구조를 구현하는데 목적이 있다.

2. 본 론

초전도체 모터는 회전자 내에 초전도테이프를 임계온도 이하로 냉각시켜야 한다. 이를 효과적으로 만족시키기 위해서는 전기적 손실 및 외부 열 유입과 회전에 따른 질소의 기화율 고려하여 입출구를 설계하여야 한다.

2.1 전기적 손실 정식화

회전자 내부에 유입되는 전류를 구하기 위하여 그림 1과 같이 플럭스댐퍼(flux damper)를 고려한 전기적 등가회로의 모델을 만들 수가 있다. [6] 등가회로를 고려하여 자속과 전류사이의 관계식 및 전압방정식을 세우면 다음과 같다. [4]

$$A = LI \tag{1}$$

$$V = RI + \frac{dA}{dt} = RI + I \frac{dL}{dt} + L \frac{dI}{dt} = RI + I\dot{L} + L\dot{I} \tag{2}$$

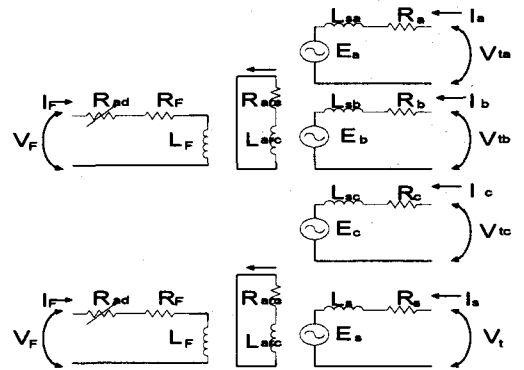


그림 1 고온초전도동기모터의 전기적 등가회로
Fig. 1 Electrical Equivalent Circuit of High-Tc Superconducting Synchronous Motor

$$\dot{I} = L^{-1} [V - [R + \dot{L}] I] \tag{3}$$

초전도권선에서 발생하는 열손실은 시변자계를 받을 때 고온초전도체에서 발생하는 히스테리시스손과 매트릭스손이다. [5]

$$\oint P dt = - \frac{1}{4\pi} \oint dt \oint_s (E \times H) ds \tag{5}$$

E = 초전도 권선에 유도된 전기장

H = 초전도 권선에 인가된 자기장

준 무한대 슬랩모델(slab model)에서 교류손실이 발생되므로 다음과 같은 형식이 된다

$$P \propto af + b^2 \tag{5}$$

a, b = 물질에 따른 비례상수

f = 인가 자장의 주파수

본 실험에서는 공심을 사용하지 않고 4극의 철심을 사용하므로 발생하는 열손실은 플럭스댐퍼를 침투하여 들어온 시변자계에 의하여 발생한다. 전기자에서 발생된 자계가 플럭스댐퍼를 통과하여 들어오는 양은 스킨효과를 이용하여 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$G = 4 \times J_{bene}^2 \times R_n \tag{6}$$

R_n = 철심의 전기저항

J_bene = 플럭스댐퍼를 통과한 회전자의 유입전류

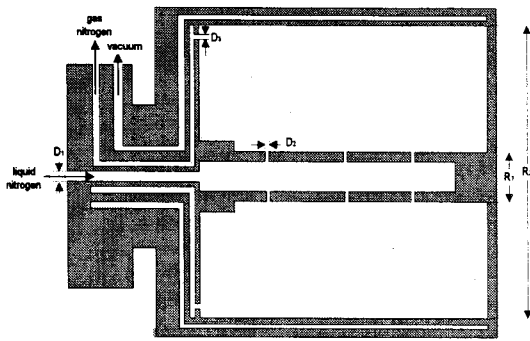


그림 2 회전자 단면의 개략도
Fig. 2 Schematic drawing of rotor cross-section

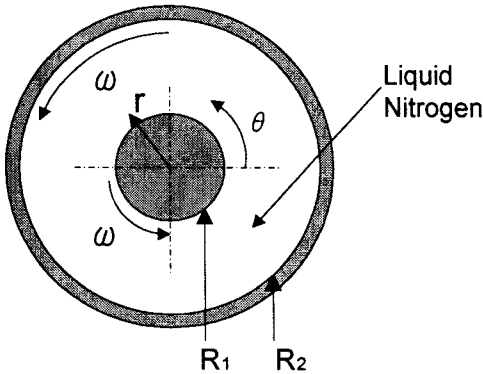


그림 3 회전자 압력분포 설정모델의 개략도
Fig. 3 Schematic drawing of pressure distribution model inside the rotor

표 1 시뮬레이션에 사용된 치수 및 계수
Table 1 Dimension and coefficient used for simulation

구분	치수(mm)	개수	비고
회전자 내경(R1)	110	-	
샤프트 직경(R2)	50	-	
액체질소 투입구(D1)	10	-	
액체질소 투입구(D2)	3	12	
기체질소 방출구(D3)	Design 1	4	4
	Design 2	2	4
	Design 3	1	4
회전자길이	160	-	
액체질소의 동점성 계수	0.0213	-	at 77K
액체질소의 Prandtl수	2.43	-	at 77K

회전자의 진공층을 통하여 유입되는 열량을 Q_{out} , 시변자계에 의하여 초전도테이프선재의 발생하는 열량을 Q_{tape} 라 하면 회전자 내부 총발생열량은 다음과 같다.

$$Q_{total} = Q_{out} + Q_{tape} + Q_{rot} \quad (11)$$

필요한 액체질소의 양은 다음과 같다.[6]

$$\frac{dV}{dt} = \frac{Q_{total}}{\rho_f \times h_{fg}} \quad (12)$$

V = 필요한 질소의 부피

ρ_f = 액체질소의 밀도

h_{fg} = 액체질소의 엔탈피

2.2 회전자의 회전에 따른 발생 열량

그림 2는 회전자의 단면에 대한 개략도를 나타내었다. 회전자 내부는 액체질소가 회전하면서 냉각되므로 회전시의 발생하는 열량을 구하려면 열전달의 상관식이 도입되어야 한다. 회전하는 원통에 대한 Nusselt수 N_{UD} 의 거동은 매우 복잡하므로 다음과 같은 평균 N_{UD} 에 대한 상관관계식을 도입하였다.[3]

$$N_{UD} = 0.633(Re_D \cdot P_r)^{1/2} \quad (7)$$

Re_D = 레이놀즈(Reynolds)수

P_r = Prandtl수

레이놀즈수는 다음과 같다

$$Re_D = \omega R_2^2 / \nu \quad (8)$$

R_2 = 회전자의 내경[m]

ω = 각속도

ν = 동점성계수[m²/s]

복사의 열전달계수 h_c 는 다음과 같다.

$$h_c = \left(\frac{k}{R_2} \right) N_{UD} \quad (9)$$

회전시 열량은 Fourier법칙에 의해 다음과 같다.[1]

$$\dot{Q}_{rot} = h_c A \Delta T \quad (10)$$

2.3 회전시 회전자 내부의 압력 분포

회전자 내부에 액체질소만 있다고 가정하고, 층류 유동장내의 임의의 시각 t 에 대하여 유체 $dm = \rho dr d\phi dz$ 에 Navier-Stokes 운동방정식을 적용할 수 있다. 그림 3과 같이 회전자의 모델을 근사화 시키고 반지름이 R_1, R_2 인 동심원통에 액체질소를 주입하고 ω 로 회전시킬 경우 유체의 정상운동을 고찰할 수 있다. 회전축이 수평일 때 운동방정식을 다음과 같다.[2]

$$r \text{ 성분: } -\rho \frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r}$$

$$\phi \text{ 성분: } 0 = \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_\theta) \right] \right\}$$

$$z \text{ 성분: } 0 = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

V_θ 을 정리하면 다음과 같다.

$$V_\theta = \left(\frac{\omega - \omega (R_1/R_2)^2}{1 - (R_1/R_2)^2} \right) r \quad (13)$$

경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$r = R_1 \text{에서 } V_\theta = \omega R_1$$

$$r = R_2 \text{에서 } V_\theta = \omega R_2$$

r 성분의 압력분포는 V_θ 에 의존한다. 식 13에 경계조건을 대입하여 얻은 지배방정식은 다음과 같다.

$$\Delta p = \frac{\rho \omega^2}{(R_1^2 - R_2^2)^2} \left[\frac{(R_1^2 \omega - R_2^2 \omega)^2 (r^2 - R_1^2)}{2} \right] \quad (14)$$

Pressure distribution inside with change in rpm

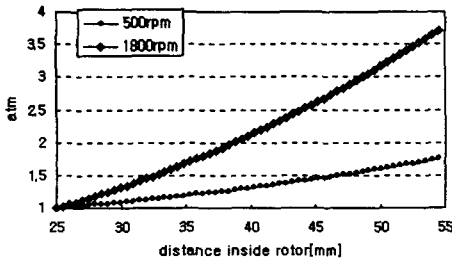


그림 4 속도에 따른 회전자 내부 압력 분포
Fig. 4 Pressure distribution inside the rotor with change in rpm

Available output volume of gas Ni

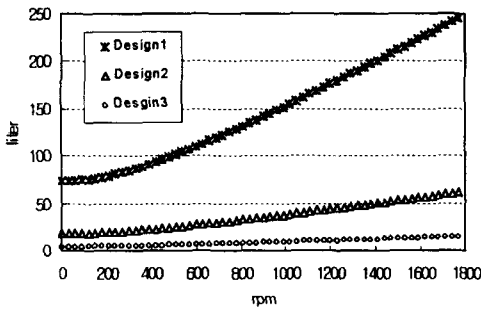
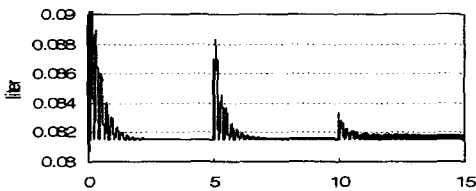


그림 5 설계에 따른 기체질소 방출 가능량
Fig. 5 Available output volume of gas Ni due to design

Required liquid Ni



Induced gas Ni under transition condition

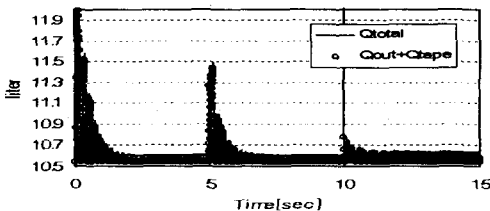


그림 6 부하 변동에 따른 액체질소 필요량 및 기체질소 발생량
Fig. 6 Required liquid Ni and Induced gas Ni under transition

2.4 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 시뮬레이션은 외부 열침입을 차단하기 위한 회전자의 진공도는 0.001Torr, 회전자 내부의 빈 공간 전체가 액체질소로 채워졌다고 가정하고 해석하였다. 시뮬레이션에 사용된 치수 및 계수는 표 1에 주어졌다.

그림 4의 시뮬레이션 결과를 검토하면 회전속도가 증가하면 회전자의 내부 압력이 중심 축에서 외곽으로 증가함을 알 수 있다. 그림 5의 결과를 검토하면 기체질소의 방출구 구경에 따라 회전자 내부에서 발생하는 기체질소를 얼마나 방출할 수 있는가를 알 수 있다. 그림 6은 입력변수로 전자기권선의 정격전압은 3상 220V, 총저항은 6Ω으로 하였다. 여자전류를 4A로 하고 무부하로 모터를 구동시키다가, 250W로 부하를 걸어주고 모터를 구동되어 안정된 다음, 다시 부하를 500W로 올리게 될 경우에 발생하는 전기적손실에 따라 필요한 액체질소 및 발생하는 기체질소의 양을 알 수 있다. 시간축에서 보면 부하에서 250W로 변화할 때가 5초, 250W에서 500W로 변화할 때가 10초에서 시작한다. 또한 회전에 따른 발생열의 영향은 무시할 정도로 작다는 것을 알 수 있었다. 그림 5와 그림 6의 결과를 비교하면 기체질소 방출구(D3)가 Design 2로 주어지면 문제가 없으며, 실제로는 Design 1로 제작되어 발생된 기체질소가 충분히 방출되는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 고온초전도모터의 구조 및 전기적 손실에 따른 유체 특성 해석을 통하여 설계 시에 필요한 파라메타 등을 알 수 있었고 초전도체의 특성으로 인하여 부하가 변동할 때 외부에서 침투하는 시변자계의 영향에 매우 민감한 것을 알 수 있었다. 동기속도인 1800rpm에서 4A의 계자전류 공급시 무부하 상태에서 부하를 각각 320W, 640W로 변동시 과도 현상이 2초 동안 지속되는 것을 알 수 있었다. 설계된 유로가 적절하다는 것과 내부 압력 분포를 고려할 때 액체질소를 투입할 때의 압력이 대략 4기압 이상이 필요하며 회전자가 0.001Torr를 유지하고 필요한 액체질소가 공급이 되면 회전자 내부의 전기적 손실과 온도 변화에 따른 영향과 관계없이 모터의 운전 중에 시스템이 안정되게 작동한다는 것을 알 수 있었다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] A. Mills, *Heat Transfer*, Richard D. Irwin, Inc., Boston, Ch. 4, 1992
- [2] W. Janna, *Introduction to Fluid Mechanics*, International Thomson Publishing, Boston, Ch 11, 1993
- [3] A. Kendoush, "Approximate Solution of the Convective Heat Transfer from an Isothermal Rotating Cylinder", *Int. J. Heat Transfer*, 17, pp 439-441, 1996
- [4] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen Umans, *Electric Machinery*, McGraw Hill Book Company, New York, pp 147-310. 1992
- [5] W. J. Carr, Jr, *AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, pp 128-130. 1993
- [6] 송명관, 윤용수의 3인 "고온초전도동기모터의 부하변동시 Flux Damper의 특성해석", 전기기기연구회 춘계학술대회 논문집, p24-27, 1998