

실차 시험을 통한 ER 현가장치의 성능평가

이현균* · 최승복** · 장유진*** · 한승직*** · 이성범***
(1999년 3월 3일 접수)

Performance Evaluation of ER Suspensions Under Field Test

Hun-Kuen Lee, Seung-Bok Choi, EU-Gen Chang, Seung-Jik Han and Sung-Bum Lee

Key Words : Electro-Rheological Fluid(전기유동 유체), ER Suspension(ER 현가장치), Semi-Active Suspension(반능동형 현가장치), Skyhook Control(스카이훅 제어), Field Test(실차시험)

Abstract

This paper presents performance characteristics of a semi-active suspension featuring continuously variable ER (electro-rheological) dampers. These are evaluated through the field test of a passenger car. Four ER dampers (two for front and two for rear part) are manufactured and their field-dependent damping properties are experimentally investigated. The damping force responses to step input fields are also identified by employing small size of high voltage amplifiers which are made adaptable to the field test. A skyhook controller considering the vertical, pitch and roll motions is formulated and incorporated with a car to be tested. The field test is then undertaken in order to evaluate both comfortability and steering stability showing bump, dive and squat responses.

1. 서 론

초기의 자동차에 관한 연구는 주행과 조향, 정지 등 차량의 기본 기능에 대한 것이 주를 이루었다. 그러나 최근에는 산업의 발달과 생활 수준의 향상에 따라 운전자 측면에서의 승차감 향상 및 조종안정성 향상을 추구하는데 연구의 초점이 맞추어지고 있으며, 자동차의 승차감과 조종안정성에 큰 역할을 담당하는 현가장치에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 스프링과 댐퍼로 구성된 수동형 현가장치는 구조가 단순하고 가격이 저렴하며 신뢰도가 높아 널리 사용되고 있으나, 스프링과 댐퍼의 특성이 단일하여 승차감과 안전성이라는 두 상충되는 요소를 동시에 충족하지 못하고, 상호 보완하는 차원에서 설계가 이루어지므로, 제한된 영역에서만 성능을 나타내게 된다.⁽¹⁾ 따라서,

이러한 수동형 현가장치의 제한된 성능을 획기적으로 개선하기 위하여 능동형 현가장치가 대두되었다.⁽²⁾ 외부의 에너지원과 힘을 전달하는 구동부로 구성된 능동 현가장치는 적용되는 제어 알고리즘에 따라 현가장치의 변위를 능동적으로 변화시키는 것으로 연속적인 제어 수행이 가능하며, 차량의 승차감과 안정성, 자세 제어 등에 우수한 성능을 구현할 수 있다. 그러나 부가 장치가 많아 구조가 복잡하고, 에너지의 소비가 크며, 성능향상에 비해 고가라는 단점을 가지고 있다. 한편, 1974년 Karnopp 등⁽³⁾이 스카이훅(skyhook) 제어이론을 바탕으로 반능동 현가장치에 대한 개념을 정립하여 능동 현가장치와 유사한 성능을 갖는 현가장치로서의 가능성을 보인 이후, 반능동 현가장치의 개발이 활발히 이루어져왔으며, 최근 들어 다양한 제어이론을 적용한 제어기의 설계와 실용화에 대한 연구가 진행중이다. 이런 연구의 일환으로 빠른 응답특성과 전기장 부하에 따라 연속적인 제어특성을 갖는 ER 유체를 적용한 반능동 현가장치에 대한 연구가 급속히 진행되고 있다.

Petek⁽⁴⁾은 기존의 상용댐퍼와 같은 수준의 댐핑력을 발생시키는 단일 튜브형 ER 댐퍼를 제작하

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : soangback@dragon.inha.ac.kr

TEL : (032)860-7319 FAX : (032)868-1716

*** 현대자동차 승용제품개발 2 연구소

여 그 성능을 고찰하였고, Gordaninejad 등⁽⁵⁾은 다단 원관형 전극을 갖는 ER 댐퍼를 구성하여 그 성능 실험을 수행하였으며, Hagele 등⁽⁶⁾은 피스톤에 다단 원관형 전극을 구성한 ER 댐퍼를 제작하여 실험을 수행하였다. 또한, Nakano⁽⁷⁾는 ER 댐퍼를 이용한 1/4 차량 모델의 현가장치를 구성하고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 제안된 제어알고리즘에 따른 ER 현가장치의 진동절연성능을 고찰하였다. 한편, Petek 등⁽⁸⁾은 실제 차량의 전·후륜 모두 ER 현가장치를 장착하고 차체의 피치, 히브, 롤운동이 고려된 스카이hook 제어알고리즘을 구성하고, 현가장치의 성능향상을 고찰하여 반능동형 현가장치의 실용 가능성을 보인바 있다. 국내에서도 전기장 부하에 따라 댐핑력을 연속적으로 가변할 수 있는 ER 댐퍼를 제작하여 기초적인 성능시험을 수행한 바 있으며,⁽⁹⁾ HILS (hardware-in-the-loop simulation)를 이용한 ER 현가장치의 제어성능고찰에 관한 연구가 수행되었다.⁽¹⁰⁾

이상에서 살펴본 바와 같이 ER 댐퍼에 대한 지금까지의 연구는 대부분 단품 혹은 1/4 차량에 장착되어 수행되었으며, 실차 시험을 통한 ER 현가장치에 대한 각종 성능시험 연구는 국내외적으로 매우 드문 실정이다. 특히 이에 대한 국내연구는 아직 보고된바 없으며, 따라서 본 연구를 통하여 새로운 형태의 반능동형 현가장치의 성능 평가를 수행하고, 실용화를 위한 유용한 자료를 확보하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서 수행한 연구내용을 요약하면 다음과 같다. 우선 ER 유체의 방형 특성과 연계하여 실차 적용이 가능한 4개의 ER 댐퍼를 설계·제작하였으며, 전기장에 따른 각 ER 댐퍼의 댐핑력 특성을 실험적으로 고찰하였다. 그리고 제어로직의 구현에 필수적인 ER 댐퍼의 응답 속도를 평가하였으며, 실차시험을 위한 각종 센서를 차량에 장착한 후 스카이hook 제어알고리즘을 설계·구현하였다. 제안된 ER 현가 시스템의 성능 평가는 범프가진과 스퀴트(squat) 시험을 통하여 수행 되었으며, 그 결과로 수직가속도, 피치 각가속도 및 롤 각속도 등의 제어응답이 제시되었다.

2. ER 댐퍼의 설계 및 제작

제안된 ER 댐퍼의 구조를 Fig. 1에 도시하였다. ER 댐퍼는 크게 외측 실린더, 외측 전극, 내측 전극 그리고 피스톤으로 구분되며, 내·외측 전극 사이에는 ER 유체의 유동을 위하여 원형의 덕트(duct)가 구성되었다. 또한, 외측 전극에는 고전압의 (+)전원이 연결되어 있고 내측 전극에는 (-)전원이 연결되어 ER 유체에 전기장을 인가하는 두

전극 관으로써 작동하게 되며, 외측 전극은 절연 물질로 싸여져 외측 실린더로 고전압이 흐르는 것을 방지한다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부챔버, 아래쪽을 하부챔버로 정의하였고, 이 두 챔버에 ER 유체가 완전히 채워지게 된다. 노면의 변화에 의해 차륜과 차체 사이에 상대적인 변위 차가 발생하게 되면, 피스톤 로드와 피스톤은 상하 운동을 하게되어 한쪽 챔버의 유체가 내측실린더에 구성된 오리피스와 내·외측 실린더 사이에 구성된 원형 덕트를 지나 다른 쪽 챔버로 유동된다. 하부 챔버는 크게 두 부분으로 나뉘어 한쪽은 댐퍼 내부에, 다른 한쪽은 댐퍼 외부에 구성되었으며 이 두 부분사이의 유체유동을 위한 유압관이 연결되었다. 댐퍼 외부의 하부챔버는 다이어프램을 경계로 하는 가스챔버 부와 유체챔버 부로 구성하였다. 피스톤 로드가 하향 운동시 삽입된 피스톤 로드만큼의 부피 차가 생겨 유체가 유동을 할 수 없으므로, 가스챔버는 이때 발생하는 부피 차를 보상하며, 또한 급격한 피스톤 로드의 운동으로 인하여 하부챔버에 전해지는 급격한 압력변화를 흡수하고 이때 발생하는 기포 등의 영향을 방지하는 역할과 열팽창에 따른 유체 부피를 수용 하는 어큐뮬레이터(accumulator)로 작동하게 된다.

고전압이 내측 전극과 외측 전극에 인가되면 내·외측 전극사이에서 구성된 원형 덕트에 전기장이 형성되고, 덕트사이를 유동하던 ER 유체는 순간적으로 뉴토니안 유동에서 빙햄 플라스틱 유동으로 전환하게 된다. 즉 전기장이 인가됨에 따라 원형 덕트 사이의 ER 유체의 항복 전단응력이 증가하게 되어 유체 유동저항을 증가시킨다. 이것은 피스톤 상·하부 챔버의 압력차를 증가시키며, 이로 인하여 피스톤의 상하 운동에 저항하는 방향의 댐핑력이 발생하게 된다. 결과적으로, ER 댐퍼는 전기장 무부하시 속도에 따른 유체점성으로 인한 댐핑력만을 발생시키게 되나 전기장 인가시에는

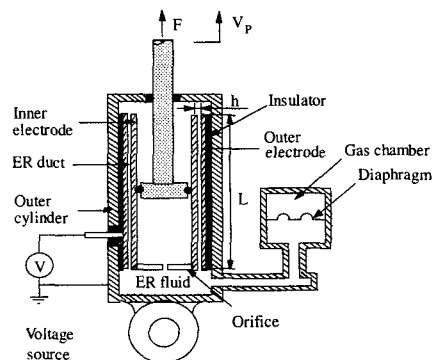


Fig. 1 Configuration of the ER damper

ER 유체의 항복 전단응력으로 인한 댐핑력이 더 해지므로 보다 큰 댐핑력을 발생시키게 된다. 따라서 기존의 수동형 댐퍼와 다르게 피스톤 속도에만 의존적이지 않고, 전기장에 따라 연속적으로 제어 되는 댐핑력을 발생시킬 수 있다.

ER 댐퍼의 모델링을 위한 가정으로 ER 유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 하부챔버의 내·외부 챔버를 이어주는 유압관은 길이가 짧고 직경이 크므로 이로 인한 유체저항은 무시하였다. ER 댐퍼의 지배방정식은 본드그래프 방법으로부터 다음과 같이 구해진다.⁽⁹⁾

$$\dot{q} = -A_r V_p \quad (1)$$

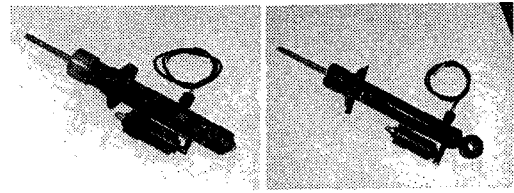
$$F = -\frac{A_r}{C_g} q + (A_p - A_r)^2 R_f V_p + (A_p - A_r) P_{ER} \quad (2)$$

여기서 q 는 하부챔버의 부피, A_r 은 피스톤 로드 의 단면적, V_p 는 피스톤 속도, F 는 ER 댐퍼의 댐핑력, A_p 는 피스톤 단면적, $R_f (= R_e + R_o)$ 는 ER 유체의 유체점성 R_e 와 오리피스에서 발생하는 유체저항 R_o 의 합이며, P_{ER} 은 ER 효과에 의한 댐퍼내부의 압력강화로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) = 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta \quad (3)$$

여기서, L 은 ER 댐퍼의 전극길이이고 h 는 ER 댐퍼의 전극간격이다. $\tau_y(E)$ 는 인가 전기장에 의한 유체의 항복전단응력으로 전기장에 대해 지수함수적으로 증가하는 것으로 알려져 있다. 여기서 α 와 β 는 입자의 종류, 중량비, 수분 함유량, 용매의 종류 및 유체의 온도 등 조성 조건 및 사용 조건에 따라 달라지는 ER 유체의 고유 값이다. 본 연구에서 사용한 ER 유체는 상용 ER 유체로 상온에서 인가 전기장에 대하여 $58.74E^{1.952}$ Pa의 항복응력을 갖는다.

제한된 모델을 근거로 하여 승용차량의 제원을 갖는 ER 댐퍼를 설계 제작하였다. Fig. 2는 제작된 전·후륜 ER 댐퍼의 사진으로, 외측 실린더는 차량 장착을 위하여 상용 댐퍼의 외형치수와 동일하게 설계하였으며, 설계된 ER 댐퍼의 행정거리(stroke)는 전륜부 ± 125.5mm, 후륜부 ± 199mm로 하였고, 외경은 전·후륜 모두 45mm로 하였다. 내부 전극의 길이는 상용 댐퍼의 내부 실린더와 동일한 길이로 하였고, 실제 장착시에 차량내부에 간섭되지 않는 범위에서 ER 댐퍼의 효과를 극대화하기



(a) front part (b) rear part

Fig. 2 Photograph of ER dampers

위하여 외부 전극의 길이를 최대화하여 전륜부 214.5mm, 후륜부 267mm로 설계하였으며, 전극간격은 유체의 유동과 고전압 부하의 용이성을 고려하여 0.75mm로 설계하였다. 또한, 내경은 30.1mm로 상용 댐퍼의 피스톤 헤드의 크기에 맞추었으며, 전극의 재질은 스테인레스 강을 사용하였다. 또한 장시간 사용할 때 가스챔버 안의 가스가 유체 쪽으로 유입되는 것을 방지하기 위해 가스챔버를 댐퍼 외부에 구성하였으며, 가스챔버 내에 다이어프램을 장착하여 가스와 유체의 접촉을 차단하였다. 한편, 가스챔버가 댐퍼 바깥쪽으로 구성되어 내부에 구성된 경우 보다 행정거리와 전극의 길이를 길게 설계할 수 있고, 더 큰 댐핑력을 얻을 수 있게 된다. 또한 실제 차량의 장착을 감안하여 전륜부와 후륜부 모두 상용차와 동일한 스프링 지그 및 고정 지지대를 사용하였으며, 상용 댐퍼와 유사한 무게를 갖도록 하였다.

3. ER 댐퍼의 성능시험

전기장 변화에 따른 ER 댐퍼의 댐핑력 변화를 고찰하고자 실험장치를 구성하였다. 서보밸브를 사용한 유압시스템으로 댐퍼를 가진하여 댐퍼내에 유동을 발생시키며, 이때 가진입력은 LVDT에 의하여 측정되고 댐핑력은 상부에 구성된 로드셀에 의해 얻어진다. 컴퓨터의 계산에 의하여 결정된 전기장의 크기는 D/A 변환기에 의하여 전기적 신호로 바뀐 뒤 1000 배 DC 전압 증폭기를 거쳐 ER 댐퍼에 전기장을 공급하게 된다. 자세한 내용은 참고문헌⁽¹⁰⁾에 잘 기술되어 있어 생략한다.

실험조건으로 가스챔버의 가스압은 피스톤로드가 최대 신장된 상태에서 주입된 압력으로 정하였고 실험에 사용된 가스압은 20bar이다. 성능시험 수행시 댐퍼내 ER 유체의 온도는 25~30℃범위 내에 있도록 하였다. 그리고 ER 댐퍼가 리바운드(인장) 운동을 할 때의 댐핑력을 (+)값으로, 반대 방향인 자운스(압축) 운동일 때의 댐핑력을 (-)값으로 표시하였다.

Fig. 3은 ER 댐퍼의 피스톤 속도에 따른 댐핑

력 곡선으로 가진 변위는 $\pm 22\text{mm}$ 이다. Fig. 3(a)는 전륜 ER 댐퍼의 실험 결과로 전기장 무부하시 리바운드 운동의 피스톤 속도 0.083m/s 에서 226N 의 댐핑력을 발생시켰으며, 0.414m/s 에서 1225N 의 댐핑력을 발생시켰다. 그러나, 전기장 3kV/mm 인가시 ER 유체의 전단항복응력에 의해 피스톤 속도 0.083m/s 에서 댐핑력은 712N 으로 495N 증가하였고, 0.414m/s 에서는 1629N 으로 404N 증가하였다. Fig. 3(b)는 후륜 ER 댐퍼의 피스톤 속도에 따른 댐핑력 곡선으로, 전기장 무부하시 피스톤 속도 0.083m/s 에서 172N 의 댐핑력이 발생되었으며, 0.414m/s 에서 688N 의 댐핑력이 발생되었다. 또한, 전기장 3kV/mm 인가시 0.083m/s 에서 댐핑력은 241N 으로 70N 만큼 증가하고 0.414m/s 에서는 923N 으로 235N 만큼 증가하였다. 두 결과 모두, 낮은 피스톤 속도에서뿐 아니라 높은 피스톤 속도에서도 전기장의 증가에 따라 댐핑력이 증가함을 확인할 수 있으며, ER 댐퍼가 피스톤 속도에 관계없이 전기장의 제어만으로도 넓은 제어영역을 가짐을 알 수 있다.

ER 댐퍼가 차량의 제어에 적합한 응답속도를 가짐을 입증하기 위해 응답특성실험을 수행하였다. 후륜 ER 댐퍼에 계단파 (step wave) 형태의 전기장을 공급하고, 이에 상응하는 ER 효과에 의한 댐핑력의 증가를 측정하여 Fig. 4 에 도시하였다. 실험 조건으로 가지는 1.4Hz 의 삼각파로 하여 피스톤 로드의 속도를 일정하게 하였으며, 3kV/mm 의 전

기장을 인가하고, 상온에서 수행하였다. Fig. 4(a)는 전기장을 0.1 초간 인가한 경우로 부하전기장에 따라 댐핑력의 증가가 뚜렷이 발생한다. Fig. 4(b)는 0.025 초 동안의 더욱 짧은 전기장을 인가하였을 경우로 Fig. 4 (a)와 같이 부하전기장에 따라 댐핑력의 증가가 뚜렷하여 상용 ER 유체를 사용한 ER 댐퍼가 인가전기장에 대해 빠른 응답특성을 가짐을 확인할 수 있으며, 차체의 공진 주파수인 $1\text{-}2\text{Hz}$ 는 물론 차륜의 공진 주파수인 $10\text{-}20\text{Hz}$ 까지 도 제어가 가능함을 제시한다.

ER 유체를 적용한 응용장치의 제어에 사용되는 상용 고전압 장치는 무게와 부피가 크고 고가이다. 그러므로, 실제 차량에 장착하기 위하여 그 부피와 무게가 작고 저렴한 단가의 고전압 장치를 개발할 필요성이 있다. Fig. 5 는 자체 제작한 고전압 장치로 국내 차량에 장착된 배터리로 구동 될 수 있도록 12V DC 의 정격 입력 전압에 작동되며 크기가 약 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 60\text{mm}$ 이며, 무게 0.6kg 으로 소형이다. Fig. 6 은 일반적으로 우수하다고 알려진 미국 Trek 사의 고전압 장치와 자체 제작한 고전압 장치의 전기장 공급시 응답특성을 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 미국 Trek 사에서 제작한 매우 크고 무거운 고전압 장치의 응답특성이며, Fig. 6(b)는 자체 제작한 소형 고전압 장치의 응답 특성이 다. 이때의 응답시간은 정상상태의 63.2% 에 해당되는 시상수(time constant)로 정의하였다. Trek 사 고전압 장치의 경우 전기장 공급시 응답시간은

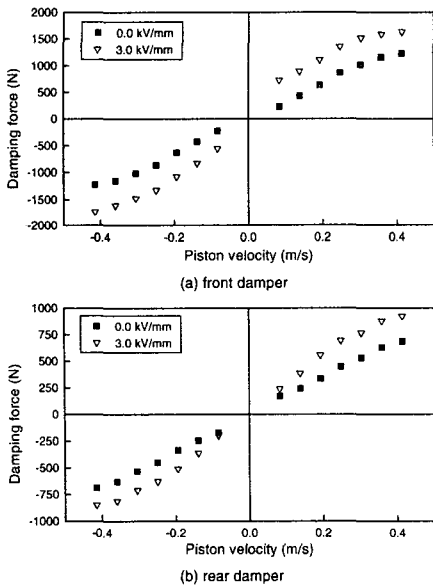


Fig. 3 Damping force vs. piston velocity of ER dampers

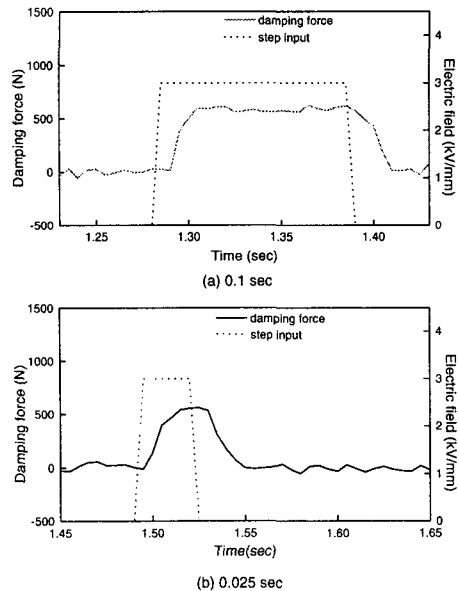


Fig. 4 ER damper response to step electric field (rear part)



Fig. 5 Photograph of the manufactured high voltage amplifier

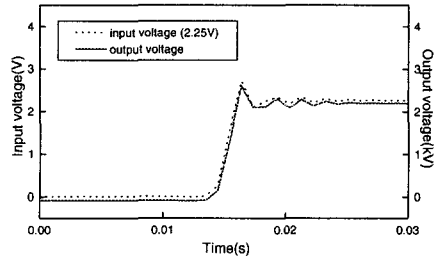
1.6ms 인 반면 자체 제작한 고전압 장치의 응답시간은 이보다 약간 느린 2.1ms 를 나타내고 있다. 그러나, 자체 제작한 고전압 장치가 상용 고전압 장치와 큰 차이 없이 매우 빠른 전기장 공급시의 응답특성을 보이고 있으며, 이러한 빠르기는 실차 시험을 위해 충분하다. 동일한 방법으로 실험한 전기장 제거시의 경우 Trek 사의 고전압장치의 응답시간은 1.9ms 이며 자체 제작한 고전압 장치의 응답시간은 2.8ms 이다. 이로부터 제작된 고전압 장치의 응답시간은 각종 차량의 중요 모드를 제어 하는데 충분한 빠르기를 제공한다. Fig. 6 을 위한 실험에 사용한 고전압장치는 아날로그 신호 방식 이지만 실차 시험에 사용하는 고전압장치는 ECU 에 의해 제어되어야 하므로 PWM 방식으로 개조 하여 사용하였다.

4. 실차시험 및 성능평가

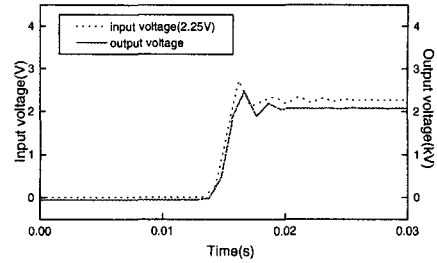
4.1 차량 준비

실차 시험을 위해 ER 현가시스템과 각종 센서를 장착한 차량의 구성도를 Fig. 7 에 도시하였다. 차량의 제어를 위하여 각각의 현가장치에 ER 댐퍼를 장착하였다. 시험 중에 측정된 신호는 조수석에 장착된 포터블 컴퓨터 내부의 DSP 보드를 통해 입력되며, 제어 알고리즘이 장착된 컴퓨터에서 순간순간 차량의 거동을 분석하여 성능 향상을 위한 요구 댐핑력을 계산하고, 이에 해당되는 제어 신호는 DSP 보드를 통해 트렁크에 장착되어진 고전압 증폭 장치를 거쳐 ER 댐퍼로 제어 전기장을 인가한다. 그리고, 데이터를 수집하는데 필요한 센서의 종류와 센서 장착부위의 결정은 제어로직과 연계하여 결정하였다.

본 연구에서는 ER 현가장치의 제어를 위하여 독립 스카이훅 제어를 사용하였다. 이 알고리즘은 차체 위의 공간상에 절대고정변위를 갖는 천정과 차체 사이에 가상의 댐퍼를 설치하고 이때 발생하는 가상 댐퍼의 댐핑력을 요구 댐핑력으로 사용하

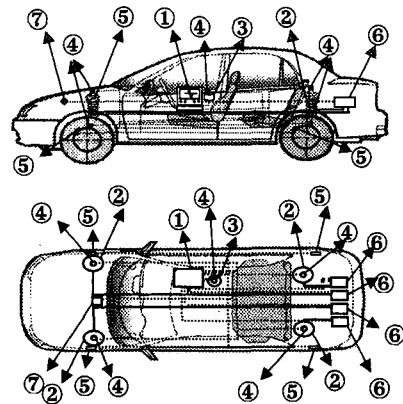


(a) Trek



(b) Inhouse-made

Fig. 6 Response time of high voltage amplifiers at voltage on



- ① Controller ⑤ ABS sensor
- ② ER damper ⑥ High Voltage Amp.
- ③ Gyroscope ⑦ TPS Sensor
- ④ Accelerometer

Fig. 7 Experimental configuration of a vehicle with ER suspension system

는 것으로, 구조가 간단하고, 실현이 용이하다. 스카이훅 알고리즘의 요구 댐핑력은 승차감과 관련된 차체의 수직변위와 피치 각, 롤 각을 고려하여 다음과 같이 정의하였다.⁽¹⁰⁾

$$u_i = \begin{bmatrix} C_1(\dot{z}_g - a\dot{\theta} + c\dot{\phi}) \\ C_2(\dot{z}_g - a\dot{\theta} - d\dot{\phi}) \\ C_3(\dot{z}_g + b\dot{\theta} + c\dot{\phi}) \\ C_4(\dot{z}_g + b\dot{\theta} - d\dot{\phi}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

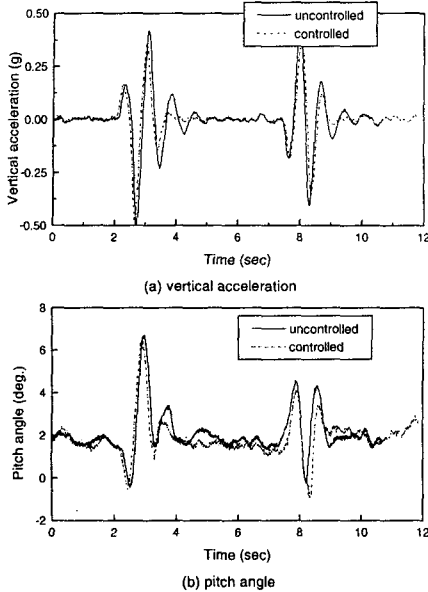


Fig. 8 Bump responses (40km/h)

여기서 \dot{z}_g 은 차체의 무게중심의 수직속도를 나타내고, $\dot{\theta}$ 은 피치각의 각속도, $\dot{\phi}$ 은 롤각을 나타낸다. C_1, C_2, C_3, C_4 는 스카이훅 알고리즘의 제어 게인값을 나타내며, 본 연구에서는 C_1, C_2, C_3, C_4 모두 8000 을 사용하였다. 독립 스카이훅 알고리즘 제어를 수행 하기 위해 필요한 상태 변수는 차체의 수직 속도와, 차체와 차륜의 수직 상대 속도로서, ER 현가장치가 부착된 차체 부분과 차륜에 가속도 센서를 장착하여 차체와 차륜의 가속도를 측정하며, 가속도 센서로부터 측정된 신호를 적분기에 거쳐 차체의 수직 속도와 차륜의 수직 속도를 얻는다. 또한 자이로스코프를 조수석 뒷부분에 설치하여 차량의 피치, 롤 및 요잉 양을 측정하고, 조수석 뒷 부분에 설치된 가속도 센서로부터 수직 가속도를 측정하여 차량의 성능 평가를 위한 신호로 사용하였다. 또한 ABS 센서로부터 차량의 속도를, 브레이크 등 스위치로부터 브레이크의 작동 여부를 알아내며, TPS 센서로부터 차량의 가속 정보를 측정한다.

4.2 승차감 시험

실제 차량의 승차감 성능을 파악하기 위하여 범프와 사인파 도로 주행에 대한 동적응답 특성을

측정하였다. Fig. 8 은 범프 형상의 노면을 40km/h 로 주행하였을때 차량의 거동을 도시한 것이다. ‘uncontrolled’로 표현된 것은 제어를 수행하지 않은 경우의 곡선으로, 차량의 조정안정성 확보를 위하여 ER 현가장치의 전기장 무부하시 댐핑력이

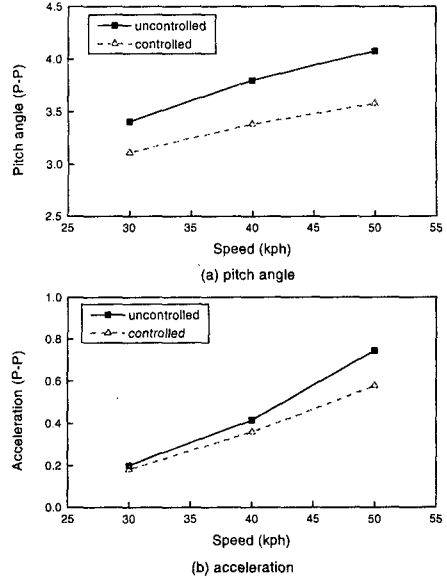


Fig. 9 Pitch motion characteristics under sinusoidal road test with respect to the vehicle speed

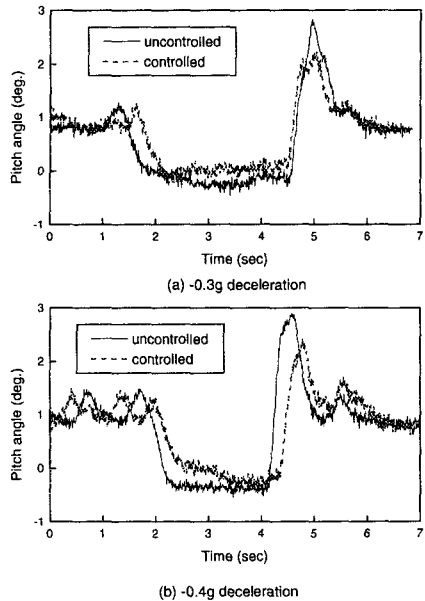


Fig. 10 Pitch angular displacement under dive test

기존의 수동형 댐퍼의 댐핑력과 근사하도록 설계 되었으므로 수동형 현가장치를 장착한 차량과 유사한 특성을 나타낸다. ‘controlled’로 표현된 것은

본 연구에서 제안된 독립 스카이훅 제어기를 사용하여 차량의 진동 제어를 수행한 것이다. Fig. 8(a)는 차량의 수직 가속도, Fig. 8(b)는 차량의 피치각 변위를 나타낸다. 두 경우 모두 제어를 수행함으로써 차량의 수직가속도와 피치각의 변위가 감소하며, 범프의 통과 후 차량의 여진이 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 정현파형의 노면 주행시 차량의 속도에 대한 피치각변위의 최대변화값과 수직가속도의 최대변화값을 도시한 것으로, 제어를 수행함으로써 차량의 수직가속도와, 자세의 변화가 감소하는 것을 알 수 있다. 이로부터 반능동형 ER 현가장치를 장착한 차량에 제어를 수행함으로써 승차감을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

4.3 조정안정성 시험

조정안정성을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 차량의 피치 방향 특성과 롤 방향의 특성 시험을 수행하여 차체의 자세변화를 측정하였다. 차량의 피치특성을 평가하기 위하여 급제동시(dive)와 급가속시(squat)의 피치특성을 측정하였다. 이때 측정하는 신호는 차속과 피치각 변위, 피치 각속도, 그리고 수평 가속도 등이다. 급제동시의 성능 평가를 위하여 30km/h의 속도로

달리는 차량을 급제동하여 정지하고, 이로부터 발생하는 피치각변위를 평가하였다. Fig. 10(a)는 차량의 가속도를 $-0.3g$ 로 하였을 때의 피치각변위의 변화로 제어 수행시, 그렇지 않은 경우에 비해 피치 각변위가 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10(b)는 동일한 실험을 가속도가 $-0.4g$ 가 되도록 수행한 결과로, Fig. 10(a)와 같이 제어를 수행함으로써 피치각변위가 감소되는 것을 확인할 수 있다.

급가속시 피치각변위의 특성변화를 평가하기 위하여 아이들(idle) 주행 중에 급가속하고, 이로부터 발생하는 피치 각변위가 제어를 수행함에 따라 향상되는 것을 확인하였으며, $0.4g$ 로 급가속하였을 때의 결과를 Fig. 11에 도시하였다. 제어를 수행한 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 피치각변위가 감소하여 자세의 변화가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 실험을 여러 가속도에 대하여 수행하고 그 결과를 Fig. 12에 도시하였다. Fig. 12(a)는 차량의 가속정도에 대한 피치각변위의 피크(peak)값으로 제어를 수행한 경우 수행하지 않은 경우에 비해 훨씬 낮은 값을 보이고 있다. Fig. 12(b)는 가속도에 대한 피치각속도의 피크값을 도시한 그림으로 Fig. 12(a)와 동일한 경향을 나타내어, 제어를 수행함으로써 차량의 자세 변화가 감소되어 조정안정성이 향상됨을 확인할 수 있다.

차량의 롤특성을 알아보기 위해, 60km/h로 주행하고, 정현파형으로 스티어링 하였을 때의 롤특성을 파악하였다. 이때, 측면 가속도가 $0.3g$ 정도가

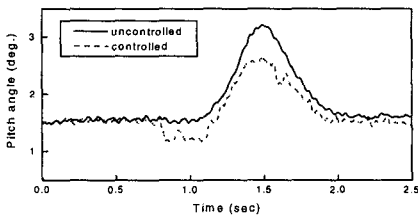


Fig. 11 Pitch angular displacement under squat test

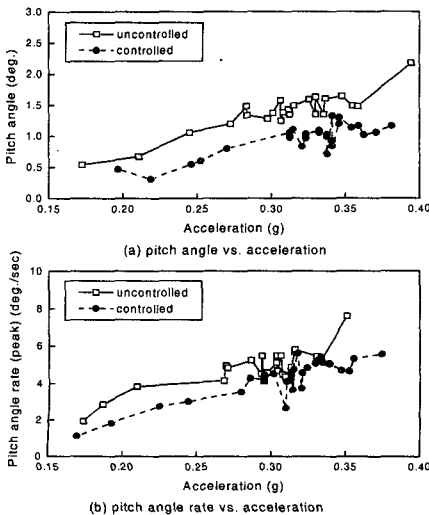


Fig. 12 Pitch motion characteristics under squat test

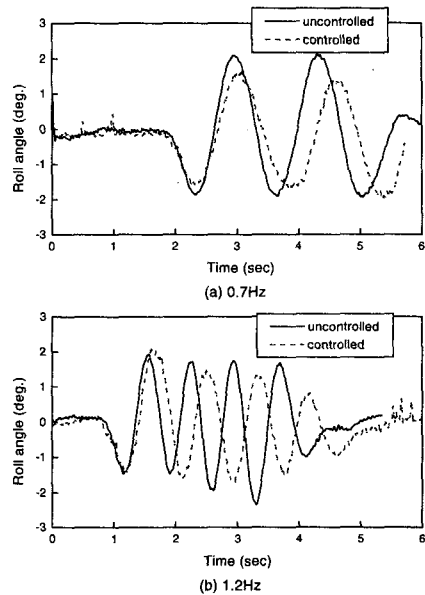


Fig. 13 Roll angular displacement under sinusoidal steer test

나오도록 스티어링 각도를 조절하였고, 스티어링의 주파수를 변경하면서 시험하였다. 이때 측정하는 데이터는 롤각변위와 롤각속도, 그리고 수평가속도와 스티어링 각도이다. Fig. 13은 정현파형으로 스티어링하였을때의 롤각변위를 도시한 그림이다. Fig. 13(a)는 0.7Hz로 스티어링한 경우의 롤각변위 변화를 나타낸 것으로 제어를 수행함으로써 롤방향의 각변위가 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 13(b)는 1.2Hz로 스티어링하였을때의 경우로, Fig. 13(a)와 같은 경향을 보인다. 두 경우 모두 제어를 수행함으로써 차체의 자세가 안정되어 조정안정성이 향상됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 ER 현가장치를 장착한 승용차량의 실차시험을 통하여 승차감과 조정안정성에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위하여 전륜 및 후륜용 ER 댐퍼 4개를 설계·제작하였으며, 전기장에 따른 댐핑력을 고찰하였다. 또한 전기장에 대한 ER 댐퍼의 응답속도를 파악하였으며, 실차 적용을 위한 고전압 증폭기를 자체 제작하였다. 제안된 ER 댐퍼를 차량에 장착하고 스카이록 제어 알고리즘의 구현을 위한 각종 센서를 차량에 부착하였다. 범프가진 시험에 따른 승차감평가와 급가속시험, 급제동시험, 스티어링 시험들을 통한 조정안정성 평가를 수행하였다. 시험결과 제안된 ER 현가장치의 우수한 제어 특성을 입증하였다. 향후, 성공적인 실용화를 위하여 여러 제어알고리즘을 통한 다양한 성능 평가 및 내구성 시험 등이 계속 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) J. Y. Wong, 1993, Theory of Ground Vehicles, Jhon Wiley & Sons. inc.
- (2) 이경수, 1996, "자동차 현가 시스템의 능동제어," 대한기계학회지, 제 36 권 제 7 호, pp. 679~704.
- (3) D. Karnopp, M. J. Corsby and R. A. Harwood, 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generator," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, No. 2, pp. 619~626.
- (4) N. K. Petek, 1992, "An Electronically Controlled Shock Absorber as an Application of Electro-rheological Fluid," *SAE Technical Paper Series*, No. 920275.
- (5) F. Gordaninejad, A. Ray, and H. Wang, 1997, "Control of Forced Vibration Using Multi-Electrode Electro-Rheological Fluid Dampers," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 119, pp. 527~531.
- (6) K. H. Hagele, K. Engesdorf, M. Mettner, M. Panther, Q. N. Tran and E. Rubel, 1990, "Continuously Adjustable Shock Absorbers for Rapid-Acting Ride Control Systems(RCS)," *SAE Technical Paper Series*, No. 905125.
- (7) M. Nakano, 1995, "A Novel Semi-Active Control of Automotive Suspension Using an Electrorheological Shock Absorber," *Proceeding of the 5th International Conference on ER Fluid, MR Suspension and Associated Technology, Sheffield, United Kingdom*, pp. 645~653.
- (8) N. K. Petek, D. J. Romstadt, M. B. Lizell and Weyenberg, 1995, "Demonstration of an Automotive Semu-Active Suspension Using electro-rheological Fluid," *SAE Technical Paper, Series*, No. 950586.
- (9) 정원식, 최승복, 정재천, 김철수, 이윤희, 한승직, 1996, "ERF의 항복응력에 따른 댐퍼 성능고찰," 한국자동차공학회 춘계학술회의 논문집, pp. 294~299.
- (10) 안창섭, 최영태, 최승복, 1998, "HILS를 통한 ER 현가장치의 성능평가," 대한기계학회논문집 (A), 제 22 권, 제 11 호, pp. 2061~2071.