

반응표면모델을 이용한 한국형 고속전철 현가장치의 효율적인 최적설계

Efficient Optimization of the Suspension Characteristics Using Response Surface Model for Korean High Speed Train

박찬경[†] · 김영국* · 배대성** · 박태원***

C. K. Park, Y. G. Kim, D. S. Bae and T. W. Park

(2002년 3월 22일 접수 ; 2002년 4월 29일 심사완료)

Key Words : Railway Dynamics(철도차량 동역학), Experimental Design(실험계획), Response Surface Model(반응표면모델), Suspension(현가장치), Optimization(최적화), Ride Comfort(승차감), Derailment Quotient(탈선지수), Unloading Ratio(윤증감소), Stability(안정성)

ABSTRACT

Computer simulation is essential to design the suspension elements of railway vehicle. By computer simulation, engineers can assess the feasibility of the given design factors and change them to get a better design. But if one wishes to perform complex analysis on the simulation, such as railway vehicle dynamic, the computational time can become overwhelming. Therefore, many researchers have used a surrogate model that has a regression model performed on a data sampling of the simulation. In general, metamodels(surrogate model) take the form $y(x) = f(x) + \epsilon$, where $y(x)$ is the true output, $f(x)$ is the metamodel output, and ϵ is the error. In this paper, a second order polynomial equation is used as the RSM(response surface model) for high speed train that have twenty-nine design variables and forty-six responses. After the RSM is constructed, multi-objective optimal solutions are achieved by using a nonlinear programming method called VMM(variable matrix method). This paper shows that the RSM is a very efficient model to solve the complex optimization problem.

기호설명

b : β 의 최소제곱추정 계수벡터
 β : 회귀모형 함수의 계수벡터
 η : 오차벡터

$d(x)_i$: i 번째 성능지수
 $d(x)_{i,ini}$: i 번째 성능지수의 초기치
 R^2 : 결정계수
 $R^{2_{adj}}$: 수정결정계수
 SS_E : 오차에 대한 분산
 SS_R : 적합식의 성능지수에 대한 분산
 S_{yy} : 실험에 의한 성능지수의 분산
 X : 설계변수메트릭스
 y : 성능지수벡터
 \hat{y} : y 최소제곱 추정 성능지수벡터

[†] 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원
E-mail : ckpark@krri.re.kr
Tel : (031)457-6088(531), Fax : (031) 455-4868

* 정회원, 한국철도기술연구원

** 한양대학교 정밀기계공학과

*** 정회원, 아주대학교 기계/산업공학부

1. 서론

철도차량은 동적 질량요소로서 차체, 대차 및 휠셀으로 크게 나누어지며, 이들은 1차 현가장치에 의해 차체와 대차가 연결되고, 2차 현가장치에 의해 대차와 휠셀이 연결된다. 이러한 현가장치들은 탄성 및 댐핑을 갖는 요소들로 구성되는 데, 이들은 철도차량의 안전성과 승차감에 중요한 영향을 주기 때문에 철도차량의 초기설계 단계에서부터 이들에 대한 검토가 필요하다.⁽¹⁾ 그러나, 설계변수와 만족시켜야 하는 성능지수가 많이 존재하는 철도차량 현가장치의 설계는 초기설계 단계에서 설계자가 성능을 만족시키는 설계값을 선정하기 어렵다. 특히 여러 가지의 성능을 많은 설계변수가 동시에 만족시켜야 하기 때문에 무수히 많은 데이터가 필요하므로 많은 노력과 시간이 요구되어 주어진 짧은 기간 내에 정확하고 효과적인 현가장치의 설계를 하기 위한 새로운 설계방향의 제시가 필요하며, 이에 대한 연구가 이루어져야 한다.

철도차량 현가장치의 설계는 만족해야 할 설계변수와 성능지수가 많기 때문에 통합 최적설계의 방법론으로 최근에 빠르게 적용되고 있는 통계적 방법론인 반응표면 모델을 적용하는 것이 효과적일 것이다.⁽²⁻⁴⁾

미국의 NASA는 유한 요소모델과 전산유체 동력학의 통합최적설계에 이 모델을 효과적으로 적용하였으며,⁽⁵⁾ 벨기에의 LMS는 기어박스 경량화, 반도체 공정 최적화 및 자동차의 NVH분야에 이 모델을 적용하여 좋은 결과를 얻었다.⁽⁶⁾ 미국의 GM에서도 CAD와 CAE를 통합한 구조해석, 충돌해석, 공기역학, 차량동역학, 내구해석 등의 통합 최적설계에 이 방법을 적용을 하고 있다.⁽⁷⁾ 또한, 박찬경, 이광기 등은 다구찌 적교배열에 의한 반응표면모델을 구성하여 철도차량 대차의 탄성조인트와 전체 현가장치에 대한 최적설계를 1차 함수에 의하여 수행하였다.^(8,9) 본 연구에서는 한국형 고속전철 기술개발사업에서 개발하는 시제차량의 안전성, 안정성 및 승차감을 보다 향상시킨 대차를 개발하기 위해 1, 2차 현가장치의 최적설계를 수행하여 실제 대차설계에 이용하고자 한다. 본 연구에서 수행하는 현가장치의 최적설계과정은 Fig. 1의 흐름도에서 보듯이 29개의 설계변수에 대해 46개의 성능지수를 적합하도록 66회의 실험계획을 통한 반응표면모델을 생성하였고, 이 모델을 이용하여 최적화를 수행하였다.

2. 반응표면모델

2.1 철도차량 주행 모델링

철도차량의 동적거동 해석은 영국의 AEA Technology사의 철도차량 전용 해석프로그램인 Vampire를 사용하여 수행하였다.⁽¹⁰⁾ 해석을 위한 시스템 편성모델과 좌표계는 Fig. 2와 같다. 차량시스템 편성모델은 동력차 + 동력객차 + 객차(3대) + 동력 객차로 구성되었으며, 대차는 동력차용 동력대차(PMB, power motor bogie) 2대, 동력객차용 동력대차(MTB, motorized trailer bogie) 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관결대차(ATB, articulated trailer bogie) 4대로 구성되어져 있다. Fig. 3은 이러한 시스템 편성모델을 질량요소와 탄성요소의 특성치를 이용하여 Vampire S/W로 표현한 것이다.

또한, 철도차량의 휠과 레일의 상호작용도 철도차량의 동적거동에 중요한 영향을 미치기 때문에 휠과 레일의 형상에 대한 모델링을 필요로 한다. 휠은 현재 부설중인 경부고속철도차량의 휠과 동일한 형상인 NFF01-112규격에 따라 모델링을 하였으며 Fig. 4와 같

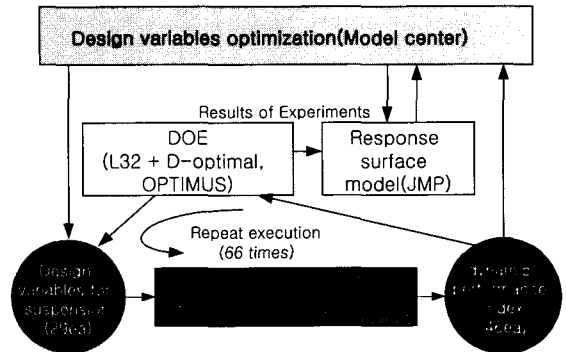


Fig. 1 Optimal design flow for suspension of railway vehicle

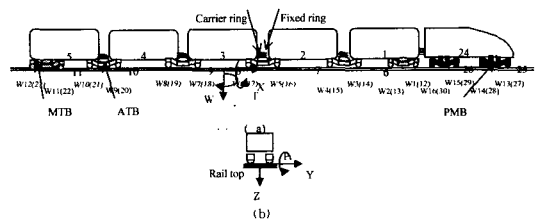


Fig. 2 Train model and axis system

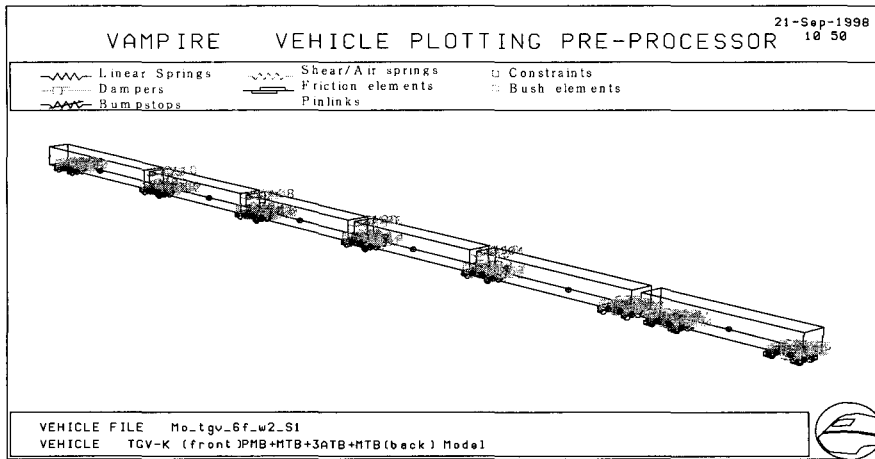


Fig. 3 Vampire train model

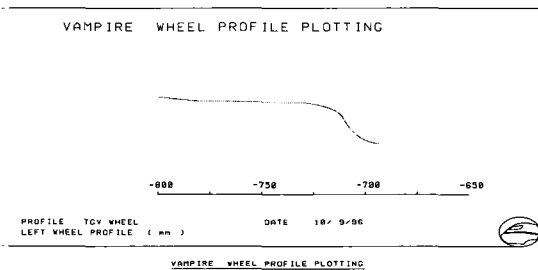


Fig. 4 Wheel profile model

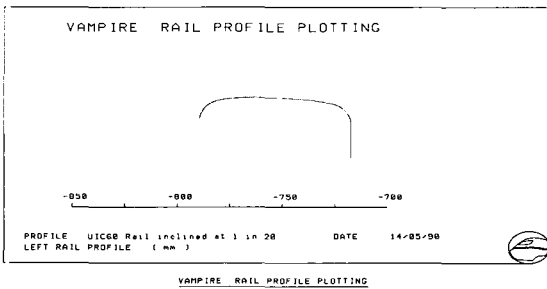


Fig. 5 Rail profile model

다.⁽¹⁾ 레일은 경부고속전철용 신선에 적용하고 있는 UIC 60 레일에 따라 Fig. 5와 같은 프로파일로 모델링을 하였다. 또한 궤도특성은 특정한 궤도특성에 따른 최적설계의 방향성 편향을 막기 위하여 일반적인 고속선의 특성을 묘사하는 불규칙 특성과 국내 고속선의 최소 곡선반경인 7000m와 최대 캔트 150mm를 중첩하여 사용하였다.

Table 1 Design variables

No	Bogie	Design variables
X1	Primary suspension of MTB and ATB	Elastic joint Kx, Kz
X2		Elastic joint Ky
X3		Elastic joint Kt, Kw
X4		Elastic joint Kp
X5	Primary suspension of MTB	Double coil spring Kz
X6		Vertical oil damper Cz
X7	Secondary suspension of MTB	Air spring Kx, Ky
X8		Air spring Kz
X9		Vertical oil damper Cz
X10		Vertical oil damper Cx
X11		Anti-yaw oil damper g1
X12		Anti-yaw oil damper g2
X13		Anti-yaw oil damper g3
X14	Anti-yaw oil damper g4	
X15	Primary suspension of ATB	Double coil spring Kz
X16		Vertical oil damper Cz
X17	Secondary suspension of ATB	Air spring Kx, Ky
X18		Air spring Kz
X19		Anti-yaw oil damper g1
X20		Anti-yaw oil damper g2
X21		Anti-yaw oil damper g3
X22		Anti-yaw oil damper g4
X23	Fixed and carrier ring	Fixed and carrier ring Kx
X24		Fixed and carrier ring Ky
X25		Fixed and carrier ring Kz
X26		Fixed and carrier ring Kt
X27		Fixed and carrier ring Kw
X28	Secondary suspension of MTB	Anti-roll bar Kt
X29	Secondary suspension of ATB	Anti-roll bar Kt

2.2 실험계획

본 연구에서 이용되는 설계변수는 동력 객차대차와

Table 2 Performance indices

Performance	Indices	Description
Ride comfort	r1~r5	Lateral acceleration of trailer
	r6~r10	Vertical acceleration of trailer
Derailment quotient	d1~d12	Ratio of lateral and vertical force of right wheel
Unloading ratio	w1~w12	Dynamic wheel force of left wheel
Stability	s1~s12	Lateral displacement of wheel center

관절대차의 1차 및 2차 현가장치에 사용되는 현가요소의 동적 특성치로 Table 1과 같이 29개이다. 또한, 성능지수는 Table 2와 같이 승차감 10, 탈선계수 12, 윤중감소 12, 안정성 12개로 총 46개 설정하였다.

여기서, 승차감은 국제규격인 ISO 2631과 UIC 513에서 사용되는 일반적인 가속도 실효값(root mean square)값을, 안전성은 탈선지수와 윤중감소로 분리하여 탈선지수는 철도차량의 안전성에 관한 국제규격인 UIC 518의 휠 작용력비(윤중과 횡압의 비)로 표준편차값을, 윤중감소는 대차 비틀림에 해당하는 정적 수직력에 대한 동적 수직력의 비로 최대값을, 안정성(stability)은 초기 가진 후에 발생하는 레일중심에서의 횡 방향변위의 표준편차 값을 사용하였다. 설정된 설계변수와 성능지수를 이용하여 반응표면모형을 생성하기 위한 실험계획은 29개의 설계변수에 대한 다쿠치 L32의 직교배열⁽³⁾ 33회에 정규화된 최대값[1]과 최소값[-1]의 중간값인 [-0.5, 0.5]에 대한 33회 D-optimal 실험계획을 추가하여 총 66회로 하였다. D-optimal 실험계획의 추가는 29개의 설계변수에 대해 이차항을 고려할 수 있도록 하여 반응표면모형의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.⁽⁴⁾

2.3 표면반응모형

실험계획법에 의한 66회의 전산실험을 Vampire S/W와 Optimus S/W⁽¹²⁾를 이용하여 자동적으로 수행하였다. 설계변수와 설계변수를 이용해 계산된 성능지수에 대해 설계변수간의 상호작용을 무시한 독립이차모형은 일반적인 증회귀모형에 따라 식 (1)과 같이 사용하였다.⁽²⁾

$$y = X\beta + \epsilon \tag{1}$$

where,

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{nk} \end{bmatrix},$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \text{and} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

식 (1)의 실제모형 y 와 표면반응모형 \hat{y} 의 오차(mean square error)를 최소로 하는 \hat{y} 를 식 (2)와 같이 결정할 수 있으며, β 의 최소제곱 추정 계수벡터 (b)는 식(3)으로부터 구할 수 있다.

본 연구에서는 시험횟수(n)은 66이며, 설계변수(k)는 2차항을 고려하기 때문에 58이 된다.

$$\hat{y} = Xb \tag{2}$$

$$b = (X'X)^{-1}X'y \tag{3}$$

추정된 계수벡터(b)를 식 (3)을 이용하여 각 성능지수에 대해 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 식 (2)의 반응표면모형을 생성할 수 있다. 이 반응표면모형의 신뢰성은 식 (4)와 식 (5)에 의한 결정계수(R^2)와 수정결정계수(R^2_{adj})로 판단할 수 있으며, 이 식들은 표면반응모형의 적합식 분산값에 대한 오차 분산값의 비로 표현된다.⁽⁴⁾

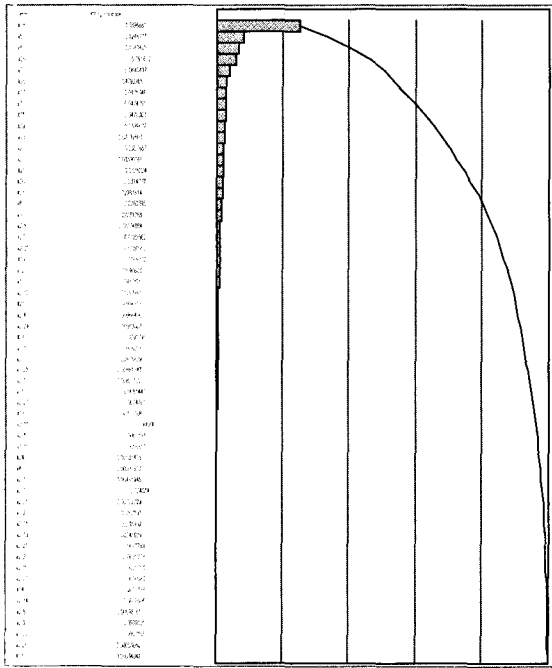
$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} = 1 - \frac{SS_E}{S_{yy}} \tag{4}$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E/(n-k)}{S_{yy}/(n-1)} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-k} \right) (1 - R^2) \tag{5}$$

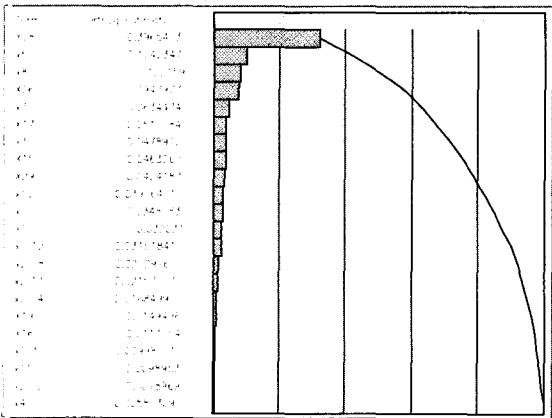
본 연구에서는 R^2 , R^2_{adj} 를 이용하여 성능지수에 대한 설계변수의 영향정도를 판단하여 영향이 없는 변수를 제거(screening)하여 반응표면 모형을 생성하였다. 변수제거에 대한 한 예로서 성능지수 r1에 대한 결과를 Fig. 6의 pareto plot에서 볼 수 있다.⁽¹¹⁾ Fig. 6(a)는 이차항까지 고려된 58개의 설계변수에 대해 변수제거를 하지 않은 상태의 설계변수에 대한 결과이며, Fig. 6(b)는 변수제거를 한 후의 설계변수에 대

한 결과이다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 변수 제거 후에 성능지수 r1에 대한 설계변수는 22개로 줄어들며, 이 모델에 대한 R^2 와 R^2_{adj} 는 각각 0.9918와 0.9877이므로 충분한 신뢰성을 갖는 것으로 판단된다.

다른 성능지수에 대해서도 성능지수 r1의 경우와 동일한 방법으로 설계변수들의 민감도 분석을 통해 설계변수의 이차항이 포함된 반응표면 모델을 생성할 수 있다.



(a) Before screening



(b) After screening

Fig. 6 Sensitivity of design variables for r1

또한, 생성된 이차 반응표면모델이 실제로 사용될 수 있는지를 판단하기 위해 실험계획에 의한 시뮬레이션

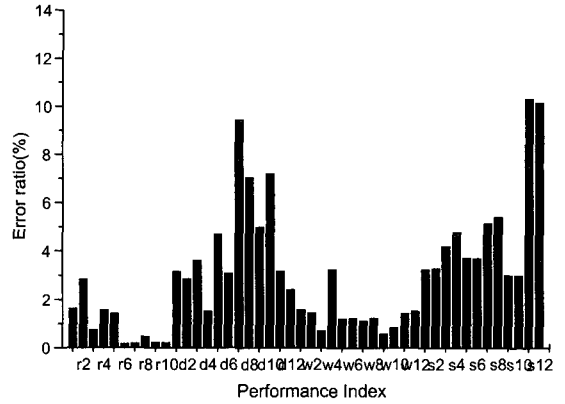
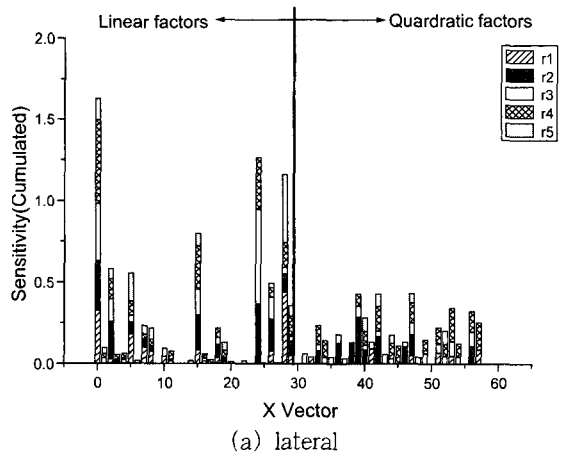
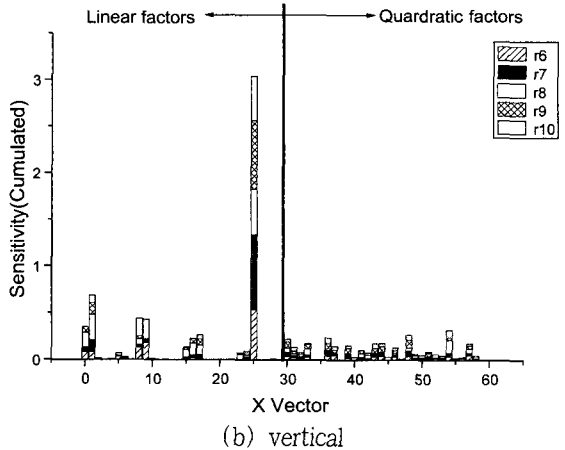


Fig. 7 Error ratio between true model and RSM model



(a) lateral



(b) vertical

Fig. 8 Sensitivity of design variables for ride comfort

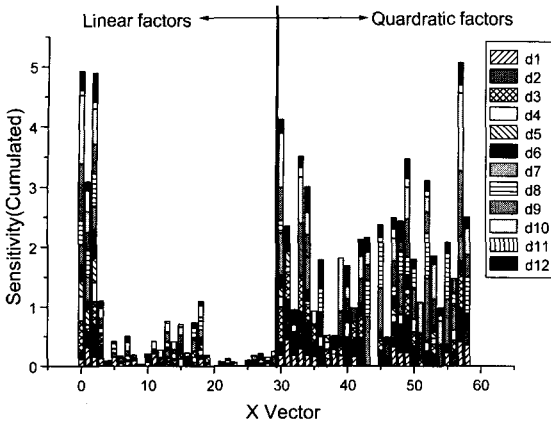


Fig. 9 Sensitivity of design variables for derailment quotient

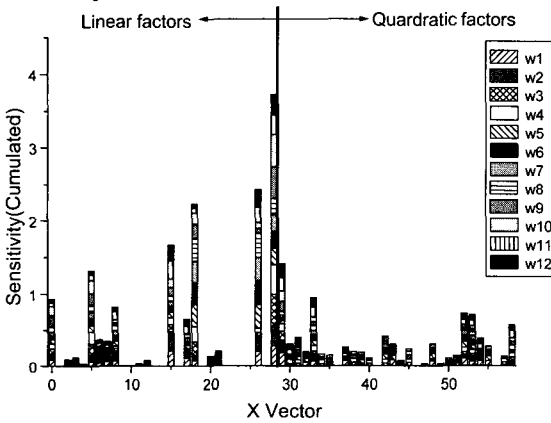


Fig. 10 Sensitivity of design variables for unloading ratio

성능지수와 반응표면모델에 의한 성능지수의 절대 오차평균에 대한 전체추정구간[-1, 1]의 비율을 구해 판단하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7의 결과를 통해 오차비율은 승차감의 경우 최대 2.86%, 탈선지수의 경우 최대 9.45%, 윤증감소의 경우 최대 3.26%, 안정성의 경우 최대 10.30%로 전체적으로 10% 내외로 이 반응표면모델은 타당성이 있다고 판단된다. 또한, 추정 계수벡터는 각 성능지수에 대한 설계변수의 민감도정보를 제공하는 데, 각 성능지수에 대해 설계변수의 계수값이 클수록 그 성능지수에 대해 해당 설계변수가 민감하다고 말할 수 있다. Fig. 8~Fig. 11은 승차감(수평방향, 승차감 수직방향), 탈선지수, 윤증감소 및 안정성 성능지수에 대한 추정 계수벡터를 누적하여 도식적으로 나타낸 것이다.

Fig. 8에서 승차감은 좌우방향과 상하방향의 설계

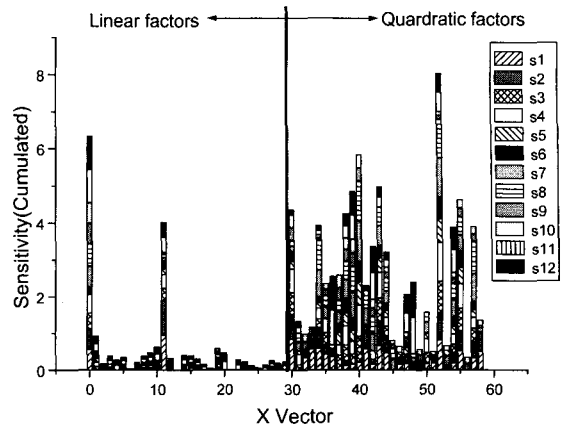


Fig. 11 Sensitivity of design variables for stability

변수에 따라 다른 민감도 정보를 갖고 있음을 알 수 있다. 승차감의 좌우방향에 대해 민감한 설계변수는 x2, x5, x15, x24 및 x28 등의 일차항이며, 특히 설계변수 x2, x15, x24는 객차 승차감(r2~r4)에, 설계변수 x5, x28은 동력객차 승차감(r1, r5)에 크게 영향을 미치는 것을 알게 되었다. 또한, 승차감의 상하방향에 대해 민감한 설계변수는 x1, x8, x9, x25 등의 일차항으로 좌우방향의 경우와 마찬가지로 동력객차와 객차에 영향을 미치는 설계변수가 다르다. 설계변수 x1, x25는 객차 승차감(r7~r9)에, x8, x9, x25는 동력객차 승차감(r6, r10)에 대해 미치는 영향이 큰 것으로 파악되었다. 특히 x25의 경우는 상대적으로 매우 큰 민감도를 갖고 있어 상하방향 승차감에 영향을 주는 대표인자가 될 것이다. Fig. 9에서 탈선지수는 x1, x2의 일차항과 x1, x4, x5, x20, x23, x28 등의 이차항이 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 윤증감소는 Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 x1, x15, x17, x26, x28, x29 등의 일차항의 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한, 안정성은 Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 x11의 일차항과 x1, x9, x10, x11, x14, x23, x26 등의 이차항에 민감한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 통해 승차감과 윤증감소 성능지수는 설계변수의 일차항에 대한 영향이 크게 미치며, 탈선지수와 안정성 성능지수는 설계변수의 일차항보다 이차항에 대해 민감함을 확인하였다.

3. 최적설계

최적설계를 수행하기 위한 목적함수는 식 (6)과 같

이 $[-1, 1]$ 의 구간으로 정규화된 반응표면모델의 성능지수 합이 최소가 되도록 하고, 제한조건을 초기치보다 우수하게 설정하여 단계별 최적화를 수행하였다.

$$\min. f(x) = \sum_{i=1}^j p(x)_i \quad (6)$$

$$\text{subject to } h(x)_i = p(x)_i - p(x)_{i,mi} < 0 \quad i=1, \dots, j$$

여기서 단계별 최적화는 목적함수를 성능지수의 합으로 구성하였기 때문에 각 성능지수들이 상대적으로 크기 성능지수보다 크게 될 수 있으며, 이를 방지하기 위해 단계별로 초기성능보다 크게 된 성능지수는 제한조건을 주고 최적화를 수행한다는 것이다. 이러한 방법은 초기에 각 성능지수에 제한조건 아래서 최적화를 수행함으로써 발생하는 국부해를 찾는 문제를 향상시킬 수 있으나, 수 차례의 반복수행으로 인한

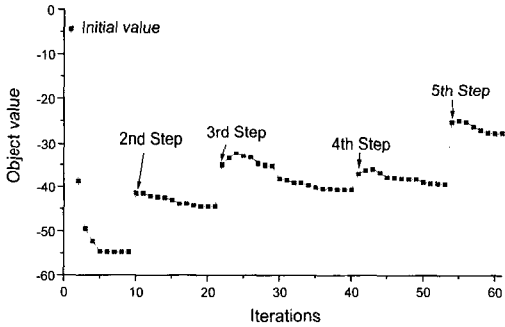


Fig. 12 Result of object values during optimization

Table 3 Design variables at initial and optimized state

No.	Design variable		No.	Design variable	
	Ininitial value	Optimized value		Ininitial value	Optimized value
X1	49.45	49.02	X16	0.006	0.006
X2	14.405	13.356	X17	0.187	0.169
X3	0.0653	0.0714	X18	0.26	0.27
X4	0.0072	0.0074	X19	8.712	9.453
X5	1.3453	1.4041	X20	3.318	3.722
X6	0.007	0.008	X21	2.4	2.6
X7	0.154	0.159	X22	3.6	4.3
X8	0.29632	0.249989	X23	45.0	40.9
X9	0.014	0.012	X24	111.5	89.2
X10	0.0237	0.0230	X25	76.63	63.92
X11	7.7007	8.7528	X26	1.61	1.45
X12	0.60	0.56	X27	0.026	0.030
X13	0.40	0.43	X28	3.80	4.05
X14	7.00	7.43	X29	3.30	3.59
X15	0.62964	0.71303			

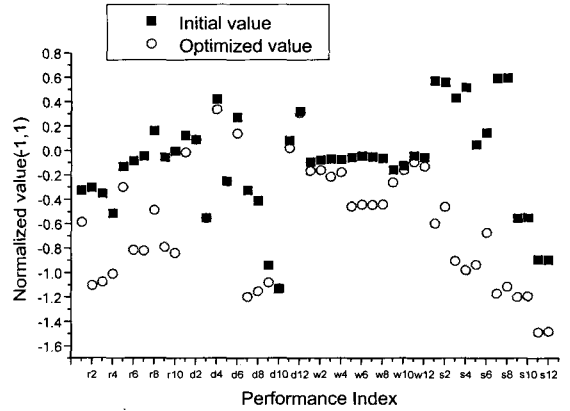


Fig. 13 Performance indices of initial state and optimized state for RSM

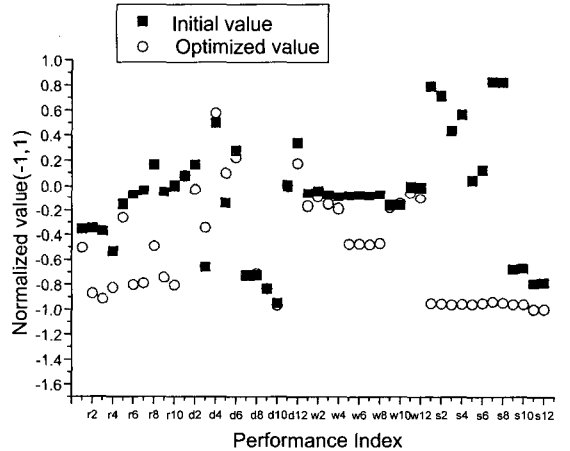


Fig. 14 Performance Indices of initial state and optimized state for true model(Vampire)

최적화 수행시간이 길어지게 된다. 본 연구에서는 5 번은 단계별 최적화를 variable matrix method를⁽¹³⁾ 이용하여 수행하였으며, 각 단계별 성능지수 합은 Fig. 12과 같이 변화하였다.

Fig. 12의 결과를 통해 각 단계의 초기에 목적함수가 급격히 증가하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 각 단계에서 추가된 제한조건의 영향으로 이에 대한 효과가 명확히 나타나고 있음을 보여준다. 또한, 성능지수의 합은 초기에는 -4.36이었으나, 5단계 최적화가 수행된 후에는 -27.7로 감소하였음을 알 수 있다. Table 3은 초기 설계변수와 최적화된 설계변수를 나타낸 것이며, Fig. 13과 Fig. 14는 Table 3을 이용하여 계산된 초기상태와 최적화된 상태에 대해 반응표면모델과 실제모델에서 구한 성능지수를 구한 결과이다.

Fig. 13의 결과를 통해 표면반응모델에 대한 각 성능지수들이 정도의 차이는 있지만, 초기값보다 작아짐을 알 수 있다. 특히, 승차감과 안정성 성능지수의 최적화 정도가 상대적으로 크다.

Vampire시뮬레이션을 통한 실제 모델에 대한 결과는 Fig. 14에서 볼 수 있는 바와 같이 각 성능지수는 초기값보다 작아지지만, 탈선계수의 일부 성능지수 d3~d5가 다소 초기값보다 증가한다. 이는 반응표면 모델 생성시 해당 성능지수에 대한 R^2 와 R_{adj}^2 값이 0.8수준에서 결정되었기 때문이다.

본 연구에 표면반응모델의 최적화가 완료된 후에 목적함수가 실제 모델은 초기의 -3.73에서 -24.01로 최소화되었으며, 반응표면모델인 경우의 최소값 -27.7과 비교해 볼 때, 본 연구의 반응표면 모델이 유효한 것으로 판단된다.

4. 결 론

이상의 결과를 통해 본 연구는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고속전철과 같은 대형 수송기계의 현가장치 최적설계를 반응표면모델을 이용하여 효율적으로 수행할 수 있었다.

(2) 반응표면 모델은 민감도 정보를 동시에 갖고 있어 직접 민감도 분석을 통해 각 성능지수에 대한 중요한 설계변수를 도출할 수 있었다.

(3) 철도차량 동특성과 같은 복잡한 시스템의 다설계변수, 다목적함수 최적설계 문제인 경우에 반응표면 모델을 유효하게 적용할 수 있으며, 국부적으로 발생하는 신뢰성 저하는 고차항이나 비선형성을 고려할 수 있는 알고리즘을 적용하여 그 정도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발 사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 김영국 등, 2001, "바람이 고속전철의 동적 안정성에 미치는 영향 분석", 한국소음진동공학회지, 제 11 권 제 8 호, pp. 349~356.
- (2) 박성현, 1995, 회귀분석, 민영사.
- (3) 박성현, 1995, 현대실험계획, 민영사.
- (4) Myers 등, 1995, Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, New York.
- (5) Dudley, 1995, "Multidisciplinary Optimization of the High-speed Civil Transport", AIAA Paper 95-1024.
- (6) Nick Tzannetakis, 1997, "Numerical Methods for Modeling and Optimization of Noise Emission Applications", ASME Symposium in Acoustics and Noise Software, Detroit, MI, USA.
- (7) Bennet, 1998, "Issues in Industrial Multi-disciplinary Optimization", AIAA Paper 98-4737.
- (8) 박찬경 등, 2000, "반응표면모델에 의한 철도차량 대차의 탄성조인트 최적설계", 대한기계학회논문집 A권, 제 24 권 제 3 호, pp. 661~666.
- (9) Lee T. H. 등, 2000, "Fuzzy Multi-objective Optimization of a Train Suspension Using Response Surface Model", AIAA Paper 2000-4762, 8th AIAA/ USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multi-disciplinary Analysis and Optimization, CA, USA.
- (10) AEAT Tech., 1998, VAMPIRE Users Manual.
- (11) SAS Institute Inc. 1995, JMP V.3 Manual.
- (12) LMS, 1998, OPTIMUS Users Guide.
- (13) Phoenix Integration Inc., 2000, ModelCenter User's Guide.