

MR댐퍼를 장착한 SUV의 조향으로 인한 롤 특성 평가 Roll Characteristics Evaluation due to the Steering of a SUV with MR Dampers

강인필 · 백운경

I. P. Kang and W. K. Baek

(접수일 : 2009년 2월 5일, 수정일 : 2009년 2월 13일, 채택확정 : 2009년 2월 26일)

Key Words : Roll Characteristics(롤특성), Steering(조향), MR Damper(자기유변 댐퍼), Semi-active Suspension System(반능동 현가 시스템), Sky-hook Control(스카이-훅 제어), Ground-hook Control(그라운드-훅 제어)

Abstract : This study is about roll characteristics evaluation to show the advantage of using MR(magneto-rheological) dampers for steering of a SUV(sports utility vehicle). Roll characteristics is very important to observe the roll-propensity of the SUV. ADAMS/Car program was used to simulate the basic steering motion, using 63 D.O.F. vehicle model. Sky-Hook and Ground-Hook control algorithms were used as a semi-active suspension system controller. The roll characteristics from the steering motion were compared between the simulation results from the semi-active suspension system and the passive suspension system.

1. 서 론

차량 현가장치 설계자들은 좋은 승차감과 조종안정성을 획득하기 위해 노력해 왔다. 그러나 현가장치 설계에 있어 승차감과 핸들링은 서로 상반되는 특성이 요구된다¹⁾. 일반적으로 SUV(sports utility vehicle)차량은 승용차에 비해 지상고가 높기 때문에 승차감과 관련하여 롤운동이 크고 이로 인한 전복성향(roll propensity)이 높은 것으로 알려져 있다. 특히 급한 차선변경이나 장애물을 피하기 위한 급속조향으로 인해 롤운동이 과다해지면 전복현상이 일어날 수도 있다.

반능동 제어시스템을 가지는 차량은 현가성능의 개선뿐만 아니라 동시에 조종안정성까지 확보할 수 있다고 알려져 있다. 반능동 제어시스템에 사용되는 기본적인 알고리즘은 스카이-훅 제어이며 1974년 Karnopp에 의해 제안되었다²⁾. 그러나 대부분의 반능동 현가시스템의 연구가 진동특성 평가 또는 제어알고리즘의 연구에 치중되어 있다^{3, 4, 6, 7)}.

최근 반능동 댐퍼에 지능형 유체를 활용한 연구

가 활발히 이루어지고 있다. 그 중에서 MR유체는 자기장의 세기에 따라 유체의 겔보기 점도(apparent viscosity)가 변화하는 빙햄유체(bingham fluid)로서 반응속도가 매우 빠르기 때문에 댐퍼 또는 클러치 등의 응용장치에 적용하려는 연구가 진행되고 있으며 특히, MR유체를 사용한 차량의 속 업소버에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다⁵⁾.

MR댐퍼를 적용한 반능동 현가장치의 연구에서 실제 차량의 타이어, 고부부싱, 속 업소버 등의 비선형요소로 인해 매우 복잡한 거동을 함에도 불구하고 단순화 된 차량모델을 사용한 연구가 대부분이다. Duchnowski 등⁸⁾은 ADAMS를 사용하여 전체 차량과 속 업소버를 모델링하여 속 업소버의 감쇠력 지연, 액츄에이터의 속도, 신호처리, 반능동 제어 알고리즘에 대해 연구하였다. Sorge 등⁹⁾과 Denesin 등¹⁰⁾은 반능동 현가시스템이 적용된 전체 차량의 거동을 주행조건에 따라 시뮬레이션하여 그 결과를 나타내었다.

본 연구에서는 다물체 동역학 소프트웨어인 ADAMS/Car를 이용하여 전체 차량을 보다 자세하게 모델링하고, MR댐퍼 모델에는 실제적인 동특성 시험데이터가 사용되었다. 이러한 모델을 사용하여 조향시험 시뮬레이션을 수행함으로써 MR댐퍼를 사용할 경우와 수동식댐퍼를 사용했을 경우에 대해

백운경(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : baekwk@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6164
강인필 : 부경대학교 기계공학부

SUV차량의 조향입력이 차량의 롤 운동 특성에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

2. MR댐퍼 모델

MR댐퍼 모델을 구성하기 위해서 직접 제작한 MR댐퍼의 감쇠력 시험과 응답특성 시험을 수행하였으며 이 MR댐퍼 모델은 SIMULINK¹¹⁾를 이용하여 모델링하였다. Fig. 1은 본 연구에서 설계 제작된 MR댐퍼와 그 구성 부품들을 보이고 있다.

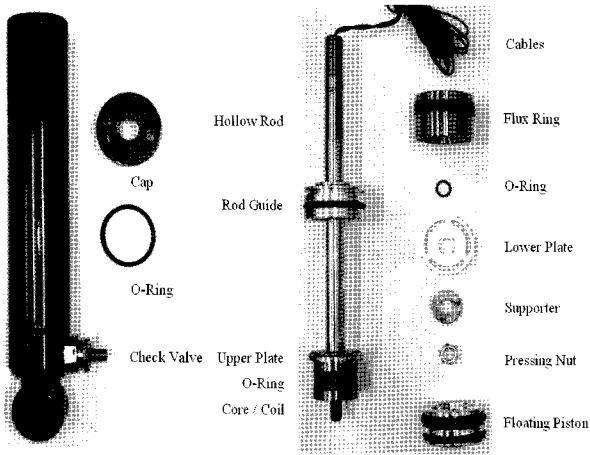


Fig. 1 MR damper assembly and components

2.1 MR댐퍼의 동특성 시험

MR댐퍼 모델에 필요한 동특성 파라메타를 구하기 위해 감쇠력 시험과 응답특성 시험을 수행하였다. 감쇠력 시험은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 감쇠력 시험기(MTS 849)를 사용하여 속도와 전류에 따른 MR댐퍼의 감쇠력을 측정하였으며, 그 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 4는 해당 전류의 감쇠력에서 0[A]의 감쇠력을 뺀 전류에 의해 제어 가능한 감쇠력(controllable damping force)을 나타내었다.

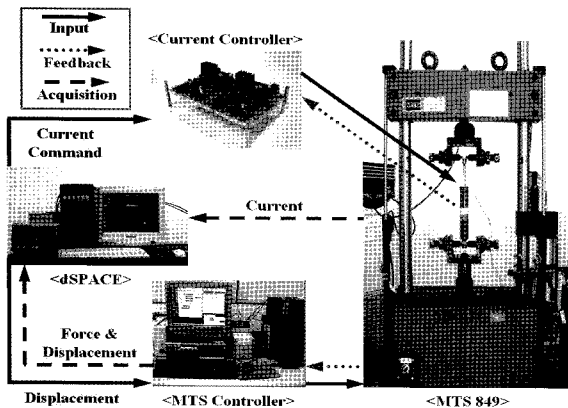


Fig. 2 Damping force test apparatus

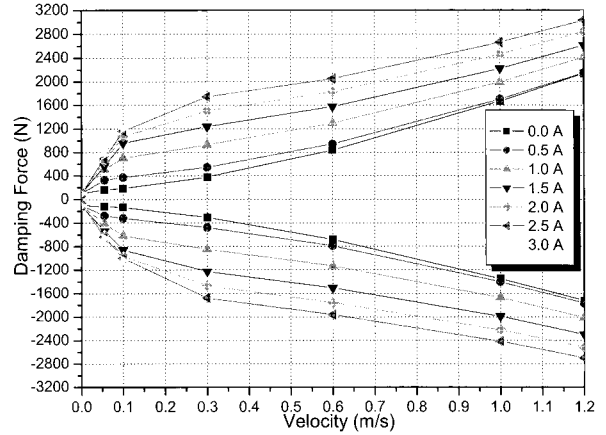


Fig. 3 Experimental damping force-velocity diagram of the MR damper

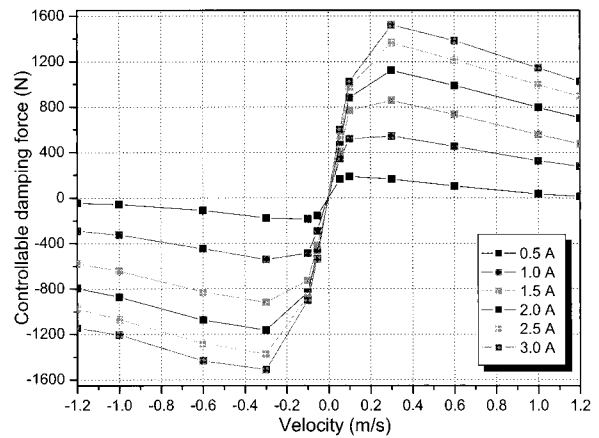


Fig. 4 Experimental force-velocity diagram of controllable damping force

2.2 MR댐퍼의 실험적 모델

MR댐퍼의 감쇠력 시험과 응답시험으로부터 MR댐퍼의 감쇠력 특성을 SIMULINK를 사용하여 구성하였다. MR댐퍼에서 발생하는 감쇠력은 식 (1)과 같이 속도와 전류의 함수로 표현할 수 있다.

$$F_d(v, i) = \text{sgn}(v)F_f + F_{vis}(v) + F_{MR}(v, i) \quad (1)$$

첫 번째 항은 속도의 부호에 따른 마찰력이며, 두 번째 항은 전류에 독립적인 유체점성에 의한 감쇠력으로 속도의 함수, 세 번째 항은 제어 가능한 감쇠력으로 속도와 전류의 함수이다.

본 연구에서 MR댐퍼의 마찰력은 무시하였으며, 유체 점성과 전류에 의한 감쇠력은 룩업 테이블(look up table)로 구성하였으며, 전류명령에 따른 감쇠력 지연은 Fig. 5와 같이 1차 시스템으로 근사화 하였다.

3. 전체 차량의 모델

본 연구에서 이용한 차량모델은 더블위시본 형식의 전륜 현가장치와 일체식 5 link 형의 후륜 현가장치를 가지는 SUV이다. 범용 다물체 동역학해석 소프트웨어인 MSC. ADAMS에서 차량 해석 모듈인 ADAMS/Car12)를 이용하여 모델링하였다. 전체 차량의 모델은 크게 전·후 현가장치와 전·후 스테빌라이저 바(stabilizer bar), 조향장치, 차량의 몸체 등 6부분으로 구분하여 모델링 하였다. Fig. 6에 전체 차량모델을 나타내었으며 Table 1에는 차량모델의 구속조인트와 자유도를 나타낸다. 각 조인트의 고무부싱모델로서는 세 방향의 회전스프링 댐퍼의 선형조합으로 표현한 켈빈-보이트(Kelvin-Voight) 모델을 이용하여 각 조인트 부분에 적용하였다. 스프링은 선형강성계수로 나타내었고, 댐퍼는 각 속도에서 감쇠력을 스플라인(spline)으로 근사시켜 모델링 하였다.

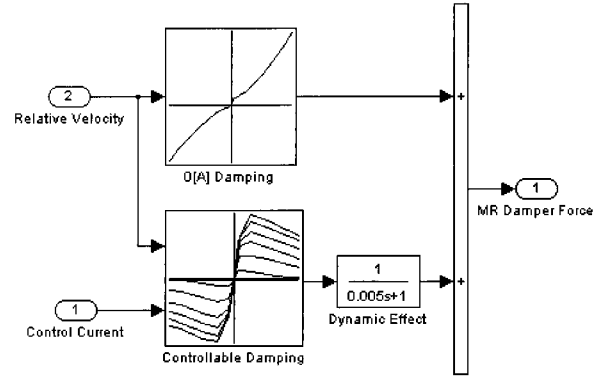


Fig. 5 The model structure of the MR damper

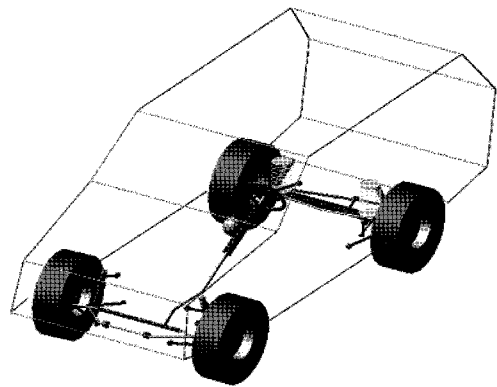


Fig. 6 Full vehicle mode

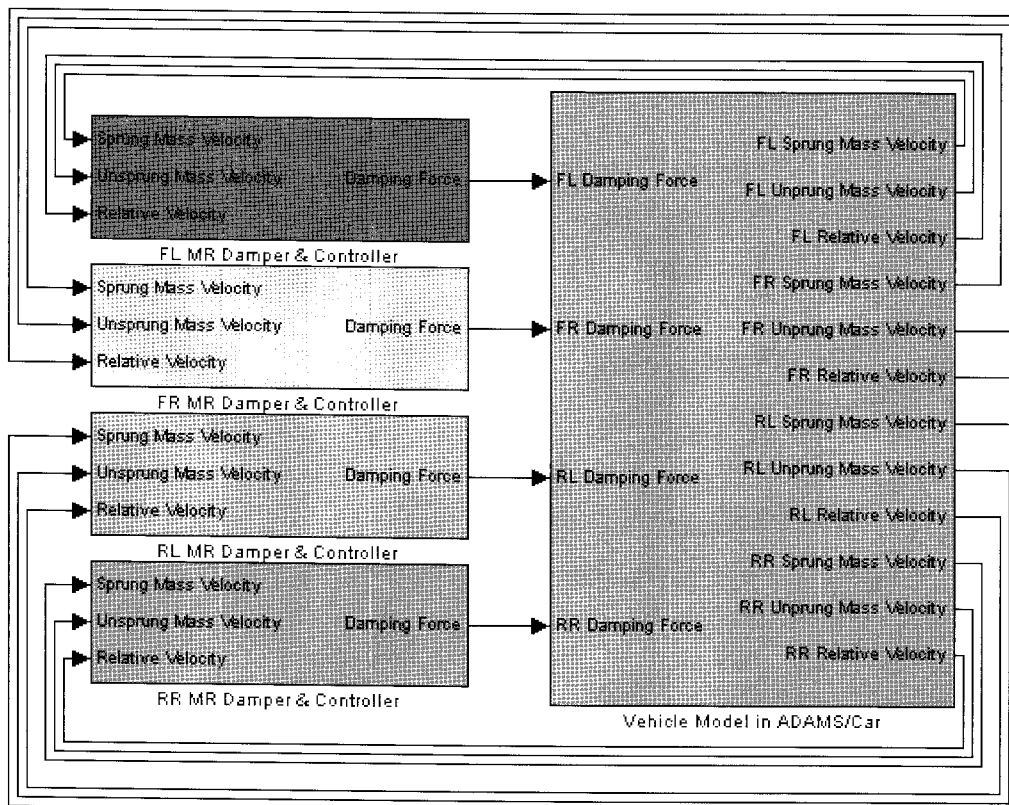


Fig. 7 The model structure of a MR damper

Table 1 D.O.F. of full vehicle model

Joint & Part	Number of Constraint	D.O.F
Cylindrical Joint	4×4	16
Spherical Joint	10×3	30
Revolute Joint	9×5	45
Translational Joint	1×5	5
Convel Joint	4×4	16
Fixed Joint	9×6	54
Hook Joint	4×4	16
Inline Joint	1×2	2
Inplane Joint	1×1	1
Perpendicular Joint	5×1	5
Coupler	2×1	2
Motion	3×1	3
Moving Part	43×6	258
Total Constraint		195
Total D.O.F.		258 - 195 = 63

4. ADAMS와 SIMULINK의 인터페이스

범용 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS에서 MR댐퍼모델 및 반능동 제어 알고리즘을 사용할 수 있도록 하기 위해서 ADAMS/Control과 SIMULINK와 연동하여 해석하였다.

Fig. 7은 MR댐퍼의 모델구조이며 이 중에서 'Vehicle Model in ADAMS/Car'블록은 ADAMS/Car solver와의 인터페이스를 담당하는 블록이다.

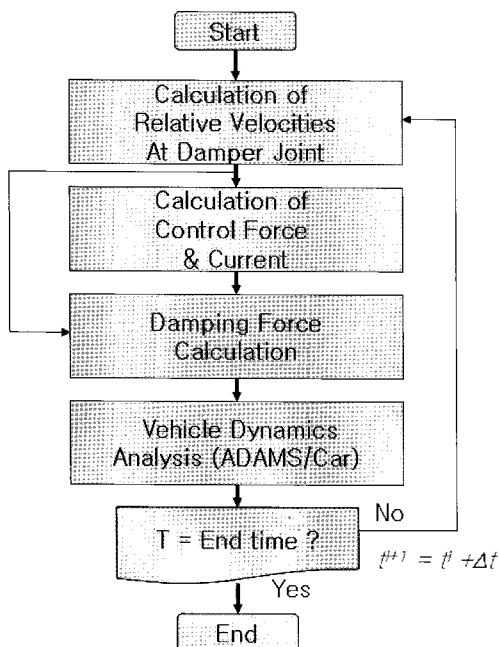


Fig. 8 Flow chart for damping force calculation

ADAMS/Car의 차량모델에서는 MR 댐퍼가 장착되는 상부와 하부 조인트에서의 속도와 상대속도를 출력하고 이 데이터는 각각의 MR댐퍼 모델과 제어기의 입력으로 사용된다.

반능동 제어알고리즘은 속도 정보로부터 요구되는 감쇠력을 계산하고 MR댐퍼의 전류명령을 조절한다. MR댐퍼모델은 상대속도와 전류명령을 입력받아 MR댐퍼의 감쇠력을 계산한다. 감쇠력을 계산하는 절차를 Fig. 8에 도시하였다.

5. SUV의 롤 운동 해석

조향 시뮬레이션을 위해 step steer 시험과 impulse steer 시험을 수행하였다. 이 두 종류의 시험에서 또한 수동식 현가댐퍼 또는 MR 댐퍼를 장착한 차량모델에 대해서 각각 시험을 수행하였다. MR댐퍼를 장착한 차량모델에서는 스프링 상부 질량의 진동 제어에 효과적인 스카이-훅 제어와 타이어 접지력 향상에 효과적인 그라운드-훅 제어를 적용하였을 경우를 각각 구분하여 해석하였다.

5.1 Step steer 시험

Step steer 시험은 차량의 조향성능을 시간영역에서의 과도응답 특성으로 파악하기 위한 대표적인 시험이다. Fig. 9는 횡 가속도가 정상상태에서 0.4[g]가 되도록 하는 조향입력이다.

Fig. 10은 step steer에 대한 전륜의 왼쪽 댐퍼의 감쇠력을 나타내고 있다. 스카이-훅 제어를 적용했을 때의 감쇠력이 수동식 현가댐퍼보다 약 두 배 정도 크게 나타났다. 이것은 스카이-훅 제어의 경우 현가제어에 필요한 감쇠력이 그만큼 더 추가로 요

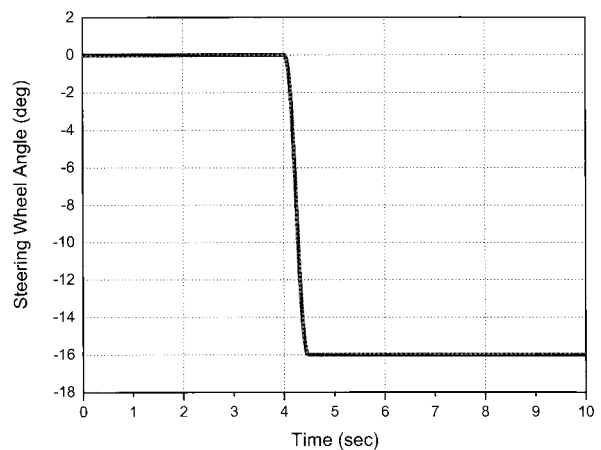


Fig. 9 Steering wheel angle for step steer test

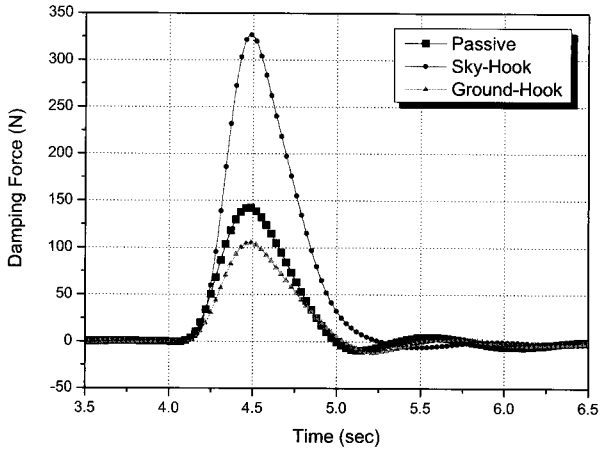


Fig. 10 Damping forces for step steer test

구된다는 것이다. Fig. 11의 롤 각에서는 크게 차이를 나타나지 않지만 Fig. 12에서는 스카이-훅 제어의 경우 롤 가속도가 제일 작게 나타난다. 따라서 MR댐퍼를 사용한 스카이-훅 제어의 효과가 크다는 것을 알 수 있다.

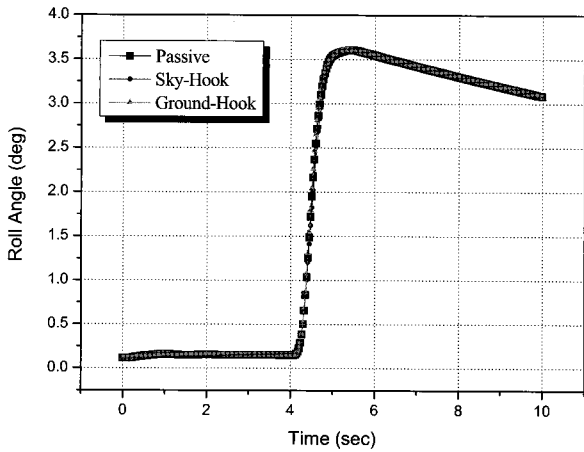


Fig. 11 Roll angles for step steer test

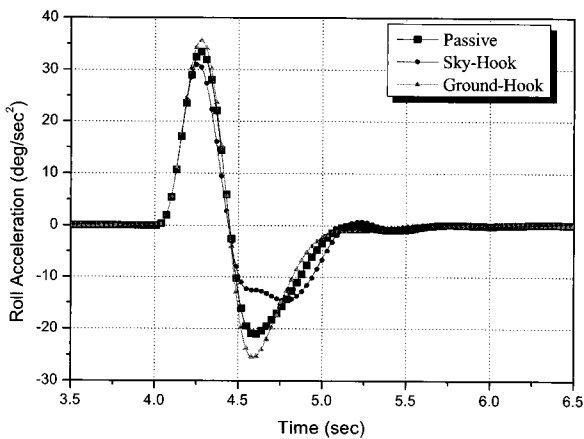


Fig. 12 Roll accelerations for step steer test

5.2 Impulse steer 시험

펄스 조향 시험은 차량의 과도상태 응답특성을 파악하고 출력 값들의 주파수 응답특성을 평가하는 방법이다.

Impulse steer 시험에서 조향 입력은 Fig. 13과 같은 조향입력을 사용하였다. Fig. 14는 impulse steer에 대한 전륜의 왼쪽 댐퍼의 감쇠력 응답을 나타내고 있다. 스카이 훅 제어를 적용했을 때 감쇠력이 수동식 현가댐퍼보다 약 세 배 정도 크게 나타났다. Fig. 15와 Fig. 16은 각각 롤 각과 롤 가속도를 보인다. 따라서 impulse steer 시험에서는 롤 각 및 롤 가속도 모두 스카이-훅 제어의 우수성을 보인다.

Fig. 17에서는 그라운드-훅 제어의 타이어 접지력이 가장 크다. 이것은 그라운드-훅 제어가 타이어의 접지력을 향상시켰기 때문이다. 따라서 접지력 향상을 위해서는 그라운드-훅 알고리즘을 병행해야 할 필요성이 있음을 알 수 있다.

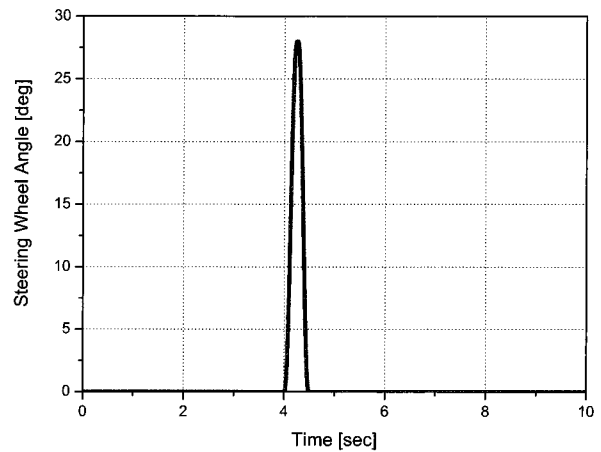


Fig. 13 Steering wheel angle for impulse steer test

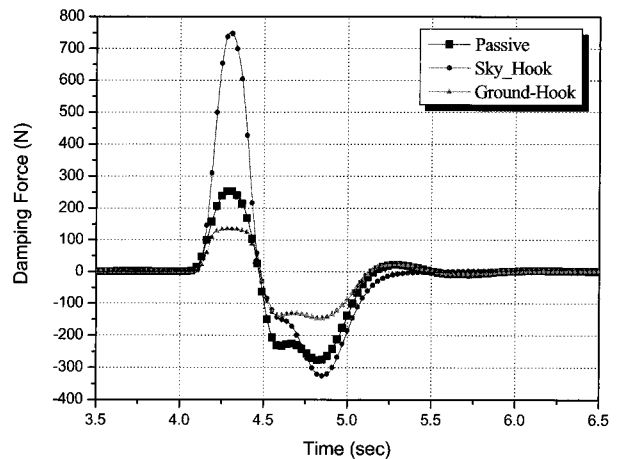


Fig. 14 Damping forces for impulse steer test

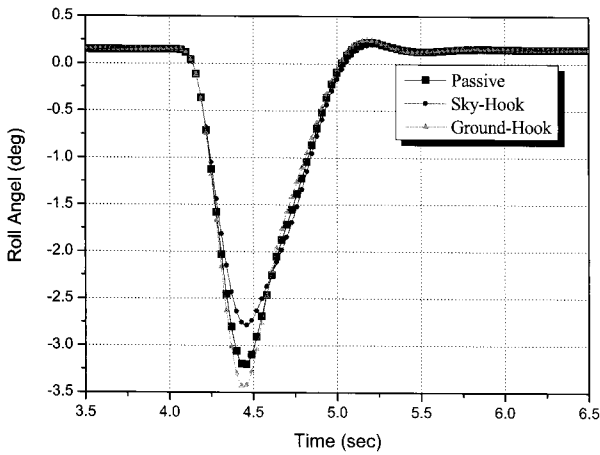


Fig. 15 Roll angles for impulse steer test

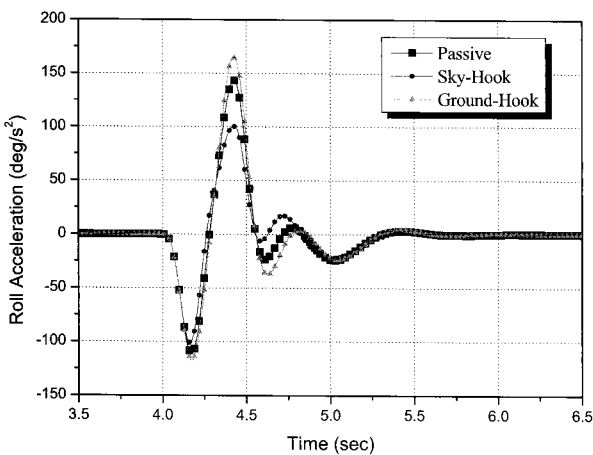


Fig. 16 Roll accelerations for impulse steer test

6. 결 론

본 연구에서는 제작된 MR댐퍼의 기본 성능시험 결과를 바탕으로 한 MR댐퍼 모델 및 반능동 제어기를 SIMULINK에서 구성하였다. 또한 고무부싱

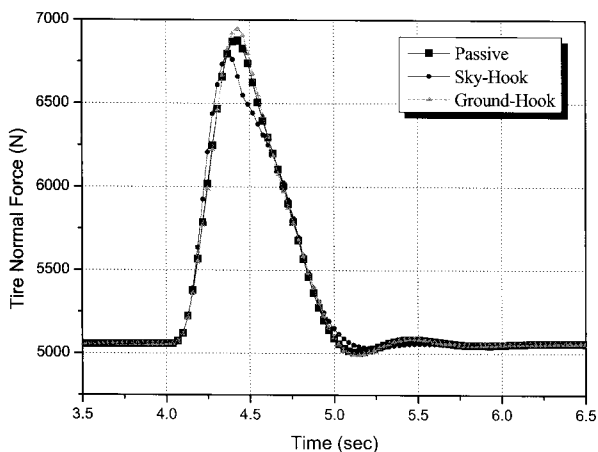


Fig. 17 Tire normal forces for impulse steer test

의 컴플라이언스를 포함하는 63자유도의 보다 상세한 SUV모형을 다물체 차량동역학 해석 프로그램인 ADAMS/Car를 이용하여 모델링하였다.

ADAMS/Control를 이용하여 SIMULINK의 MR댐퍼모델 및 반능동 제어기 모듈을 구성하고 ADAMS/Car를 사용한 전체차량 동역학모델을 연동하여 시뮬레이션하였다.

SUV의 조향으로 인한 롤 특성을 평가하기 위하여 step steer시험과 impulse steer시험에서 스카이-훅과 그라운드-훅 제어 알고리즘을 이용한 현가시스템에 대한 각각의 동역학 시뮬레이션을 수행하였다.

그 결과 두 가지 종류의 조향시험에서 모두 롤 운동에 대한 MR댐퍼를 사용한 스카이-훅 제어시스템의 효과가 크게 나타남을 알 수 있었으며, 조향에 필요한 타이어 접지력의 향상을 위해서는 그라운드-훅 제어알고리즘을 활용해야 할 필요성이 확인되었다.

참고 문헌

1. M. Raghavan, 2004, "Suspension Design for Linear Toe Curves: A Case Study in Mechanism Synthesis", Journal of Mechanical Design, Vol. 126, pp. 278~282.
2. D. Karnopp, M. J. Crosby and R. A. Harwood, 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", J. of Engineering for Industry. Transactions of ASME, pp. 619~626.
3. H. S. Lee, S. B. Choi and S. K. Lee, 2000, "Vibration Control of a Passenger Vehicle Featuring MR Suspension Units", Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 41~48.
4. G. J. Choi, K. H. Noh, Y. M. Yoo and H. Kim, 2001, "A Strategy to Evaluate Semi-Active Suspension System using Real-Time Hardware-in-the-Loop Simulation", Transactions of the KSAE, Vol. 9, No. 6, pp. 186~194.
5. M. R. Jolly, J. W. Bender and J. D. Carlson, 2000, "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids", Journal of Intelligent Material System and

- Structures, Vol. 10, No. 1, pp. 5~13.
6. M. Valasek, M. Novak, Z. Sika and O. Vaculin, 1997, "Extended Ground-Hook -New Concept of Semi-active Control of Truck's Suspension", Vehicle System Dynamics, Vol. 27, pp. 289~303.
 7. S. H. Woo and J. Ryu, 1999, "A New Double Sky-hook Algorithm for Improving Road-holding Property in Semi-active Suspension Systems", Transactions of KSAE, Vol. 21, No. 1, pp. 192~200.
 8. L. J. Duchnowski and S. A. Hann, 1989, "Modeling and Analysis of an Automobile Semi-Active Suspension", Advanced Automotive Technologies, Vol. 13, pp. 321~334.
 9. K. Sorge and H. Wilhelm, 2001, "Integration of a Damper Control Algorithm into an ADAMS/Car Full Vehicle Model", 16th European Mechanical Dynamics User Conference.
 10. D. Danesin et al., 2001, "Vehicle Dynamics with Real Time Damper Systems", 16th European Mechanical Dynamics User Conference.
 11. Mathworks, 2003, SIMULINK Users manual.
 12. MSC software, 2003, ADAMS Users manual.