



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권으로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿
현가장치의 최적설계



2007년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

지 능 기 계 공 학 전 공

박 정 훈

공 학 석 사 학 위 논 문

캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿
현가장치의 최적설계

지도교수 백 운 경

이 논문을 석사학위논문으로 제출함.

2007년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

지 능 기 계 공 학 전 공

박 정 훈

박정훈의 공학석사 학위논문을
인준함.

2007년 2월



주 심 공학박사 손 정 현 ㉠

위 원 공학박사 이 일 영 ㉠

위 원 공학박사 백 운 경 ㉠

목 차

Abstract	1
제 1 장 서 론	2
1.1 연구배경	2
1.2 연구목적 및 내용	4
제 2 장 현가장치	6
2.1 현가장치의 종류	6
2.2 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치	9
제 3 장 차량 동역학 모델	11
3.1 ADAMS 프로그램의 개요	11
3.2 전륜 현가장치 모델링	12
3.2.1 맥퍼슨 스트럿 현가장치	12
3.2.2 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치	15
3.2.3 모델 검증	17
3.3 후륜 현가장치 모델링	20
3.4 전차량 모델링	22
제 4 장 민감도 해석	24
4.1 민감도 해석의 개요	24
4.2 민감도 해석의 결과	25
4.3 SDF 특성 분석	28

제 5 장 최적 설계	32
5.1 VisualDOC	32
5.2 최적 설계 이론	35
5.3 최적 설계 문제의 정식화	37
5.4 하드포인트 최적화 및 결과 비교	39
 제 6 장 전차량 시뮬레이션	45
6.1 범프 시뮬레이션	45
6.2 스텝 조향 해석	49
 제 7 장 결론	56
 참고문헌	58
 부 록	61
A. 현가장치	61
B. 유전자 알고리즘	70

List of Table

Table 1 Classification of suspension	7
Table 2 Comparison of characteristics among three struts	10
Table 3 Parts and mass of MacPherson strut suspension	12
Table 4 Degrees of freedom of front suspension model using MacPherson strut suspension	13
Table 5 Parts and mass of MacPherson strut suspension with a carrier	16
Table 6 Degrees of freedom of front suspension model using MacPherson strut suspension with a carrier	17
Table 7 Rear suspension's parts and mass	20
Table 8 Degrees of freedom of rear suspension model	21
Table 9 Numbers of Plackett-Burman Design	26
Table 10 Comparison between DDM and PM	27
Table 11 Results of sensitivity analysis	28
Table 12 Suspension SDF general Target	37
Table 13 Stopping criteria of optimization	39
Table 14 Performance factors of step steer	54
Table 15 Response parameters of step steer simulation	55

List of Figure

Fig. 2.1 Vehicle performance while passing bump	6
Fig. 2.2 MacPherson strut suspension with a carrier	10
Fig. 3.1 MacPherson strut suspension	12
Fig. 3.2 Damping force curve - Front suspension	14
Fig. 3.3 Inputs and outputs of the UA-Tire model	15
Fig. 3.4 MacPherson strut suspension with a carrier	16
Fig. 3.5 Comparison of results between MS and MC	19
Fig. 3.6 Rear suspension model	20
Fig. 3.7 Damping force curve - rear suspension	21
Fig. 3.8 Steering system	22
Fig. 3.9 Stabilizer bar	23
Fig. 3.10 ADAMS full car model	23
Fig. 4.1 Hard-points of a MacPherson strut suspension with a carrier	26
Fig. 4.2 ADAMS model for sensitivity analysis	29
Fig. 4.3 Difference of variation between MS and MC	31
Fig. 5.1 Basic VisualDOC system	32
Fig. 5.2 Interface script definition dialog for input and output values	33
Fig. 5.3 ADAMS menu at command window	34
Fig. 5.4 Flow-chart between ADAMS and VisualDOC	35
Fig. 5.5 Design variables for optimization	38
Fig. 5.6 History of object function	40
Fig. 5.7 Results of Optimization	44

Fig. 6.1 Local coordinate for bump simulation	46
Fig. 6.2 Results of bump simulation	48
Fig. 6.3 Performance of step steer analysis	49
Fig. 6.4 steering wheel input	51
Fig. 6.5 Results of step steer simulation	53
A.1 Rigid axle suspension	61
A.2 Double wishborn type suspension	63
A.3 MacPherson strut suspension	64
A.4 Caster angle	66
A.5 Camber angle	67
A.6 Toe angle	68
A.7 Toe angle of MacPherson strut	68
A.8 Kingpin Inclination Angle	69
B.1 Flow chart of genetic algorithm	72
B.2 Comparison of conventional and genetic approaches	73

Optimal Design of A Macpherson Strut
Suspension with A Carrier

Jeong-Hoon Park

*Major of Intelligent Mechanical Engineering, The Graduate School.
Pukyong National University*

Abstract

The purpose of this paper is to study modified MacPherson strut suspension which minimizes production and transmission of disturbing vibration and force. In this paper, a design of MacPherson strut suspension with carrier is presented using ADAMS. To analyze how hard points affect SDF(Static Design Factors) of MacPherson strut suspension with a carrier, sensitivity analysis is conducted through the experimental design sensitivity analysis using Plackett-Burman Design in ADAMS/Insight. A method for optimizing hard points of modified MacPherson strut suspension is presented using multibody dynamics simulation, ADAMS and VisualDOC. The design variables to optimize SDF are extracted using Genetic Algorithm(GA) in VisualDOC. As a results of the optimization, kinematic characteristics satisfy SDF target value. A full vehicle model is developed ,which consists of MacPerson strut suspension with a carrier. To evaluate optimized hard points of MacPerson strut suspension with a carrier, J-turn simulation is performed. the results of simulation show that the vehicle which has the optimized MacPherson strut suspension with a carrier has better performance than the one with the MacPherson stut suspension.

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

운송 수단으로서 인간에게 많은 편의성을 제공하는 자동차는 현대사회를 살아가기 위한 필수품으로 이미 확고한 위치를 차지하고 있다. 이러한 자동차에 대하여 다양한 신기술들이 지속적으로 개발되고 있지만 최근에는 단순한 주행 성능의 향상과 충돌 시 운전자의 보호뿐만 아니라, 주행 시 차량 실내의 조용함, 운전자의 피로 저감, 주행 안정성 확보 등과 관련된 기술에 대해서도 점점 관심이 높아지고 있다. 특히 도로의 정체로 인해 차 안에서 보내는 시간이 증가하면서 이런 현상은 더욱 가속화될 전망이다. 따라서 승차감과 주행 안정성에 크게 영향을 미치는 현가장치 개발은 자동차 연구 개발 과정 중에서 상당한 비중을 차지하는 중요한 과제로 다루어지고 있다.

현가장치는 불규칙한 노면에 의한 진동을 흡수해 차체로의 진동전달을 억제하여 승객의 승차감을 향상시키고, 조종안정성을 확보하는 역할을 한다. 특히, 현가장치의 하드 포인트는 차량의 승차감 및 조종안정성에 직접적인 영향을 줄 뿐 아니라, 실제 조립 및 기타 부품들과의 공간적인 배치에 직접적인 영향을 주는 가장 중요한 요소 중의 하나로서 설계 초기 단계에서 주의 깊게 검토되어야 한다.

1970년대 오일 쇼크는 구조가 간단하고 상대적으로 가벼워 많은 인기를 얻은 맥퍼슨 스트럿 현가장치와 비록 원가는 다소 비싸지만 고성능을 요구하는 차들에 널리 적용되어 왔던 더블 위시본 현가장치 등이 승용차 현가장치의 큰 주류를 이루어왔다. 1980년대에는 5링크 현가장치라는 고성능 멀티링크식 현가장치가 벤츠사에 의해 최초로 차량의 후륜 현가장치에 채택되었으며 이를 필두로 하여 전륜 · 후륜에 적용되는 다양한 형식의 현가장치가 개발되기 시작하였다. 특히 1980년대 이후부터는 고출력 엔진의 등장과 더불어 소비자의 주행 안전 성능에 대한 요구가 높아짐에 따라

안전하게 주행이 가능한 성능을 갖는 현가장치의 출현이 요구되기 시작하였다. 또한 컴퓨터 기술의 급속한 발전은 차량 동역학 해석 능력을 증대시킴으로써 복잡한 현가장치의 거동에 대한 해석도 가능하게 되어 정교한 현가장치의 설계가 가능하게 되었다.

최근에는 소비자의 생활수준 향상으로 중대형 이상 승용차 수요가 증가하고 구동 형태가 전륜 구동 형식으로 진행됨에 따라서 비용 절감과 엔진룸의 공간 확보를 위해서 전륜은 맥퍼슨 스트럿 현가장치가 보편화되어 있다. 하지만, 더블 위시본 타입의 서스펜션에 비해, 설계 자유도가 낮으며, 스트럿 축과 하중 입력축(타이어 접지점과 strut upper mount점을 연결한 축)이 어긋나 있기 때문에 스트럿에 굽힘 모멘트가 발생하여 섭동부에 마찰이 발생하여 승차감이 악화되는 단점을 가지고 있다. 이러한 원인으로 엔진실의 유효공간을 크게 할 수 있는 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 장점을 유지하며, 설계 자유도가 낮은 단점을 보완하기 위해 일본(Nissan), 미국(GM), 유럽 및 국내 자동차 업계는 여러 가지 새로운 현가장치를 고안하고 있다. Nissan의 멀티링크빔 형식과 볼보의 텔타링크 현가장치, Yorozu의 하이퍼멀티 등은 그 좋은 예라고 할 수 있다. 새로운 현가장치 중에서 Ford에 의해 제안된 현가장치의 경우 구조가 간단하고 바퀴의 상하운동에 의한 진동이 조향 휠에 미치는 영향을 최소화하는 기구형태를 가진다. 이러한 새로운 현가장치를 설계하기 위해서 동역학 해석 기법과 더불어 최적 설계를 적용하면 효율적으로 현가장치를 설계할 수 있을 것이다.

오늘날 새로운 현가장치를 설계하기 위해서, 현가장치 설계 최적화에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 탁태호는 현가장치의 운동방정식을 세워 민감도 해석을 한 후 이 식을 이용한 이론적인 최적설계 방법을 제시하였다¹⁾²⁾. 황원걸은 승차감 지수와 조종 안정성 지수의 최적화를 위해 수정 가능 방법을 이용하였다³⁾. 김우영 등은 차량의 동특성의 평가를 다꾸찌 방법, 실험계획법, 유전 알고리즘을 적용하여 최적화를 수행하였다⁴⁾⁵⁾⁶⁾. 이상의 연구들을 살펴보면 동역학 해석기법과 최적설계 알고리즘에

익숙하지 못한 사용자가 접근하기에는 다소 어려운 측면이 있다. 최근에 발표된 논문⁸⁾에 의하면 최병렬 등은 ADAMS와 외부 최적화 모듈인 EMDIOS 프로그램을 GUI 환경에서 연결하여 근사최적화 방법, 확정론적 최적설계를 하였다⁹⁾.

1.2 연구 목적 및 내용

본 연구에서는 최근에 Ford에 의하여 고안된 맥퍼슨 현가장치의 장점들을 유지시키고 단점들을 보완하기 위한 새로운 형태의 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치⁸⁾의 특성을 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치와 비교 분석한다. 새로운 형태의 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 기구학적 특징을 분석하기 위해 SDF(정적 설계 인자)에 대해 실험계획법 중 Plackett- Burman Design⁹⁾을 이용하여 민감도 해석을 수행한다¹⁰⁾¹¹⁾. 또한, 자동차 개발의 초기 단계에서 설정된 현가장치 SDF 요구조건을 만족하기 위한 하드포인트를 선정하기 위해 ADAMS와 범용 최적화 프로그램인 VisualDOC를 연계시켜 최적설계 한다¹²⁾¹³⁾.

그 과정은 다음과 같다.

1) 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 ADAMS를 이용하여 모델링하고, 검증하기 위해 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 SDF 결과들과 비교한다.

2) 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 기구학적 특징을 분석하기 위해, 범프를 통과 시 토우각, 캠버각, 캐스터각에 대해 민감도 해석을 ADAMS/Insight¹⁴⁾¹⁵⁾를 이용하여 수행한다.

3) 차량 개발의 초기 단계에 요구되는 SDF 조건들을 만족하기 위한 캐

리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 하드포인트를 선정하기 위해 VisualDOC에서 제공하는 유전자 알고리즘(GA)¹⁶⁾¹⁷⁾를 이용하여 ADAMS 모델과 연계하여 최적화한다.

4) 최적화된 하드포인트를 이용하여 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치가 부착된 전차량을 모델링하고, 조종안정성을 평가하기 위해 스텝 조향 시뮬레이션을 실행한다. 스텝 조향 시뮬레이션의 응답값 결과들을 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치가 부착된 전차량의 스텝 조향 시뮬레이션 응답값 결과들과 비교한다.



제 2 장 현가장치

2.1 현가장치의 종류

현가장치는 프레임과 차축사이를 연결하여 차량의 중량을 지지하고, 바퀴의 진동을 흡수함과 동시에 조향기구의 일부를 설치하고 있는 장치이다¹⁸⁾.

현가장치는 차축의 형식에 따라 일체식 현가장치와 독립식 현가장치로 나눌 수 있고, 장착 위치에 따라 전륜현가장치와 후륜현가장치로 구분되는데, 최근에는 전자제어기술이 발달함에 따라 자동차의 현가장치를 최적의 상태로 제어하도록 설계된 전자제어식 현가장치가 개발되고 있다. Fig. 2.1은 현가장치 형식에 따라 요철을 통과할 때의 차체의 자세변화를 보여주고 있다.

Table 1은 현가장치의 기본형식에 따른 분류와 전륜 현가장치, 후륜 현가장치에 사용되는 형식을 나타낸다. 공기스프링식과 유체스프링식 현가장치는 국내에서는 흔하지 않지만, 유럽이나 미국의 고급 승용차에서 많이 채용되는 형식으로 속업소버의 공기챔버(chamber)의 체적을 변화시켜서 스프링상수를 변화시키거나 차고를 임의로 조절하는 경우에 이용된다.



(a) rigid axle suspension (b) independent suspension

Fig. 2.1 Vehicle performance while passing bump

Table 1 Classification of suspension

현가장치 기본형식에 따른 분류			
일체 식 현가장치	판 스프링 (leaf spring)식		
	링크(link)식		
	드디온(De Dion)식		
	토크튜브 드라이브식		
독립현가식 현가장치	스윙암 (swing arm)식	리딩암 (leading arm)식	풀 트레일링식
			세미트레일링식
		토션빔 (torsion beam) 식	액슬빔식
			피벗빔식
			커플드빔식
			스윙액슬식
			더블트레일링암식
			더블위시본 (double wish-bone)식
	멀티 링크 (multi-link)식		
	맥퍼슨 (MacPherson)식		
전, 후륜에 사용되는 현가장치 분류			
전륜 현가장치	맥 퍼슨형식		
	더블 위시본형식		
	멀티 링크형식		
후륜 현가장치	리지드(슬리드) 액슬형식		
	트레일링암형식		
	후륜 현가장치		

오늘날 많이 사용하는 독립식 현가장치에는 더블 위시본 현가장치와 맥퍼슨 스트럿 현가장치가 있다. 여기서는 간단히 더블 위시본식과 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 소개하고 현가장치에 대한 상세한 설명은 부록 A에 나타나 있다.

-더블 위시본 현가장치

소형 상용차의 전륜, 스페셜리티, 스포츠계의 승용차에 넓게 채용되고 있고, 근년의 고급화, 고 성능화에 따라 채용하는 차종은 증가 경향에 있다.

더블 위시본 현가장치란 본래 상하 2개의 삼각형 암과 1개의 링크로 구성되는 형식을 말하지만, 근년에는 상하 한쌍의 컨트롤 암 또는 링크를 갖고 캠버 각 변화 등이 비교적 독립적으로 제어될 수 있는 서스펜션 형식의 것을 더블 위시본 현가장치라 부르고 있다.

더블 위시본 현가장치는 일반적으로 다른 것에 비해 구조가 복잡하고 또한 고가이며 차체측이 무겁게 된다는 단점을 가지고 있지만, 캠버각 변화, 토우각 변화를 센터 높이 변화 등의 선택 자유도가 높고 낮은 보닛화, 저 마찰화가 실현하기 쉽다는 이점을 가지고 있다. 더욱이 컴플라이언스 등을 최적의 상태로 설정하고, 조종안정성, 승차감을 최대한으로 융합시킬 수 있는 가능성을 가지고 있다.

-맥퍼슨 스트럿 현가장치

댐퍼의 굽힘 강성을 높게 하여 암의 역할을 하게 한 것으로 기구학적으로는 더블 위시본식의 어퍼 암을 상방에 위치시켜 그 암 길이를 무한하게 한 것에 등가로 된다.

따라서 더블 위시본 현가장치에 비하여 어퍼 암의 설계 자유도가 없게 된 것만큼 얼라인먼트 설정의 자유도는 적다.

구조 부재가 적다는 것으로 경량 저가가 달성될수 있고, 또한 댐퍼의 차체측 부착점이 높기 때문에 캠버 각, 캐스터 각의 호트러짐 등도 적게 되며 타이어 회전 방향의 강성도 높게 취해진다.

따라서 양산차에 적합하여 상당히 넓게 채용되고 있지만, 반면 상하 마찰이 높으며 승차감을 저해한다. 또, 전륜에 사용한 경우 보닛이 높게 된다는 결점도 있다.

오늘날 소비자의 생활수준 향상으로 중대형 이상 승용차 수요 증가하고 있다. 이에 발맞추어 엔진실의 유효공간을 크게 할 수 있는 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 장점을 유지하고, 설계 자유도가 낮은 단점을 보완하기 위해 일본(Nissan), 미국(GM), 유럽 및 국내 자동차 업체는 여러 가지 새로운 현가장치가 고안되고 있다. 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치는 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치에 캐리어 링크가 추가된 형태를 가진다. 스티어링 너클이 캐리어 링크를 거쳐 컨트롤 암에 장착됨으로써 바퀴의 상하운동에 의한 진동이 조향 휠에 미치는 영향을 최소화하는 기구형태를 가지며, 스티어링 너클이 캐리어와 연결되는 연결부(6)에서 수직축에 대해 회전하도록 설계되어 있다. 이는 부가적인 링크를 사용한 휠 얼라이먼트의 설계 자유도 확보를 용이하게 하고, 스트럿 상부 하드포인트의 이동으로 차체 공간 확보 및 댐퍼 스트럿의 굽힘 모멘트를 줄여 섭동부에 발생하는 마찰을 억제시킬 수 있다. Fig. 2.2는 제안된 모델과 각 구성 성분의 명칭을 나타내며, Table 2는 다른 현가장치들과 비교하여 특성을 나타낸다.



1	knuckle	5	tire(omit)	8	control arm
2	revolute joint	6	connector between knuckle and carrier	9	connector between tie-rod and knuckle
3	carrier				
4	damper piston	7	spring		

Fig. 2.2 MacPherson strut suspension with a carrier

Table 2 Comparison of characteristics among three struts

구 분	캐리어를 가진 맥퍼슨	맥퍼슨	더블 위쉬본
조종 안정성	○○○	○	○○○
공간 효율성	○○○	○○○	○
설계 자유도	○○○	○	○○○
중량	○○○	○○○	○
가격	○○	○○○	○

3. 차량 동역학 모델

3.1 ADAMS 프로그램의 개요

ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)프로그램은 미국 미시간 대학 연구팀이 개발하여 MDI(Mechanical Dynamics Inc)에서 시판하다가 MSC에 합병되어 지금은 MSC에서 판매, 관리하고 있는 동역학 해석 프로그램이다. ADAMS는 virtual prototype을 실현시키기 위한 아주 중요한 해석 코드로써 ADAMS의 기본 로직은 Newton의 운동방정식을 따르며 자동으로 Euler-Lagrange 방정식을 적용하여 삼차원 비선형 방정식을 풀이하게 되어있다. 프로그램의 전체적인 흐름은 일반 상용 프로그램과 마찬가지로 기본적으로 해석하고자 하는 시스템을 모델링하는 전처리 단계, 모델링된 시스템의 운동방정식을 유도하며 해를 구하는 해석 단계 및 해석 결과를 가시화 시켜주는 후처리 단계로 구성된다. 전처리 단계에서는 모델링 할 시스템에 대해 ADAMS파일의 정확도를 판단하여 주며 해석 단계에서는 전처리 단계에서 구성된 모델로부터 시스템의 운동방정식을 구성한 뒤 운동방정식을 시간에 대해 적분하는 과정을 반복하면서 동적 응답을 구한다. 후처리 단계에서는 해석 단계의 결과들을 수치적으로 또는 가시적으로 보여주고, 이를 토대로 설계변수를 정하여 이를 다시 해석함으로써 설계도구로서의 역할을 한다. ADAMS를 통해 해석을 수행하기 위해서는 다음과 같은 조건들이 필요하다.

- ▷ Part또는 Rigid body의 Mass 와 Inertia
- ▷ 형상정보(Geometry System)
- ▷ 시스템의 연결(Mechanical joints, Higher-pair contacts, Elastic elements)
- ▷ 시스템에 가해지는 외력 또는 경계조건

ADAMS는 static equilibrium, kinematic, linear, dynamic analysis에 대한 해석의 수행이 가능하며 해석결과를 변위, 각변위, 속도, 가속도, 힘등으로 시간에 관련된 결과 값을 출력할 수 있다.

3.2 전륜 현가장치 모델링

3.2.1 맥퍼슨 스트럿 현가장치

맥퍼슨 스트럿 타입은 구조가 간단하고 구성부품이 적고 정비가 용이하며 스프링 아래 부품의 무게를 가볍게 할 수 있고, 타이어의 접지력 및 승차감이 좋아 현재 널리 사용되는 형식이다.

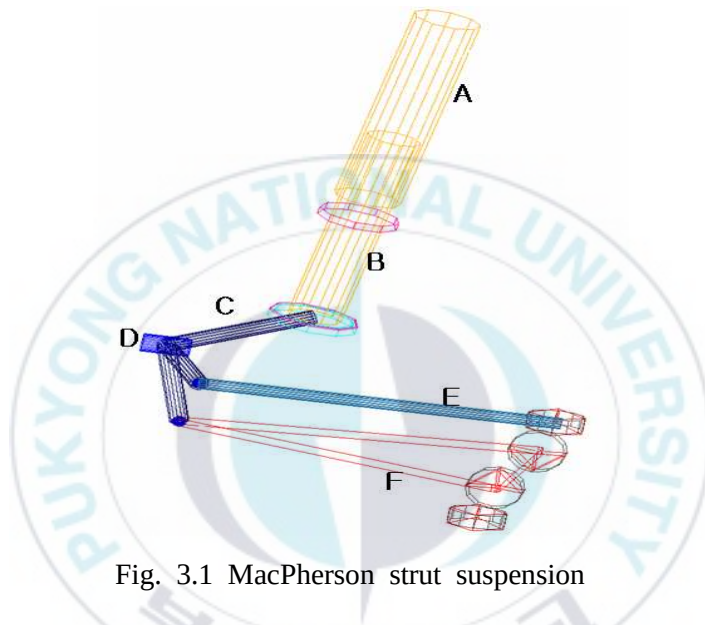


Fig. 3.1 MacPherson strut suspension

Table 3 Parts and mass of MacPherson strut suspension

	Parts	Mass (kg)
A	Rod	0.4136
B	Strut	3.0063
C	Knuckle	2.1792
D	Hub	0.1028
E	Tie rod	0.1179
F	Lower control arm	11.1576

현가장치는 ADAMS를 사용하여 강체요소, 힘요소, 조인트 요소 및 구속

요소로 모델링을 하였다. 강체요소로 로어콘트롤암(lower control arm), 너클(knuckle), 타이로드(tie rod), 댐퍼의 로드(rod) 및 스트럿(strut), 허브(hub) 등으로 구성하였다. 이들 강체들은 조인트 요소를 이용하여 상호 구속하였다. Fig. 3.1은 맥퍼슨 타입 현가장치의 기구학적 모델을 나타낸다. Table 3에 전륜 현가장치의 강체요소와 질량을 나타내었다.

전륜 현가장치 모델링에 23개의 강체 요소를 사용하였고, 28개의 조인트, 2개의 스프링과 댐퍼, 좌 우 양쪽의 타이어를 포함하여 모델링 하였다. 모델의 전체 자유도를 Table 4에 정리하였다.

Table 4 Degrees of freedom of front suspension model using MacPherson strut suspension

Number of coordinates	138
Number of bodies	23
Number of constraints	-134
Cylindrical joint	$3 \times (-4) = -12$
Revolute joint	$4 \times (-5) = -20$
Spherical joint	$4 \times (-3) = -12$
Convel joint	$2 \times (-4) = -8$
Fixed joint	$12 \times (-6) = -72$
Hook joint	$2 \times (-4) = -8$
Inplane joint	$1 \times (-1) = -1$
Driver constraint	-1
DOF	$138 - 134 = 4$

댐퍼는 일반적으로 힘에 대한 속도의 특성이 비선형성을 가진다. Fig. 3.2는 전륜 현가장치에 적용한 댐퍼의 F·V 특성을 나타낸다.

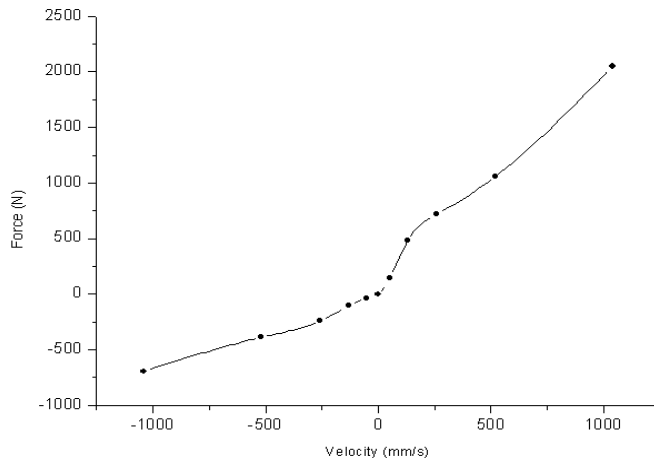


Fig. 3.2 Damping force curve - Front suspension

스프링은 두 물체사이의 힘-변위에 관계된 힘 요소 모델이다. ADAMS로 동역학 해석을 수행할 때 스프링에서 발생된 힘은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$F = k \cdot (l_o - l_m) \quad (1)$$

$$l_o = l_f - l_v + l_d \quad (2)$$

여기서 k 는 스프링 상수, l_m 은 두 물체 사이의 길이의 크기값, l_f 는 자유길이, l_v 는 장착길이, l_d 는 초기길이 이다. 전륜 현가장치에 스프링 상수로 19N/mm, 자유길이 313mm, 장착길이 221mm를 적용하여 스프링을 모델링 하였다.

동역학 해석 모델에 타이어는 UA(University of Arizona) 타이어를 사용하였다. UA 타이어 모델은 Nikravesh와 Gim이 Arizona 대학에서 개발한 타이어 모델로써 비교적 간단한 파라미터 구조로 되어있다. 실제 타이어에 근접한 해석 결과를 도출하고, 단순한 Fiala 타이어 모델보다 항상 더 나은 결과를 제공하기 때문에 동역학 해석에 많이 쓰이는 모델이다. UA

타이어는 타이어와 차체가 연결된 기구학적인 상태에서 타이어와 노면이 접하는 지점에서 힘과 모멘트를 계산한다. Fig. 3.3에 UA 타이어의 입력 값과 출력 값의 관계를 나타내었다¹⁹⁾.

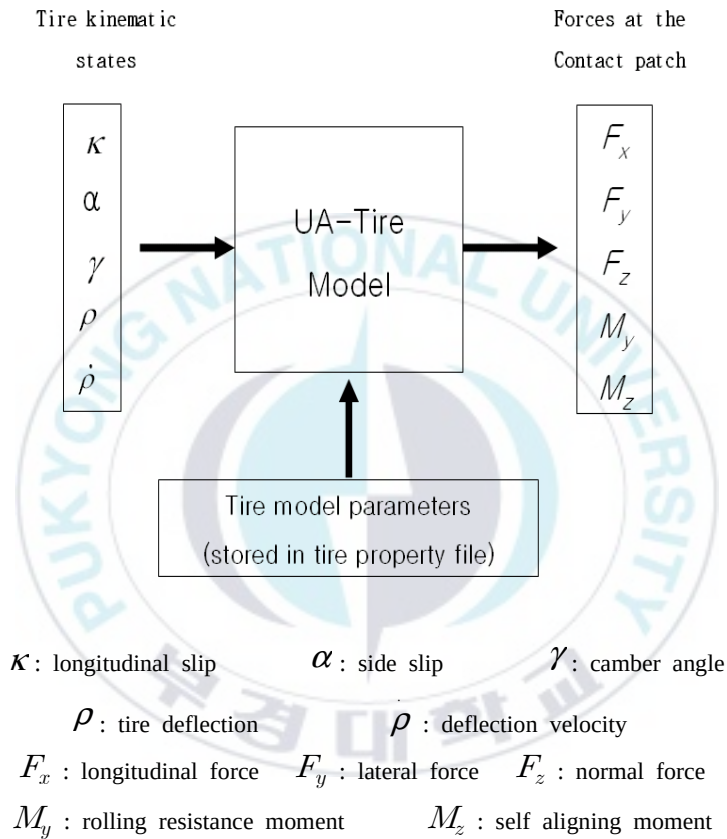


Fig. 3.3 Inputs and outputs of the UA-Tire model

3.2.2 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치

2.2절에서 제안된 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 모델링 하기 위해 범용 다물체 프로그램인 ADAMS를 이용하였다. 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치에서 사용된 하드 포인트들을 유지하며, 새로운 캐리어 부분을 추가하였다. 따라서, 1/4차량 모델링시 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 8

개의 하드포인트에 2개의 새로운 하드포인트가 추가되고, 캐리어와 너클이 연결되는 상·하부분에 볼 조인트, 캐리어와 컨트롤 암 연결부분에 회전 조인트를 사용하여 모델링하였다. 수정된 맥퍼슨 스트럿 현가장치 모델의 ADAMS 모델을 Fig. 3.4에 나타내었다. Table 5는 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 강체요소와 질량을 나타낸다.

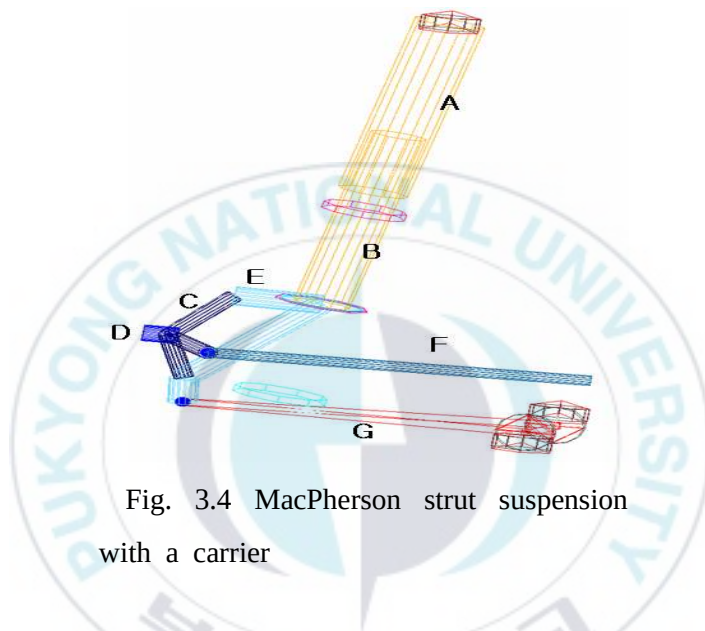


Fig. 3.4 MacPherson strut suspension with a carrier

Table 5 Parts and mass of MacPherson strut suspension with a carrier

	Parts	Mass (kg)
A	Rod	0.4136
B	Strut	3.0063
C	Knuckle	2.1792
D	Hub	0.1028
E	Carrier	1.5340
F	Tie rod	0.1179
G	Lower control arm	11.1576

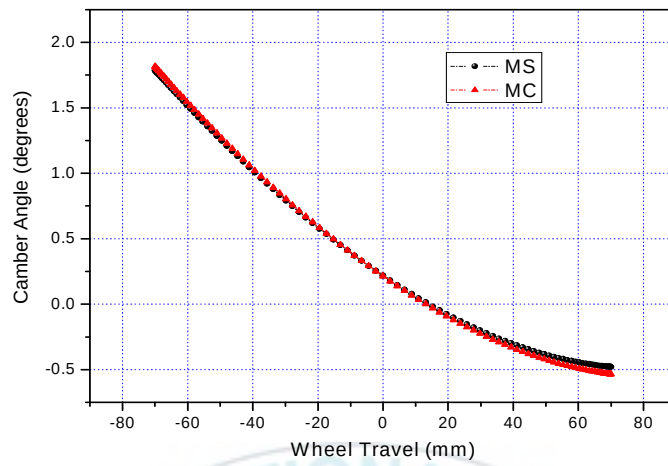
전륜 현가장치 모델링에 27개의 강체 요소를 사용하였고, 34개의 조인트, 2개의 스프링과 댐퍼, 좌 우 양쪽의 타이어를 포함하여 모델링 하였다. 모델의 전체 자유도를 Table 6에 정리하였다.

Table 6 Degrees of freedom of front suspension model using MacPherson strut suspension with a carrier

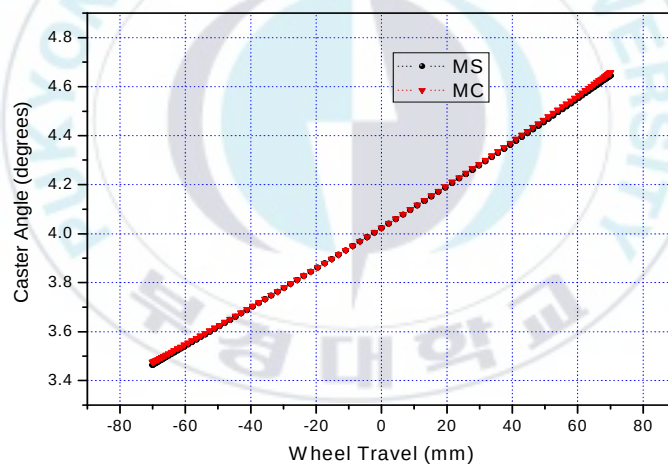
Number of coordinates	162
Number of bodies	27
Number of constraints	-158
Cylindrical joint	$5 \times (-4) = -20$
Revolute joint	$6 \times (-5) = -30$
Spherical joint	$6 \times (-3) = -18$
Convel joint	$2 \times (-4) = -8$
Fixed joint	$12 \times (-6) = -72$
Hook joint	$2 \times (-4) = -8$
Inplane joint	$1 \times (-1) = -1$
Driver constraint	-1
DOF	$162 - 158 = 4$

3.2.3 모델 검증

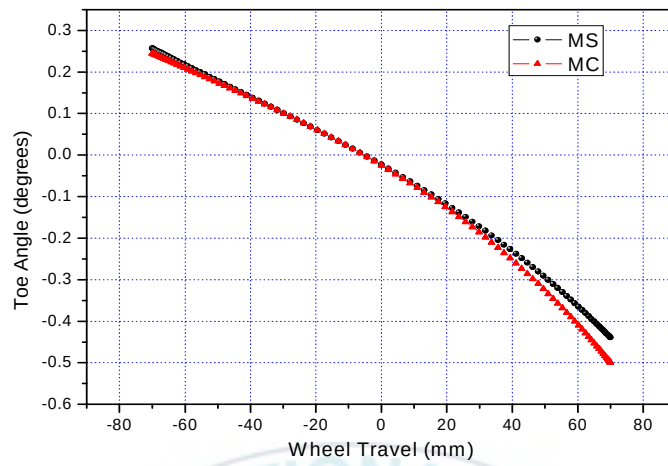
수정된 맥퍼슨 스트럿 현가장치에 대한 모델링의 타당성 검증을 위해 $\pm 70\text{mm}$ 범프통과 해석 후 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 SDF 결과와 새로운 현가장치의 SDF해석 결과를 비교하였다. Fig. 3.5는 수행한 해석의 결과를 보여주고 있다. 두 형태의 현가장치는 캠버각(camber angle), 캐스트각(caster angle)은 거의 일치하고, 토우각(toe angle)은 범프시 약간의 차이가 생기는 것을 확인할 수 있다.



(a)Camber angle



(b)Caster angle



(c)Toe angle

(MS= MacPherson strut suspension, MC= MacPherson strut suspension with carrier)

Fig. 3.5 Comparison of results between MS and MC

3.3 후륜 현가장치 모델링

토션빔 후륜 현가장치는 전륜 현가장치 모델링과 같은 방식으로 강체요소, 힘요소, 조인트 요소 및 구속 요소로 모델링을 하였다. 강체요소는 덤퍼의 로드 및 스트럿, 토션빔, 트레일링 암, 스프링 시트(spring seat), 스피들(spindle), 허브(hub)를 사용하여 모델링 하였다. 이들 강체요소들은 조인트를 사용하여 모델링 하였고, 트레일링 암과 차체는 부싱을 사용하여 연결하였다. Fig. 3.6은 토션빔 후륜 현가장치의 기구학적 모델을 나타낸다. Table 7은 후륜 토션빔 현가장치의 강체요소와 질량을 나타낸다.

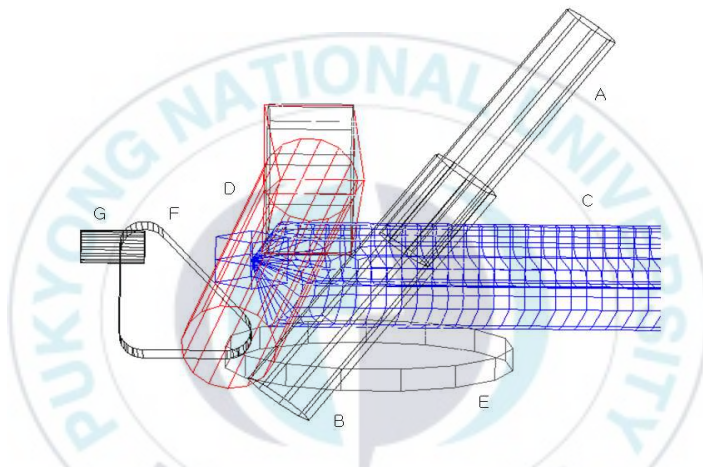


Fig. 3.6 Rear suspension model

Table 7 Rear suspension's parts and mass

	Parts	Mass (kg)
A	Rod	0.2164
B	Strut	0.3027
C	Torsion-beam	8.0260
D	Trailing arm	2.5724
E	Spring seat	1.3881
F	Spindle	1.3840
G	Hub	1.1028

후륜 현가장치는 21개의 강체 요소를 사용하였고, 23개의 조인트, 2개의 스프링과 댐퍼, 2개의 부상요소, 좌 우 양쪽의 타이어를 포함하여 모델링하였다. 모델의 전체 자유도는 Table 8에 정리한 바와 같이 8 자유도 모델이다.

Table 8 Degrees of freedom of rear suspension model

Number of coordinates	126
Number of bodies	21
Number of constraints	-118
Cylindrical joint	$3 \times (-4) = -12$
Revolute joint	$2 \times (-5) = -10$
Fixed joint	$13 \times (-6) = -78$
Hook joint	$4 \times (-4) = -16$
Inplane joint	$1 \times (-1) = -1$
Driver constraint	-1
DOF	$126 - 118 = 8$

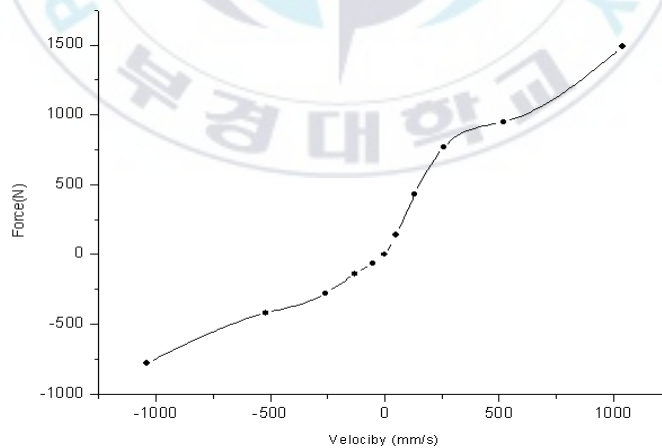


Fig. 3.7 Damping force curve - rear suspension

후륜 현가장치에서 댐퍼의 모델링은 전륜에서와 마찬가지로 힘에 대한

속도 특성을 곡선접합해서 이용하였다. 스프링은 선형 스프링을 사용하였다. 본 연구에서 후륜 현가장치에 스프링 상수로 38N/mm, 자유길이 313mm, 장착길이 219mm를 적용하여 스프링을 모델링 하였다. Fig. 3.7은 후륜 현가장치에서 사용된 댐퍼의 힘에 대한 속도 특성을 나타낸다.

3.4 전차량 모델링

전차량 모델을 하기위해 본 논문에서 사용한 조향장치 모델은 랙 앤 피니언(rack and pinion) 방식이다. 랙 앤 피니언 조향 시스템은 Fig. 3.8과 같이 랙과 피니언으로 구성되어 있으며, 조향 휠(steering wheel), 조향 칼럼(steering column), 중간축(intermediate shaft) 및 피니언으로 구성되어 있다.



Fig. 3.8 Steering system

또한 스테빌라이저 바(stabilizer bar)는 차축과 차체를 부싱으로 연결하고 비틀림 요소, 굽힘 요소를 고려하여 모델링 하였다. Fig. 3.9에 스테빌라이저 바의 ADAMS 모델링을 도시하였다.

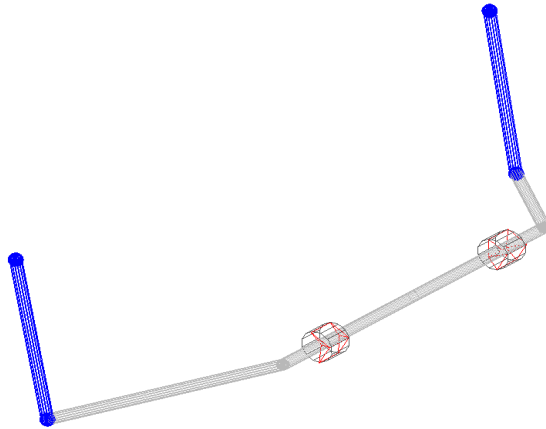


Fig. 3.9 Stabilizer bar

전륜 현가장치(캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치), 후륜 현가장치(토션빔 현가장치)와 조향장치 및 스테빌라이저 바를 이용하여 하나의 전차량 모델링하였다. 또한 전륜 현가장치를 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 사용하고 동일한 다른 요소들을 이용하여 다른 하나의 전차량을 모델링하여 6장의 시뮬레이션에 이용한다. Fig. 3.10은 전차량을 모델링한 개략도를 나타낸다.

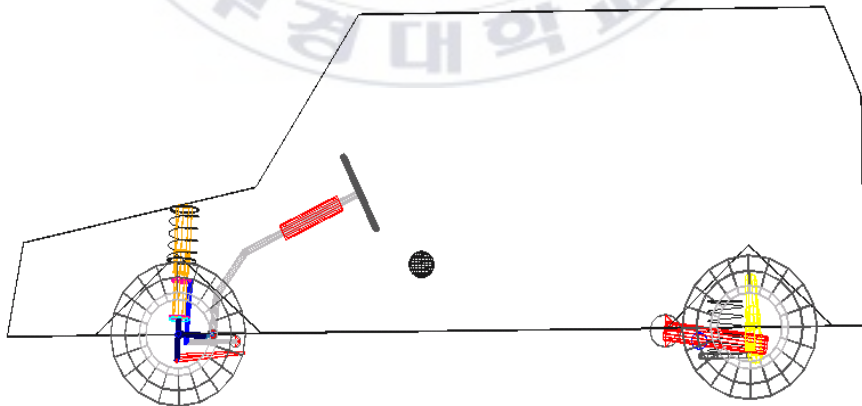


Fig. 3.10 ADAMS full car model

제 4 장 민감도 해석

4.1 민감도 해석의 개요

민감도 해석은 설계변수가 목적함수에 대한 기울기 정보를 나타낸다. 민감도 해석의 목적은 설계변수의 변화가 목적함수에 미치는 영향을 개량적으로 파악하여 이를 설계에 응용하는데 있다. 민감도 해석은 직접 미분법(direct differentiation method)을 이용한 이론적인 방법과 섭동법(perturbation method)을 이용한 실험적인 방법으로 나눌 수 있다²⁰⁾.

먼저 이론적인 방법은 많은 독립 변수들과 종속 변수들로 이루어진 운동 방정식과 최적화해야 할 목적 함수를 구성해서 풀어 나가는 방법으로써 결과 값의 정확성 및 신뢰성이 높다는 장점을 가지고 있는 반면, 각각의 시스템에 따라 각각의 운동방정식을 정의해야 하므로 범용성을 가지기 힘들다. 또한, 복잡한 계산 과정을 거쳐야 하므로 어렵고 많은 시간을 요하며, 전문적인 지식을 가지고 있어야 가능하다는 단점을 가지고 있다.

이에 반하여 실험적인 방법은 임의의 현가장치를 구성하는 운동 방정식과 구속 방정식 등을 사용자의 입력값에 따라 자동적으로 생성하고 해석할 수 있는 범용 다물체 해석 프로그램을 이용하여 쉽게 구성할 수 있을 뿐만 아니라, 설계변수와 목적 함수가 전처리 기능과 후처리 기능에 의해 정의될 수 있는 범위 내에 있는 경우 원하는 설계 변수의 목적 함수의 결과를 쉽게 이용할 수 있다. 그리고, 목적 함수에 많은 영향을 미치는 주요 설계 변수들을 이론적인 식의 전개 없이 실험을 통해서 선정할 수가 있으므로, 이론적인 방법을 이용한 민감도 해석에서의 단점들을 쉽게 해결할 수가 있다.

현재 컴퓨터의 계산 능력의 발전으로 계산시간에 대한 제약조건이 완화되어 확률적 해석의 적용범위가 급속히 확산되고 있는 추세이며, 확률적 해석에 대한 이론적 배경에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 확률적 해석을 수행하기 위한 도구로서 ADAMS에서는 Insight라는 모듈을

통하여 반응 표면법, 몬테 카를로등의 다양한 실험계획법을 제공한다. 본 연구에서는 범용 다물체 해석 프로그램인 ADAMS/Insight를 이용하여 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치와 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 민감도 해석을 수행하여 결과를 비교 분석 하였다²¹⁾.

4.2 민감도 해석의 결과

일반적으로 식(3)과 같이 목적함수 ψ 가 설계 변수 v 에 대하여 함수관계에 있는 경우, 설계변수의 목적함수에 대한 기여도를 의미하는 민감도계수(Sensitivity coefficient) $\bar{l}$ 는 목적함수의 1차 미분으로 정의되며, 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = F(v) \quad (3)$$

$$\frac{\delta \Psi}{\delta v} = \bar{l} \quad (4)$$

본 논문에서는 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치에서 캐리어를 제외한 8개의 설계점들(Fig. 4.1에서 D, E를 제외)과 제안된 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 기구학적 설계변수가 되는 총 10개의 설계점들(Fig. 4.1의 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J)을 각각 X축, Y축, Z축에 대해 ADAMS/Insight를 이용하여 실험계획법의 한 종류인 Plackett-Burman 계획법으로 민감도 해석을 수행하였다.

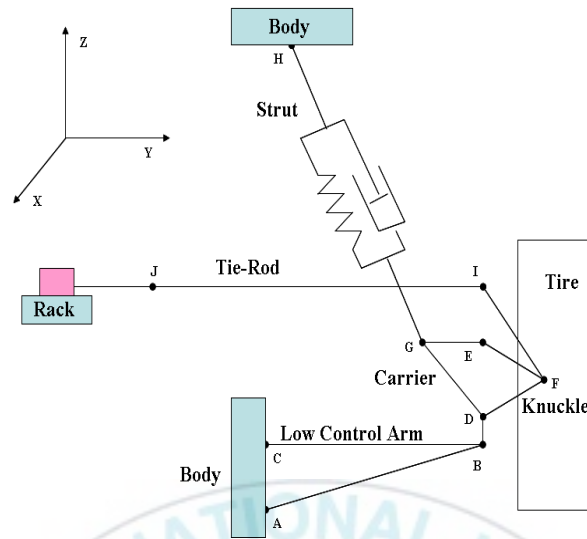


Fig. 4.1 Hard-points of a MacPherson strut suspension with a carrier

Plackett-Burman 계획법은 Plackett & Burman(1946)이 제안한 방법으로 실험횟수 N 을 4의 배수 간격으로 생성시키는 방법이다. 이 방법은 설계변수가 2 수준일 경우에만 사용할 수 있고, 주효과(Main Effect)만을 판단하며, 이제까지 나온 실험계획법 중에서 가장 적은 수의 실험점을 가진다. Plackett & Burman이 $N=4$ 부터 $N=100$ 까지 $N=92$ 만 제외하고 구현하였고, 그 후 $N=92$ 는 Baumert(1962)가 만들었다. 지금까지 Plackett-Burman 계획법은 여러 사람들에 의해 연구가 계속되어서 $N=200$ 까지 구현되어 있다. Plackett-Burman 계획법의 실험점의 개수는 Table 9와 같다.

Table 9 Numbers of Plackett-Burman Design

Factors, k	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Number of points	4	4	8	8	8	8	12	12	12	12	16
Factors, k	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Number of points	16	16	16	20	20	20	20	24	24	24	24

두 형태의 현가장치들을 ADAMS/Insight를 이용하여 Plackett-Burman 계획법으로 민감도를 해석한다. 24개의 설계변수를 가지는 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 경우 28번의 실험횟수, 30개의 설계변수를 가진 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치는 32번의 실험횟수를 가진다. 또한, 설계변수들은 $\pm 10\%$ 인 2수준의 값을 가진다. Table 10은 이와 같은 방법으로 토우각(toe angle), 캠버각(camber angle), 캐스트각(caster angle)에 대해 민감도 해석한 결과들을 직접 미분법으로 설계 변수에 대한 목적 함수의 변화비를 계산하여 얻은 민감도 해석 결과들과 비교해 보았다. Table 10에서 나타나듯이 직접 미분법에 의해 민감도 해석된 결과와 ADAMS를 이용하여 얻은 민감도 해석 결과가 동일함을 알 수 있다.

Table 10 Comparison between DDM and PM

SDF Item		Sensitivity		
		1st	2nd	3rd
Toe Angle	DDM	Tie_Rod_Inr.z (J.z)	Tie_Rod_Otr.z (I.z)	C_Arm_B_Joint.z (B.z)
	PM	Tie_Rod_Inr.z (J.z)	Tie_Rod_Otr.z (I.z)	C_Arm_B_Joint.z (B.z)
Camber Angle	DDM	Strut_Lwr.y (G.y)	Strut_Upr.y (H.y)	C_Arm_B_Joint.z (B.z)
	PM	Strut_Lwr.y (G.y)	Strut_Upr.y (H.y)	C_Arm_B_Joint.z (B.z)
Caster Angle	DDM	Strut_Upr.x (H.x)	C_Arm_B_Joint.x (B.x)	C_Arm_Rear.z (C.z)
	PM	Strut_Upr.x (H.x)	C_Arm_B_Joint.x (B.x)	C_Arm_Rear.z (C.z)

DDM : Direct Differentiation Method, PM : Perturbation Method(ADAMS/Insight)

캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치와 일반 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 토우각(toe angle), 캠버각(camber angle), 캐스트각(caster angle)에 대해 민감한 순서대로 3개씩 Table 11에 나타낸다. 두 형태의 현가장치 모두 토

우각과 캠버각에 대해서는 유사한 민감도 해석 결과가 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 새로운 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 경우 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치와 다르게, 캐스트각이 캐리어의 상부 하드 포인트 x방향의 영향이 가장 많고, 스트럿 상부 하드 포인트의 영향이 작다. 이러한 특징은 스트럿 하드 포인트의 이동으로 차체 공간을 확보를 용이하게 하며, 댐퍼 스트럿의 굽힘 모멘트를 줄여 섭동부에 발생하는 마찰을 억제할 수 있게 한다.

Table 11 Results of sensitivity analysis

SDF Item		Sensitivity		
		1st	2nd	3rd
Toe Angle	MS	Tie_Rod_Inr.z (J.z)	Tie_Rod_Otr.z (I.z)	C_Arm_B_Joint.z (B.z)
	MC	Tie_Rod_Inr.z (J.z)	Tie_Rod_Otr.z (I.z)	C_Arm_B_Joint.z (B.z)
Camber Angle	MS	Strut_Lwr.y (G.y)	Strut_Upr.y (H.y)	C_Arm_B_Joint.z (B.z)
	MC	C_Arm_B_Joint.z (B.z)	Strut_Upr.y (H.y)	Strut_Lwr.y (G.y)
Caster Angle	MS	Strut_Upr.x (H.x)	C_Arm_B_Joint.x (B.x)	C_Arm_Rear.z (C.z)
	MC	Carrier_Upr.x (E.x)	C_Arm_B_Joint.x (B.x)	Carrier_Upr.z (E.z)

(MS= MacPherson strut suspension, MC= MacPherson strut suspension with a carrier)

4.3 SDF 특성분석

민감도 해석의 결과를 바탕으로 두 형태의 현가장치에 대해 토우각(toe angle), 캠버각(camber angle), 캐스터각(caster angle)에 영향을 많이 미치는 설계 변수들을 민감한 순서대로 3개씩 선택하여 70mm 범프/리바운드 해석 후 각각의 결과 값이 변화되는 범위를 비교해 보았다. Fig. 4.2는 70mm 범프/리바운드 해석을 하기 위한 현가장치의 ADAMS모델을 나타낸

다.

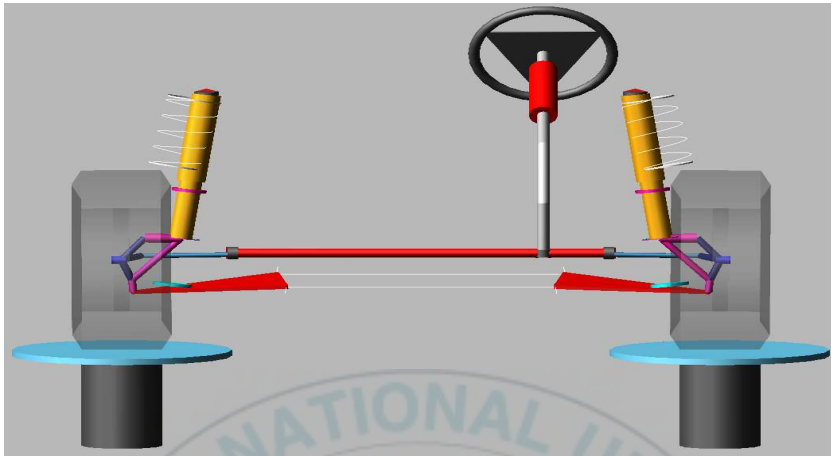
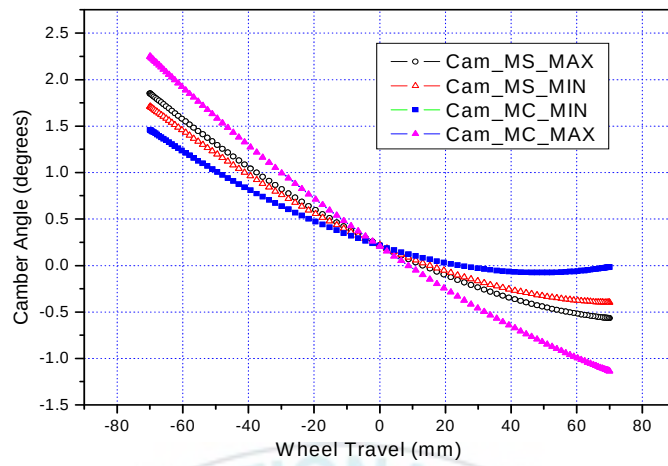
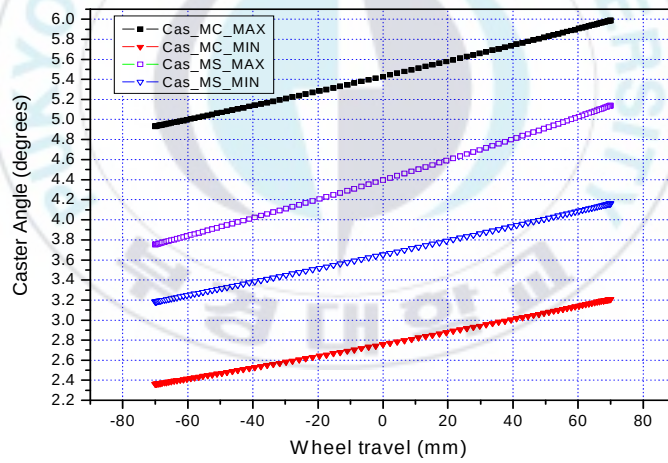


Fig. 4.2 ADAMS model for sensitivity analysis

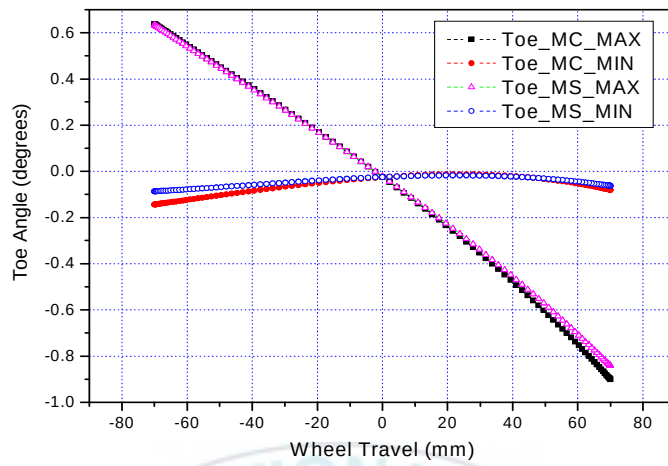
새로운 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 경우 기존의 설계 변수들뿐만 아니라 캐리어 상·하부분의 두 설계점(Fig. 4.1의 E, D)에 대해 X, Y, Z축, 즉 캐리어에 관련된 6개의 설계변수를 추가로 고려하였다. Fig. 4.3에서 보는 바와 같이 캐리어에 의해서 수정된 현가장치가 보다 넓은 변화범위의 캠버각, 캐스터각을 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 새롭게 추가된 캐리어에 관련된 6개의 설계변수를 조정함으로써 원하는 캠버각과 캐스터각을 얻을 수 있음을 나타낸다. 반면에, 토우각의 경우 거의 변화가 없다. 이는 토우각에 대한 민감도 해석 결과 캐리어에 관련된 6개의 설계변수가 토우각에 거의 영향을 주지 않기 때문이다.



(a)Camber angle



(b)Caster angle



(c)Toe angle

(MS= MacPherson strut suspension, MC= MacPherson strut suspension with a carrier)

Fig. 4.3 Difference of variation between MS and MC

5장 최적 설계

5.1 VisualDOC

Vrand사의 VisualDOC는 MATLAB, Excel, ADAMS등 외부 프로그램 및 데이터와 상호 작용하여 최적설계를 수행하는 범용 최적화 프로그램이다. Visual DOC는 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. 또한, VisualDOC는 외부 프로그램의 설계 정보를 변경하여 반복적으로 해석이 가능하도록 하며, 연속형의 설계공간(continuous design space)에서 유용한 국소 최적 설계법의 알고리즘과 설계변수의 형태가 이산형인 경우 유용한 알고리즘인 GA(Genetic Algorithm), PSO(Particle Swarm Optimization)를 제공한다. 이와 같이 VisualDOC의 다양한 최적설계 알고리즘을 사용하여 ADAMS에서 모델링 한 기계시스템을 최적설계가 가능하도록 연계하면 아주 유용한 설계 도구가 될 것이다.

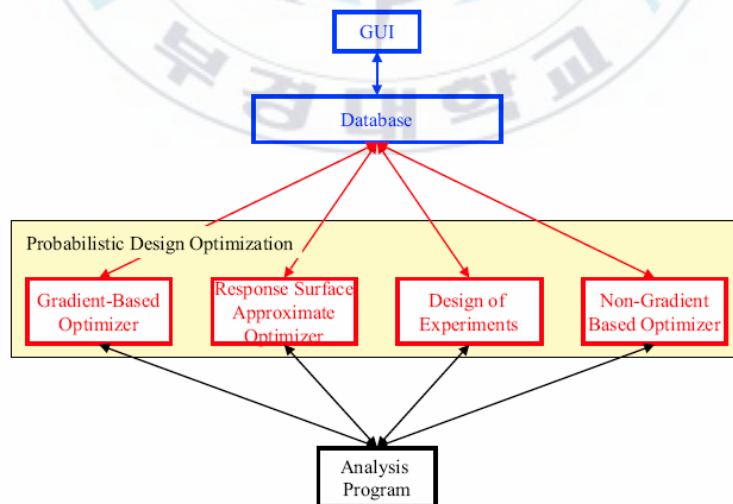


Fig. 5.1 Basic VisualDOC system

VisualDOC는 외부 프로그램 및 데이터와 상호작용 할 수 있도록 응용 프로그램 인터페이스(application program interface)를 제공한다. VisualDOC는 내부에 VisualScript라는 인터페이스 프로그램을 사용함으로써 해석 프로그램의 개수에 제한 없이 사용가능하며, 응답(response)으로 설정할 수 있는 결과파일도 여러 가지로 정의 가능하다. Fig. 5.2 에서 VisualScript를 만드는 방법을 간략하게 나타내었다.

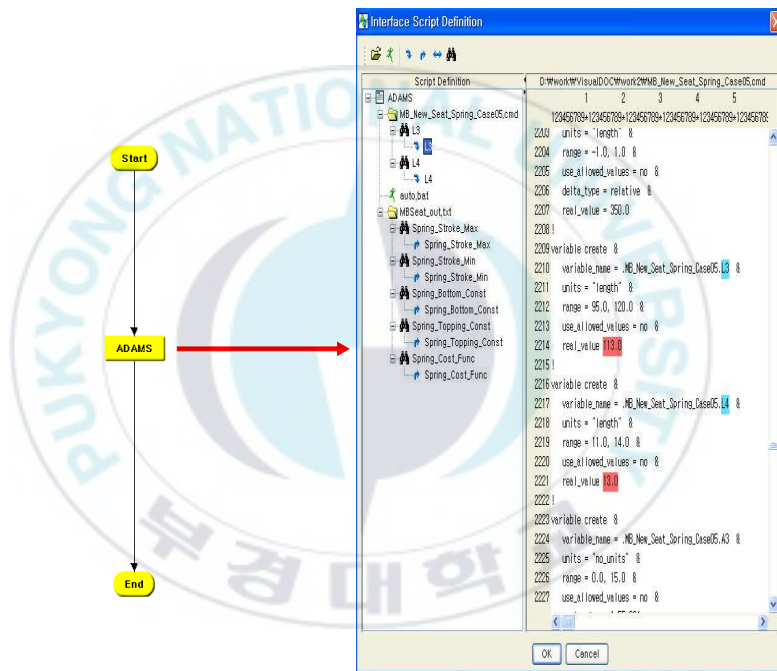


Fig 5.2 Interface script definition dialog for input and output values

VisualDOC와 상호연결이 가능한 프로그램은 다음과 같다.

- Excel 프로그램과 연동하여 최적설계를 할 수 있다.
- MATLAB의 m-file과 연동하여 최적설계가 가능하다.

· 해석 프로그램의 입력 파일이 ASCII 코드로 작성되어있으면
어떤 프로그램과도 연결이 가능하다.

VisualDOC를 ADAMS와 연계시켜 VisualDOC에서 설계 정보를 변경, 반복적으로 해석이 가능하도록 하기 위해 ADAMS는 운영체제의 명령입력창(command window)에서 실행되어야 한다. ADAMS를 실행하기 위한 명령입력어를 *.bat 파일로 만들어 VisualDOC Script파일에 입력하여 사용한다. Fig. 5.3에 명령입력창에서 ADAMS가 실행가능 한 메뉴를 나타내었다.

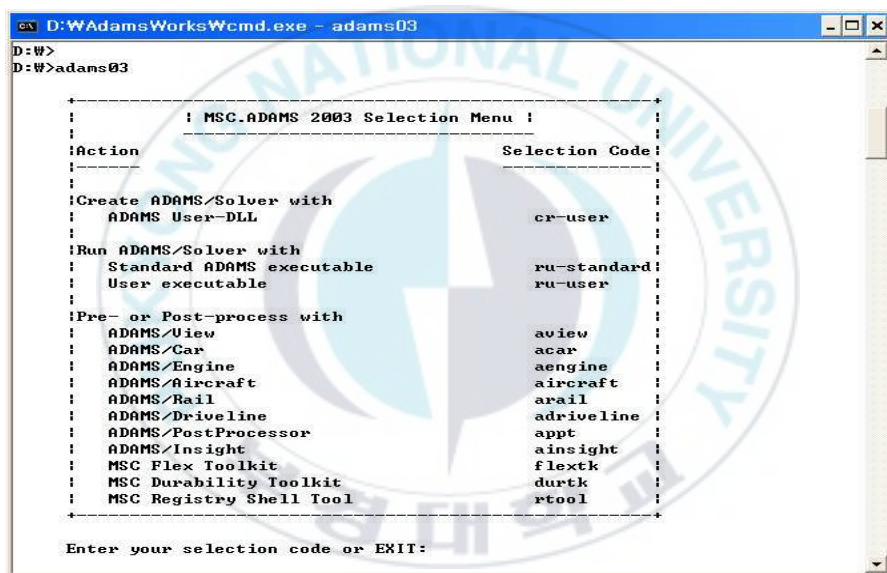


Fig. 5.3 ADAMS menu at command window

VisualDOC를 ADAMS와 연계해서 사용할 경우 VisualDOC의 입력데이터를 이용하여 설계변수를 정의한다. VisualDOC의 입력데이터로 사용하기 위해 ADAMS에서 생성되는 *.cmd 파일이나 *.sub 파일과 같은 ASCII 코드로 작성된 파일을 사용하며, 목적함수나 제약조건은 ADAMS에서 생성되는 결과 파일에서 지정 한다.

VisualDOC에서 설계변수, 목적함수, 제약조건이 설정되었으면 설계 목적에 적합한 알고리즘을 선택하여 최적설계를 수행한다. 아래 그림 5.4는

이와 같은 일련의 과정인 VisualDOC와 ADAMS를 이용한 최적화 흐름을 간단히 도시하였다.

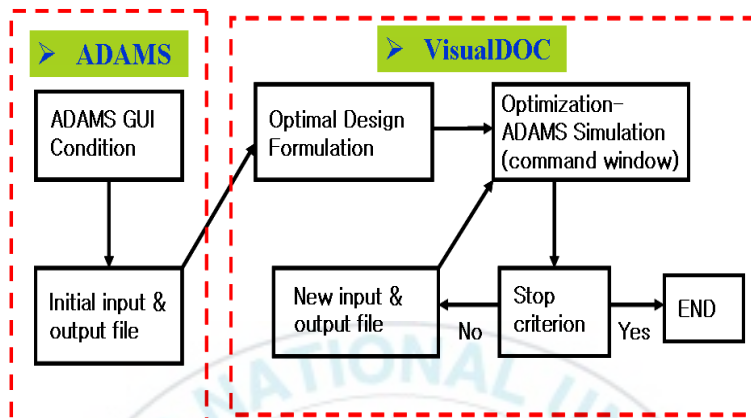


Fig. 5.4 Flow chart between ADAMS and VisualDOC

5.2 최적 설계 이론

최적설계는 설계에 주어진 모든 제약조건을 만족시키면서 목적함수를 최소화하는 설계변수를 찾는 것이다. 그러므로 최적설계문제를 정식화하면 식(5), (6)과 같이 최소화 문제로 변환할 수 있다.

$$\text{minimize } f(x); x \in R^n$$

Subject to

$$g_i(x) > 0; i = 1 \text{ to } k \quad (5)$$

$$h_j(x) = 0; j = 1 \text{ to } q \quad (6)$$

즉, k개의 부등호 제약조건 $g_i(x)$ 와 q개의 등호 제약조건 $h_j(x)$ 를 만족하면서 목적함수 $f(x)$ 를 최소화하는 n개의 실수인 설계변수 $x \in R^n$ 을

구하는 문제가 된다. 이런 최적화 문제는 카러쉬 쿤 터거(Karush-Khun-Tucker) 필요조건(necessary condition)을 만족시키는 해를 구함으로써 해석적으로 풀 수 있다. 이 방법을 이용하면 초기설계 근방의 국소 최적 설계에 수렴하게 되며 이를 국소 최적설계라 한다. 국소 최적설계법의 대표적인 알고리즘은 순차 선형계획법(Sequential Linear Programming : SLP), 순차 2차계획법(Sequential Quadratic Programming : SQP), 수정 가능방향법(Modified Method of Feasible Directions : MMFD)등이 있다. 전역 최적설계를 구하기 위한 방법으로는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA), PSO(Particle Swarm Optimization) 등이 있다.

전통적인 최적설계의 방법은 고전적 탐색 및 민감도 해석을 기반으로 하는 미분 기반 최적화기법(derivative based optimization method)이 대부분이었다. 연속형의 설계 공간(continuous design space)내에서 기본 설계사양으로부터 가장 근접한 개선된 해를 구하는 방법으로는 이러한 구배형 설계기법이 유용하게 사용되어 왔으나, 설계 및 해석 문제의 특성이 비선형적인 현상으로 표현되고 설계공간이 불연속이거나 설계변수 및 구속조건이 많으며, 설계변수의 형태가 이산형 또는 정수형인 경우에는 민감도해석이 어려울 뿐 아니라 다량의 설계 해가 존재할 가능성이 있다. 다양한 설계해의 효율적 탐색을 위해서는 확률적 탐색기법에 근거한 방법들이 효과적이다²²⁾. 확률적 탐색기법을 기반으로 하는 대표적인 방법으로는 GA, PSO 기법 등이 있다. 이러한 방법들은 기초적 개발단계를 지나 현재에 와서 그 효율성을 인정받고 있다. 특히, 유전 알고리즘은 복합재료 구조물 등을 비롯한 다양한 구조최적화 분야에 적용되고 있으며 최근에는 자동차 현가장치와 같은 비선형성이 강한 시스템에 대해서도 적용하는 사례가 증가하고 있는 추세다²³⁾²⁴⁾. 본 연구에서는 이 유전자 알고리즘을 이용하여 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 하드포인트를 최적화한다.

5.3 최적 설계 문제의 정식화

현가장치의 기구학적 설계시 설계자의 일반적인 요구는 현가장치 특성에 대한 요구가 있다. 현가장치 특성에 관한 요구는 공차 상태에서 각 현가장치 특성이 설계자가 정한 허용범위를 만족해야 하는 것과 휠의 움직임이 리바운드, 범프 상태에서 캠버각 변화와 토우각 변화에 가까워지도록 하는 것이다. 앞서 3장에서 검증된 모델을 근거로 새로운 현가장치 개발을 위한 최적 설계를 위해 설계의 기준이 되는 Target을 결정해야한다. Table 12는 일반 차량의 일반적인 SDF설정범위를 나타낸다²⁵⁾.

Table 12 Suspension SDF general Target

Suspension SDF	Target Value
Toe Change	0~-0.5°/50mm Bump 최근에는 거의 0으로 한다.
Camber Change	2~-0.5°/50mm Bump
Kingpin Inclination Angle	7~13° 작은 쪽이 바람직하다.
Kingpin Offset(Scrub Radius)	-10~30mm 작은 쪽이 바람직하고. FF차에서는 0 ~ 마이너스
Wheel Center Offset	30~70mm 작은 쪽이 바람직하다.
Caster Change	0~5°

본 연구에서는 50mm 범프를 통과할 시 요구되는 Target Value에 만족하도록 현가장치의 하드 포인트를 최적화하여 그 결과를 비교 분석해 보았다. 3장에서 모델링된 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 ADAMS 모델과 VisualDOC를 연계하여 사용하였다. 최적설계 알고리즘은 앞서 소개된 VisualDOC의 유전자 알고리즘(GA)을 이용하였으며, 요구되는 Target Value들을 만족하기 위한 최적설계에 대한 정식화는 식(7)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize } F = |w_1 f_1(x_1 + x_2 \dots + x_{30}) + w_2 f_2(x_1 + x_2 \dots + x_{30})| \\
& \text{subject to } 7^\circ \leq \text{Caster Change} \leq 13^\circ \\
& \quad 0^\circ \leq \text{Kingpin Inclination Angle} \leq 5^\circ \\
& \quad -10\text{mm} \leq \text{Kingpin Offset} \leq 30\text{mm} \\
& \quad 30\text{mm} \leq \text{Wheel Center Offset} \leq 70\text{mm}
\end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $f_1(x_1 + x_2 \dots x_{30})$ 은 $x_1 \sim x_{30}$ 까지의 30개의 설계점에 대한 토우각의 RMS값,
 $f_2(x_1 + x_2 \dots x_{30})$ 은 $x_1 \sim x_{30}$ 까지의 30개의 설계점에 대한 캠버각의 RMS값,
 w_1, w_2 는 가중치

설계변수는 Fig 5.5에서 보는 것과 같이 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 A~J, 총 10개의 설계점에 대해 각각 X, Y, Z 방향, 즉 30개를 선택하였다. 모든 설계변수들이 $\pm 10\%$ 범위 안에서 변하도록 설정하였으며, 특히, 로우스트럿 설계점(B)과 캐리어 상부 설계점(E)는 최대 변형량이 타이어나 접착이 일어나지 않도록 설계변수의 범위를 설정하였다.

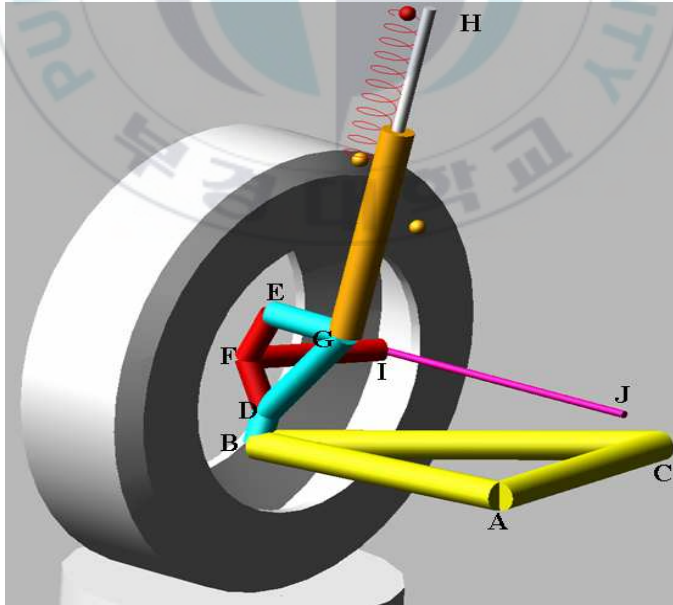


Fig. 5.5 Design variables for optimization

목적함수는 식(7)과 같이 토우각과 캠버각의 2개의 RMS값을 최소화 하는 것으로 설정하였고, 목적함수인 토우각과 캠버각의 가중치 합은 1을 만족해야 하므로, $w_1 = w_2 = 0.5$ 로 정하였다. 그밖에 요구되는 캐스트각, 킹핀 경사각 등의 4개의 값은 요구되는 Target value들을 만족하도록 구속 조건으로 설정하였다. VisualDOC의 GA를 이용하여 최적설계를 수행할 때 유전 알고리즘에 사용되는 파라미터로 집단의 크기는 100, 세대교체의 최대횟수는 100, 돌연변이율은 0.05를 사용하였다. 또한 교배율은 목적함수가 최적해에 수렴하는 속도의 빠르기를 결정하므로, 비교적 큰 값인 0.95로 정의하여 빠른 최적해가 구해지도록 하였다. 이밖에 VisualDOC의 GA를 이용하여 최적 설계를 수행할 때 종료조건을 Table 13에 정리하여 나타낸다.

Table 13 Stopping criteria of optimization

VisualDOC
• Iterations for Convergence : 1e-4 • Absolute Objective Convergence : 1e-4 • Relative Objective Convergence : 1e-3 • Absolute Design Variable Convergence : 1e-4 • Relative Design Variable Convergence : 1e-3

5.4 하드 포인트 최적화 및 결과 비교

5.3절에서 다루었던 최적설계의 결과로 캠버각과 토우각을 최소화시키는 설계점들의 값들을 얻었다. Fig. 5.6은 VisualDOC에서 목적함수를 최적화하는 변화과정을 보여주고 있다.

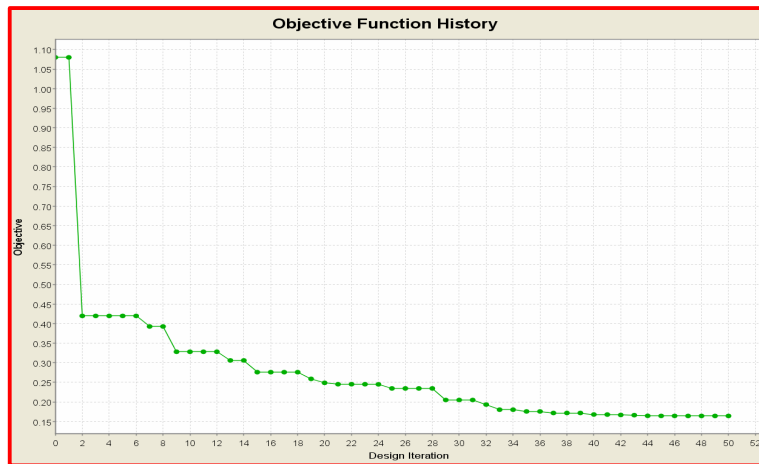
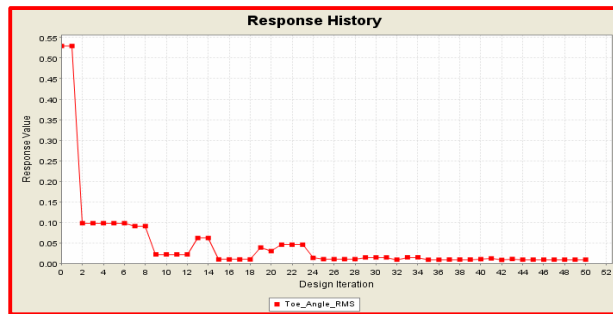


Fig. 5.6 History of object function

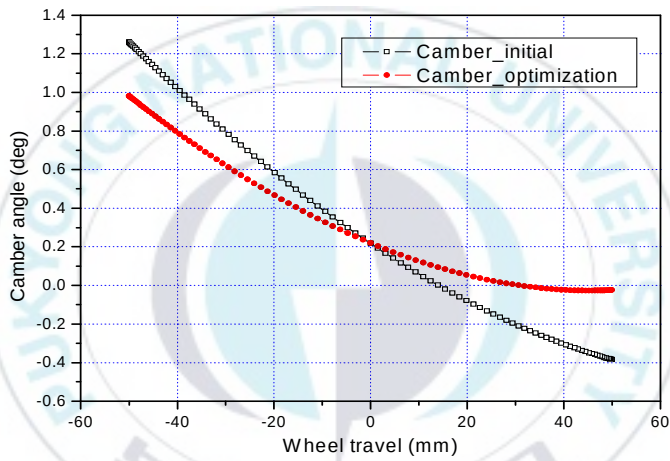
목적함수는 50번의 반복 후에 최적화되었고, 그 값은 1.07에서 0.17으로 약 84%감소한 것을 알 수 있다. GA알고리즘은 교배율의 변화에 따라 목적함수의 수렴정도가 다르지만, 이 논문에서는 빠른 목적함수의 최적화를 위하여 0.95의 높은 교배율을 사용하였다. Fig. 5.7에 최적설계 수행 중 목적함수인 캠버각과 토우각의 RMS변화와 최적설계 전과 후의 설계점을 이용하여 50mm범프 시뮬레이션 수행 시 캠버각, 토우각, 캐스트각, 킹핀 경사각, 킹핀오프셋 등을 비교하여 나타내었다. 아래 그림에서 최적설계 후 요구되는 모든 Target value들을 만족하게 설계되었음을 알 수 있다.



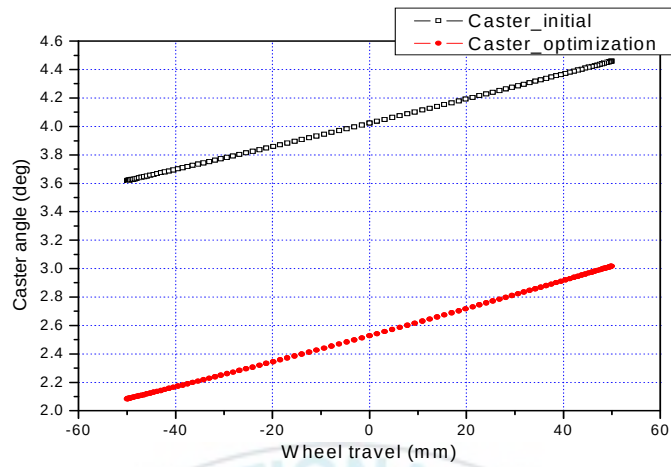
(a) History of camber angle



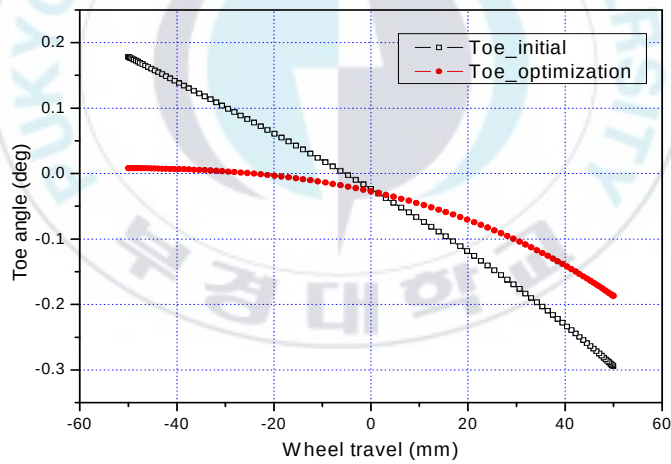
(b) History of toe angle



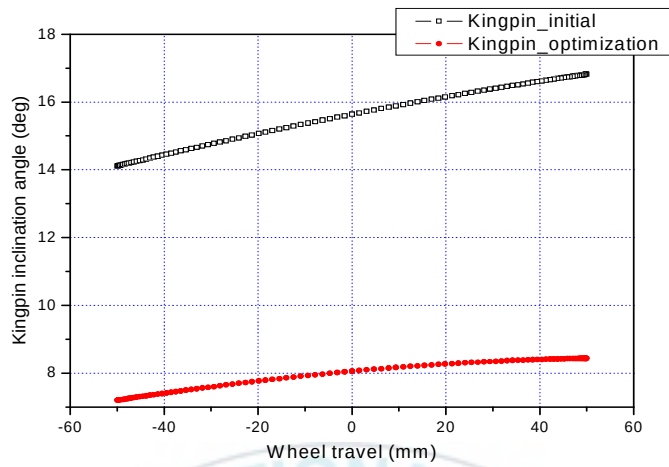
(c) Camber angle



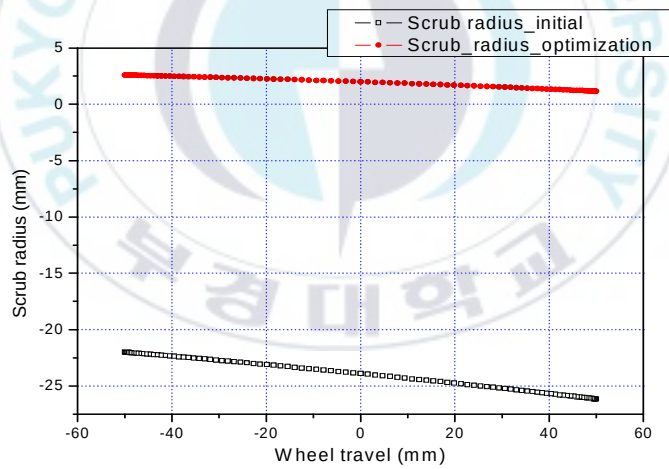
(d) Caster angle



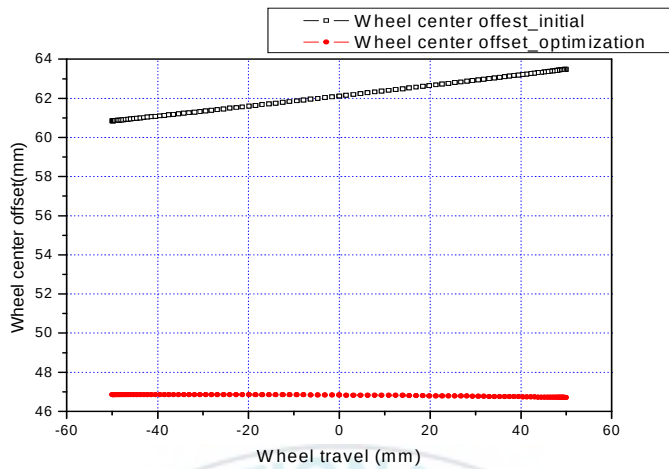
(e) Toe angle



(f) Kingpin inclination angle



(g) Scrub radius



(h) Wheel center offset

(MS= MacPherson strut suspension, MC= MacPherson strut suspension
with a carrier)

Fig. 5.7 Results of optimization

6장 전차량 동역학 해석

캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치가 상하운동에 의한 진동이 조향 휠에 미치는 영향을 파악하기 위하여 범프 시뮬레이션을 수행하고, 5장에서 수행한 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치 하드포인트의 최적설계 결과의 타당성을 입증하기 위해 전차량 모델에 대해 조종안정성 해석을 하였다. 그리고 상하 운동에 의한 진동특성을 파악하고, 조종안정성 결과의 비교를 위해 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 부착한 전차량 모델에 대해 동일한 해석을 수행하였다.

6.1 범프 시뮬레이션

일반적으로 차량의 주행 시 범프(bump)를 넘어가거나 움푹이를 통과하는 것은 운전자가 빈번하게 겪는 상황이다. 이 때 차량에는 상당한 충격이 가해지는데, 충격은 차량 속도의 제곱에 비례하여 증가하며, 차량의 충격은 스프링과 댐퍼가 완충하는 역할을 한다.

본 논문에서는 앞서 3장에서 소개된 2가지 ADAMS 차량 모델(MS, MC)을 이용하여 차량이 범프를 지날 때 댐퍼와 연결된 조인트에 가해지는 반력을 정량적으로 구하기 위한 범프 통과 시뮬레이션을 실시하였다. 여기에서 사용된 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 갖는 차량 모델은 5장에서 도출된 최적화된 하드포인트를 갖는 차량 모델이 아닌 일반 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 갖는 차량 모델과 동일한 SDF특성을 갖는 차량이다. 차량의 속도는 60km/h로 높이 50mm인 범프를 통과하는 시뮬레이션을 4초간 행하여 결과를 비교해 보았다.

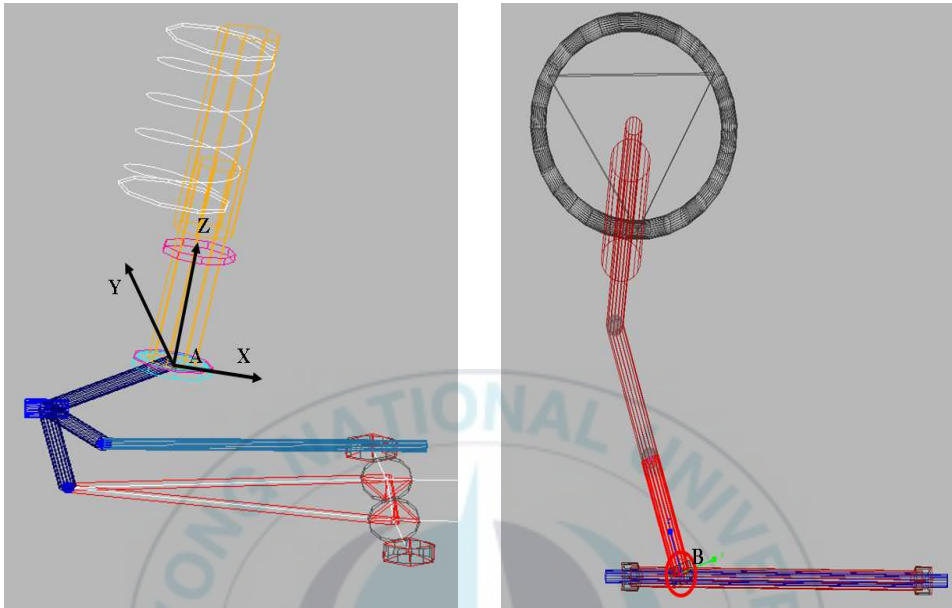
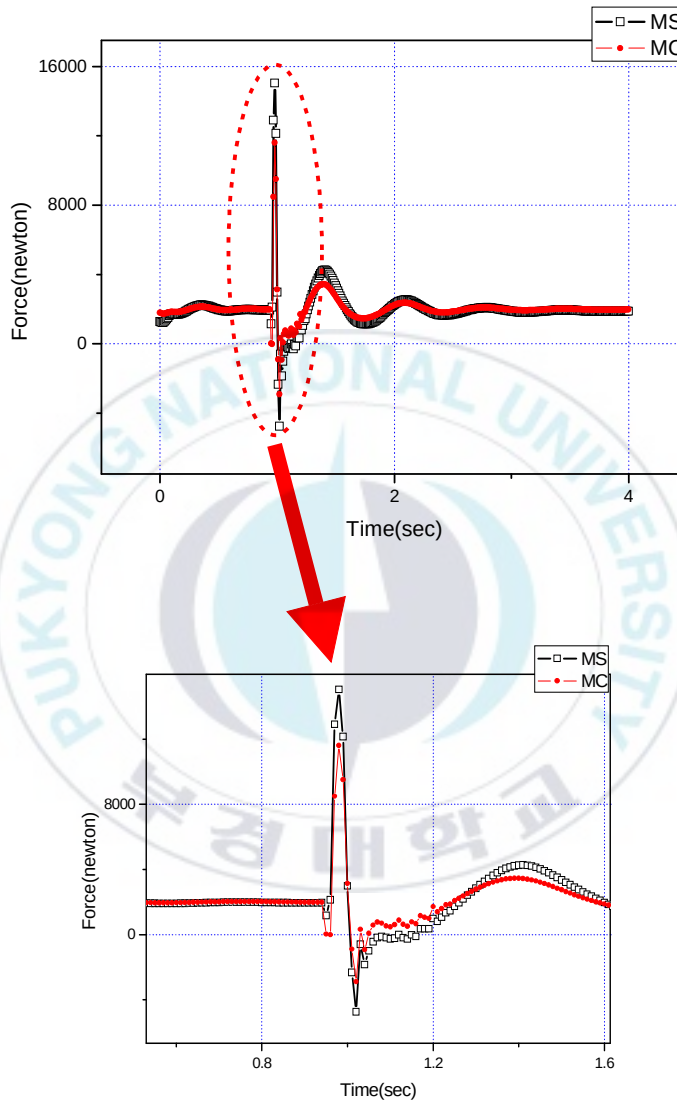
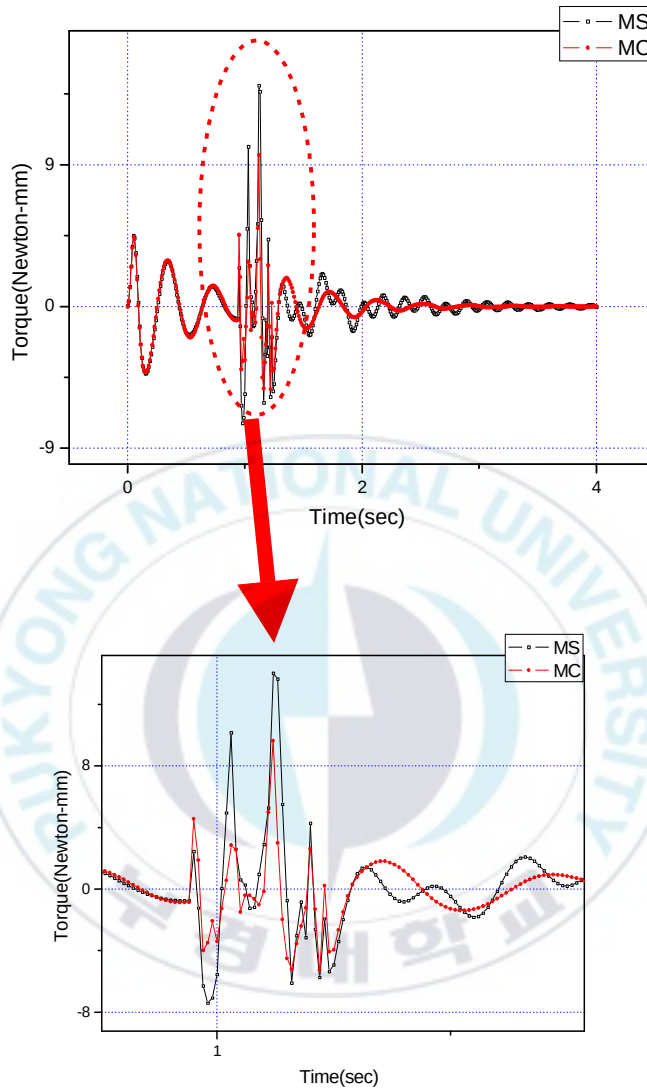


Fig 6.1 Local coordinate for bump simulation

상하운동에 의한 진동 전달 특성을 파악하기 위해 Fig 6.1에서 보듯이 스트럿 로우어 부분의 댐퍼와 너클을 연결하는 조인트(A)에 발생하는 수직방향의 반력을 측정한다. 그리고 상하운동에 의한 진동이 조향 휠에 미치는 영향을 파악하기 위하여 범프 통과시 Fig 6.1의 스티어링 피니언(B)에 작용하는 토크를 측정하여 비교한다.



(a) Reaction force



(MS= MacPherson strut suspension, MC= MacPherson strut suspension with a carrier)

Fig. 6.2 Results of bump simulation

댐퍼와 너클을 연결하는 조인트에 발생하는 수직방향 반력은 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 가진 차량의 경우 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치에 비해 최대 20% 감소한다(Fig 6.2 (a)). 그리고 50mm 범프 통과

시 스티어링 피니언에 발생하는 토크도 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 가진 차량이 최대 30%까지 감소하는 것을 Fig 6.2 (b)의 그래프에서 확인 할 수 있다. 이 결과 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치에 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치에 비해 상하운동에 의한 진동이 조향휠에 미치는 영향이 작음을 알 수 있다.

6.2 스텝 조향 해석

스텝 조향(step steer or J-turn) 해석은 일정 차속(일반적으로 100km/h)으로 주행하는 상황에서 Fig. 6.3과 같은 준 스텝(pseudo-step) 모양의 조향 입력을 주어 차량의 과도 상태(transient condition) 및 정상 상태(steady-state condition)의 차량 특성을 보는 것이다. 차량의 횡 가속도(lateral acceleration), 및 요 각속도(yaw rate)의 응답시간(response time), 오버슈트(overshoot), 그리고 롤각(roll angle)과 횡 슬립각(side slip angle)의 정상상태 값(steady-state value) 등이 차량의 성능지수(performance index)이며 그 정의는 Fig 6.3에 나타나 있다²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾.

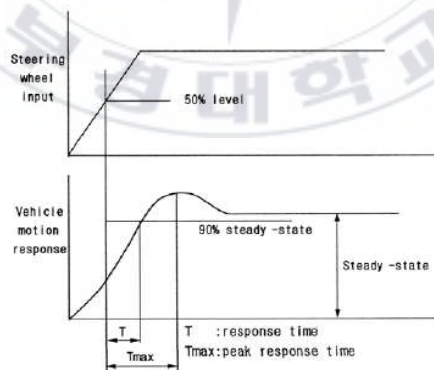


Fig. 6.3 Performance index of step steer analysis

-스텝 조향 시뮬레이션의 응답값

운전자의 주관적인 평가와 상관관계가 있는 성능지수로 TB factor를 정의하고 있다. TB factor는 요각속도 피크 응답시간과 횡 슬립각의 정상상태 값의 곱으로 식(8)과 같이 정의되며, 이 값이 작을수록 우수하다고 평가된다.

$$TB = T_{\dot{\psi}} \times \beta_{state} \quad (8)$$

여기서 $T_{\dot{\psi}}$ 는 요 각속도 피크 응답시간이며, β_{state} 는 횡방향 슬립각의 정상상태 값이다²⁹⁾.

주어진 차량속도(100km/h)에서 조향휠 각도에 따른 정상상태 횡가속도의 변화율로 정의되는 조향 민감도(steering sensitivity)는 조향계의 특성을 규명하는 중요한 성능지표가 된다. 조향 민감도는 정상상태 차량동역학 이론으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$S_s = \frac{100}{G_s [K + \delta_a]} \quad (9)$$

여기서,

$$\delta_a = 57.3 \frac{Lg}{u^2} \quad (10)$$

여기서 K는 언더스티어 계수(Understeer gradient)이고, δ_a 는 1g로 선회할 때의 애커만(Ackerman) 조향각이며, L은 차량의 축거(wheelbase)이다. 스텝 조향 해석에서는 조향 입력에 대한 횡가속도 정상상태 값에 의하여 조향 민감도를 결정할 수 있다.

롤게인(roll gain)은 선회 시 차량의 횡가속도에 의하여 발생하는 롤각의 크기를 나타내며, 이 값 역시 횡가속도 0.15g인 지점에서 구한다. 이 값이 작을수록 탑승자가 안락감과 안정감을 느낄 수 있다.

$$R_{\phi} = \frac{d\phi}{d\alpha_y} \quad (11)$$

여기서 R_{ϕ} 는 롤게인, ϕ 는 롤각, α_y 는 횡 가속도를 각각 나타낸다.

횡가속도 응답시간은 방향응답성을 나타내며, 조향입력 후 정상상태 횡가속도의 90%에 도달하는데 소요되는 시간에서 조향입력시간의 50%를 뺀 시간으로 정의한다. 조종성에 우선을 둔 차량은 이 값이 작고, 승차감에 비중을 둔 차량은 이 값이 크게 된다³⁰⁾.

-스텝 조향 시뮬레이션의 결과 비교

본 연구에서는 차량속도 100km/h, 조향각 40deg로 1초 동안 직진주행 후 0.3초의 증가시간(rising time)을 가지도록 스텝 조향을 하였다. Fig. 6.4은 스텝 조향을 입력값을 나타낸다.

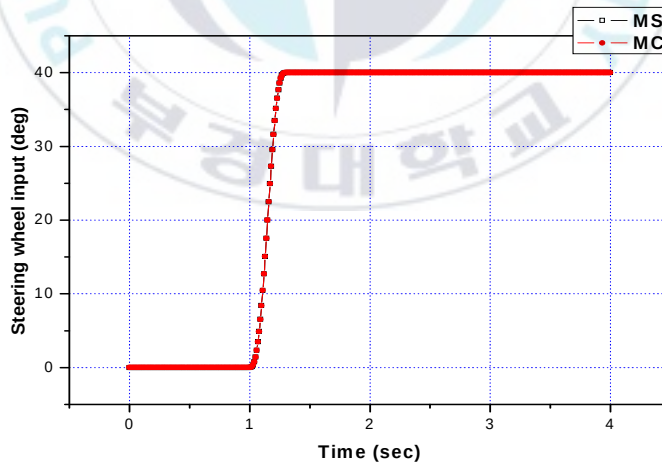
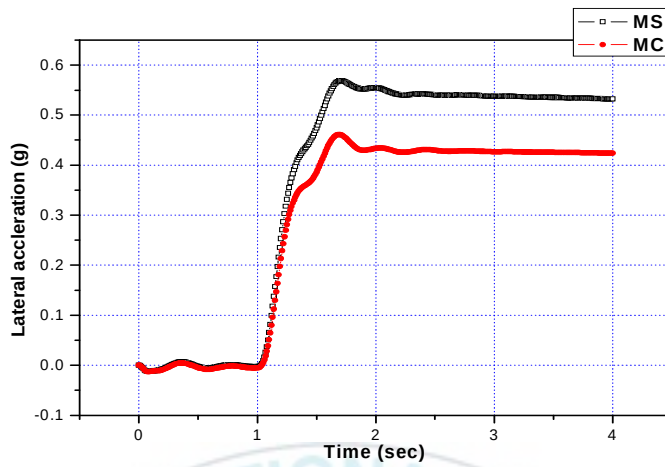
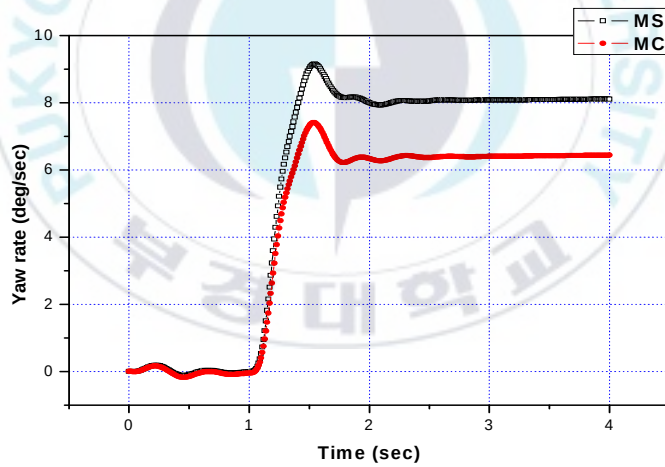


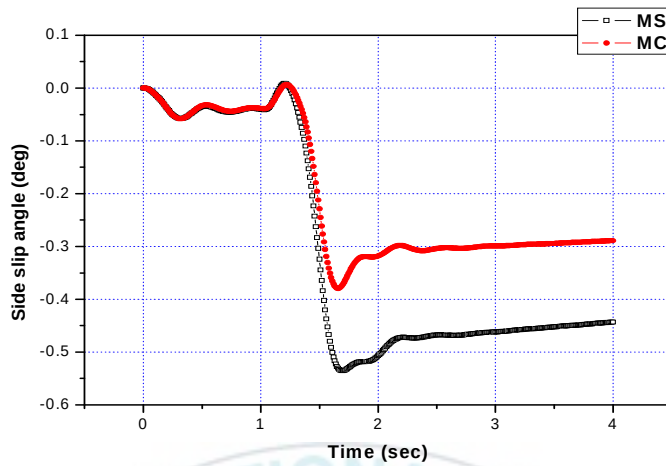
Fig. 6.4 Steering wheel input



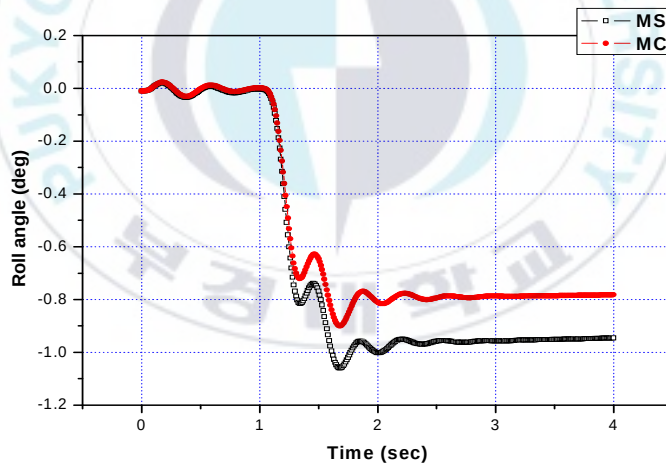
(a) Lateral acceleration



(b) Yaw rate



(c) Side slip angle



(d) Roll angle

(MS= MacPherson strut suspension, MC= MacPherson strut suspension
with a carrier)

Fig. 6.5 Results of step steer simulation

Fig. 6.5는 스텝 조향시 최적화된 하드포인트의 캐리어를 가진 맥퍼슨

스트럿 현가장치를 부착한 차량과 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 가지는 차량의 횡 가속도(lateral acceleration), 요 각속도(yaw rate), 횡 슬립각(side slip angle) 및 롤각(roll angle)을 비교하여 나타낸다. 스텝 조향에 따른 차량의 성능 인자(performance index)가 Table 14에 나타나 있는데, 최적화된 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 차량이 기존의 차량에 비해 약 62.5% 정도 감소된 TB factor를 가짐을 알 수 있다. 그리고, 일반적으로 스텝 조향 해석 후 조종안정성 평가를 위해 사용되는 인자들(조향 민감도, 롤게인, 횡가속도 응답시간)은 미국에서 생산되는 차량과 비교하여 Table 15에 나타내고 있다. 최적화 후 조향 민감도는 미국에서 생산되는 차량의 평균에 더욱 가까운 값으로 변화였고, 롤게인과 횡가속도 응답시간은 조금 향상되었다.

Table 14 Performance factors of step steer

		MS	MC	Unit
steer wheel angle		40	40	deg
Lateral acceleration	S.S	0.54	0.43	g
	R.T	0.31	0.30	sec
	P.T	0.49	0.48	sec
	Overshoot	5.31	6.7	%
Yaw rate	S.S	8.05	6.37	deg/sec
	R.T	0.15	0.14	sec
	P.T	0.33	0.32	sec
	Overshoot	13.51	16.17	%
Side slip angle	S.S	0.47	0.3	deg
Roll gain	S.S	0.95	0.79	deg
	gain	1.96	1.65	deg/g
TB factor		0.16	0.10	sec · deg
Steering sensitivity		1.35	1.08	g/100deg

Table 15 Response parameters of step steer simulation

Parameter	US Product			MS	MC
	Min	Ave	Max		
Steering sensitivity(g/100deg)	0.57	1.01	2.15	1.35	1.08
Roll gain(deg/g)	3.0	6.4	11.0	1.96	1.65
Lateral acceleration response time(sec)	0.28	0.41	0.77	0.31	0.29



제 7 장 결 론

본 논문에서는 캐리어를 가지는 새로운 맥퍼슨 스트럿 현가장치에 대해 범용 다물체 동역학 프로그램인 ADAMS를 이용하여 모델링하였다. 이 모델을 바탕으로 실험계획법의 한 종류인 Packett-Burman 설계법을 이용하여 민감도 해석을 수행하여 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치와 특성을 비교분석하였다. 또한, 범용 최적화 프로그램인 Visual DOC를 이용하여 요구되는 SDF값을 만족시키기 위해 GA(유전자 알고리즘)을 이용하여 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 하드 포인트를 최적화하였다. 최적화된 결과를 바탕으로 70mm 범프 시뮬레이션을 수행하여 그 결과들을 검증하였고, 뿐만 아니라, 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 이용하는 전차량을 모델링하여 조종안정성을 평가하기 위한 시뮬레이션을 함으로써, 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 사용하는 전차량의 시뮬레이션 결과와 비교해 보았다. 이 과정을 통해 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿형 현가장치의 장점의 특성과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 수정된 맥퍼슨 스트럿 현가장치는 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치에 비해 캐리어와 너클의 상·하 부분의 두개의 새로운 하드 포인트를 가지게 되어 설계의 자유도가 증가함을 확인하였다.

2) 수정된 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 민감도 해석 결과, 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치에 비해 차체 공간 확보가 용이하고 댐퍼 스트러트의 굽힘 모멘트를 줄여 섭동부에 발생하는 마찰을 억제시킬 수 있음을 확인하였다.

3) 수정된 맥퍼슨 스트럿 현가장치가 하드 포인트들의 동일한 변형에 대해 캐리어의 영향에 의해 갠버, 캐스터 각이 큰 변형량을 가짐을 확인하였다.

4) 수정된 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 하드포인트를 유전자 알고리즘 (GA)을 이용하여 최적화하고, 그 결과 각각의 SDF에 대해 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

5) 최적화된 하드포인트로 설계된 캐리어를 가진 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 장착한 전차량 시뮬레이션 결과 기존의 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 장착한 차량에 비해 우수한 조종안정성 성능을 가짐을 알 수 있었다.



참고 문헌

- 1) 탁태오, "민감도 해석을 이용한 현가장치의 동역학적 최적설계",
한국자동차공학회논문집, Vol. 2, No. 3, pp, 50 ~ 61, 1994
- 2) 탁태오, "수치미분에 의한 차량 현가장치의 기구학적 민감도 해석",
한국자동차공학회논문집, Vol. 6, No. 5, pp.128
- 3) 황원걸, 김우영, 임형은 "차량현가장치의 최적설계시스템 개발",
한국자동차공학회논문집, Vol. 7, No. 3, pp.339
- 4) 김우영, 안기원, 오철성, 황원걸, 임형은, "더블위시본 타입 현가계의
하드포인트 최적화에 관한 연구", 한국자동차공학회 2002년도
추계학술대회논문집, pp.897~902, 2002.
- 5) 황원걸, 김우영, 임형은 "차량현가장치의 최적설계시스템 개발",
한국자동차공학회논문집, Vol. 7, No. 3, pp.339~347, 1999.
- 6) 김상중, 박찬중, 박태원, "실험계획법을 이용한 현가장치의 요소설계",
한국자동차공학회논문집, Vol. 4, No. 1, pp.16~27, 1996.
- 7) 최병렬, 최진호, 최동훈, "K&C 특성의 신뢰성 향상을 위한 차량
현가장치의 최적설계", KSAE 추계학술대회 논문집, pp.582~587, 2004
- 8) Ford Global Technologies, LLC, "Wheel Suspension for A Motor Vehicle",
USA Patent Number US0234504 A1, 2003
- 9) 최동훈, "부분공간 일부 합성 계획법을 적용한 효율적인 반응표면
모델링 및 최적설계", 석사학위논문, 한양대학교, 2000

- 10) Dae Hyung, Lee "Kinematic Sensitivity Analysis and Optimal Design of Vehicle Suspension System"
- 11) H.K. Moon "Kinematic Sensitivity Analysis in Vehicle Suspension System" SAE No. 953757.
- 12) VisualDOC 4.0 User's Manual, Vanderplaats Research & Development, Inc., U.S.A, 2004.
- 13) Ok, Jinku, "Kinematic Optimum Design of a Torsion-Beam Suspension Using Genetic Algorithms", Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp 25~30.
- 14) MSC.ADAMS 2005 Help Manual, MSC Software, 2005.
- 15) www.mscsoftware.com
- 16) 공성곤 외, “유전자 알고리즘 입문”, 진영사, 1997.
- 17) 도진강규, “유전알고리즘과 그 응용”, 교우사, 2000.
- 18) 특허청, “자동차 현가장치”, 2002.
- 19) Michael Blundell, Damian Harty "Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics", Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- 20) 이윤기, “반응표면분석법을 이용한 Front bump steer의 최적설계” 석사학위논문, 전남대학교, 2001.
- 21) S. Ravi Shankar, Stephan Koerner, John Janevic "Robust Design using ADAMS/Insight" Mechanical Dynamics, Inc. 2002.

- 22) Jasbir S. Arora "Introduction to Optimum Design" McGraw-Hill, Inc. 2004.
- 23) 이덕희, 김태수, 김재정, "유전 알고리즘을 이용한 현가장치의 기구학적 최적설계", 한국자동차공학회논문집, Vol. 8, No. 5, pp.138~147, 2000.
- 24) 서선민 "유전자 알고리즘을 이용한 반능동 현가장치의 구조-제어계의 동시최적화" 석사학위논문, 부산대학교, 1998.
- 25) Vehicle Technical Handbook-Design, pp.455, KASE.
- 26) Thomas D. Gillespie "Fundamentals of Vehicle Dynamics" Society of Automotive Engineers. Inc. 1992.
- 27) 이철훈, 최진호 "초기 개발 차량의 승차감 및 조종안정성 향상을 위한 현가장치 SDF분석에 관한 연구" 한국자동차공학회 추계학술논문집, pp.848~854, 2005.
- 28) 김상섭, 정홍규, "현가장치 함수모델을 이용한 차량동역학 해석," 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집(II), pp.554~561, 2001.
- 29) 임형은 "차량의 조종안정성 평가 및 개선에 관한 연구" 박사학위논문, 전남대학교, 1999.
- 30) 조병관, 송성재 "ADAMS를 이용한 조종안정성 해석" 한국자동차공학회 논문집 제4권 제5호, pp. 109~118, 1996.

부 록

A. 현가장치

- 일체식 현가장치(rigid axle suspension)

좌우 양쪽바퀴가 한개의 차축으로 연결되며, 버스나 트럭 등 상용차의 전후바퀴 및 승용차의 후륜에 채용되고 있으며, 다음과 같은 특징이 있다.

- 구조가 단순하기 때문에, 값이 싸고 신뢰성이 높다.
- 차륜의 상하운동에 의한 휠얼라인먼트 변화가 작아서 타이어의 마멸 방지에 유리하다.
- 스프링 아래 질량이 커서 승차감이 나빠진다.
- 좌우 차륜의 움직임이 계속하여 발생하고, 또한 횡진동의 발생이 쉽다.



A.1 Rigid axle suspension

일체식 현가장치에 사용되는 스프링은 판스프링이 주로 사용되며 그 배치에 따라 길이방향 스프링형식과 옆방향 스프링형식이 있다. 일반적으로 길이방향 스프링형식이 사용되며, 이외에 코일스프링, 공기스프링, 토오션바 스프링 등이 사용된다. 판스프링식, 링크식, 드디온식, 토크튜브 드라이

브식으로 분류된다.

—독립식 현가장치 (Independent Suspension)

독립식 현가장치는 차축을 분할하여 양쪽 차륜이 서로 관계없이 움직이게 하며 승차감이나 안정성이 향상되게 하는 것으로서 더블위시본(Double Wishbone)식, 맥퍼슨(MacPherson)식, 스윙암(Swing arm)식으로 크게 분류할 수 있는데, 요즘 생산되는 소형 승용차는 거의 맥퍼슨타입의 현가장치를 채택하고 있으며, 아래와 같은 특징을 갖는다.

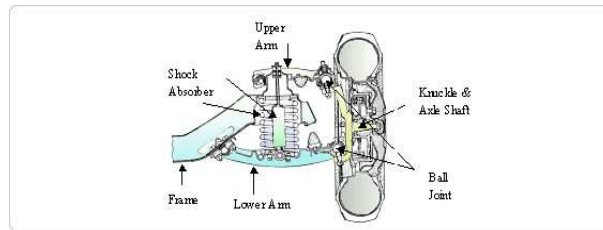
- 좌우의 차륜을 연결하는 차축이 없기 때문에 엔진위치나 차체바닥을 낮게 할 수 있다.
- 차륜이 상하로 움직일 경우 휠얼라인먼트에 대해 설정할 수 있는 자유도가 크다.
- 스프링질량을 줄일 수 있고, 노면에 대한 바퀴의 접지성이 우수하다.

1) 더블위시본식(Double Wishbone Type)

전륜 현가장치에 가장 오래 전부터 많이 사용되어 온 형식이다.

Fig. 2.3은 코일스프링을 이용한 위시본 형식을 보여주고 있다. 상하 2개의 V자형(혹은 A자형)의 암이 새의 가슴뼈 모양과 비슷하다고 해서 더블 위시본이라 한다.

그림에서와 같이 상하 2개의 암, 어퍼암(upper arm)과 로워암(lower arm)은 임에 장착되고, 다른 한쪽 끝은 상하 볼조인트(ball joint)로 조향너클(steering knuckle)에 조립되어 있다. 완충작용은 프레임과 로워암 사이의 코일스프링과 속업소버에 의해 수행되어 충격이 흡수된다.



A.2 Double wishborn type suspension

더블위시본식은 상·하컨트롤암의 모양이나 배치에 따라 휠얼라인먼트의 변화나 가·감속시에 자동차의 자세를 비교적 자유롭게 제어할 수 있다. 강성이 높아 조종안정성을 증시하는 고급 승용차에 많이 이용되고 있다.

또한 토션바스프링을 사용한 위시본형식이 사용되기도 한다. 이 경우에 토션바스프링의 한쪽은 아래 컨트롤암에 설치되어있고, 다른 쪽은 앵커암을 통하여 프레임에 설치되어 상하운동에 대한 완충역할을 담당한다. 텐션로드는 전후방향의 하중과 충격을 지지하고, 텐션로드를 컨트롤암에 경사지게 설치하여 다이브(dive)나 스쿼트(squat)를 억제하기도 한다.

더블위시본 형식의 특징을 정리하면 다음과 같다.

一 장점

- 설계자유도가 크다
- 스트러트식과 같이 속업소버에 굽힘모멘트가 걸리지 않기 때문에 마찰이 작다.
- 서브프레임 상에 링크를 레이아웃하기 때문에 강성과 진동에 대한 절연을 양립하기가 용이하다.
- 상하방향의 높이를 낮게 하는 것이 가능하여 후드(hood)의 높이를 낮출 수 있다.

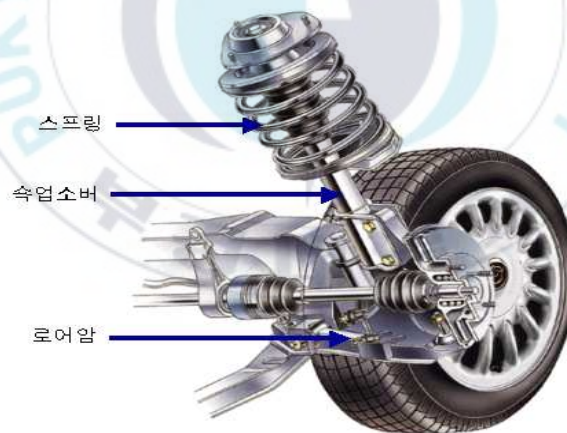
一 단점

- 부품수가 많고 위치결정에 대한 정밀도가 요구된다.

- 값이 다소 비싸고 구조가 복잡해 큰 공간이 필요하다.

(2) 맥퍼슨식 현가장치(MacPherson Strut Type Suspension)

더블위시본식을 개량하여 영국의 맥퍼슨이 고안한 독립현가방식의 한 종류이다. 속업소버를 내장하고 스프링을 부착한 스트럿을 세로로 설치한다. 위시본형에서 존재하는 어퍼컨트롤암은 없으며, 상단을 차체에 부착하고 하단은 로워암으로 지지하는 구조이다. 상단은 고무로 된 마운팅 인슐레이터(mounting insulator)를 사이에 끼워 차체에 조립되어 있다. 이는 고무의 탄성을 이용하여 타이어의 충격이 차체로 전달되는 것을 최소화하기 위함이다. 맥퍼슨식은 차체에 속업소버를 부착하는 지점이 높아 휠얼라인먼트가 정확히 설정되며, 그 변화도 작고 노면충격도 넓게 분산되는 장점이 있다. 또한 부품수가 적고 가벼워 비용도 적게 든다. 중형이하의 자동차에 널리 사용되고 있으며, 단점은 후드가 다소 높아진다는 것이다.



A.3 MacPherson strut suspension

A.3는 전륜에 적용된 맥퍼슨식 현가장치를 보여주고 있다.

맥퍼슨식 현가장치의 특징은 다음과 같다.

— 장점

- 스프링 아래 질량이 가벼워 승차감이 좋다.
- 구조가 간단하고 정비가 용이하다.
- 안티다이브(anti-dive) 효과가 우수하다.
- 엔진실의 유효공간을 크게 할 수 있어 엔진을 횡으로 배치하는 전륜 구동형에서 많이 사용하는 이유가 된다.

— 단점

- 속업쇼버에서 발생하는 마찰력이 크다.
- 설치높이가 크다.
- 횡방향력에 대한 저항력이 약하다.

—정적 설계 요소와 현가특성

정적 설계 요소는 하드포인트의 기구학적인 관계로부터 계산되어지는 Geometric 정적 설계 요소와 현가장치의 Compliance로부터 계산되어지는 Compliance 정적 설계요소로 나누어 구분할 수 있고, 또한 이들은 계산과정에서 타이어의 Vertical Spring Rate의 고려 유무에 따라서도 구분할 수 있다.

하드포인트란 초기에 현가장치를 모델링 하는데 있어서 기구학적 모델에 의해 필요한 데이터이며 Geometric 정적 설계 요소의 계산을 위한 하드포인트 데이터는 ADAMS 해석 결과로부터 변위된 하드포인트 데이터를 읽어 Geometric 정적 설계를 계산한다.

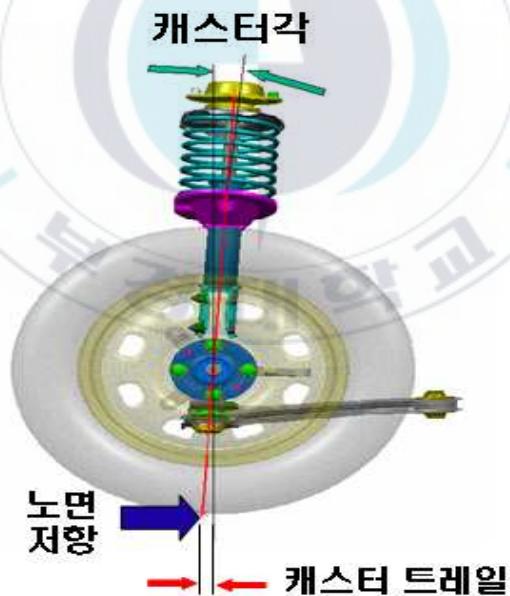
Compliance 는 어떤 점에 가해진 힘에 대한 어떤 점의 변형량으로 정의할 수 있다.

$$\text{Compliance} = \frac{\text{Displacement}}{\text{Force}} \quad (1)$$

캐스터각

A.4과 같이 자동차를 옆에서 보았을 때, 킹핀의 중심선이 노면에 수직인 직선에 대해 어느 한쪽으로 기울어져 있는 상태를 캐스터라 하며, 그 각도를 캐스터 각이라 한다. 또한, 휠허브 중심을 지나는 수직선과 킹핀 중심선이 각각 노면과 만나는 점 사이의 거리를 캐스터 오프셋 혹은 트레일(trail)이라 한다. 캐스터 각은 조향시 타이어에 가해지는 주행저항으로 인하여 킹핀축 둘레에 직진 위치로 되돌리려는 복원 모멘트가 작용하여 차에 직진성을 준다.

이 캐스터 각은 타이어의 마모에는 영향을 주지 않으며 조향 복원력의 향상 및 조향 토크를 감소시킨다. 또한 캐스터 각은 휠의 캠버 각의 변화에도 큰 영향을 미친다. 일반적으로 캐스터 각이 클수록 조향시 휠의 지면에 대한 양의 캠버 각을 줄여주고 선회 한계 성능을 향상시킨다.



A.4 Caster angle

캠버각

A.5과 같이 차량을 앞에서 보면 차륜이 수직선에 대해 어떠한 각도를 두고 장착되어 있으며 이 각을 캠버각이라 한다. 이 캠버각은 차량 선회 시 안정성을 높이며 킹핀 각과 함께 수직 하중이나 노면과의 접촉면에 작용하는 주행저항 등에 영향을 미친다. A.5와 같이 차륜이 안쪽으로 기울어진 경우를 부(-)캠버라 하며 이는 커브 주행시 선회력을 증가시키나 타이어 트레드 내측의 마모를 촉진시킨다. 이와는 달리, 차륜이 바깥쪽으로 기울어진 경우를 정(+)의 캠버라 하며 이는 직진성을 좋게 하고 킹핀 옵셋을 작게 하므로 이 값이 크면 클수록 커브 주행 시 선회력은 감소한다. 일반적으로 캠버각은 $0\sim 2.5^{\circ}$ 정도이다.

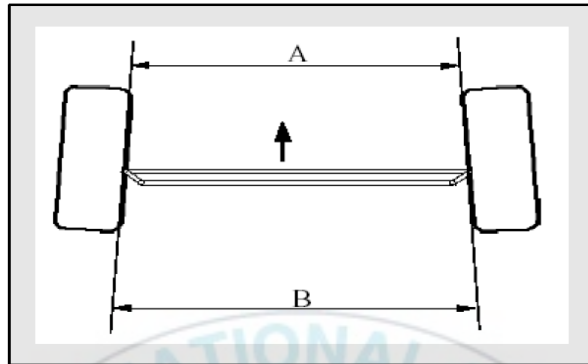


A.5 Camber angle

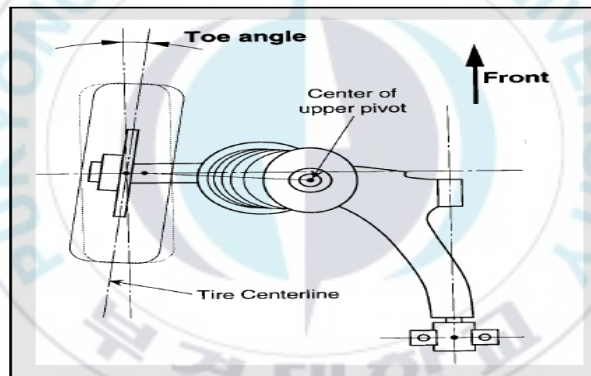
토우각

전륜을 위에서 보았을 때 좌/우측 차륜의 중심을 지나는 선은 A.6와 같이 평행이 아니고 앞쪽이 뒤쪽보다 좁게 되어 있다. 이와 같이 차륜의 앞쪽이 차체 내부를 행하고 있을 때를 양(+)의 토우각으로 하며 이를 '토우인(toe-in)'이라 한다. 그 반대의 경우, 즉 차륜의 앞쪽이 바깥쪽으로 향할 때는 음(-)의 토우각으로 하며 이를 '토우아웃(toe-out)'이라 한다. 거의 모든 차량은 토우인으로 장착되어 있는데 토우인을 주는 이유는 주행 중에는 캠버 때문에 타이어가 바깥쪽으로 벌어지려고 하는데 이 현상을 막아 앞 차륜을 평행하게 하고 조종 안정성을 좋게 하며 타이어가 측면으로 미

끄러지는 것을 막아 타이어의 마모를 방지하는 역할을 한다. A.7은 맥퍼슨 스트럿 현가장치에서의 토우각을 보여주고 있다.



A.6 Toe angle



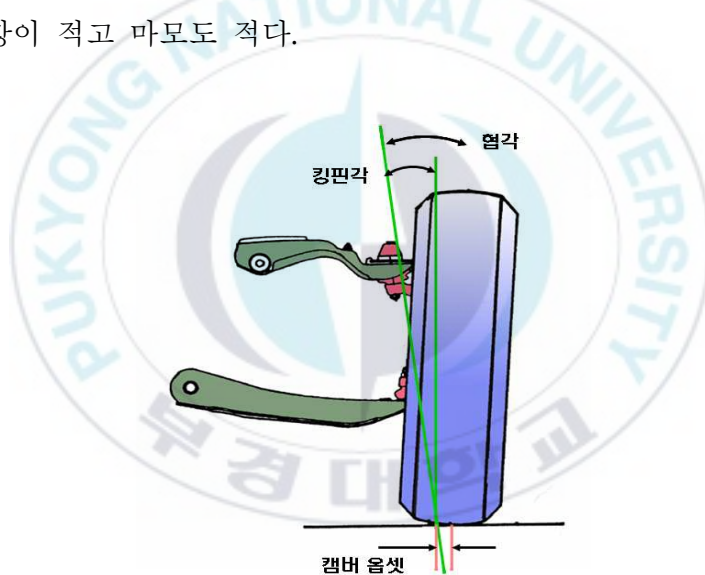
A.7 Toe angle of MacPherson strut

킹핀 경사각

A.8은 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 킹핀 경사각을 보여준다. 조향계를 가진 현가장치에서 조향작용시 휠 운동의 회전중심이 되는 축을 일반적으로 킹핀 축이라 하며 자동차를 정면에서 보았을 때, 킹핀 중심선이 노면에 수직인 직선과 만드는 각을 킹핀 경사각이라 한다. 휠의 중심부에는 제동장치 및 휠 장착을 위한 보조장치가 있어 조향축으로서의 킹핀을 휠의 중심에 가까이 할 수 없다. 그러므로 만일 킹핀이 수직이면 정역학적으로

타이어에 작용하는 종방향(longitudinal) 힘에 의하여 큰 모멘트를 받게 된다. 이를 감소시키기 위해 A.8과 같이 일정한 각을 주어서 킹핀의 중심선이 타이어 접지면에 가까워지도록 하고 있다. 킹핀 경사각을 가지는 목적은 안정한 스티어링 조작과 직진성을 얻고 커브를 회전한 후 전륜을 자동적으로 직진의 위치로 되돌리도록 하기 위해서다.

그리고 킹핀 중심선의 연장선이 노면과 만나는 점과 타이어 접지 중심과의 거리를 킹핀 오프셋이라 한다. 킹핀 오프셋이 작으면 제동시 및 주행중 노면으로부터 받는 반력에 의한 킹핀축 회전 모멘트가 작고 조향 장치에 전해지는 힘이 약하게 되나 조작성은 큰 편이 경쾌하게 된다. 오프셋이 있으면 조향 때 타이어의 운동은 미끄러짐과 오프셋을 반경으로 하는 구름저항이 적고 마모도 적다.



A.8 Kingpin inclination angle

B. 유전자 알고리즘(GA)

유전 알고리즘을 사용한 최적화 방법은 1975년에 Holland에 제안된 이후로 전역해를 구하는 공학설계에 많이 이용되었으며, 현가장치의 동역학적 최적 설계에도 이용되었다. 유전 알고리즘은 우수한 적응도를 가진 개체가 주위환경(최적설계문제의 경우에는 주어진 구속조건)속에서 더 큰 생존확률을 가지고 더 많은 교차조작에 참가하여 다음 세대에 우수한 개체를 생성하는 자연계의 적자생존의 원리와 변식, 교배, 돌연변이를 통해서 다음 세대를 형성하는 유전과정의 원리를 응용한 확률, 통계적 다점 최적화 방법이다. 유전 알고리즘의 특징은 파라미터 코딩한 것을 직접 이용하고, 다점(multi points : 군(population))탐색 방법이므로 전역해를 구할 수 있으며, 탐색에 적합도 함수를 이용하여 blind search를 하기 때문에 미분 값이나 다른 부가적인 지식을 요구하지 않는다. 또한 결정론적인 규칙이 없고, 확률적 연산자를 사용함으로 적용하기가 쉽다.

-유전자 알고리즘의 구조

유전자 알고리즘은 기본적인 세 가지 연산자(operator)로 작동하며 이는 아래와 같다.

1)선택

선택 연산자는 잘 적응한 해들은 살아남고 잘 적응하지 못한 해들은 도태되도록 유도함으로서 자연 선택(natural selection)현상을 모델링한다. 선택의 기반이 되는 것은 적합도이며 그 기본 원리는 더 좋은 개체들에게 특권을 부여한다는 것이다.

2)교배(crossover)

유전학적 연산(genetic operation)에 해당하며 유전자 연산자들(genetic operators)중에서 가장 중요한 작용을 한다. 두 개체에 대해서 한번에 작용을 하며 이 두 개체의 특징을 결합시킴으로써 새로운 자식(offspring) 개체

를 생성한다. 가장 간단한 교배 연산법은 1점 교배(one-point crossover)로써 랜덤하게 교배 위치를 발생시킨 뒤 각각의 쌍으로 된 개체들을 교배 위치에 따라 나누어서 각 개체의 오른쪽에 있는 정보부분을 서로 교환한다.

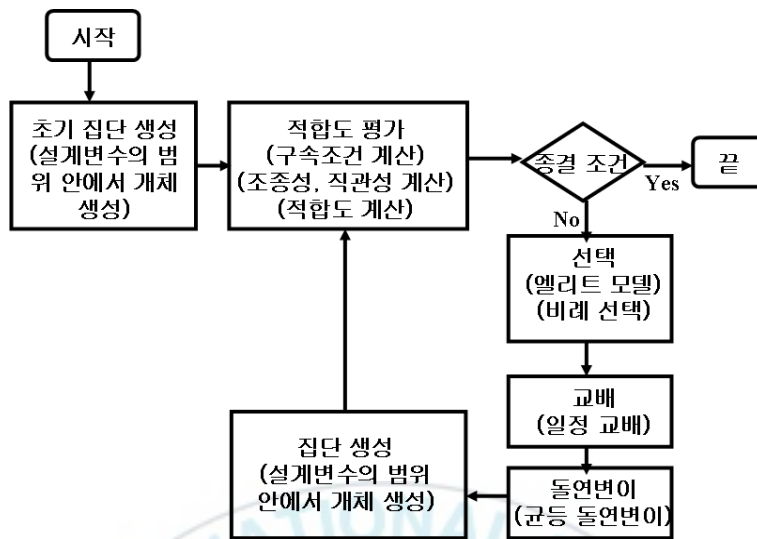
교배 전	→	교배 후
A = 0110!100		A' = 0110010
B = 1100!010		B' = 1100100

(여기서 ! 는 교배위치를 나타낸다.)

3)돌연변이(mutation)

개체의 각 유전자에 대하여 일정한 돌연변이 확률을 적용하여 대립 유전자의 값으로 바꾸는 것이다. 개체에 근접한 새로운 개체를 생성하는 국소적인 랜덤 탐색의 효과를 준다. 또 집단에서 잃어버린 유전형질을 복구하여 다양성을 유지하기 위한 수단으로 사용된다. 돌연변이 확률이 높으면 전역적인 탐색 효과가 나타나며, 진화의 초기에 뛰어난 성능을 발휘하지만, 진화의 후반부에는 높은 적합도를 가진 개체를 바꿔버릴 수도 있다. 즉 탐색된 우수한 최적해가 사라질 수도 있다. 돌연변이 확률이 낮으면 초기 유전자조합 이외의 공간을 탐색할 수 없기 때문에 국부적인 최적해에 빠질 수 있다. 돌연변이 확률은 일반적으로 0.05에서 0.1의 값이 많이 사용된다.

가장 기본적인 구조를 가지는 유전 알고리즘의 순서도를 B.1에 나타낸다.

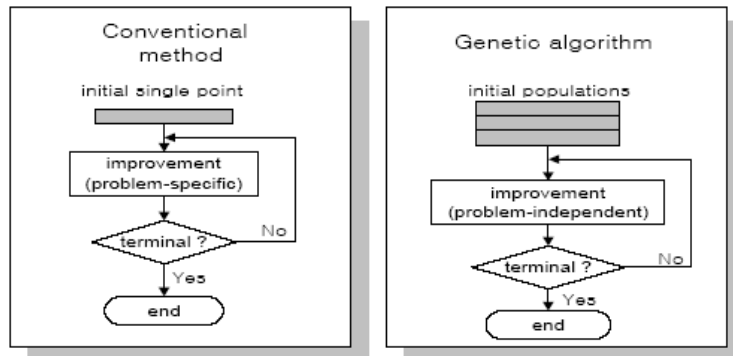


B.1 Flow chart of genetic algorithm

—유전자 알고리즘의 장점 및 단점

1)장점

- ▷ GA는 설계변수 그대로가 아닌 설계변수를 부호화(coding)시켜 수행한다.
- ▷ GA는 반복시에 한 점(single point)이 아닌 다점(multiple points)을 가지고 공간을 탐색한다. (B.2)
- ▷ GA는 민감도(sensitivity) 혹은 다른 부가적인 정보지식이 필요 없으며 단지 목적함수가 변환된 적응도(fitness)만을 필요로 한다.
- ▷ GA은 결정적인 연산방식을 대신하여 난수 연산자(random operator)를 사용한다.



B.2 Comparison of conventional and genetic approaches

2)단점

- ▷ GA는 해가 수렴하기까지 시간이 너무 걸리는 문제가 있다(이 문제들을 해결하기 위해서 기울기를 사용한 결정론적인 방법과 신경회로망을 사용한 확률적인 방법의 장점을 더한 하이브리드 유전 알고리즘 등이 연구되고 있다).
- ▷ GA는 설계변수의 유전자적인 표현이 곤란한 경우에서 적용하기가 쉽지 않다.
- ▷ GA는 구속 조건을 가지는 경우에 구속 조건의 처리가 쉽지 않다. 현재 가장 많이 사용하는 방법은 벌칙함수(penalty function)를 사용하는 방법이다.