

고속·저토크용 표면부착형 영구자석 동기 전동기의 운전 안정성 확보를 위한 손실 및 열전달 특성 분석

최 문 석* · 엄 석 기*†

* 한양대학교 기계공학부

Loss and Heat Transfer Analysis for Reliability in High Speed and Low Torque Surface Mounted PM Synchronous Motors

Moon Suk Choi* and Sukkee Um**†

* School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received October 15, 2013 ; Revised December 4, 2013 ; Accepted January 10, 2014)

Key Words: Performance Loss(성능 손실), Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor (SPMSM) (표면부착형 영구자석 동기 전동기), Thermal Resistance(열저항), Driving Condition(구동 조건)

초록: 고속 저토크 표면 부착 영구자석형 동기 전동기의 운전 안정성 확보를 위하여 과속도 및 과부하 영역에서 전동기 코일 온도 예측이 필수적이다. 0.35mm 의 S18, S08 등급인 35PN440, 35PN220 그리고 0.15mm 의 저손실 재료인 15HTH1000 으로 제작된 고정자 철심을 포함하는 전동기의 정격 구동 조건에서 손실 및 코일 온도를 측정하여 과속도 및 과부하 영역의 손실 및 열저항을 예측하고 열전달 모델링을 수행하였다. 이의 검증을 위하여 무부하 과속도 영역에서 계산된 코일 온도와 실험값을 비교하여 6.4%이하로 일치하였다. 35PN440 을 적용한 전동기에 비하여 15HTH100 을 적용한 전동기는 무차원 회전 속도 0.9, 부하율 3.0 일 때 철손실이 84.4% 로 감소하였고, 무차원 코일 온도 1.0 을 기준으로 출력이 85.2% 향상되었다. 정격 구동 영역의 손실 측정 및 열전달 모델링으로 과부하 및 과속도 영역에서 철심 재질에 따른 코일 온도 변화 및 전동기 출력 개선량을 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Abstract: It is essential to predict the coil temperature under over load and over speed conditions for reliability in high speed low torque surface mounted PM synchronous motors(SPM). In the present study, the losses and coil temperature are measured under rated condition and calculated under over speed and over load conditions in the three different motors with 35PN440, 25PN250 and 15HTH1000. The heat transfer modeling has been performed based on acquired losses and temperature. The difference of coil temperature between heat transfer modeling and experiment is less than 6.4% under no load, over speed and over load conditions. Subsequently, the coil temperature of the motor with 15HTH1000 is 84.4% of the coil temperature of the motor with 35PN440 when speed is 0.9 and load is 3.0. The output of motor with 15HTH1000 is 85.2% greater than the output of the motor with 35PN440 when the dimensionless coil temperature is 1.0.

- 기호설명 -

T, θ : 온도, 무차원 온도
 t, L : 토크, 무차원 토크(부하율)
 V, ω : 회전속도, 무차원 회전 속도

w, W : 출력, 무차원 출력
 q, Q : 열발생률, 무차원 열발생률
 i, I : 입력 전류, 무차원 입력 전류
 r, R : 열저항, 무차원 열저항

1. 서론

자동차 및 사출기, 기계 가공기 등에 적용되는

† Corresponding Author, sukkeeum@hanyang.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

내연기관 및 유압기기를 대체하기 위하여 전동기에 대한 소형화 및 고효율화의 필요성이 증가되고 있다. 특히 고효율 콤팩트 전동기 개발을 위하여 고에너지 밀도 영구자석을 장착한 고속 전동기에 대한 관심이 증가하고 있다. 지금까지는 전동기의 고밀도 소형화에 따른 발열 문제 해결을 위한 전동기 냉각에 관한 연구가 주로 이루어졌으나, 근래에 이르러 손실 평가 및 저감에 대한 연구의 중요성이 크게 대두되고 있다.

일반적으로 전동기의 손실은 코일에 인가되는 전류에 의한 코일 손실이 대부분을 차지하였다. 그러나 고속 저토크용 영구자석형 동기 전동기는 영구자석 에너지량이 증가하고 회전자 회전속도가 증가함에 따라 영구자석의 히스테리시스 현상에 따른 철손실이 크게 증가하였다.⁽¹⁾ 특히 동기 전동기의 과부하 영역과 과속도 영역에서는 코일 손실과 철손실이 각각 크게 증가하며, 이에 따라 코일과 영구자석 등의 주요 부품이 한계 온도를 넘게 되면 전동기의 성능저하와 심한 경우는 파손으로 이어진다. 따라서 과속도 및 과부하 영역에서 표면 부착 영구자석형 동기 전동기의 안정성 확보를 위하여 회전 속도 및 토크 등의 구동 조건에 따른 정확한 손실 분석 및 이에 따른 열전달 특성 분석이 필수적이다.

지금까지의 연구는 전동기의 손실 계산을 위한 실험식을 도출하거나 실험식으로 계산된 손실을 이용하여 전동기 내 열전달 특성을 분석하였다. Giorgio Bertotti⁽²⁾는 전동기에 주로 사용되는 연성 강자성체에 대하여 엡스테인(Epstein) 모델을 이용한 성능 손실 계산식을 실험을 통하여 도출하였고, L. Lorimer 등⁽³⁾은 전동기는 형상이 복잡하기 때문에 엡스테인 모델 등으로 손실 계산하는 경우에 오차가 큼을 증명하고 이를 개선하기 위하여 스핀 전동기에 대하여 철손실 실험식을 도출하였다. 특히 산업 현장에 폭넓게 적용되는 유도 전동기에서의 철손실 계산을 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다.⁽⁴⁻¹⁰⁾ 이와 같은 연구에서 도출된 철손실 실험식은 철심내 자기장이 코일에 인가되는 전류에 의하여 형성되는 유도 전동기에 한하여 적용 가능하다.

본 연구에서 논의하고자 하는 영구자석형 동기 전동기는 영구자석과 코일의 상호작용에 의하여 자기장이 형성 및 쇄교되기 때문에 위에서 제안된 실험식의 적용이 어렵다. 이를 위하여 영구자석형 동기 전동기의 철손실에 대한 연구가 다양하게 진행되었으며, 특히 기존에 주로 사용하는 전기 강

판 대신에 다양한 신소재를 적용한 영구자석형 동기 전동기의 손실 분석 연구가 많은 연구자들에게 의해서 수행되어 왔다.⁽¹³⁻¹⁹⁾ D. M. Ionel 등⁽¹⁴⁾은 다양한 철심 재질에 대하여 새롭게 제안한 방식으로 계산한 철손실과 엡스테인 모델을 통한 실험식으로 계산한 철손실을 비교하여 엡스테인 모델의 한계성을 증명하였다. Y. Enomoto 등⁽¹⁷⁾은 자체 실험을 통하여 측정된 철손실과 기존 실험식으로 계산한 철손실을 비교하였고 동시에 재질 개선에 따른 영구자석형 동기 전동기의 효율 개선을 제안하였다. 영구자석형 동기 전동기의 철손실은 철심 소재와 함께 전류 인가 방식에 따라서도 달라지게 된다. 이의 영향을 규명하기 위하여 실제 전동기에 인가되는 전류와 유사한 PWM 또는 비사인파 형태로 전류가 인가되는 경우의 손실 특성을 분석함으로써 보다 정확한 전동기 손실을 예측하였다.⁽²⁰⁻²³⁾

전동기에서의 전기적 손실 및 특성 분석의 연구와 더불어 유도 전동기, 자기저항 전동기에 대하여 기존에 제안된 실험식으로 계산된 손실을 적용하여 전동기 내부 열전달을 FEM 또는 집중 열용량법으로 수치적으로 해석하고 그 결과를 실험을 통하여 검증하는 연구도 활발하게 진행 중이다.⁽²⁴⁻²⁸⁾ 본 논문과 같이 영구자석형 동기 전동기에 대하여 집중 열용량법으로 온도 특성을 해석하였고,⁽²⁹⁻³³⁾ 특히 J. Fan 등⁽³⁰⁾은 자동차 구동용 전동기에서 대하여 실제 운전 조건을 적용하여 온도 변화를 해석함으로써 운전 조건의 중요성을 증명하였다. 그리고 N. Ishihara 등⁽³²⁾과 A. Rahideha 등⁽³³⁾은 고정자 철심 중에서 철손실이 주로 발생하는 슬롯을 제거함으로써 손실을 저감하고 이에 따른 온도 특성을 분석하였다.

이와 같이 영구자석형 동기 전동기의 철손실은 형상, 운전 조건, 영구자석 및 철심 재질 그리고 전류 인가 방식 등 매우 다양한 조건에 의하여 달라진다. 특히 본 연구에서 사용된 고속 전동기는 철손실이 코일 손실보다 크기 때문에 정확한 코일의 수렴 온도 특성 분석을 위하여 철손실 측정 및 변화 경향에 대한 분석이 필수적이다. 지금까지 전동기 내부 온도를 실험적으로 규명한 연구는 주로 연속 운전 영역인 정격 구동 조건하여 수행되어 왔다. 전동기의 과부하 및 과속도 영역에서 전동기 안정성을 보장하기 위해서는 고정자 코일의 온도가 내열 온도 이하로 유지되어야 한다. 이를 위해서 과부하 및 과속도 영역에서 손실 및 열저항 변화를 정확하게 예측하고 코일의 수렴 온도를

계산하여야 한다. 이를 위하여 표면 부착 영구자석형 동기 전동기에 대하여 정격 구동 영역에서 구동조건에 따른 손실 및 열전달 특성을 실험적으로 분석하였다. 그리고 정격 영역의 결과를 이용하여 과속도 및 과부하 영역에서 철손실과 코일 손실 및 전동기 각 부분의 열저항 변화를 예측하였다. 실험에 사용된 전동기의 손실 예측 및 열전달 모델링을 제안하였고 무부하시 과속도 영역에서 코일의 수렴 온도를 계산하고 이를 측정값과 비교하여 열전달 모델링을 검증하였다. 손실 예측 및 열전달 모델링을 통하여 과속도 및 과부하 영역에서 코일의 수렴 온도를 예측함으로써 표면 부착 영구자석형 전동기의 안정성을 확보하고자 한다.

2. 전동기 및 실험 장치

2.1 전동기 사양

본 논문에서는 고속, 저토크용 표면 부착형 영구자석 동기 전동기에 대하여 과부하 및 과속도 영역에서 전동기의 구동 안정성을 확보를 위하여 속도 및 부하율 변화에 따른 손실 및 열전달 특성을 분석하였다. 정격속도 5000rpm 으로 고속 회전하는 표면 부착 영구자석형 전동기를 표준 전동기로 정의하고 고정자 철심을 세가지 전기 강판을 이용하여 제작하였다. 사용된 고정자 철심용 전기 강판의 재질은 기존에 전동기에 폭넓게 사용되는 35PN440 과 35PN220 등 2 종과 고속 전동기용 강판인 15HTH1000 이다. 15HTH1000 은 무방향성 전기 강판으로 고주파 특성이 우수하여 본 논문에서와 같이 고속 회전하는 전동기에서 철손실을 저감할 수 있는 재질이다. 전동기의 상세 사양은 Table 1 과 같으며, 35PN440 을 고정자 철심 재료로 적용한 전동기에 대하여 정격 토크 출력 및 정격 속도 회전시 입력되는 전류를 정격 전류로 정의하였다. 회전자는 탄소강으로 제작된 회전자에 희토류계 영구자석(Nd-Fe-B)을 직접 부착하였다.

이와 별도로 기계적 손실을 측정하기 위하여 회전자 관성 모멘트, 점성력과 마찰력이 동일하도록 전동기의 기타 다른 부분은 동일하며 착자되지 않은 영구자석을 회전부에 부착한 모형 전동기를 제작하였다. 그리고 고정자를 통한 열전달을 측정하기 위하여 코일 등을 포함하는 고정자는 동일하며 영구자석 등의 회전자가 없으며 전동기 내부를 단열재로 충전한 단열 전동기를 제작하여 실험에 사용하였다.

Table 1 Specifications of a reference electrical rotating machine

Item	Specification
Output power	1.1kW
Motor type	SPMSM
Rated speed	5000rpm
Max. speed	7000rpm
Rated torque	2.12Nm
Rated current (35PN440,35PN250,15HTH1000)	7.2/7.3/6.9Arms
Resistance	0.11Ω
Number of phases	3
Number of poles	8
Number of slots	9
Width/height/length	80/80/160mm
Material of magnet	Nd-Fe-B(42SH)
Material of stator cores	35PN440
	35PN250
	15HTH1000

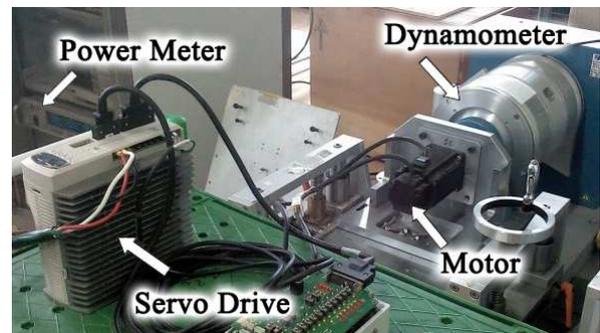


Fig. 1 Experimental motor and the measurement system.

2.2 실험 장치

전동기의 출력 에너지 및 입력 에너지를 측정하기 위하여 다이내모 메터(Dynamometer) 및 파워 메터(Power Meter)를 이용하여 실험 장비를 구성하였다. Fig. 1 과 같이 부하율 인가하고 토크 및 속도를 측정하는 다이내모 메터와 실험용 표면 부착 영구자석형 동기 전동기를 연결하였다. 그리고 서보 드라이브를 전동기 구동을 위하여 연결하고 연결 케이블 중간에 입력 에너지를 측정하기 위한 파워 메터를 연결하였다. 추가로 전동기 내부의 온도 측정을 위하여 코일의 상부와 철심 상부에 각각 3 개씩 열전대를 부착하고 이를 온도 기록계를 통하여 저장하였다.

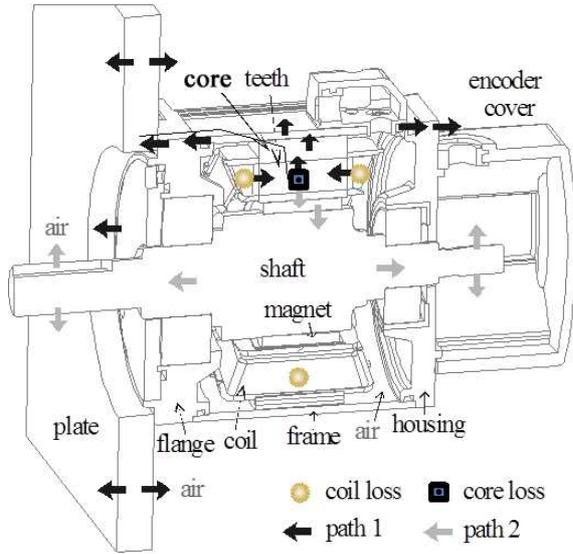


Fig. 2 Heat transfer paths in the experimental motor

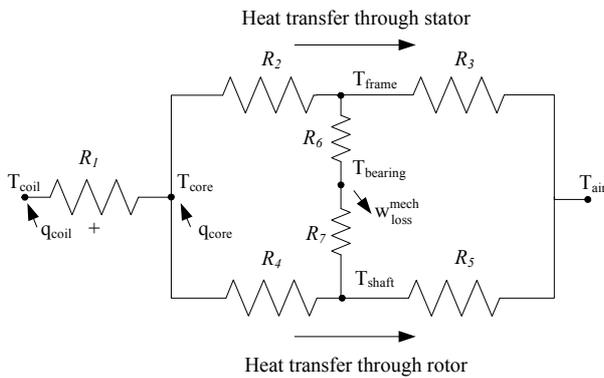


Fig. 3 Heat transfer model in the experimental motor

2.3 열전달 모델링

집중열용량법을 적용한 전동기 열전달 경로를 Fig. 2에 나타내었다. 코일 및 철심에서 발생한 열은 고정자 및 회전자를 통하여 외부 공기로 전달되며 이를 Fig. 3과 같이 모델링하였다. 영구자석형 동기 전동기의 손실 및 열저항, 코일의 수렴 온도를 계산하기 위하여 식 (1)에서 식 (7)과 같이 입력 전류, 부하율, 회전 속도, 온도, 입출력 에너지 및 손실 에너지, 열손실 그리고 열저항 등을 정격 구동조건을 기준으로 무차원화 하였다. 동일한 토크 및 회전 속도를 유지하기 위한 입력 전류는 전동기의 철심 재질에 따라 다르므로 식 (1)과 같이 35PN440을 적용한 전동기의 입력 전류를 이용하여 무차원화하였다. 부하율은 정격 토크 대비 출력토크로 정의하여 식 (2)와 같이 무차원화하였다.

$$I_{coil} = \frac{i_{coil}}{i_{rated_35PN440}} \quad (1)$$

$$L = \frac{t_{load}}{t_{rated}} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{V}{V_{rated}} \quad (3)$$

$$\theta_{coil} = \frac{T_{coil} - T_{air}}{\Delta T_{rated}} \quad (4)$$

$$W_{loss}^{elec, mech} = \frac{W_{loss}^{elec, mech}}{W_{rated}^{mech}} \quad (5)$$

$$Q_{coil, core}^{total} = \frac{q_{coil, core}^{total}}{W_{rated}^{mech}} \quad (6)$$

$$R = \frac{r_{in} \times W_{rated}^{mech}}{\Delta T_{rated}} \quad (7)$$

전동기 성능 손실은 식 (8)에서와 같이 전기적 입력 에너지와 기계적 출력 에너지의 차이로 계산하였다. 전동기의 베어링 등에서 발생하는 기계적 손실은 표준 전동기를 무부하로 구동하며 측정된 입력 에너지와 모형 전동기를 표준 전동기에 연결한 후 측정된 입력에너지의 차이를 이용하여 계산하였다. 베어링을 통한 열전달은 매우 적으므로 무시하거나⁽³⁴⁾ 고정자와 회전자사이의 공극(Air Gap)으로 처리하는 경우⁽³⁵⁾가 대부분이므로 식 (9)와 같이 무시하였다.

$$W_{loss} = W_{elect} - W_{mech} \quad (8)$$

$$R_6 = R_7 = \infty \quad (9)$$

여기서 $W_{mech} \equiv L \times \omega$ 로 계산된다.

열발생량은 전동기에서 발생한 손실량에서 기계적 손실을 차감하여 식 (10)와 같이 계산하였다.

$$Q_{total} = W_{loss} - W_{loss}^{mech} \quad (10)$$

계산된 열발생량은 코일 손실과 철손실로 나눌 수 있으며 코일 손실은 식 (11)과 같이 코일에 인가되는 전류와 전동기 상저항을 이용하여 계산할 수 있다. 표면 부착 영구자석형 동기 전동기의 철손실은 회전자부의 철심에서는 회전자의 기계적인 회전 속도와 철심 내부의 자속 밀도의 회전 속도가 일치하므로 발생하지 않는다.⁽³⁶⁾ 이를 이용하여 철손실은 식 (12)과 같이 열발생량에서 코일 손실을 차감하여 계산하였다. 본 논문에서는 베어링을 고정자와 회전자의 공극으로 가정하고 철손 발생 위치를 고정자 철심으로 한정함으로써 열전달 경

로를 각각 고정자 및 회전자를 통한 열전달로 단순화하였다.

$$Q_{coil} = \frac{3 \times i_{coil}^2 \times R_{elec}}{W_{mech}^{rated}} \quad (11)$$

$$Q_{core} = Q^{total} - Q_{coil} \quad (12)$$

3. 실험 결과

3.1 고정자 열저항 측정

회전부와 고정부로의 열저항을 계산하기 위하여 고정자 내부를 단열재로 충전한 단열 전동기를 제작하였다. 단열 전동기의 기계적 출력에너지는 식 (13)와 같이 표현되며, 회전부가 없으므로 기계적 손실과 출력 에너지가 없으며 회전부를 통한 열전달도 없으므로 속도 변화에 무관하게 열저항이 일정하다.

$$W_{mech} = W_{loss}^{mech} = 0 \quad (13)$$

단열 전동기의 열저항은 식(14), (15)와 같으며 이는 표준 전동기의 코일과 철심사이의 열저항, 고정자를 통한 열저항과 같다.

$$R_1^{isolated} = R_1 = \frac{\theta_{coil} - \theta_{core}}{Q_{coil}} \quad (14)$$

$$R_{stator}^{isolated} = R_{stator} = R_2 + R_3 = \frac{\theta_{core}}{Q_{coil} + Q_{core}} \quad (15)$$

세가지 재질로 제작된 단열 전동기에 대하여 부하율 1.0 일 때 무차원 회전 속도를 0.2, 0.6, 1.0 으로 변화시키면서 입력 에너지와 코일 및 철심의 온도를 측정하였다. 식 (9)에서 (15)를 이용하여 코일과 철심간의 열저항(R_1), 고정자와 외부 공기간의 열저항(R_{stator})을 각 회전속도에 따라 계산하고 이의 산술평균값을 Table 2 에 나타내었다. 서로 다른 재질로 제작된 전동기에서 코일과 철심간 열저항은 코일의 절연 저항을 유지하기 위한 보빈의 두께, 코일과 보빈의 조립 상태, 코일의 정렬 상태 등에 따라 차이가 발생한다.

이에 비하여 고정자와 외부 공기 간의 열저항은 비교적 유사함을 알 수 있다.

3.2 표준 전동기 열전달 모델링

부하율이 각각 0.5 와 1.0 인 표준 전동기에 대해서 속도를 0.1 에서 0.9 까지 변화시키면서 전동기의 입출력 에너지와 입력 전류를 측정하여 철손실

Table 2 Thermal resistances of isolated motors

Material of stator core	R_l	R_{stator}
35PN440	1.64	8.57
35PN250	1.38	8.53
15HTH1000	1.88	8.62

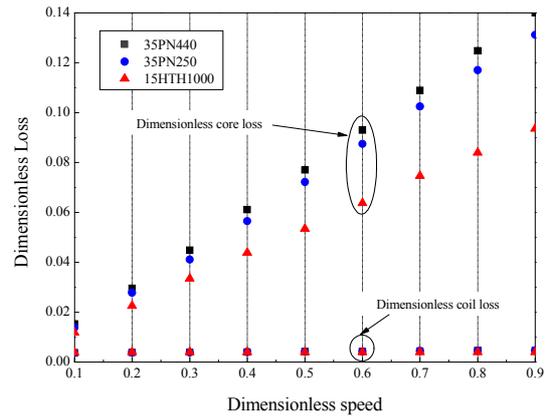


Fig. 4 Measured dimensionless losses of coils and cores as functions of dimensionless speed

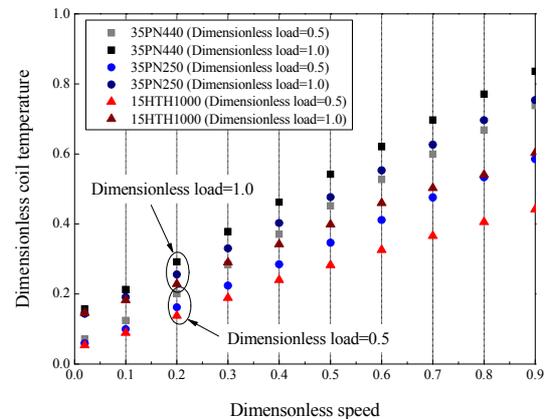


Fig. 5 Measured dimensionless temperatures of cores as functions of dimensionless load

과 코일 손실을 각각 계산하고 철심의 온도를 측정하여 각각 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 4 의 코일 손실 및 철손실은 부하율 0.5 인 경우이며 부하율 1.0 인 경우의 값은 3.5 절에서 자세히 설명하였다.

정격 구동조건인 회전 속도 1.0 까지 실험을 수행하고자 하였으나 부하율 1.0 인 경우에 회전속도가 0.9 일 때 전동기의 코일 수렴온도가 1.2 이상이 되어 전동기의 안정성을 위하여 회전속도를 0.9 까지로 한정하였다. 단열 전동기에서 계산한 Table 2 의 코일과 철심간의 열저항(R_1)과 고정자와 외부 공기간의 열저항(R_{stator}) 값을 이용하여 회전자를 통한 열저항을

식 (16)에서와 같이 부하율이 50%와 100%인 경우에 대해서 각각 계산하였다. 이를 산술 평균하여 회전자를 통한 열저항을 계산하고 식(17)와 같이 지수함수로 보간하였다. 회전자를 통한 열저항에 대한 연속 구동 영역인 정격속도 내에서 구한 실험값과 과속도 영역을 포함하는 실험식의 예측치를 Fig. 6에 나타내었다. 전동기의 철심 재질에 따른 식(17)의 실험 상수를 Table 3에 나타내었다.

$$R_{rotor} = R_4 + R_5$$

$$= \frac{R_{stator} \times \theta_{core}}{R_{stator} \times (Q_{coil} + Q_{core}) - \theta_{core}} \quad (16)$$

$$R_{rotor} = a \times \exp\left(\frac{b}{\omega+c}\right) \quad (17)$$

3.3 무부하 과속도 영역의 열전달 모델링 검증

본 논문에서 제안한 열전달 모델링을 검증하기 위하여 무부하시 실험을 통하여 측정된 코일 온도와 열전달 모델링 계산된 코일 온도를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 무부하시에는 코일에서 발생하는 코일 손실이 적기 때문에 대부분의 과속도 영역에서도 무차원 코일온도가 1.0 이하로 유지되어 전동기를 안정적으로 구동할 수 있기 때문에 실험적으로 코일의 수렴 온도 측정이 가능하다. 그러나 무부하시에는 전류와 전압의 역률이 낮아 입력 에너지 측정시 오차가 크기 때문에 입력력 차이를 이용한 손실 계산이 불가능하다. 이를 대신하여 코일 손실은 입력 전류를 측정하여 식 (11)으로 계산하고, 철손실은 3.5 절과 같이 50, 100%시 철손실을 선형적으로 보간하여 무부하시 철손실을 계산하였다.

회전 속도 1.0 이상에서 측정값대비 열전달 모델링으로 계산한 값의 오차가 고정자 철심 재질로 35PN440, 35PN250 그리고 15HTH1000을 적용한 전동기는 각각 최대 5.3%, 3.1%, 6.4%의 오차로 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 제안된 손실 분석 및 열전달 모델링을 통하여 측정이 어려운 순시 영역에서 온도 예측이 가능함을 알 수 있다.

3.4 과부하영역의 전동기 손실 및 온도 변화

과부하 영역은 짧은 시간동안 전동기 구동이 가능한 순시 동작 구간이므로 코일 온도가 수렴하기 이전에 전동기의 파손으로 이어진다. 전동기 과부하 영역에서는 부하 변동 및 실험 조건에 따라 측정값이 민감하게 변하는 비정상상태로서 온도와 입력 에너지 측정값의 신뢰도가 매우 낮다.

따라서 저부하영역에서의 측정데이터에 근거한 실험식과 전기적/열적 이론적 접근법을 이용하여

Table 3 Constants for thermal resistance calculation in Eq. (17) for representative electromagnetic materials

	a	b	c
35PN440	10.92	0.472	0.192
35PN250	11.11	0.250	0.093
15HTH1000	10.54	0.423	0.201

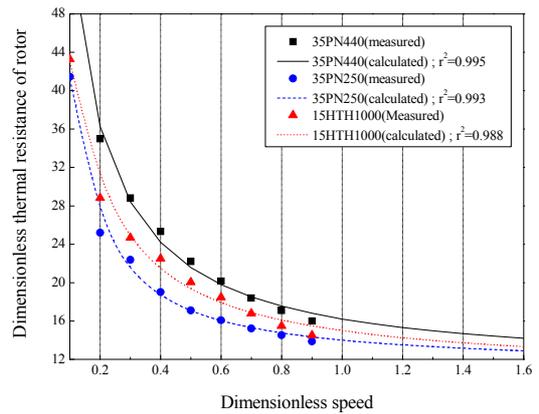


Fig. 6 Measured and calculated dimensionless thermal resistances of rotors as functions of dimensionless speed

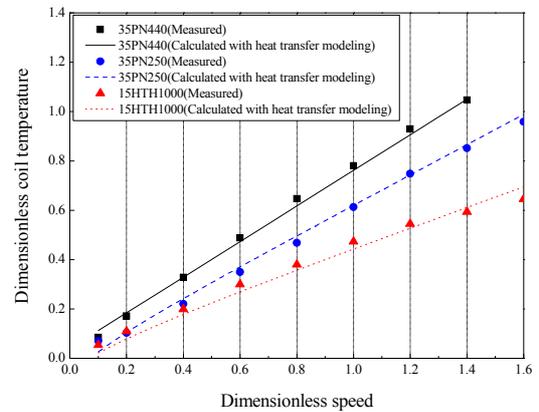


Fig. 7 Measured and calculated dimensionless temperature of coils as functions of dimensionless speed

과부하 및 과속도 영역에서의 전동기 손실 및 내부 온도 예측은 매우 중요하다. 본 논문에서는 정격 토크대비 3 배인 부하율이 3.0 까지를 과부하 영역으로 정의하고 해석하였다.

3.4.1 과부하 영역 코일 손실

표면부착 영구자석형 전동기의 무차원 속도 1.0인 경우에 코일에 인가되는 부하율을 정격 토크

대비 최대 1.0 까지 증가시키면서 식 (5)와 같은 전체 손실 및 입력 전류를 측정하고, 식 (11)을 이용하여 코일 손실을 계산하여 Fig. 8 에 도시하였다. 표면 부착 영구자석형 전동기는 코일에 인가되는 전류는 부하율에 따라 증가하며 이때 코일 손실은 전류에 제곱에 비례하여 증가하므로 최소 자승법을 활용하여 2 차식으로 보간하였다. 이때 최소 자승 오차를 나타내는 r^2 값은 0.998 로서 실험값과 보간값이 1%이내에서 잘 일치함을 알 수 있다.

3.4.2 과부하 영역 철손실

표면부착 영구자석형 전동기의 고정자 철손실은 무차원 회전 속도 1.0 일 때 Fig. 9 에서와 같이 부하율의 증가에 따라 철손실이 선형적으로 증가함을 알 수 있다.^(37,38) 부하율 1.0 이하 구간은 실험값이며 1.0 초과 구간은 선형으로 보간하였다.

부하율 1.0 일 때 무차원 철손실대비 최대 부하인 부하율 3.0 일 때 35PN440, 35PN250 과 15HHTH1000 을 적용한 전동기의 철손실은 각각 205.5%, 225.9% 그리고 248.3%로 증가하는 것으로 예측되었다. 무차원 회전속도가 0.9, 부하율이 1.0 인 구동 조건에서 35PN440 을 적용한 전동기의 철손실에 비하여 35PN250 을 적용한 전동기의 철손실은 97.0%, 15HHTH1000 을 적용한 전동기의 철손실은 71.9% 낮게 측정되었다. 무차원 회전속도가 0.9 이고 부하율이 3.0 인 경우에 35PN440 을 적용한 전동기의 철손실에 비하여 35PN250 을 적용한 전동기의 철손실은 106.1%로 증가하였으며, 15HHTH1000 을 적용한 전동기의 철손실은 84.4%로 감소하였다. 부하율이 1.5 이상인 경우 35PN4400 을 적용한 전동기의 철손실에 비하여 35PN250 을 적용한 전동기의 철손실이 6%이내로 크게 나타났으며 동일 토크 출력시 전동기의 입력 전류 및 코일 손실이 증가함을 의미한다.

3.4.3 과부하 영역 효율 및 코일 수렴 온도

무차원 회전 속도가 0.9 인 경우에 부하율 증가에 따른 효율과 무차원 코일 수렴 온도를 부하율 1.0 이하에 한하여 측정하였고 부하율 3.0 까지 전 영역에 대하여 예측된 손실값과 열전달 모델링으로 계산하여 Fig. 10 와 Fig. 11 에 나타내었다. 부하율 증가에 따른 전동기의 효율은 급격하게 증가하다가 일정하게 유지된다. 35PN440 을 적용한 전동기는 부하율 3.0 일 때 최대 효율 90.0% 35PN250 을 적용한 전동기는 부하율 2.75 일 때 최대 효율 88.4%, 그리고 15HHTH1000 을 적용한 전동기는 부하율 2.25 일 때 최대 효율 90.7%이다. 무차원 코

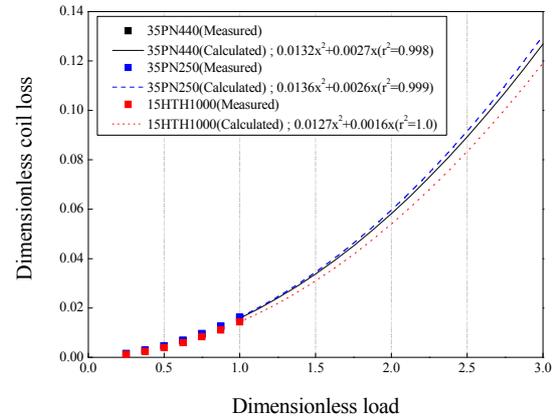


Fig. 8 Measured and calculated dimensionless temperature of coils as functions of dimensionless load

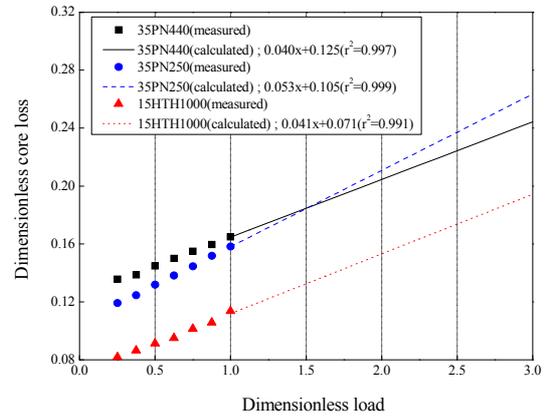


Fig. 9 Measured and calculated dimensionless loss of cores as functions of dimensionless load

일 수렴온도는 부하율 증가에 따른 무차원 코일 수렴온도는 부하율의 제곱에 비례하여 증가하지만 비교적 선형적으로 증가한다. 코일 손실보다는 철손실이 지배적임을 알 수 있다. 무차원 회전 속도가 0.9 일 때 부하율이 1.0 에서 3.0 으로 증가하는 경우에 무차원 코일 수렴 온도는 고정자의 철심 재질로 35PN440 을 적용한 전동기는 220.0%, 35PN220 을 적용한 전동기는 239.4%, 15HHTH1000 을 적용한 전동기는 270.0% 증가하였다. 무차원 회전속도가 0.9 이고 부하율이 각각 1.0 과 3.0 일 때 고정자 철심 재질로 35PN440 을 적용한 전동기의 무차원 코일 수렴 온도에 비하여 35PN250 을 고정자 철심 재료로 적용한 전동기의 무차원 코일 수렴온도가 부하율 1.0 인 경우 89.9%, 부하율 3.0 인 경우 97.4%로 낮게 예측되었다. 동일한 조건에서 고정자 철심 재질로 15HHTH1000 을 적용한 전동기의 무차원 코일 수렴온도는 고정자 철심 재질로 35PN440 을 적용한 전동기의 무차원 코일 수렴

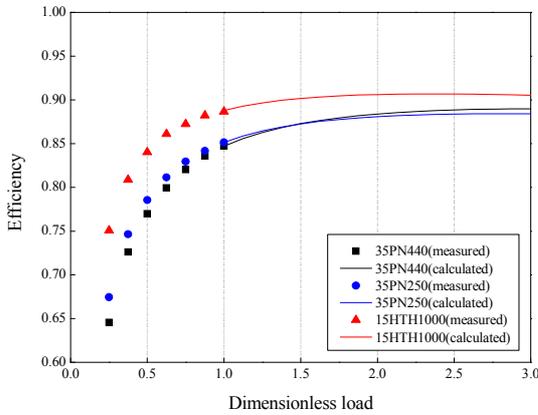


Fig. 10 The efficiency in over load conditions

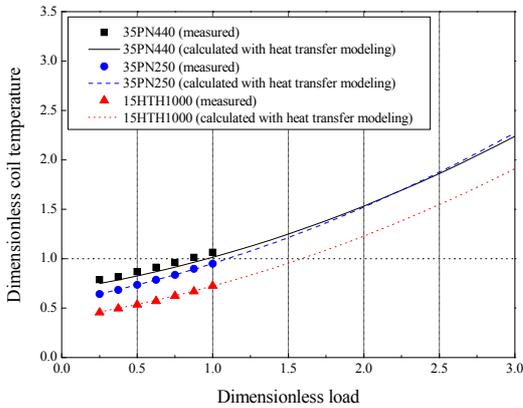


Fig. 11 The temperature of coil in over load conditions

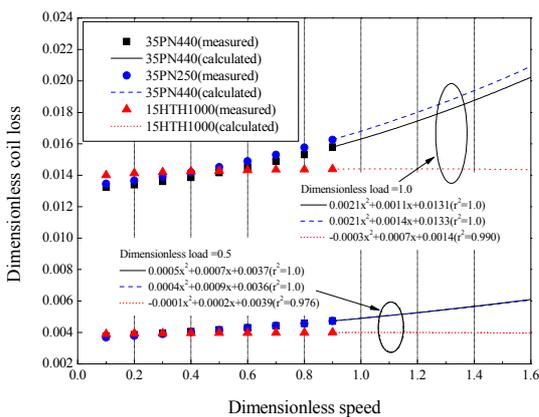


Fig. 12 The coil loss in over speed conditions

온도에 비하여 부하율 1.0 인 경우 69.6%, 부하율 3.0 인 경우 83.6%로 낮게 예측되었다. 전동기의 철손실을 저감하기 위하여 전동기의 고정자 강판 재질을 변경하는 경우에는 정격 부하에서 보다 과부하 영역에서 저감 효과가 적어짐을 알 수 있다.

이는 과부하 영역에서 고정자 철심 재질에 따라 변화하는 철손실 대비 재질과 무관한 코일 손실의 비율이 크게 증가하기 때문이다. 기존의 선행 연구에서와 같이 부하율이 증가할수록 전동기에 적용된 전기강판 재질에 따른 전동기 효율의 개선의 차이가 줄어든다는 결과와 유사하다.⁽¹⁷⁾ Fig. 10 와 같이 무차원 코일 수렴 온도 1.0 을 기준으로 고정자 철심 재질에 따른 전동기의 부하율을 비교하였고 이 때의 부하율이 전동기의 정격 구동 조건이다. 고정자 철심 재질로 35PN440 을 적용한 전동기는 부하율이 0.85 일 때 무차원 코일 수렴 온도가 1.0 이었으며, 35PN250 을 적용한 전동기는 부하율이 1.09, 15HTH1000 을 적용한 전동기는 부하율이 1.57 일 때 무차원 코일 수렴 온도가 1.0 으로 계산되었다. 즉, 고정자 철심 재질로 35PN440 대신에 35PN250 을 적용하면 29.2%, 15HTH1000 을 적용하면 85.2%의 전동기 출력이 개선될 수 있다고 예측된다.

3.5 과속도 영역의 전동기 손실 및 온도 변화

본 논문에서는 정격 회전속도대비 1.6 배인 무차원 회전속도 1.6 까지를 과부하 영역으로 정의하고 해석하였다.

3.5.1 과속도 영역 코일 손실

전동기의 부하율 1.0 일 때 무차원 회전 속도 변화에 따른 코일 손실의 변화를 Fig. 12 에 나타내었다. 영구자석형 동기 전동기는 회전 속도가 증가함에 따라 자속밀도 변화 주파수가 증가하기 때문에 철손실이 증가하고 이는 회전 저항으로 전환되며 결과적으로 토크 및 입력 전류가 증가하여 코일 손실이 증가하게 된다.

고정자 철심 재질로 35PN440 과 35PN250 을 적용하는 전동기는 회전 속도 증가에 따라 코일 손실이 증가하는데 비하여, 15HTH1000 을 사용한 전동기는 회전 저항에 의한 철손실의 증가가 거의 없으므로 입력 전류의 변화가 적어서 코일 손실의 증가가 거의 없음을 알 수 있다.

3.5.2 과속도 영역 철손실

영구자석형 동기 전동기의 철손실은 Fig. 13 에서와 같이 회전 속도에 따라 선형적으로 증가한다. 코일에 의한 와전류 철손실은 회전 속도의 제곱에 비례하며 영구자석에 의한 히스테리시스 손실은 선형적으로 비례하여 증가한다.⁽¹¹⁾ 따라서, 영구자석형 동기 전동기의 철손실은 영구자석에 의한 히

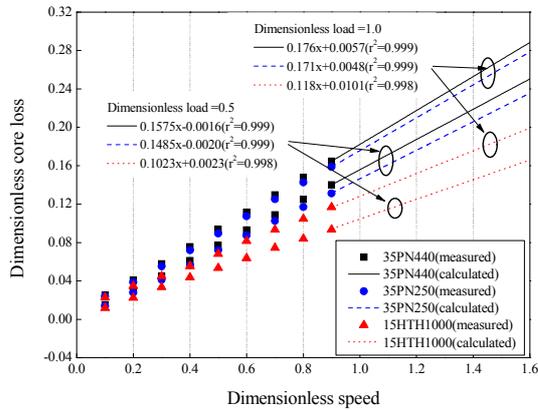


Fig. 13 The core loss in over speed conditions

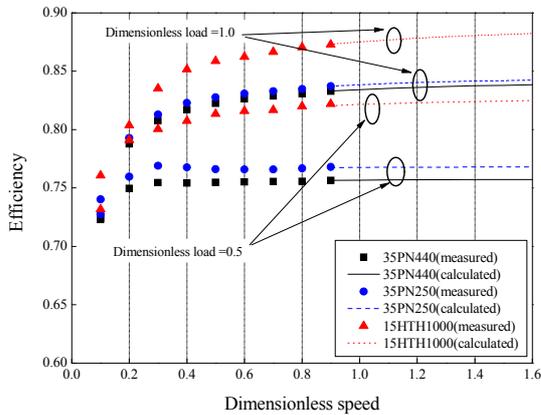


Fig. 14 The efficiency in over speed conditions

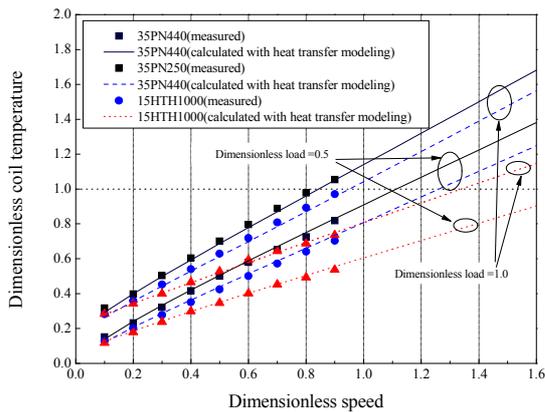


Fig. 15 The temperature of coil in over speed conditions

스테리시스 손실이 지배적임을 간접적으로 나타낸다. Fig. 13 에서 무차원 회전 속도 0.9 이하 구간은 실험값이며 1.0 이상 구간은 선형적으로 보간하였다. 무차원 회전 속도 0.9 인 경우에 고정자 철심 재질로 35PN440 을 적용한 전동기에 비하여

35PN250 을 적용한 전동기 철손실은 부하율이 0.5 일 때 93.9%, 부하율이 1.0 일 때 96.5%로 감소하였고, 15HTH1000 을 적용한 전동기 철손실은 부하율이 0.5 일 때 67.3%, 부하율이 1.0 일 때 70.8%로 낮게 측정되었다. 무차원 회전 속도가 1.6 으로 증가하게 되면 고정자 철심 재질로 35PN440 을 적용한 전동기에 비하여 35PN250 을 적용한 전동기 철손실은 부하율이 0.5 일 때 94.1%, 부하율이 1.0 일 때 96.6%로 감소하였고, 15HTH1000 을 적용한 전동기 철손실은 부하율이 0.5 일 때 66.3%, 부하율이 1.0 일 때 69.1%로 낮게 예측되었다. 이와 같이 전동기 고정자 철심 재질변경에 따른 철손실 저감 효과는 부하율이 낮고 회전 속도가 빠를수록 큼을 알 수 있다.

3.5.3 과속도 영역 효율 및 코일 수렴 온도

부하율 1.0 인 경우에 전동기의 무차원 회전 속도 증가에 따른 효율과 무차원 코일 수렴 온도를 무차원 회전 속도가 1.0 이하에 한하여 측정하였고 회전 속도 1.6 까지 전영역에 대하여 예측된 손실값과 열 전달 모델링으로 계산하여 Fig. 14 와 Fig. 15 에 나타내었다. 회전 속도 증가에 따른 전동기 효율은 급격하게 증가하다가 서서히 증가한다. 회전 속도 1.6 일 때, 35PN440 을 적용한 전동기의 최대 효율은 83.8%, 35PN250 을 적용한 전동기의 최대 효율은 84.2%이고 15HTH1000 을 적용한 전동기의 최대 효율은 88.2%이다. 무차원 회전 속도 0.9 인 경우에 고정자 철심 재질로 35PN440 을 적용한 전동기의 무차원 코일 수렴 온도에 비하여 35PN250 을 적용한 전동기의 무차원 코일 수렴 온도는 부하율이 0.5 일 때 87.0%, 부하율이 1.0 일 때 92.0%로 감소하였고, 15HTH1000 을 적용한 전동기의 무차원 코일 수렴 온도는 부하율이 0.5 일 때 65.6%, 부하율이 1.0 일 때 70.0%로 낮게 측정되었다.

Fig. 15 와 같이 무차원 코일 수렴 온도 1.0 을 기준으로 고정자 철심 재질에 따른 전동기 무차원 회전 속도를 비교하였고 이 때의 무차원 회전 속도가 전동기의 정격 구동 조건이다. 고정자 철심 재질로 35PN440 을 적용한 전동기는 부하율이 0.83 일 때 무차원 코일 수렴 온도가 1.0 이었으며, 35PN250 을 적용한 전동기는 부하율이 0.95, 15HTH1000 을 적용한 전동기는 부하율이 1.34 일 때 무차원 코일 수렴 온도가 1.0 으로 계산되었다. 즉, 고정자 철심 재질로 35PN440 대신에 35PN250 을 적용하면 14.0%, 15HTH1000 을 적용하면 60.9%의 전동기 출력이 개선될 수 있다.

3. 결 론

고속, 저토크, 표면부착 영구자석형 동기 전동기에 대하여 실험을 통하여 회전 속도 및 부하율 등 구동 조건 변화에 따른 손실 변화 경향, 열저항 계산식, 열전달 모델링을 제안하였다. 무부하시 과속도 영역에서 제안된 손실 예측 및 열전달 모델링을 검증하여 최대 6.4% 오차로 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 실험적으로 측정이 불가능한 과부하 영역에서 손실 및 온도 변화를 계산하였고 무차원 회전 속도 0.9 부하율 3.0일 때 고정자 철심 재질로 35PN440을 적용한 전동기의 철손실에 비하여 15HTH100을 적용한 전동기의 철손실이 84.4%로 감소함을 예측하였다. 이를 이용하여 동일한 무차원 코일 수렴 온도 1.0일 때 35PN440을 적용한 전동기 대비 15HTH100을 적용한 전동기는 출력을 85.2% 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 과속도 영역에서 부하율 1.0, 회전속도 1.6일 때 고정자 철심 재질로 35PN440을 적용한 전동기의 철손실 대비 15HTH100을 적용하는 전동기의 철손실 69.3%로 감소함을 계산하였다. 그리고 동일한 무차원 코일 온도 1.0일 때 35PN440을 적용한 전동기 대비 15HTH100을 적용하는 전동기는 출력을 60.9% 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이와 같이 측정 가능한 정격 구동 영역에서 손실 및 열저항을 측정하여 손실 예측 및 열전달 모델링을 수행함으로써 과속도 및 과부하 영역에서 코일의 수렴 온도 및 출력 개선을 정확하게 예측할 수 있다.

참고문헌 (References)

- (1) Bianchi, N. and Bolognani, S., 2004, "Potentials and Limits of High-Speed PM Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 6, pp. 1570~1578.
- (2) Bertotti G., 1988, "General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 24, No. 1. pp. 621~630.
- (3) Lorimer, W. L. and Lieu, D. K., 1999, "Method for Measuring and Characterizing Core Loss in a Motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 4, pp. 2146~2152.
- (4) Bertotti, G., Boglietti, A., Chiampi, M., Chiarabaglio, D., Fiorillo, F. and Lazzari, M., 1991, "An Improved Estimation of Iron Losses In Rotating Electrical Machines," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 27, No. 6, pp. 5008~5009.
- (5) Binesti, D. and Ducreux, J.P., 1996, "Core Losses and Efficiency of Electrical Motors Using New Magnetic Materials," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, pp. 4887~4889.
- (6) Umans, S. D., 1996, "Steady-State, Lumped-Parameter Model for Capacitor-Run Single-phase Induction Motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.32, No.1, pp. 169~179.
- (7) Son, D., 1999, "Ac Hysteresis Loop Measurement of Stator-Tooth in Induction Motor," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 3931~3933.
- (8) Kunihiro, N., Todaka, T. and Enokizono, M., 2011, "Loss Evaluation Fan Induction Motor Model Core by Vector Magnetic Characteristic Analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No.5, pp. 1098~1101.
- (9) Tatis, K. B., Kladas, A. G. and Tegopoulos, J. A., 2004, "Harmonic Iron Loss Determination in Laminated Iron Cores by Using a Particular 3-D Finite-Element Model," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No. 2, pp. 860~863.
- (10) Yamazaki, K. and Haruishi, Y., 2004, "Stray Load Loss Analysis of Induction Motor Comparison of Measurement Due to IEEE Standard 112 and Direct Calculation by Finite-Element Method," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 2, pp. 543~549.
- (11) Slemon, Gordon R. and . Liu. X., 1990, "Core Losses in Permanent Magnet Motors," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 26, No. 5, pp. 1653~1655.
- (12) Sebastian, T., 1995, "Temperature Effects on Torque Production and Efficiency of PM Motors Using NdFeB Magnets," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.31, No.2, pp. 353~357.
- (13) Manyage, Marubini J., and Pillay, P., 2007, "Low Voltage High Current PM Traction Motor Design Using Recent Core Loss Results," *IEEE Industry Applications Conference*, 42nd IAS Annual Meeting, pp. 1560~1566.
- (14) Ionel, D. M., Popescu, M. and Dellinger, S. J., 2006, "On the Variation With Flux and Frequency of the Core Loss Coefficients in Electrical Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 42, No. 3, pp. 658~667.
- (15) Wang, Z., Enomoto, Y., Ito, M., Masaki, R., Morinaga, S., Itabashi, H. and Tanigawa, S., 2010, "Development of a Permanent Magnet Motor Utilizing Amorphous Wound Cores," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, No. 2, pp. 570~573.
- (16) Guo, Y., Zhu, J., Lu, H., Lin, Z. and Li, Y., 2013, "Core Loss Calculation for Soft Magnetic Composite Electrical Machines," *IEEE Transactions on*

- Magnetics*, Vol. 48, No. 11, pp. 3112~3115.
- (17) Enomoto, Y., Ito, M., Koharagi, H. Masaki, R., Ohiwa, S., Ishihara, C. and Mita, M., 2005, "Evaluation of Experimental Permanent-Magnet Brushless Motor Utilizing New Magnetic Material for Stator Core Teeth," *IEEE Transactions on Magnetics*, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, No. 11, pp. 4304~4308.
- (18) Zhang, P., Kwon, S. O. and Hong, J. P., "The Design and Analysis of a High Efficiency Permanent Magnet Reluctance Motor," 2006, *International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS)*, pp. 775~786.
- (19) Huang, Y., Zhu, J., Guo, Y. and Hu, Q., 2007, "Core Loss and Thermal Behavior of High-Speed SMC Motor Based on 3-FEA," *Electric Machines & Drives Conference, IEEE International*, Vol. 2, pp.1569~1573.
- (20) Popescu, M., Ionel, D. M. and Boglietti, A., 2010, "A General Model for Estimating the Laminated Steel Losses Under PWM Voltage Supply," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 46, No. 4, pp. 1389~1396.
- (21) Tsakani, L., Mthombeni, and Pillay, P., 2004, "Core Losses in Motor Laminations Exposed to High-Frequency or Nonsinusoidal Excitation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 5, pp. 1325~1331.
- (22) Kaczmarek, R. and Amar, M., 1995, "A General Formula for Prediction of Iron Losses under Non-Sinusoidal Supply Voltage Waveform," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No.5, pp.2505~2509.
- (23) Barbisio, E., Fiorillo, F. and Ragusa, C., 2004, "Predicting Loss in Magnetic Steels under Arbitrary Induction Waveform and with Minor Hysteresis Loops," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No. 4, pp. 1810~1819.
- (24) Li, W., Cao, J. and Zhang, X., 2010, "Electro thermal Analysis of Induction Motor With Compound Cage Rotor Used for PHEV," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 2, pp. 621~630.
- (25) Sarkara, D. and Naskar, A. K., 2013, "Computation of Thermal Condition in an Induction Motor during Reactor Starting," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 44, pp. 938~948.
- (26) de Moraes Sousa, K., Hafner, A. A., Carati, E. G., Kalinowski, H. J., and Cardozo da Silva, J. C., 2013, "Validation of Thermal and Electrical Model for Induction Motors using Fiber Bragg Gratings," *Measurement*, Vol. 46, pp. 1781~1790.
- (27) Inamura, S., Sakai, T. and Sawa, K., 2003, "A Temperature Rise Analysis of Switched Reluctance Motor due to the Core and Copper Loss by FEM," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, No. 3, pp. 1554~1557.
- (28) Chiba, A., Takano, Y., Takeno, M., Imakawa, T., Hoshi, N., Takemoto, M. and Ogasawara, S., 2011, "Torque Density and Efficiency Improvements of a Switched Reluctance Moto Without Rare-Earth Material for Hybrid Vehicles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, No. 3, pp. 1240~1245.
- (29) Demetriades, Georgios D., de la Parra H. Z., Andersson, E. and Olsson, H., 2010, "A Real-Time Thermal Model of a Permanent-Magnet Synchronous Motor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.25, No.2.
- (30) Fan, J., Zhang, C., Wang, Z., Dong, Y., Nino, C. E., Tariq A. R. and Strangas, E. G., 2010, "Thermal Analysis of Permanent Magnet Motor for the Electric Vehicle Application Considering Driving Duty Cycle," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, No. 6, pp. 2493~2496.
- (31) Huang, Y., Zhu, J. and Guo, Y., 2009, "Thermal Analysis of High-Speed SMC Motor Based on Thermal Network and 3-D FEA With Rotational Core Loss Included," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No.10, pp.4680~4683.
- (32) Ishihara, N., Sanada, M. and Morimoto, S., 2010, "Structure of the PM Synchronous Motor for Low Iron Loss Characteristic in the High-speed Region," *International Power Electronics Conference*, pp. 1317~1321.
- (33) Rahideha, A., Korakianitisa, T., Ruiza, P., Keebleb, T. and Rothman, M. T., 2010, "Very High Speed Slotless Permanent Magnet Motors : Analytical Modeling, Optimization, Design and Torque Measurement Methods," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, pp. 3680~3687.
- (34) Nategh, S., 2013, "Thermal Analysis and Management of High-Performance Electrical Machines," *Ph.D. dissertation, Electrical Engineering, KTH School, Stockholm, Sweden*
- (35) Staton, D., Boglietti, A. and Cavagnino, A., 2011, "Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, pp. 620~628.
- (36) Mi, C. C., Slemon, G. R. and Bonert, R., 2005, "Minimization of Iron Losses of Permanent Magnet Synchronous Machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 1, pp. 121~127.
- (37) Shen, Q., Xu, F., Han, X., Tong, W. and Tang, R., 2011, "Investigation on the Variation of Iron Loss of Permanent Magnet Synchronous Traction Motor under Different Load Toque," *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1~5.
- (38) Almandoz, G., Ugalde, G., Poza, J. and Escalada, A.

J., 2012, "Chapter 8 Matlab-Simulink Coupling to Finite Element Software for Design and Analysis of Electrical Machines," *MATLAB – A Fundamental Tool*

for Scientific Computing and Engineering Applications, Vol. 2, pp. 161~184.