

크리깅 모델에 의한 철도차량 현수장치 최적설계

박찬경[†] · 이광기^{*} · 이태희^{**} · 배대성^{**}

(2002년 3월 7일 접수, 2003년 4월 9일 심사완료)

Optimization of a Train Suspension using Kriging Model

Chan Kyoung Park, Kwangki Lee, Tae Hee Lee and Dae Sung Bae

Key Words : Railway Dynamics(철도차량동역학), Design and Analysis of Computer Experiments(전산 실험계획법), Kriging Model(크리깅 모델), Optimization(최적설계)

Abstract

In recent engineering, the designer has become more and more dependent on the computer simulations such as FEM(Finite Element Method) and BEM(Boundary Element Method). In order to optimize such implicit models more efficiently and reliably, the meta-modeling technique has been developed for solving such a complex problems combined with the DACE(Design and Analysis of Computer Experiments). It is widely used for exploring the engineer's design space and for building approximation models in order to facilitate an effective solution of multi-objective and multi-disciplinary optimization problems. Optimization of a train suspension is performed according to the minimization of forty-six responses that represent ten ride comforts, twelve derailment quotients, twelve unloading ratios, and twelve stabilities by using the Kriging model of a train suspension. After each Kriging model is constructed, multi-objective optimal solutions are achieved by using a nonlinear programming method called SQP(Sequential Quadratic Programming).

기호설명

- X : 설계변수
- \hat{y} : 크리깅 모델
- $\hat{\beta}$: 전역모델
- Z : 국소모델
- R : 상관함수
- \mathbf{R} : 상관벡터
- \mathbf{Q} : 상관인자

1. 서론

철도차량은 크게 차체, 대차 및 휠셀으로 구성되어있으며 특히 이들을 연결하는 현수장치의 설

계는 철도차량의 성능지수를 나타내는 승차감, 탈선계수, 윤중감소, 고속안정성에 중요한 영향을 주고있다. 현수장치는 차체와 대차를 연결하는 1차 현수장치와 대차와 휠셀을 연결하는 2차 현수장치로 구성되며 이들 현수 장치들은 대부분 탄성 요소 및 댐핑 요소들로 구성된다. 이러한 탄성 요소 및 댐핑 요소들은 철도차량의 안전성과 승차감에 중요한 영향을 미치는 인자들이며, 철도차량의 초기 설계 단계에서부터 안전성 및 승차감을 동시에 고려하여 설계되어야 한다. 하지만 만족해야 하는 목표 성능지수와 설계변수가 많이 존재하는 철도차량의 현수장치 설계는 초기 설계 단계에서 원하는 성능을 얻기 위한 기준 설계 값의 선정이 어려우며, 특히 여러 가지의 성능을 동시에 만족시키는 설계를 하기 위해서는 무수히 많은 경우에 대한 데이터가 필요하므로 주어진 짧은 설계기간 내에 정확하고 효과적인 현수장치 설계를 하기 위해서는 새로운 설계 방향론의 제시가 필요하며 이에 대한 연구가 이루어져야 한다. 철도차량 현수 장치의 설계와 같이 만족해야 할

[†] 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원

E-mail : ckpark@krti.re.kr

TEL : (031)460-5613 FAX : (031)460-5649

^{*} ㈜ 태성에스엔이

^{**} 회원, 한양대학교 기계공학부

설계변수와 성능들이 많이 존재하는 복잡한 문제에는 통합 최적설계의 방법론으로 최근에 공학분야에서 빠르게 적용되고 있는 통계적 방법론에 의한 근사 모델링 기법인 반응표면모델(RSM, Response Surface Model)을 적용하는 것이 효과적이다.⁽¹⁾ 박찬경, 이광기 등^(2,3)은 전역 근사 최적화 기법으로 볼 수 있는 반응표면모델을 이용한 최적 설계 개념을 도입하여 다구짜 직교배열에 의한 반응표면모델을 구성하여 초기 설계 단계에서의 철도차량 현수장치 최적설계를 수행하여 반응표면모델을 철도차량 현수장치 설계에 효과적으로 적용하였다. 하지만 직교배열을 적용하는 방법은 철도차량에서 발생하는 동력학적인 거동을 정확히 표현할 수가 없으므로 비선형성이 강한 철도차량의 동력학 거동을 정확히 표현할 수 있는 새로운 모델링 기법이 요구된다. 다물체 동력학 해석과 같은 CAE(Computer Aided Engineering) 해석을 적용하는 전산해석은 실험에 의한 분석과는 다르게 오차가 없는 결정론적인 모델로 분류할 수 있으므로 전체 오차를 최소화하는 최소자승법을 적용하는 반응표면모델보다는 내삽법을 적용한 크리깅과 같은 모델링 기법을 전산실험점에 적용하여 최적설계를 하는 방법이 많이 적용되고 있다. 미국 보잉사의 Booker 등⁽⁴⁾은 헬리콥터 로터의 동력학 거동을 최적화하기 위하여 Kriging 모델 기법을 적용하였으며 구조설계 및 탄소성 해석까지도 동시에 고려하여 통합설계를 성공적으로 수행하였다. 본 연구에서는 1 차 및 2 차 현수 장치의 현가 요소 중에서 탄성 요소 및 댐핑 요소 29 가지 인자를 설계 변수로 설정하고, 객차에서 측정된 수직 방향 및 횡 방향 승차감의 10 가지, 우측 차륜에서 측정된 탈선계수 12 가지, 좌측 차륜에서 측정된 윤증감소 12 가지, 레일 중심에서 측정된 고속안정성 12 가지의 총 46 가지를 성능 지수로 선정하여 D-optimal 계획법을 적용한 Kriging 모델을 구성하여 민감도 해석 및 다중 목적 함수 최적설계를 수행한다.

2. 크리깅 모델

2.1 철도차량 모델링

철도 차량의 동적 거동 해석은 영국 철도 연구소에서 개발된 철도 차량 전용 해석 프로그램인 VAMPIRE⁽⁵⁾를 이용하여 수행한다. 해석을 위한 철도차량 시스템의 편성모델과 좌표계는 다음 Fig. 1 과 같다. 차량시스템 편성모델은 동력차-동력객차-객차(3 대)-동력 객차로 구성하였으며 대차는 동력차용 동력대차(PMB, Power Motor Bogie) 2 대,

동력객차용 동력대차(MTB, Motorized Trailer Bogie) 전후 2 대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차(ATB, Articulated Trailer Bogie) 4 대로 구성되어져 있다. 주행 궤도는 곡선 7000R 과 BR(British Railroad) 불규칙도를 적용하였으며 최고 속도는 468 km/h 를 적용하였다.

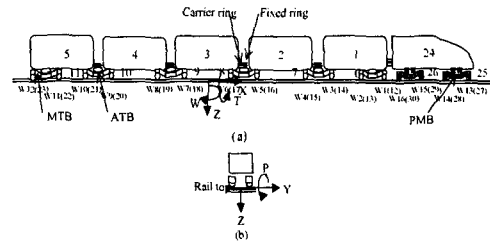


Fig. 1 Train model and axis system

Table 1 29 design variables

| No | Bogie | Design Variables |
|-----|-----------------------------|---------------------------|
| X1 | Primary | Elastic joint Kx, Kz |
| X2 | Suspension of MTB and ATB | Elastic joint Ky |
| X3 | | Elastic joint Kt, Kw |
| X4 | | Primary |
| X5 | 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 |

Table 2 Dynamic performance indices

| Index | Responses | Description |
|---------------------|----------------------|--|
| Ride Comfort | $y_1 \sim y_5$ | Lateral acceleration of trailer |
| | $y_6 \sim y_{10}$ | Vertical acceleration of trailer |
| Derailment Quotient | $y_{11} \sim y_{22}$ | Ratio of lateral and vertical force of wheel |
| Unloading Ratio | $y_{23} \sim y_{34}$ | Dynamic wheel force of left wheel |
| Stability | $y_{35} \sim y_{46}$ | Lateral displacement of wheel center |

본 연구에서 주로 해석을 수행할 대상은 동력대차 및 관철대차의 1차 및 2차 현수장치이며 설계 변수로 선정된 총 29 개의 현수장치 요소를 Table 1에 표시하였다.

사용되는 성능지수는 Table 2와 같이 총 46 가지로 선택하였다. 여기서 승차감 지수(Ride Comfort)는 ISO 2631 가중합수를 곱한 승객 가속도의 RMS(Root Mean Square) 값을 사용하고, 탈선지수(Derailment Quotient)는 레일과 휠의 접촉면에 작용하는 수직력에 대한 수평력의 비를 사용하며, 운중감소(Unloading Ratio)는 정적 수직력에 대한 동적 수직력의 비를 사용하고, 안정성(Stability)은 초기 궤도 불규칙 가진 후에 발생하는 레일 중심에서의 좌우 변위의 RMS 값을 사용한다.

2.2 전산실험계획

전산실험계획은 실험이 아닌 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 데이터를 얻는 과정을 수행하기 때문에 반복 해석을 수행하여도 일반적으로 실험에서 발생하는 랜덤오차가 발생하지 않는다. 따라서 전산 실험에서는 최대 3 수준을 사용하는 기존의 실험 계획법보다는 "space filling"이라는 개념을 사용하여 최소 5 수준 이상을 적용하여 설계 영역 전체를 실험점으로 균일하게 채워주고 있으며 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 직교배열 및 Latin Hypercube Sampling 을 많이 적용하고 있다. 본 연구에서는 Owen⁽⁶⁾이 제시한 5 수준의 랜덤직교배열을 사용하여 많은 실험점들을 생성한 후에 D-optimal 실험 계획법을 적용하여 이 중에서 필요한 실험점들을 선택하는 방법을 사용한다. 식 (1)에 표시된 D-optimal 실험 계획법은 주어진 반응 표면 모델의 일반 분산 뿐만 아니라 최대 분산을 최소화시키는 실험점들을 선택하는 방법이다.⁽¹⁾

$$\text{Maximize } |X^T X| \quad (1)$$

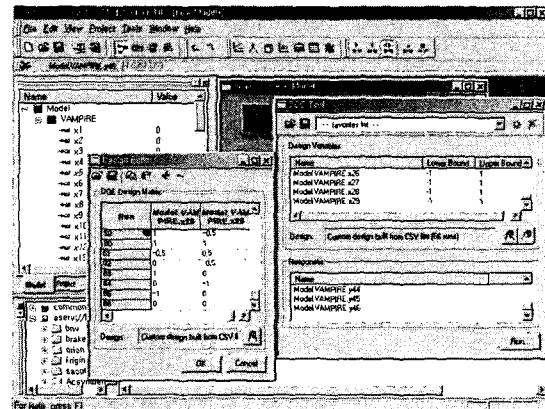


Fig. 2 D-optimal simulations in ModelCenter

본 연구에서는 총 66 회의 전산실험점을 선택하였으며 이 실험점에 대한 VAMPIRE 해석은 통합 설계 프로그램인 ModelCenter 를 사용하여 자동적으로 수행을 하였다.⁽⁹⁾ 다음 Fig. 2 는 ModelCenter 를 사용하여 Table 1 의 29 가지의 설계변수에 대한 Table 2 의 46 가지의 성능지수 해석을 자동적으로 수행하는 과정을 보여준다. Fig. 2 의 왼쪽 창은 총 66 회의 D-optimal 실험 계획을 나타내며 오른쪽 창은 총 66 회의 D-optimal 실험 계획을 자동화하기 위한 29 가지 설계변수와 46 가지 성능지수들을 입력하는 것을 나타낸다.

2.3 Kriging 모델

크리깅(Kriging) 모델은 프랑스의 지질수학자인 Georges Matheron 이 1950 년대 남아프리카의 채광학자 D.G. Krige 가 적용했던 경험적인 방법을 수학적으로 정립하면서 사용되기 시작하였다. 이 방법은 많은 과학자들에 의해 여러 다양한 분야에서 적용이 되어왔으며 특히 공학 분야에서 일반적으로 적용되고 있는 크리깅 모델은 전산실험계획에 적합하도록 Sacks 등⁽⁷⁾에 의해 제안된 모델이다. 본 연구에서도 Sacks 등에 의해 제안된 크리깅 모델을 적용하였다. 전산실험계획에 의해 만들어진 데이터로부터 결정하고자 하는 크리깅 모델은 식 (2)와 같이 구성된다.

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (2)$$

여기서 $f(x)$ 는 주로 다항함수(Polynomial Function)로 표현되며 설계영역에서의 전역모델(Global Model)을 표현하며 일반적으로 가장 간단한 형태인 상수항 β 를 취한다. $Z(x)$ 는 크리깅 모델이 각 데이터 점들을 보간할 수 있도록 국부적인 변동(Deviation)을 표현해주며 $Z(x)$ 의 공분산(Covariance)은 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\text{Cov}[Z(\mathbf{x}^i), Z(\mathbf{x}^j)] = \sigma^2 \mathbf{R}([R(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j)]) \quad (3)$$

여기서 \mathbf{R} 은 상관행렬(Correlation Matrix)이며 $R(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j)$ 는 표본 데이터 내 임의의 두 점 \mathbf{x}^i 와 \mathbf{x}^j 사이의 상관함수(Correlation Function)를 의미한다. 상관함수 \mathbf{R} 은 설계자에 의해서 결정되는데 Sacks, Owen 등에 의해 여러 가지 함수가 소개되고 있다. 본 연구에서는 가우스 상관함수(Gaussian Correlation Function)를 선택하여 크리깅 모델을 구성하였다.

$$R(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) = \exp[-\sum_{k=1}^{n_v} \theta_k |\mathbf{x}_k^i - \mathbf{x}_k^j|^2] \quad (4)$$

여기서 n_v 는 설계변수 갯수가 되고 θ_k 는 모델을 적합시키는데 사용되는 상관인자(Correlation Parameter)가 된다. 이러한 상관관계를 통하여 크리깅 모델 \hat{y} 와 실제 모델 $y(\mathbf{x})$ 의 차이인 MSE(Mean Square Error)를 최소화하는 \hat{y} 를 식 (5)와 같이 결정할 수 있다.

$$\hat{y} = \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(\mathbf{x})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \hat{\beta}\mathbf{f}) \quad (5)$$

여기서 y 는 n_s 개의 표본데이터 응답 값을 가지는 열벡터(Column Vector)이고 \mathbf{f} 는 각 원소가 1의 값을 가지는 열벡터이다. $\mathbf{r}(\mathbf{x})$ 는 임의의 좌표 \mathbf{x} 와 표본 데이터사이의 상관벡터(Correlation Vector)이다.

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = [R(\mathbf{x}, \mathbf{x}^1), R(\mathbf{x}, \mathbf{x}^2), \dots, R(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{n_s})]^T \quad (6)$$

식 (5)에서 전역모델(Global Model) $\hat{\beta}$ 는 식 (7)과 같다.

$$\hat{\beta} = (\mathbf{f}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{f})^{-1} \mathbf{f}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \quad (7)$$

또한, $\hat{\beta}$ 와 y 사이의 분산, $\hat{\sigma}^2$ 은 다음 식 (8)과 같다.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \hat{\beta}\mathbf{f})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \hat{\beta}\mathbf{f})}{n_s} \quad (8)$$

식 (4)의 θ_k 는 MLE(Maximum Likelihood Estimator)과정을 통하여 결정되게 되는데 식 (9)를 최대화(Maximization)하는 θ^* 를 구하는 과정이다.

$$\begin{aligned} \max_{\theta \in \mathbb{R}^1} & (-1/2)[(n_s \ln \hat{\sigma}^2) + \ln |\mathbf{R}|] \\ \text{subject to} & \quad 0 \leq \theta \leq \infty \end{aligned} \quad (9)$$

위에 언급된 Kriging 모델은 모두 FORTRAN 프로그램으로 작성하였으며 Modelcenter 가 제공하는 FileWrapper 기능을 사용하여 Modelcenter 의 모듈로 만들어 최적설계를 수행할 수 있도록 하였다. 다음 Fig. 3 에 크리깅 모델의 수치해석 과정을 설

명하였다. 식 (9)로 정의된 최적설계를 계산하기 위해서는 먼저 초기값 θ_k 를 가정하고 식 (4)의 $R(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j)$ 를 구한다. 다음에 식 (4)를 통하여 \mathbf{R}^{-1} 과 $|\mathbf{R}|$ 를 구한다. 최종적으로 식 (6)과 식 (7)을 통하여 식 (8)의 $\hat{\sigma}^2$ 를 구하여 식 (9)의 목적함수를 구성한다. 식 (9)의 최적설계는 비제한조건 최적설계 문제로써 본 연구에서는 전역 해를 구하기 위해서 Simulated Annealing 기법⁽¹¹⁾을 사용하여 계산하였다.

3. 현수장치 최적설계

3.1 다중목적함수 최적설계

다중 목적 함수 최적화는 다음 식 (10)과 같이 표현할 수 있으며 여기서 n 은 목적함수의 갯수이고, 범함수 P 는 선호 함수로서 여러 가지의 목적 함수를 하나의 등가 함수로 변환하는 함수이다. 여기서 f_i 는 i 번째 목적함수를 나타낸다.

$$\text{Min } P\{f_i(b)\}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

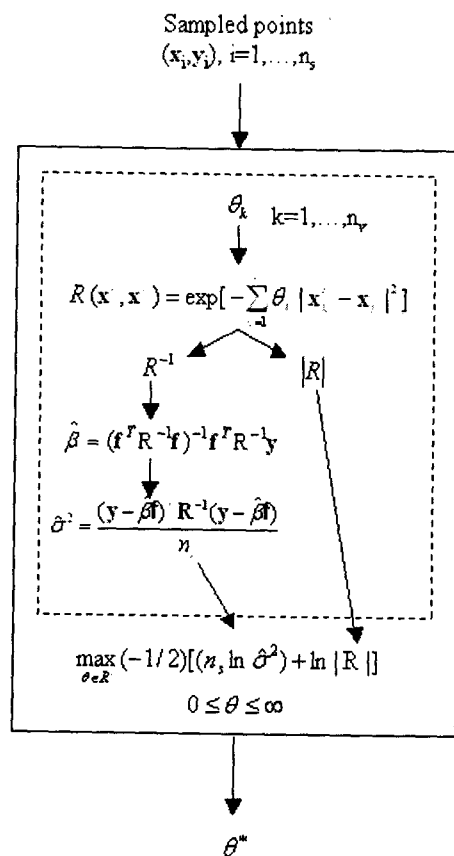


Fig. 3 Building a Kriging model

다중 목적 함수 최적화 방법 중에는 가중치 방법, 거리 방법, 최대-최소 방법 등 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 각 목적함수와의 최소값을 만족하는 경우를 1로 하고 최대치를 만족하는 경우를 0으로 정규화하여 최적설계를 수행하였다. 철도차량 현수장치 최적설계의 경우에는 모든 응답함수를 최소화하는 경우이므로 식 (11)과 같이 정규화된 46 가지의 응답함수들의 곱을 최대화하는 것으로 수식화하였다. 정규화된 46 가지의 응답함수들의 곱은 [0 1]의 범위에 존재하며 1이 되면 46 가지의 응답함수들을 모두 만족한다.

$$Max \left[\prod_{i=1}^{46} \left(\frac{f_i^{max} - f_i(x)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^{1/46} \right] \quad (11)$$

여기서 46 가지 응답함수의 제한조건은 모든 정규화된 응답함수가 응답함수의 평균값보다는 나빠지지 않도록 식 (12)와 같이 설정하였다.

$$g_i(x) > 0.5, \quad i = 1, \dots, 46 \quad (12)$$

최적설계 알고리즘은 SQP(Sequential Quadratic Programming)⁽¹⁰⁾를 적용하여 수행하였으며 식 (11)과 (12)의 다중목적함수 정식화는 ModelCenter의 Script Component를 사용하여 Fig. 4와 같이 작성하였다. Fig. 4의 왼쪽 창은 식 (11)의 응답함수들을 정규화하고 하나의 목적함수로 만들어주는 과정을 나타내며 오른쪽 창은 식 (11)의 목적함수, 식 (12)의 제한조건 및 Table 1의 29 가지 설계변수를 입력하여 최적설계 정식화를 수행하는 과정을 의미한다.

3.2 크리깅모델에 의한 최적설계

66 회의 전산실험계획을 통하여 만들어진 철도차량 현수장치 크리깅 모델에 현재 설계 값을 초기 값으로 하여 SQP 알고리즘을 적용한 결과 Fig. 4와 같이 총 10 회의 반복을 통하여 최적 해를 구하였다. Fig. 5는 정규화된 목적함수 식 (11)의 값을 나타내며 0.686의 최적값을 보여준다.

철도차량 현수장치에 의한 46개 성능지수들은 현수장치 설계자의 편의를 위하여 모두 [-1 1]로 정규화를 하였다. Fig. 6은 주어진 제한조건 식 (12)에 대한 최적 해의 향상된 성능 값을 식 (13)을 사용하여 정규화한 값으로 표현한 것이다.

$$\left(\frac{g_i(x) - f_i(x)}{2} \right) \times 100 \quad (13)$$

Fig. 6(b)의 결과를 통하여 윤증감소(y23 ~ y34)와 안정성(y35 ~ y46)에 관련된 성능지수들은 일정한 경향을 보여주고 있다.

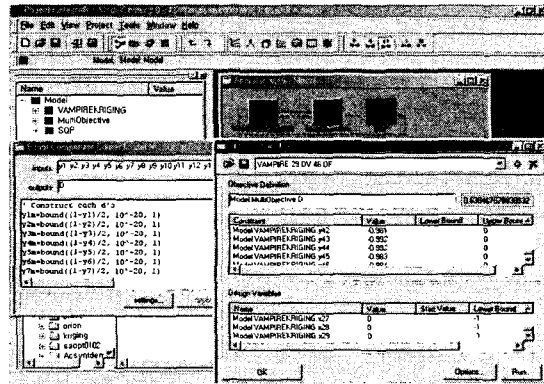


Fig. 4 Multi-objective optimization in ModelCenter

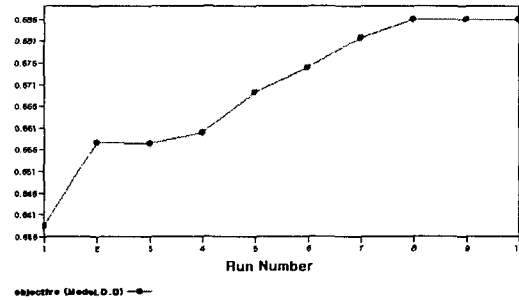
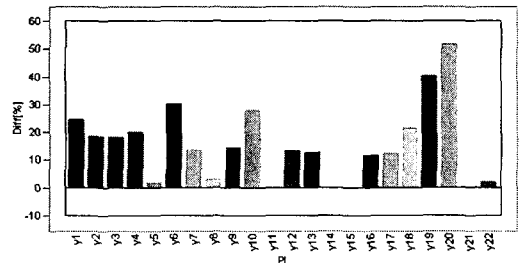
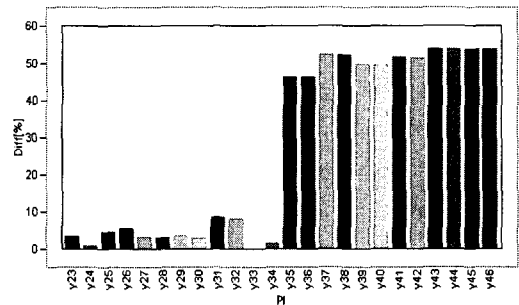


Fig. 5 Result from sequential quadratic programming

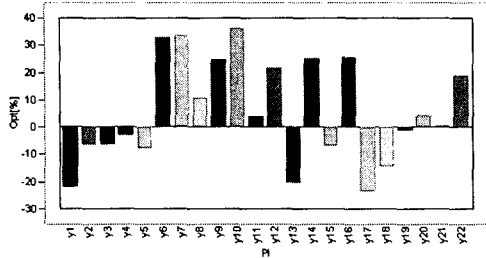


(a) Ride comforts and derailment quotient

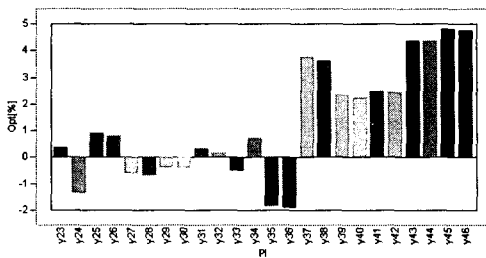


(b) Unloading ratio and stability

Fig. 6 Performance improvement with respect to Constraints



(a) Ride comforts and derailment quotient



(b) Unloading ratio and stability

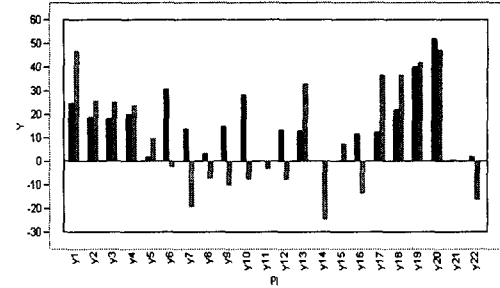
Fig. 7 Comparison between initial and optimal solutions

그러나 Fig. 6(a)의 승차감(y1 ~ y10)과 탈선지수(y11 ~ y22)에 관련된 성능지수들은 차체 및 차륜에 따라 많은 편차를 보여주는 것을 알 수 있다. Fig. 6(a)에서 y11, y14, y15 의 값은 다른 탈선지수의 값에 비하여 상대적으로 나쁜 값을 보여주기 때문에 최적설계를 수행할 때에 가중치를 높여서 설계를 수행해야 한다는 것을 보여준다. 특히 안정성은 거의 모두 값이 최소값을 가지고 있으므로 오히려 안정성 성능은 낮추어주고 승차감, 탈선지수 및 윤증감소 성능은 향상시켜주는 설계도 요구된다. 따라서 주어진 46 개의 성능지수를 모두 제한조건으로 고려하기보다는 승차감과 탈선지수에 관련된 22 개의 성능지수만을 제한조건으로 고려하여 설계하는 것이 타당하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 은 초기설계 값에 대한 최적 해의 성능변화를 보여주며 식 (14)를 사용하여 정규화한 값으로 표현하였다.

$$\left(\frac{f_{ini}(x) - f_{opt}(x)}{2} \right) \times 100 \quad (14)$$

Fig. 7(b)의 결과를 통하여 윤증감소와 안정성의 성능변화는 +5% ~ -2% 범위로서 초기설계 값에 대한 최적 해의 성능변화가 거의 없다는 것을 알 수 있다.



Legend: ■ Diffopt(%), □ Diffini(%)

Fig. 8 Initial and optimal solutions of ride comforts and derailment quotient

반대로 Fig. 7(a)의 결과를 통하여 승차감과 탈선지수의 성능변화는 ± 30% 범위로서 초기 설계 값에 대한 최적 해의 성능변화가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 현재 철도차량 현수장치의 설계 영역은 윤증감소와 안정성 성능에 대하여 안전하게 설계가 되어있다고 볼 수 있기 때문에 윤증감소와 안정성의 성능을 향상시키기보다는 승차감과 탈선지수의 성능을 향상시키는 방향으로 설계가 진행되어야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

특히 승차감과 탈선지수의 성능에 관련된 Fig. 6(a)와 Fig. 6(a)의 결과를 분석해보면 Fig. 8 의 결과를 얻을 수 있다. 최적설계에 의한 최적 해의 값들이 초기설계 값과 비교하여 주어진 성능지수들의 제한조건을 모두 만족시키지만 초기 성능지수들과 비교해보면 성능 향상 및 성능 저하를 동시에 보이는 것을 알 수 있다. 즉 승차감과 탈선지수의 성능들 간에는 서로 상반되는 경향(Trade-off)이 존재하며 이러한 상반된 경향들을 제한조건 및 목적함수로 처리하는 방법이 향후 보완되어야 한다.

4. 결론

29 가지 설계변수를 갖고있는 철도차량 현수장치 최적설계에 D-optmal 실험계획법을 적용하여 크리깅 모델을 구성한 후에 46 가지 성능지수를 고려한 다중목적함수 최적 설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) D-optmal 실험계획법과 크리깅 모델을 사용하여 복잡한 철도차량 현수장치의 동력학적 거동을 66 회의 해석을 통하여 구성할 수 있었다.

(2) 철도차량의 모든 성능지수를 크리깅 모델을 사용하여 이미 구성하였기 때문에 목적함수 및 제한조건을 변경시키면서 다중목적함수 최적화를 수행하는 과정에서 많은 시간과 노력을 줄일 수 있

다.

(3) 현재 주어진 철도차량 현수장치의 설계영역에서는 주어진 46 개의 성능지수를 모두 제한조건으로 고려하기보다는 승차감과 탈선지수에 관련된 22 개의 성능지수만을 제한조건으로 고려하여 설계하는 것이 타당하다.

따라서 많은 설계변수와 성능지수를 고려해야 하는 철도차량 현수장치와 같은 복잡한 다중목적 함수 문제에 D-optimal 실험계획법에 의한 크리깅 모델을 적용하면 좋은 최적 해를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원해주신 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Myers, Montgomery, 1995, *Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New York.
- (2) K. Lee, C. K. Park, T. H. Lee, 1999, "Optimal Design of Train by Using Response Surface Model of the Taguchi Orthogonal Array," *KSAE spring Conference*, 99380080, pp. 495~500.
- (3) C. K. Park, K. Lee, 2000, "Optimization of the Elastic Joint of Train Bogie Using by Response Surface Model," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, No. 3, pp. 661~666.
- (4) Booker, A. J., 1996, "Case Studies in Design and Analysis of Computer Experiments," *Proceeding of the Section on Physical and Engineering Sciences*, American Stochastic Association.
- (5) BRR, 2000, *VAMPIRE User's manual*.
- (6) Owen A., 1994, "Lattice Sampling Revisited: Monte Carlo Variance of Means over Randomized Orthogonal Arrays," *The Annals of Statistics*, 22, pp. 930~945.
- (7) Sacks, J., Welch, W. J., Mitchel, T. J., 1989, "Design and Analysis of Computer Experiments," *Statistical Science*, 4, pp. 409~435.
- (8) SAS Institute Inc., 1995, *JMP v3.1 User's Guide*.
- (9) Phoenix Integration Inc., 2001, *ModelCenter v3.0 User's Guide*.
- (10) Arora, J.S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill.
- (11) Goffe, W. L., Ferrier, G. D. and Rogers, J., 1994, "Global Optimization of Statistical Functions with Simulated Annealing," *Journal of Econometrics*, Vol. 60, No. 1-2, pp. 65~100.