

전자석을 이용한 와전류 제동기의 제동 특성에 관한 연구

김철진\*, 이관용\*, 김용하\*\*, 한경희\* \*\*\*, 백수현\*\*  
 한라대학교\*, (주)태하 연구소\*\*, 동국대학교\*\*\*

(A study on the characteristics of eddy current braking torque with electromagnet exciting)

Cherl-Jin Kim\*, Kwan-Yong Lee\*, Yong-Ha Kim\*\*, Kyoung-Hee Han\* \*\*\*, Soo-Hyun Baek\*\*\*  
 Halla University\*, Taeha Mechatronics Co\*\*, Dongguk University\*\*\*

**Abstract** - The technical improvement of servo system, it is required to study on robust control method in company. It needs to study on brake system that has constant torque-speed performance as load variation.

In this paper, braking torque characteristics of eddy current braker between electromagnet stator and rotating disk are analyzed. The torque-speed characteristics and proper disk construction are presented.

From the computer simulation results, it was found that eddy current braking torque is linear or approximately constant over the desired speed range depending on the rotor material, disk construction, pole number and pole displacement of stator. The relationship of these parameters are confirmed by experimental result.

1. 서론

최근 시스템의 개발은 동력원이 되는 모터, 액추에이터의 정밀한 제어에 많은 연구가 이루어지고 있으며, 제동특성을 고려한 서보시스템의 개발이 활발하게 진행되고 있다.

이동중인 회전 도체판에 의해 시분별 자속이 쇄교되어 도체에 유기된 와전류와 자속 사이의 상호 작용에 의하여 제동토크가 발생된다.

회전자를 철로 사용한 기존의 제동기는 제동토크를 발생하기 위한 자속의 투자율은 우수한 반면, 전기적 저항이 크기 때문에 와전류가 흐르기 시작하면 열로 소비되는 에너지를 감소시키기 어려운 단점이 있었다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 자속의 투자율은 높게 유지되되 와전류의 흐름을 원활하게 하기 위한 전기적 저항을 낮게 하기 위해 구리나 알루미늄 등을 회전자에 복합적으로 사용한 구조를 제안하였으며, 제동토크를 해석하였다.

영구자석을 사용하여 제동토크를 조절하는 경우, 기자력의 크기를 조절하기 위해 부가적인 기계적 장치가 필요하나, 전자석을 사용함으로써 이러한 불편함을 배제할 수 있다. 본 연구에서는 전자석의 면적과 극 수, 극간 거리, 회전자 두께에 따라 각각 다르게 나타나는 제동토크를 비교하였다. 다양한 구조의 고정자와 복합구조의 회전자 적용에 따라 선형적 토크 특성과 일정 부하 토크 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 분석, 확인 하였다.

2. 와전류 제동기

2.1 기본 구조

본 연구에서 제시한 전자석 제동 시스템의 구조는 그림 1과 같다. 시스템은 고정된 전자석 원판의 공극 사이를 회전하는 복합구조의 금속원판을 구성하고 있으며 전자석의 극 수는 다양하게 조절할 수 있도록 구성하였고 자기 저항을 줄이기 위해 고정된 철판으로 지지되어 있다.

이 회전자는 알루미늄-철-알루미늄의 3층으로 구성되어 있으며, 알루미늄 대신에 구리를 사용할 수 있다. 회전자는 제어대상이 되는 전동기에 축으로 연결되어 회전한다. 제어를 원하는 시점에, 양측 고정판에 부착된 전자석에 일정전원을 인가함으로써 회전자는 전자석에서 발생된 자속과 쇄교하게 되고, 이로써 와전류가

회전자에 발생된다. 3층 구조의 회전자에서 와전류는 전기적 저항이 작은 알루미늄 또는 구리판에 분포되며, 이때의 자속은 알루미늄판을 통과하여 자기적 저항이 작은 회전자 중심부의 철판을 따라 자기경로를 형성한다. 법칙에 따라 회전방향의 반대방향으로 힘을 받아 제동력을 발생한다. 그림 1은 본 연구에 제시된 3층 구조의 복합구조 제동기를 나타낸다.

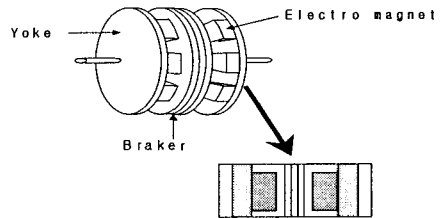


그림 1. 와전류 제동기의 구조

2.2 동작원리

본 연구에서 사용된 전자기 모델은 2차원 유한요소 모델로 구성되고, 반복적인 방법으로 해를 구한다.

회전원판 모델에 존재하는 곡선은 무시하며, 기하학적 평면을 가정할 때 운동의 방향은 정속도 운동의 방향에서 변화하지 않는다고 가정한다. 철 영역의 포화상태를 계산하기 위하여 평면의 도전율은 상수이며 등방성으로 가정한다. 이러한 가정에서 자계는 정지된 2차원 평면(x, y)상에 존재하게 된다.

와전류는 전자석을 기준으로, 이동하는 도체 평면상에서 일정하게 분포한다. 와전류의 분포는 자극의 극성과 방향을 반영하므로 완벽한 해석을 위해서는 극 피치에 관한 데이터가 필요하며, 해석에 사용된 Maxwell 방정식은 아래와 같이 간단하게 나타낼 수 있다. 여기서,  $\vec{J}_s$ 는 전자석으로 인한 전류밀도이며, 식 (3)에서  $\vec{M}$ 은 전자석의 자화를 나타내는 일정한 벡터이며,  $\vec{n}$ 은 자기 경로를 따라 수직으로 향하는 단위 벡터이다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ec} \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2}$$

$$\vec{J}_s = \vec{M} \times \vec{n} \tag{3}$$

2차 전류 밀도  $\vec{J}_{ec}$ 항은 속도 변화에 의해 발생하는 와전류 밀도로서, 이 때,  $\sigma, \vec{v}, \vec{B}$ 는 각각 판의 도전율, 속도, 자속밀도를 나타낸다.

$$\vec{J}_{ec} = \sigma \vec{v} \times \vec{B} \tag{4}$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{5}$$

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_s + \sigma \vec{v} \times \nabla \times \vec{A} \tag{6}$$

식(4)는 자기 벡터 포텐셜을 이용하여 해석한다. 자속 밀도는 식(2)에 의해 솔레노이드 특성을 만족하게 되고, 이러한 개념을 식(1)에 적용하면, 정자계에서의 회전 방정식을 식(6)으로 나타낼 수 있으며, 이동영역에서 전위항이 부가된다. 속도가 일정하기 때문에 이 방정식에는 시간의 미분항은 존재하지 않으므로 정적인(static) 상태가 된다.

### 3. 특성 해석

제안된 모델은 두께가 10mm인 원판 2개에 각각 4극의 전자석을 고정시켜 구성된 고정자 축과, 2mm의 공극, 그리고 재질이 철로 된 회전자로 구성되었고, 평균 직경이 150mm이며 강철제를 사용한 모델로 설정하였다. 본 연구에서는 3층의 복합 구조 회전자를 제안하였으며, 이 회전자의 자기경로를 그림 2에 나타내었다.

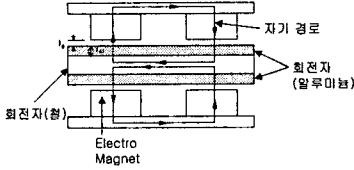


그림 2. 3층 회전자의 이상적 구조

#### 3.1 속도 토크의 산출

와전류로 인한 전기자 반작용을 무시할 수 있는 저속에서는 토크가 선형적 특성을 나타내며, 토크특성을 일반화하는 근사식을 유도할 수 있다.

그림 2의 3층 구조의 회전자에서, 철의 투자율이 구리 혹은 알루미늄의 투자율에 비해 상대적으로 매우 크기 때문에 전자석을 지지하는 철판의 자기저항과 누설 자속을 무시할 수 있다. 따라서, 전자석에서 발생하는 자속은 공극과 저 투자율의 회전자 도체판을 통하여 진행한 후 철의 내부로 진입하여 인접한 극 쪽으로 자기경로를 형성한다. 고정자의 한쪽 극 당, 미치는 힘은 알루미늄과 철에 의한 와전류 힘의 합으로 표현할 수 있다.

$$F = F_{Al} + F_{Fe} \quad (7)$$

$$B = \mu_0 \frac{(NI)}{(l_g + l_{Al})} \quad (8)$$

주어진 가정을 고려하여 매우 낮은 속도에서 전자석과 공극 및 알루미늄 층의 자속밀도  $B$ 는 일정하며 이를 식으로 표현하면 식 (8)과 같다. 여기서  $l_g$ 는 공극의 길이, 알루미늄 층의 두께는  $l_{Al}$ 이다.

$$J = \sigma Bv = \sigma \mu_0 \frac{(NI)^2}{(l_g + l_{Al})^2} v \quad (9)$$

$$F_{Al} = \sigma \mu_0^2 \frac{(NI)^2}{(l_g + l_{Al})^2} (s l_{Al}) v \quad (10)$$

식(9)에서 와전류 밀도  $J$ 는 일정하며  $\sigma$ 는 도전율이며,  $v$ 는 회전자의 속도를 나타낸다. 극 하부의 구리 혹은 알루미늄의 부피  $s l_{Al}$  ( $s$ 는 극의 면적)에  $J^2 / \sigma_{Al}$ 를 곱하여 소요 전력을 계산할 수 있으며, 전력을 원판의 회전속도로 나누면 극당의 힘을 알 수 있다. 식(10)에서 힘은  $l_{Al} = l_g$ 일 때 최대가 된다. 그러나  $l_g$ 과  $l_{Al}$ 의 합은 공극의 역할을 하므로 공극  $l_g$ 와 구리(혹은 알루미늄)의 길이와의 합이 어느 범위를 넘어서게 되면  $l_{Al} = l_g$ 는 의미가 없어진다.

#### 3.2 제안한 모델의 특성 해석

##### 3.2.1 고정자 극수에 따른 토크 특성

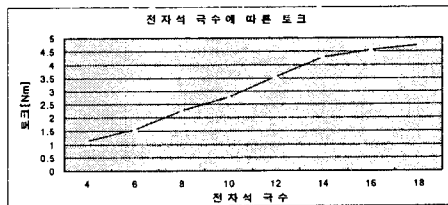


그림 3. 전자석 개수에 따른 토크

극수는 설계시의 중요한 파라미터로서 출력 토크에 큰 영향을 미친다. 알루미늄과 철로 구성된 복합구조의 회전자 50rpm에서 발생하는 토크를 극수의 함수로 그림 3에서 나타내고 있다.

극수가 적으면 주 자기경로 저항이 커지고 회전자의

자속밀도는 낮아진다. 극수를 4에서 8로 변경한 경우 총 자속은 거의 2배로 커지고 토크도 2배가 되는 것을 그림 3.에서 알 수 있다.

그러나 극수가 증가함에 따라 대향 극간의 면적도 전자석의 표면적에 비례하여 증가하게 되므로 극간에서는 공극을 경유하지 않는 누설자속이 존재하게 되고 유용한 자속이 감소하게 된다. 그러므로, 그림 3에서 알듯이 상하 4극에서 14극 사이로 전자석 개수를 정하는 것이 제동력의 측면에서 보다 유리한 것을 알 수 있다.

##### 3.2.2 회전자 형상에 따른 토크 특성

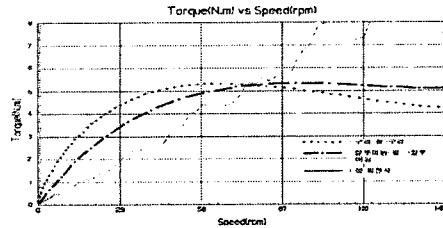
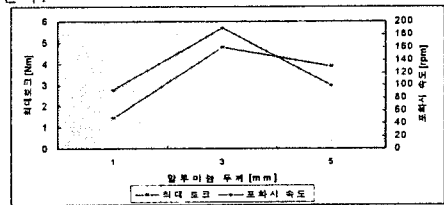


그림 4. 회전자 재질에 따른 속도-토크 특성

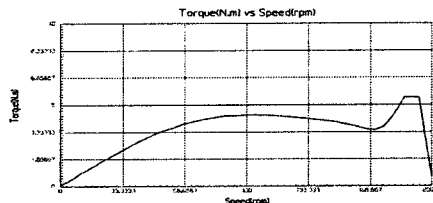
위의 그림 4는 초기속도 약 150rpm에서의 제동기의 회전자 재질에 따른 제동 특성을 나타낸 것으로, 회전속도에 따라 선형적 토크 특성과 정부하 토크 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 회전자의 구조가 단순히 강철로만 구성된 경우는 회전자의 속도가 증가할수록 발생토크도 증가한다. 그러나 이러한 특성은 정토크 특성을 요구하는 시스템에서는 바람직한 결과라 할 수 없다. 따라서, 정토크 특성을 요구하는 서보시스템에서는, 구리-철-구리, 또는 알루미늄-철-알루미늄의 복합구조의 회전자가 유리하다. 회전자가 구리-철-구리의 구조로 되어 있는 경우는 저속에서 보다 큰 토크를 얻을 수 있으나, 최대 토크점 이상의 고속에서는 토크가 감소한다. 반면, 알루미늄-철-알루미늄 구조의 회전자인 경우는 구리-철-구리 구조의 경우보다 최대토크 이상의 속도에서 정토크 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

이는 구리와 알루미늄의 도전율에 관계된 것으로서 최대토크에 이르기까지의 속도-토크 곡선의 기울기는 저속에서 각 재질의 도전율에 비례하지만, 최대토크가 나타날 때의 속도는 회전자의 도전율에 반비례하는 특성을 나타낸다.

그림 5(a)는 회전자의 자속 경로가 되는 철의 두께가 3mm인 경우에 알루미늄의 두께를 각각 1, 3, 5mm로 변경하였을 때의 속도-토크 특성을 나타낸다. 와전류의 분포는 회전원판의 두께가 증가할수록 전기저항이 감소하므로 전류량의 증가로 인하여 회전자에 미치는 힘도 증가한다.



(a) Al 두께에 따른 속도 토크 특성



(b) Al(5mm)-steel(3mm)일 때

그림 5. 알루미늄 두께에 따른 속도-토크 특성

그림 5(a)에서 알루미늄의 두께가 3 mm일 때의 최대토크는 두께 1 mm일 때의 최대토크보다 그 크기는 크지만 고속에 이르러야 나타남을 볼 수 있다.

그러나 알루미늄의 두께가 어느 수치(여기서는 3 mm)를 초과하면 공극의 길이가 길어지는 효과를 일으키므로 누설자속량이 증가하여 토크가 감소하게 되어, 알루미늄의 두께가 3 mm 이상이 되면 최대토크의 크기는 감소하나 최대토크는 오히려 저속에서 나타남을 알 수 있다(그림 5(a)).

또한 그림 5(b)에서는 steel의 두께가 충분히 얇은 경우(여기서는 3 mm) 자속밀도의 포화로 인해 저속인 100 rpm에서도 정토크 특성이 나타남을 확인할 수 있다.

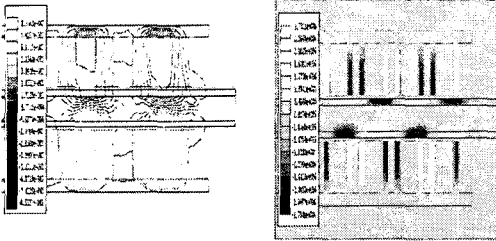


그림 6. 복합구조 회전자의 자속 분포

그림 7. 복합 구조 회전자의 와전류 분포

그림 6과 그림 7은 본 연구에서 제시한 3층의 복합구조를 갖는 회전자의 자속분포와 와전류 분포를 나타낸 결과이다. 철판도체에 자속의 대부분이 분포하는 것과 알루미늄판 도체에 집중적으로 분포하는 와전류를 확인할 수 있다.

#### 4. 실험 결과

본 연구에서는 사용된 와전류 제동기 실험장치는 반경이 15 cm이며 4극의 전자석이 각각 2개씩 양쪽 고정자 철판에 고정되어 있으며 회전자의 알루미늄 두께는 1 mm, 회전자 철판의 두께는 3 mm이며 전자석과 회전자 사이의 공극은 2.5 mm이다.

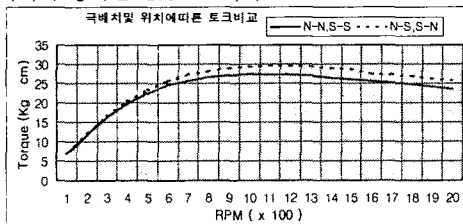


그림 8. 실험결과 1

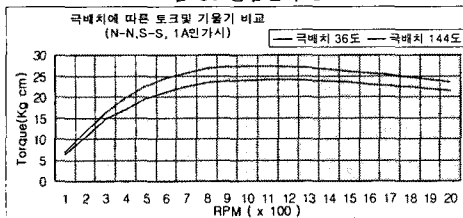


그림 9. 실험결과 2

그림 8은 대향한 고정자 전자석의 극이 N-N(S-S)인 경우와 N-S(S-N)인 경우의 속도-토크 특성 결과를 나타낸다. 전자의 경우, 900 ~ 1300 rpm 동안 약 27 kg·cm의 정토크를 유지하나, 후자의 경우에는 900 ~ 1500 rpm 동안 약 29 kg·cm의 토크를 유지하여 전자석의 대향극이 서로 다른 경우, 서로 같은 극끼리 대향

한 경우보다 정토크가 200 rpm 정도 지속되는 것이 확인되었다.

그림 9는 양쪽 고정자에 고정된 2개의 전자석간의 거리간격을 각각 36°, 144°로 하였을 때의 속도-토크 특성을 나타낸다. 최대토크는 극간격이 36°인 경우가 144°일 때보다 큰 값을 지니지만 정속도 구간은 극간격 144°일 경우가 극간격 36°일 때보다 오래 지속됨을 알 수 있다.(150 rpm 정도) 아래 그림 10은 실험 장치의 모습을 나타낸다.

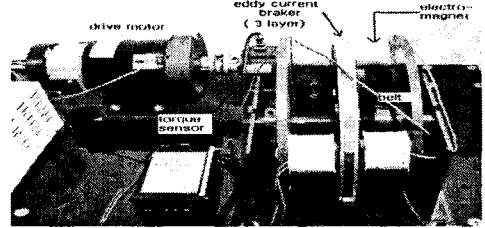


그림 10. 실험장치의 모습

#### 4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄-철-알루미늄, 또는 구리-철-구리의 3층으로 구성된 복합구조 회전자를 와전류 제동기에 적용하였다. 이 경우, 철심으로 된 단일 구조의 회전자나, 알루미늄-철 또는 구리-철의 2층 구조의 회전자로 구성된 기존의 제동기의 속도-토크 특성에 존재하는 선형적이며 비효율적인 제동 특성에 대한 적절한 해결방안이 될 수 있다. 해석과 실험결과, 3층의 복합구조 회전자의 제동이 보다 효율적이며, 일정한 속도범위에서는 정토크 부하 특성을 가짐을 확인하였다.

또한 실험을 통해 전자석의 배치에 따라 최대토크에 이르는 속도와 정토크 유지구간이 변하는 것을 확인하였다. 이로써 자극의 배치만으로도 원하는 정토크 구간과 최고 토크, 포화속도를 제어하는 것이 가능함을 확인하였다.

향후 광범위한 속도 변동에 대한 제동기의 특성해석이 수반되면 속도 변화에 따른 일정한 제동토크 특성을 갖는 서보시스템을 개발함으로써 산업적 응용이 유용하게 이루어질 것으로 기대된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] T.Kuwahara, K.Araki, "Development of Permanent Magnet Type Retarder", JSAE, pp92-96, Jan, 1992
- [2] B.Lequesne, B Liu, T.W.Nehl "Eddy Current Machines with Permanent Magnets and Solid Rotors". IEEE Trans on Industry App. Vol33, pp 1289-1294, Sept.-Oct. 1997
- [3] E. P. Furlani, R. Wang, and H. Kusnadi, "A 3D model for computing the torque of radial couplings". IEEE Trans on Magn., vol. 31, pp. 2522-2526, Sept. 1995
- [4] Y.-D. Yao, G.-J. Chiou, D.-R. Huang, and S.-J. Wang, "Theoretical computations for the torque of magnetic coupling." IEEE Trans on Magn., vol. 31, pp. 1881-1884, May 1995.
- [5] W. L. Lorimer, D. K. Lieu, J. R. Hull, T. M. Mulcahy, and T. D. Rossing, "Three-dimensional finite element modeling of a magnet array spinning above a conductor." IEEE Trans. Magn., vol. 30, pp. 3004-3007, Sept. 1994.