

## 비상 제동기능을 지닌 전자력 브레이크 시스템(MABS)에 대한 제안 및 동작특성해석

강종호, 김태용, 최상민, 정현교  
 서울대학교 전기,컴퓨터공학부

Dynamic characteristics analysis of the magnetic actuator brake system (MABS) for emergency a car

Jong-Ho Kang, Tae-Young Kim, Sang-Min Choi and Hyun-Kyo Jung  
 Seoul National University

**Abstract** - This paper formulates the principle of the magnetic actuator brake system (MABS) for emergency situation driving a car. When the exciting break system of a car is broken, MABS will be able to stop the car by the electric system. MABS controls the rotating wheel to slow down gradually while holding and laying the wheel down several ten times per second. We present the magnetic field and dynamic behavior analyses for the magnetic actuator brake system using finite element method (FEM) associated with parameter, for calculating the displacement of the moving parts and the supplying current.

### 1. 서 론

공학의 복합체라고 불리는 자동차 공학에 있어서 동력 장치에 대한 연구와 더불어 제동장치에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 제동장치는 운전자의 안전과 생명에 직결되는 문제이므로, 성능 뿐 아니라 안전성을 기준으로 연구되어야 한다[1-2]. 기존의 제동장치는 유압식 기계적 브레이크 시스템을 사용하여 왔다. 이는 마스터실린더에서 강한 유압력을 발생시켜 오일을 파이프 라인을 통해 각 휠에 전달하게 되는데 종종 이 압력으로 인한 유압파이프의 파손이 발생하고 결국 브레이크가 파열되어 제동기능을 상실하게 된다. 이와 같은 브레이크 파손으로 인해 대형사고를 방지할 수 있는 보조제동장치에 대한 연구가 여러 방향으로 시도되고 있다. 본 논문에는 보조제동장치의 일환으로 X-By-Wire 시스템인 전자력브레이크시스템 (MABS)을 제안하고자 한다.

MABS에 전류를 일정시간 공급 및 차단함으로써 1초에 수십 번씩 브레이크를 작동시켜 슬립현상을 방지하는 동시에 바퀴가 조금씩 회전 하면서 멈추도록 하여 조종성을 겸비한 효율적인 제동능력을 가질 수 있다. 휠 센서에 의해 자동차의 속도를 감지할 수 있고, 완전제동속도 범위 내에 들어오게 되면 MABS에 전류를 계속 인가시킴으로써 차량을 완전히 멈추도록 한다. MABS는 구조가 간단하고, 전류에 의한 제어로 원격제어가 가능하며, 안정적이며 효율성이 높다. 유한요소법(FEM)을 이용하여 코일 전류에 의해 여자된 자계를 해석하고 전기회로와 기계적인 역학과의 커플링 문제를 해결함으로써 입력전압과 전류변화에 따른 브레이크 동작을 위한 가동자의 힘, 변위 및 속도 등을 구할 수 있다[3-4]. 이러한 동작특성해석을 통해 MABS가 차량의 비상용 제동차치로써 적용 가능함을 보일 것이다.

### 2. 본 론

#### 2.1 MABS 구조

MABS는 기존 유압식 브레이크 시스템의 파손에 의

한 제동기능이 상실되었을 때를 대비한 보조브레이크 시스템이고 구조가 아주 간단하고 작은 사이즈로 제작이 가능하므로 그림 1에서와 같이 기존 유압식 브레이크 시스템 속에 MABS를 바로 적용할 수 있다. MABS는 기존 유압식 브레이크시스템과 상보적으로 동작할 수 있을 뿐 아니라 정상시에는 기존 유압식 브레이크의 동작에 방해가 되지 않도록 최적설계가 되어야 한다. MABS는 크게 4개의 부품(철심, 가동자, 코일, 로드)으로 이루어져 있고, 특히 외부의 링크구조 없이 단 하나의 부품이 직접적으로 브레이크 작동을 하게 됨으로 제품의 경량화와 효율성 및 기능성 그리고 안정성에서 뛰어난 구조를 지닌다.

그림 2에서는 MABS와 유압조작기 시스템의 세부구조를 나타내고 있다. 코일전류에서 여자된 자력으로 가동부가 브레이크 라이닝으로 동력을 전달하여 휠과 브레이크 패드의 마찰을 발생시켜 제동을 유발하고 다시 전류가 끊어지게 되면 휠 스프링과 MABS안에 있는 스프링의 힘으로 가동부의 위치가 복원이 되는 원리이다. 이러한 과정이 완전 제동 시까지 반복적으로 발생한다.

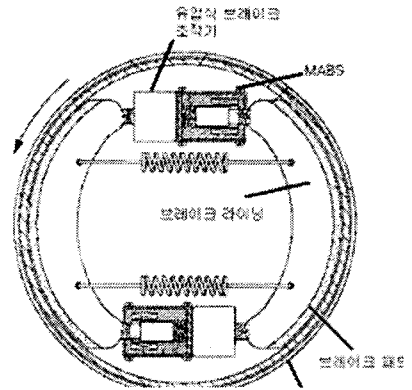


그림 1. 휠 브레이크 내부 구조

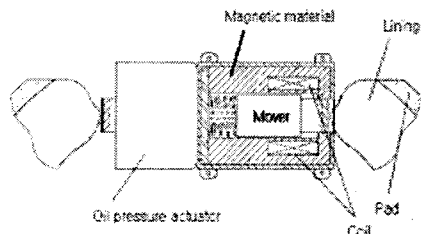
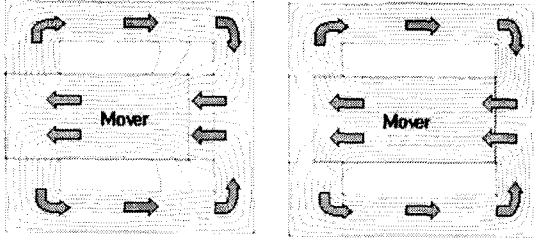


그림 2. MABS와 유압조작기 세부구조

## 2.2 자계분포 및 동작원리



(a) 전류 투입 후 브레이크동작 직전 때 자계분포 (b) 전류 투입 후 브레이크동작 일 때 자계분포

그림 3. MABS 자계 분포

DC 배터리 전원으로로부터 커패시터에 충전된 전압입으로부터 전류는 MABS에 유입된다. 유입된 전류에 의해 자계는 그림 3과 같이 유도되고, 자력은 공극쪽으로 발생하게 된다. 휠과 가동부 스프링은 가동부의 공극 방향과 반대방향으로 힘을 나타낸다. 그림 3(a)는 전류 투입 후 스프링의 반대하는 힘을 극복하고 브레이크 동작전의 자계분포를 나타내고 있고, 그림 3(b)는 계속해서 투입되는 전류에 의한 자력이 스프링보다 월등히 커져 브레이크 동작이 완전히 이루어져 있을 때의 자계분포를 나타낸다. 이때 자기저항은 공극이 작을수록 급감하므로 가동부가 반대쪽 철심에 가까워질수록 큰 힘을 받게되고 최대의 힘을 발생시킨다. 즉 브레이크 동작이 이루어질수록 그 힘이 커지는 구조를 나타낸다. 일정시간 전류를 인가한 후 또 다시 전류를 끊는 동안 코일전류에 의한 자력이 휠과 조작기 스프링보다 작게 되어 가동부는 그림 3(a)와 같이 복원되는 자계분포를 나타내게 되어 브레이크가 해제된다. 반복적인 동작에 의해 MABS는 ABS(Anti-locking Break System)처럼 동작하게 되어 슬립 없이 안정적인 제동력을 가질 수 있다.

### 2.3 동작 특성 해석

자기 벡터퍼텐셜을 이용하여 FEM을 통한 자계해석을 아래 식과 같이 수행한다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 + \vec{J}_e \quad (1)$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu}(\nabla \times \vec{A}) - \frac{1}{\mu_r} \vec{M}_r \quad (4)$$

식 (1),(2),(3),(4)를 이용하여 벡터퍼텐셜을 이용하여 나타내면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \vec{J}_e + \left( \nabla \times \frac{1}{\mu_r} \vec{M}_r \right) \quad (5)$$

여기서  $J_0$ 는 권선 전류 밀도,  $J_e$ 는 와전류 밀도,  $M$ 은 자화량,  $A$ 는 자기벡터 퍼텐셜, 그리고  $M_r$ 은 잔류자화량이다. 자기회로 방정식은 가동자가 움직이기 전과 가동자가 움직이는 동안에 다르게 표현된다. 전류인가 후 전류에 의해 발생하는 자계의 힘이 스프링의 힘보다 작을 때는 가동자가 움직이지 않으므로 가동자 변위에 따른 자속변화 (Speed Voltage)는 없고, 전류변화에 의한 자속변화 (Transformer Voltage) 만이 발생하게 되므로 식 (6)과 같이 표현된다.

$$V = (I_0 + di) + N \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \left( \frac{di}{dt} \right) \quad (6)$$

전류가 증가하게 되어 자계 힘이 스프링보다 커지게 되면 가동자가 동작하게 되고, 이 때는 가동자의 위치에 따른 자속 변화를 고려해 주어야 하므로 자기회로 방정식은 식 (7)과 같이 표현된다[3].

$$V = (I_0 + di) + N \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \left( \frac{di}{dt} \right) + N \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \left( \frac{dx}{dt} \right) \quad (7)$$

여기서  $\phi$ 는 공극을 통해 흐르는 자속,  $N$ 은 코일 턴수를 나타낸다. 코일에서 여자된 자계 힘은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{magnetize} = - \frac{\phi^2}{2\mu_0 A_g} \quad (8)$$

식 (9)의 기계적인 운동방정식으로부터 가동자의 위치, 변위, 그리고 속도 등을 구할 수 있다.

$$M \left( \frac{d^2 x}{dt^2} \right) = F_{magnetize} + kx \quad (9)$$

$k$ 는 스프링 상수이다.

### 2.4 동작 특성 결과

MABS 설계사양은 표 1에 나타나있다. 자동차의 전면 휠에서는 제동력 뿐 아니라 운전자의 조향력을 확보하여야 하고, 반면에 후면 휠에서는 조향력 보다는 큰 제동력을 우선적으로 요구하기 때문에 이들 특성을 잘 고려하여 설계할 필요가 있다.

표 1에서는 이물 전, 후면 휠에 적용가능한 MABS 모델에 대한 설계사양을 나타내었다. 42[V] 배터리 전원에서 커패시터에 저장된 전압을 사용하게 되고 무게는 실제 액추에이터의 가동부 무게 뿐 아니라 브레이크 작동 때 동작을 일으키는 부하까지 포함한 것이다. 커패시터의 용량은 차량의 크기와 속도를 고려하여 완전제동 시까지 전류를 공급할 수 있도록 해야 한다. 본 논문에서는 아래와 같은 용량을 기준으로 시뮬레이션을 통한 MABS 특성을 나타내고, 비상용 제동장치로서 그 가능성을 가늠해본다.

표 1. MABS 설계 사양

	Front wheel	Rear wheel
Volume [mm <sup>3</sup> ]	50*50*30	50*50*50
Diameter of coil [mm]	0.9	1.0
Turns	225	208
Resistance (Ω)	0.67580	0.81278
Voltage [V]	42	42
Capacitance [μF]	100,000	100,000
Mass [kg]	1.0	1.0

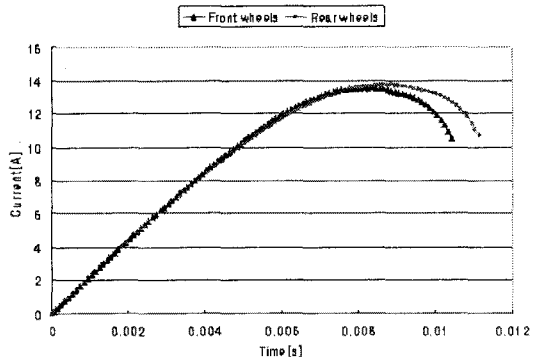


그림 4. 시간변화에 따른 코일에 투입되는 전류

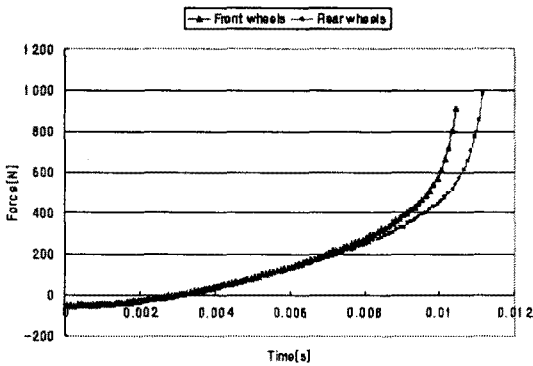


그림 5. 시간변화에 따른 전차력

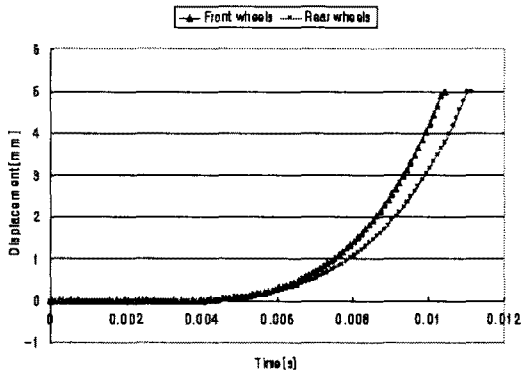


그림 6. 시간변화에 따른 가동부 변위

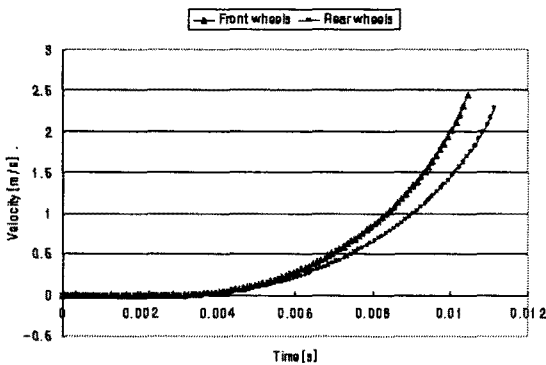


그림 7. 시간변화에 따른 가동부 동작 속도

그림 4'7에 나타난 바와 같이 전면 휠에서는 제동력 뿐 아니라 조향력을 확보하기 위해 브레이크 반응속도가 전면 휠에서와 비교해서 후면 휠에서 보다 빠른 것을 볼 수 있다. 이는 구동 전압을 제어함으로써, 현재 상태를 고려한 제동력을 설정하게 되므로 운전자가 효율적인 제동을 할 수 있으면서 휠의 슬립 없이 용이하게 조향을 할 수 있는 조건을 만들어 줄 수 있다.

그 동안 ABS를 적용한 유압식 브레이크 시스템에서는 초당 수번의 제동반응속도를 가짐으로써 실제로 ABS가 동작하는 동안에는 운전자의 조향을 기대할 수가 없었다. 후면 휠에서의 주 동작은 최대 힘으로 제동하는데 목적이 있으므로 반응속도는 전면 휠에 비해 상대적으로 늦지만 동작 힘은 큰 것을 볼 수 있다. 한 주기 시간설정은 차량의 현재 조건, 즉 중량, 속도 및 노면 상태를 고려할 수 있는 센서를 통해 최적의 상태로 설정될 것이다. MABS를 적용하면 초당 20회에 가까운 브레이크 동작을 기대할 수 있을 것이다. 보통 4 휠 차량의 경우, 전면 또는 후면 휠에 각 조작기는 4구가 장착되므로 1회 동작에 총 차량에 미치는 알짜 제동력은 7600[N]에 달하게 된다. 차량의 중량과 속도에 따라 그 제동시간은 달라지겠지만 비상시 위급한 상황에서 동작하는 만큼, 차량이 완전히 멈추는 제동시간은 아주 중요한 부분이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소법(FEM)을 이용하여 자체해석을 통한 비상제동 장치 MABS에 대한 동작특성을 나타냈다. MABS의 기본 동작을 ABS를 채택함으로써 자동차의 스티어링으로 인한 제동력 상실을 미연에 방지할 뿐 아니라 여러 번 나누어서 동작하기 때문에 기계적 스트레스를 줄여 기계적 강도를 키울 수 있고 제동거리 또한 짧게 가져올 수 있다. 각 차량의 구동 센서를 통한 정보를 이용하여 구동 전압을 제어함으로써 결국 제동력을 결정할 수 있다. 이는 MABS에서 차량의 현재 환경을 최대한 고려한 인공지능적인 제동을 발휘하게 되는 것이다. 또한 전류제어 시스템은 원격 자동시스템으로 구현 가능하게 되고, 이 시스템의 응용으로 운전자 뿐 아니라 외부에서 무선통신으로 위급한 상황 때, 강제적으로 자동차를 멈추게 할 수도 있을 것이다. 전차력을 이용한 브레이크 시스템은 제조비용과 유지보수 비용 절감 및 우수한 동작특성을 가지므로 이를 이용한 제동장치 연구가 향후에 보다 활발해 질 것으로 보인다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Y-H Yoon, J-S Jang. "Development Situation of the X-by-Wire system". *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*. vol.26, No.26. pp.15-25. 2004.
- [2] Paljoo Yoon. "Technology Trends and Perspectives of Brake-by-wire system". *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*. vol.26, No.26. pp.21-28. 2004.
- [3] Jong-Ho Kang and Hyun-Kyo Jung. "Development and Characteristic Analysis of New type Actuator, Electro Magnetic driven Force Actuator applicable to High Voltage Circuit Breaker" *The Fifth International Symposium on Linear Drives for Industry Applications*, 25-28 September 2005, pp. 383-386
- [4] B.A.R. Mckean and Dr. Reuber, "MAGNETS & VACUUM - THE PERFECT MATCH," *Trends in Distribution Switchgear*, 10-12 November 1998, Conference Publication No.459.
- [5] Edgar Dullni, "A Vacuum Circuit-breaker with Permanent Magnetic Actuator for Frequent Operations", *IEEE 18th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum-Eindhoven*, 1998, pp.688-691.