2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

영구자석형 초고속 전동기의 열특성 해석

장석명, 서정출, 조한욱, 정연호*
충남대학교, 한국전기연구원*

Analysis of thermal distribution for Permanent Magnet High Speed Motor

Seok-Myeong Jang, Jung-Chul Seo, Han-Wook Cho, Yeon-Ho Jeong*
Chungnam National Universitv. KERI*

Abstract - Permanent magnet high-speed machines are small size compared with general motor of the same power and so must minimize generating heat, as well rotor structure is simple and strong for born centrifugal force. Especially, Material of each part is given thermal limit therefore temperature distribution vary important.

In this paper, heat transfer coefficient of permanent magnet high-speed machines with 5-kW 40,000 rpm is calculated and temperature distribution due to power loss is predicted by finite element analysis.

1. 서 론

일반적으로 초고속 전동기는 동일 출력의 범용 전동기에 비하여 소형화되기 때문에 전동기에서 발생하는 열을 최소화하고, 회전자가 원심력에 충분히 견디도록 구조가 간단하며 견고해야 한다. 특히 각 부분에 사용된 재질이 온도의 한계성을 지니고 있으므로 각 부분에 대한 온도 분포의 예측은 매우 중요하다. 영구자석형 초고속 전동기에서 열원은 손실에 관계되며, 온도 상승에 주로 영향을 주는 손실은 크게 동손과 철손, 그리고 회전자손이다[1]. 열전달은 전도, 대류, 복사에 의해 이루어지며 손실의 크기와 위치, 기기의 기하학적 구조 그리고 냉각 방법에 영향을 받는다. 또한, 열 해석에 있어서 적절한 대류 열전달 계수를 구하는 매우 중요하다[2].

본 논문에서는 정격출력 5kW 정격속도 40,000 rpm을 갖는. 영구자석형 초고속 전동기의 적절한 대류 열전달 계수를 구하고 유한요소해석 방법을 이용하여 손실에 따른 각 부분에 온도 분포를 예측하였다.

2. 영구자석형 초고속 전동기의 열특성 해석

2.1 해석모델

해석모델은 초고속 전동기용으로 설계된 2극 18슬롯의 기기이며 영구자석은 SmCo, 고정자와 회전자축의 재질은 고주파수에서 작은 철손을 갖는 실리콘 규소 강판인 ST150을 사용하였다. 그림 1은 해석모델의 단면을 보여주며 해석모델의 사양은 표1과 같다.

2.2 영구자석 초고속 전동기의 주요 열원

초고속 전동기에서 열원은 손실과 관계있으며, 온도상승에 주로 영향을 주는 손실은 크게 철손과 동손, 그리고 회전자 손실이다. 철손은 자성체의 자속이 시변일 때 발생하는 손실로 히스테리시스 손실과 와전류 손실이며, 동손은 고정자 권선의 저항에 의한 주울열이고, 회전자 손실은 공극자속이 슬롯의 개방부에 의해 리플이 발생하여 와전류 손실로 발생한다.

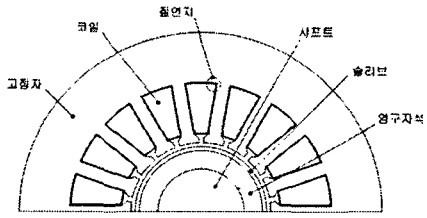

그림 1 해석모델의 단면

표 1 해석모델의 사양

항목	사양
고정자 외반경	44 (mm)
고정자 내반경	17 (mm)
회전자 외반경	15 (mm)
회전자 내반경	10.5 (mm)
회전자 슬리브	1 (mm)
스택길이	55 (mm)
공극길이	1 (mm)

2.2.1 철손

일반적으로 철손은 와전류 손실과 히스테리시스 손실로 나뉘어 지고 Steinmetz 방정식으로서 구할 수 있다. 그러나 초고속 전동기와 같이 높은 주파수 영역에서 운전되는 경우 Steinmetz 방정식은 오차가 크기 때문에 식 (1)과 같이 초고속 전동기에 적합한 식을 이용하여 철손을 구하였다[3].

$$\begin{aligned} P_c &= P_h + P_e + P_a \\ &= k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \\ &= k_h f B^{(a+bB+cB^2)} + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \end{aligned} \quad (1)$$

P_h, P_e는 히스테리시스 손실과 와전류 손실을 의미하며, P_a는 이상와전류 손실이다. 해석모델의 운전주파수는 667 H_z이며, 각각의 계수는 ST150의 단위철손 정보와 곡선의 근사화 방법을 이용하여 구할 수 있고 표 2와 같다. 치와 요크에서의 평균자속밀도는 유한요소법을 이용하여 구하였고 치에서의 질량은 0.385kg, 요크에서의 질량은 1.175kg이다. 식 (1)과 표 2의 계수로부터 각 영역의 철손을 산출할 수 있고 표 3과 같다.

표 2 운전 주파수에서의 각각의 계수

항목	사향
운전주파수	667 Hz
k_h	0.00610866
a	2.14456728
b	0.7961973
c	-0.927319713
k_e	18.0673×10^{-6}
k_a	573.08×10^{-6}

표 3 각 영역의 철손

치	요크	전체
10.73 W	1.174W	28W

2.2.2 동손

높은 주파수에서 운전되는 기기들은 침투깊이를 줄이기 위하여 얇은 소선으로 구성된 도선을 사용하고 저항은 식 (2)로부터 구할 수 있다[4].

$$R_c=\frac{1}{\pi r^2\gamma p}\left[f_1\left(\frac{r_d}{a}\right)+\frac{p^2}{a}\left(\frac{r_0}{r_d}\right)^2 f_2\left(\frac{r_d}{a}\right)\right] \quad (2)$$

해석 모델의 정격 전류는 17A이고 식 (2)에 의해서 계산된 저항은 0.279Ω 이다. 동손은 식 (3)으로부터 구할 수 있고 242W 이다.

$$P=3I^2R \quad (3)$$

2.2.3 회전자손

회전자 손실은 유한요소법과 전자장 해석법을 이용하여 적절한 전계 $\boldsymbol{E}$와 자계 $\boldsymbol{H}$를 계산하여 포인팅 벡터 $\boldsymbol{P}$에 의해 계산할 수 있고 식 (4)와 같다[1].

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}$$
$$P=\frac{1}{2}Real(E\times H^*) \quad (4)$$

식 (4)에 의해 계산된 회전자 손실은 표 4와 같다.

표 4 해석모델에서의 회전자 손실

슬리브	영구자석	샤프트	합계
2.47W	0.845W	0.012W	3.327W

2.3 해석 모델에서의 열전달 계수 산출

해석모델의 열해석을 위해서는 공극에서의 대류열전달계수가 결정되어야 한다. 대류열전달계수를 결정하기 위해 *Reynolds*수(*Re*)와 *Prandtl*수(*Pr*) 그리고 *Nusselt*수(*Nu*)와 같은 무차원수를 사용하였다[2].

원형 관내의 공기 유동에 대한 Reynolds수는 식 (5)로부터 계산된다.

$$Re=\frac{Vd}{\nu} \quad (5)$$

여기서 V는 공극에서의 공기유속, d는 공극의 직경, ν는 공기의 동점성계수이다. 공극의 직경은 식 (6)로부터 구할 수 있다.

$$d=\frac{4(\pi/4)(D_o^2-D_i^2)}{\pi D_o+\pi D_i} \quad (6)$$

*Prandtl*수는 운동량수송과 에너지수송의 상대적인 유효척도를 보여주는 것으로 식 (7)와 같다.

$$\Pr=\frac{c_p\mu}{k}=\frac{c_p\rho\nu}{k}=\frac{\nu}{a} \quad (7)$$

여기서 c_p는 비열, μ는 점성계수, k는 열전도율, ρ는 밀도, ν는 동점성계수, a는 열확산계수이다. 일반적으로 기체들의 Pr는 거의 1에 가깝고 기름종류는 Pr≫1, 액체금속류에서는 반대로 Pr≪1이다.

*Reynolds*수와 *Prandtl*수가 결정되면 *Nusselt*수를 구할 수 있다. 원형관내부를 흐르는 완전히 발달된 난류유동에 대한 Nusselt수는 여러 연구자에 의해 제안된 식이 있으나 본 논문에서는 Prandtl수가 0.7≪Pr≪160인 범위내에서 적용되는 Dittus-Boeltertlr을 사용하였고 식 (8)와 같다.

$$Nu=0.023Re^{0.8}\Pr^{0.4} \quad (8)$$

Reynolds수와 Prandtl수, Nusselt수가 결정되면 공극에서의 대류열전달계수(h)를 식 (9)와 같이 정의할 수 있다.

$$h=\frac{Nuk}{d} \quad (9)$$

공극에 유입되는 공기의 물성치는 표 5와 같고, 공극에 유입되는 공기의 유속을 10, 20, 30m/s 로 가정하면 각각의 유속에 따른 Reynolds수, Prandtl수, Nusselt수와 대류열전달계수는 표 6와 같다.

표 5 유입 공기의 물성치

구 분	물성치	단 위
밀도(ρ)	1.1614	[kg/m^3]
비열(c_p)	1007	[$J/kg\cdot C$]
동점성계수(ν)	15.89×10^{-6}	[m^2/s]
열전도율(k)	26.3×10^{-3}	[W/m°C]
열확산계수(α)	22.5×10^{-6}	[m^2/s]

표 6 유속에 따른 *Re, Pa, Nu*수와 열전달계수

공극에 유입되는 유속 (m/s)	10	20	30
Re	1266	2517	3776
Pr	0.707		
Nu	6.07	10.52	14.56
h	80	138	191.4

본 논문에서는 공극으로 유입되는 공기의 온도를 25℃, 고정자 외표면의 대류열전달계수는 자연대류로 가정하여 20 [W/m²°C]라 하였다. 또한, 해석모델에 사용된 재질의 열전도율은 표 7과 같다.

표 7 해석모델에 사용된 재질의 열전도율

항목	계수 [W/m°C]
고정자(ST150)	20
영구자석(SmCo)	9.6
슬리브(INCONEL)	11.4
절연지(노맥스)	0.105
공기	0.026
코일	400

2.4 해석 결과

그림 2, 3과 4는 해석모델의 공극에 유입되는 공기 유속의 변화에 따른 온도 분포를 보여준다.

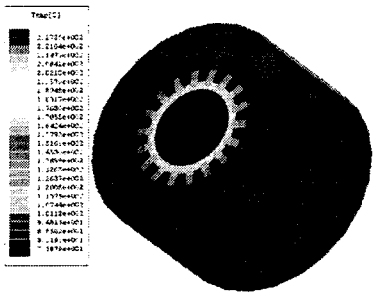

그림 2 공극에 유입되는 공기의 유속이 10m/s인 경우의 온도 분포

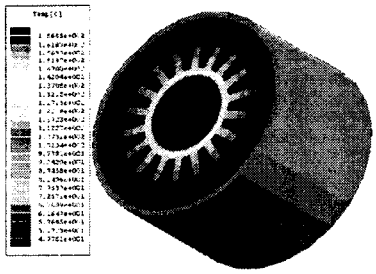

그림 3 공극에 유입되는 공기의 유속이 20m/s인 경우의 온도 분포

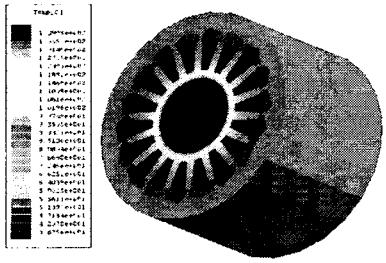

그림 4 공극에 유입되는 공기의 유속이 30m/s인 경우의 온도 분포

그림 5와 그림 6은 반경방향 변화에 따른 온도 변화를 보여준다. 그림 5는 샤프트 중앙-영구자석-슬리브-공극-절연지-코일-절연지-요크에서의 온도 변화이며, 그림 6은 샤프트 중앙 영구자석-슬리브-공극-치-요크에서의 온도 변화이다.

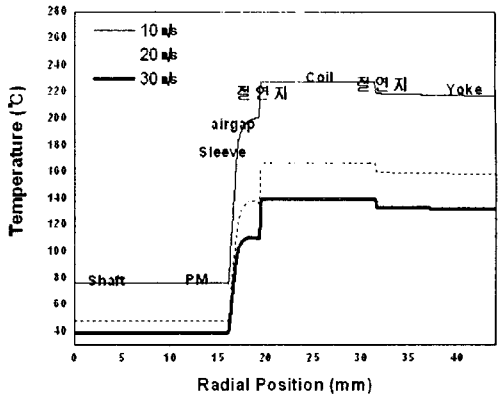

그림 5 반경방향 변화에 따른 온도 변화 I

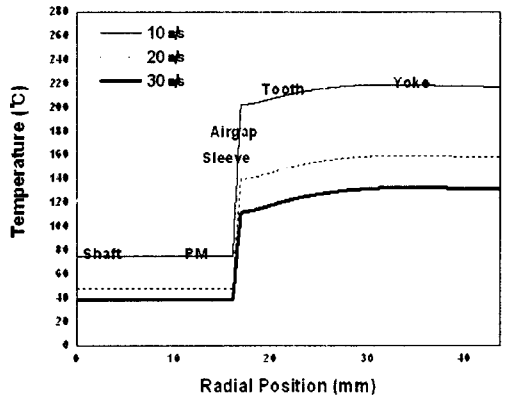

그림 6 반경방향 변화에 따른 온도 변화 II

일반적으로 사용되는 절연지와 코일의 절연등급은 H종(180℃)으로 열적으로 높은 내성을 가졌다고 할 수 있다. 그러나 해석결과 공극에 유입되는 공기의 유속이 10m/s인 경우 최대 온도가 약 230℃까지 상승하기 때문에 고정자 외표면에 강제 냉각이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석형 초고속 전동기에서 온도상승의 주요 원인이 되는 철손, 동손, 회전자손에 대하여 알아보았고 5kW 40,000 rpm을 갖는 해석 모델의 철손, 동손, 회전자 손실을 구하였다. 각각의 손실을 열원으로 하여 공극에 유입되는 공기의 유속변화에 따른 영구자석형 초고속 전동기의 온도분포를 해석하였다. 공극에 유입되는 공기의 유속이 많을수록 온도가 낮아짐을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 조한욱, "고속용 영구자석 동기전동기의 설계 및 회전자 손실 특성해석", 충남대 석사학위논문, 2004

[2] J. P. Holman ,"Heat transfer, 8th", McGraw Hill, 2000

[3] 상석명, 조성국, 조한욱, 양현섭, "고속용 전동기에 사용되는 실리콘 규소 강판의 철손 계수 산정", 추계 학술대회 논문집, pp128 130, Oct. 2003

[4] J. Lammeraner and M.Stafl, Eddy Currents. Cleveland, OH:CRC, 1966