

600W급 IPMSM의 고정자 설계 변수 변화에 따른 온도 특성 분석 및 고찰

Analysis of IPMSM Temperature Characteristics based on Stator Design Parameters

고 덕 화* · 김 용 태** · 김 규 탁*
(Duk-Hwa Go · Yong-Tae Kim · Gyu-Tak Kim)

Abstract - In this paper, the temperature characteristics by change the width of teeth and yoke in the stat or parameters were analyzed. An initial model of fill factor 45 [%] was produced. Through the experiment, the validity of the temperature analysis using the thermal equivalent circuit method was verified. So, initial model was selected as basic model. Also, temperature characteristic analysis was performed for each width change of the stator teeth and yoke, and the effects of the width of stator teeth and yoke on the temperature characteristics were analyzed.

Key Words : Temperature, Thermal analysis, Motor, Electronics

1. 서 론

최근 국·내외의 대기업들을 필두로 하여 전기자동차의 높은 관심과 투자가 이루어지고 있다. 전기자동차의 안정적인 상용화를 위해 전동기의 소형화, 경량화 및 고효율화에 대한 연구가 이루어져야 한다.

영구자석 매입형 동기전동기의 경우 킬러턴스 토크와 인덕턴스 토크를 모두 사용하여 높은 출력을 낼 수 있을 뿐만 아니라, 약 계자 제어와 같은 제어 방법을 통한 넓은 속도 범위를 가질 수 있다[1]. 그러나 매입형 영구자석 전동기의 운전 특성 상 고속 회전과 고 출력 밀도를 가지므로 많은 철손이 발생한다. 철손과 같은 손실은 전동기의 주 열원으로 전동기의 온도 상승시키는 원인이 된다. 전동기의 온도 상승은 회로류 영구자석의 감자와, 권선 저항 상승으로 인한 동손 증가로 인한 출력 감소, 전동기의 효율 감소, 내구성 저하가 발생할 수 있어, 운전조건 중 발생하는 열 발산량을 기준으로 정확한 열 해석이 실시되어야 한다[2].

전동기의 열 해석 방법에는 집중정수법을 이용한 열 등가회로 방법과 분포정수법을 이용한 유한요소법이 있다. 유한요소법은 정확한 해석결과를 볼 수 있으나 해석 시간이 긴 단점이 존재한다. 이에 모터 전체적인 온도 해석이 아닌 중요부분에 대한 온도 해석에 주로 이용된다[3]. 열 등가회로방법은 해석 시간이 긴 시간을 요구하지 않고 계산이 쉬워 전체적인 온도 해석을 하는데

용이하다.

본 논문에서는 전동기를 13개의 체적으로 나누어 열 등가회로 방법을 이용하여 각 체적의 열 저항 및 열용량 계산을 통한 온도 해석을 수행하였다[4]. 그 중 고정자 체적 중 온도 특성에 영향을 크게 미치는 고정자 치 와 요크에 대한 심화분석을 수행하였다.

2. 열 등가회로망

2.1 열 등가회로 구성

전동기를 열 등가회로로 구성하기 위해서는 먼저 계산의 편의성을 위하여 원통형으로 등가화 한 후, 전동기의 각 부분을 적당한 체적으로 분할하여 계산을 수행하였다[5]. 본 논문에서는 프레임, 요크, 치, 슈, 치 끝단, 권선, 앤드 권선, 공극, 회전자 외측, 영구자석, 회전자 내측, 샤프트, 앤드캡 내부 공기에 절점을 할당

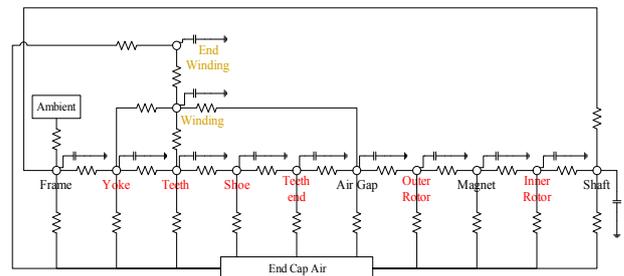


그림 1 열 등가회로망

Fig. 1 Thermal Equivalent Circuit

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea.

E-mail: gtkim@cwnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea .

** Motor R&D Center, S&T Motiv, Korea.

Received : January 24, 2017; Accepted : July 24, 2017

하였다[3]. 완성된 열 등가회로망은 총 13개의 절점으로 이루어져 있다. 고정자 권선 및 철심에서 동손 및 철손의 열원이 발생하여 프레임과 회전자 및 샤프트로의 열전달이 발생하며 프레임 표면에서 대류를 통하여 외부로 방출되도록 하였다.

그림 1은 전동기를 13개의 절점으로 나누어 체적별 등가회로를 합하여 하나의 열 등가회로망으로 구성한 그림이다[6]. 구성된 열 등가회로망을 이용하여 열 방정식을 정리 하였고, 계산을 진행 하였다. 계산 수식 및 개념은 아래에 설명하였다. 각각의 체적 요소를 인접한 요소와 열 저항에 의해서 연결된 절점으로 볼 수 있다. 정상상태 조건에서 i 절점으로 들어가는 열전달량의 합은 0이므로 총 에너지량은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q_i + \sum_j \frac{T_j - T_i}{R_{ij}} = 0 \quad (1)$$

하지만 비정상상태 조건의 경우에는 절점으로 들어가는 열전달량은 체적 요소 안에서 증가하는 내부 에너지의 양과 같아야 한다. 절점 i 에서의 내부 에너지를 비열과 온도의 항으로 나타낼 수 있다면 내부 에너지의 시간 변화율은 수식 (2) 와 같이 표현된다[7].

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \rho c \Delta V \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta t} \quad (2)$$

위 수식에서 $\rho c \Delta V$ 는 열용량을 의미한다. 그러므로 비정상상태 조건의 i 절점에서 열평형에 대한 열 저항-열용량의 일반적인 수식은 다음과 같다.

$$C_i \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta t} = \sum_j \frac{1}{R_{ij}} (T_j^p - T_i^p) + u_i, \quad i, j = 1, 2, \dots, 13 \quad (3)$$

$$T_i^{p+1} = \frac{\Delta t}{C_i} \left(\sum_j \frac{1}{R_{ij}} (T_j^p - T_i^p) + u_i \right) + T_i^p \quad (4)$$

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 (4)를 각각의 절점에 대하여 열평형 방정식을 세운 후 이를 반복하여 계산을 수행한다.

2.2 열원 계산

2.2.1 동손 계산

전동기의 3상 전류가 흐르는 경우 발생하는 동손은 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$P_{cu} = 3I^2 R \quad (5)$$

식 (5)에서 R 은 권선의 상 저항이며, 온도에 증가에 따라 선형적으로 증가하므로 다음과 같은 수식 계산할 수 있다.

$$R = R_0 (1 + \alpha(T - T_0)) \quad (6)$$

식 (6)에서 α 는 저항 온도 계수이며, 금속 재료의 고유한 특성 값이다. 전동기의 권선은 구리를 사용하므로 본 논문에서는 구리의 저항 온도 계수인 0.004[%/°C]를 사용하였으며, 초기 온도의 저항은 25 [°C], 점적율 45 [%]에서 계산된 저항 값을 사용하여 온도 상승에 따른 저항 변화를 고려하였다.

2.2.2 철손 계산

$$W_T = k_h f B_m^2 + k_e f^2 B_m^2 + k_a f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (7)$$

수식 (7)의 k_h 는 히스테리시스 손실 계수, k_e 는 와전류 손실 계수, k_a 는 이상와전류 손실 계수, f 는 전동기 구동 주파수, B_m 은 자속밀도를 의미한다.

철손의 계산을 위해 FEM을 통하여 그림 2와 같이 하나의 고정자 치를 55개의 영역으로 나누어 자속밀도 및 손실 계수를 계산하였다. 본 논문에서 구동 주파수는 200[Hz]이다. 요크와 치의 자속밀도는 POSCO에서 제공하는 주파수 변화에 따른 철손 정보를 이용하여 계산하였다[8].

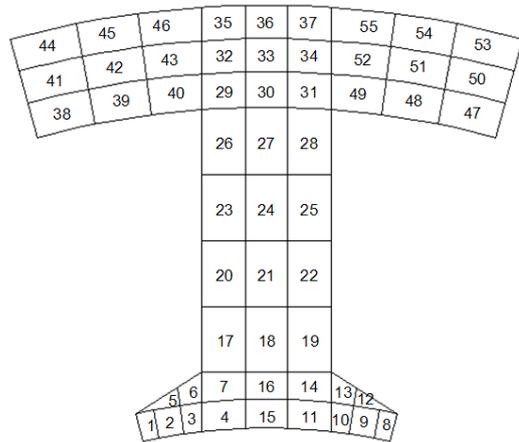


그림 2 분할된 고정자 형상

Fig. 2 Divided stator core shape

2.3 기본 모델 온도 실험

그림 3은 기본 모델 실험 장치 및 구성을 나타내었다. K타입 열전대를 이용하여 권선 끝 부분의 온도를 측정하였다. 전동기 절점 중 온도에 영향을 받는 권선 및 영구자석의 온도를 측정하

여야 하나, 영구자석은 회전자에 위치하기 때문에 온도를 측정할 수 없다. 전동기에 사용되는 권선의 사양은 B종 권선 절연이며, 전동기의 내구성과 안정성을 고려하여 100[°C]까지 정격부하를 인가하여 연속구동실험을 수행하였다[9].

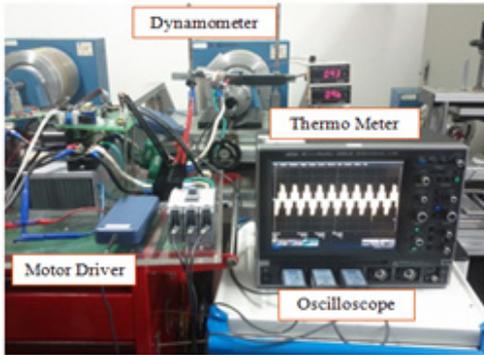


그림 3 기본모델 실험 장치 및 구성
Fig. 3 Experiment equipment and composition

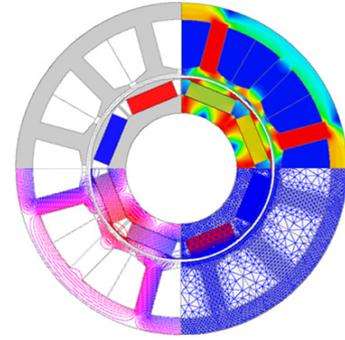


그림 5 기본 모델 형상, 유한요소 분할 및 자속 밀도
Fig. 5 Basic model core shape, finite element partition and flux density

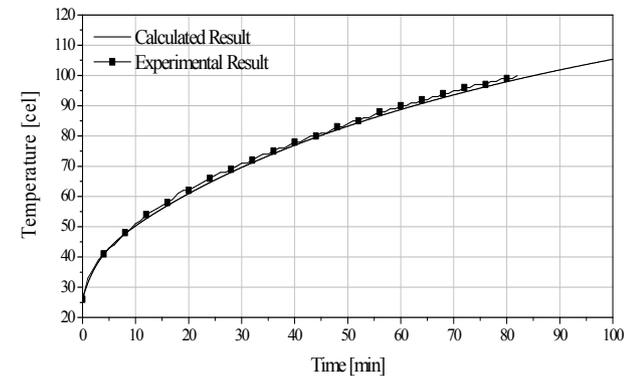


그림 4 기본모델 해석결과 및 실험결과
Fig. 4 Basic model calculated result and experimental result

그림 4는 기본 모델의 해석 결과와 실험 결과에 대한 그래프이다. 외부온도 25 [°C], 정격속도 3,000 [rpm]의 조건에서 실험을 수행하였다. 전동기의 수명과 안전을 고려하여 100[°C]까지 실험하였으며, 약 74분의 시간이 소요되었다. 또한, 해석치와 시험치의 오차가 적은 것을 확인하였으며, 이에 본 모델에서의 열 등가회로망 해석의 타당성을 입증하였다.

3. 해석 모델 선정

3.1 기본 모델 형상 및 제원

본 논문에 사용된 전동기는 600 [W]급 IPMSM이다. 기본 모델의 사양은 표 1과 같고 고정자 및 회전자 코어 형상은 그림 5

표 1 기본모델 제원

Table 1 Specification of basic model

Item	Value	Unit
Pole/slot	8/12	-
Rated Torque	1.91	[N·m]
Rated Speed	3,000	[rpm]
Rated Current	23.7	[Arms]
Output Power	600	[W]
Air-gap	1.0	[mm]
Br	1.3	[T]
Ambient temperature	25	[°C]

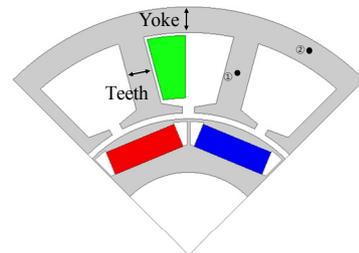


그림 6 고정자 설계 변수 및 자속 밀도 해석 위치
Fig. 6 Design parameter of stator and Analysis position of magnet flux density

에 나타내었다. 정격속도 3,000 [rpm], 정격 전류 23.7 [Arms]에서 1.91 [N·m]의 정격토크를 낸다. 고정자 및 회전자의 철심 재질은 50PN1300을 사용하였으며, 1.3[T]의 NdFeB의 재질의 영구자석을 사용하였다.

3.2 해석 모델 선정

그림 6은 고정자 설계 변수 및 자속 밀도 해석 위치, 그림 7은 치 폭 및 요크 폭 변화에 따른 점적율을 나타내었다. 고정자의 설계변수 중 치 폭과 요크 폭은 전동기의 출력 및 효율에 가장 큰

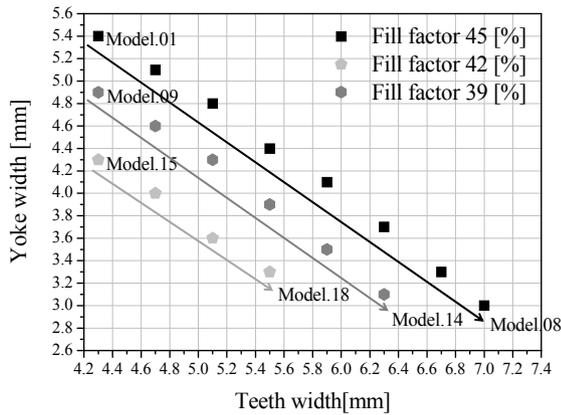


그림 7 치 폭과 요크 폭 변화에 따른 점적율
Fig. 7 Fill factor change of which follows in teeth and yoke thickness

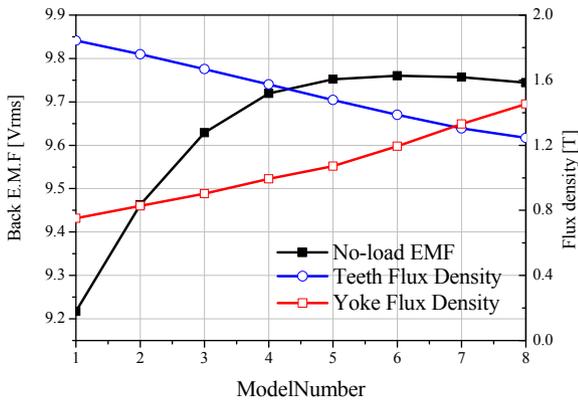


그림 8 점적율 45 [%] 모델 특성
Fig. 8 Characteristics of Fill factor 45 [%] Model

영향을 미친다[3]. 점적율 45 [%] 모델은 기본 모델 치 폭 4.3[mm] 대비 0.4 [mm]씩 증가시키며 Model.01~Model.08로 선정하였으며, 점적율 42 [%] 모델은 Model 09~Model.14, 점적율 39 [%] 모델은 Model.15 ~ Model.18로 선정하였으며, 선정 모델에 대한 역기전력 및 치와 요크의 자속 밀도 값을 비교하였다.

3.3 모델 해석

3.3.1 점적율 45 [%] 모델

그림 8의 (a)와 (b)는 점적율 45 [%] 모델의 25 [°C], 3,000 [rpm]에서의 역기전력 그래프와 고정자 치와 요크 부분의 자속 밀도를 나타내었다. 역기전력은 입력 전류 산정에 영향을 미치며, 자속 밀도는 전동기 철손에 영향을 미친다. 철손은 치의 자속 밀도와 요크의 자속 밀도가 비슷할수록 적어지며, 동손은 역기전력이 높을수록 적어진다. 이에 7번 모델의 전체 손실이 가장 적다.

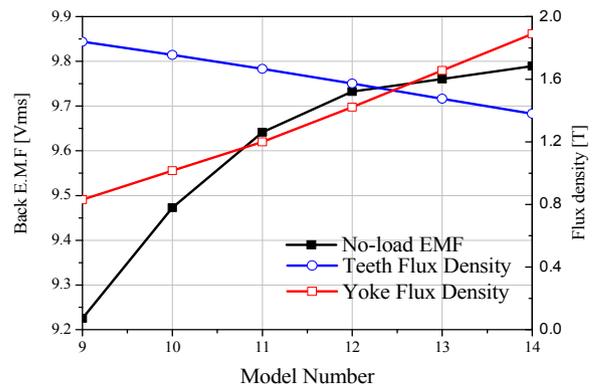


그림 9 점적율 42 [%] 모델 특성
Fig. 9 Characteristics of Fill factor 42 [%] Model

3.3.2 점적율 42 [%] 모델

그림 9의 (a)와 (b)는 점적율 42 [%] 모델의 25 [°C], 3,000 [rpm]에서의 역기전력 그래프와 고정자 치와 요크 부분의 자속 밀도를 나타내었다. 12번 모델은 치와 요크의 자속 밀도가 비슷하여 철손이 가장 적으며, 입력 전류가 낮아 동손이 적다. 이에 12번 모델의 총 손실이 가장 적다.

3.3.3 점적율 39 [%] 모델

그림 10의 (a)와 (b)는 점적율 39 [%] 모델의 25 [°C], 3,000 [rpm]에서의 역기전력 그래프와 고정자 치와 요크 부분의 자속 밀도를 나타내었다. 18번 모델은 치와 요크의 자속 밀도가 비슷하여 철손이 가장 적으며, 입력 전류가 낮아 동손이 적다. 이에 18번 모델의 총 손실이 가장 적다.

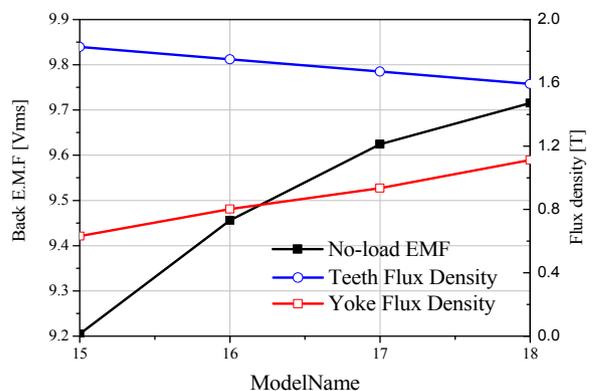


그림 10 점적율 39 [%] 모델 특성
Fig. 10 Characteristics of Fill factor 39 [%] Model

치와 요크의 자속 밀도가 비슷한 모델일수록 철손이 저감되며, 역기전력이 낮은 모델일수록 입력전류가 줄어 동손이 저감된다.

4. 전동기 온도 해석 방법 및 계산 결과

4.1 모델 온도 해석

그림 11은 점적율 변화에 따른 손실 및 온도 특성을 나타낸 그래프를 나타내었다. 온도 특성 그래프에서 Operating Time은 고정자 권선 온도가 100 [°C]에 도달할 때 까지 소요되는 시간을 의미한다. 온도 특성 해석 결과, 7번 모델이 동일 출력에서 전체 손실이 가장 적고 가장 큰 온도 내력을 가지며, 구동 가능 시간이 기본모델 대비 18분 27초 증가함을 확인하였다.

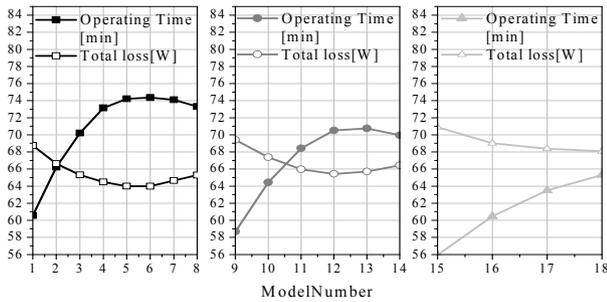


그림 11 점적율 변화에 따른 손실 및 온도특성 그래프
 Fig. 11 Thermal characteristic and total loss of which follows in fill factor

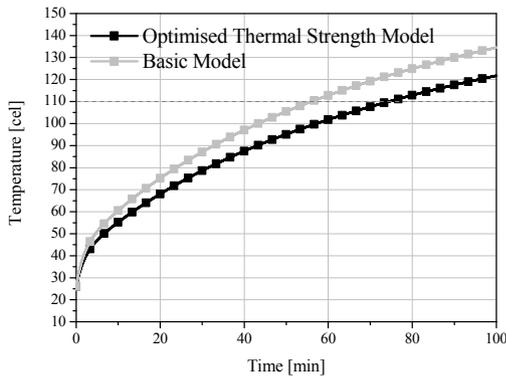


그림 12 점적율 변화에 따른 손실 및 온도특성 그래프
 Fig. 12 Thermal characteristic and total loss of which follows in fill factor

그림 12는 온도 최적화 모델과 기본모델의 온도 특성을 나타내었고, 표 2에서는 두 모델의 손실 및 온도 특성 비교하였다.

그림 13은 요크 폭 변화에 따른 온도 특성 그래프를 나타내었다. 그림에 점적율 45 [%], 점적율 42 [%]에서 동일 치 폭 4.7 [mm]의 두 모델을 원으로 표시하였다. 두 모델의 요크 폭은 4.6 [mm], 5.1 [mm]이며, 10.87 [%]의 증가폭을 가지며, 두 모델간의 구동가능 시간 차이는 1분 47초 이다. 이에 요크 폭 1 [%] 증가에 따라 9.84초의 구동 시간 증가 효과를 가지는 것을 확인하였다.

표 2 손실 및 온도 특성 비교

Table 2 Comparison of the Thermal characteristic and total loss

Item	Basic	Optimized
Iron loss	29.64	31.17
Copeer loss	39.1	32.8
Mechanical loss	17.51	17.51
total loss	86.25	81.48
operating time	60.55	74.1

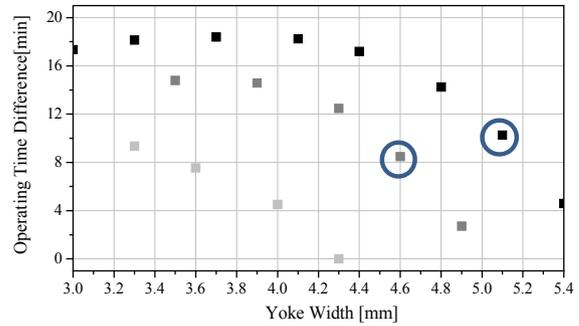


그림 13 요크 폭 변화에 대한 온도 특성 그래프
 Fig. 13 Thermal characteristic of which follow in yoke width

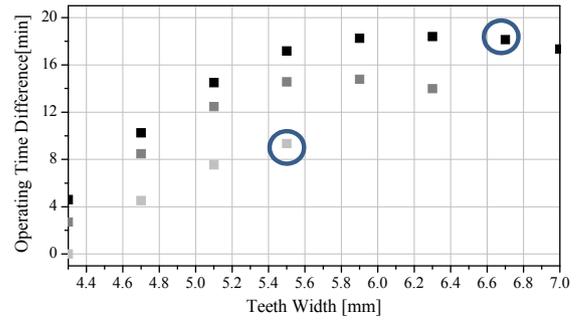


그림 14 치 폭 변화에 대한 온도 특성 그래프
 Fig. 14 Thermal characteristic of which follow in teeth width

그림 14는 치 폭 변화에 따른 온도 특성 그래프를 나타내었다. 그림에 점적율 45 [%], 점적율 42 [%]에서 동일 치 폭 3.3 [mm]의 두 모델을 원으로 표시하였다. 두 모델의 요크 5.5 [mm], 6.7 [mm]이며, 21.8 [%]의 증가폭을 가지며, 두 모델간의 구동가능 시간 차이는 8분 48초이다. 이에 치 폭 1 [%] 증가에 따라 24.22초의 구동 시간 증가 효과를 가지는 것을 확인하였다.

치 폭 1 [%] 증가에 의하여 구동 시간이 24.22초 증가하며, 요크 폭 1 [%] 증가에 의하여 구동 시간이 9.84초 증가한다. 따라서 동일 비율로 증가할 경우 치 폭이 요크 폭 대비 2.46배 큰 구동 시간 증가효과를 가진다.

5. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 고정자 치 폭, 고정자 요크 폭의 변경에 따른 온도 특성 변화에 대하여 분석하였다. 치 폭과 요크 폭을 설계 변수로 하여 점적율 45%, 42%, 39%를 만족하는 치 폭과 요크 폭을 갖는 18가지 모델을 선정, 전동기 특성 및 온도 내력 비교를 수행하였다.

선정된 모델의 온도 특성 해석을 위하여 집중정수회로법인 열 등가회로망법을 이용하였다. 열 등가회로망법은 유한요소법에 비하여 해석시간이 길지 않아 전체적인 온도 특성 분석을 하는데 용이하다. 열 해석을 위하여 전동기 전체 체적을 13개의 절점으로 나누어 각각의 열 저항 및 열 용량을 산정하여 열 등가회로망을 구성하였다. FEM을 이용하여 모델의 역기전력 및 자속 밀도에 대하여 분석을 수행하였으며, 이에 전동기의 열원인 철손 및 동손을 계산하였다. 열 등가회로망법 및 계산된 열원을 통한 온도 특성해석과 실험 결과 비교를 통한 본 논문 온도해석방법의 타당성을 입증하였다. 각 점적율에 대한 손실 및 온도 특성을 분석하였으며, 동일 치 폭에서의 요크의 온도 변화량과 동일 요크 폭에서의 치 폭의 온도변화량에 대한 분석을 수행하였다.

감사의 글

이 논문(저서)는 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2015 H1C1A1035824).

References

- [1] C. Feng, P. Yulong, L. Xinmei, G. Bin, and C. Shukang, "The Performance Research of Starter-Generator Based on Reluctance Torque Used in HEV," IEEE Trans. on Magn., volume 45, no. 1, pp. 635-38, 2009.
- [2] Won-Sik Lee, Deak-Hwa Go, Yong-Tae Kim, Gyu-Won Cho, Gyu-Tak Kim "The Increase of heat capacity for improved the output characteristics of the rare earth permanent magnet motor," KIEE summer conference, BP 1, July. 2016
- [3] Lim jae-won, Seo jang-Ho, Lee Sang-Yub, Jung Hyunkyo, "Thermal Network Analysis of Interior Permanent Magnet Machine," The Korean society for railway, 2009 spring conference, pp. 527-532, May. 2009
- [4] Kye Seung-Hyun, "A Study on Thermal Characteristics Analysis of IPMSM by Using Thermal Equivalent Circuit Network", Master's Thesis, Chagwon national university, 2012
- [5] 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.

- [6] Chaofan Shen, "Thermal Analysis of Permanent Magnet Brushless DC Motor For Electric Vehicle", Master's Thesis, Yeungnam University, 2012
- [7] T.J Roberts., "Determination of the Thermal Constants of the Heat Flow Equations of Electrical Machines", Proc IME, Vol. 184, Pt 3E, pp. 84-92, 1969
- [8] Kye, Seung-Hyun; Jeong, Tae-Seok; Cho, Gyu-Won; Jang, Ki-Bong; Kim, Gyu-Tak; "Thermal Analysis of IPMSM According to Current Vector Control Method" The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol 61, pp.1420-1425, 2012
- [9] Seok-Hyeon Woo, Gyu-Won Cho, Ki Bong Jang, Gyu Tak Kim, "Coreloss Calculation of IPMSM Using the Modified Steinmetz Equation", KIEE fall conference, EMP 14, october. 2011

저 자 소 개



고 덕 화 (Duk-Hwa Go)

1992년 6월 1일생. 2016년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-213-3640, Fax : 055-213-9956

E-Mail : gdh3456@gmail.com



김 용 태 (Yong-Tae Kim)

1987년 1월 24일생. 2012년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 S&T모티브(주) 근무.

Tel : 055-213-3640, Fax : 055-263-9956

E-mail : yongtae.kim@sntmotiv.com



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(공박). 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 055-213-3635, Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr