

# 고토크 저속 직접 구동식 회전 모터의 열특성 분석

정 문 경, 이 상 민\*, 최 문 석\*\*, 엄 석 기\*\*\*

한양대학교 기계공학부, \*(주)메트로닉스, \*\*한양대학교 기계공학부

## The Experimental heat transfer Analysis of a High torque and low speed direct drive rotary motor

Moon-Kyung Jung, Sang-Min Lee\*, Moon-Suk Choi\*\*, Sukkee Um\*\*\*

School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

\*Mecapion, Daegu, 704-240, Korea

**ABSTRACT:** The direct drive motor used in a precision motion rotate at about 1/10 speed and high torque comparing with general rotary motor. Excessive heating of the coils cause an exacerbating the heat problems and reducing the performance of motor. Because the rotation speed of the rotor and surrounding air is low, the motor can not be inefficiently cooled, the thermal analysis in the motor is very important. As the variations of rotation speed and torque, the temperature of several parts is measured and the features of the heat transfer is analyzed and improved.

**Key words:** Direct drive rotary motor(직접 구동 회전 모터), Motor conductive thermal analysis(전도 열전달 해석), Thermal resistance(열저항)

### 기 호 설 명

- $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2K$ ]
- $k$  : 열전도계수 [ $W/m \cdot K$ ]
- $T$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]
- $Q$  : 열전달량 [ $W$ ]
- $R$  : 열저항 [ $^{\circ}C/W$ ]
- $Re$  : Reynolds 수
- $Nu$  : Nusselt 수

$v$  : 속도 [ $m/s$ ]

### 하첨자

- eq : 등가(equivalent)
- g : 발생(generation)

### 1. 서 론

직접 구동식 회전 모터는 범용 회전 서보 모터에 비하여 구동 속도가 약 1/10정도로 열전달량이 적다. 그러나 높은 토크를 발생하기 위한 높은 전류가 인가되어 열발생이 매우 크므로 이에 따른 열전달 분석 및 개선을 통한 토크를 최적화하여야 한다. 또한 직접 구동식 회전 모터는 정밀도가 약 5배 이상 높고 그 응용 범위도 반도체 및 FPD 생산 장비, 초정밀 가공기 등 정밀한 모션 제어 분야에 적용되기 때문에 열팽창에 대한 어려움을 평가하기 위하여 정확한 열전달 분석이

### 그리스 문자

- $\nu$  : 동점성 계수 [ $m^2/s$ ]
- $l$  : 특성길이 [ $m$ ]

† Corresponding author  
 Tel./Fax.: +82-2-2220-0432  
 E-mail address: sukkeeum@hanyang.ac.kr

필수적이다. 기존의 모터 내 열해석은 열발생량이 매우 높은 유도(induction) 방식의 회전모터를 중심으로, 주로 전자기 해석에 의하여 모터 효율을 높임으로써 기계적 에너지 발생량을 늘리고 열발생을 줄이도록 수행되어왔다. 최근 BLDC 모터를 중심으로한 영구자석형 모터에 대한 연구도 수행되고 있다.

Staton et al.<sup>(1)</sup>은 모터 내부의 다양한 기계적 사양의 변화에 따른 열해석을 기반으로 각 영향을 분석하였으며, Mellor et al.<sup>(2)</sup>은 유도기형 모터에서 열저항을 통한 수치적 모델링을 제안하였고, 또한 Boglietti et al.<sup>(3)</sup>은 팬이 부착된 유도형 모터에 대하여 간소화된 수치적 모델링을 나타내었다. Negrea et al.<sup>(4)</sup>은 본 논문에서와 같이 영구자석형 모터에 대하여 로터에 부착된 영구자석의 변화에 따른 열해석을 수행하였으며 Kang et al.<sup>(5)</sup>은 다극 BLDC 모터에 대하여 열유동을 수치적으로 해석하였다.

지금까지 연구 결과에서는 주로 수치적인 방법을 주로 이용하였고 모터를 이상적인 원통형 회전체로 모델링하여 내의 열전달을 분석하였으나<sup>(1-5)</sup> 이와 같은 가정은 직경이 작고 길이가 긴 모터가 빠른 속도로 회전하는 유도 방식에서만 적용 가능하다. 따라서 본 연구에서는 초정밀 위치 제어에 사용되는 고토크 저속 직접 구동식 회전 모터의 열특성을 분석함으로써 모터를 구성하는 각 부분의 열저항을 도출하고 이에 따른 열전달 개선 방향을 제시함과 동시에 향후 다양한 모델에 적용 가능한 열전달 모델링을 제시하였다.

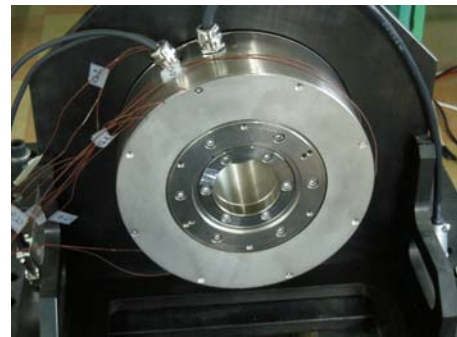
## 2. 실험 모델링 및 수치 모델링

### 2.1 실험 모델 및 실험 방법

실험 대상인 직접 구동식 회전 모터는 Fig. 1과 같으며 크게 회전부(Rotor)와 고정부(Stator)로 나누어지며 이는 베어링으로 결합된다. 회전부는 영구자석과 회전자로 구성되며, 고정부는 코일, 보빈(bobbin), 슬롯(slot), 프레임으로 구성된다. 직접 구동식 회전 모터는 고정부는 브라켓에 고정되고 회전부는 다이내모(dynamo)에 연결하여 정격속도 300rpm으로 회전시키면서 토크를 인가하고 모터내부의 각 부분에서의 온도를 측정하였다. 첫 번째 실험은 구동 토크에 따른 열발생량



(a) Dynamo set



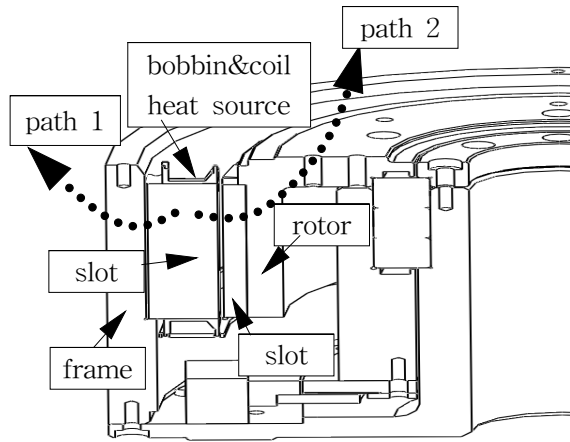
(b) Direct rotary motor with thermo couples

Fig. 1 Measurement kits and a test motor

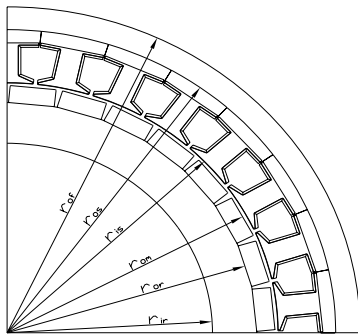
을 계산하기 위하여 인가 토크를 변화시키면서 필요 전류를 측정하였고, 두 번째로 코일의 온도 상승이 80도가 되는 모터의 정격 토크를 선정하기 위하여 인가토크를 변화시키면서 코일온도를 측정하였다. 세 번째로 선정된 정격토크를 인가하면서 정상 상태 도달 후 각 부분의 온도를 측정하여 열저항을 분석하였다.

### 2.2 수치 모델링

직접 구동식 회전 모터의 토크를 발생하기 위한 전기 에너지가 인가되면 코일부에서 열이 발생하고 동시에 모터가 구동되면 슬롯 내부에서 전자기장이 교란됨에 따라 와전류가 형성되어 열이 발생하게 되지만 이에 대한 영향은 매우 적으므로 무시하였다. 코일에서 발생한 열은 Fig. 2와 같이 보빈 및 슬롯을 통하여 프레임으로 전도되며 외부 공기 및 고정 브라켓으로 방출되고, 동시에 모터내부 공기 유동 및 복사를 통하여 영구자석으로 전달되며, 회전자로 전도되어 외부 공기로 대류로 방출되는 것으로 모델링하였다.



(a) Cross-section diagram



(b) Geometric diagram

Fig 2. Schematic diagrams of a test motor

Table 1 Geometric parameter

Parameters	Name	Value
Outer Frame radius[m]	$r_{of}$	0.086
Outer slot radius[m]	$r_{os}$	0.080
Inner slot radius[m]	$r_{is}$	0.066
Outer magnetic radius[m]	$r_{om}$	0.065
Outer rotor radius[m]	$r_{or}$	0.060
Inner slot radius[m]	$r_{is}$	0.066

### 2.3 실험 및 수치 모델의 비교 분석

각 부분의 저항을 Fig 3과 같이 나타내었으며 Fig. 4는 이러한 열 저항을 세부적으로 표시하였다. 또한 계산 가능한 열저항과 접촉 열저항 등의 수치적으로 도출하기 어려운 열저항을 포함하

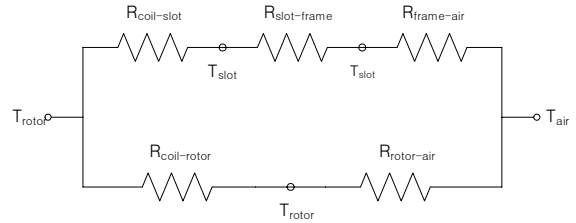
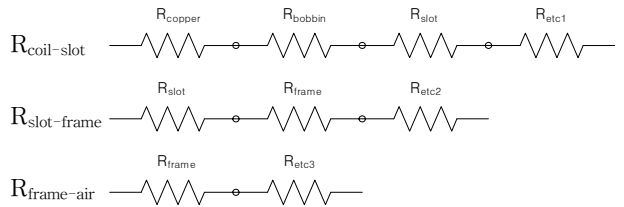
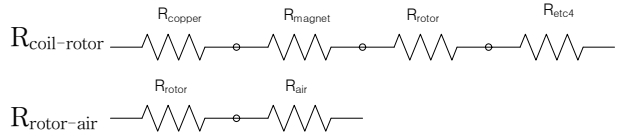


Fig. 3 Heat transfer paths



(a) Thermal resistances in the path 1



(b) Thermal resistances in the path 2

Fig 4. Thermal resistances in detail

고 있으므로 실험값과 비교하여 각각 구분하여 계산하였다.

코일에 인가된 전류에 의하여 발생하는 열량은 식 (1)과 같으며 이는 각 경로에 따라 나누어 전달된다. 실험을 통하여 측정된 정상 상태 도달 후 이러한 경로에 대해 부분별 온도를 이용한 상관 관계식은 식(2), (3)과 같다.

$$Q_g = 3i^2 R = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Path 1 ; } Q_1 &= \frac{T_{coil} - T_{slot}}{R_{coil-slot}} = \frac{T_{slot} - T_{frame}}{R_{slot-frame}} \quad (2) \\ &= \frac{T_{frame} - T_{air}}{R_{frame-air}} \end{aligned}$$

$$\text{Path 2 ; } Q_2 = \frac{T_{coil} - T_{rotor}}{R_{coil-rotor}} = \frac{T_{rotor} - T_{air}}{R_{rotor-air}} \quad (3)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 전류와 토크의 상관 관계

직접 구동식 회전 모터의 토크에 따른 열특성을 분석하기 위해서는 토크와 전류와의 상관 관계를 규명하여야 한다. 이러한 상관 관계를 열특성과 연계하여 해석하여야 하므로 실험 및 수치해석(FEM)을 통하여 Fig. 5와 같이 인가 전류대비 토크를 측정하였다.

#### 3.2 정격 전류의 선정

직접 구동식 회전 모터의 정격 토크를 선정하기 위하여 Fig. 6과 같이 정격속도로 회전시키면서 토크를 변화시켰다. 정상상태 도달 후 온도변화를 측정하였으며 정상 상태 도달후 코일부 온도 상승이 80°C일 때의 토크인 16.45Nm를 기준으로 열특성을 분석하였다.

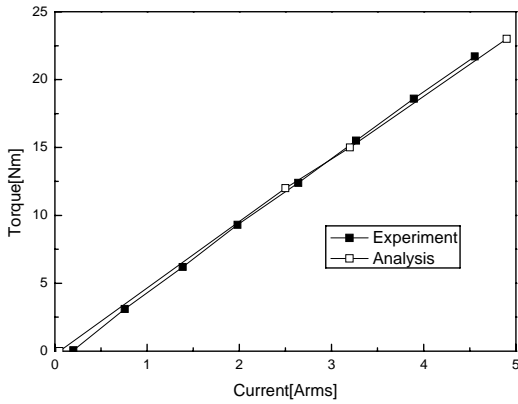


Fig. 5 Torque variation according to input current

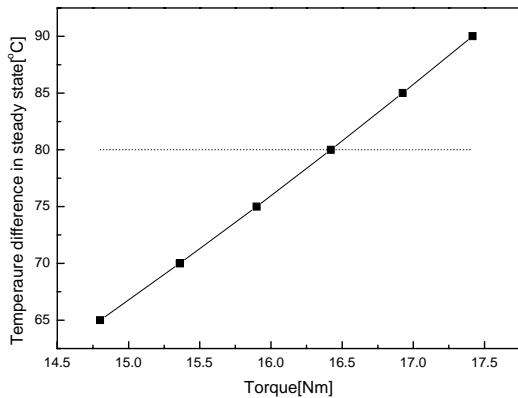


Fig.6 Torque variation according to input current

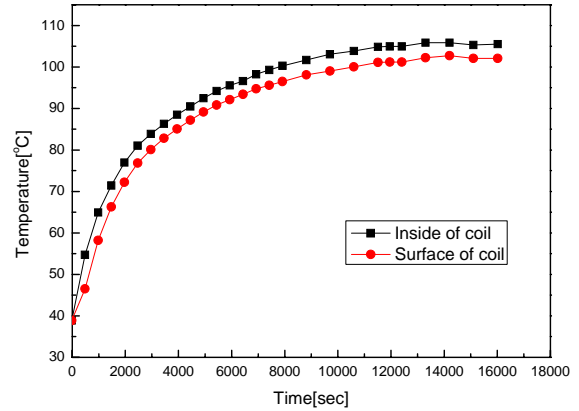


Fig. 7 Temperature variation of coil

#### 3.3 정상 상태시 열저항 계산

정격 속도 및 정격 토크로 구동한 모터의 수렴 온도는 Fig. 7과 같으며 측정 결과는 Table 2에 나타내었다.

정격 토크 발생을 위한 인가 전류를 이용하여 코일에서 발생하는 열량을 도출한 후 실험에서 측정된 각 부분 온도를 통해 Fig. 3에서의 열저항을 계산한다. 이때 두 번째 열전달 경로 중에서  $R_{rotor-air}$ 는 회전자표면으로의 전도 열저항이며 표면에서의 대류열저항 대비 매우 작으므로 무시하였고 식(4)~식(8)로부터 8.11[°C/W]의 저항값을 얻을 수 있었다. 또한 식(3)을 이용하여 경로2로 전달되는 열량( $Q_2$ )이 6.14W(8.6%)임을 알 수 있었으며 식 (2), (3)을 통해 각 부분의 열저항을 계산한 후 결과를 Table 2에 표시하였다. 이를 통하여 코일에서 발생하는 열량의 90%이상은 경

Table 2 Heat generation and temperature of several parts

Parameters	Value
Heat generation	
Heat generation	71.4
Resistance of Phase	2.187
Rated current	3.3
Temperature in steady state	
$T_{air}$ [°C]	25
$T_{coil}$ [°C]	105
$T_{slot}$ [°C]	92
$T_{frame}$ [°C]	89
$T_{rotor}$ [°C]	70

Table 3 Heat generation and temperature of several parts in detail

Heat generation		Value
Q <sub>1</sub>	[W]	61.3
Q <sub>2</sub>	[W]	6.1
Thermal resistance		Value
R <sub>coil-slot</sub>	[°C/W]	0.18
R <sub>slot-frame</sub>	[°C/W]	0.03
R <sub>frame-air</sub>	[°C/W]	1.01
R <sub>path1</sub>	[°C/W]	1.23
R <sub>coil-rotor</sub>	[°C/W]	4.83
R <sub>rotor-air</sub>	[°C/W]	8.04
R <sub>path2</sub>	[°C/W]	13.00
R <sub>total</sub>	[°C/W]	1.12
Thermal resistance in detail		
R <sub>copper</sub>	[°C/W]	0.0001
R <sub>bobbin</sub>	[°C/W]	0.0336
R <sub>slot</sub>	[°C/W]	0.0086
R <sub>etc1</sub>	[°C/W]	0.01415
R <sub>frame</sub>	[°C/W]	0.0009
R <sub>etc2</sub>	[°C/W]	0.0211
R <sub>etc3</sub>	[°C/W]	1.0098
R <sub>magnet</sub>	[°C/W]	0.0073
R <sub>rotor</sub>	[°C/W]	0.0283
R <sub>etc4</sub>	[°C/W]	4.8466
R <sub>air</sub>	[°C/W]	8.1372

로 1을 통하여 프레임으로 전달되어 냉각됨을 알 수 있고 그중에서 프레임과 공기와의 접촉면을 통한 열저항은 82.5%를 갖는다. 특히 모터 내부의 각 부분의 보다 상세한 열저항을 수치적으로 비교하여 각 부분의 접촉 열저항 및 대류 열저항 등을 계산할 수 있고 이를  $R_{etc}$ 로 표현하였다. 대류 열전달이 발생하는  $R_{etc3}$ ,  $R_{etc4}$ ,  $R_{air}$ 의 값이 기타 다른 열저항대비 50~400배 정도 크므로 각 부분의 접촉 열저항은 매우 작음을 알 수 있다.

$$l_{eq} = \sqrt{R_{or}^2 \pi} \quad (4)$$

$$Re = \frac{v_{eq} \cdot l_{eq}}{\nu} \quad (5)$$

$$N = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{1/3} \quad (6)$$

$$h_{air} = \frac{k_{air}}{l_{eq}} Nu \quad (7)$$

$$R_{rotor-air} = \frac{1}{h_{air} R_{or}^2 \pi} \quad (8)$$

Table 4. Heat generation and temperature of several parts in improved model

Heat generation		Value
Q <sub>g</sub>	[W]	116.8
Q <sub>1</sub>	[W]	106.7
Q <sub>2</sub>	[W]	10.1
Thermal resistance		Value
R <sub>coil-slot</sub>	[°C/W]	0.18
R <sub>slot-frame</sub>	[°C/W]	0.03
R <sub>frame-air</sub>	[°C/W]	0.51
R <sub>path1</sub>	[°C/W]	0.72
R <sub>coil-rotor</sub>	[°C/W]	2.68
R <sub>rotor-air</sub>	[°C/W]	4.98
R <sub>path2</sub>	[°C/W]	7.66
R <sub>total</sub>	[°C/W]	0.65
Temperature		Value
T <sub>coil</sub>	[°C]	102.00
T <sub>slot</sub>	[°C]	82.30
T <sub>frame</sub>	[°C]	79.00
T <sub>rotor</sub>	[°C]	75.00
T <sub>air</sub>	[°C]	25.00

따라서 모터의 열전달을 개선하기 위해서는 프레임과 공기 간의 열전달을 향상시켜야 하며 이에 따라 가공한 흰을 통해 열저항을 약 50%로 줄인 후 수치 모델링을 한 결과 전체 열저항은 39.1% 감소하고 동일한 모터에서 28.1%의 정격 토크가 향상됨을 알 수 있었다. Table 4는 이에 대한 결과이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고토크 저속 직접 구동식 회전 모터의 정격 토크를 발생하기 위한 전류 및 발생 열 및 냉각에 대하여 실험을 통해 각 부분의 온도를 측정하여 분석하였다. 이를 기반으로 열저항을 적용한 수치 모델링을 제안하고 각 부분의 열저항을 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 90%이상의 열전달은 코일을 감싸고 있는 슬롯과 프레임을 통하여 공기중으로 전달되며, 이때 대류 열저항이 82.5%를 차지한다.

(2) 각 부분의 열저항 및 접촉 열저항을 계산하여 기구적인 사양이 다른 모터에도 적용 가능한 모델을 제안하였다.

(3) 대류 열전달을 향상시키기 위하여 프레임에 환을 가공하여 열저항을 50%로 감소시키는 경우에 28.1%의 토크 개선효과를 얻을 수 있다.

### 참고 문헌

1. Staton, D., and Boglietti, A., 2003, Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis, Proceedings of the IEMDC, pp. 747-755.
2. Mellor, P.H., Roberts, D., Turner, D.R., 1991, Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design, Proceedings of IEEE, Vol. 138, No. 5, pp. 205-218.
3. Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., and Pastorelli, M., 2002, A simplified Thermal Model for Variable-Speed Self-Cooled Industrial Induction Motor, Conference record of the 37th IAS Annual Meeting, Vol. 2, pp. 723-730.
4. M. Negrea and M. Rosu, 2001, Thermal Analysis of a Large Permanent Synchronous Motor For Different Permanent Rotor Configurations, Proceedings of International Electric Machines and Drives Conference 2001, pp. 777-781.
5. Kang, S. J., Lee, K. S., Wang, S. and Shim, H., 2007, Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design, Trans. of the KSME(B), Vol. 31, No. 9, pp.772-779