

# 전기기계식제동장치용 감속기일체형모터의 최적설계방법 및 성능평가

백승구\*, 신지환, 최성훈, 김석원  
한국철도기술연구원 차세대철도차량본부

## An Optimal Design Method and Evaluation of Geared Motor Driving Unit for Electro-Mechanical Brake

Seung-Koo Baek\*, Ji-Hwan Shin, Sung-Hoon Choi, Seog-Won Kim  
Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

**요약** 고속철도차량에 장착되는 전기기계식 제동장치(EMB : Electro-Mechanical Brake, 이하 EMB)는 약 50 ~ 60 kN 수준의 제동압부력을 필요로 한다. 모터가 사용되는 EMB 구동부는 고토크 출력을 위해 높은 감속비를 필요로 하며 대차 설치로 인한 공간적인 제약 때문에 소형화 설계 및 운행 중 차량하부로부터 발생하는 진동으로 인한 내구성을 가져야 한다. 따라서, 감속기일체형모터(GM : Geared Motor, 이하 GM)의 설계 및 제작기술은 철도차량용 EMB 구동부의 신뢰성 향상을 위해 필요한 기술이다. 본 논문은 GM을 위한 모터 최적설계기법 및 감속기 구조를 다루었다. 모터는 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)를 적용하였으며 최적설계기법으로 Plackett-Burmann(PB, 이하 PB)의 민감도 분석을 통한 반응표면분석법(RSM : Response Surface Methodology, 이하 RSM)을 적용하여 최적화설계를 수행하였다. 감속기는 유성기어와 베벨기어의 조합을 통한 동심형 축직각 감속기 형태를 통해 안전축(fail safety) 동작 기능을 갖도록 제안하였다. IPMSM의 최적화 설계를 통하여 초기 설계결과 대비 출력토크는 12% 상승하였으며, 모터축과 감속기의 동심축 연결을 통하여 부피는 25% 감소, 중량은 50% 감소하는 결과를 보였다. GM은 EMB에 설치하여 기본성능시험을 통한 가용성을 평가하였다.

**Abstract** An Electro-Mechanical Brake (EMB) mounted on the bogie of a high-speed train (HST) requires about 50 ~ 60 kN clamping force for braking. The EMB driving unit using a motor needs a high reduction gear for high torque output. In addition, the EMB driving unit must be compact owing to the space constraints and need to withstand the vibrations generated from under the vehicle while it is operating. Therefore, the design and manufacture of a geared motor (GM) for improving the reliability of the EMB driving unit for HST are necessary. This paper deals with the motor optimal design method and reduction gear structure of the GM. As part of the design, an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) is used, and the optimization design was performed by applying Response Surface Methodology (RSM) using the Plackett-Burmann (PB) sensitivity analysis. The reduction gear is proposed to have a safety function through the concentric shaft perpendicular reducer using the combination of planetary and bevel gears. Through the optimized design of IPMSM, the output torque increased by 12% compared to the initial design. Simultaneously, the volume and weight had decreased by 25% and 50%, respectively, through the integrated connection of the motor shaft to the reducer. Finally, the GM was installed in EMB, and its availability was evaluated through a basic performance test.

**Keywords** : Geared Motor, Brake-By-Wire, Electro-Mechanical-Brake, Interior-Permanent-Magnet-Synchronous-Motor, Response-Surface-Methodology, Plackett-Burmann, Optimal-Design.

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업(PK2102B1) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

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

email: skbaek@krri.re.kr

Received October 28, 2021

Accepted December 6, 2021

Revised November 23, 2021

Published December 31, 2021

## 1. 서론

최근 국외 철도차량 제동시스템 제작업체는 기존의 공기압식 제동장치에서 사용되는 공기압축기, 제동공기통 및 제동 배관의 복잡한 구조 및 관리 문제로 인하여 새로운 형식의 제동장치인 EMB의 개발을 추진중이다. 국내에서는 철도관련 연구기관을 중심으로 EMB의 개발을 수행하고 있으며, 현재 고속철도차량에 적용을 위한 주요 구성품인 캘리퍼, 구동부 및 제어장치의 초기 모델의 제작 및 성능평가가 수행되었다[1].

EMB 제동 캘리퍼의 동력을 발생시키는 구동부는 감속기와 모터의 연결구조로 구성된다. 대차에 설치되는 제동장치는 KS C IEC 61373 2종의 진동-충격 시험기준을 만족해야 한다. 캘리퍼와 대차의 연결구조는 진동시험 중 커다란 공진을 유발하고 증가된 진동은 상대적으로 취약한 모터와 감속기의 연결부위에 영향을 주어 구동부에 손상을 일으킬 수 있다. 자동차 분야의 경우 구동 모터의 출력단에 감속기가 직결된 형태의 일체형 GM가 적용되는 사례가 증가하고 있으며 이는 구동부의 단순한 구조로 인해 신뢰성이 향상될 수 있는 방안이다. 따라서, EMB 구동부는 모터의 최적화와 모터와 감속기를 모듈 형태의 일체형으로 설계·제작하는 기술을 통한 소형화·경량화 연구가 필요하다.

구동부 모터의 설계를 위해 많이 사용되는 최적화 설계의 목표는 출력토크 향상, 회전속도 향상 및 토크리플을 저감하는 방향으로 수행되었다. 최근에는 통계학 기반의 근사화 기법인 RSM[2]을 통한 실험계획을 활용한 방법, 유전 알고리즘(GA : Genetic Algorithm)을 통한 토크 및 속도향상 기법[3] 그리고 Simplex 알고리즘을 혼합한 코깅(cogging) 토크와 토크 리플저감[4] 등의 기법에 관한 연구가 있었다. 이러한 방법은 현재 모터 해석들의 발전으로 인하여 설계자가 모터의 출력특성에 영향을 많이 주는 인자를 경험적인 방법에 의하여 선정하고 각 인자에 대한 최소·최대값의 범위를 선정하면, 해석들의 내부함수로 정의된 계산순서에 따라 결과값을 출력하게 된다. 그러나, 해석들의 계산량이 많아지는 것과 설계된 모터출력에 실질적으로 영향을 주는 인자가 누락되는 경우를 가져올 수 있다.

본 논문에서는 통계학 기반의 근사화 기법 중 RSM을 통한 실험계획을 활용하여 IPMSM을 설계하였다. PB[5]를 통한 민감도 분석을 적용하여 모터출력에 영향을 많이 주는 인자를 빠르게 선별하였으며 실험계획법 중 중심합성계획법(CCD : Central Composite Design, 이

하 CCD)[6]을 활용하여 최적설계 결과를 도출하였다. GM 설계를 위해 모터소프트와 유성기어 및 베벨기어의 연결은 동심형의 축직각 구조가 적용되어 소음과 부하를 줄여 내구성을 향상시키는 설계를 진행하였다. 제작된 시제품은 EMB용 캘리퍼에 설치하여 목표 제동압부력에 대한 출력이 정상적으로 추종되는지 실험결과를 통하여 확인하였다.

## 2. 본론

### 2.1 IPMSM 최적화 설계방법

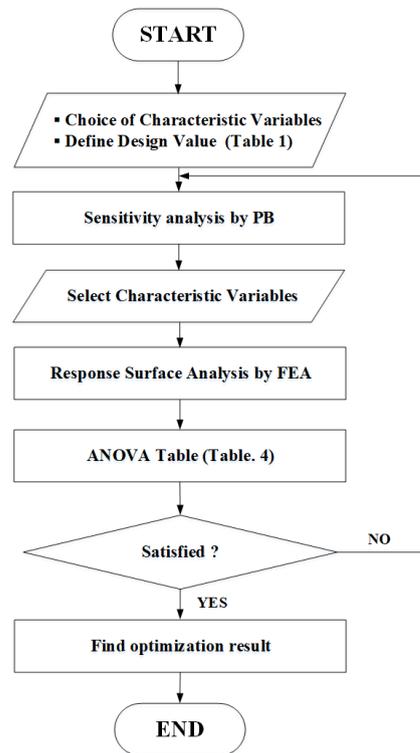


Fig. 1. RSM using PB Optimization procedure

Fig. 1은 IPMSM의 최적 설계를 위한 과정을 나타낸다. Fig. 1의 과정에 따라 설계하고자 하는 IPMSM의 출력토크 및 리플에 영향을 주는 인자(Characteristic variable)를 선정하고 각 변수에 대한 특성치(Design value)를 정의한다. 정의된 인자는 PB 민감도 분석을 통하여 모터의 출력토크 및 토크리플률(ripple rate)에 민감한 인자의 순으로 다시 분류한다. 분류된 인자에 대한

여 CCD를 활용한 RSM 알고리즘을 통하여 출력토크 및 토크리플률을 해석한다.

본 논문에서 IPMSM의 실험 결과값을 얻기위해 유한 요소해석(FEA : Finite Elements Analysis) 툴인 JMAG(Ver. 20.0)이 사용되었다. 계산된 회귀모형함수의 결과는 ANOVA 분산분석법에 의하여 계산된 값이 유의한 결과인지를 검토하였다.

Table 1은 선택된 특성인자, 특성치 및 특성치를 기준으로 최대값과 최소값을 나타낸다. 각 특성치 범위는 IPMSM의 크기에 따른 물리적 한계를 벗어나지 않도록 하였다.

선정된 7개의 설계변수는 PB에 의한 민감도 분석에 따라 설계변수의 변화에 의한 목적함수의 변화율을 확인하여 각 설계변수의 기여도를 확인하였다. 실험횟수는 4의 배수로 설정되며, 7개 설계변수의 선정에 따라 총 실험 횟수는 12회가 수행되었다.

Table 1. Characteristic variables and values

No.	Characteristic Variables	Design Value	Min.	Max.
x1	Position of Magnet(mm)	7.5	7.2	7.8
x2	Angle of Magnet(deg)	120	119	121
x3	Thickness of Magnet(mm)	2.0	1.8	2.2
x4	Width of Magnet(mm)	9.0	8.5	9.5
x5	Slot Depth(mm)	14	13	15
x6	Slot Openning(mm)	2.0	1.7	2.3
x7	Slot Width(mm)	3.5	3.0	4.0

PB 방법의 실험회수에 따른 토크와 리플률의 실험 결과값을 나타내며, 결과값에 따른 반응함수의 다항식은 Eq. (1)과 같다.

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

Where,  $x$  denotes characteristic variable according experimental condition,  $\alpha$  denotes coefficient of design value,  $y$  denotes design value after experimental result,  $\varepsilon$  denotes error value and  $k$  denotes number of characteristic variable.

Table 2는 실험회수에 따른 토크출력과 리플률의 결과값을 나타내며, 실험 결과값에 따른 반응함수의 다항식 결과는 Eq. (2-3)과 같다.

$$Y = 3.1619 + 0.1361x_1 - 0.0602x_2 + 0.1130x_3 + 0.3280x_4 - 0.5066x_5 + 0.0324x_6 + 0.1623x_7 \quad (2)$$

$$Y = 0.0649 + 0.0097x_1 - 0.0009x_2 - 0.0075x_3 + 0.0044x_4 + 0.0044x_5 + 0.0035x_6 - 0.0059x_7 \quad (3)$$

Table 2. FEM Simulation result according to PB table

No.	Torque	Ripplerate
1	2.851779	0.1005673
2	2.358394	0.0462603
3	4.491461	0.0638636
4	2.823907	0.0622891
5	2.314847	0.0618324
6	4.011461	0.0571277
7	2.536086	0.0665705
8	3.137968	0.0807219
9	3.723797	0.0577206
10	3.714369	0.0364171
11	3.04674	0.0784475
12	2.932056	0.0670791

PB에 따른 민감도 우선순위를 판단하기 위해 Eq. (2-3)의 다항식 계수를 Fig. 2와 같이 그래프로 나타낼 수 있다. Table 1과 같이 선택된 7가지 인자 중 x3 및 x7의 인자는 토크는 증가하고 리플은 감소하는 경향을 보이므로 인자값을 최대값으로 선정하고 x5는 토크는 감소하고 리플은 증가하는 경향이 있으므로 최소값으로 선정한다. x1, x4 및 x6의 경우는 토크 증가에 따라 리플도 함께 증가하거나, x2와 같이 토크가 감소하고 리플이 증가하는 인자의 경우, 최적 조합을 고려해야 하므로 x1, x2, x4, x6의 4개의 인자를 RSM을 위한 설계변수로 선택한다.

최종 선택된 4개의 인자에 대하여 민감도가 큰 순서로 설계변수를 선정한 후 RSM을 통한 최적화를 수행한다. IPMSM 설계시 토크와 연관된 설계변수가 여러 개 존재하는 것이 일반적이므로 1차 모델식으로는 표현되기 어려우며, Eq. (4)와 같이 2차의 회귀모형을 사용한다.

$$\eta = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i x_i + \sum_{i < j}^k \alpha_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

Eq. (4)의 회귀모형을 구하기 위하여 실험 계획법으로

CCD를 적용하였으며 정의된 실험계획표에 따라 각각의 경우에 대하여 FEM 해석틀을 활용하여 해석을 수행한다.

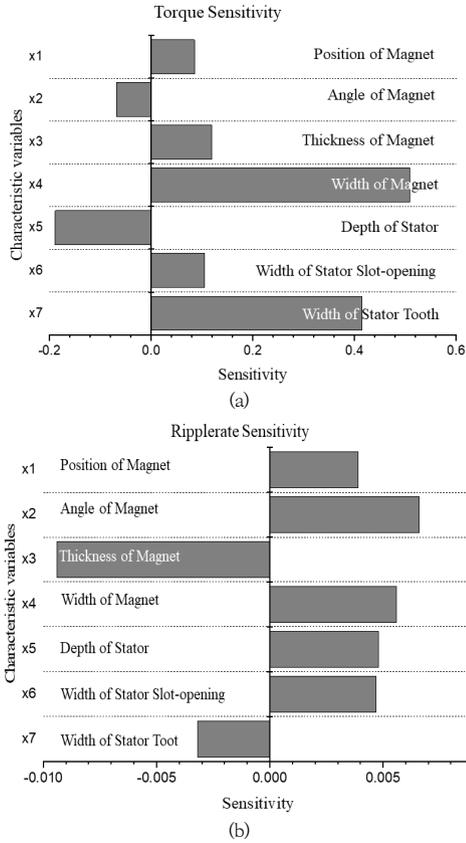


Fig. 2. Sensitivity analysis results  
(a) torque output (b) ripplerate

Table 3은 25건의 실험계획표에 따른 토크 출력과 리플률을 나타낸다. 최대 출력토크는 최적화 전 3.95 Nm에서 4.50 Nm(case 13)로 12 % 이상 토크가 증가하였으며, 이때의 리플률은 6% 수준으로 증가되었다. case 23의 경우 출력토크가 10 % 증가하였지만 리플은 증가하지 않은 결과를 보여주었다.

Fig. 3은 Table 3을 리플률 대 출력토크를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보듯이 토크 기준값을 4 Nm 이상으로 하고 리플률 기준값을 0.06 Nm 이상으로 선정할 경우 선택가능한 영역을 파란색원으로 표시하였다. 본 논문에서는 EMB용 IPMSM 적용을 위해 case 13, case 23 및 case 8 중 하나를 최종 설계변수로 선택하는 것이 가능하다.

Table 3. FEM result according to CCD

No.	Torque	Ripplerate	Remark
1	3.436316	0.043338	
2	3.468958	0.042571	
3	4.155315	0.052487	
4	4.184637	0.054621	
5	3.372034	0.038959	
6	3.403949	0.036425	
7	4.081998	0.050221	
8	4.111043	0.048885	Selected
9	4.428834	0.061544	
10	4.39911	0.066784	
11	3.737666	0.058134	
12	3.70385	0.058035	
13	4.503915	0.060102	Selected
14	4.473423	0.070214	
15	3.812303	0.062095	
16	3.777863	0.061614	
17	3.952053	0.05645	Before Opt.
18	3.720983	0.044697	
19	4.187079	0.064176	
20	4.005806	0.062034	
21	3.904799	0.047184	
22	3.423482	0.046642	
23	4.422628	0.057028	Selected
24	3.924734	0.059293	
25	3.96848	0.051247	

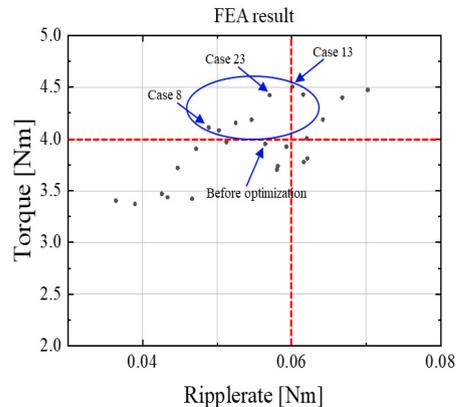


Fig. 3. FEM Simulation result for torque and ripplerate

Table 4 는 회귀모형함수의 검증을 위한 분산분석표이다. Table 4에서 보듯이  $F_0 > F(0.01)$ 이므로 추정된 회귀모형함수가 신뢰성을 갖는다. Eq. (4)에 의한 2차 회귀모형함수의 결과식은 Eq. (5)와 같이 표현할 수 있다.

Find

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \quad (5)$$

to minimize

$$Y = -3.95 - 0.1641x_1 + 0.0359x_2 - 0.03519x_3 - 0.0157x_4 - 0.0023x_1^2 - 0.0029x_2^2 + 0.0132x_3^2 + 0.0014x_4^2 + 0.0014x_1x_2 + 0.0011x_2x_3 + 0.0009x_3x_4 + 0.0049x_1x_3 + 0.0001x_2x_4 - 0.0003x_1x_4$$

Table 4. ANOVA table

Fator	Regression variation	Residual variationF	Sum
S	3.048032	0.000037	3.048069
F	k	n-k-1	n-1
V	0.762008	0.000002	
FO	409929.567299		
F(σ)	4.43		

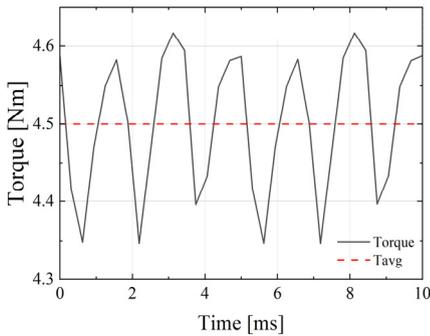


Fig. 4. Torque output of optimized design for IPMSM

Fig. 4는 case 13의 토크 출력특성 파형을 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이 평균 토크는 4.5 Nm 수준으로 최초 설계조건과 비교할 경우 약 12 % 증가한데 반하여 리플률은 약 6 % 증가하는 결과를 얻었다. 만이 case 23 을 선택할 경우 리플률의 증가 없이 출력토크가 10 % 증가되는 결과를 얻을 수 있다.

## 2.2 IPMSM 최적화 설계방법

Fig. 5는 상기 설계된 모터 코어부를 바탕으로 GM를 설계한 결과이다. Fig. 5 (a) 부분은 모터의 로터(rotor)와 스테이터(stator) 위치이며, (b)는 1단 유성기어부, (c)는 베벨기어부 및 (d)는 2단 유성기어부를 나타낸다.

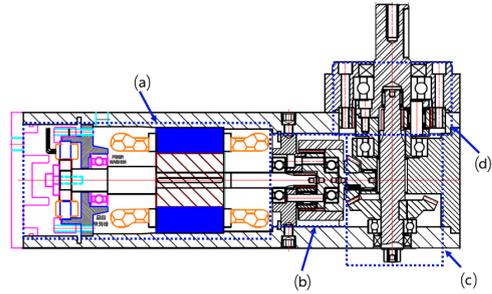


Fig. 5. Design of Geared Motor

모터와 감속기의 일체형 구조는 철도차량의 대차에 설치되는 제동장치의 특성상 운행중 하부로부터 전달되는 진동에 강건하여 신뢰성이 향상될 수 있다. 모터 샤프트와 직결로 연결된 유성기어와의 동심형축직각 구조는 베벨기어단에서 발생할 수 있는 소음과 부하부담을 줄여 내구성을 증가 시킬 수 있다. 베벨기어의 축은 감속부 아래쪽으로 돌출되어 모터의 고장으로 인해 동작이 불가능한 상태에서 수동으로 제동완해가 수행될 수 있도록 수동풀림기능을 위한 설계를 적용하였다. (a), (b) 및 (c)의 감속기어 연결구조에 의한 구동부의 정격 출력토크 기준은 90 Nm 이며, 3상 IPMSM의 위치제어를 위해 레졸버 센서가 적용되었다.

Fig. 6은 Fig. 5의 설계를 토대로 제작된 GM의 형상(아래)을 나타낸다. 기존에 개발된 모터(위)와 감속기 결합 제품과 비교하여 부피는 약 25% 감소하였으며, 중량은 약 50% 감소하여 제작되었다. 특히, 기존 개발품의 모터와 감속기 결합부 인터페이스의 부분을 설계 개선함으로써 구동부 동작중 발생하는 오염물 침입이나 외부 이물질 끼임 현상 등을 차단할 수 있도록 개선되었다.

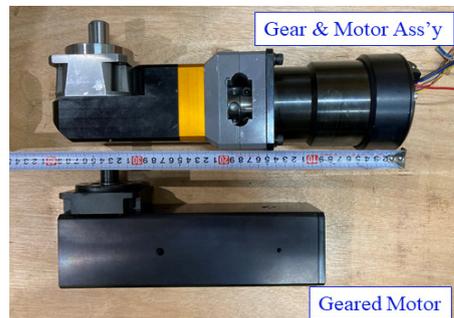


Fig. 6. Appearance of Reduction gear and IPMSM

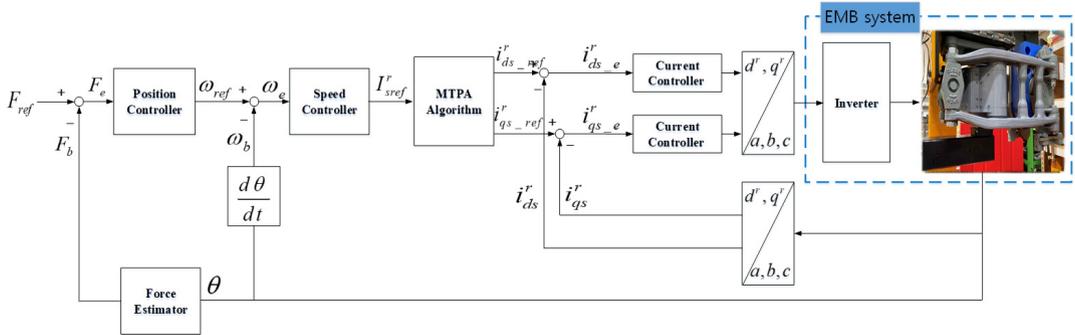


Fig. 8. IPMSM control concept of EMB system

### 2.3 Geared Motor의 성능평가

Fig. 7은 2.2절에서 설계 및 제작된 GM의 시제품을 EMB 캘리퍼에 장착하여 정적 압부력시험을 수행하기 위한 설치구성을 나타낸다. EMB용으로 사용된 캘리퍼는 기존 고속철도차량인 EMU-250에 적용된 공압식 캘리퍼에서 공압식 구동부를 제거하고 모터와 감속기의 동력을 전달할 수 있는 형태로 개조가 수행되었다. 제동패드의 중앙부는 철도차량의 휠디스크 두께와 동일한 지그를 구성하고 내부에 힘센서(load cell)를 설치하여 압부력을 측정할 수 있는 구조이다.

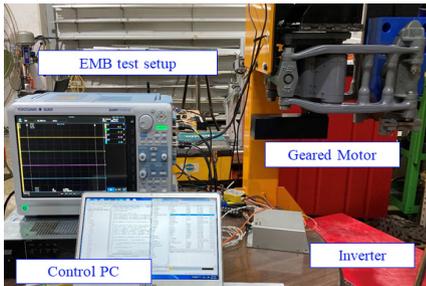


Fig. 7. EMB Installation for geared motor testing

Fig. 8은 IPMSM을 구동하기 위한 제어개념도를 나타낸다. EMB는 모터의 구속(Stall) 상태에서 발생하는 토크를 이용하여 감속기를 통해 제동패드에 압부력을 전달한다. 요구된 압부력을 유지하기 위해서는 캘리퍼가 정해진 위치에 도달한 상태를 계속 유지하여야 하며 유지하지 못할 경우 제동압부력이 증가-감소를 반복하는 현상이 발생하여 실제 철도차량에 설치시 정상적인 제동을 체결하지 못하고 불안정해지는 결과를 가져오게 된다. 따라서, 모터의 속도제어 및 전류제어 이외에 상위 제어 기인 위치제어기가 포함되어야 한다. 레졸버센서는 로터

의 각변위(angular displacement)  $\theta$ 값을 위치제어값으로 피드백하고  $\theta$ 값을 통하여 모터의 속도제어 지령값을 생성하며 지령속도에 따라 전류제어 지령값을 계산한다. 전류제어는 전류 지령값에 대한 효율적인 제어를 위해 단위전류당 최대토크방법(MTPA : Maximum Torque Per Ampere, 이하 MTPA)을 적용한다.

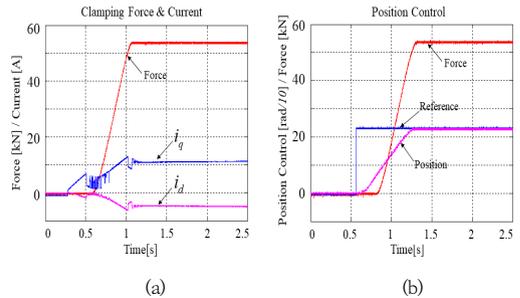


Fig. 9. Experimental result of clamping force  
(a) d-q axis current control (b) position control

Fig. 9는 EMB의 최대 압부력(54kN) 출력상태에서 IPMSM의 전류제어파형 및 위치제어파형을 나타낸다. Fig. 9(a)에서 보듯이 d-q축 전류제어는 MTPA 제어방법이 적용되었다. 이때 q축 전류는 약 11A, d축전류는 약 -5A로 제어되고 있으며 전체 제어전류값은 약 12A가 인가되었음을 알 수 있다.

Fig. 9(b)는 (a)의 전류제어 상태에서 위치제어 파형을 나타낸다. 최대 압부력 출력상태에서 IPMSM이 지령 위치값을 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 최대압부력 도달시간과 모터의 회전수와의 동작관계를 나타낸다. 그림에서 보듯이 0 kN에서 최대 압부력(54kN) 도달까지 소요되는 시간은 0.47초이며, 이때 모터는 약 36 회전을 수행하였다. 초기 모터회전시 압부력이 발생하지 않는 이유는 캘리퍼의 디스크패드와 제동디스크 사이 거리가 존재하기 때문이다.

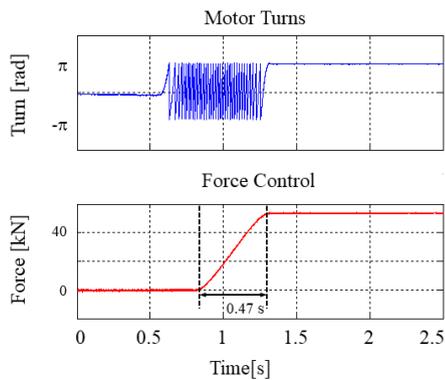


Fig. 10. The relationship between the time to reach maximum clamping force and the rotation of the IPMSM

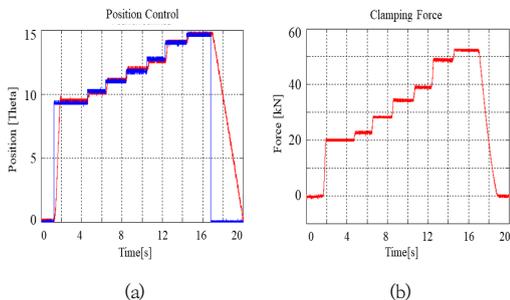


Fig. 11. EMB control pattern under static condition  
(a) position control for each step input  
(b) clamping force for each step input

Fig. 11은 제동 단계별(1단 - 7단) 압부력 변화를 나타낸다. 임의의 시간 간격을 두고 압부력 지령을 순차적으로 인가하여, 이에 따른 위치제어가 수행되고 있는 패턴을 나타낸다. Fig. 11 (a)은 각 위치 지령값에 따라 IPMSM이 위치를 추종하고 있는 결과를 보여주고 있으며, Fig. 11 (b)는 각 위치 추종값에 대하여 제동패드에서 발생하는 제동압부력이 변화하는 값을 나타내고 있으며, 각 제동 단계별 압부력 값이 변화하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 GM를 설계 및 제작하고 EMB용 캘리퍼에 설치하여 기본성능평가를 수행하였다. IPMSM 최적설계를 위하여 PB 민감도 분석 결과를 바탕으로 한 RSM 분석이 수행되었다. 최적설계결과 출력토크는 초기 설계 결과와 비교하여 12% 상승하는 결과를 가져왔다.

감속기 구조는 유성감속기와 베벨기어의 조합을 통하여 동심형 축직각 형태로 설계되어 출력축 부하에 대한 부담을 줄여 내구성이 향상될 것으로 판단된다. IPMSM과 감속기가 동심축으로 결합된 GM는 EMB 시스템의 기존 구동부와 비교하여 부피는 약 25%, 중량은 약 50% 감소하는 결과를 보였으며, 차량하부의 진동에 대하여 신뢰성 향상을 가져올 것이다. GM를 EMB 시스템에 설치하여 기본 성능을 위한 최대압부력과 제동단계별 압부력성능을 확인하였으며 지령값에 대하여 추종성능을 보여 사용성을 확인하였다.

향후 GM의 기계적 구조해석 및 내구성 시험을 통하여 EMB 구동부의 신뢰성 검증과 관련한 연구가 진행될 예정이다.

### 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] R. H. Myers, D. C. Montgomery. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [3] L. Jolly, M. A. Jabbar, and L. Qinghua, "Design optimization of permanent magnet motors using response surface methodology and genetic algorithms," *IEEE Transaction. Magnetics*, Vol. 41, No. 10, pp.3928-3930, 2005.
- [4] W. G. Yim, K. O. An, J. H. Seo and H. K. Jung, "A Study on Notch Shape Optimization for Interior Permanent Magnet Motor based on the Response Surface Method and Simplex Method," *KIEE conference*, pp.90-92, 2010.
- [5] R. L. Plackett, J. P. Burman, "The Design of Optimum Multifactorial Experiments," *Biometrika*, Vol. 33, No. 4, pp.305-325, 1946.  
DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/33.4.305>
- [6] S. H. Park, "Design of Experiments," *Minyoung Publishing Co.*, 2009.

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

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

신 지 환(Ji Hwan Shin)

[정회원]



- 2016년 2월 : 동국대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 : 동국대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2020년 4월 ~ 2020년 7월 : 고영테크놀러지 연구소
- 2020년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임 연구원

<관심분야>

구조물 진동제어, 철도차량 동역학

최 성 훈(Sunghoon CHOI)

[정회원]



- 1990년 2월 : KAIST 기계공학과 (기계공학 학사)
- 1992년 6월 : Northwestern University (응용역학 석사)
- 1995년 6월 : Northwestern University (응용역학 박사)
- 1995년 3월 ~ 2000년 6월 : 삼성종합기술원 CSE 센터
- 2000년 9월 ~ 2002년 10월 : KAIST 기계공학과
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

소음/진동, 철도차량 시스템엔지니어링