

# 전기기계식제동장치의 힘센서 보상을 이용한 제어방법의 성능평가

백승구

한국철도기술연구원 차세대철도차량본부

## A Performance Evaluation of Control Method Using Force Sensor Compensation of Electro-mechanical Brake

Seung-Koo Baek

Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

**요 약** 철도차량에 주로 사용되고 있는 공압식제동장치는 각 제동 단계에 따라 미리 결정된 공압을 오픈루프(open loop) 제어를 통해 철도차량에 제동력을 인가한다. 최근 전기기계식제동장치(EMB : Electro-Mechanical Brake, 이하 EMB)의 등장으로 공압식 액추에이터의 기능을 대체하는 전동기의 제어방법이 연구되고 있다. 모터를 이용한 제동동작은 모터의 스톱(stall)상태에서 수행되므로 복잡한 제어가 필요하다. 특히, 제동디스크의 마찰면은 고온이 발생하여 센서 설치의 어려움으로 인해 압부력추정제어가 주로 적용되지만 마찰면의 변화 및 모터의 히스테리시스 특성에 대응하여 정확한 압부력 제어를 위해서는 힘센서의 설치가 검토되어야 한다.

본 논문에서는 제동디스크의 마찰면에 가해지는 압부력을 측정하는 대신에 캘리퍼의 제동패드 연결부에 힘센서를 설치하고 센서피드백 신호를 함께 사용하여 기존의 추정제어를 보상하는 방법을 적용하였다. 제안된 방법은 압부력센서의 고장에도 위치추정제어를 통해 제어가 가능하므로 제동시스템의 신뢰성을 높일 수 있다. 제안된 제어방법을 적용한 EMB의 제어성능은 실험지그에 설치하여 정적 제어성능평가를 통해 가용성을 평가하였다.

**Abstract** Pneumatic brakes, which are mainly used in railway vehicles, apply a braking force to railway vehicles through an open loop control of a predetermined pneumatic pressure according to each braking step. Recently, with the appearance of electromechanical braking devices, a control method of an electric motor to replace the function of an existing pneumatic actuator has been studied. Complicated control is required because the braking operation using the motor is performed in the stall state of the motor. In particular, pressure estimation control is mainly used because the sensor installation is difficult due to the temperature rise of the friction surface of the brake disc. On the other hand, to accurately control the clamping force according to the change of the friction surface and the hysteresis characteristics of the motor, it is necessary to consider the installation of a force sensor.

In this paper, instead of measuring the clamping force applied to the friction surface of the brake disc, a force sensor was installed in the brake pad bracket connection part of the caliper, and the sensor feedback signal was used together to compensate for the control of the existing position estimation control. The proposed method can increase the reliability of the braking system because it can be controlled through position estimation control when the clamping force sensor fails. The performance of EMB to which the proposed control method was applied was installed in the experimental jig, and the availability was evaluated through static control performance evaluation.

**Keywords** : Brake-By-Wire, Electro-Mechanical-Brake, EMB, Clamping force Sensor, estimation control, Maximum Torque Per Ampere, MTPA

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업(PK2203D5) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Seung-Koo Baek(Korea Railroad Research Institute)

email: skbaek@krri.re.kr

Received October 17, 2022

Revised November 16, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

## 1. 서론

최근 국외 철도차량 제동시스템 제작업체는 독일의 철도박람회(ICE)를 통하여 순수 전기구동장치를 적용한 EMB 제품을 선보였으며 2022년 말에 도시철도차량에 적용 예정임을 알렸다. EMB는 철도차량의 에어리스트레인(airless train)을 목표로 기존의 공압식 제동장치에서 사용되는 공기압축기, 제동공기통 및 제동 배관의 복잡한 구조 및 관리 문제를 해결하기 위한 대안으로 개발이 수행 중이다.

국내에서는 철도관련 연구기관을 중심으로 EMB의 개발을 진행 중이며, 현재 초기 모델의 제작 및 성능평가와 함께 철도차량 적용을 목표로 기능개선 및 문제점 보완이 수행되고 있다[1].

철도차량의 EMB 제어의 문제점 중에 하나는 제동캘리퍼의 마찰면에서 발생하는 압부력을 피드백 받는 것이다. 철도차량의 제동장치는 제동캘리퍼에 부착된 마찰재(제동패드)와 디스크를 접촉시켜 차량의 운동에너지를 열에너지로 변환시켜 차량의 속도를 감속시킨다. 제동캘리퍼의 마찰면은 마모를 동반한 수 백도가 넘는 고온이 발생하기 때문에, 제동압부력을 측정하기 위한 센서의 설치가 어려우며, 압부력측정 센서의 고장이 쉽게 발생할 수 있는 구조이다. 따라서, 현재 개발된 다수의 EMB의 압부력 제어방법은 모터의 위치정보를 이용한 압부력 추정방법을 주로 활용하고 있으며, 최근 EMB의 압부력 추정제어 기법에는 모터의 회전자 정보와 히스테리시스 특성을 활용한 방법[2], 감속기의 마찰특성을 고려한 방법[3], 모터의 회전자 정보와 전류를 활용한 방법[4], 슬라이딩모드 관측기를 활용한 방법[5] 등 많은 연구가 수행되었다. 그러나, 대부분의 연구는 실내 정적제어 또는 HILS(Hardware In the Loop Simulation)에 시뮬레이션으로 실제 동적시험 등 적용된 결과에 대한 내용이 없어 실효성을 판단하기에 어려움이 있다. 현재 진행 중인 철도차량 EMB의 센서리스 제어기법의 경우, 각 단계별 제어 입력에 대해서는 비교적 정확한 압부력 출력치가 가능하지만 연속지령 입력에서는 모터와 감속기의 기구적 구조로 압부력 상승 시와 하강 시 히스테리시스 구간이 존재한다. 또한, 차량의 휠이 회전하는 동적제동시험에서 마찰 디스크 표면의 열 발생으로 인하여 마찰면 재질의 경도가 낮아져 캘리퍼의 디스크면에 가해지는 압부력 특성이 저하되는 결과가 발생하여 힘센서 설치의 필요성이 커지고 있다.

본 논문에서는 압부력 추정제어(센서리스제어) 방법에

압부력센서의 보상제어를 보완적으로 사용하여 EMB 캘리퍼의 압부력 제어 방법을 제안하였다. 압부력 센서의 안정적인 동작을 위해 캘리퍼의 센서 설치방법 및 위치를 제안하였으며, 모터 회전자의 위치데이터를 이용하여 추정제어를 수행하고 모터 위치제어가 안정화 된 후 압부력을 피드백 받아 최종 모터 위치를 보상하는 방법을 적용하였다.

본 논문에서 제안한 캘리퍼 압부력 제어 알고리즘을 적용한 EMB 캘리퍼가 제동압부력 출력의 오차범위 측면에서 성능이 향상되었음을 실험적 방법으로 보였다.

## 2. 본론

### 2.1 EMB 압부력 신뢰성 향상 제어기법

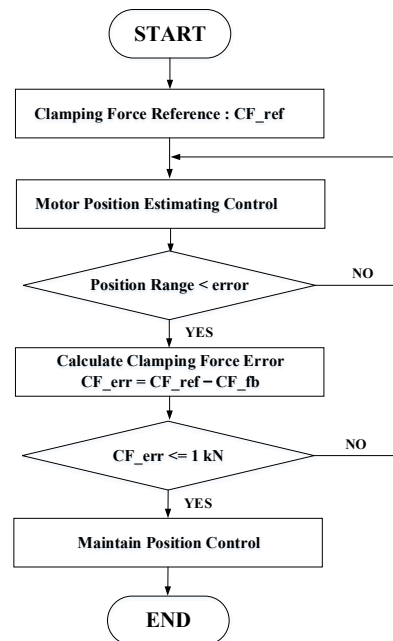


Fig. 1. Sensor compensated control procedure for EMB clamping force

Fig. 1은 EMB의 압부력 추정제어에 센서 피드백 값을 보상하는 제어과정을 나타낸다. Fig. 1에서 보듯이 압부력 지령이 입력되면 EMB는 추정제어를 통하여 모터의 위치제어를 수행하고 추정 압부력값이 정해진 에러값의 범위내에 도달한다. 이때 추정 압부력값과 측정압부력값의 차이를 통해 에러값이 계산되고 결과값이 1 kN 보다 작을 경우 기존의 위치제어를 유지하게 된다. 만일 에



기존 공압용 액추에이터가 설치된 캘리퍼 대신 영구자석동기전동기와 감속기를 설치하여 EMB 캘리퍼를 제작하였다[6]. 압부력 측정을 위한 센서는 캘리퍼의 암(arm)과 마찰패드 브라켓 연결부위에 2개가 설치된다. 철도차량의 배터리 전원을 사용하므로 DC 100 V의 입력전원으로 구동되는 인버터가 적용되며, 제어 PC와 오실로스코프를 통하여 상태데이터와 출력파형을 확인할 수 있는 구성이다.

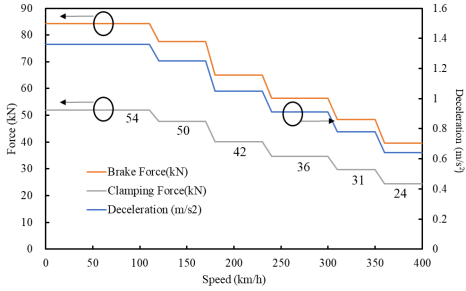


Fig. 4. Clamping and braking force reference for HEMU-430X

Fig. 4는 국내에서 개발된 동력분산식 고속철도차량 (HEMU-430X)의 차량속도에 따른 제동력과 각 제동력에 필요한 제동캘리퍼의 압부력 값을 나타낸다. Fig. 4에서 보듯이 고속운행중 높은 제동력을 인가할 경우 차륜과 레일의 손상 및 제동장치에 높은 온도와 충격이 발생하여 제동장치 고장의 원인이 되므로 철도차량의 제동은 고속운행 시 낮은 제동력에서 점차적으로 높은 제동력을 인가하여 차량을 정지하도록 기준을 정의하고 있다.

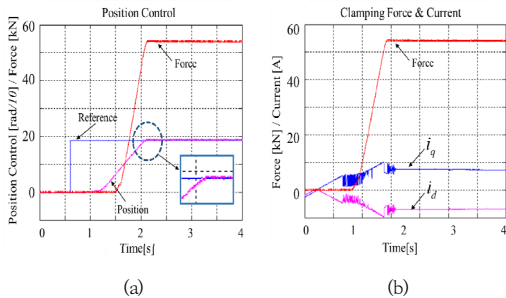


Fig. 5. Experimental result of clamping force using estimation control (a) position control, (b) d-q axis current control

Fig. 5는 추정제어를 바탕으로 최대 압부력에서의 제어성능을 보여준다. Fig. 5 (a)에서 압부력값은 Fig. 3의 실험용 설치지그 구성에서 측정되는 압부력을 나타내며, 지령값은 추정위치 계산에 따른 값으로 지령값에 따라

추정위치가 제어되고 있음을 보여준다. 최대 압부력 지령값은 54kN이며, 외부의 지그에 설치된 힘센서로부터 측정되는 압부력값은 약 53.5 ~54.0 kN으로 센서리스 제어가 수행되고 있다.

Fig. 5 (b)는 최대 압부력 발생시 PMSM 제어를 위한 d-q축 전류값을 나타낸다. Fig. 5에서 보듯이 전류제어의 효율성 향상을 위하여 MTPA 전류제어가 수행되고 있으며 모터의 위치가 안정된 후 q축은 약 8A d축은 약 -7A의 전류가 출력되고 있다.

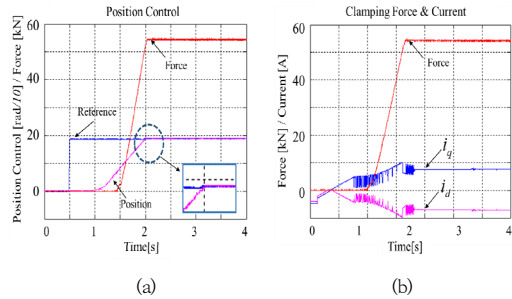


Fig. 6. Experimental result of clamping force using sensor compensated control (a) position control, (b) d-q axis current control

Fig. 6 (a)는 추정제어에 압부력 센서 보상제어를 수행한 제어파형을 나타낸다. 그림에서 보듯이 최대 압부력 지령값에 도달하는 순간 초기 추정제어단계에서 센서값을 통해 정확한 지령 압부력값을 보상하는 계산이 이루어지며 지령값과 위치제어값이 정확히 일치하여 출력되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5의 파형과 비교할 경우, 센서보상이 이루어지지 않으므로 초기 추정된 위치값을 유지하고 있는 파형을 출력하게 된다. 그러나 실험 지그에서 측정되는 압부력 출력값은 두가지 제어방법 모두 큰 차이를 보이지 않고 1kN 이내 조건에서 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

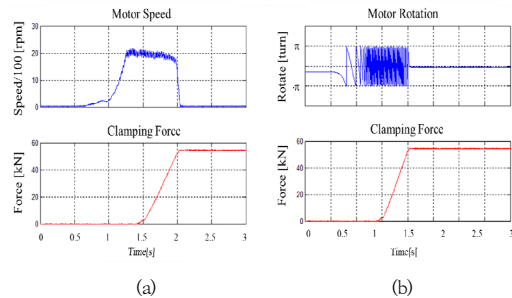


Fig. 7. The relationship between the time to reach maximum clamping force and the rotation of the IPMSM.

Fig. 7은 압부력 센싱보상제어에서 압부력이 최대값인 54 kN에 도달했을 때의 모터속도와 회전수를 나타내고 있다. Fig. 7 (a)에서 모터의 최대 속도는 약 2,000 rpm으로 제어되고 있으며, 모터 회전수는 약 63회에서 최대 압부력에 도달 한다.

Fig. 5와 Fig. 6의 결과와 같이 한단계의 압부력 지령에 대한 입력시험의 경우, 제어 방법의 차이에 따른 성능의 차이가 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 그러나, 연속 압부력지령 입력에대한 특성은 두 제어방법에서 제어성능의 차이점이 발생한다.

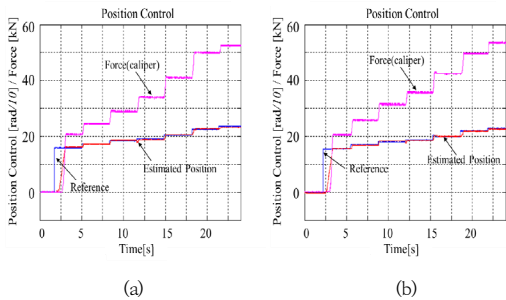


Fig. 8. EMB up step position control pattern under static condition (a) estimation control, (b) estimation and sensor compensated control

Fig. 8은 제동 1단계에서 7단계로 상승하는 연속지령 입력에 대한 압부력 출력을 보여준다. 연속제어의 경우 압부력 출력값이 0에서 목표 압부력까지 하나의 스텝으로 상승하는 것과 달리 여러 스텝을 거쳐 압부력 출력을 발생시키는 시험이다. Fig. 8 (a)는 압부력 추정제어만을 수행했을 때의 파형이며, Fig. 8 (b)는 압부력 센서 보상제어를 적용했을 때의 파형을 나타낸다. 그림에서 보듯이 제어방법의 차이에 따라 1~2단계와 6~7단계의 압부력 지령에는 정확한 출력값을 보이지만 추정제어만을 사용할 경우, 3~5단계 사이의 압부력 출력값이 지령값에 비해 약 2 kN 수준의 낮은 값을 출력하고 있다. 그러나 Fig. 8 (b)의 센서 보상제어의 경우, 모든 제동단계에 대하여 ±0.5 kN 내의 오차를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 추정제어와 센서보상을 통하여 추정된 지령값의 보상이 수행되고 모터의 제어는 보상된 지령값을 따라 정확히 추종함으로써 모든 제동지령 입력에서 정확한 압부력을 출력하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 제동 7단계에서 1단계로 하강하는 연속지령 입력에 대한 압부력 출력을 보여준다. Fig. 8 (a)는 압부력 추정제어만을 수행했을 때의 파형이며, Fig. 8 (b)는 압부력 센서 보상제어를 적용했을 때의 파형을 나타

낸다. 추정제어의 경우 최초 7단 입력 후 6단부터 출력 압부력값이 입력 지령값과 비교하여 점차적으로 큰 오차가 발생하고 있다. Fig. 9 (a)에서 모터는 추정 위치제어만을 피드백 받으므로 제동완해 동작에서 필요한 모터의 출력토크가 줄어들어 압부력 오차를 발생시킨다. 그러나 Fig. 9 (b)에서 보듯이 압부력 센서의 보상을 통하여 위치와 토크의 제어가 모두 수행되고 있으며 특히, 제동 5단 입력에서 4단으로 하강 시 추정값과 측정값의 에러값을 계산하여 모터의 위치를 재조정하는 제어가 수행되어 압부력 출력에서 언더슈트(undershoot)가 발생하는 결과를 보여준다.

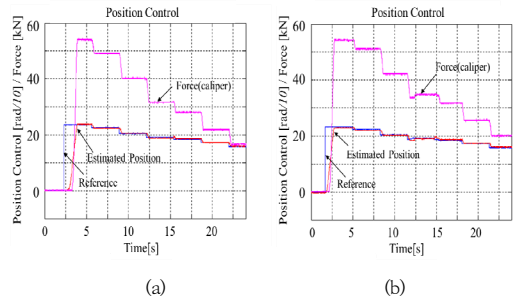


Fig. 9. EMB down step position control pattern under static condition (a) estimation control, (b) estimation and sensor compensated control

Table 1. Comparison of experimental result

Step (reference [kN])	Test Result [kN]		Error [%]		Remark
	Estimation control	Sensor compensated control	Estimation control	Sensor compensated control	
1 (20)	20.7	20.3	3.5	1.5	
2 (26)	24.3	26.0	6.5	0	
3 (31)	29.3	31.3	5.4	1.0	
4 (36)	34.3	36.0	4.7	0	
5 (42)	41.3	42.0	1.6	0	
6 (50)	50.0	49.7	0	0.6	
7 (54)	52.7	53.7	2.4	0.6	

Table 1은 Fig. 8의 압부력 추정제어와 센서보상제어의 연속제어 입력에 대한 압부력 출력값을 표로 정리한 결과이다. 추정제어를 적용할 경우 압부력의 오차값은 최대 6.5%가 발생하였으며, 전체 7단계의 압부력 평균은 약 3.1%의 오차값이 발생한다. 본 논문에서 제안한 센서보상제어를 추가한 경우의 압부력 오차값은 최대 1.5% 수준이며, 평균값은 약 0.5% 수준으로 모든 단계에서 추정제어와 비교하여 향상된 압부력이 출력되고 있

음을 확인할 수 있다.

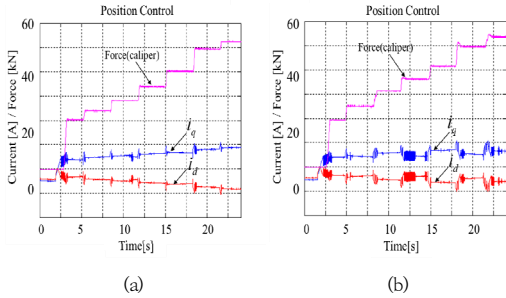


Fig. 10. EMB up step current control pattern under static condition (a) estimation control, (b) estimation and sensor compensated control

Fig. 10은 연속 지령입력에 대한 d-q축 제어전류 파형을 보여준다. Fig. 10 (a)의 추정제어의 경우 제동입력 값이 증가할수록 현 압부력값을 피드백 받지 않으므로 추정식에 따라 전류값도 서서히 상승하는 형태를 보이며, 압부력 기준 개루프 제어를 수행하므로 오버슈트 없이 비교적 단순한 전류제어 파형을 보여준다. Fig. 10 (b)는 추정제어기법과는 달리 압부력을 피드백 받아 제어를 수행하므로 압부력 값을 재조정하는 동작이 각 단계에서 보이며 전류제어 파형이 상대적으로 복잡 형태임을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 기존 캘리퍼의 위치제어를 통한 압부력 추정제어(센서리스 제어)에 압부력 센서의 보상제어를 추가하여 EMB의 압부력 제어성능을 평가하였다. 정적제어 시험에서 각 제동 단계별 압부력 성능은 유사한 결과를 보이지만 연속단계 압부력지령에서 추정제어는 압부력 기준값 대비 최대 6.5 %의 오차값을 보이지만 센서보상제어를 적용할 경우 최대 1.5 % 오차값 수준으로 5 % 이상 압부력 오차가 개선되었다. 또한, 기존의 추정제어에 압부력 센서의 보상제어를 병합함으로써 철도차량의 운행중 센서의 고장시에도 추정제어의 이중화를 통한 EMB의 신뢰성 향상이 예상된다. 다이노마 시험장비를 활용한 동적제어시험의 일부 제동단계 구간에서 기존의 추정제어 방식을 적용할 경우, 제동압부력 출력특성 저하가 발생하는 구간이 존재하였으나 향후 압부력 센싱보상제어를 통하여 동적제어시험에서도 요구지령에 따른 향상된 제어특성을 출력할 것으로 판단된다.

### References

- [1] S. K. Baek, H. K. Oh, J. H. Park, S. W. Kim, S. S. Kim "A Evaluation of Emergency Braking Performance for Electro-Mechanical Brake using Interior Permanent Magnet Synchronous Motor," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 6, pp.170-177, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.6.170>
- [2] Y. H. Ki, K. J. Lee, J. S. Cheon, 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>
- [3] 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>
- [4] R. Schwarz, R. Isermann, J. Bohm, J. Nell and P. Rieth "Clamping force estimation for a brake-by-wire actuator", *SAE Technical Papers*, Jan. 1999.
- [5] M. R. A. Atia, S. A. Haggag, and A. M. M. Kamal, "Enhanced electromechanical brake-by-wire system using sliding mode controller," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 138, no. 4, pp. 041003 1-6, Apr. 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4032484>
- [6] S. K. Baek, H. K. Oh, J. H. Park, S. W. Kim, S. S. Kim "A Evaluation of Emergency Braking Performance for Electro-Mechanical Brake using Interior Permanent Magnet Synchronous Motor," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 6, pp.170-177, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.6.170>

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