

IPM type BLDC 전동기의 통전비에 따른 온도 특성 해석

Thermal Analysis According to Duty Ratio of IPM Type BLDC Motor

김 용 태* · 조 규 원* · 김 규 탁†
(Yong-Tae Kim · Gyu-Won Cho · Gyu-Tak Kim)

Abstract - The use of BLDC motor in Vehicle and industrial field, it is operated by continuous and intermittent driving. When the intermittent driving is occurred by the rise and fall of temperature repeatedly, it was represented by different characteristics in case of continuous driving. So, it is very important that heat source estimation according to the duty ratio. In this paper, temperature characteristics according to the operating method of BLDCM was calculated by using the thermal equivalent circuit, and the validity of the study was demonstrated as compared to the calculated and experimental results.

Key Words : Thermal analysis, Thermal equivalent circuit, IPM, Duty ratio, BLDC

1. 서 론

매입형 영구자석 BLDC 전동기는 영구자석에 의한 마그네틱 토크 성분과 d-q축 인덕턴스 차이에 의한 릴럭턴스 토크 성분을 함께 이용할 수 있으므로 단위 체적 당 높은 토크를 얻을 수 있다[1]. 하지만 매입형 영구자석 BLDC 전동기의 운전 특성 상 고속 동작에 의한 철손의 발생, 고 출력 밀도에 의한 많은 동손 발생이 불가피하다[2]. 이러한 열 발생은 전동기의 온도를 상승시키게 된다. 이는 전동기의 수명뿐만 아니라 고온에서 불가역 감자 특성을 가지는 희토류 계열 영구자석의 감자에도 큰 영향을 미치게 된다. 특히 차량 및 산업현장에서 사용되는 BLDC 전동기는 정격 상태로 장시간 구동하는 연속구동 및 빈번한 구동·정지에 따른 단속 정격으로 동작한다. 따라서 전동기의 설계 시 전동기의 온도 특성에 대하여 반드시 고려하여야 한다.

지금까지의 전동기 열해석에 관한 연구는 전동기 내구성 및 안정성을 고려하기 위하여 연속상태에서의 열 해석을 주로 수행하여, 이론치와 실험치를 비교하는 경우가 대부분이었다.[3]. 그러나, 단속 정격 시의 온도 특성은 온도의 상승·하강이 반복적으로 발생하여 연속 정격 시와는 다른 특성을 나타내므로, Duty 비에 따른 열원 산정이 매우 중요하다.

따라서, 본 논문에서는 전동기의 복잡한 열전달을 간단한 열 저항과 열원으로 등가화하여 집중변수로 취급하는 열 등가회로방법을 사용하여 열 해석을 수행하였다. 이를 위하여 대상 전동기의 형상에 따라 열 등가회로망을 작성하여 전도

와 대류 열 저항을 산정한 후 시간에 따라 온도 특성을 계산하였으며, 주기적 단속 구동 시 duty ratio에 따른 온도 특성을 해석하였다. 즉, 전동기를 구동시킬 때에는 산정된 동손과 철손을 입력하여 온도상승을 계산하고, 전동기 정지 시에는 동손과 철손을 0으로 입력하고 온도하강을 계산하여 실험치와 이론치를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

본 연구에 사용된 전동기는 180W급 BLDC 전동기이며, 모델 형상은 그림 1과 같고 제원은 표 1에 나타내었다.

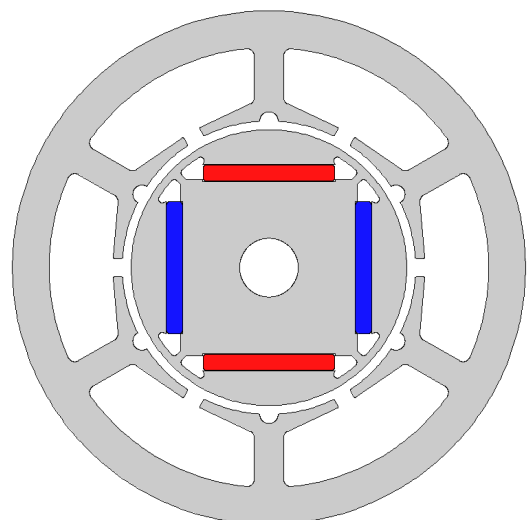


그림 1 해석 모델의 코어 형상
Fig. 1 Core shape of analyzed model

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

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

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr

Received : August 13, 2013; Accepted : December 11, 2013

표 1 해석 모델의 제원

Table 1 Specification of analyzed model

Item	Specification
Material(stator & rotor)	50PN1300
Output power[W]	180
Pole/Slot	4/6
Rated Speed[RPM]	3200
Br[T]	1.13
Rated Current [A]	13.5A
Stack Length[mm]	46
Stator Diameter[mm]	70
Phase Resistance[ohm]	0.15 (25℃)

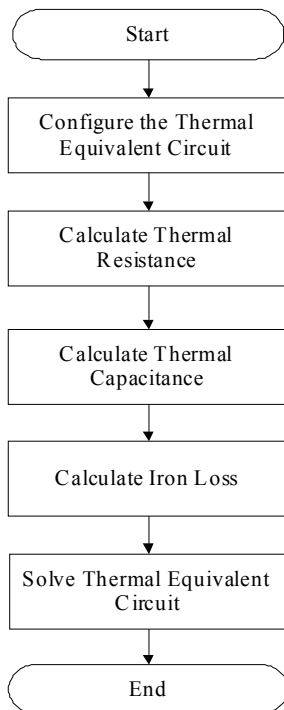


그림 2 열 등가회로를 이용한 열 해석 과정

Fig. 2 Procedure of thermal analysis using thermal equivalent circuit

본 연구에서 사용한 계산 과정을 그림 2에 나타내었다.

2.2 열 등가회로 구성

엔드 권선 부분과 고정자 치 끝단에 열전대를 설치하여 실험을 진행하였다. 계산 시간 단축을 위하여 그림 3과 같이 고정자의 notch를 제거하고 해당하는 면적만큼 치 끝단부의 면적을 줄였다. 그리고 고정자 치 부분을 총 세 개의 절점으로 분할하여 치 끝단에 0.1mm 두께를 가지는 가상의 층을 설정하였다. 이는 열전대가 치 끝단부에 설치되므로 실험치와 비교하기 위함이다. 이에 따라 작성된 열 등가회로는 그림 5와 같다.

열 등가회로망을 작성할 때, 회전자 부분은 영구자석과 철심이 복잡한 형상으로 구성되어 열 저항 계산이 난해하기 때문에 원통형으로 등가화 하여 열 저항을 계산하였다. 회

전자 모델 등가화 및 회전자에 할당된 절점은 그림 4에서 나타내었다.

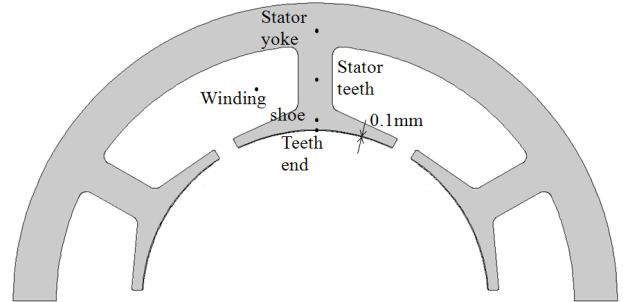


그림 3 고정자에 할당된 절점

Fig. 3 allocated node in stator

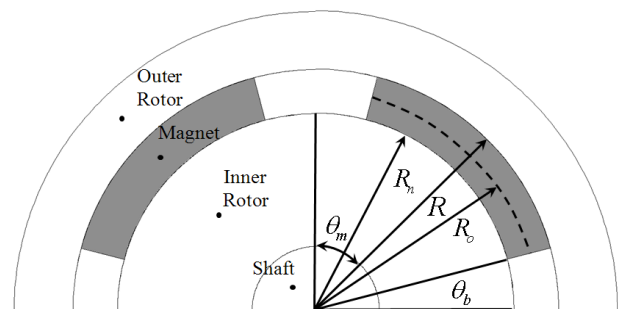


그림 4 회전자에 할당된 절점

Fig. 4 allocated node in rotor

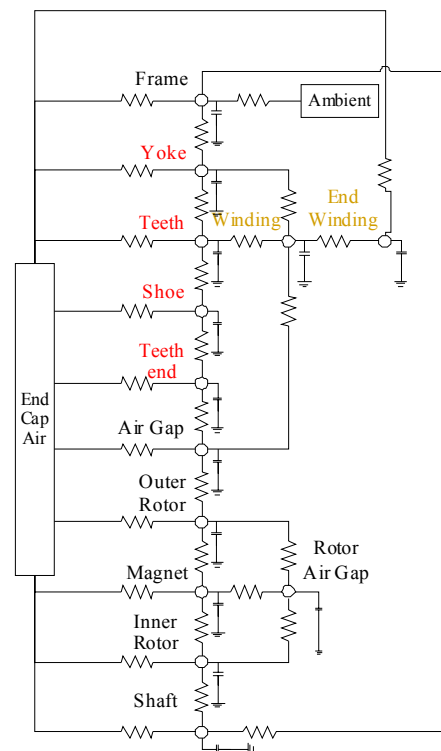


그림 5 해석 모델의 열 등가회로

Fig. 5 Thermal equivalent circuit of analyzed model

2.3 열 증가회로 풀이

2.3.1 전도 열 저항 산정

전도에 의한 열 저항은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{cond} = \frac{l}{k_{cond}A} \quad (1)$$

식 (1)에서 k_{cond} 는 열전도 계수이고 A 는 전도에 의한 열 전달이 발생하는 면적, l 은 전도가 발생하는 두 물질간의 거리를 의미한다. 재료의 열전도 계수는 고유 물성치이므로 알려져 있는 재료의 값을 사용하였다.

2.3.2 대류 열 저항 산정

대류에 의한 열 저항은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}A} \quad (2)$$

위 식에서 h_{conv} 는 대류열전달계수이고, A 는 대류가 일어난 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 누셀트 수(Nusselt number) N_{Nu} 와 공극 길이 l_g , 공기의 열전도도 k_{air} 로 표현된다[4].

$$h_{airgap} = \frac{N_{Nu} \cdot k_{air}}{l_g} \quad (3)$$

그리고 누셀트 수는 테일러 수(Taylor number) N_{Ta} 와 프란틀 수(Prandtl number) N_{Pr} 에 의해 식 (4)과 같이 정리할 수 있다.

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

또한, 테일러 수와 프란틀 수는 공극 길이 l_g , 회전자의 속도 V , 공기의 동점성 계수 ν_a , 비열 c_p 등으로 식 (5), (6)와 같이 표현된다.

$$N_{Ta} = \frac{l_g V}{\nu_a} \quad (5)$$

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

전동기의 고정자, 회전자 및 고정자 권선의 축 방향으로 전달되는 열과 엔드 권선의 열은 엔드캡 내기를 통해 하우징으로 전달된다. 엔드캡 내기의 대류열전달계수는 식 (7)으로 계산된다[5].

$$h_{endcap} = 15.5 \times (0.29v + 1) \quad (7)$$

식 (7)에서 v 는 팬의 속도이며, 본 논문에 사용된 전동기의 경우 팬이 없으므로 $v=0$ 을 사용하였다.

2.3.3 열 증가회로 풀이를 위한 열평형 방정식

각각의 절점에서의 온도 산정은 식 (8)과 같은 열평형 방정식으로 이루어진다[6].

$$C_i \frac{dT}{dt} = \frac{1}{R_{ji}} (T_j - T_i) + u_i \quad (8)$$

여기서 C_i 는 각 절점에서의 열용량, T_i, T_j 는 절점의 온도, R_{ji} 는 절점 i, j 사이의 열 저항이며, u_i 는 절점 i 에서 발생하는 열 발생량을 의미한다. 시간에 따른 온도 변화량을 계산하기 위하여 위의 식 (8)은 식 (9)의 형태로 표현될 수 있다.

$$T^{p+1} = \left(\frac{\Delta t}{C_i} \right) \cdot \left(\sum_j \frac{1}{R_{ji}} (T_j^p - T_i^p) + u_i \right) + T^p \quad (9)$$

각각의 절점에 대해 식 (9)의 열평형 방정식을 구하여 온도가 수렴할 때까지 계산을 반복 진행하였다.

2.3.4 열원 계산

2.3.4.1 동손

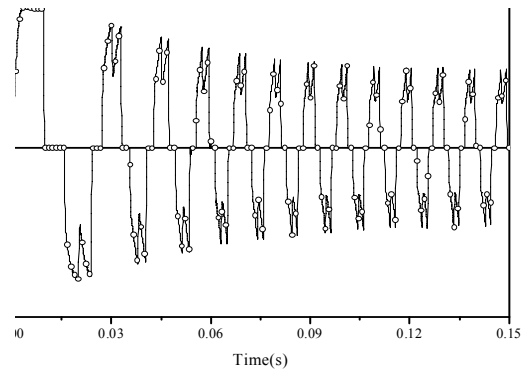


그림 6 해석 모델의 한 상 전류 파형

Fig. 6 The one-phase current waveform of analyzed model

BLDC 전동기는 기동전류를 포함하여 한 상의 전류는 그림 6에 나타내었다. 그리고 동손 계산 시 전류는 2가지로 나누어 입력하였다. 초기의 전류부터 전동기가 정격속도에 도달할 때까지의 전류와 정격속도에 도달한 이후의 전류로 나누어 전류를 입력하였다.

BLDC 전동기는 3상이므로 전류 I_a 호를 때, 고정자 권선에서 발생하는 손실은 다음과 같다.

$$P_{cu} = 3I^2 R_{ph} \quad (10)$$

식 (10)에서 R_{ph} 은 권선의 상저항이며, 이는 온도에 따라 선형적으로 상승하기 때문에 이를 고려하기 위하여 다음 수식을 사용하였다.

$$R_{ph} = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (11)$$

식 (11)에서 α 는 저항 온도 계수이며, 이는 금속의 재질에 따라 다른 값을 가진다. 전동기의 권선은 구리를 사용하므로 본 논문에서는 구리의 저항 온도 계수인 0.004를 사용하였으며, 초기 온도에서의 저항인 R_0 는 25[°C]에서의 측정값인 0.0208[Ω]을 사용하여 온도 상승에 따른 저항 변화를 고려하였다.

2.3.4.2 철손

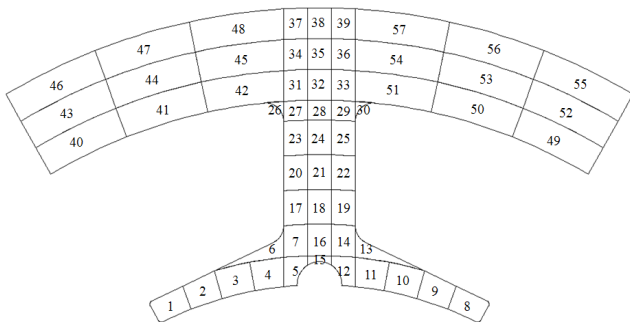


그림 7 57개의 영역으로 분할된 고정자 형상
Fig. 7 Divided stator core shape

철손의 계산은 고정자 요크와 치 부분을 그림 7과 같이 57개의 영역으로 분할하여 수행하였다.

철손은 재질 자체의 자기이력 특성으로 인한 히스테리시스 손실분과 유도 전류에 의한 와전류 손실분으로 분류되고, 그 외에 이상 와전류 손실이 발생하게 되며 이는 주파수와 자속 밀도의 함수로 식 (12)와 같이 정의된다.

$$W_i = W_h + W_e + W_a \quad (12)$$

$$= k_h f B_m^2 + k_e f^2 B_m^2 + k_a f^{1.5} B_m^{1.5}$$

식 (12)에서 k_h 는 히스테리시스 손실 계수, k_e 는 와전류 손실계수, k_a 는 이상와전류 손실 계수이다[7].

본 논문에서 사용된 모델의 운전 주파수는 106.67[Hz]이며 치와 요크에서의 자속 밀도는 유한요소법에 의해 계산한 값을 사용하였다. 각각의 계수는 철심 재질인 50PN1300의

표 2 해석 모델의 철손 계산치

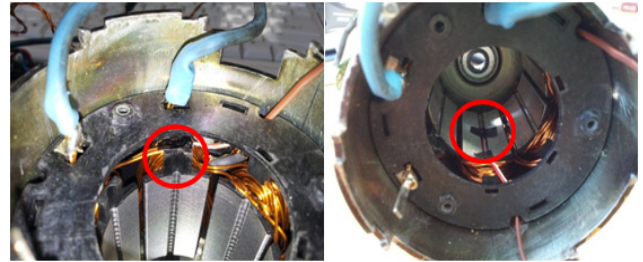
Table 2 Calculated iron loss of analyzed model

Item	Value [W]
Stator yoke	8.3854
Stator teeth	2.6613
Total	11.0467

단위 철손 정보와 Curve Fitting Method(CFM)을 사용하여 계산하였다. 그리고 고정자 치와 요크에서의 철손을 산정한 후 열원으로 입력하였다.

2.4 실험 및 계산 결과 비교

2.4.1 실험 장치



(a) End winding (b) Teeth end

그림 8 열전대 부착 위치

Fig. 8 Attachment position of thermocouple

180W급 BLDC 전동기의 온도 분포를 확인하기 위해 실험을 수행하였다. Duty ratio에 따른 실험을 진행하여 계산 결과와 비교하였다.

다이내모 미터를 사용하여 부하를 인가하였으며, 온도 측정에는 열전대를 사용하였다. 열전대는 엔드 권선 부와 고정자 치 부분에 설치하여 계산 결과와 비교하였다. 열전대는 그림 8의 위치에 부착하였고, 실험 장치는 그림 9에 나타내었다.

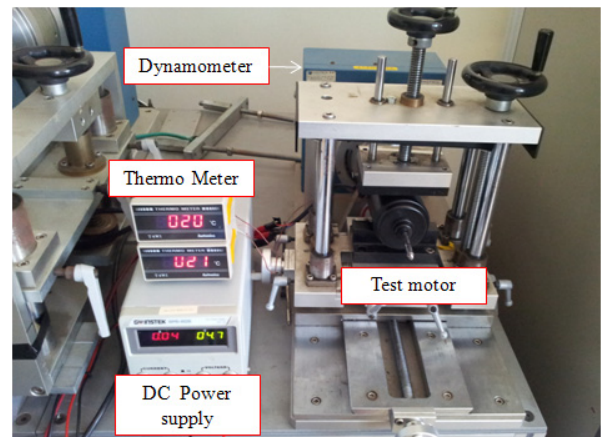


그림 9 실험장치

Fig. 9 Experiment set for temperature measurement

2.4.2 실험 및 계산 결과 비교

1주기 2분 30초를 기준으로 duty ratio는 0.2, 0.4, 0.6, 0.8에서의 주기적 단속 구동에서는 다이내모에 180W의 부하가 걸려있는 상태에서 on/off를 하여 시간에 따른 온도변화를 측정하였고, duty ratio가 1인 연속 구동시 다이내모에 180W의 부하가 걸려있는 상태에서 on하여 시간에 따른 온

도변화를 측정하였다[8]. 본 논문에 사용된 전동기의 경우 B종의 절연 등급을 사용하므로 허용 온도는 130[°C]이나 전동기의 열화 등을 고려하여 115[°C]까지 온도를 측정하였다. 그리고 duty ratio가 1일 경우 10분이 되기 전에 115[°C]를 넘기 때문에 전체 실험 및 계산시간은 0~10분까지 실험

및 계산을 진행하였다.

각 duty ratio에 따른 온도 실험 및 계산 결과 그래프는 그림 10 ~ 14와 같다. Teeth end 부분의 실험 및 계산 결과는 잘 일치하는 양상을 보이지만 End winding 부분은 duty ratio=0.8일 때 9분 30초 부분에서 5[°C]의 온도 차이가

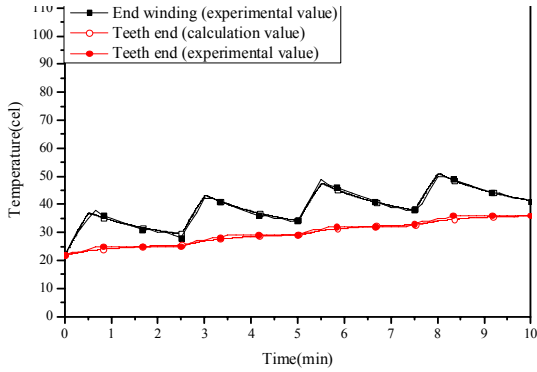


그림 10 duty ratio=0.2 일 때 실험 및 계산 결과
Fig. 10 The experimental and calculated results in duty ratio=0.2

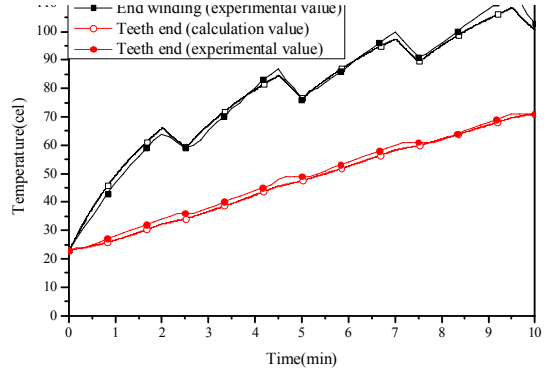


그림 13 duty ratio=0.8일 때 실험 및 계산 결과
Fig. 13 The experimental and calculated results in duty ratio=0.8

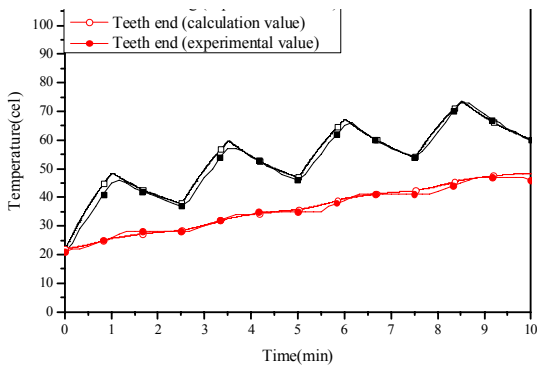


그림 11 duty ratio=0.4일 때 실험 및 계산 결과
Fig. 11 The experimental and calculated results in duty ratio=0.4

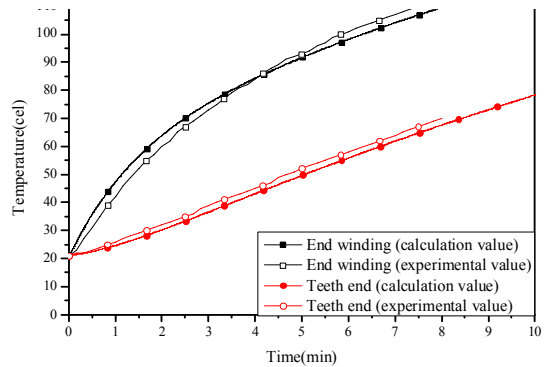


그림 14 duty ratio=1일 때 실험 및 계산 결과
Fig. 14 The experimental and calculated results in duty ratio=1

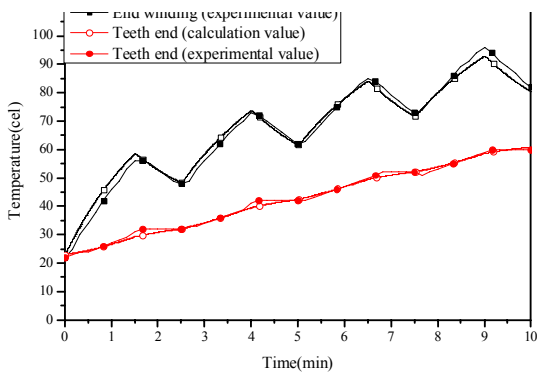


그림 12 duty ratio=0.6일 때 실험 및 계산 결과
Fig. 12 The experimental and calculated results in duty ratio=0.6

표 3 duty ratio에 따른 계산 및 실험 결과 비교
Table 3 Calculation and experimental results comparison according to the duty ratio

	Temperature End winding(cal)	Temperature End winding(exp)
duty ratio=0.2 (10min)	51	50
duty ratio=0.4 (10min)	73	73
duty ratio=0.6 (10min)	92	96
duty ratio=0.8 (10min)	109	114
duty ratio=1 (8min)	110	114

존재하지만 이는 오차의 중첩과 Thermocoupler의 측정오차로 판단되며 전반적으로는 그 추이가 일치하고 있음을 알 수 있다. 계산 및 실험 비교 결과는 표 3에 나타내었다.

3. 결 론

본 논문에서는 BLDC전동기에 대하여 열 등가회로를 작성하여 열해석을 수행하였으며, 연속구동시의 온도 계산뿐만 아니라 duty ratio에 따라 주기적 단속구동 시의 열 해석 및 온도 실험을 수행하여 그 결과를 비교, 분석 하였다.

열 등가회로에 따른 열 해석은 3차원 유한요소법을 이용한 열 해석 결과와 비교하여 볼 때 해석 시간이 짧고 다양한 해석 조건에 대해 적용할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서의 열 등가회로 계산 결과는 최대 오차 5[°C]로 오차의 중첩과 계측기의 측정오차를 감안하면 실험 결과와 매우 유사한 값을 얻을 수 있었다. 이를 위해서는 열원인 각 손실 분포의 정확한 계산이 선행되어야 한다. 또한, 운전 특성에 따라 알맞은 duty ratio를 선정하는 것이 전동기의 온도 상승 및 효율에 큰 영향을 미침을 알 수 있으며 duty ratio에 따른 용량 산정은 추후 과제로 삼겠다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

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 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, pp. 527-532, 2009
- [3] 이양수, 한송엽, "전동기의 열해석 기술", Proceedings of KIEE, vol. 48, No. 9, pp12-17, September 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] P.H. Mellor, D. Roberts, D.R. Turner, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design", IEE Proceedings-B, Vol. 138, No. 5, pp. 205-218, 1991
- [7] Cha-Seung Jun, Byung-Taek Kim, Byung-Ill Kwon, Seung-Chan Park, "Analysis of losses and temperature rises of the three-phase squirrel cage induction motor considering skew effect", The transactions of KIEE, vol.47, No. 10, October 1998 (Korean)
- [8] J.P. Holman, Heat Transfer, 10th Edition, Mc Graw - Hill, 2009.

저 자 소 개



Yong-Tae Kim

He received B.S degree in electrical engineering from Changwon National university, Korea 2012. He is Currently Pursuing his M.S degree at Changwon National University.

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : kimcheolmin@changwon.ac.kr



Gyu-Won Cho

He received B.S and M.S degree in electrical engineering from Changwon National University, Korea 2009, 2011 respectively. He is currently pursuing his Ph.D degree at Changwon National University.

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : chogyuwon@changwon.ac.kr



Gyu-Tak Kim

He received B.S, M.S and Ph.D degree in electrical engineering from Hanyang University, Korea. He is presently a Professor of Changwon National University. His research interests are Electrical machine and FEM analysis.

Tel : 055-213-3635

Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr