

# 전기기계식 제동장치의 제동패드 마모보상방법 및 성능평가

백승구\*, 오혁근, 박춘수, 김석원  
한국철도기술연구원 차세대철도차량본부

## A Brake Pad Wear Compensation Method and Performance Evaluation for ElectroMechanical Brake

Seung-Koo Baek\*, Hyuck-Keun Oh, Choon-Soo Park, Seog-Won Kim  
Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

**요약** 본 논문은 전기기계식제동장치(EMB : Electro Mechanical Brake, 이하 EMB)의 제동패드 마모발생에 따른 소프트웨어 기반의 마모보상방법의 적용 및 성능평가를 다루었다. EMB의 구동을 위해 사용된 모터는 3상 매입형 영구 자석 동기전동기(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)가 사용되었다. EMB의 압부력(clamping force) 제어를 위해 위치제어기, 속도제어기 및 전류제어기가 적용되었으며, IPMSM의 출력 압부력 예측을 위해 모터의 거리별 압부력 실험을 통하여 힘 추정기(force estimator)를 1차 모델식으로 단순화 하였다. 제동패드에서 마모가 발생함에 따라 IPMSM에서 출력되는 토크전류의 크기가 감소하는 특성을 이용하여 기존 토크전류와의 비교를 통해 힘 추정기를 업데이트하는 방법으로 마모보상이 가능함을 보였다. 제동패드의 마모 후 최대 압부력 도달시간이 0.1초 이내로 증가하였으나, 마모패드 장착시에도 제동압부력은 마모 전 제동패드와 동일한 최대 기준 압부력을 만족하였으며, 최대압부력 도달시간의 경우 0.5초(기준값) 이내임을 실험으로 검증하였다. 소프트웨어 기반의 EMB 제동패드의 마모보상 방법은 철도차량의 출발 전 제동장치 점검시 테스트모드의 진입을 통하여 수행이 가능하다.

**Abstract** This study examined a brake pad wear compensation method for an Electro-Mechanical Brake (EMB) using the braking test device. A three-phase Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) was applied to drive the actuator of an EMB. Current control, speed control, and position control were used to control the clamping force of the EMB. The wear compensation method was performed using a software algorithm that updates the motor model equation by comparing the motor output torque current with a reference current. In addition, a simple first-order motor model equation was applied to estimate the output clamping force. The operation time to the maximum clamping force increased within 0.1 seconds compared to the brake pad in its initial condition. The experiment verified that the reference operating time was within 0.5 seconds, and the maximum value of the clamping force was satisfied under the wear condition. The wear compensation method based on the software algorithm in this paper can be performed in the pre-departure test of rolling stock.

**Keywords** : Wear Compensation, Electro-Mechanical-Brake, Brake-By-Wire, Force Estimation, Maximum Torque Per Ampere, Interior-Permanent-Magnet-Synchronous-Motor.

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업(PK2002D1) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Seung-Koo Baek(Korea Railroad Research Institute)  
email: skbaek@krrri.re.kr

Received September 2, 2020

Revised September 21, 2020

Accepted October 5, 2020

Published October 31, 2020

## 1. 서론

EMB는 모터를 통해 캘리퍼(caliper)의 구동축을 회전시켜 제동디스크에 압부력을 가하는 원리로 동작한다. EMB는 자동차분야에서 유압식 제동장치를 대체하기 위한 대안으로 활발한 연구가 수행되고 있으나 안전성, 신뢰성 및 비용 증가 등의 문제가 남아있다[1,2].

철도차량 제동장치의 경우 현재까지 공압을 캘리퍼의 실린더에 주입하여 압부력을 발생시키는 방법을 사용하고 있지만, 최근 유럽에서는 전기기계식 제동장치를 개발하여 실용화를 추진중이다.

패드와 마찰을 이용한 제동장치는 차량의 운동에너지를 마찰을 통한 열에너지로 소비하여 속도를 감소시키는 원리로 작동한다. 따라서, 운행 중 지속적인 제동체결로 인한 제동패드의 마모는 피할 수 없으며, 제동체결 속도의 저하 및 압부력 감소의 원인이 된다. 만일 제동 캘리퍼에 발생하는 압부력 값을 실시간 측정하여 피드백(feedback) 받아 제동장치의 제어를 수행한다면 상기 문제점을 개선할 수 있으나 제동패드 혹은 차량의 제동디스크에 힘 센서(force sensor)의 설치가 필요하며 제동 인가시 제동패드와 디스크 사이에 발생하는 300 °C 이상의 높은 온도를 견뎌야 하므로 센서내부에 한계가 있어 철도차량에 적용된 제동장치는 압부력 측면에서 오픈루프(openloop) 방식의 제어가 적용되고 있다.

기존의 연구에서 자동차 분야의 EMB 제동장치는 센서를 적용한 실시간 캘리퍼의 압부력 측정방법[3], 압부력의 추정을 통한 센서리스(sensorless) 제어[4,5] 등의 압부력 직접측정 또는 압부력 추정방법에 대한 연구가 있었으나 앞에서 설명한 제동패드의 마모발생에 따른 보상 알고리즘에 대한 방법 관련한 연구는 수행되지 않았다.

본 논문에서는 전류제어, 속도제어 및 위치제어를 적용한 중속(cascade)연결 형태의 EMB 제어 구조에서 힘

추정기(force estimator) 구성을 통한 소프트웨어 마모 보상 알고리즘에 대하여 다루었다. 1차식의 단순한 모델식을 활용하여 힘 추정기를 구성하였으며, 모터의 토크전류를 검지하여 힘 추정기의 업데이트를 통해 제동패드의 마모상태에서도 마모전 상태와 동등한 압부력을 발생시킬 수 있도록 하는 제어방법을 제안하였다. 또한, 마모된 제동패드에서 보상 알고리즘 적용 전과 후의 압부력 실험결과와 비교를 통하여 가용성을 검증하였다.

## 2. 본론

### 2.1 EMB의 캘리퍼 구조

Fig. 1은 고속철도차량용 EMB의 동작 매커니즘을 나타낸다. 구동축은 IPMSM에 1차 감속기어가 결합되어 있고 감속기의 출력은 반달 형태의 2차 감속기어를 통하여 접합편심부(Cam Shaft)를 회전시키는 구조이다.

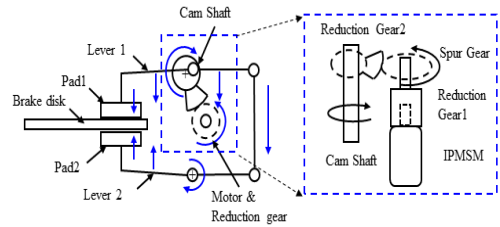


Fig. 1. Dynamic mechanism of EMB

접합편심부는 레버 1과 레버 2가 큰 압부력을 제동디스크에 인가하는데 용이하며 제동패드와 제동디스크간의 거리가 수 mm 내외에서 이동하는 철도차량의 EMB 적용에 좋은 대안이 될 수 있다.

Fig. 1의 구동축 회전에 사용되는 모터는 IPMSM이다. IPMSM은 제어방식에 따라 마그넷(Magnet) 토크와

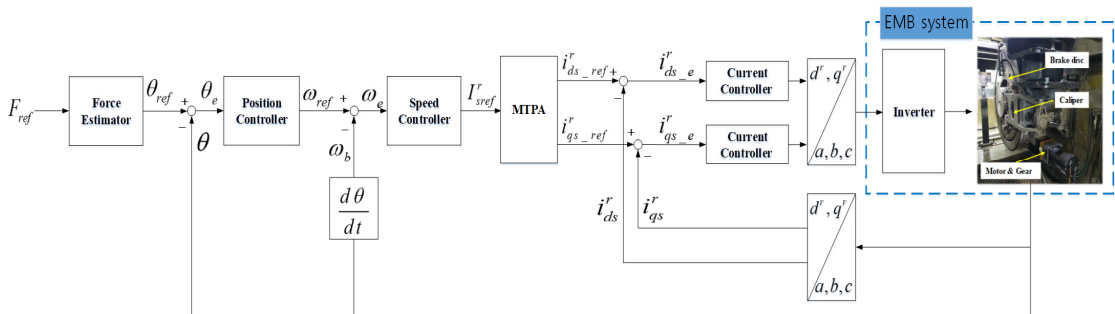


Fig. 2. IPMSM control concept of EMB system

릴럭턴스(Reluctance) 토크를 함께 사용할 수 있어 동일 출력대비 상대적으로 부피가 작으며, 효율이 높아 최근에는 전기자동차용 모터 등 적용범위가 증가하는 추세이다.

### 2.2 EMB의 IPMSM 제어구조 및 MTPA 제어

Fig. 2는 EMB 제어를 위한 IPMSM의 제어 개념도이다. IPMSM 제어를 위해 위치제어기, 속도제어기 및 전류제어기가 사용되었다. IPMSM으로 부터 각변위 (angular displacement)  $\theta$ 를 피드백 받아 위치제어와 속도제어의 기준입력이 계산되고 3상 전류를 피드백 (feedback) 받아 전류제어기의 기준입력이 계산된다. 각각의 제어기는 비례적분(proportional integral) 제어가 적용되었으며 전류제어기의 경우 IPMSM의 단위전류당 최대토크를 얻기 위한 단위 전류당 최대 토크제어 (MTPA : Maximum Torque Per Ampere, 이하 MTPA)가 적용되었다.

앞절에서 설명한 바와 같이 IPMSM의 토크는 Magnet 토크와 Reluctance 토크의 합으로 Eq. (1)과 같다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} (\phi_f i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{ds}^r i_{qs}^r) \quad (1)$$

여기서, P는 극수,  $\phi_f$ 는 Flux Linkage,  $i_{qs}^r$ 는 동기 q축 고정자전류,  $i_{ds}^r$ 는 동기 d축 고정자전류,  $L_d$ 는 d축 인덕턴스  $L_q$ 는 q축 인덕턴스이다.

표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM : Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 SPMSM)는  $L_d$ 와  $L_q$ 의 값이 같게 설계되어 일반적으로 d축 기준 전류값을 0으로 제어하지만 IPMSM은 내부 영구자석의 배치구조로 인하여  $L_q$ 값이  $L_d$ 값 보다 크게 설계되어 있어 d축 기준 전류값이 모터의 정방향 기준으로 음의 값을 가질 경우 추가적인 토크를 출력할 수 있다.

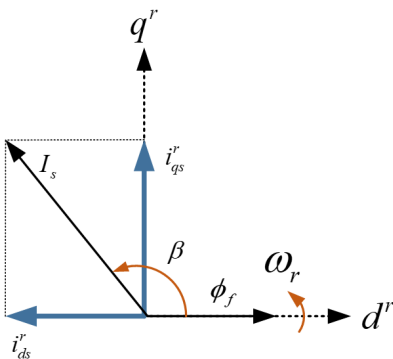


Fig. 3. Relation of  $i_{ds}^r$ ,  $i_{qs}^r$  and  $\beta$  for IPMSM

Fig. 3은  $i_{ds}^r$ 와  $i_{qs}^r$ 의 입력에 따른  $\beta$ 각의 관계를 나타낸다. 그림과 같이 d-q축 고정자 전류  $I_s$ 와 d축이 이루는 각이  $\beta$ 각이 된다. Eq. (1)을  $I_s$ 와  $\beta$ 로 표현하면 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있으며 Eq. (2)를  $\beta$ 로 미분하면 Eq. (3)과 같이 표현된다. 최대토크 발생점은 Eq. (3)이 0일 때이므로 Eq. (3)을  $\beta$ 에 대한 식으로 정리하면 Eq. (4)와 같이 제어전류의 크기  $I_s$ 에 따른  $\beta$ 각의 크기가 계산된다.

즉, 최대토크를 발생시키는  $\beta$ 값을 계산하였으므로 Eq. (5)에 의하여 MTPA를 발생시키는  $i_{ds}^r$ 와  $i_{qs}^r$ 를 구할 수 있다[6].

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} (\phi_f I_s \sin\beta + \frac{(L_{ds} - L_{qs})}{2} I_s^2 \cos 2\beta) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial \beta} = \frac{P}{2} \frac{3}{2} (\phi_f I_s \cos\beta - (L_{ds} - L_{qs}) I_s^2 \sin 2\beta) \quad (3)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{-\phi_f + \sqrt{\phi_f^2 + 8(L_{ds} - L_{qs})^2 I_s^2}}{4(L_{ds} - L_{qs}) I_s} \right) \quad (4)$$

$$i_{ds}^r = I_s \cos\beta \quad , \quad i_{qs}^r = I_s \sin\beta \quad (5)$$

### 2.3 EMB의 위치제어 및 마모보상 방법

철도차량에 사용되는 공압식 제동장치는 각 제동 단계 별로 미리 정해진 기준 공압을 설정하여 오픈루프 제어가 적용된다. 철도차량의 제동 디스크에 발생하는 정확한 압부력 제어를 위해서는 일반적으로 피드백 제어가 필요하지만 앞 절에서 설명한 바와 같이 센서의 내구문제 및 비용증가 문제로 인하여 실제 적용된 사례는 없다.

EMB의 경우 Fig. 2의 개념도에서 보듯이 캘리퍼의 압부력제어는 위치제어기와 힘 추정기를 이용한 제어방식이 적용되었다. 위치제어기는 제동 인가시 일정한 수준의 압부력 출력 성능 뿐만 아니라 제동 해제시 캘리퍼가 제동 인가 전 초기상태의 위치에 도달할 수 있도록 한다. 위치제어기의 입력은 힘 추정기의 출력인 IPMSM의 이동거리 기준값  $\theta_{ref}$ 와 IPMSM의 이동거리 피드백 값  $\theta$ 의 차이값인  $\theta_e$ 가 사용되며 출력값으로 속도제어기의 기준속도인  $\omega_{ref}$ 를 출력한다.

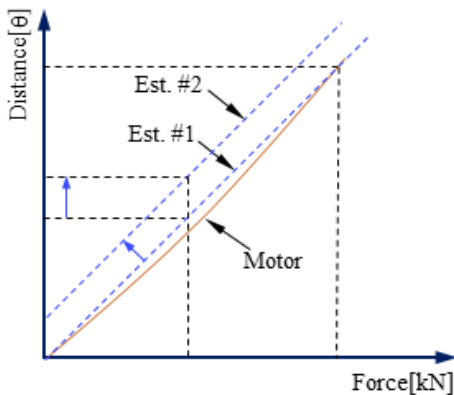


Fig. 4. Relation between force and distance of IPMSM

Fig. 4는 힘 추정기에 적용된 IPMSM의 압부력과 이동거리 관계를 나타낸 그래프이다. 실제 IPMSM의 이동거리와 압부력과 성능을 확인하기 위해 시험을 수행하여 IPMSM의 동작곡선을 얻었으며 이러한 특성곡선을 이용하여 Est. #1의 1차식 모델식을 추정하였다. 1차 모델식과 압부력 시험결과 값을 비교하면 낮은 압부력과 높은 압부력 영역에서는 비슷한 값을 보이지만 중간 영역에서 실제 압부력과 모델식 사이에 오차가 존재한다. 만일 다차항의 모델식으로 표현할 경우 정확한 압부력 추정이 가능하지만 실제 캘리퍼 압부력 기준값이  $\pm 5\%$ 의 범위를 가지고 있으므로 1차식의 모델식도 적용이 가능한 범위이다. 따라서, 본 논문에서는 제어기의 계산량을 줄이기 위한 1차식의 모델식을 고려하였다.

제동패드에 마모 발생 시 Est. #1의 모델식으로 동작할 경우 캘리퍼는 기준 압부력보다 작은 압부력 값을 출력하게 된다. 이러한 경우 마모보상 알고리즘을 적용하여 IPMSM의 모델식을 Est. #2로 재정의하면, 동일한 압부력 기준입력에 대하여 IPMSM의 이동거리가 증가하는 효과가 발생하여 압부력은 제동패드 마모전의 압부력을 출력하게 된다.

Fig. 5는 앞서 설명한 힘 추정기를 이용한 마모보상 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

EMB 구동시 마모보상을 위해 테스트모드(test mode)에 진입하면 정해진 압부력 지령에 따라 모터가 회전하고 위치제어기에 의해 정해진 위치에 모터가 정지하며 제동 압부력이 발생한다. 위치제어기에 의해  $i_{qs}^r$ 는 모터의 정지 상태에서 일정한 전류를 유지하게 되는데 요구 압부력 발생을 위한 q축 전류 기준값  $i_{qs}^{r*}$ 와 비교하여 작

을 경우  $i_{qs}^r$ 를 증가 시키기 위해 Fig. 4와 같이 y축 절편 값을 상승시켜 압부력을 증가시키는 방향으로 모터가 회전하게 되고  $i_{qs}^r$  값은 증가하게 된다. 모델식의 반복적인 업데이트를 통하여 압부력 보상을 수행하고 정해진 시간 후 테스트 모드를 빠져나오면 보상 알고리즘이 종료된다. 위치제어기를 포함한 EMB의 마모보상제어는 인버터의 전류제어를 통한 모터토크의 직접적인 보상방법 보다 압부력의 증가를 실시간 확인 가능하며 재연성이 좋다.

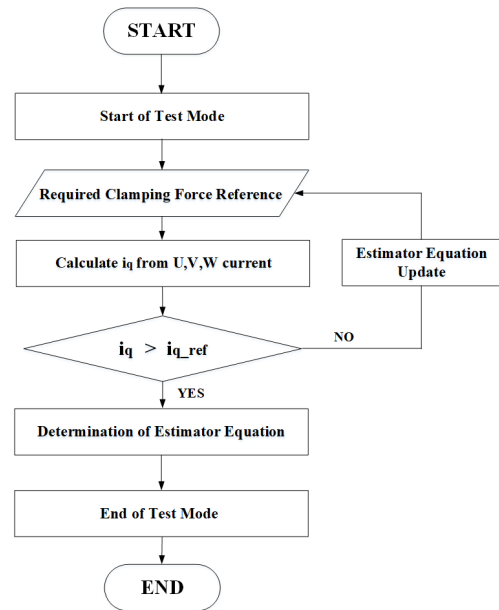


Fig. 5. Wear compensation algorithm procedure

## 2.4 EMB 마모보상 알고리즘 시험결과

Fig. 6은 마모보상 실험을 위한 EMB 설치환경이다. Fig. 6의 (a)는 EMB의 압부력을 측정하기 위해 고속철도 차륜과 동일한 두께의 지그를 구성하고 중앙에 로드셀(load cell)를 설치하여 압부력을 측정할 수 있도록 하였다. 캘리퍼의 구동축을 움직이기 위한 모터는 IPMSM이 사용되었으며 출력단에 베벨기어 형태의 감속기가 적용되었다. Fig 6의 (b)와 (c)는 각각 제동패드의 마모전 상태와 마모후 상태를 나타낸다. 그림에서 보듯이 마모전 약 14 mm이며, 마모 후 약 7 mm 수준을 보여주고 있다.

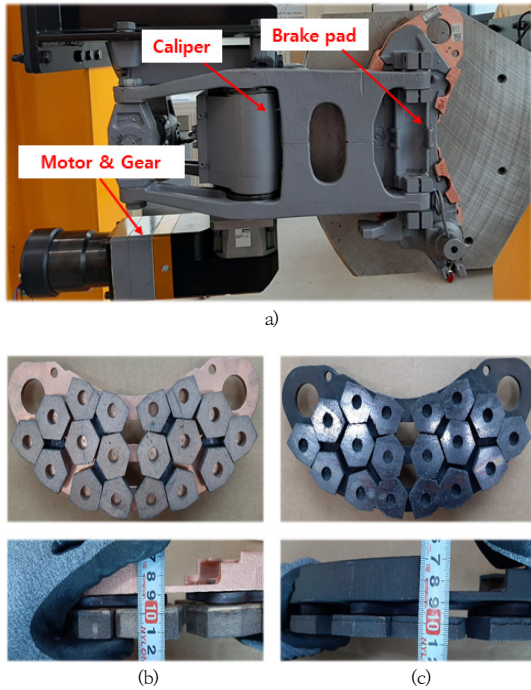


Fig. 6. Installation for EMB wear compensation test  
(a) EMB test rig (b) Break pad before wear condition  
(c) Brake pad in a worn condition

Fig. 7은 마모패드가 적용된 경우 20 kN 기준입력에 따른 압부력 출력 및 전류제어 파형과 모터의 위치제어 파형을 나타낸다. 파형에서 보듯이 20 kN의 기준압부력 입력에 대하여 약 12 kN의 압부력 출력이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

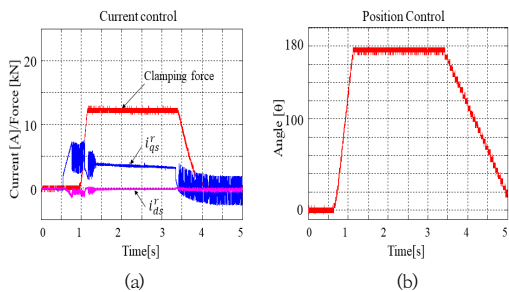


Fig. 7. Test result before applied wear compensation algorithm  
(a) Clamping force and d-q control current  
(b) Position control

이러한 현상은 Fig. 4의 힘 추정기의 모델식에서 마모가 고려되지 않은 초기 상태의 Est. #1이 적용됨으로써 마모패드 상태에서 IPMSM이 동일한 거리로 이동하여도 압부력기준을 추종하지 못하게 되는 것을 보여준다. 즉, Fig. 5의 마모보상 알고리즘을 통하여 Est. #1을 Est. #2

방향으로 이동시키는 과정을 거쳐 제동패드 마모에 따른 보상이 필요하다. Fig. 7 (b)는 위치제어를 통하여 IPMSM이 175 rad를 이동하였으며 원하는 위치제어가 수행되고 있음을 보여준다. 175 rad의 거리는 마모전의 제동패드를 적용할 경우 20 kN의 값을 보여 주지만 제동패드의 마모로 14 kN의 낮은 제동 압부력이 출력되고 있다.

Fig. 8은 Fig. 5의 마모보상 진행과정에 따라 추정기의 업데이트가 진행되는 과정을 파형으로 나타낸다. 마모보상 알고리즘의 시작은 시험모드로 진입하여 수행되며 기준 전류값인  $i_{qs}^{r*}$ 은 마모전 제동패드의 압부력 20 kN에 해당하는 기준전류 3.7 A로 설정하였다. IPMSM가 회전을 시작하여 약 175 rad 이동 후  $i_{qs}^{r*}$ 와 모터 출력전류  $i_{qs}^r$ 의 비교를 통하여 힘 추정기 모델식의 절편값이 증가하게 된다.  $\theta_{ref}$ 의 증가로  $\theta_e$ 값이 상승함에 따라 모터의 이동거리가 점차적으로 증가하여 서서히  $i_{qs}^r$ 값이 상승하고 있음을 보여준다. 테스트 모드에서 정해진 시간동안  $i_{qs}^{r*}$ 와  $i_{qs}^r$ 값의 비교를 통하여 마모보상 수행이 완료되면 IPMSM은 초기 위치로 복귀하고 최종적으로 추정기가 업데이트되어 마모보상이 종료된다.

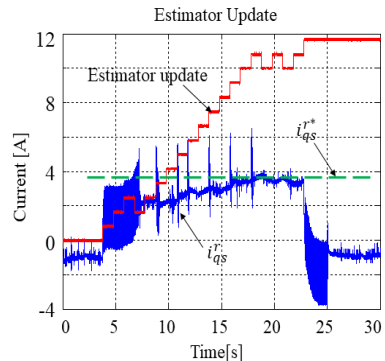


Fig. 8. Estimator update test results during the wear compensation process

Fig. 9는 마모보상시 추정기의 업데이트가 진행되는 동안 EMB의 압부력이 서서히 증가하는 파형을 보여준다. Fig. 4에서 설명한 바와 같이 1차 모델식이 Est. #1에서 Est. #2 방향으로 이동하게 되면 IPMSM의 위치제어기 입력값인  $\theta_e$ 가 증가하게 되어 Fig. 9의 파형과 같이 압부력 출력이 증가함을 보이고 있으며, 20초의 보상알고리즘 시간동안 총 6회의 보상이 진행되었음을 확인할 수 있다.

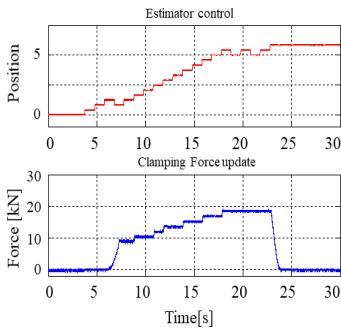


Fig. 9. Increased clamping force during the wear compensation process

Fig. 10은 마모패드가 적용된 상태에서 마모보상 알고리즘이 수행된 후 20 kN 기준입력에 따른 압부력 출력 및 전류제어 파형과 모터의 위치제어 파형을 나타낸다. 기준압부력으로 마모 보상전과 동일한 기준압부력인 20 kN을 설정하였으며 시험결과 약 21 kN의 압부력이 발생하여 마모 보상전과 비교하면 약 8 kN의 압부력이 상승했음을 보여준다. Fig. 10 (b)에서 보듯이 마모보상 전 175 rad에서 마모보상 후 205 rad로 IPMSM의 위치가 약 30 rad 압부력 증가 방향으로 이동했음을 보여준다. 모터의 이동거리 증가로 인해 최대 압부력 도달시간은 약 0.05 초 증가하였지만 전체 기준압부력 도달시간은 만족하였다.

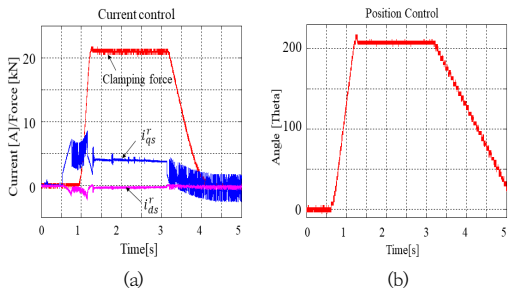


Fig. 10. Test result after applying wear compensation algorithm  
(a) Clamping force and d-q control current  
(b) Position control

Fig. 11은 마모패드 장착상태에서 제동체결시 IPMSM의 입력전류 파형을 나타낸다. 제동체결 동작중 IPMSM이 회전하는 시점에서 입력전류가 발생하고 제동압부력 유지 시점부터 입력전류는 0.1 ~ 0.2 A 수준이다. 이러한 이유는 IPMSM 출력단에 설치된 감속기어의 큰 감속비로 인하여 작은 제어전류로 출력 압부력 유지가 가능한 것으로 판단된다.

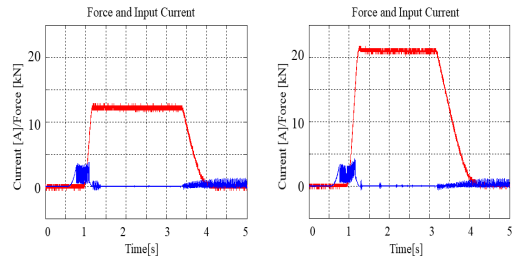


Fig. 11. Input current and clamping force comparison  
(a) without wear compensation (b) with wear compensation

Fig. 12는 마모보상 알고리즘 적용 전과 적용 후의 이동거리 변화에 따른 모터의 속도변화를 나타낸다. 제동체결시 IPMSM의 최고속도는 2000 rpm으로 제한하였으며 압부력 달성시까지 제한된 속도를 유지하고 있음을 보여준다.

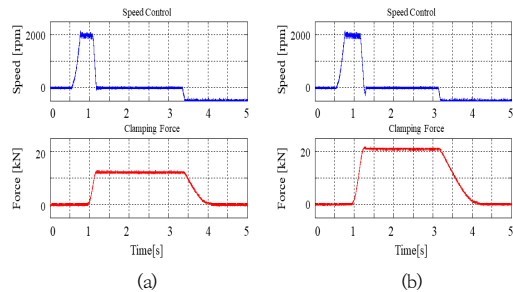


Fig. 12. IPMSM speed comparison at reference 20 kN  
(a) without wear compensation (b) with wear compensation

Fig. 13은 마모보상 알고리즘 적용 전과 후의 최대압부력 기준 54 kN에서의 압부력 변화 및 제어전류변화를 보여준다. 마모보상 전과 후 캘리퍼의 최대압부력은 각각 약 43 kN과 53 kN을 출력하고 있다. 최대 압부력 도달 시간은 마모보상 후 0.1초 증가하나 최대압부력에 도달 기준인 0.5초 이내에 도달이 가능하다.

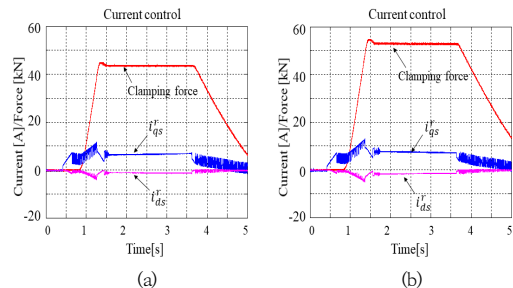


Fig. 13. Comparison of maximum clamping force  
(a) without wear compensation (b) with wear compensation

### 3. 결론

본 논문은 철도차량에 EMB 장치를 적용할 경우 캘리퍼의 제동패드 마모에 따른 소프트웨어를 통한 제동 압부력 보상알고리즘 적용결과를 실험적으로 평가하였다. 제동패드의 교체 수준인 마모상태에서 마모 보상 전과 후 최대 압부력 도달시간은 약 0.1초 이내에서 증가하나 최대 압부력 도달시간 기준(0.5초 이내)과 제동압부력 기준치( $54 \text{ kN} \pm 5\%$ )가 만족됨을 보였다.

본 논문에서 제안한 소프트웨어기반의 마모보상 방법은 기존에 공압식 제동장치에서 수행하는 철도차량의 출발전 제동장치 점검 테스트 과정에서 테스트모드의 진입을 통하여 수행이 가능할 것으로 판단된다.

향후 철도차량의 제동시스템에 다수의 EMB를 적용하기 위한 제동 제어장치와의 연계시험을 통하여 지속적인 신뢰성 향상 연구가 필요하다.

### References

- [1] R. T. Bannatyne. "Advances and challenges in electronic braking control technology," *SAE Technical Papers*, Sep. 1998.
- [2] M. Sundar, D. Plunkett. "Brake-by-Wire, Motivation and Engineering-GM Sequel," *SAE Technical Papers*, Jan. 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.4271/2006-01-3194>
- [3] R. Hoseinnezhad, A. Bab-Hadiashar, and T. Rocco, "Real-Time Clamp Force Measurement in Electromechanical Brake Calipers," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 770-777, Mar. 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2007.906374>
- [4] Y. H. Ki, K. J. Lee, J. S. Cheon, and H. S. Ahn, "Design and implementation of a new clamping force estimator in electro-mechanical brake systems," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 739-745, Oct. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-013-0081-4>
- [5] C. Jo, S. Hwang, and H. Kim, "Clamping-force control for electromechanical brake," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 7, pp. 3205-3212, Sep. 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2043696>
- [6] S. Morimoto, K. Hatanaka, Y. Tong, "Servo Drive System and Control Characteristics of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motor". *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 29, No. 2, pp.338-343, Mar/Apr., 1993.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/28.216541>

백 승 구(Seung-Koo Baek)

[정회원]



- 2003년 2월 : 충북대학교 대학원 전자공학과 (전자공학 석사)
- 2017년 2월 : 아주대학교 대학원 전자공학과 (전자공학 박사)
- 2003년 1월 ~ 2005년 7월 : SIEMENS automotive 연구원
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

고속철도차량 추진시스템, 전력전자, 자동제어

오 혁 근(Hyuck Keun Oh)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (기계항공공학 학사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (기계공학 석사)
- 2012년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (기계공학 박사)
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

고속철도 차량 동역학(집전, 제동), 열전달

박 춘 수(ChoonSoo Park)

[정회원]



- 1991년 2월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1991년 1월 ~ 1996년 6월 : 현대정공 주임연구원
- 1996년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

고속철도차량, CAE응용역학

김 석 원(Seogwon Kim)

[정회원]



- 1989년 8월 : 서울대학교 대학원  
조선해양공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 아주대학교 기계공  
학과 (공학박사)
- 1987년 2월 ~ 1994년 2월 : 대우  
조선해양(주) 과장
- 1994년 3월 ~ 1997년 2월 : 삼성  
중공업 선임연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

〈관심분야〉

고속철도차량, 제동시스템