

IPMSM의 희토류 영구자석의 온도상승 억제를 위한 팬효과

Fan Effect for Temperature Rising Suppression of the Rare Earth IPMSM

조을규* · 조광진* · 김규탁*
(Eul-Gyu Jo · Kwang-Jin Cho · Gyu-Tak Kim)

Abstract - In this paper, temperature characteristic analysis was performed by using a thermal equivalent circuit. To suppress the temperature rising, the cooling fan was installed in rotor. The temperature of permanent magnet was reduced from 66[°C] to 55[°C] by installing the fan. The temperature of the permanent magnets is difficult to measure. Therefore the temperature of end winding was measured directly by the thermo couple. The validity of this study was demonstrated as compared the calculated results with experimental ones.

Key Words : Thermal equivalent circuit, Temperature rising, Demagnetization of permanent magnet, Efficiency

1. 서론

매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : IPMSM)는 영구자석에 의한 마그네틱 토크 성분과 d-q축 인덕턴스 차이에 의한 릴럭턴스 토크 성분을 함께 가지므로 단위 체적 당 높은 토크를 얻을 수 있다[1]. 하지만 매입형 영구자석 전동기의 운전 특성 상 고속 회전과 고 출력밀도에 의한 많은 철손의 발생이 불가피하다[2]. 이러한 손실은 전동기의 온도를 상승시키는 단점이 있다. 전동기의 온도 상승은 권선 저항의 증가에 의한 많은 동손 발생은 물론 희토류 영구자석의 성능이 저하되는 등의 원인이 되기 때문에 전동기의 효율과 내구성이 저하 된다. 그러므로 전동기 설계 시 전동기의 온도 특성에 대하여 반드시 고려하여야 한다.

전동기의 열해석 기술에는 집중정수법(Lumped Parameter Method)을 활용한 열 등가회로망법, 유한요소법(Finite Element Method, FEM), 유한 차분법(Finite Difference Method, FDM) 등을 이용한 분포정수법(Distributed Parameter Method)이 있다[3]. 일반적으로 전동기의 열적 성능을 계산하기 위하여 유한요소법과 유한차분법이 사용되어진다. 그러나 유한요소법과 유한차분법을 이용한 열 해석은 복잡한 영역을 해석하기 위하여 요소를 나누고 거대한 행렬을 계산하기 위해서는 너무 긴 시간이 걸리기 때문에 전동기 형상의 전체 영역에는 사용하지 못하고 고정자와 회전자에 작은 영역에서만 한정되어 사용되어진다. 반면에 집중

정수법을 활용한 열 등가 회로망 법에 의한 열 해석은 계산이 간단하고, 전동기의 다양한 부분에서의 전체적인 온도 상승을 긴 계산 시간이나 작업을 요구하지 않고 확인할 수 있는 장점이 있다[2].

본 논문에서는 전동기에서의 복잡한 열전달을 간단한 열저항과 열원으로 등가화하여 집중정수법을 활용한 열등가회로망법을 사용하여 열해석을 수행하였다. 이를 위하여 대상 전동기의 형상에 따라 열등가회로망을 작성하여 전도와 대류 열저항을 산정한 후, 시간에 따른 온도 상승 특성을 계산하였다. 냉각팬 설치를 통한 대류 열저항 재 산정을 통하여 전동기의 온도 상승을 억제시켰다. 유한요소법을 이용하여 IPMSM의 특성을 해석하였으며, 온도 상승 실험을 통하여 본 논문의 타당성을 입증하였다.

2. 열 등가회로

2.1 해석 모델

본 논문에서 사용된 전동기는 600[W]급 IPMSM이다. 정격 속도 3000[rpm]에서 1.91[Nm]의 정격 토크를 내며 이때의 정격 전류는 17.51[A]이다. 고정자 및 회전자의 재질은 50PN1300을 사용하였으며 1.3[T]의 NdFeB 재질의 영구자석을 사용하였다. 전동기의 제원과 형상은 표 1과 그림 1에 나타내었다.

2.2 열 등가회로망을 이용한 열 해석 절차

먼저 열 등가회로망을 이용하여 전동기의 온도를 해석한 후에 영구자석의 온도에 따른 잔류자속밀도를 재계산하고, 동일 출력을 발생시키기 위한 입력 전류를 계산하였다. 입력 전류와 영구자석의 잔류자속밀도가 변화하였으므로, 동손과 철손을 재계산한다. 다시 열 해석을 수행하여, 입력전류의 변화가 없을 때까지 반

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l University, Korea

E-mail : gtkim@cwnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l University, Korea

Received : August 31, 2015; Accepted : October 6, 2015

복수행 하였다. 열 등가회로망을 이용한 열 해석 절차는 그림 2에 나타내었다.

표 1 해석 모델의 제원

Table 1 Specification of analysis model

Item	Specification
Material (stator&rotor)	50PN1300
Rated Torque [Nm]	1.91
Rated Speed [rpm]	3000
Rated Current [A]	17.51
Pole / Slot	8 / 12
Winding type	Concentrated winding
Br [T]	1.3
Stack Length [mm]	45
Stator Diameter [mm]	83.6

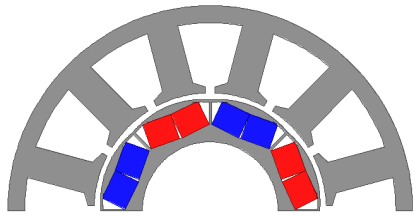


그림 1 해석 모델

Fig. 1 Analysis model

2.3 열 등가회로 구성

전동기의 열 등가회로를 구성하기 위해서는 먼저 전동기의 각 부분을 적당한 제어체적으로 분할하여야 한다. 본 논문에서는 프레임, 고정자 요크, 고정자 치, 권선, 엔드 권선, 공극, 회전자 외측, 영구자석, 회전자 내측, 샤프트, 엔드캡 내부 공기에 절점을 할당하였으며 그에 따른 열 등가회로의 구성은 그림 3과 같다. 철손이 발생하는 4개의 영역과 동손이 발생하는 2개의 영역이 있다. 고정자 권선 및 철심에서 동손 및 철손의 열원이 발생하여 프레임과 회전자 및 샤프트로의 열전달이 발생하며 프레임 표면에서 대류를 통하여 외부로 방출된다. 온도가 가장 높을 것으로 예상되는 부분은 End winding부분이며, 등가회로망 계산 시 각 절점 사이의 열 저항 및 열용량의 산정이 올바르게 이루어져야 한다. 이를 위해서는 전동기의 정확한 치수 및 재질 정수를 파악해야 하며, 계산의 정확도 및 편의성을 위하여 원통형이 아닌 특이한 형상에 대해서는 원통형으로 등가화 한 후 계산을 수행하여야 한다[7].

2.4 열 등가회로 풀이

전도에 의한 열 저항은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

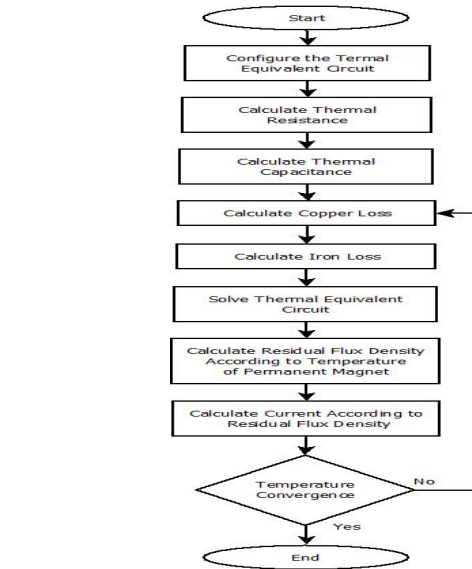


그림 2 열 해석 절차

Fig. 2 Procedure of thermal analysis

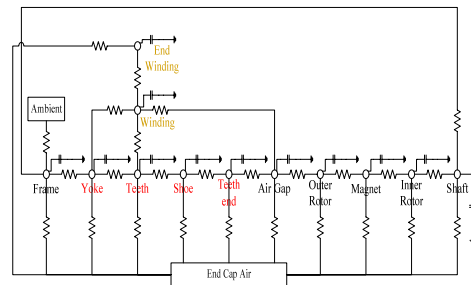


그림 3 열 등가회로

Fig. 3 Thermal equivalent circuit

$$R_{cond} = \frac{l}{kA} \tag{1}$$

식 (1)에서 l 는 열전도 계수이고 A 는 전도에 의한 열전달이 발생하는 면적, k 는 전도가 발생하는 두 물질간의 거리를 의미한다. 재료의 열전도 계수는 고유 물성치이므로 알려져 있는 재료의 값을 사용하였다.

대류에 의한 열 저항은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \tag{2}$$

위 식에서 h 는 대류열전달계수이고, A 는 대류가 일어나는 면적을 의미한다. 따라서 대류에 의한 열저항을 계산하기 위해서는 대류열전달계수 산정이 필요하다.

공극에서는 고정자와 회전자의 상대적인 회전 운동에 의해 대류 열전달이 발생한다. 공극에서의 대류열전달계수는 식 (3)과 같이 뉴셀트 수(Nusselt number)와 공극 길이, 공기의 열전도도로

표현된다[4].

$$h = \frac{N_N \cdot k_{air}}{l_g} \quad (3)$$

그리고 누셀트 수는 레이놀드 수(Reynolds number)와 프란틀 수(Prandtl number)에 의해 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$N_N \begin{cases} = 2.2 & (N_{Ta} \leq 41.1) \\ = 0.23 N_{Ta}^{0.63} N_{Pr}^{0.23} & (N_{Ta} \geq 41.1) \end{cases} \quad (4)$$

또한, 레이놀드 수와 프란틀 수는 공극 길이, 회전자의 속도, 공기의 동점성 계수, 비열 등으로 식 (5), (6)과 같이 표현된다.

$$N_{Ta} = \frac{l_g V_{rotor}}{v_a} \quad (5)$$

$$N_{Pr} = \frac{c_p v_a}{k_{air}} \quad (6)$$

전동기의 고정자, 회전자 및 고정자 권선의 축 방향으로 전달되는 열과 엔드 권선의 열은 엔드캡 내부를 통해 하우징으로 전달된다. 엔드캡 내부의 대류열전달계수는 식 (7)로 계산된다. 식 (7)에서 v [m/s]는 유동 공기의 속도를 의미한다.

$$h = 15.5 \times (0.29v + 1) \quad (7)$$

2.5 열원 계산

3상일 경우 전류가 흐를 때, 고정자 권선에서 발생하는 손실은 다음과 같다.

$$P_{cu} = 3I^2 R \quad (8)$$

식 (8)에서 R 은 권선의 상저항이며, 이는 온도에 따라 선형적으로 상승하기 때문에 이를 고려하기 위하여 다음 수식을 사용하였다.

$$R = R_0 (1 + \alpha(T - T_0)) \quad (9)$$

식 (9)에서 α 는 저항 온도 계수이며, 이는 금속의 재질에 따라 다른 값을 가진다. 전동기의 권선은 구리를 사용하므로 본 논문에서는 구리의 저항 온도 계수인 0.004[%/°C]를 사용하였으며, 초기 온도에서의 저항은 26[°C]에서의 측정값인 0.0322[Ω]을 사용하여 온도 상승에 따른 저항 변화를 고려하였다.

철손의 계산은 고정자 요크와 치 부분을 그림 4와 같이 55개의 영역으로 분할하여 수행하였다.

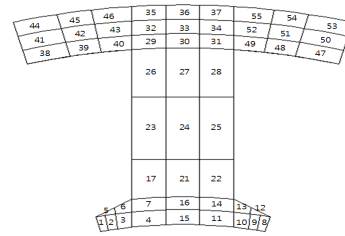


그림 4 분할된 고정자 형상

Fig. 4 Divided stator core shape

철손은 재질 자체의 자기이력 특성으로 인한 히스테리시스 손실분과 유도전류에 의한 와전류 손실분으로 분류되고, 그 외에 이상 와전류 손실이 발생하게 되며 이는 주파수와 자속 밀도의 함수로 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\frac{W_i}{f} = \frac{W_h + W_e + W_a}{f} = k_h B_m^n + k_e f B_m^2 + k_a f^{0.5} B_m^{1.5} \quad (10)$$

식 (10)에서 k_h 는 히스테리시스 손실 계수, k_e 는 와전류 손실 계수, k_a 는 이상와전류 손실 계수, n 은 steinmetz 상수이다[5]. 본 논문에서 사용된 모델의 운전 주파수는 200[Hz]이며 치와 요크에서의 자속 밀도는 유한요소법을 이용하였다. 각각의 계수는 철심 재질인 50PN1300의 단위 철손 정보와 Curve Fitting Method (CFM)을 사용하여 구하였다. 고정자 치와 요크에서의 철손을 산정한 후 열원으로 입력하였다.

2.6 열전달 방정식

비정상상태 조건의 절점에서 열평형에 대한 열 저항-열용량의 일반적인 수식은 다음과 같다[6].

$$T^{p+1} = \frac{\Delta t}{C_i} \left(\sum_j \frac{1}{R_{ij}} (T_j^p - T_i^p) + u_i \right) + T^p \quad (11)$$

위 수식에서 C_i 는 절점에서의 열용량, R_{ij} 는 절점 i, j 사이의 열 저항이며, u_i 는 i 절점에서 발생하는 열 발생량을 의미한다. T^p 는 현재 시간 증분에서의 온도이고 T^{p+1} 은 다음 시간 증분에서의 온도를 의미하며, Δt 는 시간 증분량을 나타낸다. 즉, 수식 (11)을 각각의 절점에 대하여 열평형 방정식을 세운 후, 이를 반복 계산하여 수렴할 때까지 계산을 수행한다.

2.7 영구자석의 감자특성

영구자석의 잔류자속밀도 및 보자력은 외부온도에 따라 변하게 되며 식 (13), (14)에 나타내었다.

$$B_r(t) = B_r [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (13)$$

$$H_r(t) = H_r [1 + \beta(t - t_0)] \quad (14)$$

희토류 계열 영구자석은 온도가 상승할수록 보자력과 잔류자속밀도가 감소하는 특성을 갖고 있기 때문에 고온 불가역감자에 주의하여야 한다. 본 논문에서 사용된 영구자석의 재질은 N42SH 이고 그림 5에 감자특성곡선을 나타내었다. N42SH재질의 잔류자속밀도 온도 계수는 $-0.12[\%/^{\circ}\text{C}]$ 이고 보자력 온도 계수는 $-0.55[\%/^{\circ}\text{C}]$ 이다. 열 등가회로망에서는 자기포화현상이나 누설자속을 고려하기 어렵기 때문에 잔류자속밀도 온도 계수를 $-0.25[\%/^{\circ}\text{C}]$ 인 경우에 유한요소해석에서 $0.12[\%/^{\circ}\text{C}]$ 인 경우와 전류 상승이 잘 일치하였다.

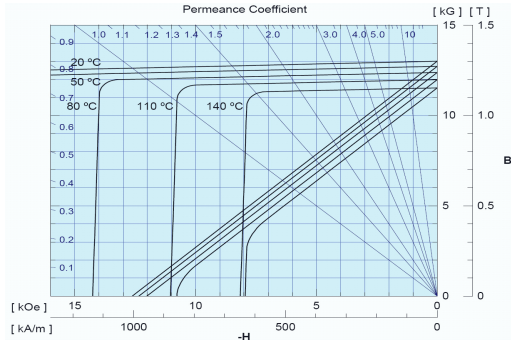


그림 5 영구자석의 감자 특성
Fig. 5 The demagnetization characteristics

2.8 냉각팬 선정



그림 6 냉각팬
Fig. 6 Cooling fan of rotor

전동기의 온도 상승 저감을 억제하기 위하여 전동기 샤프트에 냉각팬을 설치하였다. 본 논문에서 사용된 냉각팬은 컴퓨터용 냉각장치로서, 시중에서 쉽게 구할 수 있는 것으로 선정하였다. 구입한 냉각팬을 샤프트에 설치할 수 있도록 가공하였다. 냉각팬의 크기는 $80[\text{mm}] \times 80[\text{mm}] \times 25[\text{mm}]$ 이고 회전속도가 $3000[\text{rpm}]$ 일 때의 풍량은 $36.5[\text{CFM}]$ 이다. 풍량은 단면적과 유속의 곱으로 계산되므로 풍량과 단면적으로 공기의 유속을 계산할 수 있다. 공기의 유속은 $3.43[\text{m/s}]$ 로 계산되었고 냉각 팬의 형상은 그림 6과 같다.

3. 해석 및 실험 결과

그림 7은 기본 모델과 전동기 내부에 팬을 설치한 모델의 시간에 따른 온도 상승을 나타내고 있다. 초기에는 유사한 온도 상승 특성을 나타내지만, 전동기의 구동 시간이 오래 구동할수록 냉각 팬의 효과가 증가함을 알 수 있다.

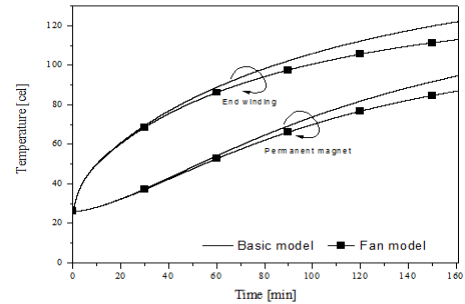


그림 7 온도 상승 해석 결과
Fig. 7 Temperature rising analysis result

600[W]급 전동기의 온도 분포를 확인하기 위하여 실험 장비를 구성하였다. 온도 측정을 위한 K 타입의 열전대 및 계측기를 사용하였다. 회전자의 경우 열전대 설치가 힘들기 때문에 고정자에서 온도가 가장 높을 것으로 예상되는 엔드권선에 열전대를 설치하였다. 또한 부하 인가를 위한 다이아모 미터와 오실로스코프 등 계측기, 그리고 전동기 구동을 위한 드라이버 등으로 실험 장비를 구성하였으며 전체 실험 장비는 그림 8과 같다. 주위 온도는 $30[^{\circ}\text{C}]$ 이며 1분 단위로 온도를 측정하였으며 전동기의 내구성과 안전을 고려하여 End winding부의 온도가 $100[^{\circ}\text{C}]$ 까지만 실험하였으며, 냉각 팬이 설치되지 않은 기본모델은 74분의 시간이 소요되었다.

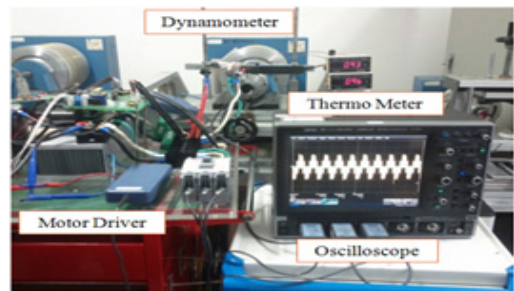


그림 8 온도 상승 실험 장비
Fig. 8 Temperature rising experiment set

그림 9는 시간에 따른 입력전류 상승을 비교하여 나타내었다. 희토류 영구자석의 성능은 온도 상승에 따라 저하 되므로 동일 출력을 발생시키기 위해서는 전류는 증가된다. 이러한 전류의 상승으로 인하여 열원인 동손이 더 크게 발생하며 전동기의 온도를

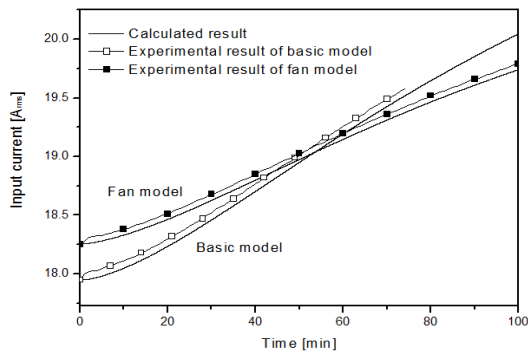


그림 9 입력 전류 특성
Fig. 9 Input current characteristics

상승시키게 된다. 초기 운전시 냉각 팬 모델의 전류는 18.25[A]로 기본 모델보다 0.3[A] 증가하였다. 이 증가분이 냉각 팬에 의한 기계손이다. 전동기 구동 후 전류 차가 점점 감소하며 구동 시간이 51분에서 냉각 팬 설치모델과 기본 모델의 전류 차가 역전되어 냉각 팬 모델의 전류가 기본 모델보다 전류가 낮아진다. 74분에서 기본 모델의 End winding부 온도가 허용온도에 근접하게 되어 실험을 중단하였다. 이때 냉각 팬 설치 모델의 전류는 19.42[A]로 기본 모델보다 0.16[A] 낮으며 냉각 팬 설치 모델의 영구자석의 온도는 30[°C]에서 55[°C]로 25[°C] 상승하였으며, 기본 모델의 영구자석 온도는 30[°C]에서 66[°C]로 36[°C] 상승하였다. 즉 냉각 팬 설치로 인한 공기의 대류에 의하여 영구자석의 온도 상승이 줄어들었다. 이론치와 실험치에 다소 차이가 발생하였는데 이는 온도측정을 위해 설치한열전대에 의한 오차, 전동기 모델링 시 영구자석의 형상 근사화에 따른 오차 등에 기인한 것으로 사료된다.

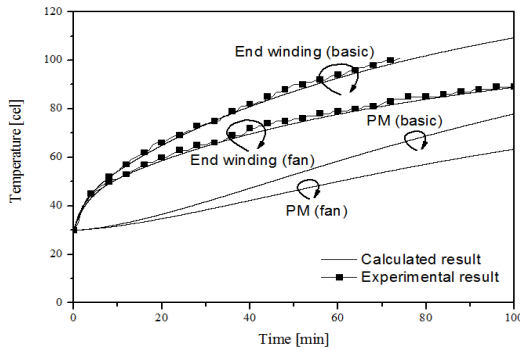


그림 10 온도 상승 결과 비교
Fig. 10 Compared with temperature rising

그림 10은 시간에 따른 End winding부에서의 온도 상승 해석 결과 및 실험결과를 비교하여 나타내고 있다. 냉각 팬 설치로 인하여 프레임 길이가 90[mm]에서 145[mm]로 커져야 한다. 74분 구동후의 기본 모델과 냉각 팬 모델의 End winding부의 온도차는 16[°C], 영구자석의 온도차는 11[°C]이다. 냉각 팬에 의한 온

도 상승 억제 효과로 냉각 팬 모델의 온도 상승이 억제됨을 알 수 있다. 냉각 팬 모델의 경우 100분 부근에서 온도의 변화율이 낮아, 실험을 중단하였다. 이때의 End winding부의 온도는 89[°C]이고 영구자석의 온도는 63[°C]이다.

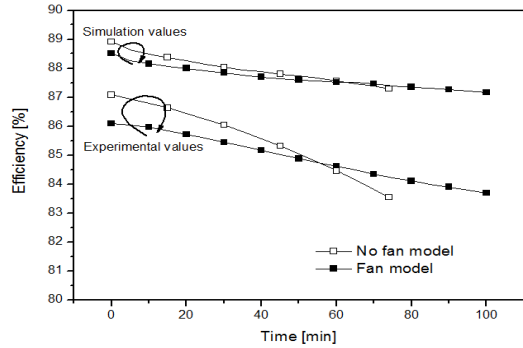


그림 11 효율 특성
Fig. 11 Efficiency characteristics

그림 11은 시간에 따른 기본 모델과 냉각 팬 모델의 실험으로 측정된 효율을 비교하여 나타내고 있다. 냉각 팬에 의한 손실, 다이ना모 미터에 의한 손실 및 권선과 영구자석 온도 상승에 의한 전류 증가로 인하여 효율이 감소하게 된다. 초기 운전시 냉각 팬에 의한 손실에 의하여 냉각 팬 모델의 효율이 86.1[%]로 기본 모델보다 1[%]더 낮다. 냉각 팬 효과에 의하여 전동기 구동 시간이 56분 이후에서 기본 모델과 냉각 팬 모델의 효율이 역전 된다.

표 2 효율
Table 2 Efficiency

	Fan model	
Operating time [min]	0	100
Winding temperature[°C]	30	90
PM temperature [°C]	30	63
Input current [Arms]	17.95	19.56
Winding resistance [Ω]	0.0327	0.0403
Copper loss [W]	31.61	46.59
Core loss [W]	25.7	22.5
Mechanical loss [W]	20.51	
Total loss [W]	77.8	89.6
Output [W]	600	
Efficiency [%]	88.5	87.0

표 2에 냉각 팬 모델의 효율 계산치를 나타내었다. 효율 계산 값과 실험값은 다소 차이가 발생하였다. 이는 전동기 구동 시간에 따라서 다이나모 미터가 가열되어 발생된 기계손에 의한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 전동기에서의 복잡한 열전달을 간단한 열저항과 열원으로 증가화하여 집중변수법을 활용한 열등가회로방법을 사용하여 열 해석을 수행하였다. 전동기의 온도 상승을 억제하기 위하여 회전자 샤프트에 냉각 팬을 설치하였다. 기본 모델과 냉각 팬 모델의 전류를 비교해보면, 냉각 팬 모델의 초기 전류값이 0.3[A] 더 크다. 이 증가분은 냉각 팬에 의한 기계손이다. 냉각 팬 효과에 의하여 권선의 온도와 영구자석의 온도 상승이 억제되어 시간에 따라서 두 모델의 전류 차가 점점 감소하며 구동 시간 51분 이후에는 전류차가 역전된다. 냉각 팬 효과에 의하여 기본 모델의 End winding부의 온도가 100[°C]인 시간에서 냉각 팬 모델의 End winding부의 온도는 84[°C]로 저감되었다. 냉각 팬의 손실에 의하여 초기에는 효율 측면에서는 효과가 좋지 못하였다. 그러나 냉각 팬에 의한 냉각 효과로 효율이 구동 시간 56분 이후에는 역전되어 냉각 팬 모델의 효율이 더 높아지게 되었다.

본 논문에서 사용된 냉각 팬은 컴퓨터에 사용되는 것이다. 따라서, IPMSM의 용도에 맞는 냉각팬을 선정하거나, 설계 제작하여 설치하면 더 좋은 효과를 얻을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업(2015H1C1A1035824) 및 산학협력 선도대학육성사업의 지원을 받아 수행된 연구임

References

[1] Gyu-Hong Kang, Young-Dae Song, Gyu-Tak Kim and Jin-Hur, "The Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior Type Permanent Magnet Motor", IEEE Trans. on AE, Vol. 45, No. 1, pp 161-167, 2009.

[2] Jae-Won Lim, Jang-Ho Seo, Sang-Yub Lee, Hyun-Kyo Jung, "Thermal network analysis of interior permanent magnet machine" 2009 Spring Conference of The Korean Society for Railway, pp. 527-532, 2009.

[3] 이양수, 한송엽, "전동기의 열해석 기술", Proceedings of KIEE, Vol. 48, No. 9, pp. 12-17, 1999.

[4] S.K. Chowdhury, P.K Baski, "A simple lumped parameter thermal model for electrical machine of TEFC design", Power Electronics, Drives and Energy Systems(PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on, pp 1-7, 2010.

[5] Y. Chen, P. Pillay, "An Improved formula for lamination

core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation", Industry Application conference. Vol. 2, pp. 13-18, 2002.

[6] J.P. Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill, 10th Edition, 2010.

[7] Ayman M. EL-Rafaie, Nathan C. Harris, Thomas M. Jahns, Khwaja M. Rahman, "Thermal Analysis of Multibarrier Interior PM Synchronous Machine Using Lumped Parameter Model", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 2, 2004.

저 자 소 개



조 을 규 (Eul-Gyu Jo)

1991년 4월 22일생. 2014년 창원대학교 전기공학과 졸업. 현재 동대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : joeulgyu@cwnu.ac.kr



조 광 진 (Kwang-Jin Cho)

1987년 6월 13일생. 2015년 창원대학교 전기공학과 졸업. 현재 동대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : chokwangjin@cwnu.ac.kr



김 규 탁 (Gyu-Tak Kim)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~2000년 일본 早稻田大 客員研究員. 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 055-213-3635

Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr