

# 고속전철의 와전류 제동장치 동적 최적화 연구

박찬경\*

## An Optimization of Dynamic Elements for Eddy Current Braking System of High Speed Train

Chankyong Park

**Key Words:** Railway Dynamics(철도차량 동역학), Experimental Design(실험계획), Response Surface Model(반응표면모델), Eddy Current Braking System(와전류제동장치)

### Abstract

Dynamic behavior of high speed train is very important because the high speed train should be safe and satisfied with the ride comfort. An eddy current brake system is mounted on trailer bogie and wheelset. The eddy current braking force longitudinally exerts on the articulated trailer bogie and the attraction force vertically exerts on the wheelset. Because a frame of eddy current brake system is flexible, these forces generate the vertical vibration at middle point of the frame. Also, the vibration change the vertical clearance between an electromagnet and top of rail which affect the magnitude of braking and attracting forces. Therefore, the dynamic behavior of the eddy current braking system must be predicted for design the dynamic characteristic of its mounting system when normally operate on rail which have irregularity. Vampire program is used for prediction of the dynamic behavior of an eddy current braking system. Five design variables and five performance index are considered for optimization through D-optimal experimental design in this paper. Also model center is used to search the optimal point for sum of performance index with variational matrix method.

기호설명

$R^2$ : 결정계수

$R^2_{adj}$ : 수정 결정계수

### 1. 서 론

고속철도차량은 고속주행에 필요한 제동력 확보를 위하여 전자석을 이용하고 있으며, 이는 레일과의 전자력에 의하여 제동력을 부가적으로 확보토록 설계되어 진다.<sup>(1)</sup> 이러한 제동 시스템을

와전류 제동장치(ECB, Eddy Current Braking System)라 하고, 해외의 경우 독일의 ICE 3에 장착되어 사용되고 있으며 일반적으로 작동시 휠셀의 엑슬박스에 지지되어 발생하는 제동력을 대차에 전달토록 한다. 따라서 이러한 와전류 제동장치는 제동력뿐 만 아니라 필수적으로 레일과 상하방향의 흡인력을 동반하게 되며 와전류 제동장치 동적거동은 철도차량의 휠 운동과 더불어 이러한 흡인력에 의하여 영향을 받게된다. 따라서 레일과의 간격이 제동력의 크기와 밀접하게 연관이 되어 있는 와전류 제동장치는 설계시에 동적거동을 필수적으로 고려하여야 하며 본 연구

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원 ckpark@krrri.re.kr

는 고속철도차량에 대하여 지난 3년간 많이 수행된 결과 (2),(3),(4)를 이용하여 완성된 차량 모델링에 와전류 제동장치 모델을 추가하여 동적거동에 대한 와전류 제동장치의 동적요소에 대한 최적설계값을 분석하고자 한다. 이러한 와전류 제동장치의 동적거동 분석은 와전류 제동장치가 핵심 기술을 갖고있기 때문에 분석자료등을 공개하지 않아 동적거동에 대한 설계자료가 거의 없으며 국내에서는 처음 적용되기 것으로서 본 연구에서는 VAMPIRE<sup>(5)</sup>를 이용한 이론해석을 통하여 위하여 그 동적요소를 설계하도록 한다. 사용되어질 모델은 선도기술개발사업으로 개발중인 한국형 고속전철차량의 시제차량 시스템을 대상으로 하였다.

## 2. 와전류 제동장치의 동적 모델링

차량 모델링은 Fig. 1 에서와 같은 Vampire를 이용한 해석용 개발 시제차량 편성 모델을 사용하였다. 동력차는 모델링에 포함되지 않았으며 좌표계는 모델링을 위한 좌표계로서 해석 결과에서도 동일한 좌표계를 사용토록 한다. 따라서 전체 모델링에 사용한 차량 편성은 M(동력객차, TT1)+3T(객차, TT2, TT3, TT4)+M(동력객차, TT5)으로서 총 5량 편성이며 관절대차(ATB)에는 와전류 제동장치가 장착되어 있으며 장착 개념도는 Fig. 2 및 Fig. 3 과 같다.

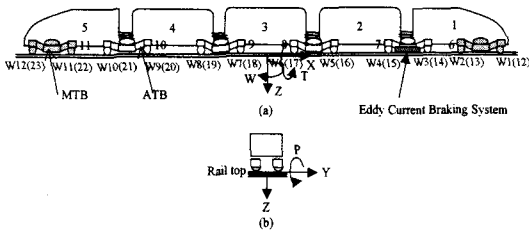


Fig. 1 Vehicle Model and Axis System

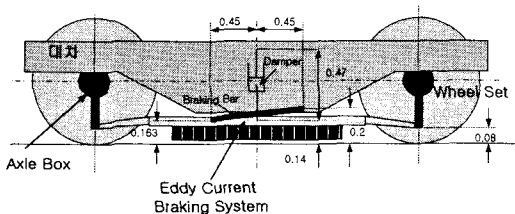


Fig. 2 Schematic Diagram of ECB

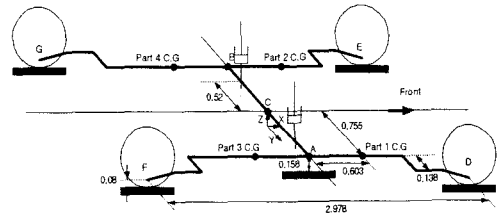


Fig. 3 Schematic Diagram of Dynamic Modeling of ECB

와전류 제동장치는 길이방향으로 굽힘에 의한 처짐이 발생하며 이를 고려하기 위하여 Fig. 3의 A 및 B점에서 와전류 제동장치의 상하방향 처짐과 C지점에서 롤 및 피칭에 대한 유연성을 고려하였고, 이를 동력학적으로 모델링 하기 위하여 와전류 제동장치 구조물을 4개 부분의 강체로 구성하고 A,B,C지점에서는 초기 구조해석 결과에서 제시된 동적 특성치를 고려하여 부쉬특성으로 모델링을 하였다. 모델링에 사용한 와전류 제동장치의 휠셀과 대차에 장착하는 동적요소 특성치는 Table 1. 및 2.와 같이 사용하였으며 Vampire로 모델링한 결과는 Fig. 4와 같다.

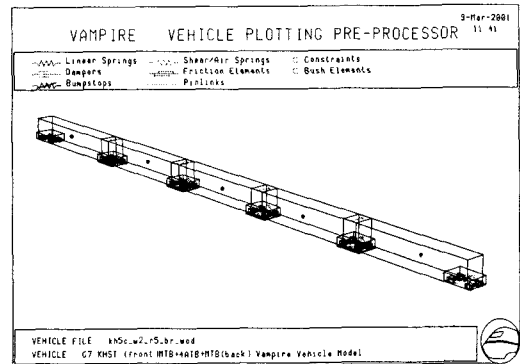


Fig. 4 Vampire Train Model

Table 1 Mass Properties of ECB

Mass (Mg)	Moment of Inertia (Mg · m <sup>2</sup> )			Center of Gravity*		
	Ixx	Iyy	Izz	x	y	z
0.25	0.004	0.0246	0.0294	0.603	0.755	0.158

\*. x, y : Distance from the Bogie's Center,

z : Distance from the Rail Top

Table 2. Initial Dynamic Characteristics of ECB

Contents		Stiffness / Damping (MN/m, MNm/rad / MNs/m)
Connecting Element to Bogie	Braking Bar (Stiffness, X)	20.0
	Damper (Damper, Z)	0.1
Flexibility of ECB	Stiffness of A,B points (Bush)	X:100.0, Y:100.0, Z:100.0, T:100.0 P:1.6425, W:100.0
	Stiffness of C point (Bush)	X:100.0, Y:100.0 Z:100.0, T:15.2 P:0.42, W:100.0
Connecting Element to Axle Box	Vertical (Bumpstop(Z))	-10.0/-5.0/0.0/360.0(mm) -200.0/-100.0/0.0/0.0(kN)
	Lateral/ Longitudinal (Bush)	X:0.001, Y:100.0 Z:100.0

제동력 모델링은 제동장치 개발에서 제공되는 비상 제동력 선도를 이용하여 제동거리와 시간에 대한 차량속도와 외력으로 정의되는 진행방향의 제동력 및 상하방향의 흡인력으로서 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 모델링 하였다. 거리에 대한 속도 선도는 전체 제동력에 의한 선도로서 제동시 전체 제동장치가 혼합되어 작동된 경우를 표현하였으며 제동력 및 흡인력은 각 와전류 제동장치 질량중심에 작용하는 것으로 모델링 하였으며 흡인력의 경우 실제 와전류 제동장치의 좌, 우측 중심에서 작용하기 때문에 질량중심 위치로의 일반 힘으로 변경시켜야 하며, 이때 pitching에 대한 모멘트가 필요하다. 따라서 흡인력을 질량중심위치로 변경하기에 필요한 pitching 모멘트를 구하였으며 함께 도시하였다.

또한 시뮬레이션에 사용할 궤도 불규칙 모델은 현재 건설중인 경부고속철도의 시운전 구간에서 궤도 검측차에 의해서 측정된 불규칙 데이터를 이용하였으며 Fig 7과 같다.

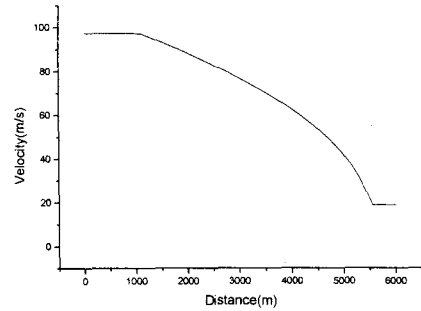


Fig. 5 Distance vs. Speed for Braking

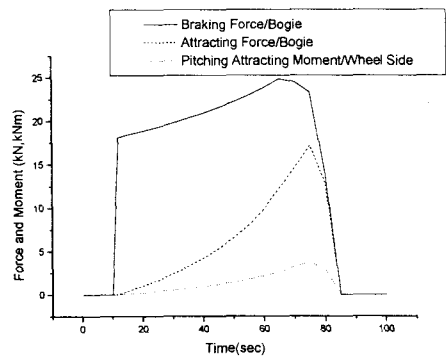


Fig. 6 Time vs. Braking and Attracting Force

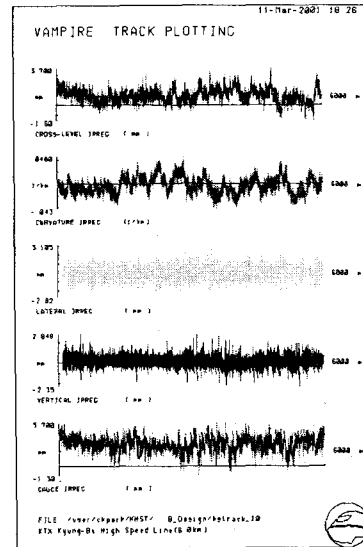


Fig. 7 Track Irregularity

### 3. 반응표면모델

2장의 모델링에 알 수 있듯이 와전류 제동장치의 동적요소는 와전류 제동장치 프레임의 유연성 강성, 대차와 연결요소인 제동력 전달바, 수직댐퍼, 휠셀과의 연결요소인 지지 마운팅 강성이 있으며 본 연구에서는 동적 요소 설계변수로서 수직 댐퍼와 휠셀 지지 마운팅 강성을 Table 3 과 같이 설정하였다. 수직댐퍼는 비선형성을 고려하여 4부분으로 분리하여 설계변수로 설정하였다.

Table 3 Design Variables

Design Variables	level		Initial Values	Description	
	Max.	Min.			
X1	0.1	100	50	Support Mounting	Kz
X2	1.0	9.0	5.0	Vertical Damper	First
X3	1.0	9.0	5.0		Second
X4	1.0	9.0	5.0		Third
X5	1.0	9.0	5.0		Fourth

성능지수는 와전류 제동장치의 동적거동이 대차 및 휠셀에 영향을 최소화 해야 하기 때문에 대차에 작용하는 댐핑 작용력과 와전류 제동장치의 좌우 중간부위인 A지점 및 D 지점에서의 변위로 Table 4 와 같이 설정하였다.

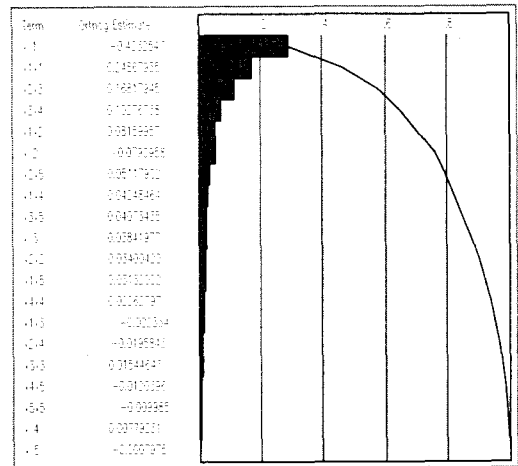
Table 4 Performance Index

Performance Index	Symbol
Max. force of Damper	dmf
S.D. of damper force	dsf
Max. Displacement at A point.	dma
r.m.s. Value of Displacement at A point.	dra
r.m.s. Value of Displacement at D point.. (Relative displacement between Wheelset and ECB)	d1

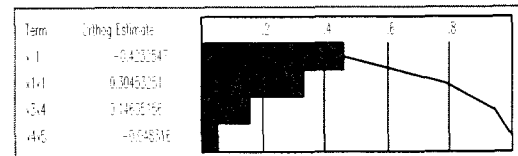
실험계획은 5개의 설계변수를 D-optimal에 의한 실험계획표를 작성하여 총 36회를 5수준(-1, -0.5,

0, 0.5, 1)범위에서 수행하였다.<sup>(8)</sup>

설계변수의 성능지수에 대한 민감도 분석을 위하여 수행된 결과를 설계변수에 대한 성능지수 표로 작성하고 회귀분석을 실시하였으며 그중 d1에 대한 설계변수의 민감도를 살펴보면 Fig. 8와 같다. 여기서 (a)는 전체설계변수에 대한 효과를 나타내고 있으며 여기에는 영향이 없는 인자와 r1을 설명하는데 있어서 지해한 요소들이 존재할 수 있다 따라서 이를 주요인자로 선별하면 (b)와 같이 도출 할 수 있다.<sup>(9)</sup>



(a) Effect of Total Design Variables before Screening for d1



(b) Main Effects of Design Variables after Screening for d1

Fig. 8 Sensitivity of Design Variables for d1

Fig. 8에서 보듯이 처음 2차항까지 고려한 20개의 설계변수 중에서 Screening후에는 4개의 설계변수로 줄일 수 있었으며 이때 계산된  $R^2$ 와  $R^2_{adj}$  값은 각각 0.92와 0.91로 계산되어 졌으며<sup>(10)</sup> 신뢰성이 보장될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 d1의 경우와 동일하게 각 성능지수에 대한 설계변수들의 민감도 분석을 통하여 상호작용 요소를 제외한 각 설계변수의 2차항까지 고려한 반응표면 모델을 생성 할 수 있었으며 이를 이용하여 최적설계를 수행하였다.

#### 4. 최적설계

3장에서 완성된 반응표면 모델을 이용하여 (-1,1)의 구간으로 정규화 시킨 성능지수의 합이 최소가 되도록 최적화를 수행하였으며 최적화 수행중의 목적함수 변화 추이를 살펴보면 Fig. 9와 같다.

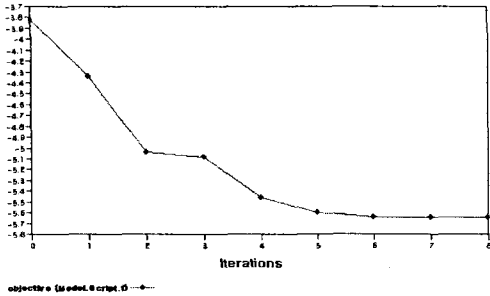


Fig. 9 Variation of Object Function

본 연구에서 사용된 최적화 방법은 Variable Matric Method를 이용하여 수행하였다.<sup>(11)</sup>

Fig. 9에서 보듯이 최적화를 위한 반복수행은 총 8회를 수행하였으며 초기의 목적값(Object Value)이 급격히 줄어 최적 지점에 도달하는 것을 볼 수 있다. 또한 성능지수의 합을 정규화된 값을 기준으로 초기 -3.82에서 최적화 후 -5.64로 최소화 시키고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 5개의 성능지수 합으로서 나타내고 있으며 이를 각각의 성능지수에 대한 향상정도로 살펴보면 Fig. 10과 같다.

Fig. 10은 각 성능지수(Performance Index)들이 초기값보다 작은 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

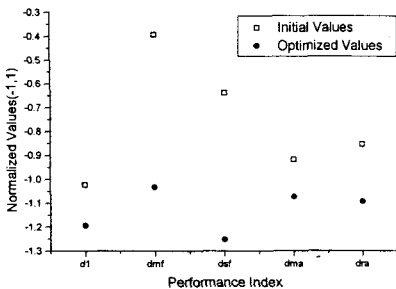


Fig. 10 Results of Performance Index Values of RSM after Optimizing

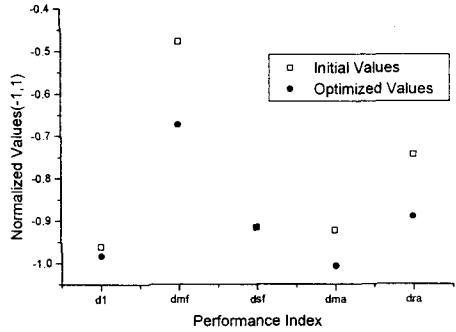


Fig. 11 Results of Performance Index Values of Real Model(simulation) after Optimizing

이를 실제 시뮬레이션 결과와 비교하면 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서는 반응표면 모델에 의한 최적화 정도보다는 최적화 폭이 다소 작으나 이는 전반적인  $R^2$ 와  $R^2_{adj}$ 값이 0.9~0.8수준에 있기 때문이고 초기 성능지수값이 정규화된 값으로 -0.9수준에 있어 그 정도가 미약한 것으로 판단된다. 이는 초기치 선정에 있어서 시뮬레이션에 의하여 초기값을 미리 최소수준 부근으로 설정하였기 때문이며 사전 정보가 없는 설계에서는 최적화 정도 폭이 클것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 수행된 2차항까지 고려된 반응표면모델에 의한 최적화는 전체적으로 실제 대상인 전산 시뮬레이션에 의한 성능지수의 합으로 볼 때 -4.02에서 -4.471로 최소화됨을 나타내고 있다.

따라서 최종 최적화된 설계변수의 결과는 Table 5와 같으며, 댐퍼의 비선형특성은 Fig. 12와 같다.

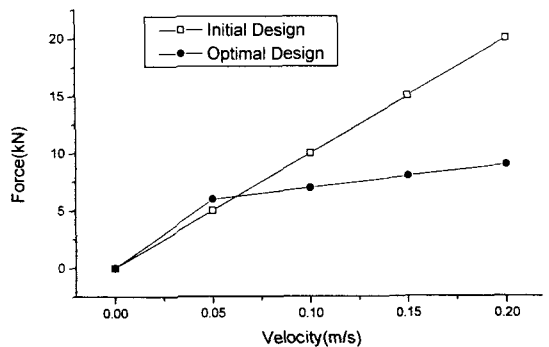


Fig. 12 Nonlinear Characteristic of damper

Table 5 Optimizes Design Variables

Design Variable	Initial Value	Optimized Value
X1	50	70.707
X2	5.0	5.93
X3	5.0	1.0
X4	5.0	1.0
X5	5.0	1.0

#### 4. 결론

이상의 결과에서 본 연구는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고속전철의 와전류 제동장치 동적요소 최적설계를 반응표면 모델을 이용하여 효율적으로 수행할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 최적화 정도가 실제모델에 비하여 다소 떨어지는 것은 목적함수의 선택에 있어서 성능지수가 잘 나타날 수 있도록 조정함의 필요하고, 비선형성을 고려할 수 있는 알고리즘을 고려하여 그 정도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발 사업의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 박성현, 1995, 회귀분석, 민영사.
- (2) 박성현, 1995, 현대실험계획, 민영사.
- (3) Myers, Montgomery, 1995, Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, New York.
- (4) Dudley, 1995, Multidisciplinary Optimization of the High-Speed Civil Transport, AIAA Paper 95-1024.
- (5) Nick Tzannetakis, 1997, Numerical Methods for Modeling and Optimization of Noise Emission Applications, ASME Symposium in Acoustics and Noise Software, Detroit, MI, USA.

- (6) Bennet, 1998, Issues in Industrial Multi-disciplinary Optimization, AIAA Paper 98-4737.
- (7) BRR, 1998, VAMPIRE Users Manual.
- (8) LMS, 1998, OPTIMUS Users Guide.
- (9) 박찬경, 이광기, 2000, 반응표면모델에 의한 철도차량 대차의 탄성조인트 최적설계, 대한기계학회 논문집 A권, 제24권 제3호, pp661~666.
- (10) SAS Institute Inc. 1995, JMP V.3 Manual.
- (11) Phoenix Integration Inc., 2001, ModelCenter v3.0 Users Guide