

# 철도차량 동적 진동특성을 고려한 다목적함수 최적설계

<sup>0</sup>박 찬 경\*, 이 광 기\*\*, 김 기 환\*\*\*, 현 승 호\*\*\*, 박 춘 수\*

## A Study on the Optimum Design of Multi-Object Dynamic System for the Rail Vehicle

Chan-Kyoung Park, Kwang-Ki Lee, Ki-Hwan Kim, Seung-Ho Hyun,  
Choon-Soo Park

### ABSTRACT

Optimization of 26 design variables selected from suspension characteristics for Korean High Speed Train (KHST) is performed according to the minimization of 58 responses which represent running safety and ride comfort for KHST and analyzed by using the each response surface model from stochastic design experiments. Sensitivity of design variables is also analyzed through the response surface model which ineffective design parameters to the performance index are screened by using stepwise regression method. The response surface models are used for optimizing design variables through simplex algorithm. Values of performance index simulated by optimized design parameters are totally lower than those by initial design parameters. It shows that this method is effective for optimizing multi-design variables to multi-object function.

### 1. 서론

철도차량은 승객을 목적지까지 안전하고, 안락하게 수송하기 위해서 향상되어져 왔고, 이에 대한 평가기준으로써 UIC 및 ISO 규격<sup>(1)(2)</sup> 등이 적용되고 있다. 이러한 규격들은 평가항목으로 안전성은 레일과 휠사이의 상호작용력을, 승차감은 승객이 느끼는 가속도를 선정하고 있다. 이런 평가항목들은 차량주행중의 동적특성으로서 철도차량의 현수장치의 특성에 따라 크게 변화하게 되며, 따라서 안전하고 안락한 승차감 확보를 위해서는 현수장치의 특성들을 최적의 특성치로 설계되어야 한다.

철도차량의 기본적인 성능지수는 안전성과 관련하여 탈선지수, 윤증감소, 승차감과 관련하여

여 승차감지수등이 있고, 설계변수는 스프링과 댐퍼의 조합형태로 구성된 1,2차 현수장치 및 차간연결 장치등이 있다. 이러한 최적설계 문제는 다목적함수, 다설계변수가 되어 통합 최적설계의 방법론으로 최근에 빠르게 적용되고 있는 통계적 방법론인 반응 표면 모델을 적용하는 것이 효과적이다<sup>(3)(4)(5)</sup>.

국내에서는 최근 한국형 고속전철 기술개발 사업을 통한 현수장치 최적설계를 위하여 1차 현수장치의 탄성조인트에 대한 최적설계<sup>(6)</sup>와 개별 성능지수에 대한 설계변수 민감도를 반응표면 모델을 이용하여 제시하였다<sup>(7)(8)</sup>. 일본의 Isuzu사와 미국 Chrysler사에서는 Taguchi가 제안한 실험계획법으로부터 얻어진 반응 표면 모델을 바탕으로 민감도 분석을 다변수 다목적설계의 최적화 문제에 도입하여 각각 최적의 승차감 선정과 자동차의 정상상태와 과도상태를 고려한 최적 조정 안정성 선정에 적용하여

\* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 선임 연구원

\*\* NVH Korea 차장

\*\*\* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 책임 연구원

좋은 결과를 얻고 있다<sup>(9)(10)</sup>.

본 연구에서는 최근 활발하게 적용되고 있는 반응 표면 모델을 이용하여, 철도차량의 안전성과 승차감에 대한 현수장치 특성의 최적설계를 수행하였다.

## 2. 차량 주행 모델

실험계획을 위해서 본 연구에서는 Vampire를 이용한 철도차량 주행 시뮬레이션을 사용하였다<sup>(11)</sup>. 철도차량 동적 모델은 한국형 고속전철을 대상으로 Fig. 1과 같이 P(동력차) + M(동력객차) + 3T(객차) + M(동력객차)로 총 6량으로 편성하였다. 대차는 P(동력차)용 동력대차(PMB, Power Motor Bogie) 2대, 동력객차(M)용 동력대차(MTB, Motorized Tailer Bogie) 전후 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차(ATB, Articulated Tailer Bogie) 4대로 편성을 구성하였다. 주행 궤도는 곡선 7000R과 BR제공 불규칙도를 사용하였으며 385km/h의 속도 주행을 모사시켰다.

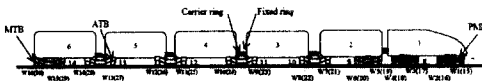


Fig. 1 Train Configuration

## 3. 실험계획

설계변수는 현수장치 특성치로서 각 수준을  $\pm 20\%$ 로 설정하여 해당요소를 구성하였으며 Table 1과 같이 총 26개로 설정하였다.

또한 만족해야할 동역학적 성능지수는 객차의 승차감, 휠의 탈선지수 그리고 윤증감소이다. 탈선지수는 레일과 휠의 작용력을 이용 수직력(P)에 대한 수평력(Y)의 비(Y/Q)로서 설정하며, 윤증감소는 정적 수직력(Qs)에 대한 동적 변동수직력( $\Delta Q$ )의 비( $\Delta Q/Q_s$ )로서 설정한다. 승차감은 승객 가속도의 RMS (Root Mean Square)값으로 안락성의 여부를 판단하므로 객차의 횡방향과 수직방향 가속도의 RMS값을 성능지수로 선택하였다. 여기서 탈선지수나 윤증감소의 경우 주행구간 중의 최대치 하나를 최소화하는 것은 탈선지수나 윤증감소의 전체 성능을 향상시키기 보다는 특정한 부분으로 치우칠 수 있어 본 연구에서는 전체에서 얻어지는 데이터를 통계학적인 관점에서 Table 2와 같이 평균과 표준편차로서 설정토록 하였다.

따라서 전체 성능지수는 승차감 10개, 탈선지수 24개, 윤증감소 24개로 구성하여 총 58개를 설정하여 사용하였다.

Table 1 Design Parameters and Level

인자 번호	수준(level)		현재 모델링 값	해당 현수장치		
	-1 수준	1 수준				
1	46.0	69.0	57.5	MTB 1차	탄성조인트	Kx
2	13.4	20.1	16.75			Ky
3	0.04584	0.06876	0.0573			Kt
4	0.00572	0.00859	0.00716			KD
5	0.9784	1.3453	1.223	MTB 1차	2중 코일 스프링	Kz
6	0.007	0.013	0.01		수직 오일 댐퍼	Cz
7	0.126	0.154	0.14	MTB 2차	에어 스프링	Kx
8	0.29632	0.44448	0.3704			Kz
9	0.014	0.026	0.02		수직 오일 댐퍼	Cz
10	0.021	0.039	0.03		수평 오일 댐퍼	Cx
11	7.7	14.3	11.0		안티요 오일 댐퍼 (특성 고신 기울기)	첫번째
12	0.42	0.78	0.6			두번째
13	0.28	0.52	0.4			세번째
14	4.9	9.1	7.0			네번째
15	0.41976	0.62964	0.5247	ATB 1차	2중 코일 스프링	Kz
16	0.0035	0.0065	0.005		수직 오일 댐퍼	Cz
17	0.153	0.187	0.17	ATB 2차	에어 스프링	Kx
18	0.2424	0.3636	0.303			Kz
19	5.04	9.36	7.2		안티요 오일 댐퍼 (특성 고신 기울기)	첫번째
20	2.94	5.46	4.2			두번째
21	1.68	3.12	2.4			세번째
22	3.192	5.928	4.56			네번째
23	31.5	58.5	45.0	차간 연결링	고정링 - 이동	Kx
24	78.05	144.95	111.5			Ky
25	67.9	126.1	97.0			Kz
26	1.4252	2.6468	2.036			Kt

Table 2 Performance Index

성능지수	순번(r)	응답(Response, r)
승차감	1~5	T1~T5의 횡방향 가속도
	6~10	T1~T5의 수직방향 가속도
탈선지수	11~34	왼쪽 휠 5~16의 평균 및 표준편차
윤증감소	35~58	오른쪽 휠 5~16의 평균 및 표준편차

Table 1의 설계변수 변화에 대한 Table 2의 성능지수를 얻기위하여 본 연구에서는 효율적인 실험계획법인 다구찌방법의 직교배열표준  $L_{32}$ 를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.<sup>(4)</sup>

## 4. 민감도 분석

성능지수들과 관심 현가요소들 사이에 실험 계획법을 적용하여, 성능지수에 대한 각 설계변수의 민감도를 식(1)을 이용한 회귀 특성방정식

으로부터 구하였다<sup>(5)</sup>.

$$\hat{y} = b_0^* + \sum_{i=1}^k b_i^* x_i^* \quad (1)$$

여기서  $k^*$ 는 설계변수의 갯수이고,  $b_i^*(i=1, \dots, k^*)$ 는 인자  $x_i^*$ 에 대한 민감도가 된다. 예로서 첫 번째 객차(T1)의 승차감(r1)에 대한 설계변수들의 민감도도는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 즉 동력객차 대차의 2차 수평 오일뎀퍼(x10)의 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다.

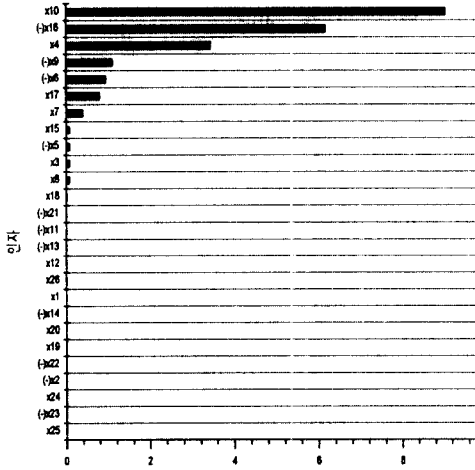


Fig. 2 Sensitivity of Design Parameters for r1

또한 식(1)의 회귀 방정식에 대한 타당성은 결정계수( $R^2$ ) 및 수정 결정계수( $R^2_{adj}$ )<sup>(11)</sup>로써 판단될 수 있으며, 앞 예의 경우 각각 0.97, 0.89로서 매우 유사하게 근사화 시켰다는 것을 알 수 있다.

### 5. 단계적 회귀를 통한 주효과 변수의 선별 및 검증

각 성능지수에 대한 설계변수의 민감도는 성능지수의 영향정도에 대한 정보를 제공하며 상대적으로 영향이 적거나 거의 영향이 없는 설계변수를 제거시킬 수 있다. 이러한 제거는 각 설계변수를 단계적으로 소거하면서 각 성능지수의 정도와 회귀방정식의 통계적인 F검정<sup>(12)</sup>을 통하여 실시할 수 있으며 앞의 예인 r1에 대해서 실시하면 Fig. 3과 같이 26개의 설계변수 중 7개의 설계변수만으로 성능지수 r1을 설명할 수 있다. 또한 이렇게 선별(Screening)한 설계변수로 구성된 회귀방정식의 결정계수( $R^2$ ) 및 수정 결정계수( $R^2_{adj}$ )는 각각 0.95, 0.93으로서

26개의 설계변수로 구성된 회귀방정식의 정도보다  $R^2_{adj}$ 의 경우 더욱 큰값을 나타내고 있어 불필요한 오차를 줄이는 효과도 볼 수 있음을 알 수 있다.

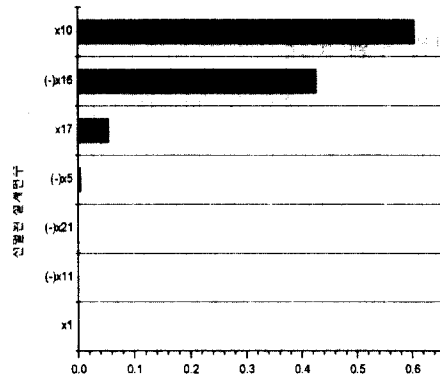


Fig. 3 Sensitivity of Screened Design Parameters

### 6. 주효과와 설계변수를 통한 반응표면모델 구성 및 분석

단계적 회귀를 통하여 선별된 설계변수로 58개 성능지수의 회귀방정식을 이용하여 선형 반응표면모델(Response Surface Model, RSM)을 구성할 수 있다. 또한 구성된 반응표면 모델의 정도를 살펴보기 위하여 초기설계변수값과  $\pm 20\%$ 의 수준으로 설정된 임의의 실험계획에 사용한 설계변수 및 10% 변화시킨 설계변수 특성치를 이용하여 동적 시뮬레이션에서 얻어진 성능지수(실험치)와 반응표면모델에 의하여 계산된 성능지수(추정치)의 값을 비교할 수 있으며, 식(2)와 같은 오차 계산식으로 유사정도를 Fig.3과 같이 계산하였다.

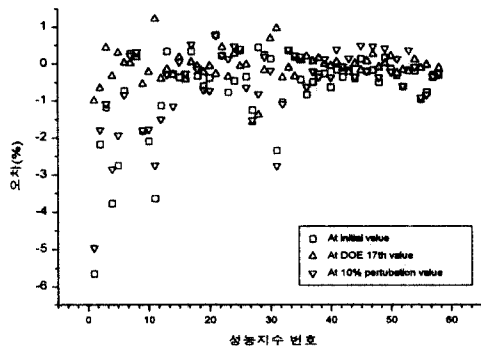


Fig. 3 Comparison between RSM and Simulation

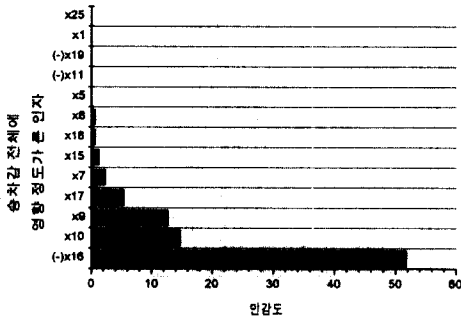
$$\text{오차}(\%) = \frac{(\text{추정치} - \text{실험치})}{\text{실험치}} \times 100 \quad (2)$$

Fig. 3에서 보듯이 각 경우에 대한 오차는 +1~-6% 정도로서 생성된 RSM이 시뮬레이션 결과를 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

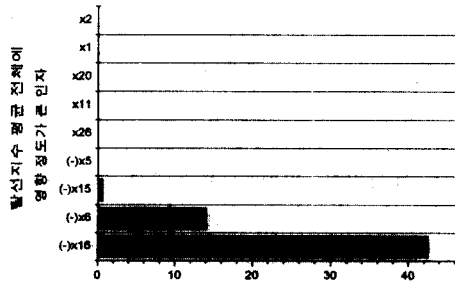
58개의 성능지수에 대한 설계변수의 민감도 정보를 이용한 반응표면모델은 성능지수 측면에서 볼 때 승차감의 경우 5개의 객차에 대한 좌우, 상하 가속도로 분리 표현되어 있으며, 탈선지수나 윤중감소의 경우 12개의 휠에 대한 평균 및 표준편차에 대해서 분리 표현되어 있다. 따라서 열차 전체 승차감과 안전성에 대한 대표지수를 RSM 모델을 이용하여 식 (3)과 같이 정도가 유사한 특성의 합으로 표현하면 설계변수의 민감도를 설계자에게 좀더 효율적으로 제공할 수 있게된다.

$$\begin{aligned} \text{RSM}_{\text{승차감}} &= \sum_{i=1}^k \hat{y}_i \\ \text{RSM}_{\text{탈선지수 평균}} &= \sum_{i=1}^{12} \hat{y}_i (2i+9) \\ \text{RSM}_{\text{탈선지수 표준편차}} &= \sum_{i=1}^{12} \hat{y}_i (2i+10) \\ \text{RSM}_{\text{윤중감소 평균}} &= \sum_{i=1}^{12} \hat{y}_i (2i+33) \\ \text{RSM}_{\text{윤중감소 표준편차}} &= \sum_{i=1}^{12} \hat{y}_i (2i+34) \end{aligned} \quad (3)$$

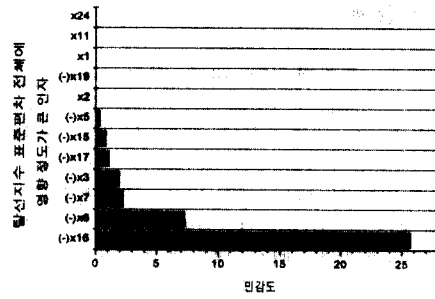
여기서  $i$ 는 Table 2.의 순번이며, 식(3)의 반응표면모델에 의한 설계변수 민감도를 살펴보면 Fig. 4와 같다.



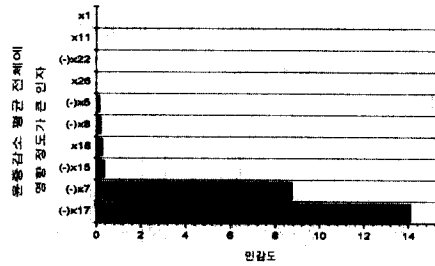
(a) For Ride Comfort



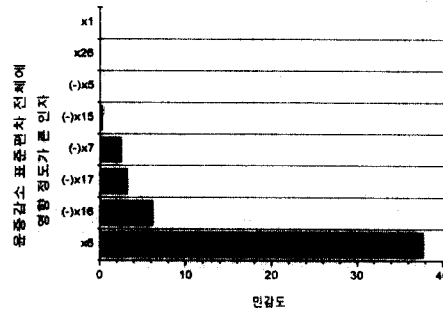
(b) For Mean of Derailment Index



(c) For Standard Deviation of Derailment Index



(d) For Mean of Wheel Unloading



(e) For Standard Deviation for Wheel Unloading

Fig. 4 Sensitivity of Design Parameters

Fig 4.에서 보듯이 각 조합 성능 지수에 대한 RSM 관점에서 살펴본 설계변수 민감정도는 승차감과 탈선지수의 평균 및 표준편차의 경우 관절대차의 1차 수직오일 댐퍼, 윤중감소의 경우 평균에 대해서는 관절대차의 2차 에어스프링 탄성계수, 표준편차에 대해서는 동력객차대차의 1차 수직오일댐퍼의 영향이 가장 크게 나타남을 알 수 있었으며, 공통적으로 객차와 동력객차대차의 1차 수직오일댐퍼 및 코일스프링, 2차 에어스프링 및 코일스프링의 영향이 지배적임을 알 수 있었다.

## 7. 최적설계

26개의 설계변수에 대한 최적설계를 효율적으로 수행하기 위해서 식(3)에서 얻은 민감도 정보에서 각 성능지수에 영향이 거의 없는 설계변수는 초기치값으로 설정하고, 민감도 방향성이 동일하게 나타나고 있는 설계변수는 최적화 방향성을 알고있어 설계범위인 각 수준의  $\pm 70\%$  수준으로 최적치를 설정토록 하여 최적화 알고리즘의 설계변수에는 포함시키지 않았다. 이에대한 전체 설계변수의 최적설계를 위한 초기값 설정은 Table 4와 같다.

Table 3 Initial Values of Design Parameters for Optimizing

설계변수 번호(최적 설계변수)	최적화를 위한 초기치	설 명
1	49.45	하한치의 70%
2	14.405	하한치의 70%
3	0.065322	상한치의 70%
4	0.007162	영향이 없는 변수
5(1)	1.223	변수
6(2)	0.01	변수
7(3)	0.14	변수
8(4)	0.3704	변수
9(5)	0.02	변수
10	0.0237	하한치의 70%
11(6)	11.0	변수
12	0.6	영향이 없는 변수
13	0.4	영향이 없는 변수
14	7.0	영향이 없는 변수
15(7)	0.5247	변수
16	0.00605	상한치의 70%
17(8)	0.17	변수
18	0.26058	하한치의 70%
19	8.712	상한치의 70%
20	3.318	하한치의 70%
21	2.4	영향이 없는 변수
22	3.6024	하한치의 70%
23	45.0	영향이 없는 변수
24	111.5	영향이 없는 변수
25	76.63	하한치의 70%
26	1.6084	하한치의 70%

또한 목적함수는 식(4)와 같이 58개의 성능지수를 목표값에 대한 오차비의 합으로 설정하

여 이를 최소화하는 방향으로 수식화 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Min. Goal} = & \sum \left( \frac{r_i - T_i}{T_i} \right)_{\text{ride}} \times 10^5 \\ & + \sum \left( \frac{r_i - T_i}{T_i} \right)_{\text{derailment}} \times 10^5 \quad (4) \\ & + \sum \left( \frac{r_i - T_i}{T_i} \right)_{\text{unloading}} \times 10^5 \end{aligned}$$

여기서,  $T_i$ (target value<sub>i</sub>) =  $0.9 \times$  minimum value of  $r_{ij}$  ( $j = 1, \dots, 33$ ) 이며  $j$ 는 실험 계획 횟수를 의미한다.

본 연구에서는 최적화 알고리즘으로 실험 계획법을 통한 최적화에서 널리 사용되고 있는 Simplex Method를 사용하였으며, 수행된 최종 최적화된 설계 변수는 Table 5와 같다.

Table 4 Optimizing Values of Design Parameters

인자 번호	최종 최적화 값	초기 모델링 값
1	49.45	57.5
2	14.405	16.75
3	0.065322	0.0573
4	0.007162	0.007162
5	1.3453	1.223
6	0.007	0.01
7	0.154	0.14
8	0.29632	0.3704
9	0.014	0.02
10	0.0237	0.03
11	7.7007	11.0
12	0.6	0.6
13	0.4	0.4
14	7.0	7.0
15	0.62964	0.5247
16	0.00605	0.005
17	0.187	0.17
18	0.26058	0.303
19	8.712	7.2
20	3.318	4.2
21	2.4	2.4
22	3.6024	4.56
23	45.0	45.0
24	111.5	111.5
25	76.63	97.0
26	1.6084	2.036

또한 최적화된 설계변수를 사용하여 58개 성능지수들의 향상정도를 살펴보기 위하여 초기모델 특성값에 의한 시뮬레이션 결과와 최적 설계변수의 특성치에 의한 결과값을 비교하였으며, 비교값으로 초기 성능지수에 대한 최적설계변수에 의한 성능지수값의 차를 비율로서 나타내었으며 그 결과 Fig. 5와 같다.

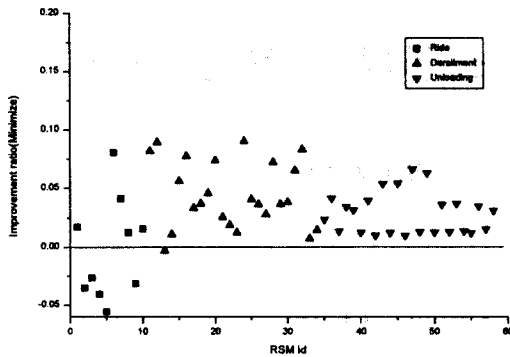


Fig. 5 Comparison between Initial Values and Optimized Values of Performance Index

Fig.5에서 보듯이 승차감의 경우 일부는 악화되는 경우도 나타나고 있으나, 탈선지수나 윤증감소는 최대 10%까지 향상됨을 보이고 있으며, 전체적으로 성능지수의 향상정도를 얻을 수 있었다. 이는 본 연구가 58개의 성능지수를 전체적인 통계관점에서 최적화를 시도하였기 때문에 일부분에서의 악화가 발생되었으며, 설계자의 중요도에 따른 가중함수 적용으로 이를 해결 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 철도차량과 같은 대형 연결 수송 장비에서 특징을 갖고있는 다설계변수 다성능지수의 경우에 대하여 통계개념을 통한 효율적인 최적설계를 실험계획법을 이용한 반응표면 모델을 구축하여 수행될 수 있음을 시뮬레이션을 이용하여 보였다. 또한 본 연구의 방법은 실제 열차주행에 대한 시험시에도 활용이 가능하며, 복잡한 시스템의 최적설계에도 응용이 가능할 것으로 판단된다.

## 후기

본 연구는 선도기술개발사업으로 시행되는 G7 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

1. UIC Code 518 OR(1995) "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour Safety", International Union of Railway.
2. ISO 2631-1(1997) "Mechanical vibration

and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1 : General requirements", International Standard.

3. Myers, R.M. and Montgomery, D.C.(1995), "Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley & Sons, New York.
4. 박성현(1999), "현대실험 계획법", 민영사.
5. 박성현(1998), "회귀분석", 민영사.
6. 박찬경, 이광기(2000), "반응표면모델에 의한 철도차량 대차의 탄성조인트 최적설계" 대한 기계학회논문집, 제24권 제3호, pp.661~666.
7. 박찬경, 심태웅, 김기환(1999), "반응표면모델을 이용한 철도차량 현수장치의 승차감에 대한 민감도 분석", 소음진동공학회 추계 학술대회 논문집, pp.114~119.
8. 심태웅, 박찬경, 김기환(1999), "철도차량 현수장치의 탈선에 대한 민감도 연구", 철도학회 추계학술대회 논문집, pp.566~573.
9. Sakai, T.(1991), "The Optimum Designing of Riding Comfort by Application of Taguchi Methods", SAE 912673.
10. Lee, Y.L.(1996), "Vehicle Handling Design Process Using DOE", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 17, No. 1.
11. BRR(1997), "Vampire User's Manual".
12. SAS, Inc(1998), "JMP User's Guide".