

# 구동 조건 변화에 따른 동기 전동기의 성능 손실 및 내부 열전달 특성

최 문 석 · 엄 석 기\*

한양대학교 기계공학부

## Performance Loss & Heat Transfer Characteristics of Synchronous Motors under Various Driving Conditions

Moon Suk Choi · Sukkee Um\*

*Division of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea  
(Received 8 October 2012 / Revised 22 November 2012 / Accepted 23 November 2012)*

**Abstract** : Core loss has a major effect on heat generation in synchronous motors with surface-mounted permanent magnets (SPMs). It is essential to perform heat transfer analysis considering core loss in SPM because core loss is seriously affected by torque and speed of motors. In the present study, mechanical loss, core loss and coil loss are evaluated by measuring input and output energies under various driving conditions. For a better understanding heat transfer paths in synchronous motors, we developed a lumped thermal system analysis model. Subsequently, heat transfer analysis has been performed based on acquired energy loss, temperature data and thermal resistance with three types of SPM. It is shown that the torque constants decrease by Max. 10% as speed increase. At the rated torque, the core loss is Max. 10.9 times greater than the coil loss and the hysteresis loss of magnets is dominant in total loss.

**Key words** : Core loss(철손실), Surface-mounted permanent magnet synchronous motor(SPMSM, 표면부착 영구자석형 동기 전동기), Thermal resistance(열저항), Driving condition(구동 조건)

### Nomenclature

T : temperature  
Θ : non-dimensional temperature  
t : torque  
L : non-dimensional torque (load)  
V : rotational speed  
ω : non-dimensional rotational speed  
w : output  
W : non-dimensional output  
q : heat generation rate  
Q : non-dimensional heat generation rate  
i : current  
I : non-dimensional heat generation rate

r : thermal resistance  
R : non-dimensional thermal resistance

### Subscripts

rated : continuous condition of motor  
elec, mech, loss : electronic, mechanical, loss  
coil, core : parts of motor  
stator : stationary part of motor  
rotor : rotating part of motor

### 1. 서 론

전기 자동차 및 공장 자동화 등의 산업 분야에서 기존의 내연기관 및 유압식 구동기를 친환경적인 전동기로 대체하고자 하는 요구가 증가하고 있다.

\*Corresponding author, E-mail: [sukkeem@hanyang.ac.kr](mailto:sukkeem@hanyang.ac.kr)

초기에는 주로 유도 전동기를 적용하였으나 근래에 이르러 소형화와 고효율화를 위하여 영구자석형 동기 전동기의 적용이 확대되고 있다. 특히 자동차 응용분야에서 소형 전동 자동차(NEV) 등은 유도 전동기가 주로 적용되나 승용차 등의 트랙션용 전동기와 휠 내장형 전동기에서는 영구자석형 동기 전동기가 적용된다. 지금까지는 유도 전동기의 토크 증가 및 냉각에 대한 연구가 주로 이루어졌나, 점차적으로 고효율 영구자석을 사용하는 동기 전동기의 소형화와 손실을 정확하게 예측하고 저감하기 위한 연구가 증가하고 있다.

기존 전동기의 손실은 코일에 인가되는 전류에 의한 동손실이 대부분이었으나 동기 전동기의 영구자석 에너지량이 높아지고, 회전속도가 증가하거나 중공구조에 따른 영구자석 수가 증가하여 전기각 회전 주파수가 증가함에 따라 코일의 동손실보다 철심에서의 철손실이 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 회전속도가 5000rpm 정도인 경우에는 철손실이 전체 손실의 약 50~70%를 차지한다. 따라서 영구자석형 동기 전동기의 철손실에 대한 정확한 분석 및 예측이 매우 중요하게 되었다.

철손실은 전동기의 고정자 철심에서 주로 발생하며 전기 강판의 재질 및 자속 밀도와 주파수에 따라 달라지고 열손실을 발생시킨다. 이를 예측하기 위해서 강판 제조회사에서는 정규화된 조건에서 측정된 실험식을 이용하는 방법을 널리 사용하고 있다. 대표적으로 Bertotti<sup>1)</sup>은 엡스테인(Epstein) 프레임을 이용하여 손실 계수 및 실험식을 도출하였고, 이를 전동기에 적용하여 철손실을 계산하였다. Bertotti et al.<sup>2)</sup>와 Lorimer and Lieu<sup>3)</sup>는 유도 전동기의 형상을 고려하여 실험적으로 철손실을 측정하고 이를 기반으로 손실 계산식을 도출하였다. Ionel et al.<sup>4)</sup>은 유도 전동기와 비교하여 영구자석형 전동기의 철손실을 분석하였다. Popescu et al.<sup>5)</sup>은 유도 전동기에서 주파수 변조 방식(Pulse Width Modulation)의 전압 변조 주파수와 철손실의 상관 관계를 실험적으로 규명하였다. Enomoto et al.<sup>6)</sup>은 고주파영역에서 기존의 전기 강판과 소프트 자성 복합체, 아몰퍼스 강판 등으로 제작한 전동기에 대하여 철손실을 측정하였으며, 특히 소재에 따른 철손실 특성을 파악하였다.

Zhang et al.<sup>7)</sup>은 고주파용 전기 강판인 15HTH1000 강판을 적용한 영구자석형 킬러턴스 전동기의 철손실을 수치적으로 예측하였다. Demetriades et al.<sup>8)</sup>은 영구자석형 동기 전동기에서 기 발표된 문헌을 활용하여 전동기 손실을 계산하였으며, 실시간 열전달 모델 및 실험을 통하여 온도 특성을 분석하였다. Fan et al.<sup>9)</sup>은 집중열용량법을 이용하여 자동차용 영구자석형 전동기의 부하 조건에 따른 열해석을 수행하고 실험적으로 검증하였다. 지금까지의 전동기 성능 손실 연구는 주로 엡스테인(Epstein) 프레임 등을 이용하여 철손실 계산식을 도출하였다. 그러나 엡스테인 프레임은 기구 구조가 간단하고 코일의 전류 인가시 유도되는 자기장에 의한 전동기 손실만 측정 가능한 시스템이므로, 전동기 성능 손실은 유도되는 자속 밀도와 이의 변화 주파수를 이용하여 계산된다. 이에 비하여 영구자석형 전동기는 철심의 형상이 복잡하며, 코일 및 영구자석에 의하여 복합적으로 자속 밀도가 형성되기 때문에 철손실 계산이 용이하지 않다.<sup>4)</sup> 영구자석형 동기 전동기는 기본 사양인 철심 형상 및 재질, 영구자석 에너지량 등에 따라 전동기 손실이 변하게 된다. 특히 동일한 전동기에서도 토크와 회전 속도에 따라서 손실량이 다르게 측정되며, 회전부로의 열저항도 전동기 회전속도의 영향에 따라 변화된다.

따라서 본 논문에서는 영구자석형 동기 전동기에서 구동조건에 따른 성능 손실 및 열전달 특성을 실험적으로 분석하였다. 특히 전동기 성능 손실을 기계적인 손실과 코일에서의 동손실, 고정자 철심에서의 철손실로 세분화 하였다. 표준 전동기, 모형 전동기, 단열 전동기 등을 이용하여 각각의 손실을 측정하고 원인을 규명하였다. 또한 전동기 내부의 국부적 온도를 측정하여 전동기 각 부분의 열저항을 계산하였고 열전달 모델을 제안하였다. 끝으로 제안된 열전달 모델링을 통하여 온도 및 열전달량을 계산하고 이를 상용프로그램 및 실험을 통하여 정확성을 검증하였다.

## 2. 전동기 부하 실험 및 열전달 모델링

### 2.1 전동기 선정

실험에 사용된 표면 부착 영구자석형 동기 전동



(a) Standard/dummy model (b) Insulation model

Fig. 1 Surface mounted permanent magnet synchronous motor

Table 1 Parameters of experimental motor

Item	Specifications
Output power (출력)	1.1kW
Motor type (모터 형식)	SPMSM
Rated speed (정격 속도)	5000rpm
Max. speed (최대 속도)	7000rpm
Rated torque (정격 토크)	2.12Nm
Number of phases (모터 상수)	3
Number of poles (모터 자석수)	8
Number of slots (모터 슬롯수)	9
Width/height (모터 폭/높이)	80mm
Magnet degree (영구자석등급)	42SH
Material of core (철심 재질)	35PN440

기를 표준 전동기로 정의하고 이는 Fig. 1(a)와 같다.

기계적 손실을 측정하기 위한 모형 전동기는 Fig. 1(a)와 형상이 동일하며 착자되지 않은 영구자석을 적용하였다. Fig. 1(b)는 회전자부가 없으며 전동기 내부를 우레탄폼으로 충전하여 단열한 모델이다. 전동기의 상세 사양은 Table 1과 같으며 철손실에 중대한 영향을 미치는 전기 강판은 현재 전동기에서 폭넓게 적용되고 있는 35PN440을 이용하였다. 회전 속도는 자동차용 전동기의 구동속도를 고려하여 전동기 정격 속도의 0.9인 4500rpm까지 실험하였다. 영구자석은 희토류계(Nd-Fe-B)를 적용하여 소프트 표면에 부착하였다.

전동기를 정확하게 제어하기 위하여 전동기 끝단부에 회전 변위 센서를 부착하였고 서보 앰프를 이용하여 토크 및 회전 속도를 제어하였다. 단열 전동기의 경우에는 가상의 속도 센서를 이용하여 가상의 회전자 회전 속도에 따라 고정자에서 자속 밀도가 변화하도록 하였다.

## 2.2 전동기 손실 측정

전동기의 구동 조건에 따른 손실을 측정하기 위

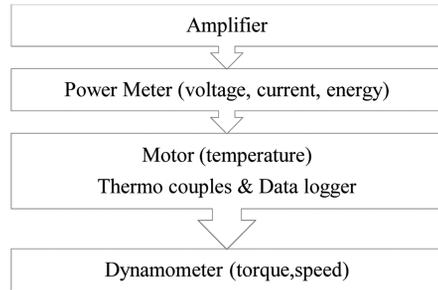


Fig. 2 Schematic diagram of the experiment

하여 Fig. 2와 같이 실험 장치를 구성하였다. 디지털 서보 앰프를 통하여 전동기를 일정한 속도로 회전하도록 하고 부하측정기(Dynamometer)를 이용하여 일정한 토크를 전동기에 인가하였다. 부하 측정기에 부착된 토크 센서와 속도 센서를 이용하여 출력 에너지를 측정하였다. 주파수 변조 방식으로 인가되는 전기 에너지를 측정할 수 있는 고속 파워 미터를 이용하여 전동기에 인가되는 전류, 전압, 입력 에너지를 측정하였다. 전동기 내부의 온도를 측정하기 위하여 열전대를 상부 코일의 전면부와 철심의 상단부 및 프레임의 상단부에 각각 3개씩 부착하여 온도 변화를 측정하였다.

## 2.3 전동기 열전달 해석

전동기에서 발생하는 손실은 동손실, 철손실, 기계적 손실의 세가지로 나눌 수 있으며 이 중에서 기계적 손실은 전체 손실에서 3% 미만으로 매우 적기 때문에 열원으로 고려하지 않았다. 이 부분에 대해서는 3.1절에서 논의될 예정이다. 전동기에서 발생하는 동손실(Copper loss)은 코일에 전류가 통전됨에 따라 저항에 의하여 발생하며, 철손실(Core loss)은 자기장 변화에 따라 고정자 및 회전자 내부에서 발생한다.

철손실은 자기장의 변화 주파수와 영구자석에 의한 자기장 세기, 코일의 유도 자속 밀도에 따라 변화한다. 특히 표면부착 영구자석형 전동기의 경우에 기계적 회전 속도와 고정자의 자속 밀도 변화 속도가 일치하고 영구자석에 의한 자속 밀도가 우세하기 때문에 회전부의 철손실이 발생하지 않는다.<sup>7)</sup> 따라서 철손실은 고정자 철심에서만 발생하는 것으로 가정하였다.

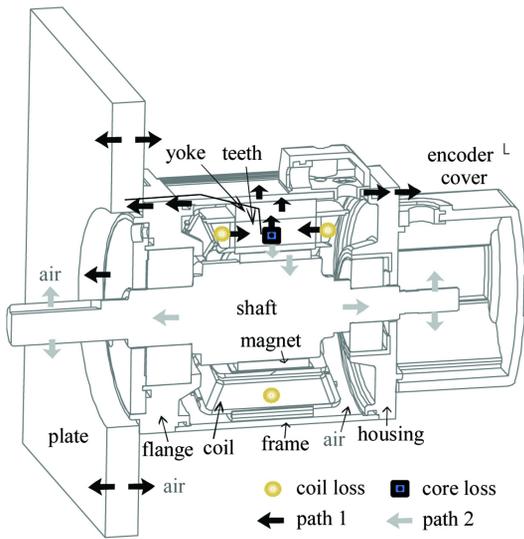


Fig. 3 Heat transfer paths in the experimental motor

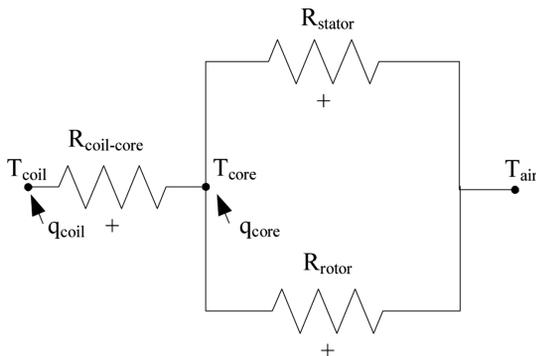


Fig. 4 Model of heat transfer in the experimental motor

코일 및 고정자 철심에서 발생한 손실은 열에너지로 전환되어 Fig. 3과 같이 다양한 경로를 통하여 외부 공기로 방출된다. 실험적으로 검증할 수 있도록 집중열용량법을 이용하여 열전달 모델을 Fig. 4와 같이 간략하게 구성하였다. 코일에서 철심, 전동기 몸체(Frame) 및 고정판(Plate)을 통하여 외부 공기로 전달되는 경로 1과 코일에서 철심, 공극을 거쳐서 영구자석 및 샤프트를 통하여 외부 공기로 전달되는 경로 2의 두 경우로 모델링 하였다.

경로 1의 열저항( $R_{stator}$ )은 모터의 회전 속도와는 무관한데 비하여 경로 2의 열저항( $R_{rotor}$ )은 회전 속도가 증가함에 따라 열저항은 감소한다.

구동조건 변화에 따라 측정된 출력 토크, 회전 속

도, 전류, 온도, 열저항 및 파워 정수 등의 입력 및 출력 에너지 등을 식 (1)에서 식 (7)을 이용하여 무차원화 하였다. 식 (6)에서 코일의 정격 온도차는  $80^{\circ}\text{C}$ 로 적용하였다. 식 (8)과 같이 입력된 전기 에너지와 출력된 기계 에너지의 차이를 이용하여 전체 손실을 계산하였다.

• 표준/모형 모델

$$W_{elec,mech,loss} = \frac{w_{elec,mech,loss}}{w_{rated}} \quad (1)$$

$$Q_{total,coil,core} = \frac{q_{total,coil,core}}{w_{rated}} \quad (2)$$

$$L = \frac{t_{load}}{t_{rated}} \quad (3)$$

$$I = \frac{i}{i_{rated}} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{v}{v_{rated}} \quad (5)$$

$$\theta_{coil} = \frac{T_{coil} - T_{air}}{\Delta T_{rated}} \quad (6)$$

$$R = \frac{r \cdot W_{rated}}{\Delta T_{rated}} \quad (7)$$

$$W_{elec} = W_{mech} + W_{loss} \quad (8)$$

$$W_{loss} = Q_{total} + W_{mech,loss} \quad (9)$$

$$Q_{total} = Q_{coil} + Q_{core} \quad (10)$$

$$R_{coil-core} = \frac{\theta_{coil} - \theta_{core}}{Q_{coil}} \quad (11)$$

$$R_{core-air} = \frac{\theta_{core} - \theta_{air}}{Q_{coil} + Q_{core}} = \frac{R_{stator} \cdot R_{rotor}}{R_{stator} + R_{rotor}} \quad (12)$$

• 단열모델

$$R_{core-air} = \frac{\theta_{core} - \theta_{air}}{Q_{coil} + Q_{core}} = R_{stator} \quad (13)$$

$$R_{total} = R_{coil-core} + R_{core-air} \quad (14)$$

그리고 모형 전동기를 이용하여 측정된 기계적 손실을 이용하여 식 (9)와 같이 열발생량을 계산하였다. 열발생량은 동손실과 철손실로 나누어지며 동손실은 측정된 전류 및 저항을 이용하여 쉽게 계산할 수 있으므로 식 (10)을 이용하여 철손실을 계산할 수 있다. 전동기 각 부분의 손실 및 측정된 온도를 이용하여 식 (11)에서 식 (14)에서와 같이 각 부분의 열저항을 표현하였다. 회전부와 고정부 각각의 열저항을 계산하기 위하여 단일 전동기를 이용하였다. 단일 전동기는 회전자를 통한 열전달이 발생하지 않으므로 철심과 공기 간의 열저항은 식 (13)과 같이 표현되며 이는 표준 전동기에서의 고정부 열저항과 같다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 기계적 손실 측정

기계적 손실을 측정하기 위하여 표준 전동기의 회전속도를 변화시키면서 입력 에너지를 측정하였다. 표준 전동기가 무부하 상태인 경우와 모형전동기를 연결한 경우에 각각의 결과와 차이를 Fig. 5에 나타내었다. 무부하 상태 대비 모형 전동기를 연결한 후 증가된 입력 에너지를 모형 전동기의 기계적 손실로 정의할 수 있다. 모형 전동기에서 발생한 기계적 손실인 마찰 및 점성 저항은 표준 전동기와 동일하다. 기계적 손실은 속도에 비례함을 알 수 있으며 이는 기계적인 마찰 토크가 일정함을 의미한다. 따라서 베어링에서 발생하는 마찰 저항이 내부 공기에 의한 점성 저항보다 지배적임을 알 수 있다.

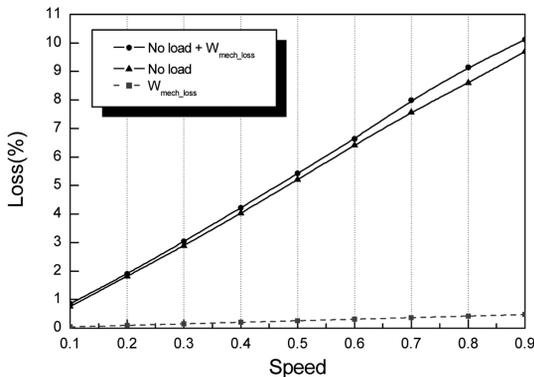


Fig. 5 Friction loss of the dummy model

#### 3.2 토크 정수 측정

토크 정수는 전동기 제어시 정확한 출력 토크 제어율을 위하여 매우 중요한 항목이다. 자기포화가 이루어지지 않는 영역에서는 구동조건과 무관하게 일정하다고 가정하는 경우가 대부분이다. 그러나 회전 속도에 따라 기계적, 전기적 손실이 변화하므로 토크 정수도 변화한다.

Fig. 6은 무차원 회전 속도 0.9로 회전할 때 입력 전류 변화에 따른 출력 토크(부하율) 변화 선도이다. 입력 전류 증가에 따라 부하율이 선형적으로 증가하며 토크 정수는 1.08임을 알 수 있다. 이는 자기 회로상에서 자기 포화가 이루어지지 않았음을 의미한다.

Fig. 7은 부하율을 0, 50, 100%로 변화시켰을 때 속도 변화에 따른 입력 전류와 앞서 측정한 기계적 손실에 따른 입력 전류 변화 선도이다. 회전속도 증가시 기계적 손실에 의한 마찰 토크가 일정하므로 입력 전류는 거의 일정하다. 이에 비하여 부하율이 일정한 경우에 속도 증가에 따라 입력 전류가 선형적으로 증가한다. 이는 회전속도 증가에 따라 토크 손실의 증가를 의미하며 기존의 쿨롱 마찰력과 동일한 경향이다. 특히 부하율이 0에서 50, 100%로 증가하는 경우 무차원 회전 속도가 0.1에서 0.9로 증가하게 되면 무차원 입력 전류가 0.06에서 0.07, 0.09만큼 증가하였다. 이는 회전 속도 증가에 따라서 0.065에서 최대 0.1만큼 토크 손실이 발생함을 의미한다. 부하율이 100%인 경우에 토크 정수는 속도 0.1일 때 1.2, 속도가 0.9로 증가하면 0.9로 감소한다.

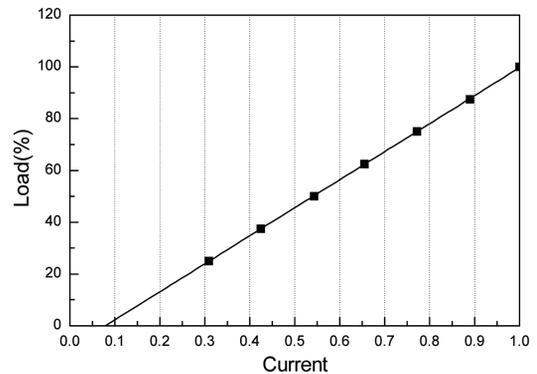


Fig. 6 The variation of load according to the variation of input current at rated speed\*0.9

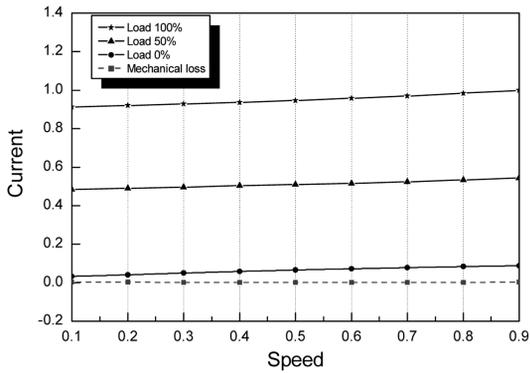


Fig. 7 The input current in the various load and speed

이를 통하여 속도에 비례하는 토크 손실이 기계적 점성력이 아닌 철손실에 의하여 발생함을 알 수 있다. 특히 손실 토크가 회전 속도와 함께 부하율에 따라 변화하므로 이는 철손실에 의하여 발생하였음을 증명한다.

### 3.3 단열 전동기 실험

단열 전동기에 대하여 정격 전류 인가시 회전속도 변화에 따른 동손실과 철손실 및 코일 온도의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 단열 전동기는 회전자에 부착된 영구자석에 의한 철손실이 발생하지 않고 코일에 의한 동손실과 철손실만 발생한다. 따라서 철손실이 비교적 적음을 알 수 있다. 식 (13)을 이용하여 단열 전동기에서 코일과 철심 및 철심과 외부 공기와의 열저항을 계산하면 각각 1.49와 7.79이다. 계산된 열저항은 전동기의 구동조건과 관계없으므로 표준 전동기에 적용하였다.

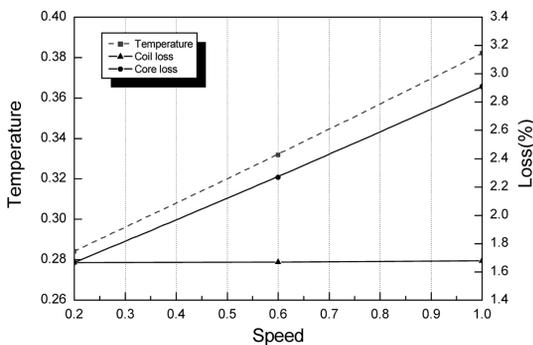


Fig. 8 The loss and converged temperature at rated current in isolated model

### 3.4 부하율에 따른 온도 및 손실 측정

무차원 회전 속도가 0.9일 때 부하율 변화에 따른 온도와 손실을 측정하여 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 도시하였다. 부하율 증가에 따라 코일 온도가 2차 함수로 증가함을 알 수 있다. 이는 Fig. 10에서와 같이 코일의 동손실은 부하율 대비 제곱에 비례하고 철심의 철손실은 선형적으로 증가하기 때문이다. 특히 표준 전동기와 같이 정격 회전 속도가 빠른 전동기는 철손실이 동손실 대비 약 10배 이상 크게 나타남을 알 수 있으므로 전동기 효율 계산시 철손실에 대한 고려가 필수적이다.

### 3.5 회전 속도에 따른 온도 및 손실 측정

무차원 토크인 부하율을 50%와 100%로 각각 고정 후 회전 속도 변화에 따른 코일 온도와 손실을 측정하여 Fig. 11과 Fig. 12에 도시하였다.

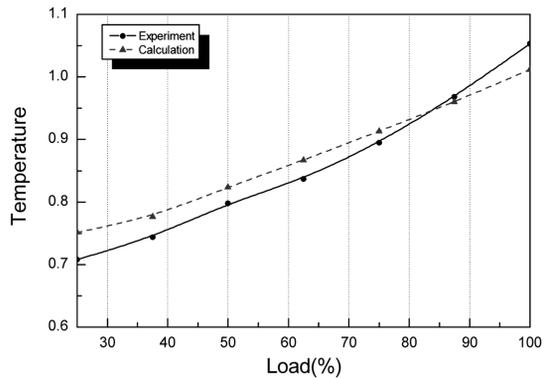


Fig. 9 The converged temperature of a coil in various load at rated speed\*0.9

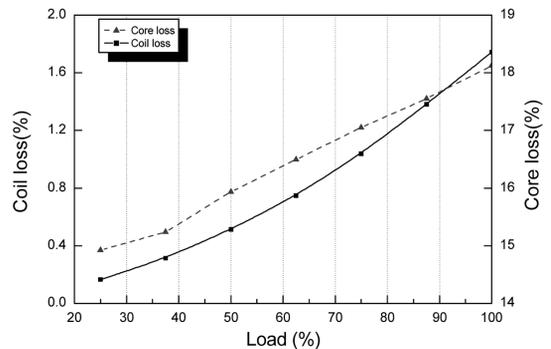


Fig. 10 The loss of a coil and a core in various load at rated speed\*0.9

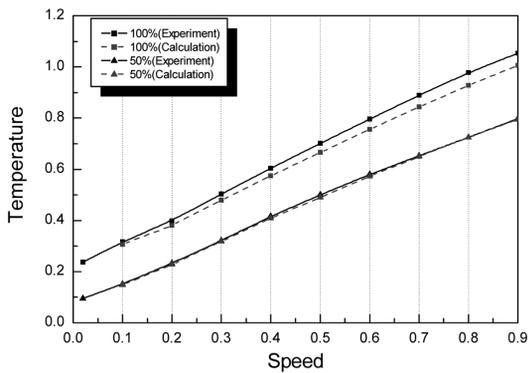


Fig. 11 The converged temperature of a coil according to the variation of speeds in various loads

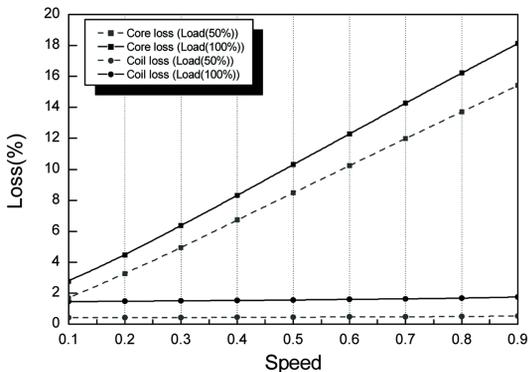


Fig. 12 The losses of a coil and a core according to the variation of speeds in various loads

Fig. 11에서와 같이 회전 속도 증가에 따라 코일 온도는 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, Fig. 12와 같이 철손실도 선형적으로 증가하는데 비하여 동손실은 비교적 일정하다. 무차원 회전 속도가 0.1에서 0.9로 증가할 때 철손실은 부하율 50%일 때 13.7, 100%일 때 15.3으로 증가한다. 이는 코일에 의하여 유도된 자속 밀도의 증가로 철손실이 증가함을 알 수 있다. 이때 동손실 대비 철손실의 비율은 부하율이 50%인 경우 4.1에서 30.0까지 변화하며 부하율이 100%인 경우 1.9에서 10.4까지 변화한다.

철손실은 Lorimer and Lieu<sup>3)</sup>가 제시한 식에서와 같이 히스테리시스에 의한 손실과 와전류에 의한 손실, 그리고 과도 손실로 구성된다. Fig. 12에서와 같이 속도 증가에 따라 철손실이 선형적으로 증가하므로 본 연구에 사용된 전동기에서는 영구자석에 의한 자속 밀도 변화에 따른 히스테리시스 손실이

지배적임을 알 수 있다. 그리고 단일 전동기에서 발생한 철손실 대비 표준 전동기의 철손실이 6배 이상 큼을 통해서도 영구자석에 의한 영향이 지배적임을 검증하였다. 그리고 전동기의 부하율이 낮고 회전 속도가 빠를수록 철손실의 비중이 커진다.

### 3.6 구동 조건에 따른 열전달 해석 및 검증

부하율 및 회전 속도에 따른 열전달 모델링을 수행하기 위해서 전동기 각 부분의 온도를 측정하고 식 (11)에서 식 (14)를 이용하여 열저항을 계산하였다. 부하율이 각각 50%와 100%인 경우에 회전 속도에 따른 무차원화된 열저항의 변화를 Fig. 13에 나타내었다. 코일과 철심간의 열저항과 전동기 몸체를 통한 철심과 공기간 열저항은 단일 전동기에서 계산한 값을 적용하였다. 회전부를 통한 철심에서 공기로의 열저항은 표준 전동기를 이용하여 계산하였다. 회전부를 통한 열저항은 부하율 변화에 따라 고정자 철심에서 발열 위치가 다르기 때문에 11~16%의 차이를 나타내므로 평균값을 이용하여 열저항을 적용하였다. 이를 이용하여 Fig. 4에서와 같이 전동기의 회전 속도에 따른 열전달 모델링을 구성하였다. 이를 검증하기 위하여, 제안된 열전달 모델링으로 계산한 코일의 온도와 실험으로 측정된 온도를 비교하였다.

부하율 변화에 따른 온도변화를 Fig. 9에 도시하였고 회전 속도 변화에 따라 온도 변화를 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 9와 Fig. 11로부터 실험값 대비 계산된 코일 온도가 4% 이내의 오차를 가짐을 알 수 있다.

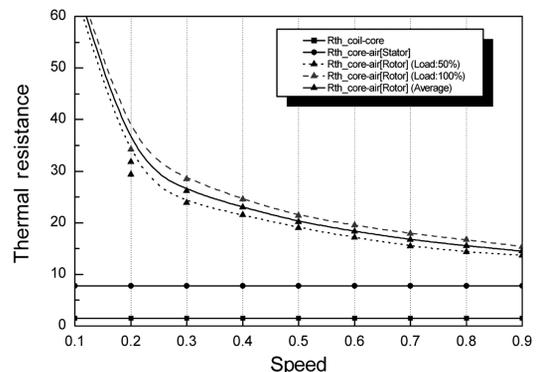


Fig. 13 Thermal resistance variation at various rotation speeds

Table 2 The comparison of result in the experiment, the heat transfer model and the MotorCAD<sup>®</sup>

	Experiment	MotorCAD	Modeling
Speed : 0.6, Load : 50%			
Temperature of a coil	0.58	0.57	0.57
Temperature of a frame	0.49	0.47	-
Ratio of transferred energy through a rotor (%)	-	3.28	3.34
Speed : 0.6, Load : 100%			
Temperature of a coil	0.8	0.74	0.83
Temperature of a frame	0.61	0.6	-
Ratio of transferred energy through a rotor (%)	-	4.23	3.96
Speed : 0.9, Load : 50%			
Temperature of a coil	0.8	0.81	0.8
Temperature of a frame	0.69	0.67	-
Ratio of transferred energy through a rotor (%)	-	5.57	5.77
Speed : 0.9, Load : 100%			
Temperature of a coil	1.05	1.02	1.01
Temperature of a frame	0.82	0.83	-
Ratio of transferred energy through a rotor (%)	-	6.91	6.67

그리고 부하율 50%, 100% 및 무차원 회전 속도 0.6, 0.9인 경우에 대하여 실험, 열전달 모델링 및 전동기 열해석 전문 프로그램인 Motor-CAD<sup>®</sup>를 이용하여 코일 및 프레임의 온도와 회전부로의 열전달량을 비교하였다. Motor-CAD 사용시 전동기 전면 브라켓 고정 방식으로 자연 대류 및 복사 열전달을 고려하였으며 실험시 측정된 손실값을 적용하였다. 제안된 열전달 모델링으로는 프레임 온도를 계산할 수 없고 실험을 통해서 회전부로의 열전달량을 측정할 수 없으므로 이를 제외하고 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 코일 온도는 측정값 대비 제안된 열전달 모델링으로 계산한 값이 최대 3.8%의 오차를 가지며 상용 프로그램은 최대 6.9%의 오차를 가진다. 회전자를 통한 열전달량은 Motor-CAD<sup>®</sup>로 계산한 값 대비 열전달 모델링으로 계산한 값이 최대 6.4%의 오차를 가진다. 이와 같이 열전달 모델링을 수행함으로써 정확하게 코일 온도 및 발생한 열의 전달 경로를 예측할 수 있다.

#### 4. 결론

영구자석형 동기 전동기에서 세가지의 측정 모델을 이용한 구동 조건 변화에 따른 입출력 에너지와 기계 손실을 측정하는 방법을 제안하였다. 그리고 이를 이용하여 동손실 및 철손실을 계산하였다. 표

준 전동기와 단열 전동기의 손실 및 각 부분 온도를 측정하고 속도 변화를 고려하여 열전달 모델링을 제안하였다.

이를 통하여 부하율 및 회전속도에 따른 철손실의 변화 경향을 분석하였다. 특히 고속 영역에서 철손실 발생 경향과 주요 원인을 규명하였다. 부하율이 동일한 경우에 회전 속도가 증가할 때 철손실이 증가함으로써 최대 0.1의 토크 손실이 증가함을 알 수 있었다. 영구자석형 전동기에서 회전 속도 및 부하율 증가에 따라 철손실이 선형적으로 증가하였고, 이는 철손실의 주요 발생 원인이 영구자석에 의한 히스테리시스 손실임을 증명하였다.

열전달 모델링을 통하여 해석한 코일 온도와 실험 및 상용전산해석 프로그램으로 계산한 코일 온도를 비교하여 3.8% 이내로 잘 일치함을 알 수 있었다. 그리고 실험적으로 검증하기 어려운 회전자를 통한 열전달량을 평가하여 전동기내의 열전달 경로를 파악하였다.

제안된 손실 변화 경향과 열전달 모델링을 통하여 실험적으로 측정하기 어려운 과부하 영역에 대한 전동기의 손실 및 온도를 예측함으로써 전동기의 성능 평가와 함께 안정성을 확보할 수 있다.

#### References

- 1) G. Bertotti, "General Properties of Power Losses

- in Soft Ferromagnetic Materials,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol.24, No.1. pp.621-630, 1988.
- 2) G. Bertotti, A. Boglietti, M. Chiampi, D. Chiarabaglio, F. Fiorillo and M. Lazzari, “An Improved Estimation of Iron Losses in Rotating Electrical Machines,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.6, pp.5008-5009, 1991.
  - 3) W. L. Lorimer and D. K. Lieu, “Method for Measuring and Characterizing Core Loss in a Motor,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol.35, No.4, pp.2146-2152, 1999.
  - 4) D. M. Ionel, M. Popescu and S. J. Dellinger, “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.658-666, 2006.
  - 5) M. Popescu, D. M. Ionel, A. Boglietti, A. Cavagnino, C. Cossar and M. I. McGilp, “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, 2010.
  - 6) Y. Enomoto, M. Ito, H. Koharagi, R. Masaki, S. Ohiwa, C. Ishihara and M. Mita, “Evaluation of Experimental Permanent-magnet Brushless Motor Utilizing New Magnetic Material for Stator Core Teeth,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol.41, No.11, pp.4304-4308, 2005.
  - 7) P. Zhang, S. O. Kwon and J. P. Hong, “The Design and Analysis of a High Efficiency Permanent Magnet Reluctance Motor,” ICEMS, pp.775-776, 2006.
  - 8) G. D. Demetriades, H. Z. de la Parra, E. Andersson and H. Olsson, “A Real-time Thermal Model of a Permanent-magnet Synchronous Motor,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.25, No.2, pp.463-473, 2010.
  - 9) J. Fan, C. Zhang, Z. Wang, Y. Dong, C. E. Nino, A. R. Tariq and E. G. Strangas, “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, 2010.