파라미터 변화에 따른 전자 브레이크 시스템의 민감도에 대한 연구

박희람*¹⁾·최세범¹⁾·최성진²⁾·전광기²⁾·황현수²⁾ 한국과학기술원 기계공학전공¹⁾·자동차부품연구원²⁾

Study for Sensitivity of the Electronic Brake System with the

Parameter Variation

Heeram Park^{*1)} · Seibum Choi¹⁾ · Sungjin Choi²⁾ · Kwanki Jeon²⁾ · Hyunsoo Hwang²⁾

 Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, Korea
 Vehicle Platform Research Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Youngjung-Ri, Pungse-Myun, honan, Chungnam 330-912, Korea

Abstract: This paper is focused on the output sensitivity of electronic brake system due to the parameter variation. The mathematical models of electro-mechanical brake system and electronic wedge brake system are introduced. Using MATLAB Simulink, the performance change of each system caused by parameter variation are verified.

Key words : EMB(Electro-Mechanical Brake), EWB(Electronic Wedge Brake), brake-by-wire(브레이크 바이 와이어), Parameter variation(파라미터 변화), Sensitivity(민감도), brake pad friction coefficient(브레이크 패드 마찰계수)

민감도를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

1. 서 론

회생제동 시스템은 제동 시 브레이크 디스크 와 패드 사이의 마찰열로 소모되는 차량의 운동 에너지를 전기에너지로 변환시켜 베터리, capacitor 혹은 기계식 에너지 저장장치에 저장 한 후 이를 구동 시에 다시 이용할 수 있는 기 술이다. 일반 자동차의 경우 제동력은 운전자 브레이크 답력에 비례하나, 회생제동 시스템의 경우 회생되는 에너지 양에 따라서 운전자의 브 레이크 답력과 일반적으로 비례하지 않게 된다. 따라서 자동차의 제동장치와 브레이크 페달은 단지 전기적인 신호로만 간접적으로 연결되는 Brake-by-Wire 기술개발이 필요하게 된다.

EMB, EWB 은 대표적은 Brake-by-Wire 시스템이 다. 본 논문에서는 EMB, EWB 시스템의 수학적인 모델링을 소개하고 MATLAB Simulink를 사용하여 가상의 모델을 구현한 후 파라미터 변화에 따른

2. EMB 시스템 모델링

Fig. 1은 EMB 시스템을 단순화 하여 나타낸 그림 이다.



Fig. 1 Simple diagram of Electro-Mechanical Brake system

Electro-mechanical brake의 작동 원리는 다음과 같다. 컨트롤러가 12볼트 베터리를 통해 모터를 회 전시킨다. 모터와 연결 된 스크류는 모터의 회전운 동을 스크류 너트의 직선 운동으로 변환시킨다. 스크류에 연결된 브레이크 패드가 디스크에 닿은 후 켈리퍼를 변형시키면 켈리퍼의 강성을 통해 디 스크에 clamping force가 작용하고 디스크와 패드 사이의 마찰 μ 에 의해 제동 마찰력이 발생한다.

2.1 PMSM 모델링

EMB를 위한 엑츄에이터는 PMSM(Permanent magnet synchronous motor)이 사용되었다. PMSM의 모델링은 Clarke and Park transform 을 사용한다. Clarke and Park transform은 교류 시스템을 쉽게 모델링하고 해석 및 제어하기 위해서 일반적으로 사용되는 방법이며 전압, 전류, 자속 등의 좌표계 를 사용하기 쉽도록 변환하는 것이다.

Clarke transform 은 3 상의 vector 를 2 상의 stator 직교(orthogonal) 좌표로 변환시킨다. Clarke transform 의 변환공식은 식 (2.1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} f_{\alpha} \\ f_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{a} \\ f_{b} \\ f_{c} \end{bmatrix}$$
(2.1)

Park transform 은 2 상 stator 직교 좌표계를 rotor 에 고정되어 회전하는 2 상의 d-q 축으로 변환시킨다. 여기서 d 축은 rotor flux 와 동일 축 상에 있다. 식 (2.2)는 Park transform 의 변환공식이다.

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix}$$
(2.2)

 θ 는 rotor 의 회전 각도이다.

식 (2.3), (2.4)는 PMSM 의 전압 방정식을 d-q 좌표계로 나타낸 것이다.

$$v_d = R_M i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_s \psi_q \qquad (2.3)$$

$$v_q = R_M i_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_s \psi_d \tag{2.4}$$

$$\psi_q = L_q i_q, \quad \psi_d = L_d i_d + \psi_{af}$$

여기서 v_d , i_d 는 d 축의 전압과 전류를 v_q , i_q 는 q 축의 전압과 전류를 L_d , L_q , ψ_d , ψ_q 는 각 축의 인덕턴스와 쇄교(flux linkage)를 ω_s 는 동기속도를 R_M 은 고정자(stator) 저항을 ψ_{af} 은 회전자에 의한 쇄교를 나타낸다.

모터의 전기적 토크(electric torque)는 식 (2.5)와 같다.

$$T_{M} = \frac{2}{3} n_{p} \left[\psi_{af} i_{q} + (L_{d} - L_{q}) i_{d} i_{q} \right] \qquad (2.5)$$

PMSM 의 벡터제어는 최대 토크를 발생시키기 위해서 자속 성분의 전류 가 0 이 되도록 제어한다. d 축 성분의 전류를 0 으로 보내면 DC 모터와 같이 선형화된 모델을 얻을 수 있다. d 축 성분의 전류를 0 으로 보냈을 때 식 (2.4), (2.5)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\psi_d = \psi_{af} \tag{2.6}$$

$$T_M = \frac{2}{3} n_p \psi_{af} i_q = K_t i_M \tag{2.7}$$

2.2 EMB Mechanical Part 모델링

EMB 시스템 mechanical 의 운동 방정식은 식 (2.7)과 같다.

$$T_M = T_L + T_F + J_M \dot{\omega}_M \tag{2.7}$$

$$T_L = \frac{L}{2\pi\eta} F_N \tag{2.8}$$

$$T_{F} = \begin{cases} D\omega_{M} + (C + G2F_{N})\operatorname{sign}(\omega_{M}), & \forall |\omega_{M}| > \delta \\ T_{E}, & if |\omega_{M}| < \delta \text{ and } |T_{E}| < (T_{S} + G2F_{N}) \\ (T_{S} + G2F_{N})\operatorname{sign}(T_{E}), & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$(2.9)$$

 T_L 은 clamping force 에 의한 load 를 T_F 는 screw 의 friction 으로 인한 load 를 나타낸다. Figure 1.2 는 T_F 를 나타낸 그림이다. 식 (2.9)에서 T_F 는 clamping force 에 dependent 함을 알 수 있다. D는 viscous friction coefficient 를, C는 load independent Coulomb friction torque 를 G는 friction load dependency 를 T_S 는 load independent static friction torque 를 나타낸다. $\delta = 0$ 에 가까운 매우 작은 속도라 정의한다.

Figure. 2 는 로드셀(load cell)을 이용하여 clamping force 을 측정한 데이터와 approximate 한 데이터를 나타낸 것이다.



Fig. 2 Clamping Force

Table 1 Error of Approximation

	Maximum Error	Error(%)
Clamping Force F_N	117.32 N	3.06

Fig. 2 에서 실선은 센서를 통해 측정된 값이고 점선은 approximate 한 값을 나타낸다. 측정된 데 이터를 통해 caliper stiffness가 상수가 아닌 caliper 변위에 dependent한 변수임을 알 수 있다. 따라서 caliper stiffness를 식 (2.10)과 같이 변 위에 대한 함수로 정의하여 F_N 을 근사화 하였다.

$$F_{N} = K_{Cal} y_{p}$$

$$K_{Cal} = K_{Cal} y_{p}$$

$$F_{N} = K_{Cal} y_{p}^{2}$$
(2.10)

Yp 설명

3. EWB 시스템 모델링

Fig. 3은 EWB 시스템을 간단하게 나타낸 그림 이다.



Fig. 3 Simple diagram of Electrical wedge brake system

 θ_M, ω_M 은 모터의 position 과 속도를 K_{Axial}, D_{Axial} 은 스크류의 stiffness 와 damping coefficient 를 x_W, y_W 은 웨지의 수평, 수직방향 변위를 K_{Cal} 은 caliper 의 stiffness 를 나타낸다.

Electronic wedge brake 의 작동 원리는 다음과 같다. 컨트롤러가 12 볼트 베터리를 통해 모터를 회전시킨다. 모터와 연결 된 스크류는 모터의 회전운동을 스크류 너트의 직선 운동으로 변환시킨다. 스크류 너트와 연결된 링크가 β의 각도와 F_M 의 힘을 가지고 웨지를 캘리퍼 하우징 안으로 밀어 넣는다. F_M 에 의해서 웨지와 켈리퍼 하우징 사이에 반력이 발생한다. 발생한 힘에 의해 브레이크 패드가 디스크를 누르게 된다. 켈리퍼 강성 K_{Cal} 을 통해 디스크에 clamping force F_N 이 작용하고 디스크와 패드 사이의 마찰 mu 에 의해 제동 마찰력 F_B 가 발생한다. F_B 는 다시 패드를 끌어 당기면서 clamping force 를 증폭시키게 되는데 이것이 자기 강화 효과가 작동하는 mechanism 이다.





Fig. 4 Simple diagram of Electrical wedge brake system

웨지의 수평, 수직 방향의 운동 방정식은 식 (3.1), (3.2)와 같다.

$$m_W \ddot{x}_W = F_M \cos \beta + F_b - F_R \sin \alpha$$

$$F_b = \mu F_N$$
(3.1)

$$m_W \ddot{y}_W = F_M \sin \beta - F_N + F_R \cos \alpha \qquad (3.2)$$

 m_W 는 웨지의 질량, μ 는 웨지와 브레이크 디스크 사이의 마찰계수, α 는 웨지의 각도를 β 는 모터 force 의 입력각을 의미한다.

Clamping force F_N 은 EMB 에서와 마찬가지로 근사화된 식을 사용하였다.

$$F_N = K_{Cal} y_W^2$$
 (3.3)

모터로 인한 input force 은 식 (3.4)와 같이 정의된다.

$$\begin{split} F_{M} &= -K_{Axial} \left(\frac{x_{W}}{\cos \beta} - \frac{L}{2\pi} \theta_{M} \right) \\ &- D_{Axial} \left(\frac{\dot{x}_{W}}{\cos \beta} - \frac{L}{2\pi} \omega_{M} \right) \\ &2\pi \eta T_{L} = LF_{M} \end{split} \tag{3.5}$$

 K_{Axial} 은 axial stiffness 를, D_{Axial} 는 점성 댐핑 (viscous damping)을, L은 screw lead 를, η 는 screw 효율을 의미한다.

웨지의 수평, 수직방향 운동의 관계식은 다음과 같다.

$$y_W = \tan \alpha x_W \tag{3.6}$$

위와 같은 관계에 의해 식 (3.2)를 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$m_W \tan \alpha \ddot{x}_W = F_M \sin \beta - F_N + F_R \cos \alpha \quad (3.7)$$

식 (3.1)과 (3.7)에서 F_R 을 소거할 수 있다. 식 (3.7)에 $\tan \alpha$ 를 곱해서 식 (3.1)에 더하면,

$$\ddot{x}_{W} = \frac{\left(\cos\beta + \tan\alpha\sin\beta\right)}{m_{W}\left(1 + \tan^{2}\alpha\right)}F_{M} - \frac{\left(\tan\alpha - \mu\right)}{m_{W}\left(1 + \tan^{2}\alpha\right)}F_{N}$$
(3.8)

식 (3.4), (3.5)를 식 (3.8)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{x}_{W} = \frac{\left(\cos\beta + \tan\alpha\sin\beta\right)}{m_{W}\left(1 + \tan^{2}\alpha\right)} \left[-K_{Axial}\left(\frac{x_{W}}{\cos\beta} - \frac{L}{2\pi}\theta_{M}\right) - D_{Axial}\left(\frac{\dot{x}_{W}}{\cos\beta} - \frac{L}{2\pi}\omega_{M}\right) \right] - \frac{\left(\tan\alpha - \mu\right)K_{Cal}\tan^{2}\alpha}{m_{W}\left(1 + \tan^{2}\alpha\right)} x_{W}^{2}$$

$$(3.9)$$

모터의 토크 방정식 (1.1.7)에 (3.1.4), (3.1.5)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\omega}_{M} = \frac{K_{Axial}L}{J_{M}2\pi\eta\cos\beta}x_{W} + \frac{D_{Axial}L}{J_{M}2\pi\eta\cos\beta}\dot{x}_{W}$$
$$-\frac{K_{Axial}L^{2}}{J_{M}4\pi^{2}\eta}\theta_{M} - \frac{D_{Axial}L^{2}}{J_{M}4\pi^{2}\eta}\omega_{M} + \frac{K_{I}}{J_{M}}\dot{i}_{M}$$
$$(3.10)$$

4. 시뮬레이션

MATLAB Simulink 를 사용하여 앞장에서 정리한 EMB, EWB 시스템의 수학적 모델을 구현하였다. 각각의 파라미터 중 환경 변화에 의해 값이 변할 수 있는 파라미터를 가지고 파라미터 스터디를 수행하였다. 파라미터 스터디 시뮬레이션에 plant 모델과 아닌 PI current controller 가 사용되었다. PI current controller 가 사용된 이유는 모델에 직접 step input 을 넣어주는 경우 PMSM 의 d 축에 전류가 발생하여 모터의 효율이 떨어지는 등 관심 있는 파라미터의 영향을 확인하는데 문제가 발생하기 때문이다. 민감도를 하는 확인하고자 파라미터 외의 나머지 파라미터를 고정하고 관심 있는 파라미터의 값을 수정하며 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 5 는 EMB 시스템에서 Gear 와 screw 의 efficiency 를 변화시켰을 때의 결과를 나타낸다. Gear 와 screw 의 efficiency 는 마찰 즉, 윤활 상태와 관련이 있다. 시간이 지남에 따라 윤활유의 소진으로 인하여 gear 와 screw 의 마찰이 증가하므로 efficiency 가 변할 수 있다. Efficiency 를 0.3 부터 0.55 까지 변화시키며 ouput(clamping force)의 변화를 확인하였다. (a)는 시간의 변화에 따른 clamping force 출력을, (b)는 파라미터 변화에 따른 steady state 상태의 clamping force 를 나타낸다. Gear 와 screw 의 efficiency 는 시뮬레이션 상에서 주어진 range 에서는 반응속도에 영향을 주지 않음을 확인하였다. 그러나 efficiency 가 떨어지게 되면 clampinf force 역시 떨어짐을 확인할 수 있다.

제동시 마찰열로 인하여 모터가 과열되는 현상이 발생할 수 있다. 이 때 모터의 resistance 가 증가하게 되는데 이때 system 은 어떤 영향을 받는지 시뮬레이션을 통해 확인하였다. Fig. 6 은 EMB 시스텎에서 resistance 를 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig 6. (a)는 파라미터가 변할 때 시간에 따른 input 의 변화를, (b)는 파라미터 변화에 따른 stedy state 상태에서의 input 값을 나타낸 것이다. PI current 제어를 통하여 q 축의 current 가 reference step 입력을 잘 추종하였기 때문에 모터 stator 의 resistence 가 변하여도 clamping force 는 받지 않았다. 그러나 입력되는 영향을 voltage 값을 확인한 결과 resistance 가 증가할 때 입력되는 voltage 값도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7 은 EWB 시스템에서 gear 와 screw 의 efficiency 의 변화에 따른 output 의 변화를 나타낸다. (a)는 시간의 변화에 따른 clamping force 를, (b)는 파라미터 변화에 따른 steady state 상태에서의 clamping force 를 나타낸 것이다. EWB 에서는 screw 의 efficiency 가 자기강화 효과에 영향을 끼치므로 효율이 높은 screw 가 사용이 된다. 따라서 efficiency 를 0.4 에서 0.8 사이의 range 에서 변화시키며 system 의 반응을 확인하였다. EMB 에서의 경우와 달리 system 의 반응 속도가 efficiency range 에서 영향을 받음을 확인하였다. (b)에서 efficiency 가 증가할 때 output 도 증가함을 알 수 있다.

EWB는 brake pad 의 마찰을 이용하여 motor 의 힘을 증폭시키는 시스템이다. Fade 현상은 열로 인해 brake pad friction coefficient 값이 떨어지는 현상이다. Fade 현상으로 인해 마찰계수가 변했을 때의 system 의 반응을 Fig. 8 에 나타내었다. 시뮬레이션을 통해 EWB 시스템은 brake pad friction 에 매우 민감하게 반응함을 확인할 수 있다. friction coefficient 가 wedge angle 에 가까워질수록 output 이 exponential 하게 증가하였다.

EWB 시스템에서도 EMB 시스템과 마찬가지로 Stator resistance 를 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 9 의 (a)는 파라미터가 변할 때 시간에 따른 input 의 변화를, (b)는 파라미터 변화에 따른 stedy state 상태에서의 input 값을 나타낸 것이다. PI current 제어를 통하여 q 축의 current 가 reference step 입력을 때문에 잨 추종하였기 모터 stator 의 resistence 가 변하여도 clamping force 는 영향을 받지 않았다. 그러나 입력되는 voltage 값을 확인한 결과 resistance 가 증가할 때 입력되는 voltage 값도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 5 Output with various gear and screw efficiency



Fig. 6 Input voltage with various motor resistance





Fig. 7 Output with various gear and screw efficiency





Fig. 8 Output with various brake pad friction



(b)



5.결론

본 논문에서는 EMB, EWB 시스템을 수학적으로 모델링하고 시뮬레이션을 통하여 파라미터 변화에 따른 시스템의 성능 변화를 확인하였다. EMB 시스 템의 경우 환경 변화나 피로 누적에 의한 부품의 마모 등으로 인하여 시스템의 마찰계수와 관련된 파라미터가 변하게 될 때 시스템이 민감하게 반응 하는 것을 확인할 수 있다. EWB 시스템의 경우 EMB와 마찬가지로 gear와 screw부분의 마찰과 brake pad 마찰계수의 변화에 따라 성능이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 파 라미터 변화에 강인한 성능을 가진 제어기의 설계 가 필요하다.

References

- Hartmann, Schautt, Pascucci, & Gombert. "eBrake®- the mechatronic wedge brake". SAE Paper 2002-01-02582
- Roberts, Schautt, Hartmann, & Gombert. "Modeling and Validation of the Mechatronic Wedge Brake". SAE Paper 2003-01-3331
- Pragasen Pillay, Ramu Krishnan, "Modelling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Dreive", IEEE, 1989
- 4) 황윤형,최세범, "슬라이딩 모드 제어기법을 활 용한 Electronic Wedge Brake의 강인제어", KSAE 2007년 11월 추계학술대회 논문집 2호 1020-1026
- 5) 김성룡, 최세범, 김주곤, "Electronic Noncircular Gear Brake의 설계 및 브레이크 패 드 마찰계수 추정을 위한 적응제어 기법의 개발", KSAE 2008년 11월 (정기)학술대회 및 전시회 1793-1801
- 6) 김성룡, 최세범, 김주곤, "Electronic Noncircular Gear Brake의 설계 및 브레이크 패 드 마찰계수 추정을 위한 적응제어 기법의 개발", KSAE 2008년 11월 (정기)학술대회 및 전시회 1793-1801
- 7) 전광기, 황현수, 최성진, 양동호, 황성호, 박희 람, 최세범 "전자 브레이크를 적용한 연료전지 자동차 회생제동 시스템의 신뢰성 평가기술 개발 PART-(1)", KSAE 2010년 5월 부분종합학술대회 -전기&전자시스템·ITS 부문 논문집 5-11
- 8) 전광기, 황현수, 최성진, 양동호, 황성호, 박희 람, 최세범 "전자 브레이크를 적용한 연료전지 자동차 회생제동 시스템의 신뢰성 평가기술 개발 PART-(2)", KSAE 2010년 11월 (정기)학술대회 및 전시회 1364-1369