

# 유전 알고리즘을 이용한 토션빔 현가장치의 기구학적 최적설계

옥진규<sup>1)</sup> · 백운경<sup>2)</sup> · 손정현<sup>2)</sup>

부경대학교 기계공학부 대학원<sup>1)</sup> · 부경대학교 기계공학부<sup>2)</sup>

## Kinematic Optimum Design of a Torsion-Beam Suspension Using Genetic Algorithms

Jinkyu Ok<sup>1)</sup> · Woonkyung Baek<sup>2)</sup> · Jeonghyun Sohn<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate Student of School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 19 January 2005 / Accepted 6 December 2005)

**Abstract** : This study is about an optimum design to improve the kinematic and compliance characteristics of a torsion-beam suspension system. The kinematic and compliance characteristics of an initial design of the suspension was obtained through a roll-mode analysis. The objective function was set to minimize within design constraints. The coordinates of the connecting point between the torsion-beam and the trailing arm were treated as design parameters. Since the torsion-beam suspension has large nonlinear effects due to kinematic and elastic motion, Genetic Algorithms were employed for the optimal design. The optimized results were verified through a double-lane change simulation using the full vehicle model.

**Key words** : Optimum design(최적설계), Torsion-beam suspension(토션빔 현가장치), Genetic algorithms(유전 알고리즘), Kinematic and compliance analysis(탄성기구학적 해석)

### 1. 서론

토션빔(torsion team) 현가장치는 토션빔과 양 끝에 트레일링 암(trailing arm)을 결합하여 차체와 연결하는 간단한 형식이다. 구조적으로 단순하여 공간 활용이 용이하고 생산단가의 이점 때문에 경량의 전륜 구동차량에 많이 적용되고 있다. 최근에는 다목적 차량과 같은 차종에도 적용이 증가하고 있는 추세이다.

토션빔 현가장치가 간단한 구조로 설계자유도는 작지만 독립적인 설계인자를 가지고 있어서 효율적인 설계 및 개발에 의해 차량의 동특성을 개선할 수

있는 장점이 있다. 그러나 토션빔 현가장치는 구조적으로 단순함에도 불구하고 설계절차가 간단하지 않고, 초기 설계부터 많은 시간이 소요되고 있다. 따라서 토션빔 현가장치의 설계 및 개발을 위해 기구학적 특성 및 컴플라이언스 특성을 만족하도록 최적설계 기술이 요구된다.

현가장치 설계 최적화에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 탁<sup>1)</sup>은 현가장치의 운동방정식을 세워 민감도 해석과 최적설계 방법을 제시하였다. 차량의 동특성 평가를 다구찌 방법, 실험계획법, 국부 최적화 알고리즘을 적용하여 최적설계를 수행한 경우도 있었다.<sup>2-4)</sup> 최근에는 현가장치와 같은 비선형성이 강한 시스템에는 전역 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 적용하는 경향이

\*To whom correspondence should be addressed.  
baekwk@pknu.ac.kr

증가하고 있다.<sup>5,6)</sup> 국내에서도 GA를 적용하여 현가 장치의 기구학적 최적설계와 동역학적 최적설계 논문이 발표된 바 있다.<sup>7,8)</sup>

본 논문에서는 VisualDOC<sup>9)</sup>와 ADAMS/Car를 연계하여 탄성효과로 인해 비선형성이 강한 토션빔 현가장치의 탄성 기구학적(kinematic and compliance) 특성을 개선하는 최적설계를 수행하였다. 현가장치는 탄성 기구학적 거동이 비선형적이고 정량화하기 어렵기 때문에 이에 적합한 GA를 적용하여 최적설계가 가능하도록 하였다. GA는 기울기를 구할 수 없거나 기울기를 구하기 힘든 목적함수나 구속조건을 가지는 문제에 적합한 것으로 알려져 있다.

## 2. 토션빔 현가장치 모델링

### 2.1 토션빔 모드해석

본 논문에서는 토션빔 현가장치에서 토션빔을 탄성체로 모델링을 하였다. 해석 대상물의 탄성효과를 고려한 해석을 하기 위해서 해석 대상에 대한 정규모드 해석이 먼저 이루어져야 하고, 모드해석 결과 파일을 이용하여 동역학 해석에 필요한 입력 파일을 생성해야 한다.

토션빔의 유한요소 모델은 Shell 요소인 Quad 4를 이용하였다. 토션빔을 좌우의 트레일링 암에 부착하기 위하여 토션빔의 좌우를 하나의 노드(node)로 모아서 모델링 하였다. 이 때 사용된 방법은 강체 요소인 Nastran의 RBE 2를 이용하였다. 토션빔의 요소 유형과 물성치는 Table 1에 도시하였다.

토션빔의 정규모드해석은 Superelement 기법을 이용하였고, 구속조건은 free-free로 하였다. 모드해석의 결과 파일을 이용하여 동역학 해석에서 필요한 MNF(Modal Neutral File) 파일을 만들었다. Fig. 1

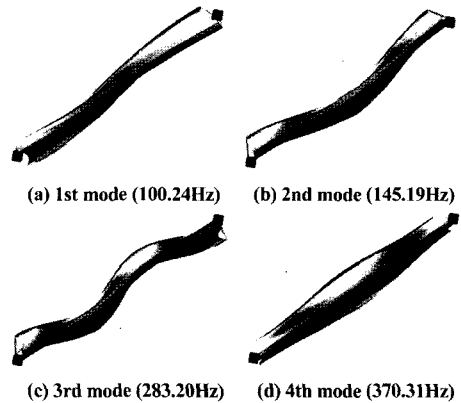


Fig. 1 Normal mode of torsion-beam

에 토션빔의 고유모드와 고유진동수를 나타내었다. Fig. 1에서 1차 모드는 비틀림모드, 2-4차 모드는 횡방향과 수직방향의 굽힘모드 현상을 보여준다.

### 2.2 토션빔 후륜 현가기구의 모델링

토션빔 후륜 현가기구의 모델에는 탄성체 요소 1개, 강체 요소 20개를 사용하였고, 23개의 조인트, 2개의 스프링과 댐퍼, 2개의 부상요소, 좌 우 양쪽의 타이어를 포함하여 모델링 하였다. 토션빔의 탄성효과로 인한 자유도를 제외하고 모델의 전체 자유도는 8자유도이다. 토션빔 후륜 현가기구의 ADAMS/Car 모델을 Fig. 2에 나타내었다.

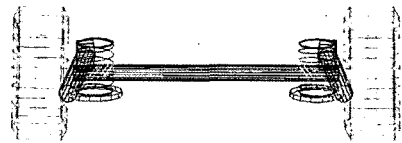


Fig. 2 ADAMS/Car model

## 3. 동역학 및 최적설계 프로그램

VisualDOC는 외부 프로그램 및 데이터와 상호 작용하여 최적설계를 가능하게 하는 프로그램이다. VisualDOC는 해석 프로그램의 입·출력 파일이 ASCII 코드로 작성되어 있으면 어떤 프로그램과도 연결이 가능하다.

VisualDOC에서 ADAMS/Car의 설계 정보를 변경하여 반복적으로 해석이 가능하도록 하기 위해서 ADAMS/Car는 운영체제의 명령 입력창(command

Table 1 Element type and property

Element type	Element number	Node number
Quad 4	1619	1726
Property	Young's modulus ( $E$ )	$2.07e+5 \text{ N/mm}^2$
	Poisson ratio ( $\nu$ )	0.30
	Density ( $\rho$ )	$7.81e-9 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{mm}^4$
	Thickness ( $t$ )	4.50 mm

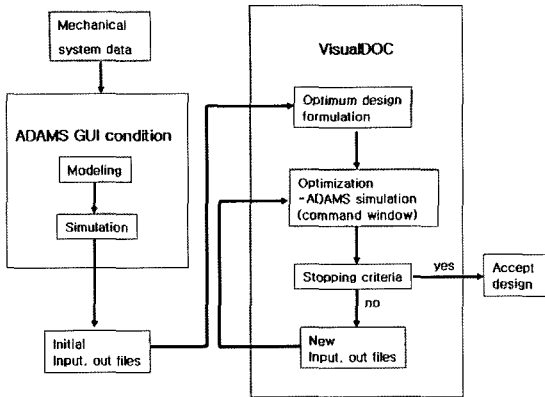


Fig. 3 Optimization progress flow chart

windows)에서 실행되어야 한다. 이 때 VisualDOC에서 설계변수 입력 파일은 ADAMS/Car의 모델링 파일인 \*.sub 파일을 사용하였다. 목적함수와 제약조건 설정은 \*.txt 파일을 이용하였다. \*.txt 파일은 해석 결과를 저장하고 있는 파일이다. ADAMS/Car와 VisualDOC를 연계한 최적설계의 진행과정을 Fig. 3에 나타내었다.

#### 4. 현가장치 특성 최적설계

##### 4.1 유전 알고리즘

유전 알고리즘을 사용한 최적화 방법은 1975년에 Holland에 의해 사용되기 시작하여 최근 활발하게 연구되고 있는 최적화 방법 중의 하나이다.<sup>10)</sup> 유전 알고리즘은 미분 기반의 최적화 방법과 달리 유전적인 계승과 자연계의 적자생존의 원리와 번식, 교배, 돌연변이를 통해서 다음 세대를 형성하는 유전과정의 원리를 응용한 확률적, 통계적 최적화 방법이다.

유전 알고리즘은 초기 설계변수의 값에 의존하지 않으므로 결정론적인 방법보다 전역 최적의 해를 구할 확률이 크다. 또한 기울기를 구할 수 없거나 기울기를 구하기 힘든 목적함수나 구속조건을 가지는 문제에 적용 가능한 특징이 있다.

##### 4.2 탄성 기구학적 특성 해석

본 논문에서는 탄성 기구학적 특성(Kinematic & Compliance : K&C)에 대한 해석을 하기 위한 방법으로 롤 모드(roll mode) 해석을 수행하였다. 좌측 휠

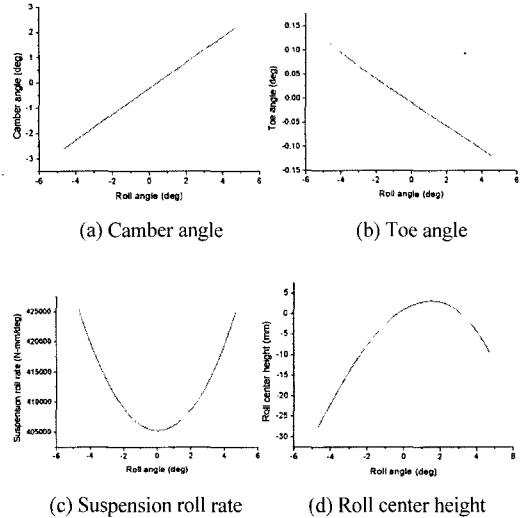


Fig. 4 Calculation of suspension characteristics

센터에 -60 mm인 리바운드 입력과 우측 휠 센터에 +60 mm인 범프 입력을 가한 상태에서 좌우 휠이 역위상으로 움직이도록 시뮬레이션을 하였다. 휠 센터에 가해지는 롤 모드의 크기 -60 mm ~ +60 mm는 차량이 일반도로에서 주행할 때 가장 빈번하게 발생하는 리바운드와 범프의 크기이다. 롤 각 변화에 따른 캠버각, 토우각, 롤 레이트 및 롤 중심 높이의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 롤 각이 -4.7°일 때 캠버각은 -2.64°, 롤 각이 4.7°일 때 캠버각은 2.19°를 나타낸다. 현재의 캠버각의 기울기를 감소하는 최적설계가 요구된다. 캠버각의 변화는 휠 센터가 리바운드가 될 때 더 크게 변한다. 롤 각의 변화에 대한 토우각은 언더스티어(understeer) 현상을 나타낸다.

##### 4.3 최적 설계문제의 정식화

토션빔 현가장치에서 토션빔이 트레일링 암과 연결되는 위치에 따라서 현가장치 특성이 달라질 수 있다. Travaglio<sup>11)</sup>는 토션빔의 위치 이동으로 현가장치 특성값이 변하는 것을 보였다. Fig. 5에서 토션빔 현가장치는 길이  $L$ 에 따라서 다음과 같은 특성을 갖는다.

차체의 롤 각(roll angle)  $\phi$ 와 토션빔의 비틀림 각(twist angle)  $\theta$ 와의 관계는 식 (1)과 같은 관계가 있다.<sup>12,13)</sup>

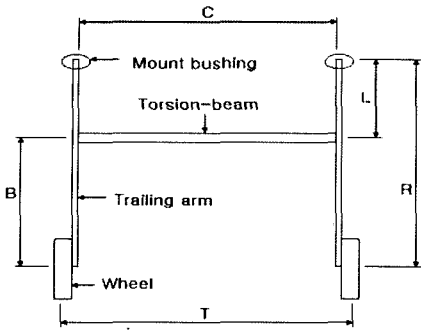


Fig. 5 Torsion-beam location

$$\frac{\phi}{\theta} = \frac{L}{C} + \frac{B}{T} \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 윤거(tread),  $C$ 는 차체와 연결되는 부싱의 거리,  $L$ 은 측면의 부싱 중심에서 토션빔의 전단중심까지의 거리,  $B$ 는 토션빔의 전단중심에서 휠 센터까지의 거리이다.

$T$ 와  $C$ 가 일정한 경우 토션빔은 길이  $L$ 에 따라서 Table 2와 같은 특성을 나타낸다.

Table 2 길이  $L$ 에 따른 토션빔의 하중 특성

$L=0$	$\theta$ 최대, 순수하게 비틀림 힘만 작용
$L=R$	$\theta$ 최소, 굽힘 하중이 크게 작용
$0 < L < R$	토션빔은 비틀림과 굽힘을 동시에 작용 $L$ 을 조절하여 굽힘 하중은 작고, 비틀림 하중이 크게 작용하도록 조절

본 논문에서는 토션빔과 트레일링 암이 연결된 조인트의 위치를 설계변수로 하였다. 설계변수의 허용범위는 장착조건과 설계 간섭 여부를 고려하여 결정하였다. Table 3에 초기 설계변수의 값과 허용범위를 나타내었다. 현가장치 특성값 중에서 캠버각을 주어진 제한조건 내에서 최소값을 만족하도록 목적함수를 설정하였다. 제한조건은 현재 측정된 토우각이 약 언더스티어 현상을 나타내므로 현재의 토우각보다 커지지 않도록 제한을 두었다. Fig. 4(d)에서 롤 각에 대한 롤 센터 높이의 좌우 차이가 대략 -17 mm로 비교적 큰 차이를 나타낸다. 최적설계에서 롤 센터 높이에 대한 좌우 차이를 초기값보다 작은 값을 나타내도록 제한조건을 설정하였다. 따라

서 후륜 현가장치 특성의 최적설계에 대한 정식화를 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$\text{Minimize } F = \alpha_c \quad (2)$$

$$\text{Subject to } -0.13 \leq \alpha_t \leq -0.12$$

$$-28 \leq \alpha_h \leq -19$$

여기서  $\alpha_c$ 는 초기 캠버각,  $\alpha_t$ 는 토우각,  $\alpha_h$ 는 롤 센터 높이이다.

Table 3 Value, range of design variables (unit : mm)

Design variables	Lower	Initial value	Upper
$T_x$	-50	0	25
$T_z$	-10	0	10

$T_x, T_z$ 는 토션빔과 트레일링 암을 연결하는 조인트의 전역 좌표계  $X, Z$ 이다.

#### 4.4 최적설계

최적설계는 ADAMS와 VisualDOC를 연계하여 수행하였고, VisualDOC의 유전 알고리즘을 적용하였다. 이때 유전 알고리즘에 사용되는 파라미터로 집단의 크기 100, 세대교체의 최대회수 100, 돌연변이 확률 0.05를 사용하였다. 교배율은 0.8, 0.85, 0.9, 0.95의 4가지 경우에 대해서 최적설계를 수행하여 최적의 교배율을 찾으려 하였다. 목적함수 수렴에 대한 절대치가  $1e-4$ , 설계변수 수렴에 대한 절대치가  $1e-4$ , 목적함수의 값이 5번 반복되는 경우에 최적설계는 종료되도록 하였다. 최적설계 과정에서 교배율이 0.8, 0.85, 0.9, 0.95일 때 목적함수의 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

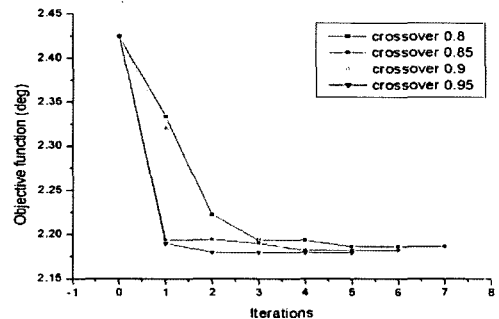


Fig. 6 History of objective function

최적설계는 시스템이나 목적함수의 값에 따라서 유전 알고리즘의 최적의 파라미터는 달라질 수 있다. 교배율이 0.9일 때 목적함수는 6번 만에 수렴하고 목적함수의 값은 2.1785로 목적함수의 변화폭이 가장 큰 것으로 확인된다. 교배율 0.9일 때 최적설계 후 설계변수의 값을 Table 4에 나타내었다. Fig. 7에 현가장치 특성값을 최적설계 전과 후를 비교하여 나타내었다.

Table 4 Optimal values of design variables (unit : mm)

Design variables	Lower	Optimal value	Upper
$T_x$	-50	-36.733	25
$T_z$	-10	-0.311	10

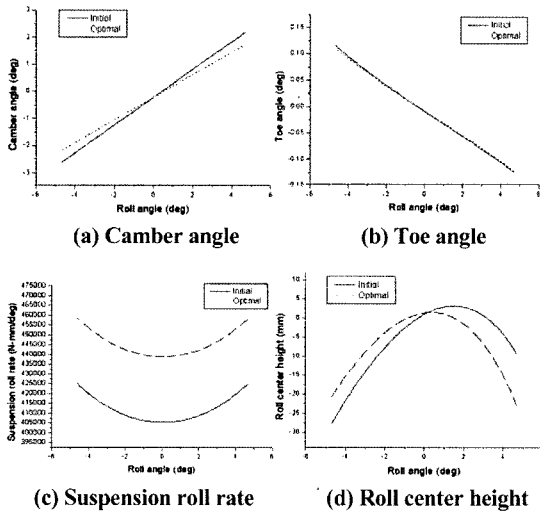


Fig. 7 Suspension characteristics after optimum design

GA를 적용한 최적설계를 통하여 목적함수인 캠버각을 19.44% 개선시킬 수 있었다. 최적설계 후 토각의 변화는 제한조건의 범위 내에서 존재하고 언더스티어 조건을 만족한다. 롤 각 변화에 따른 현가장치 롤 속도는 최적설계 후 대략 8% 개선효과를 나타낸다. 최적설계 전 롤 중심 높이 변화의 좌우 차이가 18.36mm에서 최적설계 후 2.51mm로 감소하였다. 최적설계 후 토션빔의 위치를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에서 토션빔의 위치는  $x$  방향으로 -36.733mm,  $z$  방향으로 -0.311mm 각각 이동하였다.

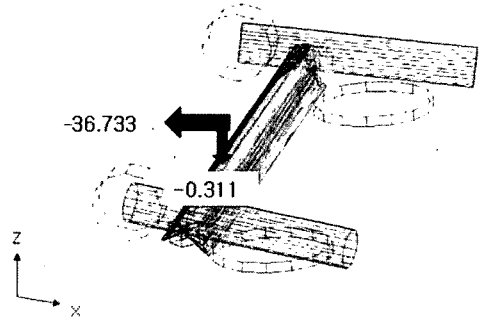


Fig. 8 Torsion-beam location after optimum design

### 4.5 이중 차선 변경을 통한 결과검증

현가장치 특성 최적설계를 검증하기 위한 방법으로 이중 차선 변경(double lane change) 시뮬레이션을 초기모델과 최적설계 후 모델에 대해서 각각 실행하였다. 이중 차선 변경 시험을 통하여 차량의 동특성과 조종 안정성을 확인할 수 있다. 이중 차선 변경 시뮬레이션은 ISO TR3888 규정에 따라 수행하였다. 각각의 경우에 대해서 횡 가속도(lateral acceleration), 롤 각, 요 각(yaw angle) 및 요 레이트(yaw rate)에 대해서 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 차선을 변경하고 차량이 안정을 찾는 시간이 최적설계 후 감소하고 차량의 응답시간이 개선됨이 확인된다. 이는 이중 차선 변경 시뮬레이션을 통하여 토션빔의 위치 최적화가 가능함을 보여준다.

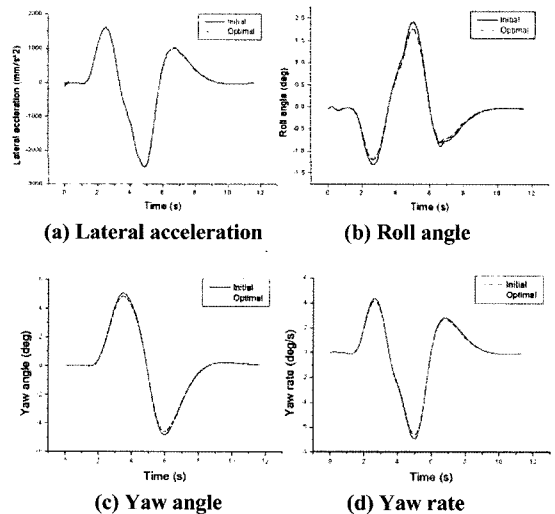


Fig. 9 Double lane change results

## 5. 결론

본 논문에서는 후륜의 토션빔 현가장치의 탄성 기구학적 특성을 개선하는 최적설계를 수행하였다. ADAMS/Car를 이용하여 현가장치의 모델링과 차량 동역학 해석을 실행하였고, 최적설계는 VisualDOC 와 ADAMS/Car를 연계하여 수행하였다. 최적설계 알고리즘은 비선형 시스템에 적합한 GA를 적용하였다. 이러한 연구과정을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 토션빔의 장착 위치를 설계변수로 하여 후륜 현가장치의 K&C 특성을 개선 시킬 수 있었다.
- 2) 최적설계 후 롤 각에 대한 캠버각은 17.44%가 개선된 효과를 보였다.
- 3) 이중 차선 변경 시뮬레이션을 통하여 최적설계 전과 후 차량의 동특성 변화를 비교하였고, 차체 거동이 개선된 효과를 확인하였다.
- 4) 현가장치의 기구학적 특성 및 컴플라이언스 특성을 만족하는 최적설계를 통하여 현가장치 설계 및 개발시간을 단축할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 논문은 산업자원부의 출연금 등으로 수행한 지역전략산업 석 박사 연구인력 양성사업의 연구 결과입니다.

## References

- 1) T. O. Tak, "Optimal Design of Vehicle Suspension Systems Using Sensitivity Analysis," Transactions of KSAE, Vol.2, No.3, pp.50-61, 1994.
- 2) W. Y. Kim, K. W. Ahn, C. S. Oh, W. G. Hwang and H. E. Im, "A Study on Optimization of Hard Points for Double Wishbone Type Suspension," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.897-902, 2002.
- 3) S. J. Kim, C. J. Park and T. W. Park, "Suspension Parameter Design Using a Design of Experiments," Transactions of KSAE, Vol.4, No.1, pp.16-27, 1996.
- 4) W. G. Hwang, W. Y. Kim and H. E. Im, "Development of Optimal Design of Vehicle Suspension," Transactions of KSAE, Vol.7, No.3, pp.339-347, 1999.
- 5) G. Perna, M. Poian and C. Poloni, "Multi Objective Optimization of a Car Vehicle Coupling FRONTIER and MDI-ADAMS," 2000 European ADAMS Users Conference, 2000.
- 6) T. Yamanaka, H. Hoshino and K. Motoyama, "Design Optimization Technique for Suspension Mechanism of Automobile," Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000G 309, 2000.
- 7) D. H. Lee, T. S. Kim and J. J. Kim, "Optimum Design of Suspension Systems Using a Genetic Algorithm," Transactions of KSAE, Vol.8, No.5, pp.138-147, 2000.
- 8) W. T. Baek and H. G. Seong, "A Study on the Improvement of Vehicle Ride Comfort by Genetic Algorithms," Transactions of KSAE, Vol.6, No.4, pp.76-85, 1998.
- 9) VisualDOC 4.0 User's Manual, Vanderplaats Research & Development, Inc., U.S.A, 2004.
- 10) A. D. Belegundu and T. R. Chandrupatla, "Optimization Concepts and Applications in Engineering," Prentice-Hall, NJ, 1999.
- 11) G. C. Travaglio, "Optimizing the Handling Behaviour of a Vehicle with McPherson Front Suspension and Twist Beam Rear Suspension Using ADAMS/Car," 14th European ADAMS User Conference, 2000.
- 12) D. C. Lee and J. H. Byun, "A Study on the Structural Characteristics and Roll Behavior of Suspension for the Section Profile of Torsion Beam," SAE 99370297, 1999.
- 13) J. S. Kang, "Kinematic Analysis of Torsion Beam Rear Suspension," Transactions of KSAE, Vol.12, No.5, pp.146-153, 2004.