한국정밀공학회지 제18권 제10호 (2001년 10월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 10, October 2001.

와전류 동력계에서 계자전류를 이용한 부하토크의 측정에 관한 연구

문병수*, 이응석*, 이형석**

A Study on the Measurement of Load Torque by the Field Coil Current in an Eddy Current Dynamometer

Byung Su Mun*, Eung Suk Lee* and Hyung Seok Lee**

ABSTRACT

Commercial eddy current dynamometers control the torque of rotating body, power supply machine, with the field coil current being operated as a braking force. In this paper, we studied the relation between field coil current and torque load of eddy current dynamometer. By the torque measuring analysis of eddy current dynamometer, it is linear relation between the brake force measured from a torque meter which is installed at the case of dynamometer and the multiplied shaft rpm by the squares of field coil current ($N \times I^2$). To prove the relation, it was experimented and showed that the torque operated by the rotating body can be measured with the shaft rpm and the field coil current of the eddy current dynamometer. This result shows a possibility that eddy current dynamometer can measure the torque of rotating body without a torque measuring device, such as load cell.

Key Words : Eddy current dynamometer(와전류 동력계), Load cell(토크센서), Field coil(계자코일), Linearity (직진성), Braking force(제동력)

1. 서 론

도체를 통과하는 자속량이 변화하거나, 또는 도체와 자속이 상대적으로 운동할 때 그 도체에는 전자유도 작용에 의해 기전력이 유도되며 이 기전력에 의해 유도된 전류는 도체 중 저항이 가장 적은 곳으로 회로를 형성하여 흐르는데 이와 같은 전류를 와전류(eddy current)라 한다. 이러한 와전류를 이용하여 엔진 및 모터 등과 같이 회전동력 발생장치의 토크를 측정하는 설비를 와전류 동력계라 한다. 여기서 와전류 전기동력계는 요동자(casing)에 여자코일을 설치하고 코일에 전류를 공급하여 폐회로의 자속을 형성한 후, 이 자계 내에서 유도자 회전판을 원동기에 의해 회전시키면 이 회전판에 와전류가 발생하고 이 전류에 의해 회전판에 제동력이 발생하여 원동기의 기계적 회전에너지를 열 에너지로 변환시켜 동력을 흡수함으로서 원동기의 회전토크를 측정하는 장치이다. 따라서 동력계에 작용하는 토크의 크기는 회전판에 제동력을 작용시키기 위해서 공급하는 여자전류와 회전판의 회전속도

접수 2001년 2월 26일 접수
* 충북대학교 기계공학부
** 주성대학 자동차학과

와의 함수임을 추측할 수 있다. 이와 같이 회전속도와 여자전류의 크기로 회전토크를 구하려는 시도는 모터와 같이 회전동력을 발생시키는 원동기의 경우에는 많은 연구가 이루어져 출력토크 계산에 관련된 특허가 출원되고 있다.[1] 또한 모터와 같이 회전동력을 발생하는 원동기의 경우, 종래의 토크상수는 회전시 소요되는 전류의 크기에 관계없이 일정한 것으로 되어 있으나, 실재의 경우 모터의 토크상수는 각 순간의 전류량과 속도의 크기에 따라 보정이 필요함을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 동력을 발생하는 모터의 경우와는 반대로 동력을 흡수하는 동력계에 대해서도 위와 같은 논리를 적용하여 동력계의 여자코일로부터 측정되는 계자전류량 및 동력계 회전속도 이용하여 토크센서로부터 측정되는 부하 토크량을 구하고자 한다.

2. 계자전류를 이용한 토크 측정

동력계는 회전체에 제동하중(load)을 가하면서 동력계 중심에서부터 일정거리 D에 토크센서를 부착하고 이에 대한 반발력을 측정함으로서 토크를 측정한다. Fig.1(a)에서 동력계에서 측정된 반발력을 G라 하면 토크 T는 식(1)로 되고, 와전류 동력계의 경우 내부 회전판에서 발생하는 제동력(F)과 회전판과 자극이 겹치는 폭 중심 반경(r)의 곱과 크기가 같게된다. 이때 1회전당 일 W로부터 출력 P는 일반적으로 식(1)과 같다. 와전류 제어형 전기동력계의 구조는 Fig.1(b)에서 흡수 토크량을 측정하기 위한 요동자와 전자유도 작용을 위한 회전판으로 되어 있다. 요동자에 여자코일을 설치하고 여기에 직류전류를 흐르게 하여 폐회로의 자속을 만들고, 이 자속의 자력선의 직각방향으로 도체로 된 회전

$$T = G \cdot D = F \cdot r, \quad W = 2\pi D \cdot G$$
$$P = \frac{2\pi T \cdot N}{60\alpha}, \quad \alpha : \text{단위환산계수} \tag{1}$$

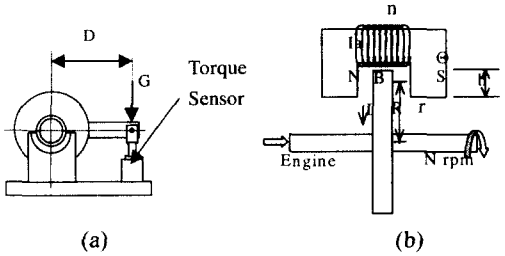


Fig. 1 Principle of eddy current dynamometer

판을 설치한후 원동기 등을 이용하여 회전시키면, 이 회전판에 있는 전자가 Lorentz 힘의 영향으로 기전력이 유도되어 와전류가 흐르게 된다. 또한 회전판 내부 유도전류와 자극사이에는 전자력이 회전판에 제동력으로 작용하게 되어, 회전판의 운동이 저지된다. 이때 회전판의 제동력은 계자코일이 형성하는 자속에 비례하는데, 이 자속은 코일에 흐르는 전류(I)에 비례하므로, 회전원판의 제동력제어는 계자코일 전류(Ia)를 제어하여 가능해진다. 회전판에 제동력이 발생할 경우, 계자코일 설치부위(요동자)에는 회전판의 회전방향과 같은 방향으로 회전판의 제동력과 같은 크기의 힘을 받게 되며, 결국 요동자가 원판의 회전방향과 같은 방향으로 회전하게 된다. 따라서 이 요동자에 암을 설치하고 그 끝에 스프링저울이나 로드셀 같은 토크센서를 설치하여 반발력을 측정하여 흡수 토크량을 측정하게 된다. 일반적으로 철심에 유도된 기자력θ 는 식(2)와 같이 되며, A를 자력선의 직각인 자장의 단면적, R_m을 계자철심 저항으로 하면, 이 기자력에 의해 형성되는 자속으로부터 자속밀도 B는 식(2)와 같다.

$$\Theta = I \cdot n, \quad \Phi = \frac{\Theta}{R_m}, \quad n: \text{계자코일 회수}$$
$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{\Theta}{A \cdot R_m} = \frac{Ia \cdot n}{A \cdot R_m} \tag{2}$$

여기서 유효길이가 L인 도체가 속도 v 로 자력선과 각θ 방향으로 움직일 때 도체에 발생하는 유도기전력 E는 식(3)과 같다.

$$E = B \cdot L \cdot v \cdot \sin\theta \tag{3}$$

위 식을 와전류 동력계에 적용하면 L은 회전판에 자속이 통과하는 폭 h가 되며, θ 는 동력계의 경우 자력선에 대해 회전판이 직각으로 설치되므로 즉 $\theta = 90°$ 가 되어 $\sin\theta$ 항이 식에서 빠지게 된다. 그러나 v 는 회전판의 반경에 따라 변함으로 회전판과 여자권선이 겹치는 폭 중심에서 회전속도는 $2\pi rN/60$가 된다. 회전판의 회전수가 N, 저항이 R이면 결국 식(4)로 표현된다.

$$I = \frac{E}{R} = \frac{B \cdot h \cdot v}{R} = \frac{Ia \cdot n}{A \cdot R_m} \cdot \frac{h \cdot v}{R} \tag{4}$$
$$= \frac{Ia \cdot n}{A \cdot R_m} \cdot \frac{h}{R} \cdot \frac{2\pi rN}{60}$$

또한 도체에 작용하는 제동력 F를 정리하면, L은 h로, sinθ =1로 대치될 수 있으며, I 대신 식(4)를 대입하여 정리하면 식(5)와 같다.

$$F = B \cdot L \cdot I \cdot \sin\theta$$
$$= \frac{Ia \cdot n}{A \cdot R_m} \cdot h \cdot \frac{Ia \cdot n}{A \cdot R_m} \cdot \frac{h}{R} \cdot \frac{2\pi rN}{60}$$
$$= \frac{\pi r n^2 h^2}{30 A^2 R_m^2 R} \cdot Ia^2 N \qquad (5)$$
$$\therefore F = K' \cdot Lq, \quad K' = \frac{\pi r n^2 h^2}{30 A^2 R_m^2 R}$$

식(5)에서 $Ia^2 \cdot N$을 부하량으로 하고 본 논문에서는 새로운 변수 Lq로 정의한다. 식(5)에서 원판인 경우 A=2π rh로 간단하게 표현이 가능하나 실제 회전판의 경우 유도된 와전류의 흐름방향제어 및 자속의 맥동을 이용하여 회전판에 발생하는 제동력 향상을 위해, 회전판의 형상을 치차 모양으로 되어 수식적으로 간단히 표현되지 않는다. 그러나 회전판의 형상에 따라 발생하는 제동력의 크기는 차이가 있을 수 있으나 일정한 크기의 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 따라서 회전판의 형상이 달라도 제동력 F는 계자코일 전류와 회전수만의 함수가 된다. 즉 동력계 내부의 구조적인 특성으로 결정되는 상수 K' 값을 구하고 그때의 Ia와 회전수 N으로 구해지는 부하량 Lq를 측정하면 회전판에 작용하는 힘 F를 구할 수 있다. 또한 동력계 내부에서 작용하는 토크와 외부에서 측정되는 토크의 크기는 같고, 이를 이용하면 식(6)과 같다.

$$T = G \cdot D = F \cdot r = K' Lq \cdot r$$
$$G = \frac{K' r}{D} \cdot Lq, \quad \therefore G = K \cdot Lq \qquad (6)$$
$$\text{단, } K = \frac{K' r}{D} = \frac{\pi r^2 n^2 h^2}{30 A^2 R_m^2 RD}$$

식(6)은 동력계에서 흡수하는 토크나 토크센서에서 측정되는 G값을 부하량 Lq값으로 표시한 것이다. 같은 방법으로 동력계 흡수동력 P를 계자전류와 회전속도로 표시하면 식(7)과 같다.

여기서 식(6),(7)에서 정의한 상수 K항들은 회전판의 저항 R을 상수로 간주한 것이며, 냉각수를 충분히 공급하여 회전판의 온도를 일정하게 유지할 경우 R은 상수처리가 가능하다. 그러나 회전판의 온도가 변하여 회전판의 저항이 K에 영향을 미칠 경우 냉각수 온도에 따라 K값을 보정 작업할 필요가 있다. 이상과 같이 전개된 식들의 결과를 요약해 보면, 앞서 언급한 바와 같이 동력계의 계자전류와 회전수로 토크센서 측정값을 대신할 수 있음을 나타내고 있다. 그러나, 동력계의 구조적 특성을 나타내는 상수항 K값은 이론적으로 구할 수 없고 실험을 통해 구해야 할 필요성이 있다.

$$P = \frac{2\pi TN}{60\alpha} = \frac{2\pi}{60\alpha} \cdot K' Lq \; r \cdot N$$
$$\therefore P = K'' \cdot N \cdot Lq \qquad (7)$$
$$K'' = \frac{2\pi}{60\alpha} K' r = \frac{\pi^2 r^2 n^2 h^2}{900 A^2 R_m^2 R\alpha}$$

3. 동력계 실험 및 데이터 분석

실험 동력원으로 불규칙 동력 발생 엔진과 반발력센서로 스프링 저울을 사용하는 엔진동력계와 균일 동력 발생 모터 및 로드셀을 사용하는 모터동력계를 사용하여 수행되었다. 실험모드는 1) 일정 회전수를 유지한 상태에서 동력원의 출력을 변화시키는 정속도 제어모드, 2) 동력계에서 일정 토크를 작용시키고 있는 상태에서 동력원의 출력을 변화시키는 정토크 제어모드, 3) 계자전류를 일정하게 유지한 상태에서 동력원의 출력을 변화시키는 정전류 제어모드, 4) 정전류 제어모드의 반대인 동력계의 출력이 일정한 상태에서 계자전류의 크기를 변화시키는 역전류제어모드 등을 동력계의 제어특성에 맞게 적용하였다. 엔진동력계는 동경메타의 와전류 제동형 전기동력계(Model GW(DW)E, 100 Ps, 7000Rev/min, Spring balance type)를 사용하였다. 회전동력원으로는 최고출력 40Ps, 2164cc의 디젤엔진을 사용하였다. 동력계의 권선코일에 소요되는 전류량은 Scope meter (10mV/A)를 사용하여 간접 측정하고, 동력계의 냉각수 입, 출구 온도는 열전대(분해능 1°F) 및 16 bit A/D변환기를 이용하여 측정하였다. 모터동력계는 스위스 Vibro-meter사의 Eddy current dynamometer를 이용하였다 (Fig. 5). 동력원으로 사용된 모터는 AC servo motor (5kW) 이며, 회전수는 동력계에서 제어된다. 동력계에 사용된 로드셀의 직진성 확인을 위해 제작회사에서 토

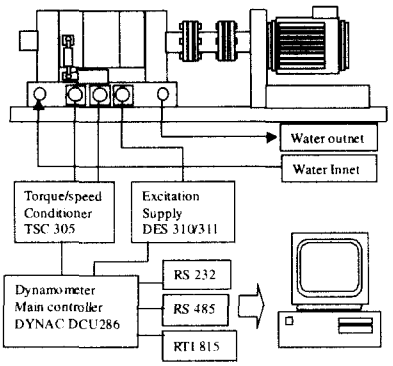


Fig. 2 Schematic of the tested motor dynamometer (Tandem Series 115:Rated 50Nm/2865rpm, Excitation current/vol 2.5A/30V, Accuracy ≤ 0.5% of rated torque, Load cell BLC 312 - 0025)

크센서의 측정으로 제공한 표준 바와 추를 이용하여 실험하였으며, 결과를 Table 1에 나타내었다. 실험시 동력계의 양쪽에 동일한 바를 부착하여 바의 무게의 의한 영향을 상쇄 시켰다.

측정 데이터 분석은 부하량 x와 반발력 y의 두 변량사이 직진성을 확인하기 위해 식(8)과 같이 정의되는 시료상관계수 r을 사용한다[2].

$$r = \frac{S(xy)}{\sqrt{S(xx)(yy)}}$$

$$S(xx) = \sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2,\ S(yy) = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2 \quad (8)$$

$$S(xy) = \sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})$$

식(8)을 이용하여 구한 시료상관계수 r은 시료의 값에 따라 산포를 갖는 통계량이다. 부하량 x와 반발력 y의 추정 회귀선은 앞서 전개한 바와 같이 선형관계를 예측할 수 있으므로 식(9)와 같이 표현되는 최소자승법을 사용하여 구한다.

$$\hat{y} = \hat{a}x + \hat{b} = \frac{S(xy)}{S(xx)}x + (\overline{y} - \frac{S(xy)}{S(xx)}\overline{x}) \quad (9)$$

측정된 데이터로부터 추정된 회귀선이 측정데이터를 어느 정도 잘 대변해 주고 있는가를 나타내 주는 회귀선 정도는 추정값의 표준오차 Sxy와 표본결정계수 또는 회귀선의 기여율 r2을 구하여 확인하였다. 측정 데이터 사이의 미측정 구간에 대한 데이터 예측은 소구간 $x_{j-1} \le x \le x_j$사이의 x와 y의 관계를 3차 이하의 다항식으로 표현하는 3차 스플라인(spline) 보간법을 활용하였다[2].

4. 실험 결과 및 분석

4.1 엔진동력계

(1) 정전류 및 rpm모드

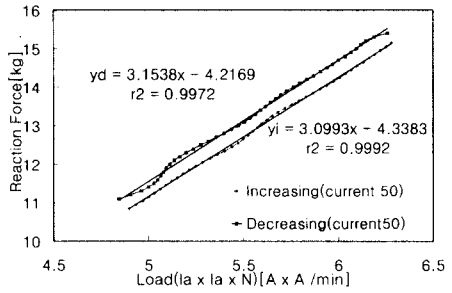
엔진동력계 실험은 각 실험별로 쓰로틀(throttle) 밸브를 열거나 닫으면서 계자전류, 회전속도, 반발력, 동력계 냉각수 입· 출구온도를 측정하였다. 데이타는 같은 부하조건에서 쓰로틀 밸브 개도를 증가 및 감소시킬 경우를 종합적으로 비교하였으며, 정도를 높이기 위해 보간 후 데이터를 기준으로

Table 1 Linearity test result of the load cell used for the motor dynamomer

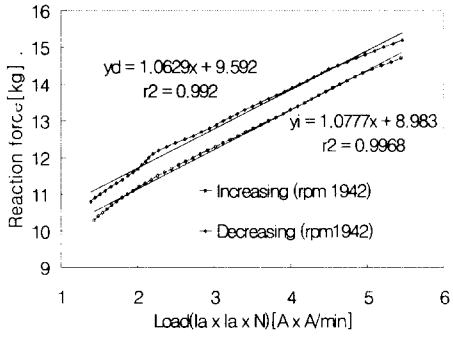
Weight (W)	Length of arm(A)	Theory value(T)	Practice value(P)	Linearity (L)
0kg	0.51m	0Nm	0.17Nm	-
1.2kg	0.51	5.9976Nm	6.19Nm	99.63%
4kg	0.51	19.992Nm	20.32Nm	99.21%

* Sensor offset(S)=0.17, L=[1-{(P-S)-T]/T}] x 100

작성하였다. 측정치를 Fig.3,4에 보였으며, 그래프에서 yi는 쓰로틀 밸브 개도 증가시 회귀직선식이고 yd는 밸브 개도 감소시 회귀직선식을 나타낸다. 실험에서 보면 시료상관 계수 r의 추정치가 최소 0.982에서 최대 0.998까지로 부하량과 반발력 사이에는 아주 강한 양의 상관 관계가 있음을 알 수 있다. 또한 시료상관계수 95% 신뢰를 가지는 신뢰구간 폭도 0.08이하로 아주 작게 나타나, 앞에서 예측한 바와 같이 부하량과 반발력 사이에 뚜렷한 선형적 관계가 있음을 보여주고 있어 수식적 해석결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 추정회귀곡선의 유용성을 표시하는 추정값 표준오차나 기여율도 부하량과 반발력 사이의 선형적 관계임을 나타내고 있다. 실험 조건별 부하량과 반발력사이의 관계를 보면 앞서 분석한바와 같이 뚜렷이 선형적으로 일정한 기울기 값에 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다. 그러나 rpm 제어모드 및 전류제어모드



(a) Current load mode (50mA)



(b) rpm(1942) control mode

Fig. 3 Linearity experiment for increasing and decreasing conditions in different modes

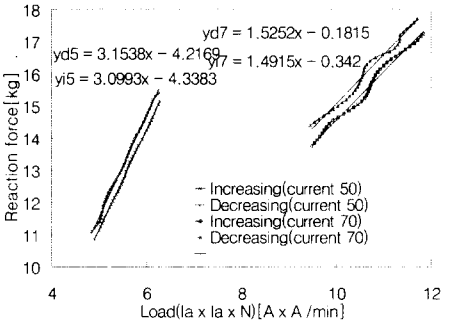


Fig. 4 Linearity result for increasing and decreasing conditions at the current control mode

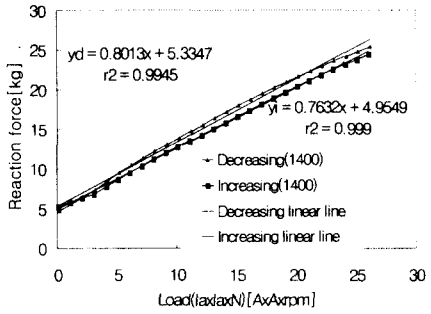
에서 부분적으로 기울기 크기에 일관성이 나타나지 않음을 알 수 있고, 즉 기울기 값이 실험 조건별로 3.1, 1.5, 1.0, 0.7 등의 값으로 같지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 결과가 나타나는 이유는 여러 가지가 있을 수 있으나 주된 이유는 실험모드와 조건이 식(6)의 반발력과 부하량의 비율인 K값에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉 수식적 해석결과 상수로 가정된 K값이 실험조건별로 달라짐을 알 수 있어, 회귀선의 방정식은 실험 조건에 따라 각 변수에 대한 보정이 필요함을 보인다.

또한 정속도 제어모드의 경우도 앞서 언급한 바와 같이 설비 특성상 설정한 rpm으로 정속도 제어되지 않고 쓰로틀 밸브 개도에 따라 rpm이 같이 상승하여 동력계에서 흡수동력이 부하량 기준으로 2~4 정도의 범위에서 작용하고 있어 그 범위가 크지 않음을 알 수 있다.

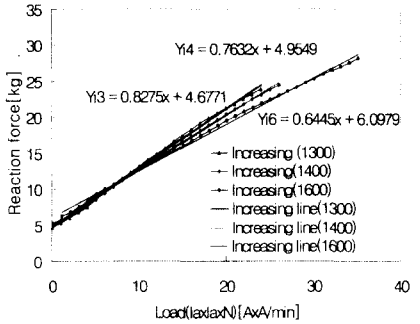
(2) 역정전류모드

정전류모드에 의한 실험에 비해 보다 넓은 부하범위에서 측정데이터를 얻기 위해서는 실험방법을 달리 해야한다. 실험은 초기 무부하 상태에서 쓰로틀 밸브개도를 조정하여 일정 rpm으로 맞추고 계자코일 전류량을 약간씩 증가시키면서 계자코일 전류량, 반발력, rpm를 측정하였다. 또한 이와 같은 방법으로 엔진에 어느 정도 부하가 가해진 뒤 반대로 부하를 약간씩 낮추면서 무부하 상태까지 데이터를 측정하였다. 즉 정전류모드에서 계자코일에 일정 전류량을 공급한 상태에서 쓰로틀 밸브개도량을 증· 감시키는 것과 반대로 일정한 쓰로틀 밸브 개도 상태에서 계자코일 전류량을 증· 감시키면서 실험하여 정전류 제어모드를 점으로 연결해 가는 역정전류제어모드로 실험하였다. 실험초기 무부하 상태의 rpm에서 실시하였으며, 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 예측한 바와 같이 부하량의 넓은 영역에 걸쳐 실험이 행해졌음을 알 수 있고, 부하량과 반발력간의 상관관계가 비교적 잘 나타나있다.

역정전류 모드 실험에도 상관계수가 0.99이상으로 나타나고 있어 매우 높은 상관성을 대변해 주고 있으며 앞의 실험에 비해 비교적 넓은 영역에 걸쳐 부하가 작용하고 있어 보다 일반적인 특성을 알 수 있다. 결과에서와 같이 회귀직선 기울기의 경우 0.64~0.86까지로 변화폭이 크지는 않으나 실험 조건과 부하의 방향에 따라 약간의 산포가 있음을 알 수 있다. 따라서 앞의 경우와 같이 역 정전류모드에서의 일반적인 회귀방정식을 예측하고 초기rpm과 부하방향 변수에 대해 보정한 식을 표시하였다. 역 정전류모드에서 초기 설정 rpm에 따라 기울기가 0.64~0.86의 비교적 적은 범위로 나타났으며, 앞의 실험에서 비교적 신뢰성이 있었던 rpm제어모드 분석에서 기울기 0.67로 나타나 본 연구에 사용



(a) Initial condition 1400rpm



(b) Initial conditions 1300-1600rpm

Fig. 5 Linearity experiment for reaction force vs. load at different initial conditions in an engine dynamometer

된 엔진 동력계의 초기 설정 rpm에 대한 기울기 값의 일반적인 경향을 파악할 수 있다. 즉 초기 설정 rpm을 증가시킴에 따라 기울기는 약간씩 감소하며, 선형성 구간이 증가함을 알 수 있고 이 것은 설정 rpm을 크게 할수록 엔진 출력이 커진데 따른 영향임을 쉽게 예측 할 수 있다.

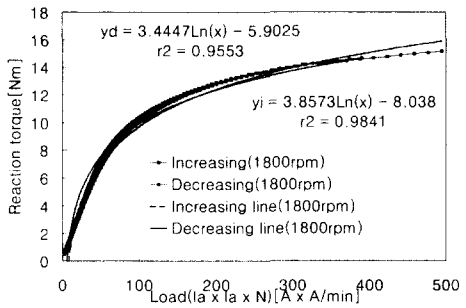
또한 정전류제어 모드의 경우 초기조건에 따라 뚜렷한 기울기차이를 보이고 있으며, 이 것은 실험조건 차이에서 나타나는 현상으로 추측된다. 역정전류 모드에서도 초기조건을 달리함으로서 기울기의 차이가 나타나는 것과 같이 실험모드가 회귀곡선의 기울기에 영향을 미치는 것으로 추측된다.

이상의 실험 결과에서 보면 같은 부하량에 대해 부하의 증가방향에서 보다 감소방향에서 반발력이 크게 보이고 있어 계측기의 히스테리시스가 나타남을 알 수 있다. 이러한 히스테리시스는 부하량이 클수록 그 폭이 크게 나타나고 있음을 보인다. 따라서 계측기 종류에 의한 정밀도 차이는 있으나 동력계의 제동력 측정을 동력계 외부에 부착한 계측기에만 의존할 경우 계측기의 히스테리시스에 의한 측정오차가 있음을 알 수 있다. 즉 계측기의 출력특성을 파악하여 측정방향 변수 보정으로 히스테리시스로 인한 측정오차는 줄일 수 있을 것으로 추정된다.

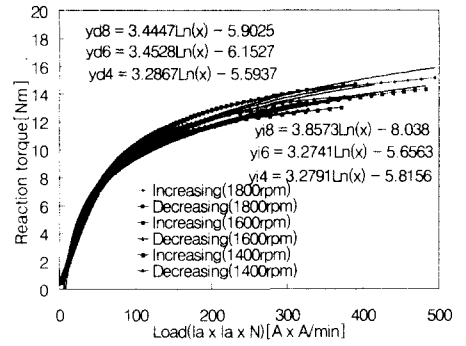
4.2 모터동력계

(1) rpm제어모드

모터동력계 실험은 엔진동력계와는 달리 rpm제어모드 실험에서 설정한 rpm제어가 정확하게 행해지고 데이터출력도 안정되게 출력되었다. 단, 모터동력계에서 사용된 토크센서는 로드셀이 사용되어 토크값이 직접 측정되므로 엔진동력계에서의 스프링 저울에서 측정되는 반발력 대신에 토크값 (반발토크)을 측정하였으며, 동력계에 공급되는 냉각수는 냉각기에 의해 23℃정도로 제어되고 있어 측정하지 않았다. 실험에서 측정된 데이터들에 대해 앞서와 같이 반발력과 부하량간의 관계를 선형적 관계로 예측하고 시료상관 계수, 추정회귀선, 추정값의 표준오차, 기여율 등을 구한 결과와 신뢰율 95%의 신뢰구간 범위를 산출하였다. Fig. 6에 설정 rpm별로 부하량과 토크와의 관계를 나타내었으며, 모터동력계의 경우 반발력과 부하량과의 관계는 선형적 관계가 아니라 로그함수관계임을 알 수 있고, 로그함수로 가정할 때의 회귀방정식과 시료상관계수를 나타내었다. 부하량과 반발토크와의 관계를 1차 선형 관계로 가정하고 분석한 결과를 보면, 추정회귀선 기울기의 점 추정치가 0.027~0.040으로 산포가 줄어든 것으로 보이나, 시료상관계수 r이 0.9이하로 나타났으며, 신뢰구간도 0.347~0.968로 크게 나타나 두 데이터간의 상관성이 높지 않음을 나타낸다. 또한 두 데이터간의 표준오차도 1.7~2.9로 0보다 매우 크게 나타나, 1차 선형적 관계로 추정된 회귀방정식이 부하량과 반발토크와의 관계를 대표하지 못함을 보인다. 즉, 부하량과 반발토크와의 관계는 선형적 관계가 아니라 기여율 0.98이상으로 두 데이터간의 관계가 로그함수관계임을 나타내고 있으며, 로그함수 계수는 모터의 종류 및 내부코일의 결선구조에 따라 결정되어지는 것으로 추측된다. 따라서 엔진동력계 실험과는 차이가 있음을 알 수 있지만 rpm제어모드에서 실험한 모든 데



(a) Initial condition, 1800rpm



(b) Initial condition, 1400-1800rpm

Fig. 6 Linearity experiment for reaction force vs. load at different initial conditions in a motor dynamometer

이터의 그래프를 한곳에 나타낸 Fig. 6(b)에서 보면 실험조건인 초기설정 rpm과 부하방향이 부하량에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 같은 방법으로 실험에 사용된 모터 동력계의 부하량과 반발토크 관계를 나타내는 일반식을 예측하고, 초기설정 rpm 및 부하방향 변수를 보정하였다. 실험조건이 부하량에 미치는 영향은 부하량이 적은 영역에서는 수식적으로 해석한 결과와 같이 비교적 큰 차이가 없이 선형적 관계를 만족하고 있으나, 부하량이 100 이상으로 큰 영역에서는 설정 rpm에 따라 부하량에 미치는 영향이 크게 나타나고 있다. 반면에 부하방향에 대한 영향은 엔진동력계에 비해 훨씬 적게 나타나 토크센서의 히스테리시스에 의한 영향은 적어짐을 알 수 있다.

부하량과 반발토크 간의 관계를 본 연구의 수식적 해석결과에서 예측된 선형적 관계를 살펴보기 위하여 저부하영역 부분을 Fig. 7에 나타내었으며, 엔진동력계에서 실험한 부하영역인 0~35 [A2/min]에 비해 비교적 넓은 영역인 10~50 [A2/min]범위에서의 부하량과 반발토크간의 결과를 보여준다.. 그래프에 표기한 바와 같이 회귀 방정식의 기울기는 0.133 (설정 1800rpm에서 반발토크 증가시)에서 0.144(설정 1400rpm에서 반발토크 감소시)로 큰 차이가 없으며, 기여율도 0.98이상으로 나타나 부하량과 반발토크의 관계가 1차 직선 관계임을 말해준다. 이러한 선형적 구간은 설정 rpm이 클수록 보다 넓은 부하영역에서까지 나타났다. 모터 동력계에서도 엔진 동력계의 경우와 같이 계측기의 히스테리시스가 나타났으나, 그 폭은 스프링저울에 비해 적었다. 또한 기울기 크기는 rpm이 클수록 작아져 엔진동력계에서 나타난 현상과 동일하였다. 따라서

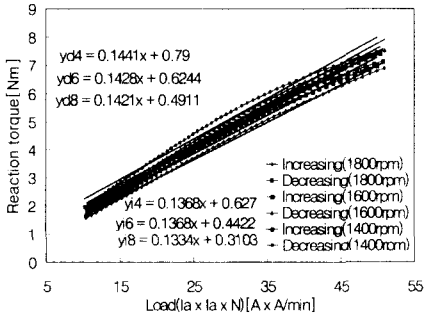


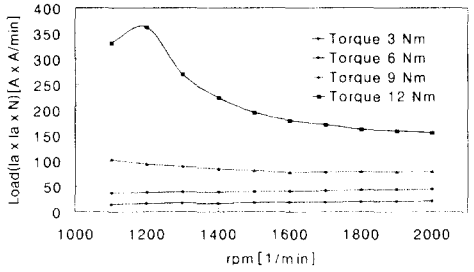
Fig. 7 Linearity experiment for low loading areas at different initial conditions in a motor dynamometer

비교적 저부하 영역에서 부하량과 반발토크가 선형적 관계를 유지하는 부분의 회귀방정식의 일반식을 예측하고 Fig. 7에 나타난 수식을 바탕으로 초기설정 rpm과 부하방향에 대한 보정을 수행하였다.

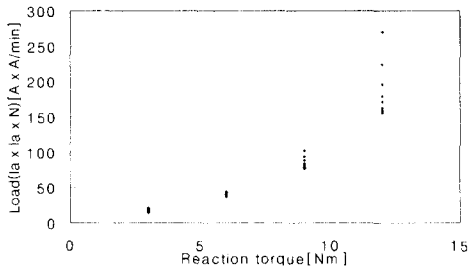
결과적으로 부하량과 반발토크의 관계는 저부하 영역에서는 엔진동력계에서와 마찬가지로 모터 동력계에서도 선형적 관계를 나타내 본 연구에서 이론적으로 해석한 결과를 만족하나, 고부하 영역에서는 모터동력계의 경우 로그함수관계로 나타나 이론적 해석과는 맞지 않았다. 고부하 영역일수록 반발토크에 대한 부하변화량 폭이 크게 변하여 출력값에 신뢰성을 떨어뜨리는 결과가 되었다. 따라서 로드셀의 토크 검출가능 범위와 검출능력에 대한 검토가 필요할 것으로 보인다.

(2) 토크제어모드

Fig. 8은 토크모드로 실험 결과이며, 각 rpm에서 일정 발발토크에 대한 부하 변화와, 동일 데이터에 대해 설정한 반발토크에서 rpm변화에 대한 부하량 변화를 나타낸 것이다. 결과에서 보면 토크 3,6,9 Nm의 경우 rpm에 관계없이 동일 반발토크에 대해 거의 같은 부하량이 출력되어, 부하량으로 반발토크를 대신할 수 있음을 보여준다. 그러나 부하토크



(a) Load vs. rpm



(b) Load vs. reaction torque

Fig. 8 Load experiment at torque control mode in a motor dynamometer

가 12Nm인 경우에서는 1600rpm이하의회전속도 영역에서 출력 부하값이 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 즉 모터 회전속도가 낮은 상태에서 큰 부하토크를 작용시킬 경우 부하량 출력이 불안정해짐을 알 수 있고, 이것은 Fig. 6에서와 같이 모터 rpm이 낮을수록 발생토크가 낮아지기 때문인 것으로 추측된다. 즉 임의 속도에서 모터에 작용하는 부하토크가 그 회전속도에서 발생시킬 수 있는 최대 토크에 가까워질수록 동력계의 부하량이 급격히 상승하는 것을 나타낸다. 이러한 현상은 엔진동력계에서 고부하 영역 데이터가 없어 쉽게 확인하기는 어려우나 Fig.5,7을 자세히 비교해보면, rpm이 낮을수록 부하량과 반발력간의 선형성 구간을 벗어나는 변곡점이 빨리 나타남을 알 수 있다. 회전속도에 관계없이 설정토크별로 출력되는 부하량을 표시한 Fig. 8(a)에서도 같은 내용을 확인 할 수 있고, 즉 부하토크가 3Nm, 6Nm, 9Nm등과 같이 비교적 작은 영역에서는 거의 일정한 부하량을 얻을 수 있으나, 큰 부하에서는 출력 부하량이 변화함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 와전류 동력계로부터 계자전류와 회전수를 측정하여 기존의 토크센서를 이용하여 측정하는 반발력을 대신 측정할 수 있음을 보이고자 하였으며, 실험 및 분석을 통한 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 엔진동력계의 경우 계자전류와 회전수를 측정하여 얻어진 부하량과 반발력간의 관계는 선형적 관계를 유지하고 있어 수식적 해석결과와 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

2) 반발력에 대한 부하량 관계는 선형적 관계를 만족하나 실험모드, 초기조건, 부하방향에 따라 회귀직선식의 기울기에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3) 실험모드, 초기조건, 부하방향 변수를 회귀방정식에 적용하여 보정할 경우 부하량 측정으로 반발력을 대신 구하는 것이 가능하다.

4) 모터 동력계의 경우 저부하영역 (모터 최대출력토크의 60%정도 이하)에서는 반발토크에 대한 부하량이 선형적 관계를 만족하였으나, 전 부하영역에 대해서는 로그함수 관계로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 박영준, 조형석, 한유희, "레이저 표면경화공정에서 경화층 깊이의 실시간 측정을 위한 와전류 전기자장의 이론적 해석," 대한기계학회 논문집, ISSN 1225-4865, pp. 529-539, 1994.
2. K E. Atkinson, An introduction to numerical analysis, second edition, John Wiley & Sons, 1986.
3. 이갑진, 박기환, "잠김방지 기능을 가지는 비접촉식 와전류형 제동장치의 견실제어," 제어자동화시스템공학회 논문집, ISSN1225-9845, pp. 525-533, 1998.
4. 구영창, 주성민, "직류기계의 토크측정장치," 대한민국 특허청, 특1993-0018993, 1997.

5. D Suharto, A H Mahadi, "Automation of Friction Brake Dynamometer for Measuring Net Power Rating of internal Combustion Engine," The World Int. Pacific Con. on Automotive Engineering, 971419(Abstract code 189), 1997.11
6. 정연택, "자계 및 와전류 침수효과를 고려한 히스테리시스 전동기의 토오크에 대한 해석법," 전기학회지, Vol. 29, No. 9, pp. 594-598, 1980.
7. H K Moffatt, "The Earth's Dynamo," Cosmical Magnetism v., n., pt., pp.1-10 NATO ASI Series : Series C, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 422, 1994.