Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 4 pp. 578-585, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.4.578
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

고속철도차량의 EMB 적용을 위한 3상 IPMSM의 설계 및 제동압부력 제어

백승구*, 오혁근, 곽민호, 김석원
한국철도기술연구원 차세대철도차량본부

A Design Method of Three-phase IPMSM and Clamping Force Control of EMB for High-speed Train

Seung-Koo Baek*, Hyuck-Keun Oh, Min-ho Kwak, Seog-Won Kim
Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

요 약 본 논문은 고속철도차량에 전기기계제동장치(EMB : Electric Mechanical Brake)를 적용하기 위한 주요 구성품인 3상 매입형영구자석동기전동기(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 설계방법과 이를 이용한 인버터 제어 시스템의 압부력제어 시뮬레이션 방법을 제안한다. 최근 자동차에서 주로 사용하는 유압식 제동장치는 유압을 발생시키기 위해 필요한 오일류와 유압 라인의 관리, 유지보수성 및 유압펌프의 동작으로 인한 효율성 등이 문제로 제기되면서 EMB에 대한 관심이 높아지고 있으나 비용증가 및 안전측면의 보완이 지속적으로 요구되고 있다. 공압식 제동장치를 주로 사용하는 철도차량은 EMB 시스템을 적용할 경우 차량 하부에 큰 공간을 차지하는 공기압축기, 제동공기통 및 연결 배관 등의 부품이 필요하지 않으므로 50% 이상의 소형화가 가능하며 인버터를 적용한 전동기 구동방식으로 인하여 상대적으로 빠른 응답속도와 정밀제어를 통해 공주거리를 단축시킬 수 있는 장점을 갖는다. 또한, 철도차량은 다수의 제동장치가 제동력을 분담하는 구조로 설계되어 자동차와 비교하여 EMB 적용이 안전측면에서 유리하다. 본 논문에서는 JMAG을 활용하여 고속철도의 제동 캘리퍼와 제동력 출력에 적합한 모터설계 및 전자계해석을 수행하였다. 제동 압부력 제어 시뮬레이션을 위해 기계구동부는 기존 EMB 시스템에 주로 적용된 볼스크류 형태의 동작방식과는 달리 고속철도차량에 적용된 편심축 회전을 이용한 구동방식으로 모델링하였다. IPMSM 제어를 통한 제동압부력 및 제동력 출력결과는 Matlab/Simulink를 활용하여 JMAG의 IPMSM 모델과 co-simulation을 통해 보였으며 결과의 타당성은 차세대고속철도(HEMU-430X)의 제동사양과의 비교를 통해 검증하였다.

Abstract This paper proposes a design method for a 3-phase interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) and clamping force control method for an electro-mechanical brake (EMB) using co-simulation for a high-speed train (HST). A traditional pneumatic brake system needs much space for the compressor, brake reservoir, and air pipe. However, an EMB system uses up to 50% less space due to the use of a motor and electric wires for controlling the brake caliper. In addition, it can reduce the latency time for brake control because of the fast response and precise control. A train that has many brakes is advantageous for safety because of the control by sharing the braking force. In this paper, a driving method for a cam-shaft-type EMB is modeled. It is different from the ball-screw-type brakes that are widely used in automobiles. In addition, a co-simulation method is proposed using JMAG and Matlab/Simulink. The IPMSM was designed and analyzed with the JMAG tool, and the control system was simulated using Matlab/Simulink. The effectiveness of the co-simulation results of the mechanical clamping force and braking force was verified by comparison with the clamping force specifications of a HEMU-430X HST.

Keywords : Brake-By-Wire, BBW, Electric Mechanical Brake, EMB, Inverter, IPMSM, High-Speed-Train

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK1801B2)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.
*Corresponding Author : Seung-Koo Baek(Korea Railroad Research Institute)
Tel: +82-31-460-5507 email: skbaek@krri.re.kr
Received January 22, 2018 Revised (1st February 14, 2018, 2nd February 22, 2018)
Accepted April 6, 2018 Published April 30, 2018

1. 서론

자동차 분야에서는 반도체 기술의 발전과 함께 ECU(Electronic Control Unit) 적용 장치의 비약적인 증가 및 성능향상이 진행되었다. 최근 자동차에서 주로 사용하는 유압식 제동장치는 유압을 발생시키기 위해 필요한 오일류와 유압 라인의 관리, 유지보수성 및 유압펌프 동작 등으로 인한 효율성이 지속적인 문제로 제기되어 구동 계통을 전기선으로 동작시킬 수 있는 BBW (Brake-By-Wire) 형태의 전기기계식 제동장치인 EMB의 적용에 대한 관심이 증가되고 있는 추세이다[1][2].

자동차의 EMB 개발은 초기 12 Vdc의 낮은 입력전압 사용으로 Wedge 구조를 이용하여 캘리퍼에 최대의 압부력을 발생시키는 형태였으나 최근 42 Vdc 입력전압 사용이 가능하여 디스크에 수직방향 형태의 캘리퍼를 제어하는 구조로 개발이 진행되고 있다[3].

모터의 제어방법도 많은 연구가 수행되었다. 기본적으로 벡터제어를 활용한 전류 및 속도제어를 사용한 압부력 제어[4], 슬라이딩모드 제어기를 사용한 압부력 제어[5], 구동부의 공간적인 제약으로 힘센서의 적용이 불가능함에 따른 압부력 추정제어[6-8], 센서 등 고장발생에 따른 고장진단 및 허용제어기법[9-14]등 많은 연구가 수행되었다. 그러나 앞서 기술한 많은 연구에도 불구하고 자동차 분야에서 요구하는 안전 관련한 요구조건과 유압시스템과 비교하여 복잡한 제어시스템의 구성에 따른 전체 제동시스템의 비용증가 측면은 향후 개선해야할 과제이다.

철도차량 분야는 수송용량 증대, 성능고도화 및 소형화에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 철도차량의 주요부품인 제동장치의 경우, 기존 공압방식에서 EMB 방식의 제동시스템 적용이 하나의 대안으로 관심을 받고 있다. 철도차량의 EMB 시스템 적용은 차량 하부에 많은 공간을 차지하고 있는 공기압축기, 제동공기통, 제동배관 및 밸브류 등의 제거로 전체 제동시스템 부피의 50% 이상 소형화가 가능하며, 빠른 응답속도로 인하여 고정밀 제동제어 및 공주거리 단축이 가능하다. 또한, 한 개 이상의 제동장치에 고장이 발생하여도 다수의 차축에 설치된 제동장치가 각각 제동력을 분담하는 구조로 설계가 가능하므로 자동차의 경우 보다 안전성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 유럽에서는 EMB 시스템의 유사한 예로 SLBS(Spring Loaded Brake System)라는 스프링과 결합된 전기모터식 구동시스템을 개발해 트램 및 모노레일과 같은 저속의 경량차량인 LRV(Light Rail Vehicle)에 적용한 사례가 있다. 국내의 경우 기존 도시철도 차량에 적용된 제동캘리퍼의 공압식 구동부를 전기기계식으로 교체하여 제동 압부력을 실험한 사례[15]가 있으나 제동캘리퍼의 구동모터로부터 출력토크 전달 형태가 볼스크류 타입으로 본 논문의 편심축 회전 형태와 다르며 고속철도차량 적용을 위한 구동모터와 인버터의 모델링을 통한 모터 출력성능 및 기구부의 제동압부력 출력 등의 해석적 접근은 수행되지 않았다.

본 논문에서는 고속철도차량용 공압식 제동장치를 대체하기 위한 EMB 시스템의 모터 설계와 인버터 제어에 대한 시뮬레이션 검증방법을 제안한다. 모터는 전기자기장 해석용 프로그램인 JMAG을 이용하여 EMB 시스템에 적용하기 위한 전용 IPMSM을 설계하였다. 설계된 IPMSM 모델은 Matlab/Simulink를 활용하여 기계부 설계 블록과 연계를 통한 제동압부력 및 제동력 결과를 도출하였다. 시뮬레이션 결과값은 동력분산식 고속열차인 HEMU-430X의 제동 설계값과 비교를 통하여 검증하였다.

앞서 설명한 Co-Simulation을 활용한 결과는 전용 FEM 해석용 소프트웨어를 이용한 재료특성과 모터 슬롯의 형상에 따른 고조파의 고려가 가능한 결과를 확인할 수 있으며 JMAG-RT(Real Time Modeling Tool)를 이용한 Simulink 모델의 생성을 통해 PMSM의 회전 토크 출력이 차량의 제동압력부와 제동력으로 전달되는 최종 특성을 확인할 수 있는 장점을 갖는다.

2. 본론

2.1 EMB용 모터 및 제어시스템 설계

2.1.1 PMSM 설계

Fig. 1은 고속철도차량용 EMB 개발을 위한 동작 구조를 나타낸 개념도이다. EMB 시스템은 구동장치인 모터, 감속기어부, 인버터, 캘리퍼 및 제동패드로 구성된다. 제동패드의 압부력은 모터 샤프트에 감속기어 1을 결합하고, 감속기어 출력 샤프트에 감속기어 2를 설치하여 접합 편심부를 회전시킴으로써 발생한다. 이때 발생하는 제동력이 철도차량의 차륜에 전달되어 제동이 체결되는 구조이다.

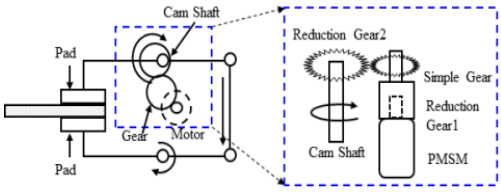


Fig. 1. (a) Caliper unit appearance of HEMU-430X, (b) Dynamic Mechanism of Caliper

캘리퍼를 이용하는 제동시스템의 경우 공간적인 제약사항으로 인해 동일 출력대비 부피가 작으며, 효율이 높고 정밀한 제어가 가능한 PMSM을 사용한다. 본 논문에서 설계하고자 하는 모터는 회전자 내부에 영구자석을 매입하는 IPMSM으로 선정하였다. IPMSM은 Magnet 토크와 Reluctance 토크를 함께 이용할 수 있으며 동일 크기 대비 효율면에서 우수하여 전기자동차용 모터 등 적용범위가 증가하는 추세이다[16].

IPMSM의 토크는 Magnet 토크와 Reluctance 토크의 합으로 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)에서 보듯이 d-q 축의 인덕턴스로 인해 Reluctance 토크가 발생하여 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM:Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)에 비해 상대적으로 높은 토크 특성을 얻을 수 있다.

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

여기서, P는 극수, ϕ는 Flux Linkage, i_{qs}^r는 동기 q축 고정자전류, i_{ds}^r는 동기 d축 고정자전류, L_{ds}는 d축 인덕턴스 L_{qs}는 q축 인덕턴스이다.

모터의 용량은 국내 동력분산식 고속열차인 HEMU-430X 제동 기준에서 요구하는 비상제동시 최대 압부력 기준인 152kN을 설계목표로 하였다. Fig. 1에서 감속기어1의 감속비를 80:1로 고려할 경우 2 Nm의 모터 회전토크와 초당 40 deg의 회전 각속도를 필요조건으로 하여 모터의 설계를 위한 출력용량은 600 W로 하였다. 철도차량 캘리퍼의 공간적 제약사항으로 인한 모터의 외경은 85mm, 적층 길이는 70mm를 넘지 않도록 외형의 설계기준이 결정되었다. 상기 요구조건을 만족시키기 위해 JMAG의 설계변수로 입력된 모터의 주요 상수값은 Table 1과 같다.

Table 1. IPMSM Mechanical Specification

Motor Specification		
Output Power		600 W
Rated Speed		3000 rpm
Inductance	Ld	3.194e-3 H
	Lq	6.946e-3 H
Torque Constant		0.2514 Nm/A
Torque		2.025 Nm
Number of Poles		4
Number of Slots		15

Fig. 2는 상기 주요 설계 상수값 및 외형으로 선정한 모터의 형상 및 와인딩 형태를 나타낸다. 극수가 적은 경우 높은 회전속도에 유리하지만 1극당 치수의 증가 및 불필요한 자로가 생길 수 있으며, 극수가 많을 경우 한바퀴 회전당 주파수의 증가로 인해 높은 회전속도에서 특성이 저하되고 조립공정이 어려울 수 있으므로 극수는 4극으로 결정하였으며, 외경의 크기를 고려하여 영구자석은 V자 배치로 하였다. 와인딩은 높은 토크를 요구하는 EMB의 동작 특성상 토크리플이 작고 상대적으로 제어성이 좋은 분포권을 채택하였다.

전기자의 쇄교자속량의 예측은 Magnet 토크와 Reluctance 토크의 비를 0.8:0.2로 가정하고 상전류의 실효값을 10A로 가정할 경우 식 (2)에 의해 0.059(Wb)로 예측될 수 있다.

$$\phi_a = \frac{T_r \times f_{mtrq}}{P_n \times i_q} = \frac{T_r \times f_{mtrq}}{P_n \times \sqrt{3} \times i_e \cos\beta} \quad (2)$$

여기서, P_n은 Pole pair, T_r은 기준 토크값, f_{mtrq}은 Magnet 토크 비율, i_q는 q축 전류, i_e는 상전류 실효값, β는 전류위상이다.

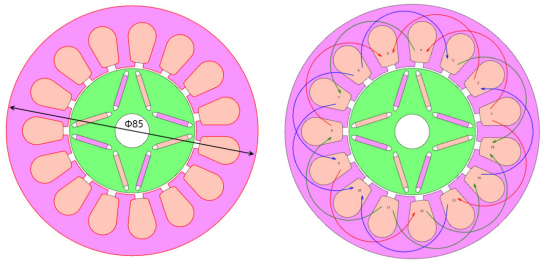


Fig. 2. Appearance of IPMSM
(a) Appearance, (b) Winding Method

2.1.2 제어시스템 설계

JMAG을 이용하여 설계된 IPMSM에 대하여 전력변환장치 및 제동부의 기계적 압부력 출력값을 시뮬레이션하기 위해 Matlab/Simulink 소프트웨어를 활용하였다. Matlab/Simulink에서 지원하는 IPMSM의 경우 d-q축의 일반화된 모델식에 근거하고 있어 모터가 회전하면서 발생하는 형상에 따른 토크리플 등의 특성을 반영하지 못한다. 따라서, JMAG에서 지원하는 Simulink 블록의 출력 기능(Export)을 이용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 인버터를 이용한 다양한 모터제어 알고리즘을 통하여 설계모터의 출력토크가 EMB 시스템의 기계적 출력인 압부력과 감속도 결과값으로 나타나는 과정을 해석적으로 보여 줄 수 있다.

Fig. 3은 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 위한 블록도이다. Fig. 3의 (a)는 EMB 시스템의 모터제어를 위한 인버터 블록도이다. 모터를 제어하기 위한 3상 2레벨의 SVPWM 방식의 인버터가 적용되었으며, d-q축 전류제어를 통하여 토크제어를 수행한다. Fig. 3의 (b)는 EMB 캘리퍼에서의 기계적 압부력 및 제동력 출력을 위한 블록도이다. 모터의 회전 토크가 감속기를 통하여 증가되고 이렇게 증가된 토크는 캘리퍼 형태의 제동장치에 전달되어 압부력이 발생하도록 구성되었다.

캘리퍼의 압부력 발생을 위한 인버터 제어는 동기좌표계에서 d-q축 전류제어를 수행하였다. 이러한 전류제어는 모터가 회전하면서 속도 기전력 성분이 발생하여 d축과 q축의 전류 변동분이 상호 영향을 주어 제어특성이 저하되는데 이를 보상하기 위해 동기좌표계 전압방정식 식(3)과 식(4)와 같이 역기전력 전향보상에 해당하는 $-\omega_r L_{qs} i_{qsr}$ 과 $\omega_r L_{ds} i_{dsr} + \omega_r \phi_f$ 을 d축과 q축의 기준전압 생성에 반영하기 위하여 Control Algorithm 블록에 추가하였다.[17]

$$v_{dsr} = R_s i_{dsr} + L_{ds} \frac{di_{dsr}}{dt} - \omega_r L_{qs} i_{qsr} \quad (3)$$

$$v_{qsr} = R_s i_{qsr} + L_{qs} \frac{di_{dqr}}{dt} + \omega_r L_{ds} i_{dsr} + \omega_r \phi_f \quad (4)$$

여기서, v_{dsr}은 d축 고정자 전압, R_s는 고정자 저항, i_{dsr} 및 i_{qsr}은 d-q축 고정자전류, ω_r은 전기각속도, L_{ds} 및 L_{qs}는 d-q축 고정자인덕턴스, ϕ_f는 Fluxlinkage 이다.

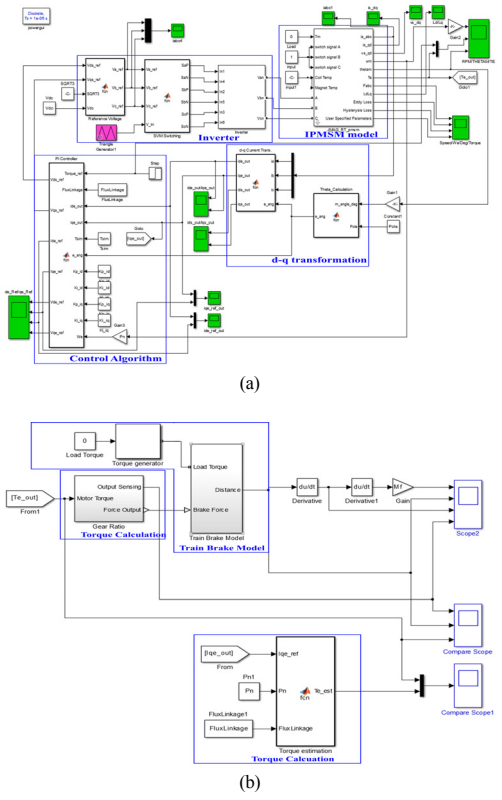


Fig. 3. (a) Motor and Inverter Block for EMB, (b) Reduction Gear and Mechanical Brake Block for EMB

모터의 회전토크 크기는 Fig. 3의 (b) Reduction Gear 블록을 통하여 기어비에 따라 토크값이 선형적으로 증가하게 되고, 구동부의 이동거리에 따라 압부력이 출력되도록 모델링 하였다. 압부력은 Shoe Brake 형태의 Train Brake Model 블록의 입력이 되어 제동시스템의 이동거리를 출력하도록 하였다. 이러한 이동거리를 이용하여 감속도, 감가속도 및 시스템 중량에 비례하는 제동력을 얻을 수 있다.

2.2 EMB 시스템 시뮬레이션 결과

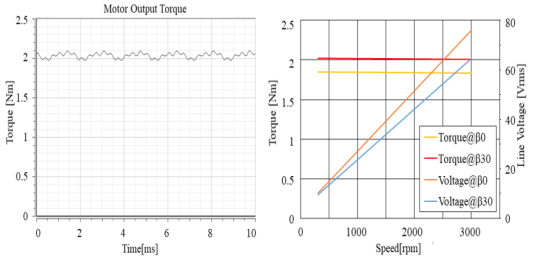
2.2.1 PMSM 시뮬레이션 결과

Table 1의 기계적 상수값을 바탕으로 JMAG Software를 이용하여 설계된 모터의 기본 성능 특성을 시뮬레이션하였다.

Fig. 4의 (a)는 모터의 토크특성을 나타낸다. 2.03 Nm의 결과값을 보이고 있으며, 리플은 6.13%의 결과를 얻었다. Fig. 4의 (b)는 IPMSM의 특성인 β각의 변화에 따

른 모터 속도별 토크변화를 나타낸다. β각이 30°일 경우 3000 rpm에서 2 Nm의 값을 나타내고 있으며 모터의 선간 전압은 65 Vrms이다. 선간전압은 인버터의 출력 전압과 관계가 있으며 만일 인버터 입력전압이 100 Vdc일 경우 SVPWM으로 제어시 선간전압은 70.7 V까지 출력이 가능하므로 모터의 출력 성능은 문제가 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 정격전류에서의 자속밀도 분포를 나타낸다. 강판에 해당하는 고정자의 티스, 백요크 및 회전자의 요크 부분에서 포화가 발생하지 않았으며, 회전자와 고정자의 강판 및 코일의 손실에 해당하는 와전류손, 히스테리시스손 및 동손 등 전체 손실은 41.13 W의 결과를 얻었다.



(a) (b)

Fig. 4. Simulation result of (a) Motor output torque, (b) Torque/speed characteristic according to angle β

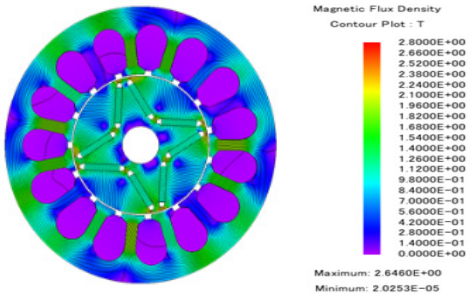
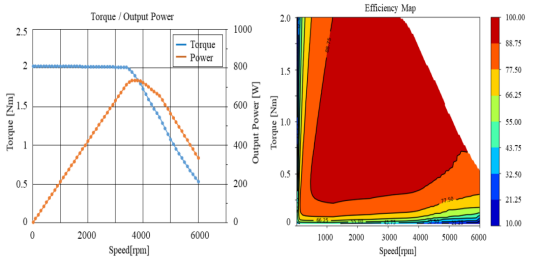


Fig. 5. Simulation result of magnetic flux density distribution

Fig. 6의 (a)는 모터의 회전수에 따른 토크 및 출력결과를 나타내는 그래프이다. Table 1의 설계 요구사항에 따라 3000 rpm에서 2 Nm를 결과를 확인할 수 있으며 모터 출력은 600 W를 나타내고 있다. Fig. 6의 (b)는 설계모터의 정격범위 동작에서의 효율맵이다. 1000 rpm 이후 속도에서 88.75% 이상의 효율을 나타내고 있으며 정격 동작 영역에서는 93.83%의 효율을 보인다.

2.2.2 제어시스템 시뮬레이션 결과

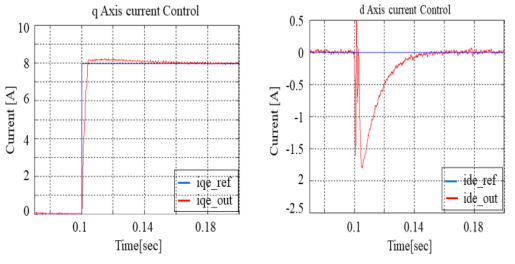
Fig. 3의 시뮬레이션 블록을 이용하여 IPMSM의 인버터 벡터제어에 따른 모터 출력과 기계적 압부력 및 감속도를 시뮬레이션 하였다. 설계된 모터의 타당성 확인을 위해 Matlab/Simulink의 PMSM 블록의 결과값과 비교하였다.



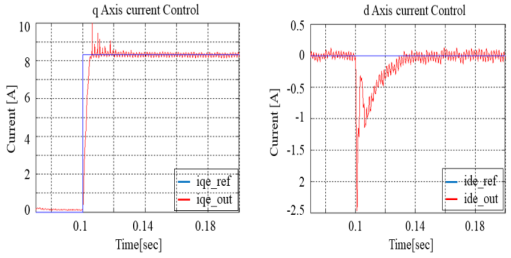
(a) (b)

Fig. 6. Simulation result of (a) Speed Vs Torque(Power), (b) Efficiency according to rated current

Fig. 7은 EMB 시스템의 토크 출력을 위한 Matlab/Simulink와 JMAG 모델에 대한 전류제어 비교 파형이다. 두 모델의 d축 기준 전류는 모두 0값을 유지하도록 설정하였으며, 이때 0.1 sec 후 2 Nm의 토크 출력을 발생시키기 위한 q축 기준전류는 각각 7.95 A와 8.3 A으로 약 0.34 A의 차이값을 보이고 있지만, 두 모델 모두 d-q 축 기준전류에 따라 출력전류가 추종하는 특성을 보여준다. 전류제어에서의 q-축 전류 리플 특성은 JMAG 모델이 비교적 큰 값을 파형으로 보여주고 있으며, JMAG 모델의 d-q축 전류리플은 Simulink 모델과 비교하여 약 2.5배 많은 리플값을 보인다.



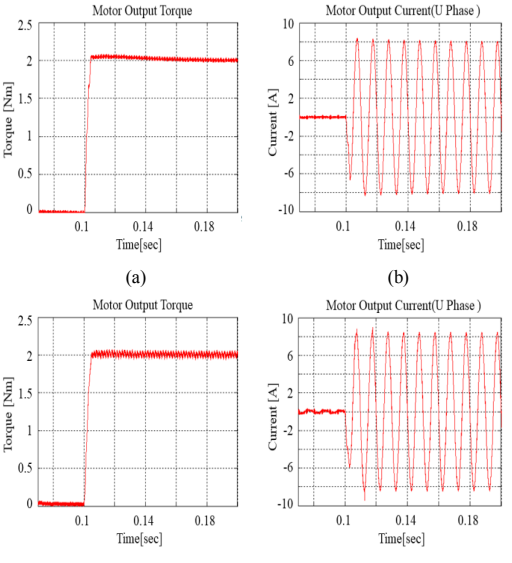
(a) (b)



(c) (d)

Fig. 7. Compare with current control simulation result between Matlab and JMAG motor model (a) q-axis(Matlab), (b) d-axis(Matlab), (c) q-axis(JMAG), (b) d-axis(JMAG).

Fig. 8은 d-q축 전류제어에 따른 IPMSM 모터의 출력 토크 및 출력전류를 보여준다. 출력토크는 2 Nm를 모두 만족하고 있으며 리플은 Matlab과 JMAG 모델이 각각 1%와 3%로 JMAG 모델에서 약 3배 많은 토크리플이 발생하고 있다. q축 기준전류에 따라 u상 출력전류는 정현파 형태이며 출력전류의 피크값은 각각 8 Apk와 8.5 Apk 값을 안정적으로 출력하고 있다.

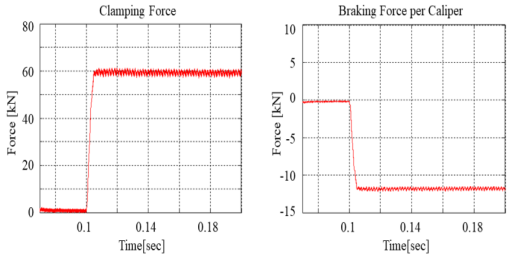


(a) (b)

(c) (d)

Fig. 8. Compare with motor output torque and U-phase current simulation result between Matlab and JMAG motor model (a) motor torque(Matlab), (b) U-phase current(Matlab), (c) motor torque (JMAG), (b) U-phase current(JMAG).

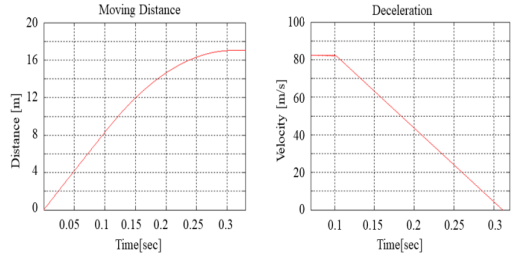
Fig. 9은 모터의 감속비와 캘리퍼의 레버비에 따른 캘리퍼의 압부력 출력 및 제동력을 보여준다. Fig. 1의 EMB 구조와 같이 모터축에서 80:1의 감속비와 편심축과 감속기 사이의 4.4:1의 감속비에 따라 캘리버에 전달되는 압부력은 59 kN이 발생하고 있으며, 이에 따라 캘리퍼와 차륜에 발생하는 제동력은 약 11.8 kN이 출력됨을 확인할 수 있다. 현재 동력분산식 고속열차인 HEMU-430X의 설계 기준값에 따르면, 캘리퍼 당 필요 압부력과 캘리퍼 당 부담제동력 기준값이 각각 56 kN와 11.25 kN으로 고속열차 제동장치의 설계 기준값과 시뮬레이션 모델링 결과값이 유사함을 확인할 수 있다.



(a) (b)

Fig. 9. (a) Clamping force of Caliper, (b) Braking force for Wheel.

Fig. 10는 제동력 인가에 따른 철도 차륜의 이동거리와 제동장치의 감속도를 나타낸다. 시뮬레이션 계산 시간으로 인하여 차륜의 무게를 10 kg로 설정하고 초기 이동속도를 84 m/s(302 km/h)로 하여 약 0.35 sec 이내에 제동 체결이 수행되었으며 최종 제동거리는 17 m가 출력되고 있다. 차륜의 무게를 증가시킬 경우 제동력은 일정하게 유지되지만 최종 제동거리는 증가되는 특성을 보인다.



(a) (b)

Fig. 10. EMB modeling for train (a) Braking distance, (b) Braking Deceleration.

3. 결론

본 논문은 철도차량 제동장치에 EMB 시스템을 적용하기 위하여 전자기장 해석툴인 JMAG으로 IPMSM 모터를 설계하고 설계된 모터의 최종 기계적 압부력 확인을 위해 Matlab/Simulink를 활용한 Co-simulation 결과를 보였다. 설계된 IPMSM의 결과값은 Matlab 모델과의 비교 및 HEMU-430X의 제동 압부력과 비교를 통한 타당성을 해석적으로 검증하였다. 향후 제작될 EMB 모델의 동작 실험을 통하여 실험결과와 해석결과의 정확도를 높이는 과정이 수행될 계획이다. 이를 통하여 실제 차량에 적용하기 전에 해석결과를 통한 EMB 제동장치의 성능예측이 가능하며, 고속철도차량의 EMB 개발의 초기 단계 수준에서의 설계 프레임 구축에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

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] J. S. Cheon, “Brake by wire system configuration and functions using front EWB(Electric Wedge Brake) and rear EMB(Electro-Mechanical Brake) actuators,” *SAE Technical Papers*, Oct. 2010.
DOI: https://doi.org/10.4271/2010-01-1708

[4] J. K. Ahn, K. H. Jung, D. H. Kim, H. B. Jin, H. S. Kim, and 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

[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.

[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] 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

[8] Y. O. Lee, M. Jang, W. Lee, C. W. Lee, C. C. Chung, and Y. S. Son, “Novel clamping force control for electric parking brake systems,” *ELSEVIER Mechatronics*, vol. 21, no. 7, pp. 1156-1162, Jun. 2011.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.07.006

[9] W. Hwang and K. Huh, “Fault detection and estimation for electromechanical brake systems using parity space approach,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 137, no. 1, pp. 014504 1-7, Jan. 2015.
DOI: http://doi.org/10.1115/1.4028184

[10] S. Kim and K. Huh, “Fault-tolerant braking control with integerated EMBs and regenerative in-wheel motors,” *International Journal of Automotive Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 923-936, Apr. 2016.
DOI: https://doi.org/10.1007/s12239-016-0090-1

[11] W. Hwang, K. Han, and K. Huh, “Fault detection and diagnosis of the electromechanical brake based on observer and parity space,” *International Journal of Automotive Technology*, vol. 13, no. 5, pp. 845-851, Aug. 2012.
DOI: https://doi.org/10.1007/s12239-012-0085-5

[12] K. Han, I.-J. Yang, and K. Huh, “Current and Force Sensor Fault Detection Algorithm for Clamping Force Control of Electro-Mechanical Brake,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 17, no. 11, pp. 1145-1153, Sep. 2011.
DOI: https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2011.17.11.1145

[13] Y.-H. Ki, H.-S. Ahn, and J. S. Cheon, “Fault-tolerant control of Emb systems,” *SAE Technical Papers*, vol. 5, no. 2, pp. 579-589, Sep. 2012.
DOI: https://doi.org/10.4271/2012-01-1795

[14] M. Sho, K. Park, M. Park, and M. Kim, “Development of a fail-safe control strategy for electro-mechanical brake system,” *SAE Technical Papers*, Mar. 2013.

[15] M. S. Kim, S. C. Oh and S. J. Kwon, “Characteristic Test of the Electro Mechanical Brake Actuator for Urban Railway Vehicles,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, vol. 33, no. 7, pp. 535-540, July 2016.
DOI: https://doi.org/10.7736/KSPE.2016.33.7.535

[16] Y. Honda, T. Nakamura, T. Higaki, Y. Tkeda, "Motor design Cosiderations and Test Result of an Interior Permanent Magnet Syncronus Motor for Electric Vechicles," *IEE Proc. of Elecric Power Application*, vol. 145, no. 2, pp119-124, 1998

[17] T. M. Rowan and R. J. Kerhman, “A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverter,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 4, pp. 678-690, July/August, 1986.
DOI: https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504778

백 승 구(Seung-Koo Baek) **[정회원]**

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

<관심분야>
고속열차 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 기계공학부 (기계공학 박사)
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>
고속열차 제동시스템 및 집전시스템, 열유체 공학

곽 민 호(Minho Kwak) **[정회원]**

- 2006년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (기계항공공학학사)
- 2013년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (기계항공공학박사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>
고속열차, 공기역학, 공력소음

김 석 원(Kim-Seog Won) **[정회원]**

- 1989년 8월 : 서울대학교 공과대학원 조선해양공학과 (석사)
- 2007년 2월 : 아주대학교 기계공학과 (박사)
- 1987년 2월 ~ 1994년 2월 : 대우조선해양 선임연구원
- 1994년 3월 ~ 1997년 2월 : 삼성중공업 선임연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>
철도차량 시험평가, 철도차량제동시스템