

와전류를 이용한 제동장치의 실험적 동특성 연구

이미선* · 곽동기* · 배재성** · 황재혁**

An Experimental Study on Dynamic Characteristics of an Eddy Current Brake System

Mi-seon Yi* · Dong-gi Kwag* · Jae-sung Bae** · Jai-Hyuk Hwang**

ABSTRACT

Eddy currents are generated when a moving conductor is exposed to a stationary magnetic field, or vice-versa. These currents create their own magnetic field, causing a repulsive force between the magnetic material and the conductor. Using this concept, a magnetic brake system can be established by the permanent magnets and a conductive material. In this paper, the eddy current effects on a magnetic brake system which consists of 2 pairs of magnets and a conductor are investigated by using a electromagnetic software, and the results of simulations are compared with experiments. It can be concluded how the arrangement of magnets effects on the dynamic characteristics of the eddy current brake system.

Key Words: Eddy Current, Eddy Current Brake System, Permanent magnet

1. 서 론

최근 하이브리드에 이목이 집중되고 있다. 기계의 단순생산력만 중시되던 이전 세대와는 달리 기술이 발달함에 따라 환경적인 문제, 연료 대비 효율, 소음, 보수 및 유지 등 세부적인 요소에 대한 성능향상도 요구되고 있기 때문이다.

열차의 고속화로 인해 그동안 사용되던 유압식 제동장치는 한계에 부딪히고, 전기식 자동차의 새로운 제동장치의 필요성이 요구되면서 와전류 제동장치에도 눈을 돌리고 있다. 외부 동

력공급이 필요하지 않고, 비접촉식이기 때문에 마모의 염려가 없다는 장점이 있어 실생활에서 저속 장치의 제동에도 적용되고 있다. 현관문의 힌지, 낚시 릴의 제동, 롤러코스터의 감속 장치 등을 예로 들 수 있다.

와전류란 도체가 자기장에서 움직일 때나 정지한 도체에 시간에 따라 변화하는 자기장이 가해질 때, 전자기 유도에 의해 도체 표면에서 발생하는 소용돌이 모양의 전류를 말한다. 발생한 와전류와 기존의 자기장사이에서 로렌츠힘(Lorentz force)이 도체와 자기장 사이 상대운동을 제동시키는데 이것이 바로 와전류 브레이크의 원리이다.

* 학생회원, 한국항공대학교 기계공학과

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부
연락처, E-mail: jsbae@kau.ac.kr

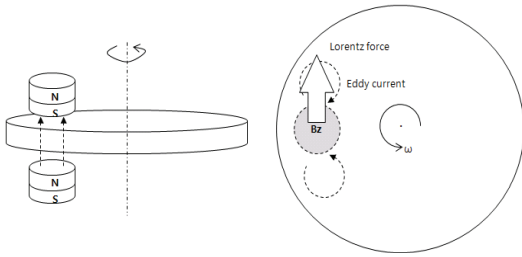


Fig. 1 Eddy Current Generation

와전류는 1824년 아라고(Arago)에 의해 발견되어 아라고의 원판으로 지금까지 알려져 있고, 1831년 패러데이가 전자기 유도의 법칙을 발견하여 이론적인 근거를 제시하였다. 그리고 1855년 푸코(Foucault)가 와전류에 의한 제동력을 실험으로 증명하였다. 이후에도 이론적, 실험적 연구가 계속되고 있다. D. Schieber[1]은 정자계 속 회전도체에 발생하는 토크의 이론식을 정립하였고, 이갑진 등[3]은 고속차량에서 유압식 제동장치의 시간 지연 현상 문제를 해결하기 위한 와전류형 제동장치의 대체 가능성을 보여주었다. 또한 이갑진[2]은 유도 자속밀도를 고려한 와전류형 제동장치의 해석적 모델링을 제시하고 현관문의 힌지에 와전류형 제동장치를 적용하였다. 회전운동의 제동 이외에, 광동기 등[4]은 ECD 감쇠기를 제작 및 실험하여 이를 이용한 단일방향 운동의 감쇠와 동특성을 보였다.

본 논문에서는 링 타입 영구자석 두 쌍을 사용하여 구리 원판의 회전을 제동하는 장치를 설계 및 제작하였고 자석 배치에 따른 와전류에 의한 제동토크의 동적 특성을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 개요

구리 원판이 등속으로 회전하고 있을 때 두 쌍의 영구자석의 배치에 따른 제동토크의 변화를 살펴보기로 한다. 일단 자석의 배치는 자석 두 쌍의 자속이 원판을 투과하는 방향이 서로 같은 경우와 서로 반대인 경우로 구분하고 각각

을 A와 B로 언급하기로 한다. A와 B의 경우에서 원판의 회전중심에 대한 두 쌍의 자석중심의 사이각 θ 를 20, 40, 60, 180°로 변화시키면서 제동토크를 구했다.

즉, 본 논문에서는 상용 프로그램을 이용한 시뮬레이션과 실험을 통해 두 자석 쌍의 자속 방향이 동일한 경우(A)에서 사이각(θ)를 변화시키면서 제동토크의 변화를 살펴보고, 두 자석 쌍의 자속 방향이 반대인 경우(B)에서 사이각(θ)에 따른 제동토크의 변화를 살펴본 뒤 A와 B를 비교해 보았다. 원판의 회전속도는 300, 400, 500rpm으로 변화시키면서 동일한 시뮬레이션과 실험을 진행하였다.

2.2 시뮬레이션(Simulation)

유한 요소법을 이용한 전자기장 해석 프로그램인 Maxwell 3D(version 12)를 사용하였다. Table.1에 시뮬레이션에서 사용된 재료의 물성치(properties)와 지오메트리(geometry)를 나타내었고, Fig.2는 A와 B의 시뮬레이션 모델을 나타냈다. 도시된 그림은 θ 가 20°인 경우이지만 동일모델을 θ 만 40, 60, 180°로 변화시켜 해석을 수행하였다. 한 쌍의 자석일 경우도 시뮬레이션을 수행하였다.

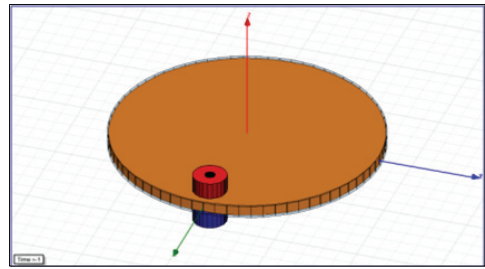
Table. 1 Material Properties and Geometry

Disk		Copper
R	Radius (mm)	80
d	Thickness (mm)	6
σ	Conductivity (1/ Ω m)	$5.79 \cdot 10^7$
Magnet		Nd35
D_o	Outer diameter (mm)	20
D_i	Inner diameter (mm)	6
l	Thickness (mm)	10
H_c	Coercive force (At/m)	890000
Air		
μ_0	Permeability (H/m)	$4\pi \cdot 10^{-7}$
l_g	Air gap (mm)	2

해석 결과를 Fig.3에 도시했다. 300, 400, 500rpm로 각속도를 달리해도 θ 에 대한 제동토크의 경향은 동일하다. θ 가 20° 일 때 A, B의 결과 값이 크게 차이가 나지만 θ 가 커짐에 따라 점점 차이가 줄어들어 동일한 값으로 수렴한다. 수렴된 제동토크는 자석 한 쌍을 사용한 경우의 결과보다 두 배정도 크다. 이러한 해석 결과로 θ 가 약 80° 이상으로 커지면 제동토크의 크기는 사용되는 자석 쌍수에 비례한다고 볼 수 있다.

그리고 A와 B의 그래프는 수렴값을 기준으로 상하 대칭을 이룬다. 이는 두 자석 쌍이 근접할 때 발생 제동토크를 증가 혹은 감소시키는 상호영향이 존재하는 것으로 추측할 수 있다. 이때, θ 는 두 자석 쌍이 근접한 정도를 나타내는 변수이다.

즉, 두 자속 방향이 같은 경우 두 자석 쌍의 상호작용에 의해 제동토크 발생량이 감소되고, 두 자속방향이 반대일 경우 제동토크 발생량이 증가되는데, θ 에 따라 증감양의 크기가 같다.



(c) The case of one pairs of magnets
Fig. 2 Simulation Modeling

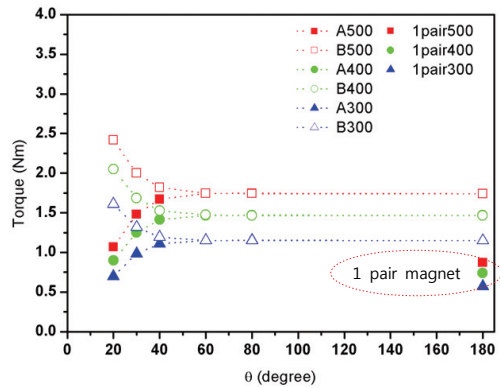
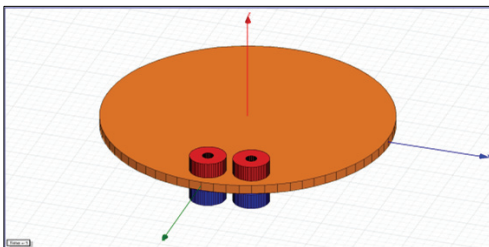
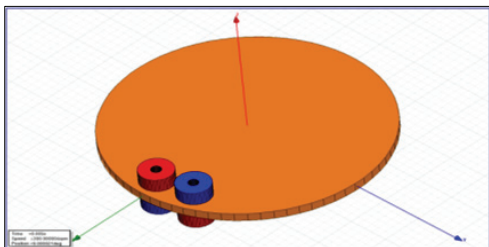


Fig.3 The Simulation Results



(a) The same magnetic flux direction (A)



(b) The different magnetic flux direction (B)

2.3 실험(Experiment)

시뮬레이션과 동일한 물성치와 형상을 갖는 구리원판과 링 타입자석을 사용하고 원판이 진동없이 회전할 수 있도록 실험 장치를 설계하였다. 두 쌍의 자석을 특정 사이각 만큼 떨어뜨린 채 위치시키고, 자석과 원판 사이 공극을 두어 접촉하지 않도록 자석 고정 지그를 제작하였다. 그리고 10kgf인 굽힘형 로드셀에 지그를 얹어 발생 제동토크를 로드셀에 측정되도록 장치하였다.

원판을 회전시키기 위해 정격출력이 800W이고 정격토크는 2.55Nm인 AC모터를 사용하고 그에 맞는 모터 드라이버를 사용하였다. 회전속도를 디지털(digital) 조그로 입력하면 모터 드라이버를 거쳐 모터의 속도를 손쉽게 조절할 수 있다. 그리고 접촉식 타코미터를 사용하여 원판의 회전속도가 입력속도와 일치하는지 확인했다.

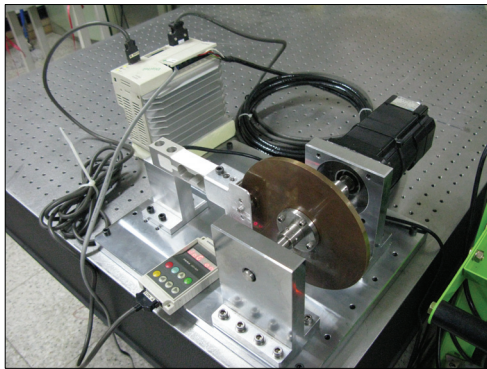


Fig.4 The Eddy Current Brake System

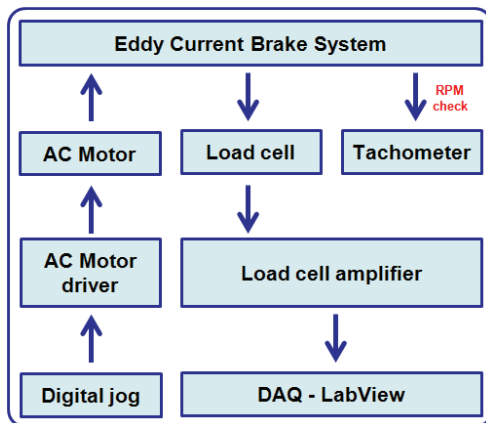


Fig.5 The Schematic of Experiment

모터에 의해 회전하는 원판과 고정된 자석사이에서 와전류로 인해 발생하는 제동토크는 자석 고정지그에 가해지고 로드셀이 이를 측정한다.

로드셀의 출력전압은 로드셀 증폭기를 통과하면서 필터 및 증폭되고 랩뷰(LabVIEW)에서 보정(Calibration)단계를 거쳐 저장된다. Fig.6은 랩뷰(LabVIEW)의 블록 다이어그램이다.

해석을 수행한 경우들을 동일하게 실험을 수행하여 결과를 비교했다. 시뮬레이션에서 자석 한 쌍을 사용한 결과값의 두 배가 자석 두 쌍을 사이각을 180° 로 두었던 결과와 같았다. 이 결과를 근거로 θ 가 180° 인 경우의 실험결과를 자석 한 쌍을 사용하여 실험한 결과에 두 배 곱한 값으로 가정하였다.

Figure 7에서 실험 결과 역시 시뮬레이션과 동일한 경향임을 확인할 수 있다. A의 경우 θ 가 커질수록 제동토크가 비선형적으로 증가하고 B의 경우는 θ 가 커질수록 제동토크가 비선형적으로 감소하는데 서로 대칭적이다. 그리고 θ 가 약 80° 이상이 되면 A와 B가 같은 값으로 수렴한다.

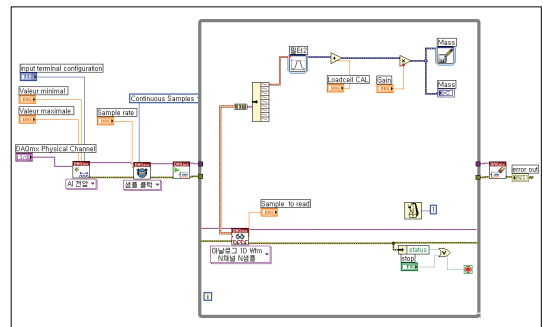


Fig.6 LabVIEW Block Diagram

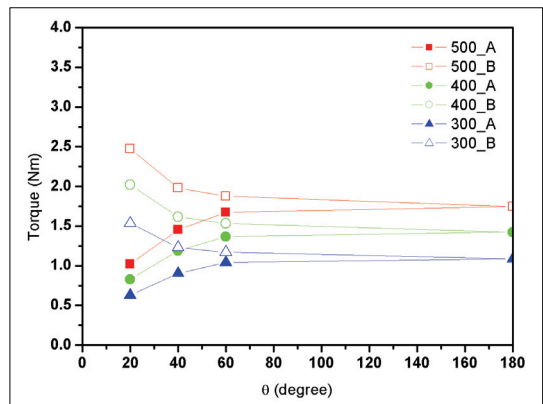


Fig.7 The Experiment Results

3. 결론

시뮬레이션에서 부여한 경계조건과 달리 실험에서는 외부환경이 영구자석의 자속에 영향을 주었고, 실험장치 제작상의 문제로 2mm 공극 유지에 약간의 오차가 있었다. 또한 와전류가 열 에너지로 손실되고 이에 따라 원판 표면의 온도

가 조금씩 달라져서 시뮬레이션과 실험사이에 오차가 존재한다. 그러나 그 값이 크지 않고 시뮬레이션과 실험에서 θ 에 대한 제동토크의 변화 경향이 일치한다.

두 자석 쌍의 사이각을 약 80° 이상 크게 유지하면 자석의 상호영향이 없어 제동토크는 사용하는 자석 쌍수에 비례한다. 그러나 그 이하 사이각에서 제동토크는 단순히 자석 쌍수에 비례하지 않는다. 두 자속방향을 동일하게 배치할 경우 와전류로 인해 발생하는 제동토크가 자석 쌍수에 비례한 값보다 감소하고, 자속 방향을 반대로 배치하는 경우 제동토크가 증가한다. 그러므로 와전류형 제동장치에서 사용하는 자석 쌍의 수를 N 배로 증가시켜 더 큰 제동토크를 얻으려고 할 경우, 자석 쌍의 배치를 자속방향을 서로 엇갈리게 하고 사이각의 최소로 하면 N 배 이상의 제동토크 증대효과를 볼 수 있다.

본 제동장치는 일반적인 제동장치와 달리 마찰력을 사용하지 않아 마모가 없고, 구조가 매우 단순하다. 또한 영구자석 이외에 외부 동력을 공급하지 않아도 된다. 그렇기 때문에 회전식 댐퍼나 제동장치로써 실생활에서 다양하게

적용이 가능할 것이다. 향후 전자석을 이용한 와전류형 제동장치를 설계하여 현재보다 더 큰 제동력을 얻고, 제동력을 제어할 수 있도록 연구할 계획이다.

참고 문헌

- [1] D.Schiever, "Braking torque on rotating sheet in stationary magnetic field.", Proc.IEE, 1974, Vol.121, No.2, pp. 117-122.
- [2] 이갑진, "경계 조건과 유도 자속 밀도를 포함하는 와전류 타입 기기의 해석적 모델링 : 자기 댐퍼 응용", 박사학위논문, 광주과학기술원, 2002.
- [3] 이갑진, 박기환, "와전류형 제동장치의 토크제어", 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A, 대한기계학회, 1997, pp. 434-439.
- [4] 락동기, 배재성, 황재혁, "와전류 댐퍼의 동적특성", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 2007, pp. 947-951.