

철도차량 현수장치의 탈선에 대한 민감도 연구

The Sensitivity Analysis of Derailment in Suspension Elements of Rail Vehicle

심태웅* 박찬경** 김기환***
Shim, Tae-Woong Park, Chan-Kyoung Kim, Ki-Hwan

Key Words : Derailment Quotient(탈선지수), Response Surface Model(반응 표면 모델), Design of Experiments(실험 계획법), Stepwise Regression(단계적 회귀), Interaction effect(교호작용), Regression Model Function(회귀 모형 함수)

ABSTRACT

This paper is the result of sensitivity analysis of derailment with respect to the selected suspension elements for the rail vehicle. Derailment phenomenon has been explained by the derailment quotient. Thus, the sensitivity of derailment is suggested by a response surface model(RSM) which is a functional relationship between derailment quotient and characteristics of suspension elements. To summarize generation of RSM, we can introduce the procedure of sensitivity analysis as follows. First, to form a RSM, an experiment is performed by a dynamic analysis code, VAMPIRE according to a kind of the design of experiments(DOE). Second, RSM is constructed to a 1st order polynomial and then main effect factors are screened through the stepwise regression. Finally, we can see the sensitivity level through the RSM which only consists of the main effect factors and is expressed by the linear, interaction and quadratic effect terms.

1. 서론

철도 차량은 승객을 목적지까지 탈선사고 없이 수송하기 위해서 안전성을 확보하여야 한다. 이 안전성을 확보하기 위해서 탈선지수가 만족되는지 검토되어진다. 그러므로 탈선지수가 좀더 안정화되도록 차량을 개선하고, 설계하기 위해서는 어떤 현가요소들이 이 지수에 크게 영향을 미치는지 이해되어야 한다. 이는 각 현가요소에 대한 탈선지수의 민감도를 구함으로써 파악될 것이다.

철도 차량의 경우와 같이 만족해야 할 성능지수들과 설계변수가 많은 경우에 있어서 민감도를 구하기 위해서는 통합최적설계의 방법론으로 최근에 빠르게 적용되고 있는 통계적 방법론인 반응 표면 모델을 적용하는 것이 효과적이다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾.

국내에서는 자동차의 현가장치 설계에 있어서 실험 계획법을 이용하여 관심있는 입력의 범위 내에서 입력과 출력의 상관 관계인 회귀 모형 함수를 추정 한 후, 이 회귀 모형 함수로부터 민감도

* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 위촉 연구원(정회원)
** 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 선임 연구원 (정회원)
*** 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 책임 연구원(정회원)

정보를 얻고 있다⁽⁴⁾. 그리고 일본의 Isuzu사와 미국 Chrysler사에서는 다구찌가 제안한 실험계획법으로부터 얻어진 반응 표면 모델을 바탕으로한 민감도 분석을 다변수 다목적 설계의 최적화 문제에 도입하여 각각 최적의 승차감 선정과 자동차의 정상상태와 과도상태를 고려한 최적 조정 안정성 선정에 적용하여 좋은 결과를 얻고 있다⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

본 연구에서는 최근 활발하게 적용되고 있는 반응 표면 모델을 구성하고, 탈선지수와 현수요소 사이의 민감도 분석을 수행하는 과정을 철도 차량에 대해 제시하였다.

2. 차량 모델

실험 계획법을 적용하기위해 철도 차량의 해석과정에 사용된 좌표계는 그림 2.1과 같다. X와 Z 방향은 각각, 좌표계의 중심으로부터 차량의 진행 방향과 연직 하방향으로 설정하였다. 또한 X, Y, 그리고 Z방향에 대한 회전은 각각 T(Roll), P(Pitch), 및 W(Yaw)로 표시하였다⁽⁷⁾.

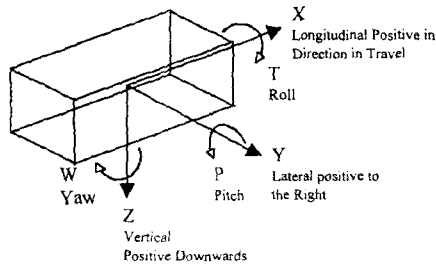


그림 2.1 모델링 좌표계

차량 모델은 그림 2.2와 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. 숫자는 강체의 고유 번호를 말하며, 흰색은 숫자 앞에 W를 붙여 고유 번호와 함께 표시하였다.

차량의 편성과 연결특성상 기관차 1과 나머지 부분은 운동의 영향 관계가 거의 없으므로 민감도의 분석은 MTB와 ATB에 의해 연결되는 현수장치들에 대해서 수행하였다.

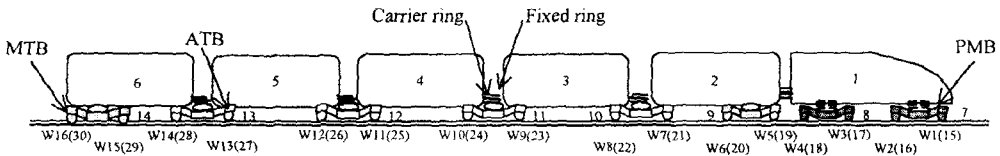


그림 2.2 차량 편성

3. 민감도 분석 개요

현수요소 특성치(인자, Factor)에 대한 민감도 분석의 응답은 주행구간에서 측정된 탈선지수 데이터의 평균과 표준편차로 선택하였다. 평균과 표준편차에 대한 인자들의 민감도를 알 수 있다면 탈선지수의 저주파 응답이나 pick치를 형성하는 고주파 특성에 대한 설계 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 휠 각각보다는 차량 전체의 관점에서 탈선지수의 민감도를 보기 위해서 각 휠에서 측정되는 탈선지수의 평균과 표준편차를 평균과 표준편차별로 합하여 응답으로 정하였다.

다.

응답들과 관심 현가요소들 사이에 실험 계획법을 적용하고, 관심 인자들에 대한 응답의 민감도를 구하기 위하여 반응 표면 모델을 구성하는 과정을 그림. 3.1에 도시하였으며, 전체 과정을 설명하면 다음과 같다.

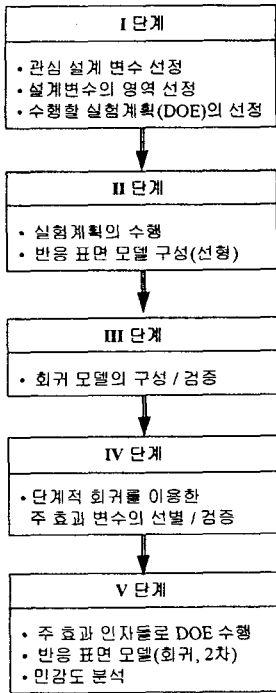


그림 3.1 민감도 분석 과정

I 단계

차량의 설계 초기 단계에서 휠셀, 대차, 그리고 객차를 연결하는 현수장치들로 설계 변수들을 선정하고 해당 설계 변수의 설계 가능 영역을 설정한다. 그리고 설계 가능 영역에서 수준(Level), 인자 및 응답의 함수관계의 차수를 고려하여 수행할 실험계획을 선정한다.

II 단계

I 단계에서 선정된 실험계획을 수행하고, 인자와 응답간의 전반적인 관계를 파악하기 위해서 반응 표면 모델의 수학적 함수 형태를 선형으로 고려한다.

III 단계

a) 회귀 모델의 구성

회귀 모델은, 최소자승법을 이용하여 잔차의 제곱합을 최소화 하는 인자의 계수를 얻을 수 있으며, 이 계수들의 크기는 파레토 플랏(Pareto Plot)⁽⁸⁾으로 나타낼 수 있다.

b) 모델의 검증⁽¹⁾

회귀모델의 신뢰성을 검증하기 위해서 결정계수를 도입하며, 결정계수는 불필요한 인자에 대해서도 값이 증가하는 경향을 보이므로, 이런 단점을 보완하기 위해서 수정결정계수와 함께 신뢰성을 검증한다.

결정계수는 총 제곱합(SST, Total sum of squares)으로 회귀 제곱합(SSR, Regression sum of squares)을 나눈 값이며, 이를 총 제곱합과 잔차 제곱합(SSE, Residual sum of squares)으로 표시하면 식 (2-1)과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2-1)$$

여기서 $SST=SSR+SSE$ 의 관계가 있으며, SST, SSR, 그리고 SSE는 식 (2-2)~(2-4)와 같이 계산된다.

$$SST = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \quad (2-2)$$

$$SSR = \mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \quad (2-3)$$

$$SSE = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (2-4)$$

여기서 n 은 전체 실험 횟수이며, \mathbf{y} , \mathbf{X} , 그리고 \mathbf{b} 는 각각 실험치, 인자의 수준 행렬, 그리고 회귀모델의 계수를 의미한다.

수정결정계수 R^2_{adj} 는 식 (2-5)와 같이 표현된다.

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SSE/(n-p)}{SST/(n-1)} \quad (2-5)$$

여기서 p 는 반응 표면 모델을 구성할 계수의 갯수이다.

IV 단계

III 단계에서 얻어진 반응 표면 모델에서 중요하지않은 변수들을 찾아내서 모델에서 제거할 수 있다면 모델의 오차(Error)를 제거하여 정확도를 향상시킬 수 있어 신뢰성이 큰 모델을 얻을 수 있다. 변수 선택법 중에서는 일반적으로 단계적 회귀를 결합하여 부분 F검정이나, t검정 등을 사용하여 불필요한 인자를 소거하는 방법을 적용한다.

V 단계

주요 인자들로부터 I~IV단계에서와 같은 과정을 거쳐 실험계획을 수행하고, 응답에 대해 인자의 2차항까지 고려된 반응 표면 모델을 구성하면 설계인자에 대한 좀더 자세한 민감도 정보를 얻을 수 있다.

4. 민감도 분석

4.1 인자 및 영역의 선정과 다구짜 실험 계획법

관심 인자와 해당 영역(수준)을 표 4.1에 정리하였다. 이 수준들은 모델링 값을 기준으로 제작 가능한 범위로서 변동폭을 기준으로 각 인자에 대해 2 수준으로 하고, Taguchi L₃₂⁽⁹⁾를 이용하여 각 인자들의 조합에 대해 실험 계획을 수행하였다.

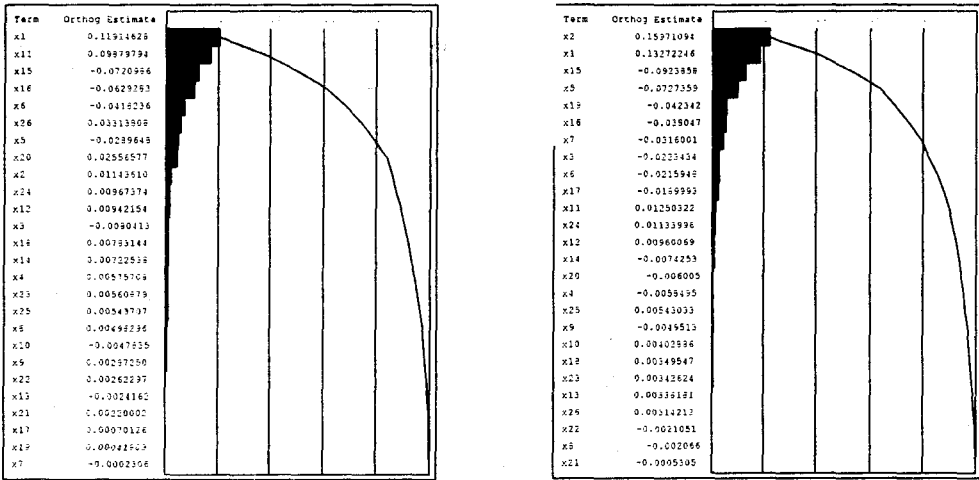
표 4.1 인자의 수준

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	0.0057296	0.0085944	0.007162			Kp	
5	0.9784	1.3453	1.223		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		안티 요 오일 댐퍼	첫 번째 기울기	
12	0.42	0.78	0.6			두 번째 기울기	
13	0.28	0.52	0.4			세 번째 기울기	
14	4.9	9.1	7.0			네 번째 기울기	
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	첫 번째 기울기	
20	2.94	5.46	4.2			두 번째 기울기	
21	1.68	3.12	2.4			세 번째 기울기	
22	3.192	5.928	4.56			네 번째 기울기	
23	31.5	58.5	45.0		차간 연결 장치	고정링 - 이동링	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			

4.2 회귀 모델의 구성과 검증

그림 4.1에 파레토 플랏으로 도시한 탈선지수 평균에 대한 회귀모델의 신뢰도는 결정계수 R²

로, 99.32%로 실제모델을 설명하고 있는 것으로 나타났다. 이 플랏으로부터 탈선지수의 평균과 표준편차 응답에 대한 인자들의 영향정도를 선형적인 관계로 전체 인자에 대해서 파악할 수 있으며, 변수들의 기여도를 누적하여 파악할 수도 있다. 탈선지수의 평균에 대한 영향 정도는 인자 x1, x11, 그리고 x15의 누적 효과를 고려하면 50%임을 알 수 있으며, 표준편차의 경우는 인자 x2, x1, 그리고 x15가 50%정도로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이들 각각에 대해서 인자 x1 즉, 탄성조인트의 x 방향 강성, Kx의 영향이 공통적으로 크게 나타남을 알 수 있다.



(a) 탈선지수의 평균

(b) 탈선지수의 표준편차

그림 4.1 RSM 계수의 파레토 플랏

4.3 단계적 회귀를 통한 주효과 변수의 선별 및 검증

4.2절에서 구해진 반응 표면 모델에 단계적 회귀를 적용하여 중요하지 않은 인자들을 제거한 응답의 신뢰지수의 변화를 표 4.2에 정리하였다. R^2 와 R^2_{adj} 값이 대체적으로 90% 수준을 보이고 있으며, 단계 회귀 후 R^2_{adj} 값은 오히려 증가하여 선별에 의한 불필요한 인자의 제거라는 관점에서 보는 모델의 정도가 향상되었음을 알 수 있다.

표 4.2 단계적 회귀모델 전후의 신뢰지수 변화

응답	신뢰지수(%)	초기 RSM		단계적 회귀후의 RSM	
		R^2	R^2_{adj}	R^2	R^2_{adj}
탈선지수의 평균		99.07	95.02	97.69	96.79
탈선지수의 표준편차		99.32	96.37	98.78	98.05

단계적 회귀 후 반응 표면 모델을 주효과 인자로 이루어진 1차 다항식으로 표현하면 표 4.3과 같다. objdm과 objdd에 공통으로 영향을 미치는 인자들의 부호가 같아, trade-off현상은 보이지 않고 있으며, x2(탄성조인트 Ky)와 x5(MTB 1차 이중 코일 스프링)의 경우는 objdm에서는 거의 영향을 미치지 못하나 objdd에는 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

표 4.3 각 인자의 RSM에 대한 민감도 및 기여도

탈선지수 평균 RSM (objdm)에 대한 민감도		
	1차 다항식 $objdm = 0.1191x1 + 0.0988x11 - 0.0721x15 - 0.0629x16 - 0.0418x6 + 0.0331x26 - 0.0289x5 + 0.0256x20 + 0.0114x2$	
인자의 기여도(%)	71.47%	28.53%
탈선지수 표준편차 RSM (objdd)에 대한 민감도		
	1차 다항식 $objdd = 0.1597x2 + 0.1327x1 - 0.0924x15 - 0.0727x5 - 0.0423x19 - 0.0380x16 - 0.0316x7 - 0.0223x3 - 0.0216x6 - 0.0190x17 - 0.0125x11 + 0.0114x24$	
인자의 기여도(%)	72.34%	27.66%

표 4.3을 참고하여, 각 반응 표면 모델에 70% 수준 이상까지 영향을 미치는 인자의 해당 현수요소를 표 4.4에 정리하였다. 전체 응답에 대한 영향이 ATB 현수장치보다는 주로 MTB 현수장치에서 크게 나타나고 있다.

표 4.4 RSM에 70%이상까지 영향을 미치는 인자의 해당 현수요소

인자 번호	해당 현수장치		기여도 순위		
			평균 RSM	표준편차 RSM	
1	MTB 1차	탄성조인트	Kx	①	②
2			Ky		①
5		이중 코일 스프링	Kz		④
11	MTB 2차	안티 요 오일 댐퍼	첫 번째 기울기	②	
15	ATB 1차	2중 코일 스프링	Kz	③	③
16		수직 오일 댐퍼	Cz	④	

4.4 주효과 인자의 2차항이 고려된 민감도 분석

2차 다항식으로 반응 표면 모델을 표현하기 위해서 실험 계획법 중의 하나인 중심 합성 계획법(Central Composite Faced Design)을 적용할 수 있다. 중심 합성 계획법은 2^k (k는 인자수) 요인 배치법의 단점인 반응량의 2차항 특성을 감지할 수 있도록 하므로, 주효과 인자들에 대해 1차 및 2차항의 민감도와 교호작용을 분석할 수 있다. 중심 합성 계획법의 수행과 2차 반응 표면 모델의 생성은 OPTIMUS⁽⁹⁾를 사용하였다. 2차항 특성을 가진 반응 표면 모델을 탈선지수 표준편차의 경우에만 한하여 설명한다.

4.3절에서 탈선지수 표준편차(objdd)는 4개의 주효과 인자가 전체 기여도의 72.34%를 차지하는 것으로 분석되었으며, 이 인자들에 대해서 2차항까지 고려된 반응 표면 모델을 그림 4.3 도시하였다. 선형 특성 부분에서는 인자 x2(탄성 조인트의 Ky)가, 교호작용 부분에서는 x1(탄성 조인트의 Kx)과 x2의 곱이, 그리고 2차항 특성에서는 x2가 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

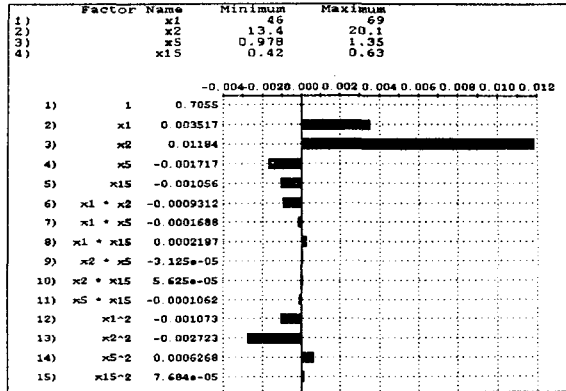


그림 4.3 탈선지수 표준편차의 반응 표면 모델

그림 4.4와 4.5는 각각 반응 표면 모델과 인자에 대한 관계를 2D 및 3D-plot으로 보여주고 있다. 그림 4.4로부터 인자 x15의 변화효과는 인자 x1, x2, 그리고 x3의 경우와 달리 선형성에 가깝게 나타나고 있음을 알 수 있다. 3D-plot의 경우는 교호작용이 크게 일어나고 있는 인자 x1에 대한 x2, x5, 그리고 x15의 경우에 대해서 살펴보았다.

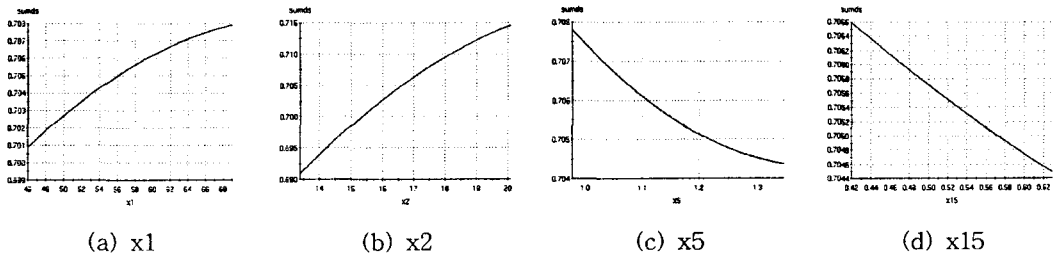


그림 4.4 반응 표면의 2D-plot

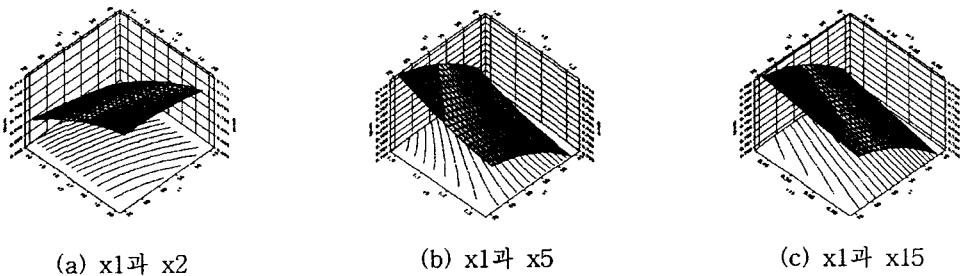


그림 4.5 반응 표면의 3D-plot

5. 결론

관심 현가요소들에 대해 Taguchi가 제안한 직교배열에 의한 실험계획을 수행하고, 단계적 회귀를 적용하여 주효과 설계인자를 선별하였다. 이들 인자에 대해 선형, 교호작용 및 2차 곡면 특성까지 고려한 반응 표면 모델을 구성하였다.

통계적 회귀를 통해 주효과 인자의 관심 영역에 대해 탈선지수와 함수 관계를 형성하여, 인자

들의 영역 내 특정 값에 대해서 다시 해석 코드를 사용하지 않고도 탈선지수의 값을 근사할 수 있는 수학적 모델을 구성하였다. 이로부터 인자의 관심 구간 전역에서의 민감도를 계산할 수 있게 되었다.

민감도 정보를 얻는 과정은 철도차량의 최적설계에 도입되어 설계영역에서의 전역 최적치를 구하는 선행 단계로 사용될 수 있다.

다변수 다목적 함수로 구성된 최적설계 문제의 해를 찾는 통합최적설계 방법론에 사용되는 반응 표면 모델을 철도 차량 시스템에 대해 형성하여 탈선 안전성에 대한 각 현수장치들의 민감도를 분석하는 과정을 제안하였다.

후기

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되는 G7 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. Myers, R.M. and Montgomery, D.C.(1995), "Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley & Sons, New York.
2. 박성현(1999), "현대실험 계획법", 민영사.
3. 박성현(1998), "회귀분석", 민영사.
4. 이광기, 모종운, 양육진(1998), "고속 안정성을 고려한 속업소버 최적 설계", 한국자동차공학회는 문집, 제6권 제4호, pp.1~8.
5. Sakai, T.(1991), "The Optimum Designing of Riding Comfort by Application of Taguchi Methods", SAE 912673.
6. Lee, Y.L.(1996), "Vehicle Handling Design Process Using DOE", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 17, No. 1.
7. BRR(1997), "Vampire User's Manual".
8. SAS, Inc(1998), "JMP User's Guide".
9. LMS(1998), "OPTIMUS User's Manual".