

철도차량 현수장치의 식스시그마 강건 설계

이광기* · 박찬경** · 한승호†

(2009년 7월 21일 접수, 2009년 8월 20일 수정, 2009년 8월 21일 심사완료)

Six Sigma Robust Design for Railway Vehicle Suspension

Kwang Ki Lee, Chan Kyoung Park and Seung Ho Han

Key Words: Robust Design(강건설계), Railway Vehicle Suspension(철도차량 현수장치), Process Capability Index(공정능력지수), Six Sigma(식스시그마)

Abstract

The spring constants of primary suspensions for a railway vehicle are optimized by a robust design process, in which the response surface models(RSMs) of their dynamic responses are constructed via the design of experiment(DOE). The robust design process requires an intensive computation to evaluate exactly a probabilistic feasibility for the robustness of dynamic responses with their probabilistic variances for the railway vehicle. In order to overcome the computational process, the process capability index C_{pk} is introduced which enables not only to show the mean value and the scattering of the product quality to a certain extent, but also to normalize the objective functions irrespective of various different dimensions. This robust design, consequently, becomes to optimize the C_{pk} subjected to constraints, i.e. 2, satisfying six sigma. The proposed method shows not only an improvement of some C_{pk} violating the constraints obtained by the conventional optimization, but also a significant decrease of the variance of the C_{pk} .

1. 서론

탄성 및 댐핑 요소로 구성된 철도차량 현수장치는 안전성과 승차감에 중요한 영향을 미치는 부품으로서 차체와 대차 간의 1차 현수장치와 대차와 휠셀 간의 2차 현수장치로 구성되어 있다. 특히, 1차 현수장치의 설계에 있어 안전성 및 승차감을 모두 만족시킬 수 있는 탄성계수의 선정이 중요하나, 많은 설계변수 및 동역학 성능지수를 고려해야 하므로 주어진 설계기간 내에 정확

하고 효과적인 설계에 어려움이 따른다. 저자 등^(1,2)은 실험계획법으로 많은 설계변수와 성능지수에 대한 동역학 해석을 통해 수행하고, 이 결과로 반응표면모델을 구축한 후 순차적 회귀분석으로 민감도 해석을 수행하였다. 이렇게 얻어진 성능지수의 반응표면모델에 최대-최소 방법에 의한 다중목적최적설계로 설계변수의 최적해를 찾았다. 또한, 비선형성이 강한 철도차량의 동역학 거동을 정확히 표현하기 위하여 다물체 동역학 해석과 전산실험계획을 기반으로 한 크리깅 모델링 기법으로 최적설계를 수행하여 좋은 최적 해를 얻을 수 있는 방법을 제시하였다.

상기한 최적설계는 모두 확정론적인 방법을 적용하고 있어, 설계변수에 불확실성이 존재하는 경우 목적함수 및 제한조건에 변동성이 발생하여 최적설계 결과에 대한 신뢰성이 떨어질 수 있다. 따라서, 통계학적인 방법을 도입하여 설계변수의 변동이 목적함수와 제한조건에 미치는 영향을 고

[이 논문은 2009년도 신뢰성부문 춘계학술대회(2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학과
E-mail : shhan85@dau.ac.kr
TEL : (051)200-7655 FAX : (051)200-7656

* 와이즈메카

** 한국철도기술연구원

려하고, 최적설계를 통해 얻어진 설계 값이 이러한 변동에 대하여 강건성을 갖게 함으로서 보다 신뢰성 높은 결과가 얻어지도록 해야 한다. 최적해가 이러한 변동에 대하여 강건성을 가지려면 목적함수의 강건성과 제한조건의 강건성이 동시에 만족되어야 한다. 목적함수의 강건성은 설계변수의 변동에 대하여 최적해의 변동이 민감하지 않은 것이며, 제한조건의 강건성은 설계변수의 변동에 대하여, 제한조건이 위배되지 않고 가용 영역에 존재하는 것이다. 지금까지 강건설계를 위하여 부품의 정밀한 공차 또는 높은 안전계수가 도입되었으나, 이는 최적해의 변동성을 줄이기보다는 설계변수의 변동 자체를 줄이는 시도로서 제품의 제작비용의 증대만을 야기하였다. 이를 극복하기 위하여, 강건설계 방법은 실험계획법, 반응표면방법 및 민감도해석과 같은 종래의 최적설계에 테일러 전개에 의한 표준편차 근사모형을 접목하여 개발되었고, 일부 실제 설계사례^(3,4)에 성공적으로 적용된 바 있다.

본 연구에서는 철도차량 현수장치의 설계변수인 탄성계수의 변동성을 고려하고 목적함수의 변동성을 최소화 하는 강건최적해를 찾기 위하여, 제품 품질변동의 척도로서 사용되어 오던 공정능력지수(Process Capability Index)를 강건설계에 적용한 식스시그마 강건최적설계기법을 제시하였다. 제시한 기법을 이용하여 공정능력지수로 표현된 철도차량의 성능지수가 식스시그마 수준으로 만족하는 최적해로 얻어졌다.

2. 강건최적설계의 수식화

최근 기업에서 각광을 받고 있는 식스시그마 설계와 같이 제품설계를 수행하는 과정에서 제품의 강건성을 꼭 고려해야만 하는 이유는 Fig. 1을 통하여 설명될 수 있다. Fig. 1은 설계변수 D에 대한 응답 F를 표현한다. 설계자가 최적해를 찾는 것이 목적이라면 A점이 최선이 될 것이다. 그러나, 생산현장에서 발생하는 제품의 공차범위 및 치수의 변동과 같은 분포함수를 설계변수에 고려하면 A점에서 응답의 변동이 크게 발생하므로 적절한 해를 선택했다고 할 수가 없다. 이 경우에는 오히려 B점이 A점에 비하여 응답의 변동을 적게 하기 때문에 더욱 적절한 최적해라고 할 수 있다. 즉, 제품의 변동성을 고려한 강건최적설

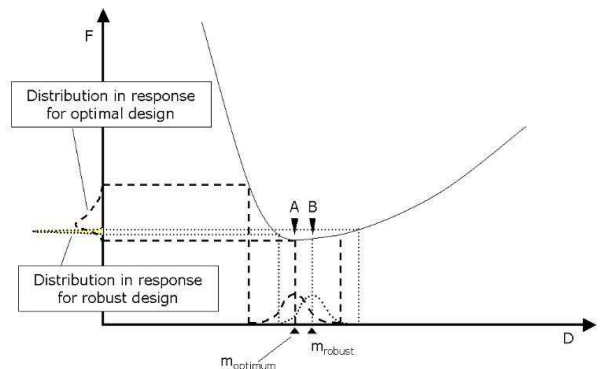


Fig. 1 Traditional optimization vs. robust design

계는 B점을 찾는 것으로 생산 현장에서 원하는 확률변동이 적은 최적해를 구할 수 있다.

2.1 강건최적설계의 일반화

설계변수의 확률변동을 고려한 강건최적설계는 다음과 같이 일반화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Objective functions } y_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, l \\
 &\text{constraints } g_j(x), \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 &\text{Find } x \\
 &\text{to minimize } (\mu_{y_i}, \sigma_{y_i}), \quad i = 1, 2, \dots, l \\
 &\text{Subject to constraints } \mu_{g_j} + \sigma_{g_j} \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 &\text{where } x_L + \Delta x \leq x \leq x_U - \Delta x
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, x 는 설계변수를 의미하며, μ_{y_i} 와 σ_{y_i} 는 각각 목적함수 $y_i(x)$ 의 평균과 표준편차를, 그리고 μ_{g_i} 와 σ_{g_i} 는 각각 제약조건 $g_i(x)$ 의 평균과 표준편차이다.

2.2 테일러 전개에 의한 표준편차의 근사화

목적함수 및 제한조건의 표준편차를 정확히 구하는 것은 불가능하기 때문에, 몬테카를로 모의 실험법, 테일러 전개에 의한 근사방법 또는 실험 계획법 등이 활용된다. 몬테카를로 모의실험법이 가장 정확하게 표준편차를 구할 수 있지만 많은 양의 계산시간이 요구되므로, 테일러 전개를 이용한 방법이 활용되고 있다. 테일러 전개를 이용해서 표준편차를 근사화 하는 방법은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\sigma_y^2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 \quad (2)$$

이 방법은 함수가 해석적으로 주어지지 않는다면 미분값을 근사적으로 구해야 하는 문제점을 가지고 있지만 계산의 편리성과 속도 때문에 많이 적용이 되고 있다.

2.3 공정능력지수

공정능력지수(Process Capability Index) C_p 란 제품의 품질변동이 어느 정도인가를 나타내는 척도로서 다음과 같이 표현된다.^(6,7)

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (2)$$

여기서, σ 는 공정의 산포(표준편차)이며, USL 과 LSL 은 이의 규격상한과 규격하한을 나타낸다. C_p 는 공정의 산포만을 반영하고 공정평균의 위치에 대해서는 고려하지 못하기 때문에, 공정의 산포는 물론 공정평균의 위치를 반영한 C_{pk} 가 제안되었다.

$$C_{pk} = \min \left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right) \quad (3)$$

C_{pk} 는 크기가 서로 다른 목적함수와 제한조건의 값을 동일한 단위로 정규화시키는 장점을 갖고 있으며, $C_{pk} = 2$ 라면 식스시그마를 의미한다.

2.4 식스시그마 강건최적설계

본 연구에서는 품질척도로만 적용되어오던 C_{pk} 를 강건설계에 도입했으며 설계변수의 확률변동을 고려하여 식 (1)의 강건최적설계를 다음과 같이 제안한다.

Find x

to minimize $C_{pk_{y_i}}, i = 1, 2, \dots, l \quad (4)$

Subject to constraints $C_{pk_{y_j}} \geq 2, j = 1, 2, \dots, m$

where $x_L + \Delta x \leq x \leq x_U - \Delta x$

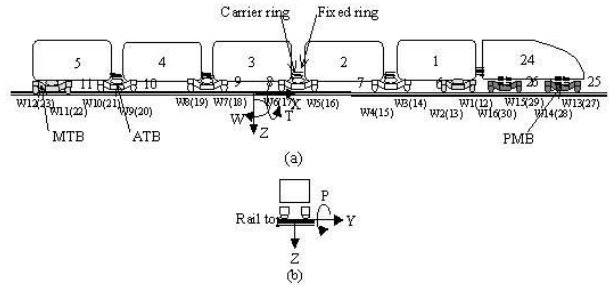


Fig. 2 Model and axis system of railway vehicle

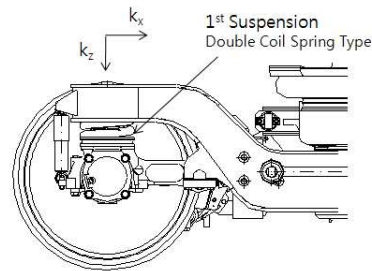


Fig. 3 1st suspension of the motorized trailer bogie

여기서, $C_{pk_{y_i}}$ 및 $C_{pk_{y_j}}$ 는 각각 목적함수 $y_i(x)$ 및 제약조건 $g_j(x)$ 의 공정능력지수이다. $C_{pk_{y_j}}$ 가 2보다 크다는 것은 공정능력이 식스시그마보다 크다는 것을 의미한다. 따라서, 상기한 식 (4)를 식스시그마 강건최적설계로 부르기로 한다.

3. 철도차량 현수장치의 강건최적설계

3.1 철도차량 모델링

철도차량의 동적거동해석을 위한 시스템편성 모델과 좌표계는 Fig. 2와 같다. 차량시스템 편성 모델은 동력차-동력 객차-객차(3대)-동력 객차로 구성하였으며, 대차는 동력차용 동력대차(PMB, Power Motor Bogie) 2대, 동력객차용 동력대차(MTB, Motorized Trailer Bogie) 전후 2대 및 동력 객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차(ATB, Articulated Trailer Bogie) 4대로 구성되어 있다.^(8,9)

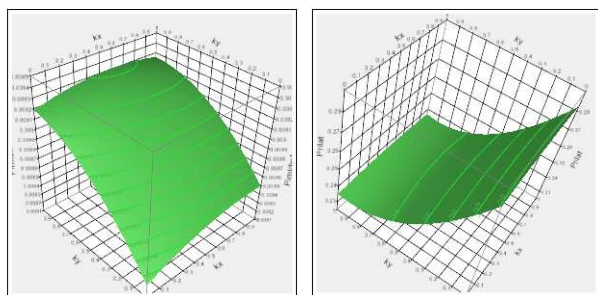
해석대상은 Fig.3 과 같은 동력객차용 동력대차 MTB이다. 철도차량은 휠과 레일의 접촉으로 운행되는 시스템이므로 무엇보다도 휠의 주행강성을 유지시켜주는 현수장치의 탄성계수에 대한 민

Table 1 Dynamic performance index

Condition	Name	Performance index*
Wind on straight track (Transient state)	Imluw1	Unloading on left wheel 1
	Imruw1	Unloading on right wheel 1
	Imldw1	Derailment on left wheel 1
	Imrdw1	Derailment on right wheel 1
Curve track (Quasi-static state)	Culdw1	Derailment on left wheel 1
	Culdw2	Derailment on left wheel 2
	Curuw1	Unloading on right wheel 1
	Curuw2	Unloading on right wheel 2
Straight track	Rilat	Ride comfort in Y direction
	Rivert	Ride comfort in Z direction

Table 2 Formular of response surface model

Name	Formular
Imluw1	$0.0167 - 0.0036k_x - 0.0042k_y - 0.00039k_z + 0.0027k_x^2 + 0.0022k_y^2 - 0.0005k_xk_z$
Imruw1	$0.0248 - 0.0014k_x - 0.00081k_y - 0.00024k_z + 0.001k_x^2 + 0.00047k_y^2 + 0.00017k_yk_z$
Imldw1	$0.0082 + 0.00059k_x + 0.0017k_y - 0.00034k_x^2 - 0.00018k_xk_y - 0.00076k_y^2$
Imrdw1	$0.0064 - 0.0019k_x - 0.00012k_y - 0.000055k_z + 0.0014k_x^2 - 0.00063k_xk_y + 0.00013k_y^2$
Culdw1	$0.045 + 0.01k_x - 0.017k_y - 0.01k_xk_y + 0.0081k_y^2$
Culdw2	$0.054 + 0.031k_x + 0.0086k_y - 0.019k_x^2 - 0.0024k_xk_y - 0.0031k_y^2$
Curuw1	$0.1752 - 0.0065k_x - 0.032k_y - 0.0038k_z + 0.0049k_x^2 - 0.0017k_xk_y + 0.017k_y^2 + 0.0014k_yk_z$
Curuw2	$0.1804 + 0.0072k_x - 0.014k_y - 0.0048k_z - 0.0059k_x^2 + 0.0041k_xk_y + 0.0072k_y^2 + 0.0021k_yk_z$
Rilat	$0.284 + 0.0072k_x - 0.104k_y - 0.0059k_z - 0.0052k_x^2 + 0.058k_y^2$
Rivert	$0.038 + 0.0015k_x - 0.00063k_y + 0.002k_z - 0.0012k_x^2 + 0.00064k_y^2 + 0.00066k_xk_z$



(a) Imdlw1 (b) Rilata

Fig. 4 Response surface models

감도 및 최적화가 우선적으로 진행되어야 한다. 동력대차의 현수장치는 대표적으로 1차 현수장치인 이중코일스프링과 2차 현수장치인 에어스프링으로 구성되어 있으며, 이들 현수장치를 보조하는 여러 가지 오일댐퍼가 장착되어 있다. 본 연구에서는 이들 중 차량의 주행 안전성 및 승차감에 가장 큰 영향을 주는 1차 현수장치인 이중코일스프링의 세 방향 탄성계수 k_x , k_y 및 k_z 를 설계변수로 선정하였다.

설계변수 k_x , k_y 및 k_z 로부터 철도차량의 주행 안전성과 승차감을 나타내는 성능지수는 승차감과 주행안정성에 관련된 총 10개로, Table 1에 정리하였다. 주행안전성과 관련하여 풍력 작용시의 과도상태 및 곡선주행시의 준정상상태에 대하여 탈선지수와 윤중감소비와 같은 8개의 성능지수를 고찰하였다. 여기서, 탈선지수(Derailment Quotient)는 휠에 작용하는 윤중과 횡압의 비를 의미하며 평균 0.8 이하, 최대 1.2 이하로 제한하였으며, 윤중감소비(Unloading Ratio)는 정적 수직력에 대한 동적 수직력의 비로서 국내 철도청 시행규범에 준하였다. 한편, 승차감은 불규칙 레일을 직진주행 할 때 발생하는 수직방향(z-dir.) 및 횡방향(y-dir.) 가속도로 평가하였다.

3.2 완전요인배치법에 의한 반응표면모델

설계변수에 대한 성능지수의 반응표면모델^(10,11)을 작성하기 위하여 완전요인배치법의 3인자 5수준을 고려하여 총 75회의 실험계획을 수립하였다. 성능지수는 철도차량 동적해석 전용 프로그램인 VAMPIRE⁽⁹⁾를 이용하여 계산하였다. 작성된 반응표면모델의 정확도를 고찰하기 위하여 결정계수(Coefficient of Determination)와 수정결정계수(Coefficient of Adjusted Determination)는 모두 0.9를 상회하였다. 이는 작성된 반응표면모델이 원래 모형의 90% 이상을 모사하고 있다는 것을 의미한다.⁽¹¹⁾ Table 2는 각 성능지수에 대하여 완전요인배치법으로 구성된 반응표면모델의 결과를 수식으로 정리한 것이며, Fig. 4는 Imdlw1 및 Rilata를 플롯한 모습이다.

각 성능지수의 반응표면모델에 최대-최소방법을 구하여 최적해를 구하였다. 여기서, 최대-최소방법⁽¹²⁾은 설계자의 최초 요구치와 각 목적함수와 의 차이를 구하여 이 상대편차 중에서 가장 큰 것을 최소화 시키는 방법이다. 그러나, 얻어진 반

Table 3 Process capability index at initial optimum design stage

Name	USL	C'_{pk}
Imluw1	0.01479	6.21
Imruw1	0.02424	6.93
Imldw1	0.00917	1.52
Imrdw1	0.00588	4.93
Culdw1	0.04407	2.84
Culdw2	0.06868	1.13
Curuw1	0.16439	4.23
Curuw2	0.17813	3.46
Rilat	0.03997	1.19
Rivert	0.26182	4.60

Table 4 Process capability index at robust optimization

Dynamic performance index	C_{pk}
Imluw1	4.04
Imruw1	3.62
Imldw1	2.88
Imrdw1	2.88
Culdw1	3.09
Culdw2	3.17
Curuw1	2.88
Curuw2	3.14
Rilat	2.88
Rivert	3.58

응표면모델에 기존의 최적설계로는 설계변수의 변동성을 고려하지 못하므로, 설계변수의 변동성을 고려하려면 식 (4)와 같이 제시한 공정능력지수 기반 강건최적설계로 설계변수의 확률변동에 강건한 목적함수를 구해야 한다.

현 최적해에 대하여 C_{pk} 를 구하였다. Fig. 5는 성능지수 중 Imruw1, Culdw2 및 Rilat에 대한 것으로 좌측편에 있는 그림이 현 최적해에 대한 성능지수의 분포와 C_{pk} 결과이다. C_{pk} 는 각각 1.52, 1.13 및 1.19로서 식 (4)의 제약조건인 $C_{pk_{ij}} \geq 2$ 을 위배한다. 이를 시그마 수준으로 환산⁽¹³⁾하면 4.6, 3.4 및 3.6으로서 모두 식스시그마 미만인 것을 알 수 있다. Table 2는 모든 성능지수의 C_{pk} 를

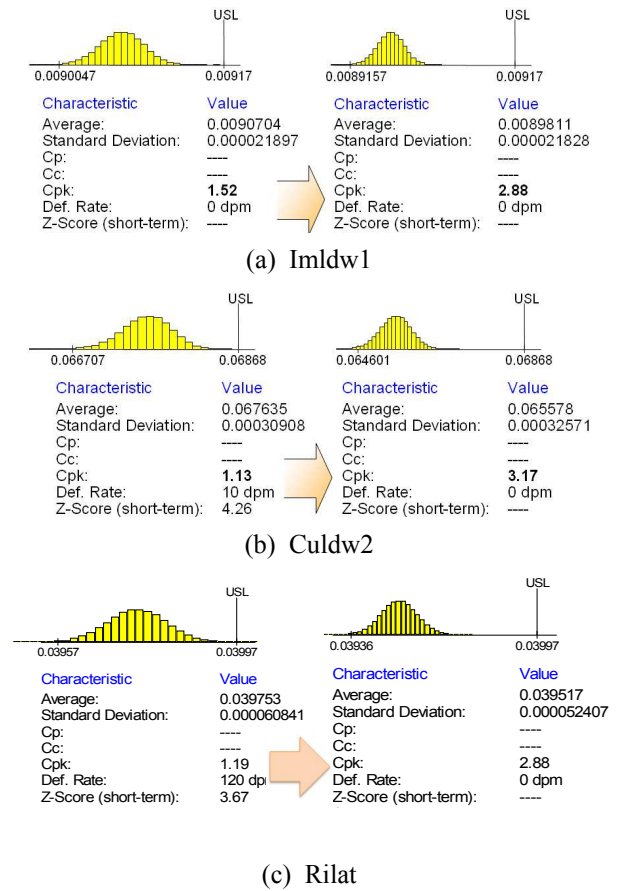


Fig. 5 Comparison of Imldw1, Culdw2 and Rilat at initial optimum design and robust design

구하여 정리한 것으로 상기한 세 성능지수를 제외하고 C_{pk} 가 모두 2 이상이다.

3.3 공정능력지수 기반 강건최적설계

얻어진 최적해에 대한 공정능력계수 C_{pk} 를 계산하기 위하여 USL은 목적함수 전체 분포의 75%로 선정하였으며, 탄성계수의 표준편차는 설계에 주어진 공차 범위를 고려하여 탄성계수 평균의 5%로 정의하였다. 각 성능지수에 대하여 선정된 USL은 Table 3과 같으며, 이를 기반으로 식 (4)의 강건최적설계를 실시하였다.

Fig. 5의 우측편 그림은 초기 최적해에서 제약조건을 위배하였던 성능지수 Imruw1, Culdw2 및 Rilat이 개선된 결과이다. 초기 최적해의 C_{pk} 인 1.52, 1.13 및 1.19가 2.88, 3.17 및 2.88로 모두 제약조건을 만족하였다. Table 4는 10개의 성능지수에 대한 C_{pk} 의 강건최적설계가 완료된 결과이다. Table 3와

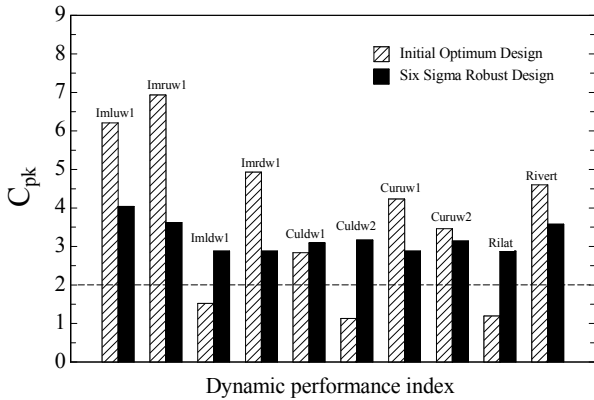


Fig. 6 Comparison of process capability index at initial optimum design and robust design

4의 C_{pk} 를 각 성능지수 별로 비교하여 Fig. 6과 같이 나타내었다. 기존의 최적설계로 얻어진 최적해의 C_{pk} 중 제약조건을 위배하였던 성능지수의 C_{pk} 가 모두 2 이상으로 상승한 것은 물론 그 외 다른 C_{pk} 의 변동성도 현저히 개선되었다.

3.4 고찰

자연공차 혹은 제품 특성치의 변이에 대한 규격공차 또는 허용치의 비율로 정의되는 공정능력 지수는 제품이 규격범위 밖의 특성치를 가질 확률 또는 불량률의 척도로 활용^(6,7,13)되고 있다. 특히, C_{pk} 는 공정 중 개발양산 직전, 틀의 변경 또는 설비변경과 같은 중요 사항이 발생하였을 때 공정에서 나타나는 현실적인 평균과 규격과의 차이와 단기간의 우연적 변동 등을 고려한다. 실제 국내 자동차 업계에서 C_{pk} 가 1.67 이상이면, 즉 시그마 수준으로 5 이상으로 공정을 안정적인 상태로 판단하고 양산을 시작한다.⁽¹⁴⁾

본 연구에서는 실제 생산공정에서 도입하여 운영 중인 C_{pk} 개념을 철도차량 현수장치의 최적설계에 도입하였다. 현수장치의 탄성계수에 의하여 결정되는 주요 성능지수의 변동성을 C_{pk} 로 환산하고, 이를 목적함수로 다루었다. 따라서, 식(4)와 같은 식스시그마 강건최적설계 정식화를 통해 각 성능지수의 변동에 대하여 목적함수의 변동성이 가장 적은 강건 최적해를 찾을 수 있게 된다. 이때, 제약조건으로 설정한 $C_{pk_j} \geq 2$ 는 목적함수의 시그마 수준을 6으로 가정한 것이며, 설계조건에

따라 제약조건을 적절히 변경할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 철도차량 현수장치의 탄성계수의 변동성을 고려하여 목적함수의 변동성을 최소로 하는 강건최적해를 생산현장에서 품질 지수로 적용되고 있었던 공정능력지수를 도입한 식스시그마 강건최적설계기법으로 구하였다.

(1) 설계변수의 확률변동에 따른 목적함수와 제한조건의 평균과 변동을 모두 고려하기 위하여 테일러 전개를 이용한 표준편차 근사화 방법과 공정능력지수를 기반으로 한 식스시그마 강건최적설계기법을 제시하였다.

(2) 철도차량 성능지수에 대하여 기존의 반응표면모델과 최대-최소방법으로 구한 최적해의 C_{pk} 중 일부가 제약조건 $C_{pk} \geq 2$ 을 위배하였다.

(3) 식스시그마 강건최적설계 기법을 통하여 초기 최적해에서 제약조건을 위배하였던 성능지수의 C_{pk} 가 2 이상으로 상승한 것은 물론 그 외 다른 C_{pk} 의 변동성도 개선되었다.

후기

본 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 연구수행에 지원을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kwangki Lee, Tae Hee Lee, Ja Kyum Koo, Kwang Soon Lee, 2000, "Robust Optimization of Automotive Seat by Using Constraint Response Surface Model," *Computational Structural Engineering Institute of Korea, Spring Conference*.
- (2) Chan Kyung Park, Kwangki Lee, Tae Hee Lee, Dae Seung Bae, 2003, "Optimization of a Train Suspension using Kriging Model," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 6, pp. 864-870.
- (3) Koksoy, O. and Doganaksoy, N., 2003, "Joint Optimization of Mean and Standard Deviation Using Response Surface Methods," *Journal of Quality Technology*, Vol. 35, pp. 239-252.

- (4) Vlahinos, A., Kelly, K., Pesaran, A., and Penney, T., 2003, "Empowering Engineers to Generate Six-Sigma Quality Designs," *The First Annual Quality Paper Symposium, American Society for Quality*, Automotive Division, Livonia, MI.
- (5) Parkinson, A., Sorensen, C., and Pourhassan, N., 1993, "A General Approach for Robust Optimal Design," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 115, No. 1, pp. 74~80.
- (6) Kane, V. E., 1986, "Process Capability Indices," *Journal of Quality Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 41~52.
- (7) Greenwich, M. and Jahr-Schaffrath, B.L., 1995, "A Process Incapability Index," *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 12, No. 4, pp. 58~71.
- (8) European Rail Research Institute, 1981-1993, *Application of ISO Standard to Railway Vehicles*, B153/RP1-Rp20.
- (9) AEA Technology, 1998, *VAMPIRE V3.5 Users Manual*.
- (10) Myers, R.M. and Montgomery, D.C., 1995, *Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New York.
- (11) SAS Institute Inc., 2008, *JMP v7.0 Users Manual*.
- (12) Du, Ding-Zhu, and Panos M. Pardalos, 1995, *Minimax and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- (13) Moonsoo Cho and Taejin Lim, 2002, "The Relation between the Process Capability Index and the Quality Assurance Level Considering Various Conditions," *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol. 30, No. 2, pp.130~151
- (14) Kwangmo Yang, Sunil Oh and Kyungsik Kang, 2006, "The Study on the Process Capability Index for Continuously Improvement Quality Safety," *Journal of the Korea safety management & science*, Vol. 8, No. 3, pp.11~25.