

## J-선회 조종성능을 고려한 승용차 현가장치의 최적화 기법

이상범<sup>†</sup> · 이춘승<sup>\*</sup> · 임홍재<sup>\*\*</sup> · 김민수<sup>\*\*</sup>  
 (2003년 6월 27일 접수, 2004년 2월 3일 심사완료)

### Optimization Technique of Passenger Car Suspension System Considering J-Turn Handling Performances

Sang Beom Lee, Chun Seung Lee, Hong Jae Yim and Min Soo Kim

**Key Words:** Approximate Optimal Design(근사최적설계), Design of Experiments(실험계획법), J-turn Simulation(J-선회 시뮬레이션), Vehicle Suspension System(차량 현가장치)

#### Abstract

The purpose of this paper is to develop a systematic design method for the suspension system hard points and compliance elements, which have great influence on the handling stability of a vehicle. In this paper, a method to optimize J-turn responses is presented based on the principles of design of experiments, multi-body dynamic analysis and optimum design technique. The design variables associated with the J-turn maneuver are selected through the experimental design sensitivity analysis using the perturbation method. An objective function is defined as an approximate function for the J-turn characteristics using the TSA(Taylor series approximation). The values of the design variables, which make the optimized J-turn characteristics, are obtained using the conjugate gradient method. The result of the J-turn simulation shows that the optimized vehicle has more improved handling stability than the original vehicle.

#### 1. 서 론

현가장치는 노면으로부터 변위 입력과 타이어의 회전에 의한 진동을 흡수하여 차체로의 진동전달을 억제함으로써 승차감을 향상시키고 또한 조종안정성을 확보하는 역할을 한다.<sup>(1)</sup>

현가장치 설계는 크게 동역학적 설계와 기구학적 설계로 나뉘는데, 동역학적 설계는 주로 승차감과 관련된 차량의 성능을 향상시키기 위해, 타이어 휠의 질량, 스프링의 강성계수와 감쇠계수 등을 결정하는 것이다. 일반적으로 차량을 설계할

때는 차량의 기본 제원을 결정하고, 정해진 제원 범위 내에서 각 현가부품의 조인트 위치를 결정하는 기구학적 설계를 하며, 또한 그 위치에서 각 부품의 질량과 동적계수들을 결정하는 동역학적 설계를 수행한다. 그러나 현가장치의 기구학적 설계는 차량의 조종안정성에 영향을 미치는 여러 요인들로 인해 해석적으로 접근하기 어려운 경우가 대부분이며, 실제로 많은 부분이 설계자의 경험에 의존하고 있다. 최근 국내외적으로 현가장치의 기구학적 특성 최적화에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>(2-4)</sup>

그러나 이러한 현가장치 최적설계에 대한 대부분의 연구가 설계과정의 효율을 높이기 위해 적은 수의 설계변수를 사용했으며 기구학적 특성인 정적설계 인자에 한정된 경우가 많았다.

본 논문에서는 전자량 모델의 조종안정성을 위하여 현가장치의 기구학적 설계변수 뿐만 아니라 컴플라이언스(compliance) 특성과 관련된 설계변수도 고려하는 최적설계 방법을 제시하고자 한다. 또한 차량 모델에서 조종안정성에 대한 현가

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원  
 E-mail : sblee@kookmin.ac.kr  
 TEL : (02)910-4817 FAX : (02)910-4718

<sup>\*</sup> 불보코리아

<sup>\*\*</sup> 회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원

장치의 기구·동역학적 근사최적설계 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 다음과 같은 내용을 수행한다.

- 1) 목적함수에 큰 영향을 미치는 기구·동역학적 설계변수와 컴플라이언스 설계변수들을 선정하기 위하여 요인배치 실험계획법의 하나인 Plackett-Burman 설계법<sup>(5)</sup>을 이용하여 현가장치의 민감도해석을 수행한다.
- 2) 전차량 모델의 J-선회 시뮬레이션을 통해 얻은 응답값들에 대하여 민감도계수 결과를 이용하여 테일러근사식을 만들고, 이를 조종안정성을 고려한 목적함수로 설정한다. 선정된 설계변수들과 설정된 목적함수를 이용하여 허용 설계구간 내에서의 최적값을 갖는 설계변수들을 찾는다.
- 3) 최적화된 차량의 J-선회 시뮬레이션을 통하여 초기모델과 조종안정성을 비교·평가한다.

## 2. 현가장치 특성과 차량성능

차량성능에 있어서 현가장치의 기하학적 특성은 대단히 중요한 인자이다. 이런 기하학적 특성을 이상적으로 구현하기 위해서는 현가장치 유형에 대한 설정도 대단히 중요한 인자라 할 수 있다. 현가장치의 기하학적 특성은 설계 단계에 따라 기구학적 특성과 컴플라이언스 특성으로 구분하며 현가장치 설계시 적절히 활용할 수 있다.

### 2.1 현가장치 기구학적 특성

현가장치의 기구학적 특성은 현가장치 링크 및 각종 조인트, 부싱 등을 모두 강체로 가정한 상태에서의 조향 및 타이어의 상하운동 시 궤적의 변화 상태를 의미하는 것으로써 설계 단계에 매우 효율적으로 사용될 수 있다.

현가장치의 정적설계인자(static design factor; SDF)로는 킹핀 경사각(kingpin inclination), 캐스터각(caster angle), 캠버각(camber angle), 토각(toe angle) 및 롤중심(roll center) 등이 있다. 이 인자들은 차량의 성능을 좌우하며 차량의 초기 설계 단계에서부터 고려되어야 하는 중요한 인자들이다.

### 2.2 현가장치 컴플라이언스 특성

자동차의 현가장치를 설계할 때 바람직한 조종안정성을 확보하기 위해 현가장치 구성요소의 설계위치를 기구학적으로 결정한다. 그러나 NVH

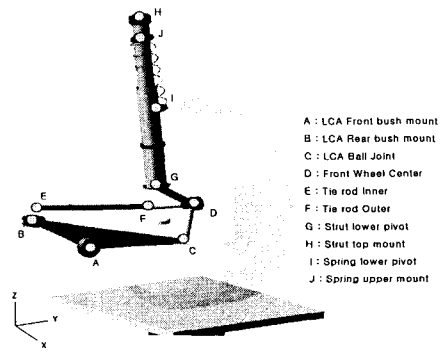


Fig. 1 McPherson strut suspension system

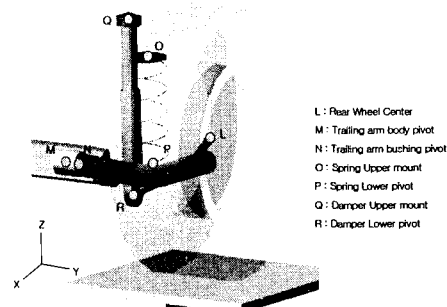


Fig. 2 Torsion beam axle suspension system

(noise, vibration and harshness) 특성과 조립공차 문제 등을 해결하기 위해 일부 요소는 부싱을 사용하여 기구적인 역할을 하도록 대체시킨다. 부싱은 힘을 받으면 쉽게 변형하는 컴플라이언스 요소로서 현가장치에 외력이 가해지면 차륜의 자세가 변하게 된다. 이는 차량의 조종안정성 뿐만 아니라 승차감과 같은 동적특성에 영향을 미쳐 현가장치의 설계시 반드시 고려해야 하는 요소이다. 횡방향 컴플라이언스 특성과 종방향 컴플라이언스 특성을 적절히 조절하여 차량의 동적성능을 높인다.

## 3. 현가장치 모델링

본 논문에서 대상으로 하는 차량의 전륜현가장치는 Fig. 1과 같은 맥퍼슨 스트럿 현가장치(McPherson strut suspension system)이고, 후륜현가장치는 Fig. 2와 같은 토션빔 액슬 현가장치(torsion beam axle suspension system)로 되어 있다.

맥퍼슨 스트럿 현가장치는 충분한 엔진 장착 공

**Table 1** Design variables of front suspension system

Design variable	Response				Remarks
	I	II	III	IV	
DVF 1			0.00194		LCA front bushing: <i>z</i>
DVF 2			-0.00203		Front wheel center: <i>y</i>
DVF 3		-0.0032			Front wheel center: <i>z</i>
DVF 4				0.00518	Tie rod outer: <i>x</i>
DVF 5		0.0039			Tie rod inner: <i>y</i>
DVF 6	0.0101				Tie rod inner: <i>z</i>
DVF 7			0.0026		Front spring stiffness <i>SF</i>
DVF 8		0.0033			Front damper damping <i>SF</i>

**Table 2** Design variables of rear suspension system

Design variable	Response				Remarks
	I	II	III	IV	
DVR 1	0.00446				Trailing arm body pivot: <i>x</i>
DVR 2		-0.00128			Trailing arm body pivot: <i>y</i>
DVR 3			-0.00137	-0.00464	Trailing arm body pivot: <i>z</i>
DVR 4	-0.00503				Trailing arm bushing: <i>x</i>
DVR 5				0.00457	Spring upper mount: <i>x</i>
DVR 6		-0.00136			Damper lower pivot: <i>y</i>
DVR 7				-0.00473	Damper upper bushing: <i>AS</i>

간을 확보할 수 있도록 설계되어 있으며, 현재 승용차의 전륜현가장치에 많이 사용된다. 기구학적 모델링은 범용 동역학해석 프로그램인 ADAMS를 이용하였으며 모델의 구성은 차체, 너클, LCA(lower control arm), 스트럿, 그리고 랙 등 총 5개의 강체로 구성하였다. 차체와 LCA는 회전조인트로 연결하고, LCA와 너클은 구면조인트, 너클과 스트럿은 병진조인트, 스트럿과 차체는 구면조인트, 그리고 랙과 너클 사이에는 타이로드(tie-rod)가 등속조인트에 의해 연결되어 있다. 이 기구학적 모델에 컴플라이언스 요소를 추가하기 위해 스트럿 마운트 위치 및 차체와 LCA 사이를 부싱요소(bushing element)로 연결한다.

토션빔 액슬 현가장치는 기하학적 특성 및 컴플라이언스 특성을 확보하기 위하여 좌우 트레일링암(trailing arm)과 단순한 형태의 토션빔(torsion beam)이 온돌레 용접으로 강결합 되어있다. 컴플라이언스 요소로는 트레일링암이 차체에 연결되는 부분과 댐핑요소(damping element)가 마운트 되는 부분이 부싱요소로 연결되어 있다.

#### 4. 현가장치 민감도해석

##### 4.1 현가장치 민감도해석

맥퍼슨 스트럿 현가장치의 설계변수로는 Fig. 1

에서 나타낸 A~J에 대한 10개의 설계점 위치 및 A, B, H 지점에서의 부싱강성에 대한 척도계수(scale factor)와 스프링강성 및 댐핑계수에 대한 각각의 척도계수가 있다. 설계점은 각 링크의 위치 및 스프링과 댐퍼의 위치를 나타내는데, 각각 세 방향으로 변경이 가능하므로 설계변수는 30개가 된다. 또한 부싱은 축방향과 반경방향에 대해 각각 병진 및 회전 스프링 강성성분이 존재한다. 차체와 스트럿은 스트럿 마운트 지점에서 부싱요소로 연결되고, 차체와 LCA 사이에는 전후방 두 곳에서 부싱으로 지지되어 있으므로 3개의 부싱에 대한 설계변수는 모두 12개가 된다. 여기에 스프링 강성에 대한 척도계수와 댐핑계수에 대한 척도계수를 포함해 전륜현가장치의 설계변수는 총 44개가 된다. 설계변수가 44개인 경우에 대한 Plackett-Burman 설계법은 전산실험을 48번을 수행해야 한다.

토션빔 현가장치의 설계변수로는 Fig. 2에서 나타낸 L~R에 대한 7개의 설계점에 대한 위치 및 N, P, Q 지점에서의 부싱강성에 대한 척도계수와 스프링강성 및 댐핑계수에 대한 각각의 척도계수가 있다. 따라서 설계점에 대한 설계변수는 21개이다. 그리고 트레일링 암과 차체, 댐퍼의 상하 부분 3곳이 각각 부싱요소로 연결되어 있으므로

부싱에 대한 설계변수는 모두 12개가 된다. 여기에 스프링강성에 대한 척도계수와 댐핑계수에 대한 척도계수를 포함하면 후륜 현가장치의 총 설계변수는 35개가 된다. 설계변수가 35개인 경우에 대한 Plackett-Burman 설계법은 전산실험을 36번을 수행해야 한다.

Plackett-Burman 설계법을 이용하여 J-선회 시뮬레이션 응답값인 조향 민감도(steering sensitivity), 부족조향 구배(understeer gradient), 롤게인(roll gain) 및 횡가속도 응답시간(lateral acceleration response time)에 대한 설계변수의 민감도해석을 수행하였다.

#### 4.2 민감도해석을 통한 설계변수 선정

본 논문에서는 민감도해석을 통한 설계변수 선정을 객관적으로 수행하기 위해서 민감도해석 결과를 표준정규화 시킨 후 각 민감도의 평균과 표준편차를 이용하여  $2\sigma$  이상의 민감도 값을 가진 설계변수를 선정하였다. 즉, 전체 설계변수에 대해 민감도가 95.4% 이상인 설계변수만을 선정한다. 표준정규화 변환은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\left(\frac{z^2}{2}\right)} \quad (1)$$

이 식에서  $\sigma^2$ 은 분산을 나타내며,  $z$ 는 다음 식 (2)에서와 같이 표준화된 확률변수를 나타낸다.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

여기서  $\mu$ 는 기대값(expected value)을 나타낸다. 민감도해석을 통해 선정된 설계변수를 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 여기서 I, II, III 및 IV는 각각 조향 민감도, 부족조향 구배, 롤게인 및 횡가속도 응답시간에 대한 민감도를 나타낸다. 또한  $x$ ,  $y$  및  $z$ 는 설계점의 좌표값,  $SF$ 는 척도계수를 나타내며,  $AS$ 는 축방향 부싱강성을 나타낸다.

### 5. 현가장치 최적설계

#### 5.1 목적함수 정의

4장의 결과인 각각의 응답값을 민감도계수를 이용하여 테일러급수 근사식으로 나타낼 수 있

다. 식 (3)은 응답값인 설계함수에 대한 근사식을 나타낸 것이다.

$$\hat{\psi}_j(x_i) = \psi_j^0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi_j}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (3)$$

여기서  $i$ 와  $j$ 는 각각 설계변수 및 J-선회에서의 응답값을 나타낸다.

최적설계 수행에 있어서의 목적함수  $J$ 는 설계함수  $\psi$ 가 되는 조향 민감도, 부족조향 구배, 롤게인, 횡가속도 응답시간의 함수로 정한다. 목적함수를 식 (4)와 같이 정규화된 오차 절대치의 합으로 정의하였다.

$$J = \sum_{j=1}^n \left[ w_j \frac{|G_j - \hat{\psi}_j|}{G_j} \right] \quad (4)$$

여기서  $w_j$ 는 각 설계함수에 곱해지는 가중치이고,  $G_j$ 는 각 함수의 목표값을 의미한다. 이 목표값은 미국 내에서 생산되는 동급 경쟁 승용차의 J-선회 특성치로 설정하였다.

#### 5.2 현가장치 근사최적설계

현가장치의 조종안정성을 고려한 최적설계 문제는 공액경사도법(conjugate gradient method)을 이용하여 풀었다. 최적설계 과정에서 사용된 대상 차량의 제원은 국내 자동차 회사에서 생산되는 소형 승용차 A의 제원을 이용하였다.

설계변수는 민감도해석을 통해 선정된 설계변수로 설정하였고 설계점에 대한 설계변수의 최대변경한도를 초기 설계치의  $\pm 30\text{mm}$ 로 한정하였으며, 컴플라이언스 요소의 척도계수는 초기 설계치의  $\pm 10\%$ 로 한정하였다. Table 3에 최적설계에 사용된 설계변수의 하한값, 상한값, 초기값 및 최적화된 결과를 나타내었다.

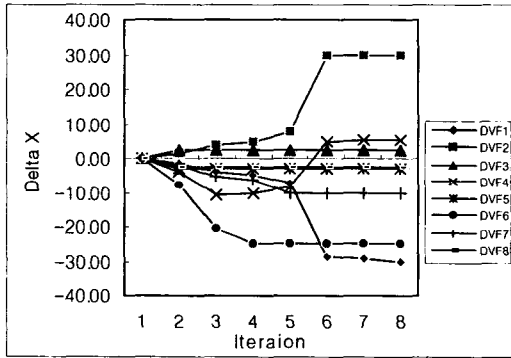
Fig. 3과 4는 각각 전륜현가장치와 후륜현가장치에 대한 설계변수 변화(Delta X)의 이력을 나타내며, Fig. 5는 근사목적함수의 수렴이력을 나타내고 있다.

#### 5.3 최적설계 결과의 검토

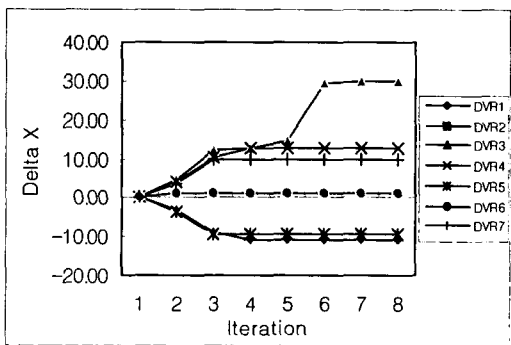
최적화된 설계변수들을 초기 차량모델에 적용하였으며 J-선회 시뮬레이션을 통해 초기모델과 비교하였다.

**Table 3** Design variables and optimized results

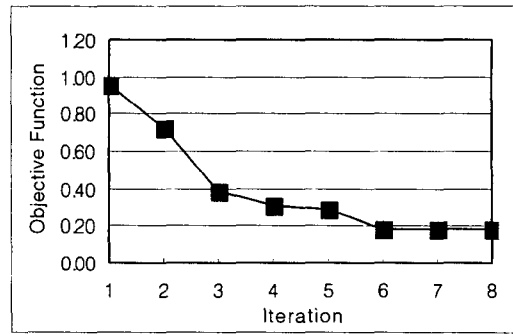
	Design variable	Lower bound	Upper bound	Initial value	Optimum value
Front	DVF 1	-106.00	-46.00	-76.00	-106.00
	DVF 2	-735.00	-675.00	-705.00	-675.00
	DVF 3	-30.00	30.00	0.00	2.43
	DVF 4	93.69	153.69	123.69	129.06
	DVF 5	147.00	207.00	177.00	174.06
	DVF 6	-32.52	27.48	-2.52	-27.59
	DVF 7	-10.00	10.00	0.00	-10.00
	DVF 8	-10.00	10.00	0.00	-2.50
Rear	DVR 1	1945.00	2005.00	1975.00	1964.06
	DVR 2	-600.00	-540.00	-570.00	-569.03
	DVR 3	-51.00	9.00	-21.00	9.00
	DVR 4	1945.00	2005.00	1975.00	1987.52
	DVR 5	2368.05	2428.05	2398.05	2388.75
	DVR 6	2265.00	2325.00	2295.00	2296.03
	DVR 7	-10.00	10.00	0.00	9.63



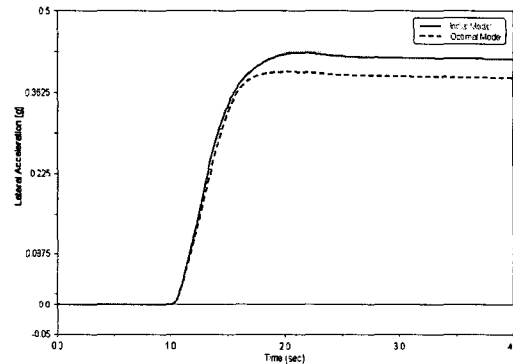
**Fig. 3** History of design variable changes for front suspension system



**Fig. 4** History of design variable changes for rear suspension system



**Fig. 5** Convergence history of approximate objective function



**Fig. 6** Lateral acceleration in J-turn simulation

J-선회 시뮬레이션은 4초간 수행하였으며 100Km/h의 속도로 직진주행을 시작하여 0.2초에 조향각 30를 주었다. J-선회 조향을 하게 되면 차체는 롤이 일어나고 횡방향의 하중이동이 발생하며, 타이어의 수직하중이 변하게 되어 좌우 타이어의 힘과 모멘트가 달라진다. 또한 타이어의 조향에 의하여 차체는 횡미끄럼각(sideslip angle), 요각속도(yaw rate) 및 횡가속도를 발생시키게 된다. Figs. 6~9는 초기모델과 최적화된 모델의 J-선회 시뮬레이션에서의 횡가속도, 요각속도, 롤각(roll angle) 및 횡미끄럼각을 비교하여 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 횡가속도, 요각속도 및 횡미끄럼각은 초기모델에 비하여 감소하였으며, 롤각은 증가하였다.

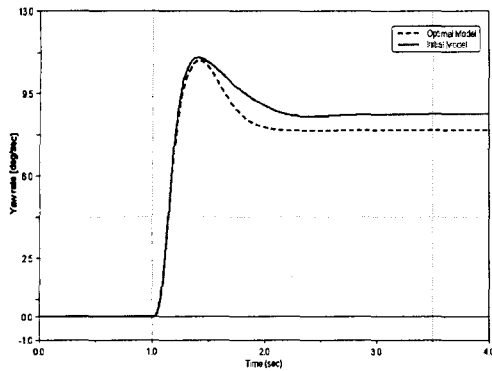


Fig. 7 Yaw rate in J-turn simulation

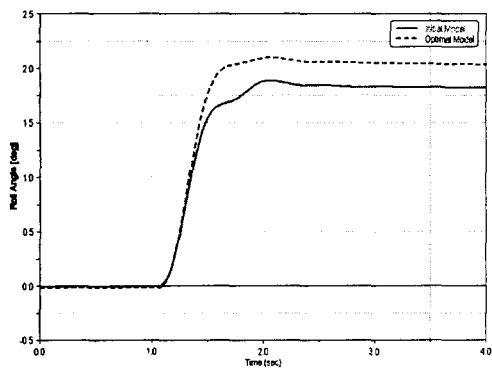


Fig. 8 Roll angle in J-turn simulation

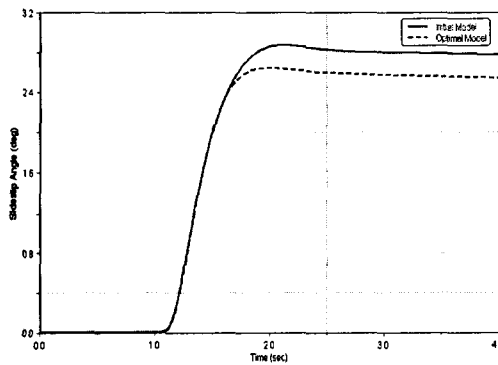


Fig. 9 Sideslip angle in J-turn simulation

Table 4는 J-선회 시뮬레이션의 특성치에 대한 목표값, 초기값, 최적값 및 퍼센트 변화율을 나타내고 있다. 여기서 목표값은 미국에서 생산되는 동급 경쟁 승용차의 특성치를 나타내며, 퍼센트 변화율은 초기값과 목표값 차이에 대한 초기값과

Table 4 Response parameters of J-turn simulation

Parameters	Target model	Initial model	Optimum model	Percent change
Steering sensitivity	1.01	1.38	1.33	13.5
Understeer gradient	4.40	4.26	4.35	64.3
Roll gain	6.40	4.06	4.90	35.9
Lateral acceleration response time	0.41	0.49	0.43	75.0

최적값 차이의 비율을 나타내며 목표치 만족도를 의미한다.

### 6. 결론

본 연구에서는 맥퍼슨 스트럿 전륜 현가장치와 토션빔 액슬 후륜 현가장치를 장착한 소형 승용차량을 대상으로 차량의 조종안정성을 위한 현가장치 최적설계를 수행하였다.

다물체 동역학해석 및 Plackett-Burman 실험계획법을 이용한 민감도해석을 통해 차량의 J-선회시 조향 민감도, 부족조향 구배, 롤게인 및 횡가속도 응답시간의 응답특성에 많은 영향을 주는 설계변수를 효율적으로 선정하는 방법을 제시하였으며 선정된 설계변수를 이용하여 최적설계를 수행하였다.

J-선회 시뮬레이션 해석 결과 최적화된 설계변수들로 재설계된 차량은 목표성능에 가까워지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

### 참고문헌

- (1) Gillespie, T. D., 1992, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers Inc., pp. 195~196.
- (2) Kim, S. J., Park, C. J. and Park, T. W., 1996, "Suspension Parameter Design Using a Design of

- Experiments," *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 4, No. 4, pp. 16~27.
- (3) Suh, K. H., Min, H. K. and Chyun, I. B., 2000, "Optimum Design of Front Toe Angle Using Design of Experiment and Dynamic Simulation for Evaluation of Handling Performances," *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 8, No. 2, pp. 120~128.
- (4) Fujita, K. and Hirokawa, N., 1998, "Design Optimization of Multi-link Suspension System for Total Vehicle Handling and Stability," AIAA-98-4787.
- (5) John, P. W., 1998, *Statistical Design and Analysis of Experiments*, Siam, pp. 185~187.
- (6) Montgomery, D. C., 2001, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 29~30.