

전자석을 이용한 와전류 제동기의 회전자 발생 토크 특성

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

(The eddy current braking torque on moving rotor 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 - It needs to study on proper brake performance used in servo system of industrial application.

In this study, 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 this paper.

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.

1. 서 론

산업기술의 발전과 함께 최근 시스템의 개발은 동력원이 되는 모터, 액추에이터 등의 동작을 정밀하게 제어하는 분야에 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이를 위하여 제동특성을 고려한 서보시스템의 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

시불변 자속이 이동중인 회전 도체판에 의해 쇄교되어 도체 내부에 와전류가 유도되며, 로렌츠의 법칙에 따라 유도된 와전류와 자속 사이의 상호 작용에 의하여 제동 토크가 발생된다.

회전자의 재료로 철을 사용한 기존의 제동기는 제동토크를 발생하기 위한 자속의 투자율은 우수하나 와전류가 흐르기 시작하면 전기적 저항으로 인해 열로 소비되는 에너지를 감소시키기 어려운 단점이 있었다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 자속의 투자율을 저하시키지 않으면서 와전류의 흐름을 원활하게 하기 위하여 구리나 알루미늄 등의 재질을 복합적으로 사용한 구조를 갖는 회전자의 제동토크 특성을 해석하였다.

영구자석을 사용하여 제동토크를 조절하는 경우, 기자력의 크기는 회전원판을 계자축으로 이동하거나 회전원판으로부터 자석을 이격시키기 위한 클러치와 같은 기계장치가 추가되어야 하는 불편함이 있으나 전자석을 사용함으로써 이러한 단점을 배제할 수 있다. 본 연구에서는 전자석을 이용하여 전자석의 면적과 극수에 따라 각각 다르게 나타나는 제동토크를 비교하였다. 다양한 구조의 고정자와 복합구조의 회전자 적용에 따라 선형적 토크 특성과 일정 부하 토크 특성을 시뮬레이션에 의해 분석, 확인하였다.

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 금속원판으로 구성되어있다. 전자석은 많은 극수로 여자(exciting)될 수 있으며, 자기 저항을 줄이기 위해 철판으로 지지되어 있다.

그림 1과 같이 구성된 제어기는 양쪽 고정자 판에 고정된 전자석 사이에 일정 간격의 공극을 둔 3층 구조의 회전자로 구성되어 있다.

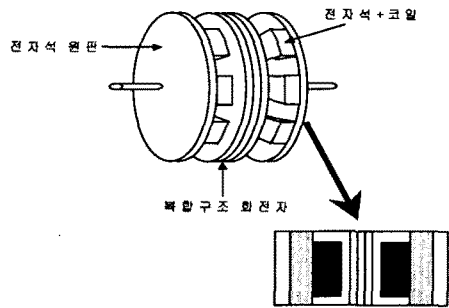


그림 1. 와전류 제동기의 구조

이 회전자는 알루미늄-철-알루미늄의 3층으로 구성되어 있으며, 알루미늄 대신에 구리를 사용할 수 있다. 회전자는 제어대상이 되는 전동기에 축으로 연결되어 회전하게 된다. 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.

회전자의 알루미늄판에 유도된 와전류는 로렌츠의 법칙에 따라 회전방향의 반대방향으로 힘을 받아 제동력을 발생한다.

2.2 동작원리

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

해석의 과정에서 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 가정을 기본으로 한 자체는 정지된 2차원 평면(x, y)상에 존재하게 된다.

와전류는 전자석을 기준으로, 이동하는 도체 평면상에서 일정하게 분포한다. 와전류의 분포는 자극의 극성과 방향을 반영하기 때문에 완벽한 해석을 위해서는 극 피치에 관한 데이터가 필요하며, 해석에 사용된 Maxwell 방정식은 아래와 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ec} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

여기서, \vec{J}_s 는 전자석으로 인한 전류밀도이며, 이를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\vec{J}_s = \vec{M} \times \vec{n} \quad (3)$$

식 (3)에서 \vec{M} 은 전자석의 자화를 나타내는 일정한 벡터이며, \vec{n} 은 자기 경로를 따라 수직으로 향하는 단위 벡터이다. 2차 전류 밀도 \vec{J}_{ec} 항은 속도 변화에 의해 발생하는 와전류 밀도로서, 이는 판의 도전을 σ , 속도 \vec{V} , 자속밀도 \vec{B} 의 함수이다.

$$\vec{J} = \sigma \vec{V} \times \vec{B} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (5)$$

식(4)는 자기 벡터 포텐셜을 이용하여 해석한다. 자속 밀도가 식 (2)로 주어지면 자속밀도의 정의는 자동적으로 솔레노이드 특성을 만족하게 된다. 이러한 개념을 식 (1)에 적용하면, 정자계에서의 회전 방정식을 아래와 같이 나타낼 수 있으며, 이동영역에서 전위항이 부가된다.

$$\nabla \times (v \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s + \sigma \vec{V} \times \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

속도가 일정하기 때문에 이 방정식에는 시간의 미분항은 존재하지 않으므로 정적인(static) 상태가 된다. 적용 가능한 3차원 모델링 가능성을 위하여, 3차원 또는 유도전류를 위한 복귀 경로는 회전자 저항에 대한 Yee 계수를 곱하여 고려하였다.[14]

3. 특성 해석

초기의 제안된 모델은 두께가 10mm인 원판 2개에 각각 4극의 전자석을 고정시켜 구성한 고정자 축과, 2mm의 공극, 그리고 재질이 철로 된 회전자로 구성되었고, 평균 직경이 150mm이며 강철제를 사용한 모델로 설정하였다.

그러나 언급한 바와 같이 와전류를 유도하기 위한 알루미늄 판과, 자기경로를 만들어주기 위한 철을 이용한 복합구조의 회전자를 사용하는 것이, 철만을 이용하거나 구리 또는 알루미늄 판만을 이용하여 회전자를 구성하던 방식보다 유리하다.[2] 본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 3층 구조인 회전자를 제안하였으며, 이 회전자의 자기경로를 그림 2에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 구조는 다음과 같다. 1)회전자가 구리-철-구리의 3층 구조인 경우, 2)회전자가 알루미늄-철-알루미늄의 3층 구조를 갖는다.

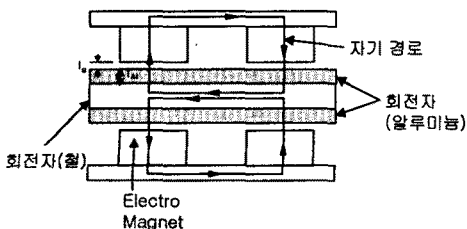


그림 2. 3층 회전자의 이상적 구조

3.1 속도 토크 특성

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 누설자속을 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.

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

주어진 가정을 고려하여 매우 낮은 속도에서 전자석과 공극 및 알루미늄 층의 자속밀도 B 는 일정하며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 N 은 전자석 한 극 당 감긴 코일의 권수이며, l 은 코일에 흐르는 전류, l_g 는 공극의 길이, 알루미늄 층의 두께는 l_{Al} 이다. 와전류 밀도 J 는 일정하며 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

식(9)에서 σ 는 구리나 알루미늄의 도전율이며, V 는 회전자의 속도이다. 극 하부의 구리 혹은 알루미늄의 부피 $s l_{Al}$ (s 는 극의 면적)에 J^2 / σ_{Al} 를 곱하여 소모 전력을 계산할 수 있으며, 전력을 원판의 회전속도로 나누면 극 당의 힘을 알 수 있다.

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

식(10)에서 힘은 $l_{Al} = l_g$ 일 때 최대가 된다. 그러나 l_g 와 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. 상하 양면의 고정자 전자석에 의해 3층의 회전자에 발생하는 힘은 고정자의 전자석이 한쪽만 있을 때와 비교하여 2배의 힘을 나타낸다.

3.2 제안한 모델의 특성해석

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

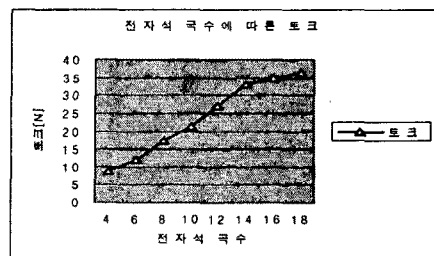


그림 3. 전자석 개수에 따른 토크

극수가 적으면 주 자기경로 저항이 커지고 회전자의 자속밀도는 낮아진다. 극수를 4에서 8로 변경한 경우 총 자속은 거의 2배로 커지고 토크도 2배가 되는 것을 알 수 있다.

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

다음의 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.

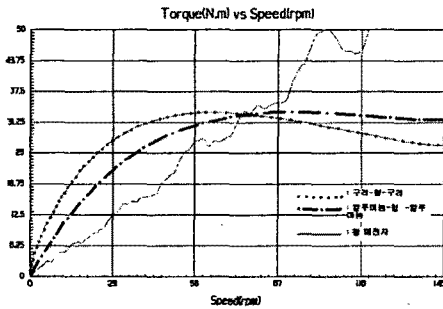


그림 4. 회전자 재질에 따른 속도-토크 특성

그림 4로부터 회전자의 구조가 단순히 강철로만 구성된 경우는 유도기와 유사하게 회전자의 속도가 증가할수록 발생토크도 증가하고 이후에는 천천히 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 특성은 속도의 변화에도 불구하고 일정한 정토크 특성을 요구하는 시스템에서는 바람직한 결과라 할 수 없다.

따라서, 정토크 특성을 요구하는 서보시스템에서는, 구리-철-구리, 또는 알루미늄-철-알루미늄의 복합구조의 회전자가 유리한 것을 알 수 있다.

그림 4에서, 회전자가 1) 구리-철-구리의 구조로 되어 있는 경우는 저속에서 보다 큰 토크를 얻을 수 있는 있으나, 최대 토크점 이상의 고속에서는 토크가 감소하는 것을 알 수 있다. 반면, 2) 알루미늄-철-알루미늄 구조의 회전자인 경우는 1)의 경우보다 고속에 이르러야 최대 토크에 도달하나, 고속으로 갈수록 정토크 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

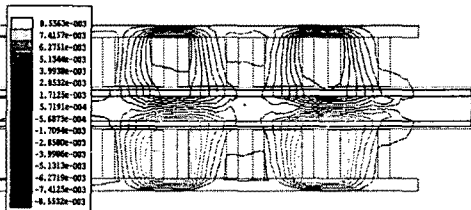


그림 5. 복합구조 회전자의 자속 분포

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 6. 복합 구조 회전자의 와전류 분포

그림 5는 본 연구에서 제시한 3층의 복합구조를 갖는 회전자의 자속분포를 나타낸 결과이며, 그림 6은 와전류 분포를 나타낸 결과이다. 그림 5, 그림 6의 결과로부터 예상한 바와 같이 자속은 철을 통하여, 와전류는 표면 알루미늄 도체에 집중적으로 분포하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

철심으로 된 단일 구조의 회전자나, 알루미늄-철 또는 구리-철의 2층 구조의 회전자로 구성된 기존의 제동기의 속도-토크 특성은 비교적 선형적이며 비효율적인 제동 특성을 나타낸다.

이에 대한 대책으로 본 연구에서는 알루미늄-철-알루미늄, 또는 구리-철-구리의 3층으로 구성된 복합구조 회전자를 와전류 제동기에 적용하였다. 해석결과 3층의 복합구조 회전자의 제동이 보다 효율적이며, 일정한 속도범위에서는 정토크 부하 특성을 가짐을 확인하였다.

또한 제안된 3층 구조 회전자의 자속 분포와 와전류 분포가 각각 자기적 저항이 작은 철과 전기적 도전성이 우수한 알루미늄 또는 구리로 구성된 도체에 집중적으로 분포함을 알 수 있었다.

향후 실험적인 결과의 도출과 함께 고속에서의 정토크 부하 특성을 비롯한 제동기의 특성해석이 수반되어야 할 것이며, 이러한 연구결과는 속도 변화에 따른 부하 토크가 일정하므로 개루프 제어에 의한 서보시스템의 제동을 가능하게 함으로써 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.