

자기 경로를 고려한 와전류 제동기의 회전자 발생 토크 특성

김철진*, 이관용*, 이달은*, 한경희***, 백수현**
 한라대학교*, 동국대학교**

The eddy current braking torque on moving rotor considering magnetic path

Cheri-Jin Kim*, Kwan-Yong Lee*, Dal-Eun Lee*, Kyoung-Hee Han***, Soo-Hyun Baek**
 Halla University*, Dongguk University**

Abstract - It requires to study on accurate control skill for the technical improvement of servo system require. It needs to study on brake that has constant-torque speed range as load.

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

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. these are confirmed by experimental results.

1. 서 론

최근 모터, 액추에이터를 포함한 시스템의 개발은 정밀한 제어에 목적을 두고 활발한 연구가 진행되고 있다. 시스템의 제동특성의 향상은 정밀 제어의 한 분야로서, 이를 고려한 서보시스템의 개발은 중요한 의미를 갖는다.

회전하는 도체판에 의해 시뮬변 자속이 쇄교되면 도체에 와전류가 유기되고, 자속과 전류사이의 상호 작용에 의하여 회전자에는 제동토크가 발생된다.

회전자를 철로 사용한 기존의 제동기는 제동토크를 발생하기 위한 자속의 투자율이 우수한 반면, 와전류로 인한 열이 발생하므로 에너지 손실을 감소시키기 어려운 단점이 있었다. 이점을 고려하여 본 연구에서는 기존의 제동기의 장점을 유지하고 와전류로 인한 손실을 저감하기 위하여 구리 및 알루미늄을 사용한 회전자의 복합구조를 제안하였다.

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 두께, 여자방식 및 자기경로를 변경하는 등 여러 가지 변화요소에 따른 제동토크를 분석하였다.

다양한 구조의 고정자와 복합구조의 회전자 적용에 따라 달리 나타나는 제동력 분석을 통해 선형적 토크 특성과 일정 부하 토크특성을 확인 할 수 있었으며, 이 과정은 시뮬레이션과 실험을 통해 입증하였다.

2. 와전류 제동기

2.1 기본 구조 및 동작원리

본 연구에서 제시한 전자석 제동 시스템의 구조는 그림 1과 같다. 시스템은 고정된 전자석 원판으로 된 고정자와 두 고정자의 공극 사이를 회전하는 복합구조의 금속원판으로 구성되어 있으며 전자석의 극 수는 다양하게 조절할 수 있다. 고정자의 재질은 자기 저항을 줄이기 위해 철판으로 지지되어 있다.

회전자는 알루미늄-철-알루미늄의 3층으로 구성되어 있으며, 알루미늄 대신에 구리를 사용할 수 있다. 회전자의 제어대상이 되는 전동기에 축으로 연결 되어 있다. 고정자의 전자석에 일정전원을 인가함으로써 발생된 자속이 회전자와 쇄교하게 되고, 회전자에 와전류가 발생된다. 3층 구조의 회전자에서 와전류의 분포는 전기적 저항이 작은 알루미늄 또는 구리판에 주로 나타나며, 이 때의 자속은 회전자 내부의 중심 철판을 통한 자기경로를 형성한다.

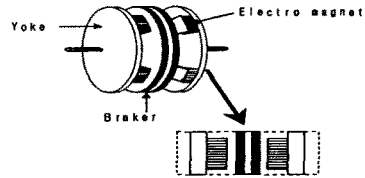


그림 1. 와전류 제동기의 구조

해석에 사용된 모델은 2차원 유한요소 모델로 구성되고, 반복적인 방법으로 해를 구한다. 회전원판 모델을 2차원으로 해석하기 위해 선형화한다(그림2). 기하학적 평면을 가정할 때 운동의 방향은 정속도 운동의 방향에서 변화하지 않는다고 가정한다. 철 영역의 포화상태를 계산하기 위하여 평면의 도전율은 상수이며 등방성으로 가정한다. 이러한 가정에서 지체는 정지된 2차원 평면(x, y)상에 존재하게 된다.

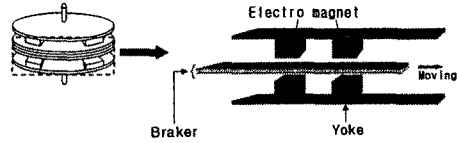


그림 2. 와전류 제동기의 선형화 모델

제동기의 구조에 대한 물리적 이해를 돕기 위해 수식을 사용하여 설명하면 다음과 같다. 한쪽 극당 회전자에 미치는 힘은 $F = F_{AL} + F_{Fe}$ 으로 볼 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. 주어진 가정을 고려하여 매우 낮은 속도에서 전자석과 공극 및 알루미늄 층의 자속밀도 B 는 일정하며 이를 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$B = \mu_0 \frac{(NI)}{(l_g + l_{Al})} \tag{1}$$

N : 전자석 극 당 감긴 코일의 권수,
 l : 코일에 흐르는 전류, l_g : 공극의 길이,
 l_{Al} : 알루미늄 층의 두께

$$F_{Al} = \sigma \mu_0^2 \frac{(NI)^2}{(l_g + l_{Al})^2} (sl_{Al})V \tag{2}$$

σ : 구리나 알루미늄의 도전율, V : 회전자의 속도

와전류 밀도 J 는 일정하며 주도 알루미늄에 와전류가 분포한다고 보면, 식 (1)에 의해 회전자에 미치는 제동력을 식(2)과 같이 구할 수 있다. 식(2)에서 힘은 $l_{Al} = l_g$ 일 때 최대가 된다. 그러나 l_g 과 l_{Al} 의 합은 공극의 역할을 하므로 공극 l_g 과 구리(혹은 알루미늄)의 길이와의 합이 어느 범위를 넘어서게 되면 $l_{Al} = l_g$ 의 의미가 없어진다. 상하 양편의 고정자 전자석에 의해 3층의 회전자에 발생하는 힘은 전자석이 한쪽만 있을 때와 비교하여 2배의 힘을 나타낸다.

전자계해석을 위한 Maxwell 방정식은 아래와 같이 나

타낼 수 있다. 여기서, \vec{J}_s 는 전자석으로 인한 전류밀도이며, 식 (5)에서 N 은 전자석의 턴수를, I 는 전자석의 여자 전류를, 그리고 S 는 전자석의 면적을 나타낸다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ec} \quad (3), \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{J}_s = \frac{N}{S} I \quad (5).$$

2차 전류 밀도 \vec{J}_{ec} 는 속도 변화에 의해 발생하는 와 전류 밀도로서, 이 때, σ , \vec{V} , \vec{B} 는 각각 판의 도전을, 속도, 자속밀도를 나타낸다.

$$\vec{J}_{ec} = \sigma \vec{V} \times \vec{B} \quad (6), \quad \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s + \sigma \vec{V} \times \nabla \times \vec{A} \quad (8)$$

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} = -v_x \frac{\partial A_z}{\partial x} \vec{a}_z \quad (9)$$

식(6)은 자기 벡터 포텐셜을 이용하여 해석한다. 자속 밀도는 식(4)에 의해 솔레노이드 특성을 만족하게 되고, 이러한 개념을 식(3)에 적용하면, 정자계에서의 와 전류 제동기를 해석하기 위한 지배방정식을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right] + J_s - \sigma v_x \frac{\partial A_z}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

속도가 일정하기 때문에 이 방정식에는 시간의 미분 항은 존재하지 않으므로 정적인(static) 상태가 된다. 식(10)에 주어진 지배방정식을 잔차법을 이용하여 자속 밀도를 구하여 나타내면 다음과 같다.

$$B_x^e = \frac{\partial A^e}{\partial y}, \quad B_y^e = -\frac{\partial A^e}{\partial x} \quad (11)$$

B_x^e , B_y^e 는 2차원 상의 임의의 한 요소내의 자속 밀도이며, 각각 x , y 성분을 나타낸다. 단위체적당 힘을 나타내면 식(12)과 같다.

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} = \frac{1}{\mu_0} \left[\vec{B} (\nabla \cdot \vec{B}) - \frac{1}{2} \nabla (\vec{B} \cdot \vec{B}) \right] \quad (12)$$

$$\vec{F} = \int_V \vec{f} dV = \int_V \nabla \cdot P dV = \oint_S P ds \quad (13)$$

맥스웰 응력텐서 P_{ij} 를 이용하여 체적당 작용하는 힘 \vec{f} 를 구하면 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

3. 특성 해석

제안된 모델의 해석은 유한 요소 반복 처리로 계산하였으며, Transient-on mode(변속 모드)와 Transient-off mode(정속 모드)로 해석하였다.

3.1 회전자 재질에 따른 토크 특성

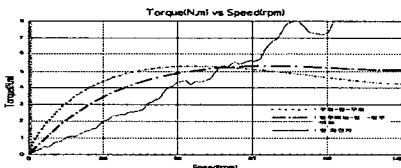


그림 3. 회전자 재질에 따른 속도-토크 특성

위의 그림 3은 Transient-on 모드에서 초기속도가 150 rpm, 8극, 여자전류 2[A], 10/10/10(mm)로서 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 유도기와 유사하게 회전자의 속도가 증가할수록 발생토크도 증가하고 이후에는 천천히 감소하는 것을 알 수 있다. 정토크 특성을 요구하는 서보시스템에서는, 구리-철-구리, 또는 알루미늄-철-알루미늄의 복합 구조의 회전자가 유리하다. 구리-철-구리의 구조의 경우, 저속에서 보다 큰 토크를 얻을 수는 있으나, 최대 토크 점 이상의 고속에서는 토크가 감소한다. 반면, 알루미늄

-철-알루미늄 구조의 경우는 구리-철-구리 구조의 경우에서의 경우보다는 고속에 이르러야 최대토크가 나타나, 고속으로 갈수록 정토크 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 구리($\sigma_{Al} = 3.54 \times 10^7 [\Omega/m]$)와 알루미늄($\sigma_{Cu} = 5.80 \times 10^7 [\Omega/m]$)의 도전율과 관계된 것으로서 회전자의 열로 인한 저항의 변화에 의한 토크 감소뿐만 아니라 회전자의 회전 속도에 따른 표피 효과 현상으로 침투 깊이(Skin depth)의 변화에 의한 토크 감소로 생각할 수 있다.

3.2 자로 형상, 극수에 따른 토크 특성

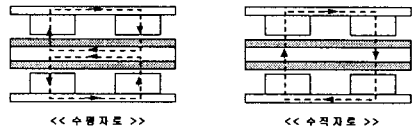


그림 4. 자로형상

그림 4은 수평 및 수직 자로에 대한 형상을 나타낸 그림으로, 수평자로의 경우 2개의 폐자로가 형성되고, 수직자로의 경우 1개의 폐자로가 형성된다. 2개의 폐자로를 형성하는 수평자로의 경우 회전자 철(Fe)부분에 두 자로의 자속이 집중하게 된다.

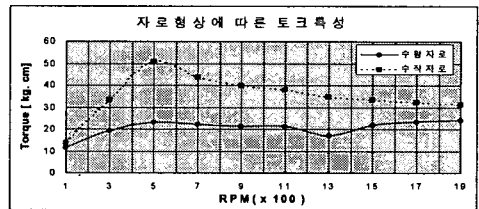


그림 5. 수직/수평자로에 따른 토크 특성

그림 5는 회전자의 구조가 3/10/3(mm)이고, Transient-off 모드에서 각각의 속도에서의 토크 특성을 시뮬레이션을 통해 해석한 결과이다. 수평자로일 경우 회전자의 철(Fe)부분에 포화가 수직자로에 비해 쉽게 포화됨으로서 수평자로가 정토크 특성이 오래 지속됨을 확인 하였다.

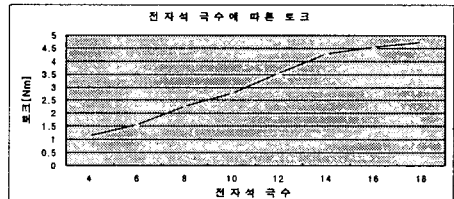


그림 6. 전자석 개수에 따른 토크

극수는 설계시의 중요한 파라미터로서 출력 토크에 큰 영향을 미친다. 그림 6는 극수에 따른 토크를 나타내고 있다. 극수가 적으면 주 자기경로 저항이 커지고 회전자의 자속밀도는 낮아진다. 극수를 4에서 8로 변경한 경우 총 자속은 거의 2배로 커지고 토크도 2배정도가 된다. 그러나 극수가 증가함에 따라 대향 극간의 면적도 전체자석의 표면적에 비례하여 증가하게 되므로 극간에서는 공극을 경유하지 않는 누설자속이 존재하게 되고 유용한 자속이 감소하게 된다. 그러므로, 그림 6에서 볼 수 있듯이 상하 4극에서 14극 사이로 전자석 개수를 설정하는 것이 제동력의 측면에서 보다 유리한 것을 알 수 있다.

3.3 회전자의 두께와 저속 정토크 특성 방안

그림 7은 3층 구조의 회전자의 두께를 조절함으로써 변화하는 제동토크 특성을 나타낸다.

Transient-on 모드에서 4극, Al/Fe/Al의 두께를 각각 3/10/3(mm), 3/3/3(mm), 1/3/1(mm), 1/10/1(mm)로 했을 경우 나타나는 토크 특성을 각각 비교하여 나타내었다. 토크의 크기만을 볼 때에는 공극이 쇠교 자속의 양에 영향을 준다.

여기서 알루미늄(Al)은 공극으로 작용을 하여 두께가 얇을수록 토크의 크기가 크게 나타난다. 또한, 알루미늄(Al)영역은 공극으로 작용하는 것 외에도 와전류가 분포하는 부분의 저항을 결정하는 성분이 된다.

저속에서의 정토크 특성을 얻기 위해서는 자성체의 동작점을 포화점 부근으로 이동함으로써 자속을 일정하게 유지할 필요가 있으며, 이때 발생하는 제동 토크를 일정한 정토크 특성을 갖도록 한다.

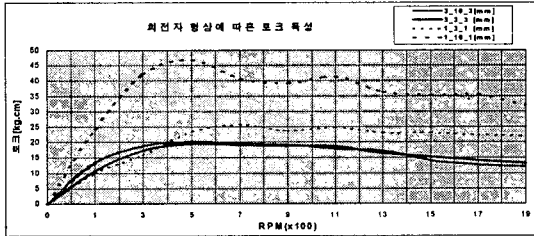


그림 7. 회전자의 두께(Al/Fe/Al(mm))에 따른 토크특성

투자율이 낮은 자성체(예: Steel-1008 계열)를 사용하거나, 자성체의 두께를 얇게 하거나, 전자석의 여자전류를 충분히 흘려주면 보다 빠른 시점에서 자성체는 포화된다.

분석 결과 자성체의 두께가 얇으면 포화되는 시점도 빨리 되어 정토크 특성이 저속에서도 가능하고, 도체의 두께가 두꺼울수록 발생하는 와전류의 양이 증가하여 제동력의 크기도 증가시키지만 도체의 두께가 어느 한도 이상 증가하면 공극이 증가하는 것과 같은 효과로 인해 오히려 발생 제동력의 저하를 일으키는 것을 알 수 있었다. 여기서, 발생하는 전자력의 대부분은 와전류에 의한 것이나, 직접적인 제동력은 회전자 내부의 자성체와 고정자 간의 이격된 거리의 제곱에 반비례 하므로 이러한 사항들을 고려한 해석결과, 회전자 내부의 자성체와 고정자 간의 이격거리가 임의의 유효자속의 쇄교를 가능하게 할 정도임을 가정했을 경우, 자성체(Fe)와 도체(Al)의 두께가 동일하면 저속에서의 정토크 특성을 그림 7에서 확인할 수 있다.

4. 실험 결과

본 연구에서는 사용된 와전류 제동기 실험장치는 반경이 15(cm)이며 4극의 전자석이 각각 2개씩 양쪽 고정자 철편에 고정되어 있으며 회전자의 알루미늄 두께는 1(mm), 회전자 철편의 두께는 3(mm)이며 전자석과 회전자 사이의 공극은 2.5(mm)이다.

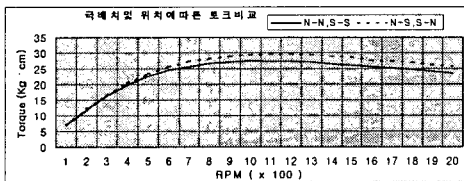


그림 8. 실험결과 1

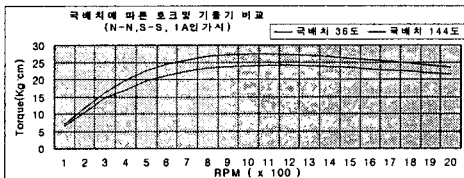


그림 9. 실험결과 2

그림 8은 마주보는 고정자 전자석의 극이 N-N(S-S)인 경우와 N-S(S-N)인 경우의 속도-토크 특성 결과를 나타낸다. 전자의 경우, 900~1300rpm동안 약 27(Kg·cm)의 정토크를 유지하나, 후자의 경우에는 900~1500rpm동안 약 29(Kg·cm)의 토크를 유지하여

전자석의 마주보는 극이 서로 다른 경우, 서로 같은 극끼리 마주보는 경우보다 정토크가 200rpm 정도 지속되는 것이 확인되었다.

그림 9는 양쪽 고정자에 고정된 2개의 전자석간의 거리간격을 각각 36°, 144°로 하였을 때의 속도-토크 특성을 나타낸다. 극간격이 36°인 경우의 최대토크가 144°일 때 보다 3(Kg·cm) 가량 크게 나타나지만, 정속도 구간은 36°일 때 900~1300rpm, 144°일 때 900~1450rpm로 극간격이 144°일 때, 150rpm정도 정토크 구간이 더 지속됨을 확인할 수 있었다. 아래 그림 10은 실험장치의 모습을 나타낸다.

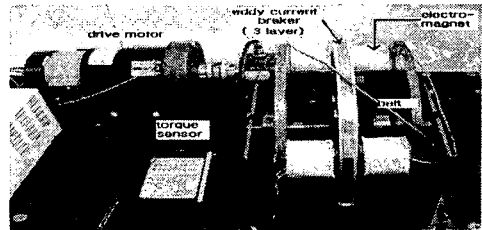


그림 10. 실험장치의 모습

4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄-철-알루미늄, 또는 구리-철-구리의 3층으로 구성된 복합구조 회전자를 와전류 제동기에 적용함으로써 철심으로 된 단일 구조의 회전자나, 알루미늄-철 또는 구리-철의 2층 구조의 회전자로 구성된 기존의 제동기의 속도-토크 특성이 비교적 선형적이며 비효율적인 제동 특성에 있어서 그 해결방안을 제시하였다. 해석과 실험결과, 3층의 복합구조 회전자의 제동이 보다 효율적이며, 자기 경로를 고려하여 일정한 속도범위에서는 정토크 부하 특성을 가짐을 확인하였고, 저속에서의 정토크 특성 방안을 제시하였다.

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

이러한 연구결과에 속도 변화에 따른 부하 토크가 일정하므로 향후 정토크 제동을 필요로 하는 시스템의 제어용 제동기로서 적합할 것으로 기대되며, 보다 광범위한 속도 영역에서의 특성해석과 실험이 수반될 경우, 개루프 제어에 의한 서보시스템의 구현을 가능하게 함으로써 산업적 응용이 유용하게 이루어질 것으로 기대된다.

[참고 문헌]

- [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. Kusunadi, "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.