

매입형 영구자석 동기전동기를 적용한 전기기계식 제동장치의 비상제동 성능평가

백승구*, 오혁근, 박준혁, 김석원, 김상수
한국철도기술연구원 차세대고속철도차량본부

A Evaluation of Emergency Braking Performance for Electro Mechanical Brake using Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Seung-Koo Baek*, Hyuck-Keun Oh, Joon-Hyuk Park, Seog-Won Kim, Sang-soo Kim
Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

요약 본 논문은 전기기계식제동장치(EMB : Electro Mechanical Brake, 이하 EMB)의 제동 압부력(clamping force) 제어방법과 제동시험장비(dynamo test equipment)를 활용한 제동성능 평가결과에 대하여 다룬다. EMB와 관련한 연구는 자동차 분야에서 대부분 수행되었으며, 다양한 제어방법에 대한 정적상태의 압부력 시험결과를 주로 다루고 있으나 본 논문은 동적상태에서의 성능평가를 수행하였다. EMB의 구동을 위해 3상 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)가 적용되었으며 유한요소법(FEM : Finite Element Method, 이하 FEM) 해석 소프트웨어인 JMAG을 통하여 설계 및 해석을 수행하였다. EMB의 압부력제어를 위해 전류제어, 속도제어 및 위치제어가 수행되었으며, 전류제어기는 단위전류당 최대토크제어(MTPA : Maximum Torque Per Ampere, 이하 MTPA)가 적용되었다. 제동성능평가는 공압식 제동장치의 비상제동 성능시험 절차와 동일한 방법으로 수행되었으며 시험장비에 설치된 고속철도차량의 차륜을 110 km/h, 230 km/h 및 300 km/h로 회전하는 상태에서 각각의 속도 조건에 따른 EMB의 제동 압부력을 인가하여 감속성능을 확인하였다. 최고속도(300 km/h) 상태에서 비상제동 시험결과는 73초의 시간이 소요되었으며 차세대고속철도차량(HEMU-430X)에 적용된 공압식 제동장치의 성능시험 결과와 비교를 통하여 제동소요 시간 및 감속패턴의 유사함 확인하였다.

Abstract This study examined the clamping force control method and the braking performance test results of an electromechanical brake (EMB) using braking test equipment. Most of the studies related to EMBs have been carried out in the automotive field, dealing mainly with the static test results for various control methods. On the other hand, this study performed a dynamic performance evaluation. The three-phase interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) was applied to drive the actuator of the EMB, and the analysis was verified by JMAG(Ver. 18.0), which is finite element method (FEM) software. The current control, speed control, and position control were used for clamping force control of the EMB, and the maximum torque per ampere (MTPA) control was applied to the current controller for efficient control. The EMB's emergency braking deceleration performance was tested in the same way as conventional pneumatic brake systems when the wheel of a train rotates at 110 km/h, 230 km/h, and 300 km/h. The emergency braking time, with the wheel stopped completely at the maximum rotational speed, was approximately 73 seconds. The similarity of the braking time and deceleration pattern was verified through a comparison with the performance test results of the pneumatic brake system applied to the next generation high-speed railway vehicle (HEMU-430X).

Keywords : Interior-Permanent-Magnet-Synchronous-Motor(IPMSM), Maximum Torque Per Ampere(MTPA), Dynamo Test Equipment, Emergency Brake, Brake-By-Wire, Electro-Mechanical-Brake.

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업(PK2003A1) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

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

Received February 28, 2020

Revised March 18, 2020

Accepted June 5, 2020

Published June 30, 2020

1. 서론

EMB는 모터의 회전을 통해 캘리퍼(caliper)를 이동시켜 제동디스크에 압부력을 발생시키는 원리로 동작한다. EMB는 자동차분야에서 유압식 제동장치를 대체하기 위한 대안으로 활발한 연구가 수행되고 있으나 안전성, 신뢰성 및 비용 증가 등의 문제가 남아있다[1][2].

철도차량분야는 기존 공압식 제동시스템을 대체하기 위한 연구가 수행 중이다. 자동차 분야와는 다르게 철도 차량은 차축별로 제동장치가 장착되어 있고 하나의 제동 장치에 고장이 발생하여도 다른 제동장치가 제동을 분담하는 구조를 가지고 있어 안전성 및 신뢰성 측면에서 적용이 가능하다. 또한, 공압을 발생시키기 위한 구성품인 공기압축기, 제동공기통, 제동배관 및 밸브류 등의 장치가 차량의 하부에 많은 공간을 차지하고 있어 이러한 장치를 제거하면 차량의 단면적을 줄일 수 있으며 전체 철도시스템의 효율을 향상시키는 효과를 가져올 수 있다.

EMB의 중요 구성품인 모터는 효율이 높고, 제어특성 및 토크특성이 우수한 3상 IPMSM이 주로 사용되고 있어 IPMSM의 제어는 EMB의 성능에 중요한 요소이다. IPMSM의 제어 방법은 동기좌표계에서 PID 제어기 기반의 속도 및 전류제어를 통한 압부력 제어[3], 슬라이딩 모드 제어를 사용한 압부력 제어[4], 압부력의 추정을 통한 sensorless 제어[5][6] 등의 여러 제어방법에 대한 연구가 주로 수행되었으나 여러 제어방법에도 불구하고 시뮬레이션 또는 정적 압부력 측정 결과만을 다루고 있으며 차량의 설치 및 주행 환경과 유사한 상태에서 동적 압부력 시험을 수행한 결과는 없었다.

본 논문에서는 EMB 시스템의 모터를 설계·제작하고 철도차량용 제동성능 시험설비를 이용하여 최고속도 300 km/h에서 비상제동 시험을 통한 동적성능을 평가하였다. IPMSM의 설계는 JMAG(Ver. 18.1)을 활용하였으며 EMB 제어를 위해 모터의 일정토크영역에서 MTPA 제어가 적용되었다. 최고속도 300 km/h에서의 비상제동 시험결과는 공압식 제동장치와 시험결과 비교를 통하여 EMB 시스템에 대한 가용성을 검증하였다.

2. 본론

2.1 EMB 캘리퍼 구조 및 IPMSM 해석결과

Fig. 1은 고속철도차량용 EMB의 개념도 및 동작 매커니즘을 나타낸다. 구동축은 IPMSM에 1차 감속기어와

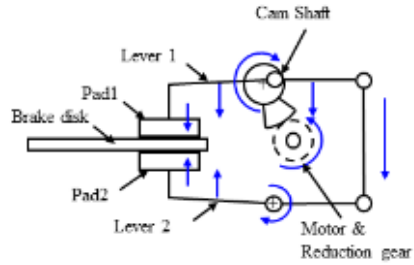


Fig. 1. Appearance and Dynamic Mechanism of EMB

평기어가 결합되었으며 구동축의 출력은 반달 형태의 2차 감속기어를 통하여 접합편심부(Cam Shaft)를 회전시키는 구조로 되어 있다. 즉, 접합편심부의 작은 이동거리를 통하여 레버 1과 레버 2가 브레이크 디스크 방향으로 이동하고 레버 끝단에 설치된 패드와 브레이크 디스크 사이에 압부력을 발생시켜 제동이 체결되는 구조이다.

Fig. 1의 구동축을 회전시키기 위해 사용된 모터의 형태는 IPMSM이다. IPMSM은 제어방식에 따라 마그넷(Magnet) 토크와 릴럭턴스(Reluctance) 토크를 함께 사용할 수 있어 동일 출력대비 상대적으로 부피가 작으며, 효율이 높아 최근에는 전기자동차용 모터 등 적용범위가 증가하는 추세이다[7].

IPMSM의 요구출력은 Eq. (1)의 운동방정식을 통하여 계산된다.

$$P = T_e \times \omega_m \quad (1)$$

여기서, P 는 출력, T_e 는 모터 출력토크, ω_m 는 각속도이다.

EMB의 동작속도 기준에 근거하여 ω_m 는 54 deg/s를 만족하여야 하며 모터의 각속도로 변경하면 263 rad/s 이상 이어야 한다. 모터의 필요 출력토크는 Eq. (2)와 같이 계산된다.

$$T_e = \frac{F \times d}{r_2} \times \frac{1}{\eta} \times \frac{1}{r_1} \quad (2)$$

여기서, F 는 요구 압부력, r_1, r_2 은 1차와 2차 감속기의 감속비, d 는 편심축의 이동거리, η 은 내부 동력전달 효율이다.

만일 내부 동력전달 효율이 1이고 1차/2차 감속비가 280이며 목표 압부력이 54 kN일 경우 Eq. (2)에 따라 모터의 출력토크는 1.9 Nm이 필요하다. 그러나 감속기의 사용으로 인한 손실 등으로 동력전달 효율을 0.8로 가

정하면 2.4 Nm의 모터 출력이 필요하다. 따라서, Eq. (1~2)를 통하여 모터에 필요한 최대출력은 모터의 이동 속도에 비례하고 동력전달 효율과는 반비례하게 된다.

Table 1은 EMB에 요구되는 압부력 기준을 54 kN이상으로 하였을 때 IPMSM과 감속기의 설계 요구사항을 나타낸다.

Table 1. Design requirements of IPMSM and reduction gear

Item	Unit	Specification	Remark	
Motor	Rated Output	W	600	Minimum
	Rated Speed	r/min	2500	
	Maximum Speed	r/min	4000	
	Rated Torque	Nm	2.5	Minimum
	Rated Current	A	20	
	Supply Voltage	V	72 ~ 100	
Reduction Gear	Ratio	-	100:1	
	Output Torque	Nm	180	

Fig. 2는 설계된 IPMSM의 출력토크 해석결과를 나타낸다. IPMSM의 크기는 캘리퍼에서 허용된 설계한계 내에서 입력전류 20 A일 경우의 결과이며, 이때의 평균토크는 약 4.55 Nm, 리플률(Ripple rate)은 0.033 Nm을 보이고 있다.

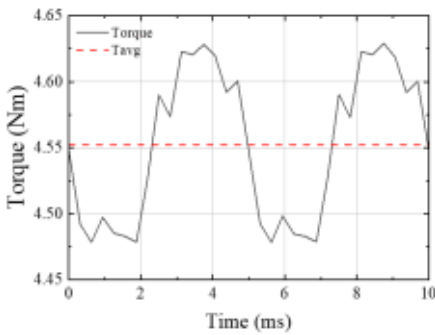
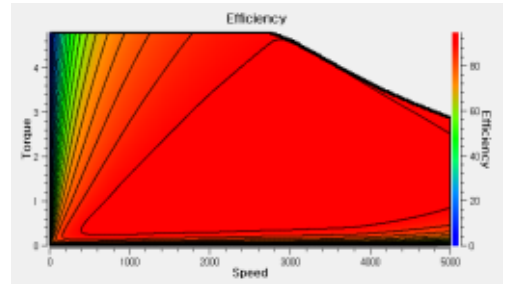
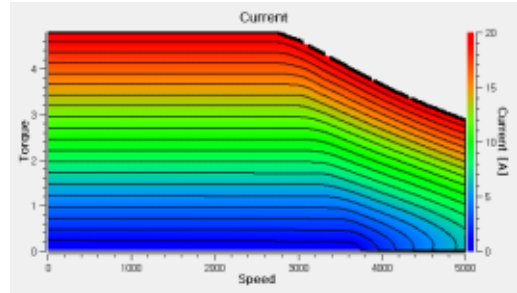


Fig. 2. Torque output of IPMSM

Fig. 3은 IPMSM의 속도와 출력 토크에 따른 효율맵 및 입력전류의 관계를 나타낸다. Fig. 3의 (a)에서 보듯이 정격에서의 최대효율은 약 95% 이상을 나타내고 있으며, (b)의 그림과 같이 정토크 영역인 약 2,800 rpm 이내에서 동작시 전류의 증가에 따라 선형적인 출력토크가 발생하고 있음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3. Dynamic characteristic according to speed (a) torque Vs efficiency (b) torque Vs input current

2.2 IPMSM의 전류제어방법

IPMSM의 토크는 Magnet 토크와 Reluctance 토크의 합으로 Eq. (2)과 같이 표현된다. Eq. (2)에서 보듯이 d-축의 인덕턴스 차로 인하여 Reluctance 토크가 발생하는데 이를 이용하여 구조적으로 L_{ds} 와 L_{qs} 가 동일하게 설계되는 표면부착형 영구자석 동기전동기 (SPMSM: Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)에 비해 상대적으로 높은 출력토크 특성을 얻을 수 있다.

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

여기서, P는 극수, ϕ_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.

IPMSM은 영구자석의 매입구조로 인하여 d-q축 인덕턴스의 값은 L_q 가 L_d 보다 큰 값을 갖도록 설계되며, Eq. (3)의 Reluctance 토크성분에 해당하는 항의 d축 전류가 0보다 작은 경우 추가적인 토크 출력값을 얻을 수 있다. 즉, i_{qs}^r 와 i_{ds}^r 의 조합에 따라 동일한 제어 전류의 크기에서 최대토크를 발생시킬 수 있다.

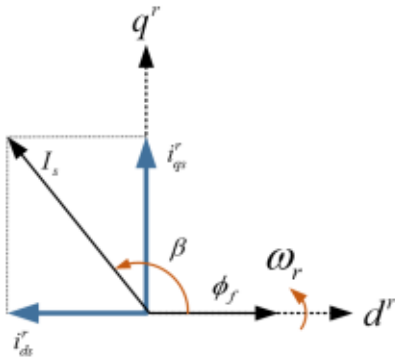

 Fig. 4. Relation of i_{ds}^r , i_{qs}^r and β for IPMSM

Fig. 4는 i_{ds}^r 와 i_{qs}^r 의 입력에 따른 β 각의 관계를 나타낸다. 그림과 같이 d-q축 고정자 전류 I_s 와 d축이 이루는 각이 β 각이 된다. Eq. (3)을 I_s 와 β 로 표현하면 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있으며 Eq. (4)를 β 로 미분하면 Eq. (5)와 같이 표현된다.

최대토크 발생점은 Eq. (5)가 0일 때이므로 Eq. (5)를 β 에 대한 식으로 정리하면 Eq. (6)와 같이 제어전류의 크기 I_s 에 따른 β 각의 크기가 계산된다.

즉, 최대토크를 발생시키는 β 값을 계산하였으므로 Eq. (7)에 의하여 MTPA를 발생시키는 i_{ds}^r 와 i_{qs}^r 를 구할 수 있다[8].

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} (\phi_f I_s \sin \beta + \frac{(L_{ds} - L_{qs})}{2} I_s^2 \cos 2\beta) \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial \beta} = \frac{P}{2} \frac{3}{2} (\phi_f I_s \cos \beta - (L_{ds} - L_{qs}) I_s^2 \sin 2\beta) \quad (5)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{-\phi_f + \sqrt{\phi_f^2 + 8(L_{ds} - L_{qs})^2 I_s^2}}{4(L_{ds} - L_{qs}) I_s} \right) \quad (6)$$

Fig. 4에 의한 d-q축 지령 전류는 Eq. (6)과 같이 나타낸다.

$$i_{ds}^r = I_s \cos \beta, \quad i_{qs}^r = I_s \sin \beta \quad (7)$$

Fig. 5는 EMB 제어를 위한 IPMSM의 제어 개념도이다. EMB 캘리퍼에 장착된 IPMSM으로 부터 각변위 (angular displacement) θ 와 3상 전류를 피드백 (feedback) 받는 구조이며 3상 전류는 동기좌표계 d-q축 변환을 통하여 d-q축 전류인 i_{ds}^r 과 i_{qs}^r 으로 변환된다. 각변위는 추정기(estimator)를 압부력 피드백으로 변환된다. 제어기는 위치, 속도 및 전류제어기가 적용되었으며 속도제어기의 출력전류인 I_{sref}^r 을 통해 Eq. (6-7) 적용하여 d-q축 기준전류인 i_{ds-ref}^r 및 i_{qs-ref}^r 으로 MTPA 제어를 구현하였다.

Fig. 6은 IPMSM 제어를 위해 d-q축의 기준 전류값에 따른 최대토크의 궤적을 나타낸다. 고정자의 입력전류 제한곡선은 각각 10 A와 20 A 두 가지 경우에

대해 예를 들었다. IPMSM의 경우 고정자의 전류제한 곡선에 따른 MTPA를 위한 β 각은 약 113°와 122°가 계산된다.

따라서, 전류제한곡선과 β 각에 따른 I_{s1} 및 I_{s2} 과 같은 전류벡터에 의해 만나는 점을 연결하면 Fig. 6의 붉은 색 선으로 표시된 궤적이 생성된다. 이렇게 생성된 궤적은 고정자 전류의 크기에 따른 최대토크를 출력할 수 있다. IPMSM의 최대 토크를 발생시키기 위한 β 각의 범위는 $90^\circ < \beta < 180^\circ$ 이다.

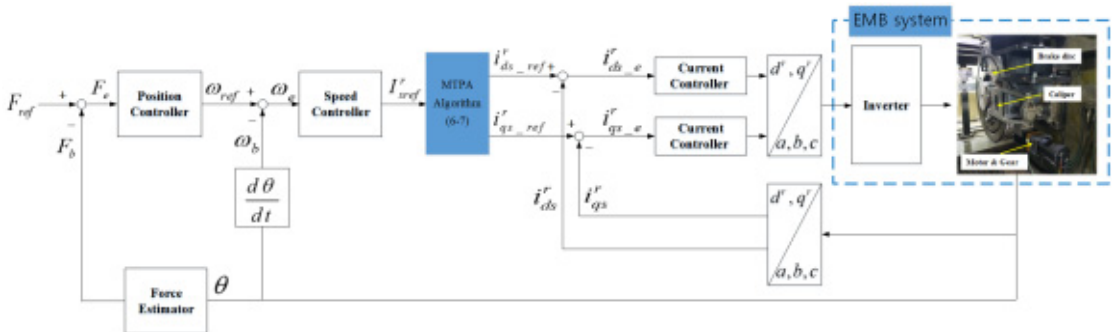


Fig. 5. IPMSM control concept of EMB system

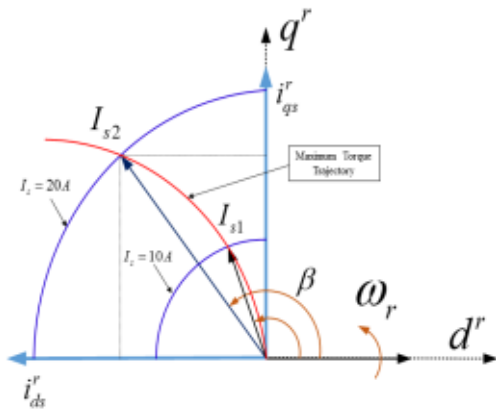


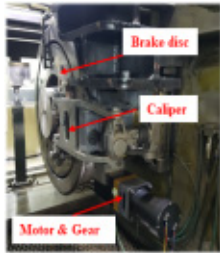
Fig. 6. d-q axis current control reference

2.3 EMB 시스템 조합시험 결과

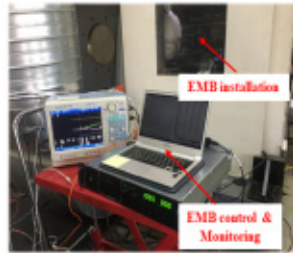
Fig. 7의 (a)와 (b)는 EMB의 제동시험을 위한 제동성능시험기와 EMB 시스템의 시험 설치상태를 나타낸다. 제동시험은 공압용 캘리퍼의 제동시험과 동일한 시험장비 및 설치환경에서 시험을 수행하였으며 EMB의 제어는 Fig. 7 (c)와 같이 외부에서 제어장치를 이용하여 제어하는 방법으로 시험을 수행하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Installation for EMB Performance Test

(a) equipment for braking performance test (b) EMB installation (c) brake control and monitoring

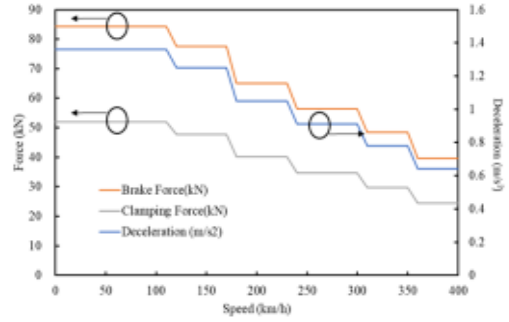


Fig. 8. Deceleration control pattern for HEMU-430X pneumatic brake system using

Fig. 8은 국내 동력분산식 고속철도차량(HEMU- 430X)에 적용된 공압식 제동장치에 대한 비상제동시 감속도 제어패턴이다. 최초 차량에 대한 감속도 기준이 정해지면 전체 제동 캘리퍼에 대한 제동력이 계산되고 이에 따라 각 캘리퍼의 압부력이 결정된다. 차량의 EMB 시스템의 조합시험은 각각 110 km/h, 230 km/h 및 300 km/h 일 경우에 대하여 점차적으로 속도를 높이면서 수행하였다.

Table 2. Clamping force reference according to axle velocity at Emergency braking.

Initial axle velocity [km/h]	Clamping force reference [kN]			
	Axle velocity [km/h]			
	300	230	160	110
300	31	42	50	54
230	-	42	50	54
110	-	-	-	54

Table 2는 비상제동 조합시험을 위해 Fig. 8에 따른 압부력 인가 순서를 나타낸다. 표에서 보듯이 차량이 300 km/h 속도로 회전시 최초 제동 압부력 31 kN에서 차량의 감속도에 따라 42 kN, 50 kN 및 54 kN의 순서로 제동을 인가하였다. EMB 시스템의 300 km/h에서의 비상제동 시험에 따른 감속패턴은 공압식 제동장치의 제조사가 제시하는 시험결과와 비교평가 하였다.

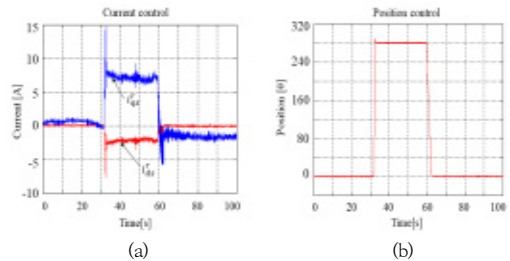


Fig. 9. IPMSM control results at 110 km/h speed (a) d-q axis current control (b) position control.

Fig. 9는 차륜속도 110 km/h에서 비상제동을 위해 Table 2와 같이 제동 압부력 54 kN 인가시 EMB의 제어파형을 나타낸다. Fig. 9 (a)는 IPMSM 제어를 위한 d-q 축 전류제어 파형이며 요구 압부력 지령에 의해 Eq. (6)에 따라 계산된 q축 전류는 약 8 A, d축 전류는 약 -2.5 A 로 제어가 수행되었으며 비상제동 시간은 약 38초 가 소요되었다. Fig. 9 (b)는 압부력 지령에 따른 IPMSM의 위치 피드백 파형을 나타낸다. 차륜의 회전에 따라 캘리퍼에 전달되는 진동의 영향 없이 IPMSM의 위치가 280 rad 을 추종하고 있다.

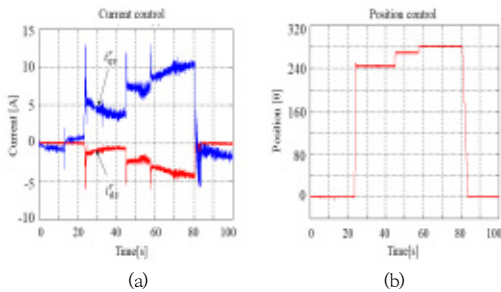


Fig. 10. IPMSM control results at 230 km/h speed
(a) d-q axis current control (b) position control

Fig. 10은 차륜속도 230 km/h에서 비상제동시 EMB의 제어파형을 나타낸다. Table 2에서와 같이 차륜의 속도에 따라 제동 압부력을 각각 42 kN, 50 kN 및 54 kN 으로 인가하였다. Fig. 10 (a)는 각 제동 압부력 기준별 d-q축 전류제어 파형을 나타낸다. d-q축 제어전류의 최대값은 각각 -4 A 와 11 A 이며 제동시간은 57초 이내에 비상제동이 체결되었다. Fig. 10 (b)는 IPMSM의 위치피드백 파형을 나타내며 각 단계별 지령에 따라 일정한 압부력제어가 수행되고 있다.

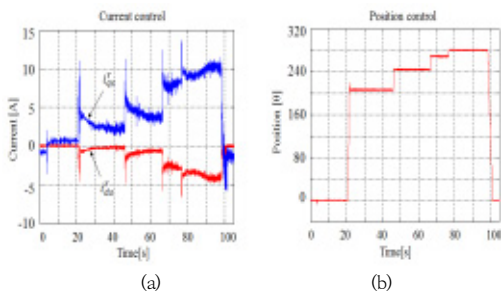


Fig. 11. IPMSM control results at 300 km/h speed
(a) d-q axis current control, (b) position control

Fig. 11은 차륜속도 300 km/h에서 비상제동시 EMB

의 제어파형을 나타낸다. 차륜의 속도에 따라 제동 압부력을 각각 31 kN, 42 kN, 50 kN 및 54 kN으로 인가하였다. Fig 11 (a)는 제동 압부력 기준별 d-q축 전류제어 파형을 나타낸다. 최대 압부력에서 d-q축 전류의 최대값은 Fig. 10과 동일하며 제동시간은 73초 이내에 비상제동이 수행되었다. Fig. 11 (b)는 각 제동 단계별 IPMSM의 위치피드백 파형을 나타내며 최고속도에서 차륜의 회전에 따라 캘리퍼의 진동없이 위치 추종이 되고 있음을 보여준다.

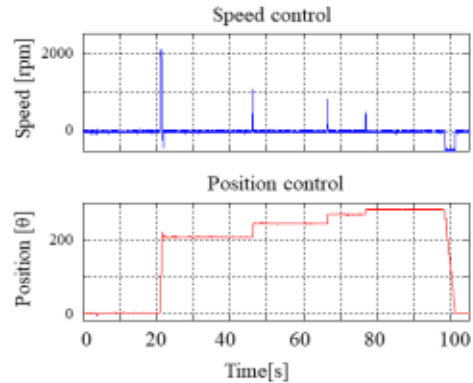


Fig. 12. IPMSM speed control according to the position control at 300 km/h speed

Fig. 12는 차륜속도 300 km/h에서 비상제동시 각 위치제어에 따라 모터의 회전속도 변화를 나타낸다. 최초 제동 압부력 31 kN 입력시 최대 2,000 rpm까지 모터가 회전하였으나 50 kN에서 54 kN 입력에서는 각변위가 짧아 최대 500 rpm 수준까지 회전하였다. 즉 Eq. (1) 과 같이 IPMSM의 출력은 속도에 비례하므로 Fig. 9에 따라 제동 압부력을 0 kN에서 54 kN으로 인가할 경우 d-q축의 제어전류가 작아도 동일한 압부력제어가 수행되고 있음을 확인 할 수 있다. 즉, IPMSM의 속도가 낮은 영역에서 동작하는 경우 EMB에서 요구되는 압부력 출력의 발생을 위해 제어전류가 증가하게 된다.

Fig. 13은 차륜속도 300 km/h에서 비상제동시 공압식 제동시스템과 EMB 시스템의 감속파형을 비교하였다. EMB의 감속제어는 Fig. 11의 제동 압부력 입력에 따라 수행된 결과이다. EMB의 경우 공압식과 비교하여 감속도의 변화가 파형에 나타나는데 이는 공압식과 비교하여 빠른 입력 반응속도에 따른 영향으로 판단된다. 그러나 차륜속도가 0 km/h까지 감속할 때의 소요시간은 두 시스템이 동일하게 73초가 소요되어 공압식 제동장치와 비교하여 감속 성능은 유사하다.

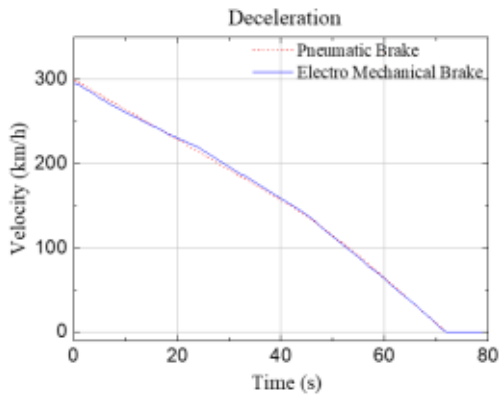


Fig. 13. Comparison of Emergency brake curve between pneumatic brake and EMB at 300 km/h speed

제동시험시 캘리퍼의 끝단에 별도의 압부력 피드백을 위한 센서 설치가 어려운 환경으로 인해 실제 입력된 압부력의 측정은 수행되지 않았으나 공압식 제동장치와의 비교결과를 통하여 각 속도대역에 따른 실제 요구압부력 출력과 동일함을 예측할 수 있다.

Fig. 14는 차량의 속도가 300 km/h 주행상태에서 EMB의 비상제동 체결시 상태이다. 차량이 회전상태에서 캘리퍼의 압부력이 인가되고 차륜디스크와의 마찰열이 발생하여 고열로 인한 붉은색의 원형모양 띠가 발생하고 있어 안정적으로 제동이 체결되고 있음을 확인할 수 있다.

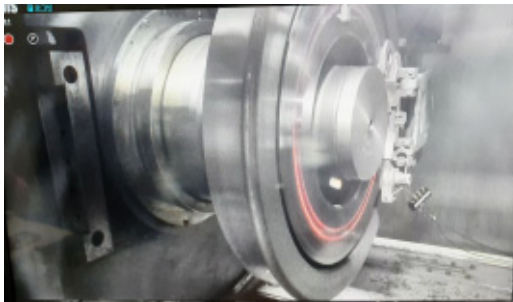


Fig. 14. Emergency brake test at 300 km/h speed

3. 결론

본 논문은 철도차량에 EMB 장치를 적용하기 위하여 중요한 항목인 제동성능 시험장비를 활용한 조합시험평가를 수행하였다. 실제 HEMU-430X 차량의 장착 환경과 동일하게 공압식 제동장치 대신 EMB가 설치되었으며 최대 300 km/h로 회전하는 차륜에 각 속도별 제동 압부

력 지령을 EMB에 인가하였다. 차량이 초기 300 km/h 속도에서 정지시까지 위치제어 및 전류제어가 정상적으로 수행되었다. 기존 HEMU-430X 차량에 사용된 공압식 제동장치와 비교한 결과 제동시간은 73초 이내에 체결되었으며 감속도 패턴도 유사한 결과를 보였다. 실험결과에서 보듯이, 고속철도차량에 기존 공압식 제동장치를 대신하기 위한 유효성을 확인하였다. 향후 EMB 적용을 위한 신뢰성 및 안전성 향상을 위한 연구가 필요하다.

References

- [1] R. T. Bannatyne, "Advances and challenges in electronic braking control technology", *SAE Technical Papers*, Vol.107, No.4, pp.2324-2328, 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] J. K. Ahn, K. H. Jung, D. H. Kim, H. B. Jin, H. S. Kim, S. H. Hwang, "Analysis of a regenerative braking system for hybrid electric vehicles using an electro-mechanical brake", *International Journal of Automotive Technology*, Vol.10, No.2, pp.229-234, Apr. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-009-0027-z>
- [4] M.R.A. Atia, S.A. Haggag, A.M.M. Kamal, "Enhanced electromechanical brake-by-wire system using sliding mode controller", *Dyn. Syst. Meas. Control*, vol.138, No.4, pp.041003, April. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4032484>
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] T. M. Jahns, G. B. Kliman, T. W. Neumann, "Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.IA-22, No.4, pp.738-747, July/August 1986.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504786>
- [8] 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>

고속열차 추진시스템, 전력전자, 자동제어

김 석 원(Seogwon Kim) [정회원]



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

<관심분야>

고속철도차량, 제동시스템

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(집진, 제동), 열전달

김 상 수(Sang Soo Kim) [정회원]



- 1999년 3월 : 일본 이바라키 대학교 이공학연구과 기계공학분야 (공학석사)
- 2002년 3월 : 일본 이바라키 대학교 이공학연구과 산업과학분야 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2004년 6월 : 일본 아키타현 고도기술연구소 주임연구원
- 2004년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량, 메카트로닉스

박 준 혁(Joon-Hyuk Park) [정회원]



- 2000년 2월 : 연세대학교 대학원 (기계공학석사)
- 2005년 2월 : 연세대학교 대학원 (기계공학박사)
- 2005년 3월 ~ 2006년 3월 : 연세대학교 자동화기술연구소 연구원
- 2006년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량 동역학, 능동현가장치