해석 및 설계 프로세스 통합을 통한 차량 후륜 현가장치 최적화

김도원¹⁾ · 박도현¹⁾ · 이진화²⁾ · 신상하²⁾ · 최진호²⁾ · 최병렬³⁾ · 최동훈^{*4)}

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한국GM Vehicle Dynamics 해석팀²⁾ · 피도텍 기술사업팀³⁾ · 한양대학교 기계공학과⁴⁾

Optimal Vehicle Rear Suspension through Integration of Analysis and Design Process

Dowon Kim¹⁾ · Dohyun Park¹⁾ · Jinhwa Lee²⁾ · Sangha Shin²⁾ · Jin-Ho Choi²⁾ ·
Byung-Lyul Choi³⁾ · Dong-Hoon Choi^{*4)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Vehicle Dynamics CAE Team, GM Korea Motor Company, 331 Parang-ro, Seo-gu, Incheon 404-210, Korea

³⁾Engineering Consulting Team, PIDOTECH, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

⁴⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 26 July 2013 / Revised 28 November 2013 / Accepted 16 December 2013)

Abstract : In this study, we perform the optimization of trailing arm bush in a vehicle rear suspension to improve the ride and handling performance. A design problem was formulated considering 2 objective functions and 7 constraints related to vehicle ride and handling performance. PIANO, one of the PIDO (Process Integration and Design Optimization) tool, was used to automate analysis procedures and perform a design optimization. In order to assess relation between performances and design variables, we perform the DOE (Design of Experiments). To find the optimal solution, we used Progressive quadratic response surface method (PQRSM), one of the design optimization techniques equipped in PIANO. As an optimization result, we got an optimal solution and could improve lateral force steer off-center by 43.0% while decreasing brake compliance at wheel center by 8.1%.

Key words : Suspension(현가장치), Ride and handling performance(승차감 및 조종안정성), Optimum design(최적 설계), Design of experiments(실험계획법), PQRSM(점진적 이차 반응표면법), Optimal latin hypercube design(최적 라틴 방격법)

1. 서론

최근 자동차의 승차감과 안정성에 대한 연구 개발이 활발히 일어나고 있다. 승차감과 안정성은 현가장치에 의해 좌우되며, 이러한 현가장치(Suspension system)는 노면으로부터의 충격이 직접 차체에 전달되지 않게 하여 승차감을 좋게 하는 역할을 한다. 뿐만 아니라 기계부나 적재화물의 손상을 방지하는 역할도 한다.¹⁾ 따라서 본 연구에서는 승차감

및 조종안정성(Ride and handling)을 향상시키기 위해 자동차 후륜 현가장치의 트레일링 암 부쉬 파라미터를 최적설계 하였다.

기존에 자동차의 승차감 및 조종안정성을 향상시키기 위하여 다중 링크 현가장치(Multi-link suspension system)에 관한 연구,²⁾ 현가장치의 기본적인 기구학적 특성을 결정하는 하드 포인트, 스프링, 부쉬, 댐퍼에 관한 연구³⁾ 등이 이루어졌다.

특히 본 연구는 차량 현가장치의 최적설계를 다룬 최병렬,⁴⁾ 육순민⁵⁾ 등의 연구보다 개선된 차량모

*Corresponding author, E-mail: dhchoi@hanyang.ac.kr

델을 초기모델로 삼아 최적설계를 수행하였으며, 스크리닝 기법의 도입, 설계영역 내에서의 Feasibility 점검을 이용한 현실적인 설계 요구사항의 선정 등으로 인해 보다 효과적으로 최적설계를 진행할 수 있었다.

최근 컴퓨터 하드웨어의 발전으로 해석모델을 통한 시뮬레이션의 해석비용이 점차 줄어들고 있고, 이에 따라 반복적인 해석의 시간적인 비용에 대한 부담이 역시 줄어들어 최적설계를 통해 짧은 시간 내에 최적의 설계안을 도출 해내는 것이 용이해졌다. 본 연구에서는 효율적인 최적설계수행을 위해 PIDO(Process Integration and Design Optimization)기술을 이용하여 해석모델로부터 원하는 성능지수들을 산출해내는 과정을 자동화하였으며 이를 통해 다양한 설계 기법을 적용하여 성공적으로 최적의 설계안을 도출해 낼 수 있었다.

본 연구에서는 실험계획법을 수행하여 초기모델에서의 구속조건 만족여부 및 각 성능지수들에 대한 설계변수의 민감도를 산출하였으며, 이를 이용해 성능지수들에 큰 영향을 미치지 못하는 설계 변수들을 제외시키고 주요 설계 변수만을 이용해 최적설계를 진행하였고 이를 통해 모든 설계요구사항을 만족하면서 승차감 및 조종 안정성을 향상시킬 수 있었다.

2. 설계문제 정식화

2.1 설계 요구사항

본 논문에서 최적설계를 수행하기 위해 고려한 성능인자는 서론에서 언급한 R&H (Ride and Handling)성능이다. R&H성능에 대한 성능인자 및 성능인자들에 대한 구속조건을 Table 1에 나타내었고, 그 중 Lateral force steer off-center와 Brake compliance at wheel center를 목적함수로 설정하고, 두 목적함수를 최대화 하도록 설계문제를 정의하였다.

Lateral force steer off-center는 조종안정성과 관련된 성능인자로써, 차량이 선회할 때 타이어에서 횡방향으로 힘이 발생하면서 steer가 발생하게 되는데 이 steer의 크기와 방향을 양의 방향으로 늘리게 되면 조종안정성을 향상시킬 수 있다. on-center가 아닌 off-center에서의 Lateral force steer를 성능인자로

Table 1 List of constraints

Notation	Constraints
g1	Lateral force steer on-center
g2	Later force steer off-center
g3	Lateral force camber
g4	Lateral compliance at contact patch
g5	Brake force steer
g6	Recession deflection
g7	Brake compliance at wheel center

잡음으로써 선행구간이 아닌 비선행구간에서의 조종안정성을 확보하고자 하였다.

Brake force compliance는 승차감과 관련된 성능인자로써 현가장치의 전후 방향의 flexibility를 나타냅니다. 이 성능인자가 커지면 차량이 범프를 지나갈 때 impact 성능을 향상시킬 수 있다.

위 두 성능인자는 torsion beam rear axle로 구성된 현가장치에서 서로 상충되는 특성이 있다. 조종안정성을 높이하고자 하면 현가장치가 경직되기 마련이고, 승차감을 높이하고자 하면 현가장치가 유연해지기 때문이다. 따라서 후륜 현가장치 설계에서는 승차감과 조종안정성을 적절히 고려한 균형있는 설계가 필요하다. 본 연구에서는 위에서 선정한 두 가지 성능인자를 최대화하도록 목적함수를 선정하였다.

2.2 설계 변수

본 연구에서 선정한 설계변수는 후륜 현가계의 트레일링 암 부쉬 파라미터이다. 이와 같은 설계변수들은 차량의 조종안정성 및 승차감에 영향을 줄 수 있는 변수들이기 때문에 설계변수로 선정하였다. Fig. 1은 설계대상인 트레일링 암과 트레일링 암 부쉬를 나타낸 것이고, Table 2는 설계변수인 트레일링 암의 12개 부쉬 파라미터의 변수명을 나타낸 것이다.

2.3 설계문제 정식화

앞서 기술한 설계 요구사항과 설계 변수를 바탕으로 후륜 현가계의 트레일링 암 부쉬 파라미터에 대한 최적설계 문제를 식 (1)과 같이 정식화하여 정리하였다. 목적함수의 가중치는 각각 0.5를 적용하였고, 두 목적함수의 스케일이 다르기 때문에 첫 이터레이션에서의 목적함수 값을 기준으로 정규화하

Fig. 1 Trailing arm bush

Table 2 List of design variables

Notation	Design variables
x1	Radial linear stiffness
x2	Radial linear range
x3	Radial linear fmax
x4	Radial linear curvature
x5	Vertical linear stiffness
x6	Vertical linear range
x7	Vertical linear fmax
x8	Vertical linear curvature
x9	Axial linear stiffness
x10	Axial outer linear range
x11	Axial outer fmax
x12	Axial outer curvature

였다. 식 (1)의 g_2^0 과 g_7^0 은 각각 첫 이터레이션에서의 목적함수 값을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && x_1, x_2, x_3, \dots, x_{12}, \\
 &\text{to maximize} && PI = 0.5 \frac{g_2}{g_2^0} + 0.5 \frac{g_7}{g_7^0} \\
 &\text{subject to} && g_1^L \leq g_1 \\
 & && g_2^L \leq g_2 \\
 & && g_3^L \leq g_3 \leq g_3^U \\
 & && g_4^L \leq g_4 \leq g_4^U \\
 & && g_5^L \leq g_5 \leq g_5^U \\
 & && g_6^L \leq g_6 \leq g_6^U \\
 & && g_7^L \leq g_7 \leq g_7^U
 \end{aligned} \tag{1}$$

3. 해석 모듈

앞서 기술한 설계변수와 목적함수, 설계요구사항들을 정의하고 효율적인 최적설계를 수행하기 위해서는 먼저 해석과정을 정립해야 한다. 해석과정

Fig. 2 Analysis module procedures

이라는 것은 설계변수를 입력하면 입력된 설계변수에 맞춰 해석모형을 갱신하고 해석을 수행한 후, 설계자에게 필요한 성능지수들을 산출해내는 일련의 과정이다. 본 연구에서는 이러한 해석과정을 전처리부, 해석부, 후처리부로 크게 3부분으로 나누어 구성하였으며, 각 부분은 GM의 Standard Work에 따라 구성되었다. 해석을 위한 CAE(Computer Aided Engineering) tool로는 MSC. ADAMS를 사용하였고, 전/후처리기로는 Hyperworks. MotionView, ADAMS/Post, GM In-house Program을 사용하였다.

Fig. 2는 전체 해석 모듈의 절차를 나타낸다. 하드포인트의 위치, 부쉬와 스프링 관련 파라미터, 스티어링 관련 변수 및 해석에 관련된 옵션들을 설계변수로 지정할 수 있도록 하였으며, standard work 모듈에서는 GM의 standard work 해석절차에 따라 VHF, FSDF, RSDF 등 총 11개 종류의 해석 항목을 선택적으로 수행할 수 있도록 하였다. 출력으로는 앞서 수행한 standard work의 해석조건에 따라 미리 정의된 192개의 성능 지수 중 사용자가 원하는 아웃풋만을 해석결과 파일로부터 추출할 수 있도록 자동화를 구성하였다.

3.1 전처리부

전처리부에서는 입력되는 설계변수에 따라 차량의 동역학 해석 모델을 정의하고, 해석을 수행하는데 필요한 파라미터 및 데이터를 생성하는 역할을 담당한다. 본 연구에서는 Hyperworks. MotionView를 통하여 전처리부를 구성하였다.

3.2 해석부

해석부는 전처리부에서 정의된 해석모형을 이용해 실제 해석을 수행하는 부분이다. 전처리부에서

선정한 파라미터들과 해석에 필요한 데이터를 전달 받은 후 실제로 CAE tool을 실행하여 결과를 얻는다. 본 연구에서는 VHF(Vehicle Handling Facility), FR(Frequency Response), CR(Control Response) simulation 등과 같은 R&H(Ride & Handling) 해석을 MSC. ADAMS를 통하여 해석하였다.⁴⁾ ADAMS는 차량 동역학 해석 solver로써, 본 연구에서는 solver를 호출하여 실행하는 형태로 이용하였다.

3.3 후처리부

해석결과 얻은 데이터로부터 설계에 필요한 성능지수들을 산출해내는 과정이다. 설계를 수행하는데 필요한 성능지수들이 해석 결과로부터 바로 나오지 않는 경우 이와 같은 후처리가 필요하다. 본 연구에서는 ADAMS/Post를 이용하여 가공된 데이터를 추출하는 작업을 후처리부에서 수행하였으며, ADAMS/Post를 통해 가공된 성능지수들을 정리하여 출력하도록 후처리부를 구성하였다.

4. PIDO 기술을 이용한 해석 자동화

최근 자동차 산업에서 신차 개발기간의 단축이 중요하게 부각됨에 따라 CAE의 적용이 자동차 산업의 경쟁력 확보를 위해 중요한 이슈가 되고 있다. 하지만 기존의 CAE 연동 해석 과정은 반복적일 뿐만 아니라 매 해석마다 데이터를 수동으로 업데이트해야 하므로 많은 시간이 소요되었다. 따라서 본 연구에서는 설계의 효율성을 향상시키기 위해 자동화된 설계 프로세스를 구축하였으며, 자동화된 설계 프로세스로 최적설계의 효율성도 향상시켰다. 본 연구에서는 상용 PIDO tool 인 PIA^{NO}⁶⁾를 사용하여 전/후 처리 과정(Pre/Post-Processor)과 해석과정의 자동화를 구성하였다.

Fig. 3은 설계 자동화의 절차를 Flow chart로 나타낸 것이다. Input parameter setting 단계에서 초기 설계 파라미터를 설정하면 MotionView를 통해 입력된 설계 파라미터를 해석모델에 반영하여 해석모델을 갱신해주고 ADAMS를 이용해 동역학 해석을 수행한다. 이후 후처리기 실행 후 관심있는 출력 변수들을 추출해 내도록 해석 과정의 자동화를 구성하였다.

Fig. 3 Flow chart

5. 최적 설계

5.1 설계 절차

본 연구는 Fig. 4와 같은 절차로 설계를 진행하였다. 먼저 초기 Baseline 모델에서의 target 만족 여부를 확인하였고, 이후 실험계획법을 통해 인자 및 특성치 간의 경향성을 파악하였고, 설계요구사항들의 Feasibility를 확인한 후에 최적설계를 수행하였다.

Fig. 4 Design procedures

5.2 실험계획법을 통한 상관관계 분석

효과적으로 최적의 설계 솔루션을 도출하기 위해서는 인자 및 특성치 간의 경향을 파악하고 주어진 설계영역 내에서 구속조건을 만족하는 설계안이 존재할 것인지를 먼저 파악하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 최적설계를 수행하기에 앞서 인자 및 특성치 간의 경향성을 파악하고, 구속조건을 만족여부를 판단하기 위하여 실험계획법(Design of

Experiments)을 수행하였다. 본 연구에서 실험계획법으로는 최적 라틴-방격 추출법(Optimal Latin-Hypercube Design)⁷⁾을 사용하였고, 상용 PIDO Tool인 PIAAnO에 탑재되어 있는 Scatter plot과 Smart screening기능을 사용하여 인자 및 특성치 간의 영향력을 판별하였다.

5.3 민감도 해석을 통한 영향력 판별

본 연구에서는 최적설계의 효율성을 높이기 위하여 민감도 해석을 수행하여 설계변수의 영향력을 판별하였다.

Appendix. A의 Fig. 7~13은 각 성능지수 별로 민감도해석결과를 나타낸 것이다. 민감도 해석은 PIAAnO에서 제공하는 smart screening 기능⁶⁾을 이용해 수행하였으며, 각 성능지수 별로 영향력이 5%이상인 설계변수를 유의하다고 판단하였다. 각 성능지수별로 유의하다고 판단된 설계변수들을 Table 3에 표시하였다. Linear range와 Curvature에 관련된 변수들이 공통적으로 영향력이 큰 것으로 나타났으며, 영향력이 없는 설계변수는 제외하고 최적설계를 진행하여 설계의 효율성을 증대시켰다.

Table 3 Result of sensitivity analysis

	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	total
x1								
x2	0	0	0	0	0	0	0	0
x3								
x4	0		0	0	0	0	0	0
x5								
x6	0	0	0	0	0	0	0	0
x7								
x8		0			0	0	0	0
x9								
x10	0	0	0	0	0			0
x11								
x12	0	0	0	0	0	0	0	0

5.4 최적화 기법

본 연구에서는 최적의 설계안을 찾기 위해 PIAAnO에 탑재되어 있는 PQRS(Progressive Quadratic Response Surface Method)⁸⁾을 사용하였다. 이 알고리즘은 수치적인 노이즈를 포함하는 CAE Solver를 이용

해야 하는 실제 문제에 효과적이고, 수치적인 노이즈에 대한 강건성이 떨어지는 전통적인 기울기 기반 최적설계 기법에 비해 안정적으로 최적해를 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 비교적 적은 수의 실험점으로 근사모델을 순차적으로 개선시키는 방법으로 최적화된 솔루션을 도출해 나간다.

수렴조건은 2 이터레이션 이상 구속조건을 만족하면서 목적함수의 개선이 없을 경우 수렴하도록 하였으며 총 10번째 이터레이션까지 진행한 후 수렴하였다. 최적해는 8번째 이터레이션에서 찾을 수 있었으며, 수렴하기까지 총 250번의 해석을 수행하였다. 1회 해석에는 대략 6분 가량이 소요되어 최적해를 얻기까지 약 25시간 가량 소요되었다.

5.5 최적 설계 결과

Fig. 5는 최적설계 결과 성능지수의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 6은 변화된 설계변수에 따른 부쉬 커브의 변화를 나타내 것이다. 성능지수 들 중 목적함수의 경우 초기 모델의 성능을 기준으로 정규화하였고,

Fig. 5 Optimization results (performance)

(a) Radial bush

(b) Vertical bush

(c) Axial bush

Fig. 6 Optimization results (bush curve)

구속조건의 경우 상한치를 100%, 하한치를 0%로 정규화하여 나타내었다. 최적설계 결과를 살펴보면 초기 설계에서는 위배되는 구속조건이 많은 반면 최적해에서는 모든 구속조건을 만족하였으며, 목적함수인 Lateral force steer off-center는 43.0% 개선되었고, Brake compliance at wheel center는 8.1% 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 승차감은 초기모델 대비 약간 떨어지지만 조종안정성 측면에서 초기모델 대비 매우 향상된 것을 확인할 수 있었다.

구속조건들 중 Lateral force steer on-center, Lateral force camber, Brake force steer, Brake compliance at wheel center가 구속조건의 하한치에 도달해 있는 것을 알 수 있는데 이 구속조건들과 목적함수와의 trade-off가 존재하기 때문에 구속조건들을 만족시키는 범위에서 목적함수를 더 개선시키기는 힘들 것으로 보인다. 이는 목적함수를 더 개선하고자할 경우 구속조건들을 위배하게 되기 때문이다. 물리적으로도 조종안정성과 관련된 목적함수인 Lateral force steer off-center를 더 개선시킨다면 승차감과 관련된 Brake compliance at wheel center가 더 악화되어 구속조건을 위배하게 되며, 승차감과 관련된 목적함수인 Brake compliance at wheel center를 더 개선시킨다면 조종안정성과 관련된 Lateral force steer on-center, Lateral force steer off-center, Brake force steer가 악화되어 구속조건을 위배하기 때문에 더 이상 목적함수의 개선은 힘들 것으로 예상된다.

최대화하고자하는 목적함수인 Brake compliance at wheel center가 초기모델 보다 8.1% 낮아졌는데 이는 초기 설계 목적과 상반된 결과라고는 할 수 없다. 초기설계 목표는 구속조건을 만족하는 범위 내에서 두 목적함수 Lateral force steer off-center와 Brake compliance at wheel center를 최대화하는 것이었으며, 초기모델에서 구속조건들을 위배하였으므로 이러한 구속조건들을 만족시키기 위해 Brake compliance at wheel center가 다소 감소하게 되었다. 만약 현재의 최적해에 만족하지 않고 Brake compliance at wheel center를 더 개선시키고자할 경우 이에 대한 구속조건을 추가하거나 목적함수에서 Brake compliance at wheel center에 대한 가중치를 늘려서 최적설계를 수행해 볼 수 있을 것이나 이 경우 Lateral force steer off-center는 보다 감소할 것으로 예상된다.

6. 결 론

차량 후륜 현가장치의 조종안정성(Ride and handling)을 향상시키기 위하여 후륜 현가계의 트레일링 암 부위 파라미터를 최적설계 하였다. 효율적인 최적설계를 위해 전/후처리과정 및 해석절차 자동화를 수행하였으며, 실험계획법을 통해 설계변수의 영향도를 분석한 후 성능지수들에 큰 영향을 미치

는 설계변수들을 선택해 최적설계를 수행하였다.

최적설계 결과 모든 성능지수가 구속조건을 만족하였으며, 목적함수인 Lateral force steer off-center가 43.0% 개선되었고, Brake compliance at wheel center는 8.1% 감소하는 설계안을 얻었다. 이는 초기 설계보다 승차감은 다소 떨어지나 조종안정성이 크게 향상된 것이며 초기 설계에서 위배한 구속조건들을 모두 만족할 수 있었기 때문에 초기모델에 비해 매우 향상된 결과라고 할 수 있다. Brake compliance at wheel center가 초기 모델에 비해 감소한 것은 초기 설계에서 위배된 구속조건을 모두 만족시키기 위해 다소 희생된 것으로 보인다. 하지만 이는 초기 설계 목표와 상반된 결과는 아니며 Brake compliance at wheel center를 초기설계보다 더 개선시키고자한다면 관련된 구속조건을 추가하거나 혹은 목적함수에서 Brake compliance at wheel center에 대한 가중치를 늘려서 최적화를 수행해 볼 수 있을 것이나, 이 경우 다른 목적함수인 Lateral force steer off-center가 현제 얻은 최적해보다 감소할 것으로 예상된다.

본 연구를 통하여 수치적 부담이 커 최적설계가 어려운 실제 공학 문제를 효과적으로 최적화 할 수 있는 방법론은 제안하였으며, 이의 효율성과 유용성을 입증하였다. 또한 이 방법론이 향후 실제 산업화 제품 설계에 적용되어 더욱 향상된 성능의 제품이 생산될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원과 한국지엠의 “G2xx R&H 해석 및 최적설계” 과제의 지원을 받아 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다(No. 2011-0016701). 또한, PIDO 툴인 PIANO 소프트웨어를 제공한 (주)피도텍에 감사드립니다.

References

- 1) J. K. Ok, W. K. Baek and J. H. Sohn, “Optimum Design of the Shock Absorber Position Using ADAMS and VisualDOC,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.2, pp.1-8, 2006.
- 2) K. Fujita, N. Hirokawa, S. Akagi and T. Hirata, “Design Optimization of Multi-link Suspension System for Total Vehicle Handling and Stability,” 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, pp.620-630, 1998.
- 3) C. H. Lee and J. H. Choi, “Simulation-based Design Study of Suspension System SDF for Enhancing Ride & Handling Performance of an Initial Development Vehicle,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.848-854, 2005.
- 4) B. L. Choi, D. H. Choi, H. S. Kim and H. C. Lee, “An Integrated Chassis Design Procedure Using the PIDO Technology,” SAE 2008-01-0884, 2008.
- 5) S. M. Yook, B. L. Choi, D. H. Choi, J. H. Choi, I. D. Kim and H. J. Baek, “Integration of Analysis and Design Process for Vehicle Suspension System Using PIANO,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.314-314, 2008.
- 6) PIANO (Process Integration, Automation and Optimization) User’s Manual, Ver.3.3, PIDOTECH Inc., 2011.
- 7) N. A. Butler, “Optimal and Orthogonal Latin Hypercube Designs for Computer Experiments,” Biometrika, Vol.88, No.3, pp.847-857, 2001.
- 8) K. J. Hong, D. H. Choi and M. S. Kim, “Progressive Quadratic Approximation Method for Effective Constructing the Second-Order Response Surface Models in the Large Scaled System Design,” Transactions of the KSME A, Vol.24, No.12, pp.3040-3052, 2000.

Appendix. Sensitivity analysis results

Fig. 7 Sensitivity analysis results of lateral force steer on-center (g1)

Fig. 8 Sensitivity analysis results of lateral force steer off-center (g2)

Fig. 9 Sensitivity analysis results of lateral force camber (g3)

Fig. 10 Sensitivity analysis results of lateral compliance at contact patch (g4)

Fig. 11 Sensitivity analysis results of brake force steer (g5)

Fig. 12 Sensitivity analysis results of recession deflection (g6)

Fig. 13 Sensitivity analysis results of brake compliance at wheel center (g7)