

고속전철의 동적특성에 따른 효율적인 현가장치 최적화 방안 연구

박찬경*·김영국*·현승호**

A Study on the Efficient Optimization of Suspension Characteristics for Dynamic Behavior of the High Speed Train

Chankyong Park, Youngguk Kim and Seungho Hyun

Key Words: Railway Dynamics(철도차량 동역학), Experimental Design(실험계획), Response Surface Model(반응표면모델), Suspension(현가장치), Optimization(최적화)

Abstract

Computer modeling is essential to evaluate possible design of suspension for a railway vehicles. By creating a simulation, the engineers are able to assess the feasibility of a given design and change the design factors 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 turned to surrogate modeling. A surrogate model is essentially a regression performed on a data sampling of the simulation. In the most general sense, metamodels(surrogate model) take the form $y(x)=f(x)+\epsilon$, where $y(x)$ is the true simulation output, $f(x)$ is the metamodel output, and ϵ is the error between the two. In this paper, a second order polynomial equation is partially used as a metamodel to represent the forty-six dynamic performances for high speed train. The number of factors as design variables of the metamodel is twenty-nine, which are composed the dynamic characteristics of suspension. This metamodel is used to search the optimum values of suspension characteristics which minimize the dynamic responses for high speed train. This optimization is a multi-objective problem which have many design variables. This paper shows that the response surface model which is made through the design of analysis of computer experiments method is very efficient to solve this complex optimization problem.

기호설명

R^2 : 결정계수

R^2_{adj} : 수정 결정계수

1. 서론

철도차량은 동적 질량요소로서 차체, 대차 및 휠 셀으로 크게 고려되고, 이를 연결하는 현가장치로서 차체와 대차간에 1차와 대차와 휠 셀간에

2차 현가장치로 구성되며 이들 현수장치들은 탄성 및 댐핑요소들로 구성된다. 이러한 탄성요소들은 철도차량의 안전성과 승차감에 중요한 영향을 미치는 인자들이다. 하지만 철도차량의 현가장치는 초기 설계단계에서 원하는 성능을 얻기 위한 기준 설계값의 선정이 어려우며, 특히 여러가지의 성능을 동시에 만족시키는 설계를 하기 위해서는 무수히 많은 설계변수가 있을 수 있으므로 주어진 짧은 시간 내에 정확하고 효과적인 설계를 위해서는 새로운 설계방향의 제시가 필요하며 이에 대한 연구가 이루어져야 한다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원

따라서 철도차량 현가장치의 설계는 만족해야 할 설계변수와 성능들이 많이 존재하기 때문에 통합 최적설계의 방법론으로 최근에 빠르게 적용되고 있는 통계적 방법론인 반응표면 모델을 적용하는 것이 효과적이다.⁽¹⁻³⁾ 이에 대한 적용사례로서 NASA 에서는 유한 요소모델과 전산유체 동력학의 통합최적설계에 효과적으로 적용을 하고 있으며⁽⁴⁾, 벨기에의 LMS에서는 기어박스 경량화, 반도체 공정 최적화 및 자동차의 NVH 분야에 적용하여 좋은 결과를 얻고 있다.⁽⁵⁾ GM에서도 VAD와 CAE를 통합한 구조해석, 충돌해석, 공기역학, 차량동역학, 내구해석 등의 통합 최적설계에 적용을 하고 있다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 한국형 고속전철 기술개발에서 개발되는 시계차량의 안전성, 안정성 및 승차감의 향상을 위하여 대차시스템의 1,2차 현가장치에 대한 최적설계를 수행 동역학 시뮬레이션에 의하여 수행하였다.

2. 반응표면모델

2.1 차량 동적 모델링

철도 차량의 동적 거동 해석은 영국 철도 연구소에서 개발된 철도 차량 전용 해석 프로그램인 Vampire를 이용하여 수행하였다.⁽⁷⁾ 해석을 위한 시스템 편성 모델과 좌표계는 다음 Fig. 1과 같다.

차량시스템 편성모델은 동력차 + 동력객차 + 객차(3대) + 동력 객차로 구성하였으며 대차는 Fig. 2와 같이 동력차용 동력대차 (PMB, Power Motor Bogie) 2대, 동력객차용 동력대차 (MTB, Motorized Trailer Bogie) 전후 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차 (ATB, Articulated Trailer Bogie) 4대로 구성되어 있다. 또한 편성모델의 동적특성치는 Table 1에 관성 특성치와 Table 2 에 각 대차에 대한 현가장치의 동적 특성치를 나타내었다.

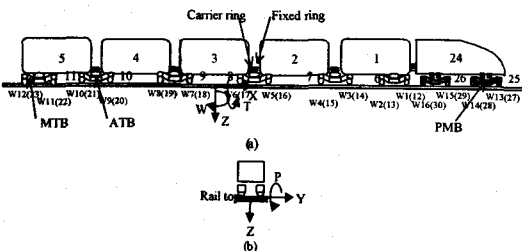
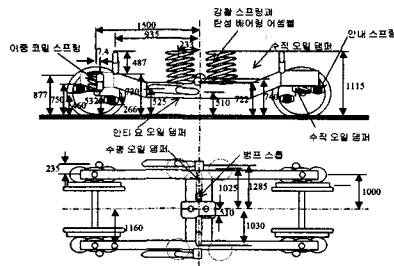
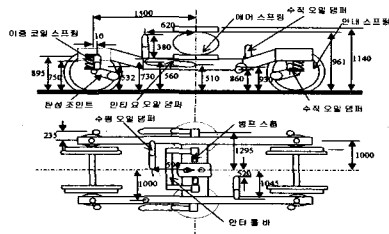


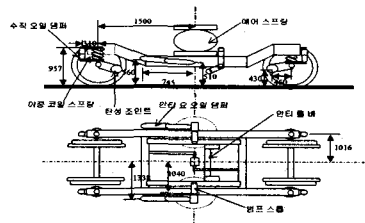
Fig. 1 Train model and axis system



(a) Motorized Bogie



(b) Motorized Trailer Bogie



(c) Articulated Trailer Bogie

Fig. 2 Bogie systems

Table 1 Characteristics of Inertia

구분	무게중심 (높이,m)	중량 (Mg)	관성 모멘트(Mg-m ²)			비고
			Ixx	Iyy	Izz	
동력객차	1.535	42.758	55.57	1643.62	1697.07	1대
객차차체	1.623	25.673	33.36	955.29	955.29	1대
객차차체	1.627	26.373	34.27	981.34	981.34	1대
객차차체	1.623	26.305	34.19	978.81	978.81	1대
동력객차	1.535	42.648	55.425	1639.39	1692.7	1대
동력객차대차	0.56	3.076	2.07	3.26	3.86	2대
관절대차	0.56	3.018	2.03	3.2	3.79	4대
휠셋	0.46	2.104	1.03	0.0008	1.03	16개
동력차	1.72	54.960	59.4	1132.8	1112.9	1대
동력대차	0.56	2.420	1.645	2.593	3.068	2대

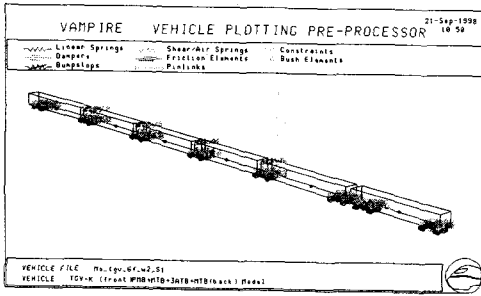


Fig. 3. Vampire Train Model

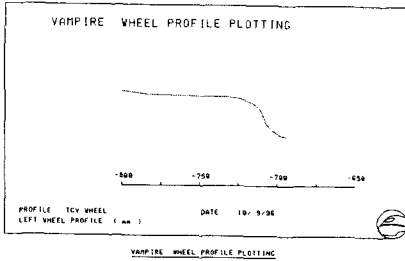


Fig. 4 Wheel Profile Model

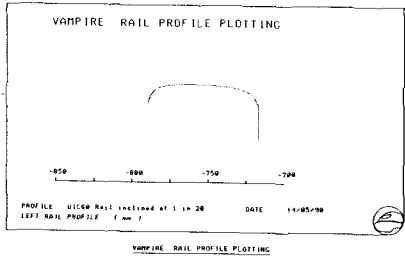


Fig. 5 Rail Profile Model

상기 특성치를 이용하여 Vampire의 열차 모델을 Fig. 3과 같이 구성하였다.

철도차량 동특성 해석은 휠과 레일의 상호작용이 중요하다. 따라서 휠과 레일의 형상을 규격에 따라 모델링 하여야 하며 휠 모델은 경부고속철도차량(KTX) 열차의 형상과 동일하여 사용 규격인 NF F 01-112 따라 프로파일 형상을 모델링 하였으며 Fig. 4와 같다.

레일 모델링은 경부고속전철용 신선에 적용하고 있는 UIC 60 레일 따라 프로파일 형상을 모델링 하였으며 Fig. 5와 같다.

2.2 실험계획에 의한 반응표면모델

상기 모델링을 이용하여 고속전철 차량의 동적

안전성과 안정성 및 승차감을 Vampire로 계산할 수 있다. 따라서 전산 실험계획을 수행할 수 있으며 이에 따른 설계변수는 현가장치의 동적 특성치로서 Table 5.와 같이 총 29개의 변수로 구성할 수 있다. 성능지수는 승차감의 경우 각 객차에서의 Y 및 Z 방향의 진동가속도 10개, 안전성의 경우 각 휠의 탈선계수 12개, 윤증감소 12개로 총 24개, 안정성은 각 휠의 Y방향 변위로서 12개를 Table 6.과 같이 설정할 수 있다.

승차감은 철도차량에 적용하는 규격인 UIC514 및 ISO 2631에 의하여 설정하였으며, 안전성은 UIC 518에 의해 설정된 값을 이용하였다.

Table 3 Design Variables

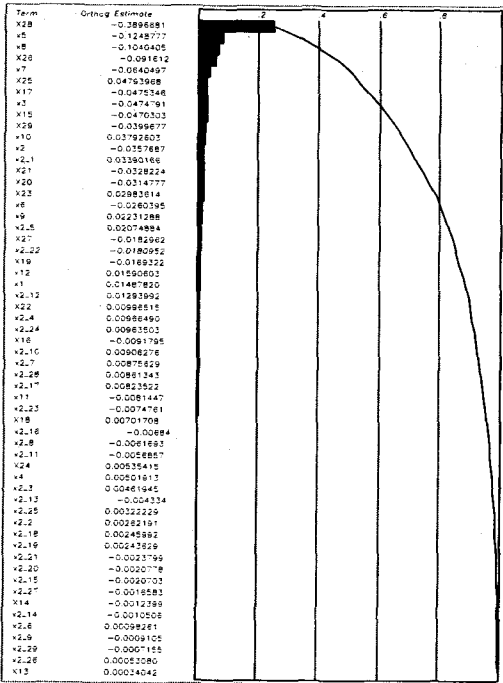
설계 변수 기호	수준(level)		초기 모델링 값	해당 현수장치			
	최소값	최대값					
X1	39.56	59.34	49.45	MTB	탄성조인트	Kx,kz	
X2	11.524	17.286	14.405			Ky	
X3	0.052	0.078	0.0653	ATB		Kt,kw	
X4	0.00572	0.00859	0.0072	1차		Kp	
X5	1.0764	1.6146	1.3453	MTB	2중 코일 스프링	Kz	
X6	0.0056	0.0084	0.007	1차	수직 오일 댐퍼	Cz	
X7	0.1386	0.1694	0.154		에어 스프링	Kx,ky	
X8	0.237	0.356	0.29632			Kz	
X9	0.0112	0.0168	0.014		수직 댐퍼	Cz	
X10	0.0196	0.02844	0.0237	MTB	수평 댐퍼	Cx	
X11	6.16	9.24	7.7007	2차	안티 요 오일 댐퍼 (특성 고선 기울기)	첫번째 두번째 세번째 네번째	
X12	0.48	0.72	0.6				
X13	0.32	0.48	0.4				
X14	5.6	8.4	7.0				
X15	0.504	0.756	0.62964	ATB	코일스프링	Kz	
X16	0.005	0.007	0.006	1차	수직 댐퍼	Cz	
X17	0.1683	0.2057	0.187		에어 스프링	Kx,ky	
X18	0.2085	0.313	0.26			Kz	
X19	6.97	10.45	8.712	ATB	안티요	첫번째	
X20	2.65	3.98	3.318	2차	오일 댐퍼 (특성 고선 기울기)	두번째 세번째 네번째	
X21	1.92	2.88	2.4				
X22	2.88	4.32	3.6				
X23	36	54	45.0			Kx	
X24	89.2	133.8	111.5	차간 연결 장치	고정링 이동링	Ky	
X25	61.3	91.96	76.63			Kz	
X26	1.287	1.93	1.61			Kt	
X27	0.021	0.031	0.026			Kw	
X28	3.04	4.56	3.8	MTB	2차	Anti-Roll Bar	Kt
X29	2.64	3.96	3.3	ATB	2차		Kt

Table 4 Performance Index

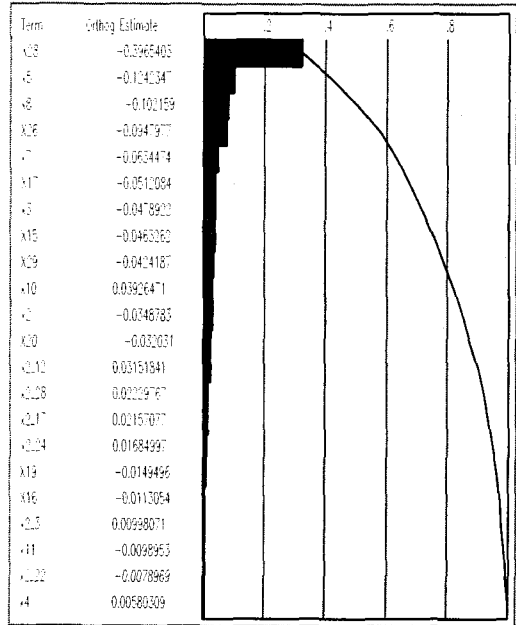
성능지수	성능지수 기호
차체의 좌우방향 가속도	r1 ~r5
차체의 상하방향 가속도	r6 ~r10
W05 - W16까지 탈선계수	d1 ~d12
W05 - W16까지 윤증감소	wu1 ~wu12
W05 - W16까지 좌우변위	st1 ~st12

실험계획은 29개의 설계변수를 L32 직교배열표를 이용하여 총 33회의 실험계획과 반응표면모델의 신뢰성 향상을 위하여 -0.5와 0.5를 추가 적용하여 D-Optimal에 의한 33회의 실험계획을 추가하여 총 66회의 시뮬레이션을 수행하였다⁽⁸⁾.

설계변수의 성능지수에 대한 민감도 분석을 위하여 수행된 결과를 설계변수에 대한 성능지수 표로 작성하고 회귀분석을 실시하였으며 그중 r1에 대한 설계변수의 민감도를 살펴보면 Fig. 5와 같다. 여기서 (a)는 전체설계변수에 대한 효과를 나타내고 있으며 여기에는 영향이 없는 인자와 r1을 설명하는데 있어서 저해한 요소들이 존재할 수 있다 따라서 이를 주요인자로 선별하면 (b)와 같이 도출 할 수 있다.⁽⁹⁾



(a) Effect of Total Design Variables before Screening for r1



(b) Main Effects of Design Variables after Screening for r1

Fig. 5 Sensitivity of Design Variables for r1

Fig. 5에서 보듯이 처음 2차항까지 고려한 58개의 설계변수 중에서 Screening후에는 22개의 설계변수로 줄일 수 있었으며 이때 계산된 R^2 와 R^2_{adj} 값은 각각 0.99184와 0.9877로 계산되어 졌으며⁽¹⁰⁾ 신뢰성이 보장될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 r1의 경우와 동일하게 각 성능지수에 대한 설계변수들의 민감도 분석을 통하여 상호작용 요소를 제외한 각 설계변수의 2차항까지 고려한 반응표면 모델을 생성 할 수 있었으며 이를 이용하여 최적설계를 수행하였다.

3. 최적설계

2장에서 완성된 반응표면 모델을 이용하여 (-1,1)의 구간으로 정규화 시킨 성능지수의 합이 최소가 되도록 제한조건(Constraint)에 따른 단계별 최적화를 수행하였다. 여기서 단계별이란 전체 목적함수를 성능지수의 합으로 구성하였기 때문에 각각의 성능지수들은 상대적으로 초기 성능지수보다 커지는 경향을 나타낼 수 있으며 이를 방지하기 위하여 단계별로 초기성능보다 커진 지수에 대하여 제한조건을 추가한다는 의미를 두었다. 이러한 방법은 초기에 각각의 성능지수에 제한조건을 두고 한번의 최적화 수행을 함으로서

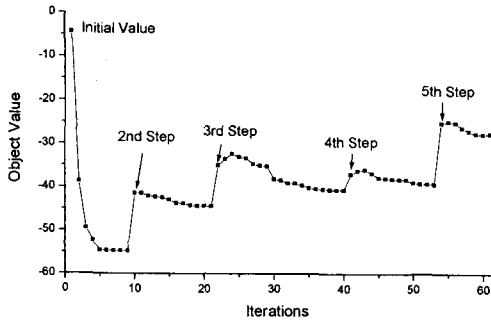


Fig. 6 Result of Object Values during Optimization
 발생하는 국부 해를 추종하는 단점을 향상시킬 수 있으며 수 차례의 반복 수행으로 최적화 수행 시간이 다소 필요하다는 단점도 갖고 있다.

본 연구는 5번은 단계별 최적화를 Variable Matric Method를 이용하여 수행하였으며⁽¹¹⁾ 각 단계별 성능지수 합의 추이를 살펴보면 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 보듯이 각 단계(Step)의 초기에 목적값(Object Value)이 급격히 커지는 경향을 볼 수 있으며 이는 각 단계에서 추가된 제한조건의 영향으로서 이에 대한 효과가 명확히 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 성능지수의 합을 정규화된 값을 기준으로 초기 -4.36에서 최적화 후 -27.7로 최소화 시키고 있음을 알 수 있다.

Fig.6은 46개의 성능지수 합으로서 나타내고 있으며 이를 각각의 성능지수에 대한 향상정도로 살펴보면 Fig. 7과 같다.

Fig. 7은 각 성능지수(Performance Index)들이 초기값보다 작은 값을 나타내고 있음을 볼 수 있으며, 운중감소(W1 ~ W12)부분이 상대적으로

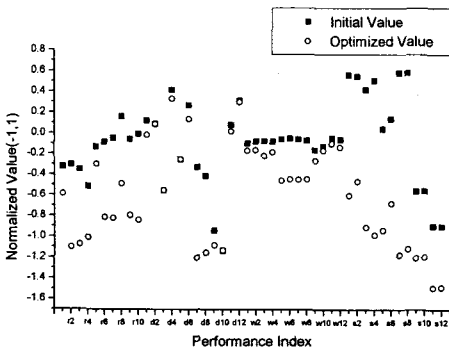


Fig. 7 Results of Performance Index Values after Optimizing for RSM

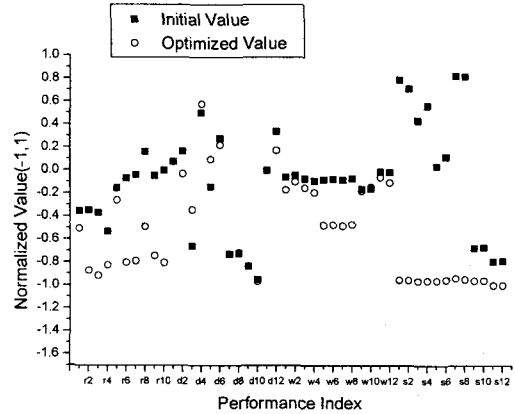


Fig. 8 Results of Performance Index Values after Optimizing for Simulation(Vampire)
 최소화되는 정도가 작은 것을 알 수 있다.

이를 실제 시뮬레이션 결과와 비교하면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서는 탈선계수중 일부분인 d3~d5에서 다소 초기값보다 커지는 경향을 나타내고 있으며 이는 반응표면 모델 생성시 해당 성능지수에 대한 R^2 와 R^2_{adj} 값이 0.8수준에서 결정되었기 때문이며 향후 이에 대한 상세한 보완이 이루어질 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서 수행된 2차항까지 고려된 반응표면모델에 의한 최적화는 전체적으로 실제 대상인 전산 시뮬레이션에 의한 성능지수의 합으로 볼 때 -3.73에서 -24.01로 최소화됨을 나타내고 있으며, 반응표면 모델에 의한 결과값인 -4.36, -27.7과 비교시 본 연구의 반응표면 모델이 유효한 것으로 판단된다.

따라서 최종 최적화된 설계변수의 결과는 Table 7과 같다.

4. 결론

이상의 결과에서 본 연구는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고속전철의 현가장치 최적설계를 반응표면 모델을 이용하여 효율적으로 수행할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 다설계변수, 다목적함수인 경우에 반응표면 모델은 전체적으로는 유효하게 이용될 수 있으며 국부적인 신뢰성 저하 발생은 고차항이나 비선형성을 고려할 수 있는 알고리즘을 고려하여 그 정도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5 Optimized Design Variables

설계변수기호	초기 설계변수값	최적화된 설계변수 값
X1	49.45	49.01998
X2	14.405	13.35625
X3	0.0653	0.071375
X4	0.0072	0.007365
X5	1.3453	1.404092
X6	0.007	0.007998
X7	0.154	0.158716
X8	0.29632	0.249891
X9	0.014	0.011836
X10	0.0237	0.023025
X11	7.7007	8.752762
X12	0.6	0.558188
X13	0.4	0.425571
X14	7.0	7.43085
X15	0.62964	0.713033
X16	0.006	0.006151
X17	0.187	0.169196
X18	0.26	0.273661
X19	8.712	9.453
X20	3.318	3.722113
X21	2.4	2.618226
X22	3.6	4.315748
X23	45.0	40.93969
X24	111.5	89.21068
X25	76.63	63.92095
X26	1.61	1.45391
X27	0.026	0.029852
X28	3.8	4.054746
X29	3.3	3.590684

후기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발 사업의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 박성현, 1995, 회귀분석, 민영사.
- (2) 박성현, 1995, 현대실험계획, 민영사.
- (3) Myers, Montgomery, 1995, Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, New York.
- (4) Dudley, 1995, Multidisciplinary Optimization of the High-Speed Civil Transport, AIAA Paper

95-1024.

- (5) Nick Tzannetakis, 1997, Numerical Methods for Modeling and Optimization of Noise Emission Applications, ASME Symposium in Acoustics and Noise Software, Detroit, MI, USA.
- (6) Bennet, 1998, Issues in Industrial Multi-disciplinary Optimization, AIAA Paper 98-4737.
- (7) BRR, 1998, VAMPIRE Users Manual.
- (8) LMS, 1998, OPTIMUS Users Guide.
- (9) 박찬경, 이광기, 2000, 반응표면모델에 의한 철도차량 대차의 탄성조인트 최적설계, 대한기계학회 논문집 Arnjs, 제24권 제3호, pp66 1~666.
- (10) SAS Institute Inc. 1995, JMP V.3 Manual.
- (11) Phoenix Integration Inc., 2001, ModelCenter v3.0 Users Guide