

< 기술논문 >

ADAMS와 VisualDOC를 사용한 속업쇼버 위치의 최적설계

옥진규¹⁾ · 백운경^{*2)} · 손정현²⁾

부경대학교 기계공학부 대학원¹⁾ · 부경대학교 기계공학부²⁾

Optimum Design of the Shock Absorber Position Using ADAMS and VisualDOC

Jinkyu Ok¹⁾ · Woonkyung Baek^{*2)} · Jeonghyun Sohn²⁾

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

²⁾School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 19 January 2005 / Accepted 6 October 2005)

Abstract : In this paper, an optimum design technology is developed to find an optimal position of the shock absorber using ADAMS and VisualDOC. A vehicle with a torsion-beam rear suspension is modeled by using ADAMS. Design variables for the optimal positioning of the shock absorber are defined considering the hard points of the chassis structure and design positioning are specified through the sensitivity analysis using a bump-crossing simulation. The objective function is defined as the joint reaction forces of the shock absorber connecting joints of the chassis structure. Sequential Quadratic Programming and Genetic Algorithms are used for this study. To validate the optimized design variables, pothole simulations are performed. GA showed better results than SQP algorithms for this design purpose.

Key words : Optimum design(최적설계), Torsion-beam suspension(토션빔 현가장치), Reaction forces(반력), Hard point(장착 설계점), Genetic algorithms(유전 알고리즘), Sequential quadratic programming(순차 2차계획법)

1. 서론

현가장치는 차량의 중량을 지탱하는 역할을 할 뿐 아니라 승차감 및 주행 안정성을 결정하는 중요한 기능을 담당한다. 현가장치는 장착 설계점, 감쇠 계수, 스프링 상수, 각 부품들의 질량과 같은 설계 변수들로 구성되어 있다. 이와 같이 많은 설계변수들로 구성된 현가장치의 성능을 해석하고 예측하기 위해 ADAMS¹⁾와 DADS 같은 범용 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하는 것이 편리하다. 이와 같은 컴퓨터를 이용한 현가장치 해석 기법은 주어진 현가장치에 대한 성능의 예측에 주안점을 둔다. 하지만 성능을 향상시키기 위해서는 어떤 방향으로

설계를 개선해야 하는지에 대한 해답을 제공하지 못하고 있다. 따라서 주어진 설계변수들이 현가장치의 성능에 미치는 영향을 수치적으로 파악할 수 있는 수단이 있다면 이는 동역학 시뮬레이션 기법과 더불어 대단히 유용한 설계 도구가 될 수 있을 것이다.

이러한 경향을 반영하여 최근에는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 범용 해석 프로그램에도 최적화 기능이 포함되고 있다. ADAMS 프로그램에 포함된 최적화 기능은 국부 최적화 알고리즘이 내장되어 있다.¹⁾ 해석 대상의 환경이나 목적함수에 따라서 효율적인 알고리즘은 달라질 수 있다. 현가장치와 같은 비선형성이 강한 시스템에는 전역 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 적용하

*Corresponding author. E-mail: baekwk@pknu.ac.kr

는 경향이 증가하고 있다.^{2,3)}

국내에서도 현가장치 설계 최적화에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 탁⁴⁾은 현가장치의 운동방정식을 세워 민감도 해석을 행한 후 이 식을 이용한 이론적인 최적설계 방법을 제시하였다. 차량의 동특성의 평가를 다구찌 방법, 실험계획법, 유전 알고리즘을 적용하여 최적설계를 수행한 경우도 있었다. 최⁵⁾는 ADAMS와 외부 최적화 모듈인 EMDIOS 프로그램을 GUI 환경에서 연결하여 근사최적화 방법을 이용하여 최적설계를 하였다.

본 논문에서는 유전 알고리즘이 포함된 최적화 소프트웨어 VisualDOC⁶⁾ 프로그램을 ADAMS와 연계시켜 VisualDOC 프로그램 내부에서 설계 정보를 변경하여 반복적으로 실행되도록 하였다. 이 방법을 사용하면 최적설계에 익숙하지 못한 사용자도 동역학 해석과 최적설계를 쉽게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. ADAMS와 VisualDOC의 인터페이스

VisualDOC는 ADAMS와 같은 사용자의 해석 프로그램을 VisualDOC와 연결하여 최적설계를 가능하게 하는 소프트웨어다. VisualDOC는 최적설계의 주 알고리즘을 포함하고 있는 DOT와 사용자의 해석 프로그램을 편리하게 연결시킬 수 있으며 DOT에서 필요한 입력 자료를 프로그램화하지 않고 GUI 환경에서 입력과 수정이 가능한 프로그램이다. VisualDOC에서 제공하는 최적설계 알고리즘으로 미분 기반의 최적설계 알고리즘, 실험계획법, 전역 최적설계 알고리즘 등이 내포되어 있다.⁶⁾

VisualDOC는 외부 프로그램 및 데이터와 상호작용할 수 있도록 응용 프로그램 인터페이스를 제공한다. VisualDOC는 내부에 VisualScript 라는 인터페이스 프로그램을 삽입함으로써 프로그램의 개수에 전혀 구속 받지 않고 사용가능 할 뿐 아니라 응답(response)으로 설정할 수 있는 결과파일의 개수도 구속 받지 않는다. VisualDOC는 해석 프로그램의 입·출력 파일이 ASCII 코드로 작성되어 있으면 어떤 프로그램과도 연결이 가능하다.

VisualDOC를 ADAMS와 연계시켜 VisualDOC에

서 설계 정보를 변경하여 반복적으로 해석이 가능하도록 하기 위해서 ADAMS는 운영체제의 명령 입력창(command windows)에서 실행되어야 한다. VisualDOC에서는 ADAMS의 입력데이터를 이용하여 설계변수를 정의할 수 있다. 이 때 사용되는 ADAMS의 입력데이터는 *.cmd 파일이나 *.sub 파일과 같은 ASCII 코드로 작성된 파일을 예로 들 수 있다. 목적함수나 제약조건은 ADAMS의 결과 파일에서 정의할 수 있다. 본 연구에서 사용한 ADAMS의 결과 파일은 *.out, *.txt 파일을 사용하였다. VisualDOC에서 설계변수, 목적함수, 제약조건이 설정되었으면 설계 목적에 적합한 알고리즘을 선택하여 최적설계를 수행한다. 최적설계 결과를 평가하여 최적의 파라미터 값을 선택한다. 이와 같은 일련의 과정을 Fig. 1에 도시하였다.

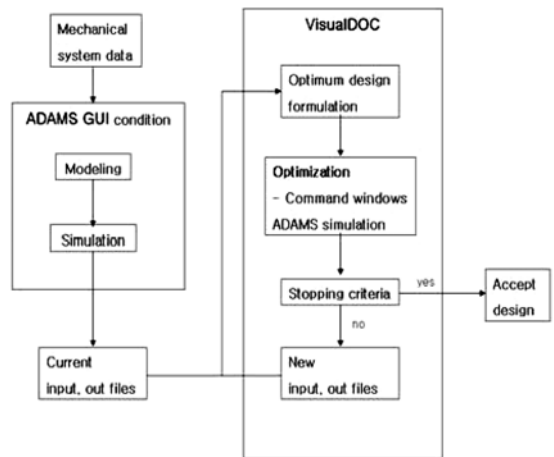


Fig. 1 Optimum design flow chart

3. 차량 동역학 모델

본 논문에서 사용한 차량은 토션빔 후륜 현가장치를 적용한 다목적 차량(Multi Purpose Vehicle : MPV)이다. 전 차량 모델에서 전륜 현가장치로 맥퍼슨 스트럿(McPherson strut) 타입, 후륜 현가장치로 토션빔(torsion-beam) 타입을 적용하였고 차량의 조향장치로 랙-피니언 타입(rack-pinion)을 적용하였다. 차량은 전체 52개의 강체 요소를 사용하였고, 62개의 조인트, 2개의 커플러(coupler), 3개의 운동 구속(driver constraint), 6개의 부싱 및 4개의 스프링과

댐퍼로 구성되어있으며 UA 타이어를 사용하였다. 전 차량 모델의 자유도는 22이다. ADAMS로 모델링한 전 차량 모델을 Fig. 2에 도시하였다.

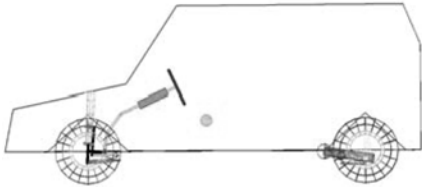


Fig. 2 Full car model

4. 범프 시뮬레이션

본 논문에서는 차량이 범프를 지날 때 댐퍼와 트레일링 암을 연결하는 조인트에 가해지는 반력을 정량적으로 구하기 위한 시뮬레이션을 하였다. 차량이 30km/h의 속도로 높이 150mm, 폭이 1200mm인 범프를 통과하는 시뮬레이션을 4초간 실행하였다. 범프의 개략적인 모습을 Fig. 3에 도시하였다.

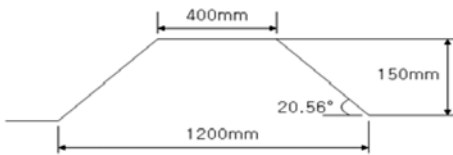


Fig. 3 Bump description

범프를 통과할 때 차체의 무게 중심점에서 수직 방향의 변위와 가속도를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

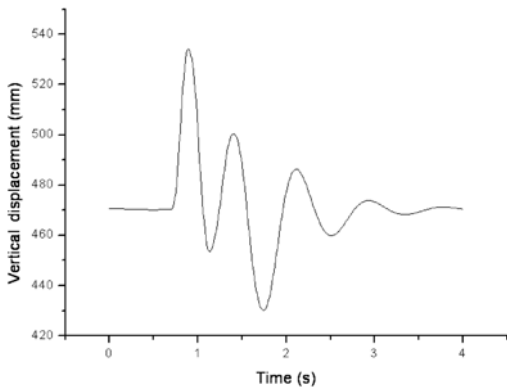


Fig. 4 Vertical displacement of the C.G

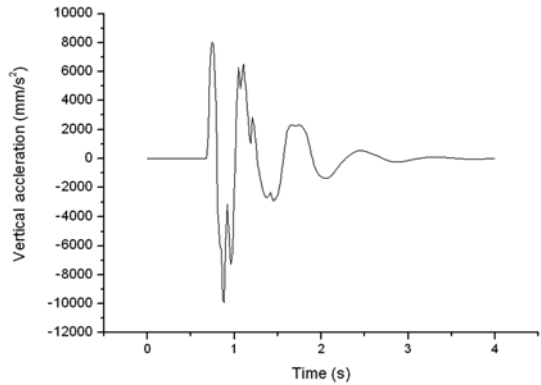


Fig. 5 Vertical acceleration of the C.G

현가장치가 노면으로부터 충격을 받을 때 현가장치에서 차체로 전달력을 감쇠하는 역할을 하는 것이 댐퍼이다. 댐퍼에 직접적인 충격을 줄이기 위해서 댐퍼와 트레일링 암 사이에 고무 부싱이 들어가게 된다. 부싱에 작용하는 반력은 부싱의 크기나 강성에 영향을 많이 받으므로 본 연구에서는 부싱의 영향을 배제하고 조인트를 사용하였다. Fig. 6에 댐퍼와 트레일링 암을 연결하는 조인트의 국부좌표계를 나타내었다.

범프 시뮬레이션 후 댐퍼와 트레일링 암을 연결하는 조인트의 반력을 국부좌표인 x, y 방향에 대하여 Fig. 7에 나타내었다.

차량의 앞바퀴가 범프를 통과한 후 뒷 바퀴가 범프를 통과하려고 할 때 댐퍼는 인장하게 되고, 이때의 댐퍼 인장력이 조인트에 가해졌을 때 조인트의 댐퍼 축 방향에 대한 반력은 최대값을 나타낸다. x 방향의 반력은 댐퍼가 인장할 때 최대값을 보이고, 반력의 최대크기는 504N이다. y 방향의 조인트 반력 또한 댐퍼가 인장될 때 최대값을 나타내고, 크기는 250N이다.

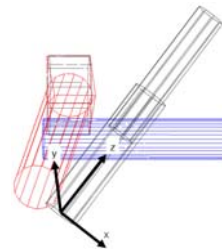
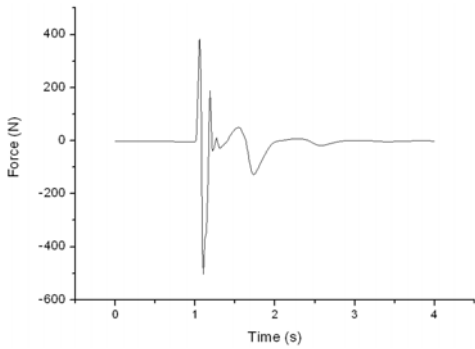
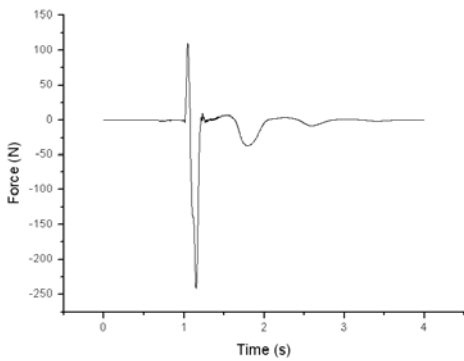


Fig. 6 Local coordinates for joint part



(a) *x* coordinates



(b) *y* coordinates

Fig. 7 Reaction forces after bump simulation

범프를 통과하는 시뮬레이션을 한 결과 댐퍼와 트레일링 암을 연결하는 조인트에는 댐퍼의 측면 방향으로의 조인트 반력이 상당히 큰 값을 나타내는 것이 확인된다. 축력이 많이 발생되면 댐퍼의 내구성에 문제가 생길 수 있으므로 축력을 줄이는 최적 설계 방안에 대해서 최적설계를 하고자 한다.

5. 최적설계

현가장치에서 댐퍼는 장착된 위치에 따라서 성능이 달라질 수 있고, 댐퍼와 연결된 조인트의 반력의 크기 또한 달라질 수 있다. 그리하여 본 논문에서는 댐퍼의 위치를 설계변수로 정하였다. Fig. 8에 토션빔 현가장치에서 댐퍼가 연결된 기구학적 상태를 나타내었고, Fig. 8에서 P_1, P_2, P_3, P_4 의 전역 좌표 X, Y, Z 를 설계변수로 하였다.

P_3, P_4 의 전역 좌표 X, Z 는 P_1, P_2 의 X, Z 값과 동일하므로 같은 설계변수로 취급하였다. P_3, P_4 의

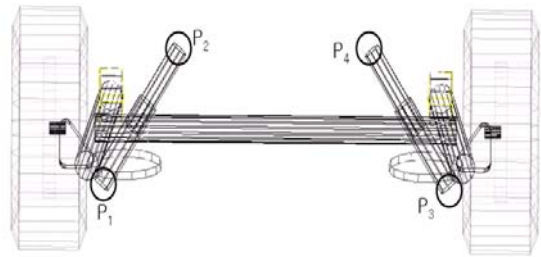


Fig. 8 Location of damper and design variables

전역 좌표 Y 는 P_1, P_2 의 값에 (-)값을 입력하였고, 이것은 토션빔 현가장치가 좌우 대칭적인 구조이기 때문이다. 이와 같이 함으로써 설계변수의 개수를 12개에서 6개로 감소시킬 수 있었다.

설계변수의 초기위치는 최적설계를 수행하기 전 현재 댐퍼의 위치이다. 설계변수의 허용범위는 민감도 해석을 바탕으로 댐퍼 장착 지점의 특성, 차량과 현가장치의 간섭 여부를 고려하여 결정하였다.

댐퍼의 측면 방향으로의 반력을 최소화하기 위한 목적함수를 식 (1)과 같이 정의하였다. 목적함수에서 조인트 반력을 좌측과 우측을 동시에 고려함으로써 최적설계 진행 과정에서 댐퍼의 성능이 어느 한쪽으로 치우치지 않도록 하였다.

$$f(x) = \{w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x)\} + \{w_3 f_3(x) + w_4 f_4(x)\} \quad (1)$$

여기서 $f_1(x), f_2(x)$ 는 P_1 에 연결된 조인트의 x, y 방향 반력, $f_3(x), f_4(x)$ 는 P_3 에 연결된 조인트의 x, y 방향 반력이다. 그리고 w_1, w_2, w_3, w_4 는 가중치이다.

Fig. 7에서 x 방향의 반력이 y 방향의 반력보다 2배 크기 때문에 $w_1 = 2w_2$ 로 설정했다. 그리고 가중

치의 합은 1을 만족해야 하므로⁷⁾ $w_1, w_3 = \frac{1}{3}$,

$w_2, w_4 = \frac{1}{6}$ 로 정하였다.

최적설계 과정에서 댐퍼의 크기를 초기 상태를 기준으로 $\pm 10\text{mm}$ 내에서 변화하도록 제한을 두었다. 또한 현재 댐퍼의 z 축 방향의 힘이 식 (3)과 같이 일정 수준 이상을 만족하도록 제한조건을 두었으며 다음 식과 같이 정의하였다.

$$387.54 < d_c < 407.84 \quad (2)$$

$$3175.95 < d_z \quad (3)$$

여기서 d_c 는 현재 댐퍼의 길이, d_z 는 현재 댐퍼의 z 축 방향의 댐핑력이다.

최적설계 알고리즘으로서는 ADAMS에 SQP 모듈과 VisualDOC의 유전 알고리즘을 사용한 경우를 비교하였다. 이 때 유전 알고리즘에 사용되는 파라미터로 집단의 크기는 150, 세대교체의 최대횟수는 100, 돌연변이율은 0.05를 사용하였다. 교배는 일정 교배법을 이용하였고, 교배율은 0.8, 0.85, 0.9, 0.95의 4가지 경우에 대해서 최적설계를 수행하였다.

VisualDOC 프로그램에서는 제한조건이 있는 목적함수를 Lagrange multiplier method를 사용하여 비제약 최적설계 문제로 변경하여 최적설계를 수행하도록 내부적으로 구성되어 있다. 따라서 본 논문에서 GA를 사용한 최적설계문제도 위와 같은 방법으로 구속조건을 처리하였다.

ADAMS의 최적화 모듈을 이용하여 최적설계를 수행하는 경우와 VisualDOC의 GA를 적용하여 최적설계를 수행할 때 종료조건을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Stopping criteria

ADAMS SQP	<ul style="list-style-type: none"> • 목적함수 수렴에 대한 절대치 차: $1e-4$ • 최대 반복회수: 100
VisualDOC GA	<ul style="list-style-type: none"> • 목적함수 수렴에 대한 절대치 차: $1e-4$ • 목적함수 수렴에 대한 상대적 차: $1e-3$ • 설계변수 수렴에 대한 절대치 차: $1e-4$ • 설계변수 수렴에 대한 상대적 차: $1e-3$ • 목적함수의 값이 5번 반복되는 경우

ADAMS 최적화 모듈의 SQP 알고리즘을 적용한 최적설계 과정에서 목적함수의 변화과정(history)을 Fig. 9에 도시하였다. VisualDOC의 GA를 적용하여 최적설계 과정에서 교배율이 0.8, 0.85, 0.9, 0.95일 때 목적함수의 변화과정을 Fig. 10에 나타내었다.

SQP는 초기 설계변수를 통한 해석을 수행하고 이를 이용해 목적함수 및 구속조건인 설계변수에 대한 도함수를 구하고, 이를 토대로 설계개선 방향과 점차적인 설계변수의 변화량을 조정하여 최적치를 탐색한다. GA는 설계변수 영역 즉 탐색공간 전

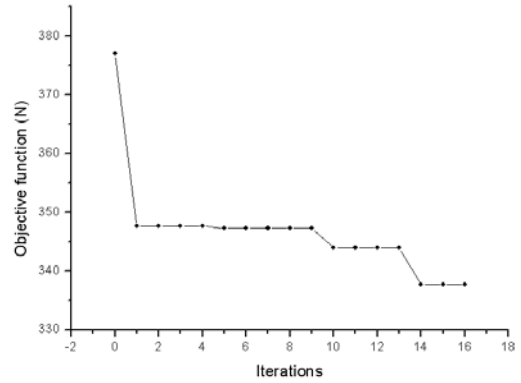


Fig. 9 History of object function using SQP of ADAMS

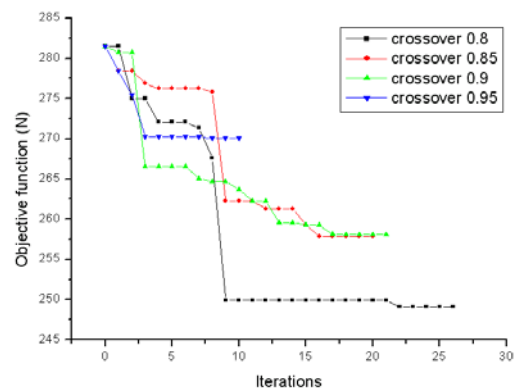


Fig. 10 History of object function using GA of VisualDOC

역에 분포된 유전자들의 적합도를 평가하고, 이를 통해 선택된 우수 개체를 바탕으로 새로운 세대를 구성하여 최적해로 수렴한다. 따라서 Fig. 9와 Fig. 10에서 초기설계변수값에 영향을 받는 SQP와 설계변수 변화영역내에서 임의의 값을 사용하여 초기목적함수를 구하는 GA의 처음 목적함수는 다를 수밖에 없고 초기 설계변수 영향으로 국부최소값에 빠질 수도 있는 SQP와는 최종값에서도 다를 수 있다.

VisualDOC의 유전 알고리즘을 적용한 경우, 교배율이 0.8일 때 목적함수의 변화폭이 가장 큰 것으로 확인된다. 펜티엄4 2.8GHz, 메모리 1GByte가 설치된 PC에서 최적설계는 수행되었다. ADAMS의 SQP 알고리즘, VisualDOC의 GA를 적용한 경우의 결과를 Table 2에 비교하였다. 최적설계 후 설계변수의 결과치를 Table 3에 나타내었다.

Table 2에서 GA는 SQP에 비해 반복회수의 증가와 많은 계산시간에도 불구하고, 전역 최적값에 수

Table 2 Comparison of results

S/W	Iterations	Force reduction	CPU time	Improved degree
ADAMS (SQP)	16	39.26N	207min	10.4%
VisualDOC (GA)	26	127.91N	1458min	33.9%

Table 3 Optimal values of design variables (Unit : mm)

Design variable	Lower bound	Optimal value		Upper bound
		SQP	GA	
x_1	4200.51	4373.92	4319.72	4450.51
x_2	-577.35	-567.54	-558.28	-557.35
x_3	74.21	87.21	89.33	104.21
x_4	4364.01	4385.32	4403.44	4404.01
x_5	-322.28	-311.68	-321.27	-302.28
x_6	410	437.7	448.06	450

림할 수 있는 장점이 있으므로 현가장치와 같은 비선형성이 강한 시스템에 더 적합할 것으로 사료된다. GA를 적용하여 최적설계 후 댐퍼의 위치를 최적설계 전과 비교하여 Fig. 11에 나타내었다.

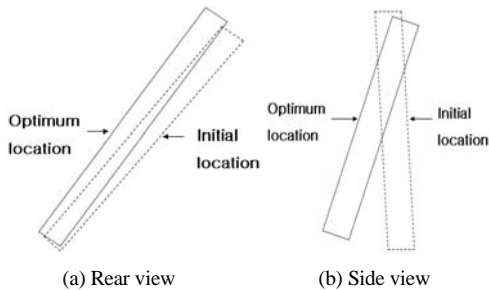
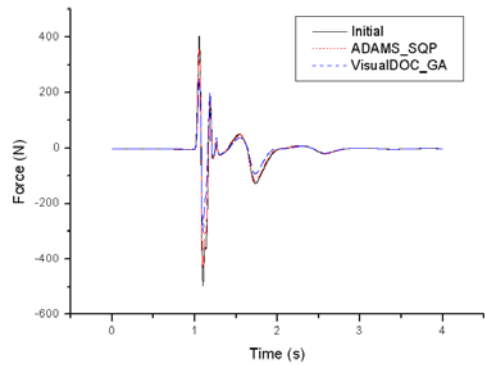


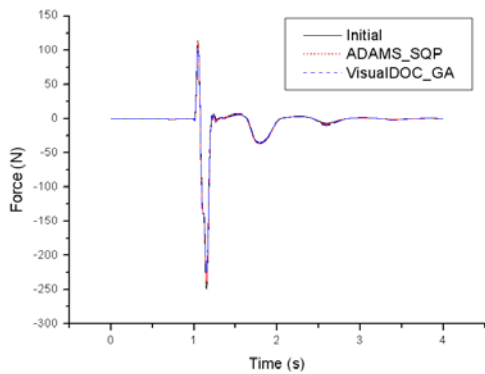
Fig. 11 Optimum location of damper

범프 시뮬레이션에서 x 방향의 반력과 y 방향의 반력을 최적설계 전과 후를 Fig. 12에 비교하였다.

x 방향의 반력의 최대 크기는 초기치 504N에서, SQP 알고리즘을 적용한 경우 444.3N, GA를 적용한 경우 308.17N으로 감소하였다. 각각 11.8%, 38.9%의 반력의 크기가 줄어들었다. y 방향의 반력의 최대 크기는 초기값 250.73N에서, SQP 알고리즘을 적용한 경우 242.77N, GA를 적용한 경우 225.92N으로 감소하였다. 각각의 경우에 3.2%와 9.9%의 반력의



(a) x coordinates



(b) y coordinates

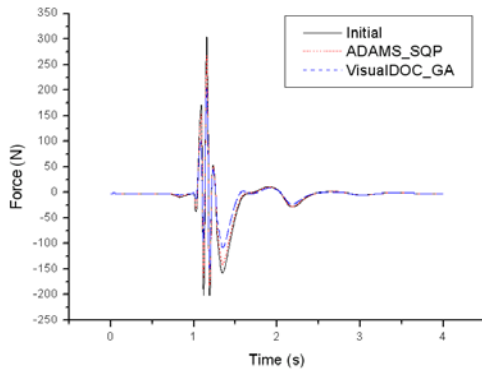
Fig. 12 Change of reaction force after optimum design

크기가 개선되었다.

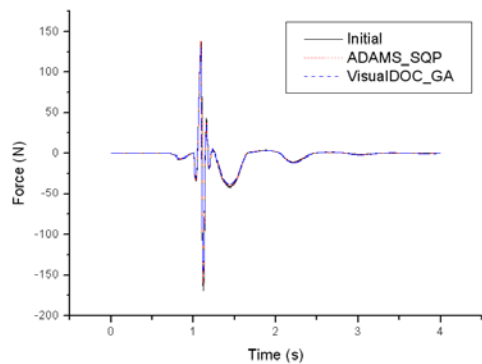
6. 웅덩이 시뮬레이션을 통한 결과 검증

댐퍼의 위치 최적설계를 검증하기 위한 방법으로 웅덩이(pothole) 시뮬레이션을 하였다. 차량이 움푹 파인 웅덩이를 지나갈 때 댐퍼와 트레일링 암을 연결하는 조인트에 걸리는 반력을 확인하였다. 범프 시뮬레이션에서의 최적설계 결과를 입력하여 웅덩이 시뮬레이션에서 댐퍼 반력의 개선 효과를 확인하였다. 웅덩이는 길이 1200mm, 높이는 -150mm로 하였다. 조인트의 x 방향 반력과 y 방향의 반력을 최적설계 전과 후를 Fig. 13에 비교하였다.

x 방향으로의 반력 크기를 최적설계 전과 후 비교하면 초기값 289.8N에서 SQP의 경우 253.91N, GA를 적용한 경우 193N으로 각각 35.89N, 96.8N이 감소하였다. VisualDOC의 GA를 적용한 경우 반력



(a) *x* coordinates



(b) *y* coordinates

Fig. 13 Change of reaction forces after pothole simulation

이 더 크게 감소하고 33.4%의 개선 효과가 있는 것으로 확인된다. *y* 방향의 조인트 반력 크기는 초기치 173.94N에서 최적설계 후 SQP의 경우 165.82N, GA의 경우 145.77N으로 감소하였다. GA를 적용한 경우 16.19%만큼 반력의 크기가 개선되었다.

7. 결론

본 논문에서는 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 이용하여 MPV 차량을 모델링 하였다. ADAMS에서 차량의 동특성을 구한 후 최적화 프로그램인 VisualDOC를 ADAMS와 연계시켜 VisualDOC 내부에서 설계 정보를 변경하여 반복적으로 실행되도록 하였다. 이러한 연구 과정을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 토션빔 현가장치에서 댐퍼 측면 방향의 반력을 최소화하기 위한 목적함수를 제안하였다.

- 2) VisualDOC의 GA를 적용한 최적설계 후 댐퍼의 *x* 방향의 측면 반력은 38.85%, *y* 방향의 측면 반력은 9.9% 개선되었다.
- 3) 응답이 시뮬레이션으로 최적결과가 타당함을 확인하였다.
- 4) 최적설계에서 목적함수는 SQP 10.4%, GA 33.9%가 각각 감소하였다. GA를 사용하는 경우 계산시간과 반복회수는 증가하였지만 최적설계의 보다 나은 결과를 얻기 위해서는 ADAMS의 SQP 모듈을 이용하는 것보다 VisualDOC와 ADAMS를 연계시켜 GA를 사용하는 것이 보다 나은 최적 설계 변수를 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

댐퍼에 힘이 과도하게 작용하게 되면 댐퍼의 변형을 유발시키고, 오일의 누설이 발생하게 되는 중요한 요인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 댐퍼의 위치(*x,y,z*)를 바꾸면서 댐퍼에 작용하는 반력을 최소화하는 최적설계 문제를 수행하였으며, 향후 힘에 따른 변형특성 및 오일 누수에 관한 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

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

References

- 1) ADAMS User's Manual, MSC Software Corporation, 2003.
- 2) 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.
- 3) T. Yamanaka, H. Hoshino and K. Motoyama, "Design Optimization Technique for Suspension Mechanism of Automobile," Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000 G309, 2000.
- 4) T. O. Tak, "Optimal Design of Vehicle Suspension Systems Using Sensitivity Analysis," Transactions of KSAE, Vol.2, No.3,

pp.50-61, 1994.

- 5) B. L. Choi, M. S. Chu and D. H. Choi, "Development of GUI Technology for Interfacing and Automation of an External Optimization Module with ADAMS/Car," 2001 Korea ADAMS User Conference, 2001.
- 6) VisualDOC 4.0 User's Manual, Vanderplaats Research & Development, Inc., 2005.
- 7) A. D. Belegundu and T. R. Chandrupatla, Optimization Concepts and Applications in Engineering, Prentice-Hall, New Jersey, 1999.