

## PMDC 전동기의 브러시 접촉저항 산정 방법

송백기\*, 이병화\*, 권순오\*, 홍정표\*  
한양대학교\*

## A new method for calculating contact resistance of brush in PMDC motors

Baik-Kee Song\*, Byeong-Wha Lee\*, Soon-O Kwon\*, Jung-Pyo Hong\*  
Hanyang University\*

**Abstract** - A new method for calculating contact resistance of brush in PMDC(Permanent Magnet Direct Current) motors is described in this paper. When designing the motor, it is very difficult to estimate contact resistance of brush. Thus, mathematical modeling of contact resistance of brush from the mechanical point of view is presented. At the result, this method is verified by comparing value of contact resistance of brush through a new method and through the experiment, also result of characteristic analysis considering contact resistance of brush is shown.

## 1. 서 론

DC전동기는 구조와 작동원리가 비교적 간단하며, 회전제어가 쉬워 제어용 전동기로서 아주 우수한 특성을 가지고 있다. 가격도 저렴하여 여러 방면에서 널리 사용되고 있다.[1]

영구자석형 계자 직류(Permanent Magnet Direct Current, PMDC) 전동기는 자석이 영구자석으로 된 직류전동기로, 권선 계자형 직류전동기와 비교해서 적용에 따라 많은 장점을 가지고 있다. 먼저 이 전동기는 외부 자계회로가 불필요하므로 자계회로에서의 동손을 걱정할 필요가 없다. 또 계자권선이 없으므로 공간과 무게를 줄일 수 있다. PMDC 전동기는 특히 경비와 공간이 필요한 타여자 회로가 없으므로 1마력 이하 또는 아주 작은 크기의 전동기에서 일반적으로 쓰인다.

PMDC 전동기 설계의 신뢰성과 경쟁력을 확보하기 위해서는 실제 전동기 제작시 전동기 사양을 만족하는 전동기 설계가 되어야 한다. 특히, PMDC 전동기의 경우에는 브러시와 정류자 사이의 접촉저항이 고속에서 크게 발생하는데, 브러시 접촉저항이 정확하게 산정되지 않으면 정확한 전동기의 특성을 얻을 수 없다. 결과적으로, 설계시 브러시 접촉저항을 고려한다면, 실제 전동기 사양을 만족하는 설계를 가져갈 수 있다.

따라서, 이 논문에서는 PMDC 전동기의 브러시 접촉저항을 수식적으로 접근하여, 이 파라미터를 반영한 특성해석 결과를 실험치와 비교 검증함으로써 본 논문의 타당성을 확인하였다.

## 2. 이 론

## 2.1 직류 전동기 기본 이론

자계 내에서 움직이는 도체에는 자속의 크기와 속도에 비례하는 전압이 유도되며 이것을 유기기전력 또는 역기전력이라 하며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{P}{a} \Phi \frac{n}{60} = k_e \omega_r \quad (1)$$

$$k_e = \frac{P\Phi Z}{2\pi a} \quad (2)$$

여기서  $E$ ,  $k_e$ ,  $P$ ,  $a$ ,  $Z$ ,  $\Phi$ ,  $w_r$  은 각각 역기전력, 역기전력상수, 극수, 병렬회로수, 도체수, 자속, 각속도를 각각 나타낸다. 한편, 기계적인 유효분토크와 손실분 토크를 합한 발생토크는 식 (3)과 같다. 여기서  $k_t$ ,  $I_a$  는 각각 토크상수와 전류를 나타낸다.

$$T = \frac{Z}{2\pi} \frac{P}{a} \Phi I_a = k_t I_a \quad (3)$$

$$k_t = \frac{P\Phi Z}{2\pi a} = k_e \quad (4)$$

전기자회로에서 단자전압과 역기전력과의 관계는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.  $V_a$ 는 전기적 입력이며,  $R_a$ 와  $R_b$ 는 각각 권선저항과 브러시 접촉저항을 나타낸다.

$$V_a = E + I_a (R_a + R_b) \quad (5)$$

이 양변에  $I_a$ 를 곱하면 식 (6)이 성립한다.

$$V_a I_a = E I_a + I_a^2 (R_a + R_b) \quad (6)$$

즉, 전기자회로에 공급되어지는 전기에너지는 기계에너지와 권선저항, 브러시 접촉저항에 의한 열에너지로 변환되어진다.

## 2.2 브러시 접촉저항 산정을 위한 수학적 모델링

권선저항은 전동기의 각속도에 상관없이 일정하지만, 브러시 접촉저항은 속도에 따라 변한다. 회전 속도가 증가하면 브러시 접촉저항도 증가하고, 속도가 감소하면 브러시 접촉저항은 감소한다. 브러시 접촉저항은 정류자편과 브러시 사이의 기계적 마찰에서 기인한다. 기계적 마찰 에너지는 속도에 비례하며, 열에너지로 손실되는 에너지이다. 따라서 브러시 접촉저항에 의해 손실되는 모든 에너지는 브러시와 정류자 사이의 마찰에 의한 에너지 손실과 같다고 가정하여 수학적 모델링에 접근하였다. <그림 1>과 같이 한 개의 정류자에 두 개의 브러시가 접촉되어 구성되어 있으므로 이를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.  $F_f$ ,  $v$ 는 각각 마찰력과 회전자의 선속도이다.

$$I_a^2 R_b = 2F_f v \quad (7)$$

수직항력은 브러시를 미는 용수철의 탄성력과 같으므로, 식(8)과 같이 나타내고 마찰력은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $N$ 은 수직항력,  $x$ 는 용수철의 줄어든 길이,  $\mu$ 는 브러시와 정류자 사이의 마찰계수를 나타낸다.

$$N = F_k x \quad (8)$$

$$F_f = \mu N = \mu(kx) \quad (9)$$

즉, 기계적 마찰에 의한 에너지는, 식 (10)과 같이 나타낼 수 있고, 브러시 접촉저항에 의한 열적 손실과 같다. 여기서  $r$ 은 회전자의 체외경 길이다.

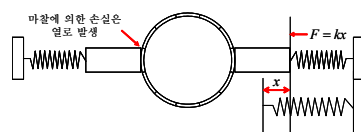
$$P_{contact} = 2F_f v = 2\mu kx(r\omega_r) = I_a^2 R_b \quad (10)$$

식 (10)를 이용해 식 (6)에 대입해서  $I_a$ 에 대해서 정리하면, 식 (11)과 같이 정리할 수 있다.

$$R_a I_a^2 + (E - V_a) I_a + 2\mu kx(r\omega_r) = 0 \quad (11)$$

이를 근의 공식을 이용해서  $I_a$ 를 풀고, 식 (5)에 대입하면 브러시 접촉저항을 식 (12)와 같이 얻을 수 있다.

$$R_b = \frac{V_a - E}{I_a} - R_a \quad (12)$$



<그림 1> 브러시 접촉저항 모델

### 3. 실험 방법 및 특성해석

#### 3.1 실험방법

<그림 2>와 <표 1>은 대상전동기 형상 및 전동기 사양을 나타낸다. 전동기 특성해석을 위해 PC를 이용하여 각 전압에 따라 토크를 가변시켜 가며 전동기의 회전속도, 역기전력, 전류 등을 측정하였다. 오차를 줄이기 위해서 3회 반복 실험하였으며, 상온에서 실험하였다. 측정 장비는 <그림 3>과 같이 구성하였다. DC Power source를 이용해 동일 전압 하에서, Dynamometer를 통해 부하를 바꿔가면서 속도, 토크, 전류 및 효율을 측정하였다. Power Analyzer를 통해 위와 같은 부하에 따른 전동기 특성을 확인하였다. Oscilloscope로는 정확한 전류와 전압이 인가되는지를 확인하였다. 브러시 접촉저항을 제외한 권선저항을 측정하기 위해서 전동기에서 브러시를 제거한 후 옴미터를 통해 전기자 권선저항만을 측정하였다.

#### 3.2 수식에 따른 특성해석

용수철의 탄성계수는 실험을 통해 측정하였으며, 브러시와 정류자 사이의 마찰계수는 관련논문을 참고하였다. <표 2>와 같이 구리, 흑연, 수지로 제작된 브러시의 흑연 함량에 따라 마찰계수가 각각 다르다. 해석 시에는 평균 마찰계수를 사용하였다. 또한, 실험치와 비교하기 위해 실험에서 측정한 토크상수와 역기전력 상수를 이용하여, 수식적으로 특성 해석을 수행하였다.

### 4. 실험 및 해석결과

#### 4.1 브러시 접촉저항

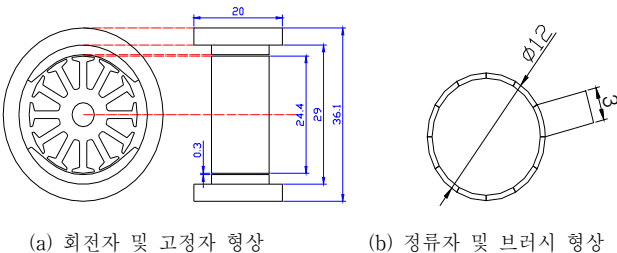
<그림 4> (a)는 토크에 따른 브러시 접촉저항을 실험결과와 해석 결과로 나눠서 나타낸 것이다. 브러시 접촉저항은 토크가 증가함에 따라 비선형적으로 감소한다. 토크는 전동기 회전속도에 반비례하므로 속도가 증가할수록 단위 시간당 마찰력을 받는 거리가 길어져 기계적 마찰 손실이 커졌기 때문이다.

#### 4.2 PMDC 전동기의 운전 특성

<그림 4> (b), (c), (d)는 PMDC 전동기의 운전 특성을 알아보기 위해 토크에 대한 속도, 전류, 효율 곡선을 실험 결과와 접촉저항을 제외한 해석 결과, 접촉 저항을 고려한 해석 결과 총 3가지로 나눠 비교한 것이다. 접촉저항을 고려한 해석결과가 실험결과와 가깝게 나타냄을 확인할 수 있다.

##### 4.2.1 N-T curve

전압의 동일 입력상에서 마찰에 의한 손실로 출력 성분이 작아지므로 <그림 4> (b)와 같이 동일 토크 상에서 속도가 감소하며, 실험양상과 더욱 비슷한 양상을 띄게 된다.



<그림 2> 대상 모델



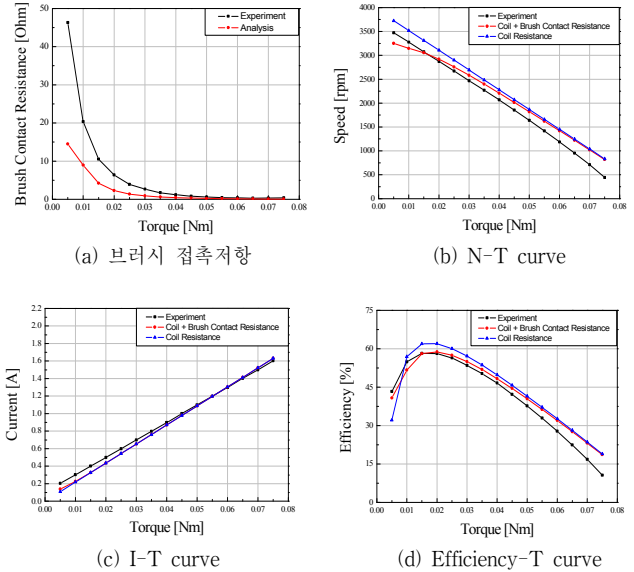
<그림 3> 실험장치 구성

<표 1> 전동기 사양

입력전압	21 [V]
권선저항	10.15 [ $\Omega$ ]
역기전력 상수	0.051 [V/rad/s]
토크 상수	0.046 [kgf·cm/A]

<표 2> 흑연 함량에 따른 브러시 마찰 계수<sup>[2]</sup>

흑연 함량 [%]	마찰 계수
0	0.31
15	0.29
35	0.25
55	0.24



<그림 4> 실험장치 구성

##### 4.2.2 I-T curve

전류는 토크가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. <그림 4> (c)에서는 동일토크에 대한 전류의 그래프를 나타내었다. 브러시 접촉저항을 고려할 때, 권선저항만을 고려한 해석결과보다 더 유사한 양상을 가져왔다. 이는 브러시 접촉저항을 더 큰 전류가 입력으로 들어가는 것을 볼 수 있다.

##### 4.2.3 Efficiency-T curve

<그림 4> (d)와 같이 전동기의 효율은 전기적 입력에 대한 기계적인 출력의 비를 의미하는데, 실험값과 더욱 유사한 양상을 나타내었다. 이는 브러시 접촉저항을 고려하면서, 동일 토크에 대하여 정확한 전류와 속도값이 산정되었기 때문이다.

### 5. 결 론

본 연구는 PMDC 전동기의 역기전력 상수와 토크 상수, 브러시 접촉 저항 등의 파라미터들을 기본이론 및 수학적 모델링을 통해서 산정한 후, 그 특성해석 결과를 실험 결과와 비교·검증하였다. 전동기의 속도, 전류, 효율 등의 브러시 접촉저항을 고려한 해석 결과가 실험치와 비교했을 때 권선저항만을 고려한 해석결과보다 더 유사한 양상을 가져왔다. 따라서, 브러시 접촉저항의 수학적 모델링의 타당함을 입증하였다. 본 연구에서와 같이 역기전력 상수와 토크 상수뿐만 아니라, 브러시 접촉 저항도 수식화하여 부하에 따른 정확한 브러시 접촉 저항값을 산정할 수 있다면 전동기 설계 시 원하는 특성을 지닌 전동기를 정확하게 설계할 수 있을 것으로 생각된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Stephen J. Chapman, Electric machinery Fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp. 511~539, 2004
- [2] Park, H. K. and Jang, H., "Characteristics Electric Signal Transmission according to Relative Amounts of Graphite in Copper-Graphite Brush", Vol. 32, No. 1, pp. 318~331, 2000