

차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술

**Design and Control of ER Components
for Vehicle Applications**

인하대학교 기계공학과
지능구조물 및 시스템 국가 지정 연구실

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술에 관한 연구” 과제의 보고서로 제출합니다.

2003. 09. 10

주관연구기관명 : 인하대학교

주관연구책임자 : 최 승 복



연 구 원 : 최 형 진

연 구 원 : 김 재 환

보고서 초록

과제관리번호	M1-0104-00-0013	해당단계 연구기간	2001.07.11 ~ 2003.07.10	단계 구분	1단계 / 2단계
연구사업명	중 사업명	국가지정연구실 사업			
	세부사업명	-			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술			
연구책임자	최 승 복	해당단계 참여연구원수	총 : 22 명 내부 : 22 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 554,100 천원 기업: 천원 계: 554,100 천원
연구기관명 및 소속부서명	인 하 대 학 교		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	254
<p>- ER 유체 조성 및 시험 : 입자분산 수용액의 산도를 8.5 정도로 조절하여 전기장에 대한 반응속도를 4.8msec로 빠르게 하였으며, 전기장 5kV/mm에서 1.6kPa을 얻었다.</p> <p>- ER 유체의 히스테리시스 규명 : 세계 최초로 전기장의 세기 변화에 따른 PMA계 ER 유체의 전단응력 히스테리시스 거동을 측정하였으며, 이로부터 프라이작 모델을 이용한 ER 유체 자체의 히스테리시스 모델을 구축하였다.</p> <p>- ER 응용장치의 히스테리시스 모델 : 세계 최초로 ER 응용장치(속 업소버) Hydraulic 모델을 개발하여 속도가 낮은 전향복(pre-yield)영역에서 나타나는 ER 응용장치의 전기장 부하에 따른 히스테리시스 거동을 표현하였다.</p> <p>- 무차원화된 일반화 설계모델 개발 : 기존의 해석위주가 아닌 실질적으로 ER 응용장치의 설계를 위하여 무차원화된 일반화 모델을 개발하였다. 이는 ER 응용장치의 제어성능도 고려할 수 있는 독창적인 연구결과이다.</p> <p>- 불확실성을 고려한 강건제어기 개발 : 차량의 질량변화나 작동온도에 따른 댐핑력의 변화가 고려된 강건 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였으며, 이는 해당 외란의 존재 시에도 우수한 제진 성능과 안정성을 보장한다.</p> <p>- 입력포화상태를 고려한 제어기 개발 : 고전압장치의 과도한 입력을 방지하고 ER 응용장치의 안정성을 보장하기 위해 관측기 시스템에 기반한 반와인드업 제어기법을 도입하였다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	ER 유체, 모듈설계, 서보메커니즘, 진동제어, 정밀제어			
	영 어	ER Fluid, Module Design, Servo Mechanism, Vibration Control, Precision Control			

요 약 문

I. 제 목

차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 과제 의 최종 연구목표는 지능재료 중의 하나인 ER 유체를 사용하여 경제적 파급 효과가 크고 핵심기술의 기반성이 매우 강한 차량관련 ER 응용장치의 설계 및 제어기술을 제안하고 이를 이용하여 속 업소버, 시트 댐퍼, 엔진 마운트, 대쉬 패널, ABS 등 차량용 ER 부품을 개발하는 데 있다.

이와 같이 제안된 차량용 ER 응용장치 설계 및 제어기술은 차량용 ER 응용장치를 비롯한 각종 ER 응용장치 개발에 반드시 필요한 원천 기술이며, 나아가서 신소재 개발, 최적설계 및 정밀제어 등 여러 기술 분야에 기초적이고 원리적인 차원에서 많은 파급효과를 기대할 수 있다. 따라서 관련 기술의 국제적 지위 확보와 기술 우위 선점을 위해서 본 연구의 수행이 반드시 필요하다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. ER 유체 조성기술 : 본 과제에서는 비수계 입자의 하나인 폴리아닐린 입자를 이용하여 최적의 공정을 통한 우수한 성능의 ER 유체를 개발하는 것이 목표이다. 이를 위해 1단계 연구에서는 폴리아닐린 입자제조 및 코팅 기술을 이용하여 입자의 전기전도도를 조절하고 합성 폴리아닐린 입자와 계면활성제를 이용한 ER 유체를 조성하여 항복응력, 온도범위가 1.5kPa, 10℃~100℃인 ER 유체를 개발한다.

2. ER 응용장치의 설계 및 해석 기술 : 본 과제에서는 개발하고자하는 차량용 ER 응용장치의 작동 모드를 분석하여 최적의 작동 메커니즘을 설계하는 것이 목표이다. 이를 위해 1단계 연구에서는 ER 응용장치의 작동 모드에 따른 응용장치 히스테리시스 현상을 규명하고, Preisach 모델을 이용하여 ER 유체에 대한 히스테리시스 현상을 해석하며, ER 응용장치의 특성을 나타내는 무차원 함수의 정의 및 이를 이용한 설계 모델을 구축한다.

3. 제어성능 평가기술 : 본 과제에서는 차량 동역학 및 기존 차량용 ECU와 연계된 실차용 제어시스템 구축을 목표로 하고 있다. 이를 위해 1단계 연구에서는 시스템 불확실성, 외란, 온도변화 등을 고려한 강건 제어를 설계하고 고전압 증폭기의 한계와 연계된 제어로직을 개발한다.

IV. 연구개발결과

	세부연구개발목표	달성내용
1	<ul style="list-style-type: none"> ● ER 유체 조성 ① 항복응력 : 1.5kPa이상 ② 온도범위 : 10~100℃ ③ 반응시간 : 5ms 미만 	<ul style="list-style-type: none"> ① 항복응력 : 1.8~2.2kPa ② 작동온도 : 10~100℃ ③ 반응시간 : 4.8ms <p>ER 유체의 항복응력은 온도에 따라 변화하며 본 연구에서는 아래와 같다.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 최저 항복응력 : 1.8kPa - 40℃ ▶ 최고 항복응력 : 2.2kPa - 100℃
2	● ER 유체의 히스테리시스 특성연구	ER 유체의 히스테리시스 현상 규명을 위해 Preisach 모델을 개발하고 실험결과를 통해 입증
	● ER 응용장치의 히스테리시스 모델 구축	ER 응용장치의 히스테리시스 현상을 규명하기 위해 Hydraulic 모델을 자체 개발하고 기존의 Bingham 모델 등과 비교
	● ER 응용장치의 무차원화 설계모델 구축	ER 응용장치의 효율적인 설계를 위하여 무차원화된 일반화 모델을 도출하고 ER 응용장치의 설계에 적용한 후, 무차원 모델의 유효성을 실험으로 검증
3	● 불확실성을 고려한 강건 제어기 설계	ER 응용장치가 갖는 작동기 시상수를 실험적으로 규명하고 이를 고려한 동적 모델을 구축한 후, 시상수 및 차체질량 변화 등 시스템이 갖는 불확실성을 보상하기 위한 강건제어 알고리즘을 1/4 차량을 통해 제어성능 검증
	● 전기장 입력 포화상태를 고려한 제어기 개발	강건제어 알고리즘 적용시 발생할 수 있는 제어입력포화를 방지하고 제어성능 및 안정성을 확보하기 위해 관측기 시스템에 기반한 반와인드업 제어이론을 도입하고 제어코드를 개발한 후 1/4 차량을 통해 제어 성능 검증

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 개발한 ER 유체는 비수계 ER 유체로서 기존의 수계 ER 유체(실리카겔 등)에 비하여 온도에 덜 민감하면서 저침전성을 보이고 있기 때문에 차량뿐만 아니라 항공기의 랜딩기어, 교량 댐퍼, 정밀 테이블 댐퍼 등에 활용될 수 있으며, 나아가서 초정밀 가공에도 적용될 수 있다.

한편 본 연구에서 구축한 차량용 ER 응용장치의 히스테리시스 모델과 무차원 설계모델은 ER 혹은 MR 유체를 이용하여 만들 수 있는 각종 응용장치의 설계 및 동적 해석에 효율적으로 사용될 수 있으며, 시스템 불확실성 및 외란을 고려한 제어기술 개발은 차량제어 뿐만 아니라 인공위성 제어, 로봇제어 등 여러 분야의 제어시스템에 적용할 수 있는 매우 중요한 기반 기술이다. 2단계 완료 후의 활동 계획으로는 ER 유체 생산과 이를 응용한 응용제어 메커니즘 분야로 벤처기업을 설립할 예정이고, 또한 관련 분야 업체에 중요 핵심 기술을 이전하여 세계 최고 수준의 ER 유체 기술을 상용화 할 수 있는 획기적인 전기를 마련할 계획이다.

S U M M A R Y

The successful realization of ER fluid technology requires three important ingredients to be developed; advanced ER fluid, accurate modeling and effective control scheme. In this research work, these three important ingredients have been developed for automotive applications. A new type of water-free ER fluid consisting polyaniline particles and silicone oils was developed by adjusting the dielectric property as well as pH level. The ER fluid exhibits the yield shear stress of $1.6kPa$ at $5kV/mm$ which is enough to employ for various dampers for vehicle systems. In addition, the ER fluid shows a response time of $4.8msec$ which is beyond control bandwidth of most dynamic components in passenger and commercial vehicles. The present research is highlighted by identifying the field-dependent hysteresis behaviors of the polymethylaniline particles based ER fluid. The hysteresis behavior was observed in the shear mode and an appropriate Preisach model was constructed on the basis of experimentally-obtained FOD(first order descending) curves. It has been demonstrated that the Preisach model newly constructed in this work can capture the field-dependent yield stress with favorable accuracy.

In the synthesis modeling of ER devices, the prediction of the field-dependent damping hysteresis at low moving velocity is as important as the prediction of the field-dependent damping force. In this work, a novel type of a hydraulic model is developed in order to predict the field-dependent damping hysteresis of ER devices. In this model, the fluid inertia is treated as an important identification parameter. The developed model has been verified by comparing the predicted results with the measured results. In addition, in order to provide a general design model for ER devices, a nondimensional design model has been developed in this work. The nondimensional model consists of the Bingham number, nondimensional damping force, dynamic range and nondimensional geometric parameter. After showing the effectiveness of the proposed design scheme through a comparative work between predictions and measured values of the nondimensional damping force, sequential steps for the ER damper design are developed. In addition, its design methodology has been tested by manufacturing an appropriate damper for the passenger car and evaluating the imposed damping characteristics.

The completeness of the ER technology is achieved by integrating a proper control scheme. Unlike conventional servomotor control, there are many uncertain parameters in ER devices such as temperature variation of the ER fluid. This leads to the development of robust control scheme. In this work, a sliding mode controller was designed in order to take account for the

variation of the response time of the ER damper as well as the variation of the operating temperature of the ER fluid. A quarter car model was adopted and tested under both bump and sinusoidal road conditions. It has been demonstrated that the proposed sliding mode controller offers robust and high control performance in the presence of the imposed uncertainties. In addition, a controller considering the input saturation has been developed. An anti-windup controller was formulated by integrating the observer system and tested by adopting a quarter car suspension system.

The results presented in this research report are quite self-explanatory justifying that the controllable ER devices based on advanced ER fluid and accurate dynamic model offer higher performance of various vehicle systems than conventional techniques.

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction -----	11
Section 1. Project Summary -----	11
Section 2. Motivation and Importance-----	14
Section 3. Research Scope and Goal -----	16
Section 4. Development Strategy and System-----	18
Chapter 2. State-of-the Art-----	19
Section 1 Previous Researches-----	19
Section 2 Impending Problems-----	19
Section 3 Future Trend -----	19
Chapter 3. Research Results and Discussions-----	27
Section 1. Development of ER Fluids -----	27
1. Definition of ER Fluid and Theoretical Background-----	27
2. Fabrication of ER Fluids-----	32
Section 2. Modeling and Analysis of ER Devices-----	58
1. Hysteresis Model for ER Fluids -----	58
2. Hysteresis Model for ER Applications Devices -----	63
3. Non-Dimensional Model for ER Shock Absorber Design -----	69
4. ER Seat Damper -----	75
5. ER ABS-----	79
6. ER Engine Mount-----	91
Section 3. Robust Control for ER Devices-----	145
1. Vibration Control of 1/4 Car with System Parameter Uncertainties-----	145
2. Robust Control System with Input Saturation -----	155
Section 4. Development of ER Device Design Program-----	177
1. Program Layout-----	177
2. ER Shock Absorber(ER Seat Damper) Design Module-----	179
3. ER Engine Mount Design Module -----	180
4. ER ABS Design Module-----	181

Chapter 4. Goal Achievement and Contribution -----	195
Section 1. Plan vs Achievement-----	195
Section 2. Primary Research Achievements-----	197
Section 3. Secondary Research Achievements-----	200
Section 4. Contribution to Related Technology -----	201
 Chapter 5. Applications of Research Results -----	 205
Section 1. Research Goal-----	205
Section 2. The Present Status of Research Achievements-----	205
Section 3. Research Results -----	211
Section 4. Technology Transfer and Application of Research Results-----	211
Section 5 Expected Impact-----	212
 Chapter 6. Recent Research Materials-----	 213
Section 1. Workshop Materials -----	213
Section 2. Special Journal Issue for ER/MR Devices for Vehicle Applications -----	223
Section 3. Conference Materials -----	225
 Chapter 7. References-----	 233

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요-----	11
제1절 연구개발의 개요-----	11
제2절 연구개발의 필요성-----	14
제3절 연구개발의 목표 및 내용-----	16
제4절 연구개발의 추진전략 및 체계-----	18
제 2 장 국내외 기술개발 현황 -----	19
제1절 지금까지의 연구개발 실적 -----	19
제2절 현 기술상태의 취약성 -----	19
제3절 앞으로의 전망-----	19
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 -----	27
제1절 ER 유체 조성기술 -----	27
1. ER 유체의 정의 및 이론적 배경-----	27
2. ER 유체의 제조-----	32
제2절 ER 응용장치의 설계 및 해석기술 -----	58
1. ER 유체의 히스테리시스 규명 -----	58
2. ER 응용장치의 히스테리시스 모델 -----	63
3. ER 속 업소버 설계를 위한 무차원 모델 -----	69
4. ER 시트 댐퍼-----	75
5. ER ABS-----	79
6. ER 엔진 마운트-----	91
제3절 강건 제어기 설계기술-----	145
1. 시스템 불확실성을 고려한 1/4 차량의 진동제어 -----	145
2. 입력포화를 고려한 강건제어 시스템 -----	155
제4절 차량용 ER 응용장치 설계프로그램 개발-----	177
1. 프로그램 Layout -----	177
2. ER 속업소버(ER 시트댐퍼) 설계 Module-----	179
3. ER 엔진마운트 설계 Module-----	180
4. ER ABS 설계 Module -----	181

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도-----	195
제1절 계획대비 달성도 -----	195
제2절 대표적 성공사례 -----	197
제3절 기타 계획하지 않은 연구성과 -----	200
제4절 관련분야에의 기여도 -----	201
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 -----	205
제1절 연구목표 및 내용-----	205
제2절 연구수행결과 현황 -----	205
제3절 연구성과-----	211
제4절 기술이전 및 연구결과 활용계획-----	211
제5절 기대효과-----	212
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 -----	213
제1절 국외 전문가 초청 지능형 워크숍-----	213
제2절 차량용 ER/MR 응용장치 특집 논문(International Journal of Vehicle Design)-	223
제3절 국제 학술회의 자료-----	225
제 7 장 참고문헌-----	233

제 1 장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발의 개요

연구 최종목표 및 주요 핵심기술

최종 목표 : 차량용 ER 부품 개발

핵심 기술 : (1) 성능이 우수한 ER 유체의 조성 및 특성 분석 기술
(2) ER 응용장치 메커니즘의 설계, 해석 및 제작 기술
(3) 차량운동 및 ECU와 연계한 ER 응용장치의 실시간 제어기술

지능재료 중의 하나인 ER(electro-rheological) 유체는 비전도성의 용매와 강한 전도성의 입자로 구성되며, 전기장 강도에 따라 강성과 댐핑 성질이 빠르게 변화되는 특징을 갖고 있다. 이는 Fig. 1-1-1에서 보는 바와 같이 전기장 무부하 시 랜덤구조를 갖고 있던 입자가 전기장 부하 시 극전하 현상에 의해 체인형태의 구조로 변하기 때문이다. 이러한 ER 유체의 고유특성을 이용하여 각종 동적 시스템에 제어 성능을 부여할 수 있으며, 기존에 사용되고 있는 복잡한 서보 메커니즘 이동장치를 손쉽게 대체할 수 있어 설계의 단순화를 꾀할 수 있다. 나아가서, ER 유체의 빠른 반응속도에 힘입어 시스템 제어 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 특징과 장점으로 인하여, 자동차 산업을 비롯한, 항공 산업, 제조 산업, 방위 산업 등 여러 산업 분야에서 ER 응용장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 여러 응용분야 중 경제적 파급효과가 매우 크며, 핵심기술의 기반성이 매우 강한 차량관련 ER 응용장치의 설계 및 제어기술을 제안하고자 한다. ER 유체를 이용하여 구성할 수 있는 차량 응용장치는 매우 많으며, 그 중 ER 유체의 고유특성으로 볼 때 실용성과 성능 면에서 가장 적합한 장치로는 Fig. 1-1-2에서 보는 바와 같이 속 업소버, 엔진 마운트, ABS, 시트 댐퍼, 그리고 엔진 룸과 실내 전방 사이에 있는 대쉬 패널 등을 들 수 있다. 이들 차량용 ER 응용장치의 성공적 개발을 위해서 공통적으로 필요한 기술은 첫째, 성능이 우수한 ER 유체의 조성 기술이며, 둘째, 응용장치 메커니즘의 설계 및 제작 기술이고, 세 번째는 차량운동 및 ECU(전자제어장치)와 연계한 ER 응용장치의 실시간 제어기술이다. 성능이 우수한 ER 유체 조성에 있어서는 현재 문제가 되고 있는 고온에서의 항복응력 저하 문제를 비수계 고분자 합성과 전도성 재료의 코팅 기법을 통하여 해결할 예정이며, 액체와 고체 입자간 질량 밀도의 최적 조합을 통하여 침전 현상을 최소화시킬 예정이다. 차량용 ER 응용장치 설계 및 해석에 있어서는 실험인자에 근거한 다구찌 방법을 통하여 최적 설계 기법을 연구할 예정이며, 무차원 해석 모델의 구축을 통하여 각종 ER 응용장치에 적용할 수 있는 일반화 설계 모델을 개발할 예정이다. 그리고,

조립과 수리가 용이한 어셈블리 모듈 설계기법 등을 개발하여 성공적인 실용화를 꾀할 예정이다. 차량 운동과 연계된 제어 기술 확보에서는 현재 문제가 되고 있는 전기장에 따른 히스테리시스 현상을 정확히 규명하여 정교한 동적 모델을 구축할 예정이며, ER 응용 장치의 우수한 제어 성능을 얻기 위해 기존 차량 ECU와 연계된 제어로직을 개발할 예정이다. 그리고, 빠른 반응 시간을 제공할 수 있는 소형 고전압 증폭기의 개발과 실용성과 경제성이 뛰어난 강건제어 알고리즘을 구성하여 실제 차량에 적용할 예정이다.

이들 세 분야의 핵심 기술과 내용을 성공적으로 추진하여 본 연구의 개발 목표인 진동 제어용 ER댐퍼 시스템(ER 속 업소버, ER 시트 댐퍼, ER 엔진 마운트, ER 대쉬 패널)과 차량 안정성을 위한 ER ABS의 성공적 실용화를 이룩하고, 관련 기술의 국제적 기술 우위를 확보할 예정이다.

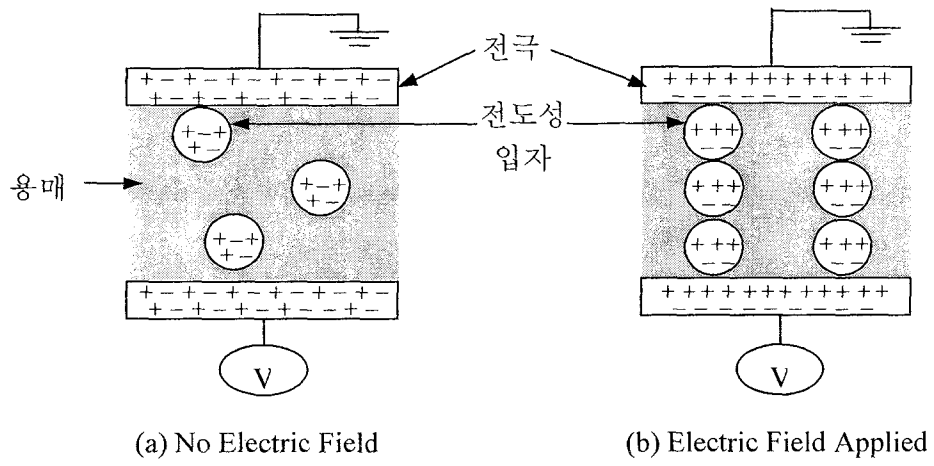


Fig. 1-1-1 Micromechanism of ER fluid

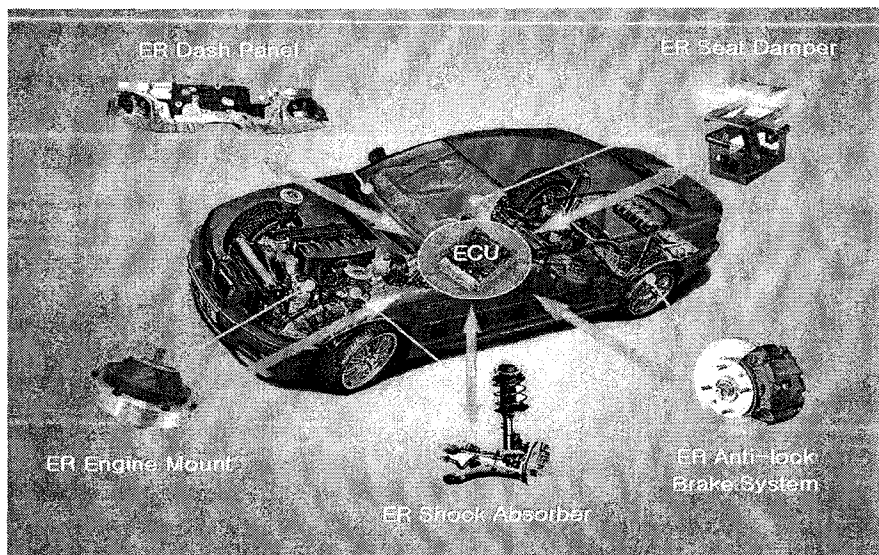


Fig. 1-1-2 ER fluid applications for vehicle system

제2절 연구개발의 필요성

주요 핵심 사항

- (1) 지능 유체 관련 모든 산업에 공통으로 적용되는 필수적인 원천 기반기술임
- (2) 새로운 차원의 차세대 기술 경쟁력 확보와 선두주자로 국가 위상제고 필요
- (3) 관련 기술의 수입대체 효과와 새로운 시장의 창출로 막대한 경제적 효과 기대
- (4) 스마트 차량을 비롯한 스마트 교량 및 건물 등의 등장으로 국민 생활 증진 효과

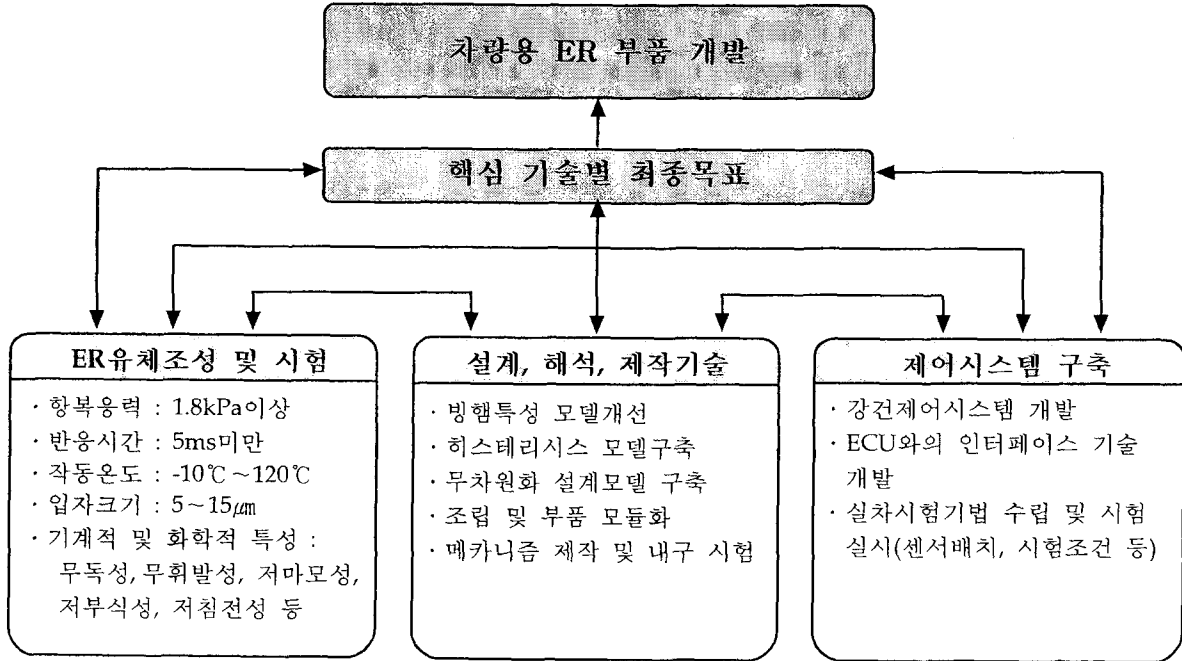
본 연구를 통하여 확보하게 될 세 가지 핵심 기술은 차량용 ER 응용장치를 비롯한 각종 ER 응용장치 개발에 반드시 필요한 원천 기술이며, 나아가서 신소재 개발, 최적설계 및 정밀제어 등 여러 기술 분야에 기초적이고 원리적인 차원에서 많은 파급효과를 기대할 수 있다. 첫 번째 핵심기술인 ER유체조성 및 분석기술은 경제성 있는 ER유체의 개발을 의미하는 것으로 고기능성 신물질 개발과 밀접한 관계를 갖는다. 또한 고분자 신소재 개발 및 가공기술분야에 해당되는 기술로 입자의 계면현상 분석기술, 입자소재 개발기술, 고분자입자의 합성 및 블랜드기술, 미립자 가공기술, 고충격 및 고내열 입자 가공기술, 입자의 코팅기술, 화학적 안정화 및 분석기술, 유연화 시험장치 설계 및 제작기술, 시험조건 및 장비의 표준화기술, 환경친화성 유체 개발기술에 핵심이 되는 기술이다. 두 번째 핵심기술인 ER유체 응용장치 설계, 해석 및 제작기술에서는 구조가 간단하면서도 빠른 응답특성과 저전력 소모로 우수한 성능을 갖는 장치개발을 목표로 하고 있으며, 이러한 기술은 기존의 제어시스템 기술과는 전혀 다른 새로운 서보 작동 메커니즘의 설계와 연계된 독창적인 기술이고, 나아가서 저전력소모 및 분포형 작동기 설계기술, 기계구조물의 동적 시스템의 해석기술, 비선형 동적 시스템의 해석기술에 핵심이 되는 기술이다. 세 번째 핵심기술인 ER 응용장치 제어기술에서는 각종 외란에 강건하고, 실용성이 뛰어난 지능형 통합 제어시스템 개발을 목표로 한다. 이 기술은 제어기술 및 신호처리 기술분야에 해당되는 원천기술로써, 시스템의 진동 및 소음 측정기술, 시스템의 방진 및 제진기술, 구조물의 흡음 및 차음기술, 비선형 동적 시스템의 안정화 기술, 제어 상태변수의 계측 및 신호처리기술, 고차 구조시스템의 제어기술, 분산 및 통합형 제어기술, 기존 ECU와의 인터페이스 기술, 고전압 장치 회로설계 기술, 제어신뢰성시험 평가기술에 핵심이 되는 기술이다. 이와 같이 제안된 차량용 ER 응용장치 설계 및 제어기술은 특정한 산업분야의 응용장치 개발을 위한 국한된 기술이라기 보다는 기초적이고 원리적인 기술로서 ER유체를 적용할 수 있는 각종 산업분야에 공통으로 적용될 수 있는 핵심기술이다.

여러 산업에 적용될 수 있는 강한 원천기반성과 중요한 핵심기술을 성공적으로 추진한다면, 새로운 차원의 차세대 기술 경쟁력 확보로 국가위상의 제고는 물론 수입기술의 대체효과와 막대한 경제적·산업적 측면에서의 이득을 가져올 수 있으며, 새로운 기술과 고급인력 배양을 통한 고용창출의 효과도 기대할 수 있다. 나아가서 어떠한 노면 조건에서

도 진동과 소음이 최적으로 제어될 수 있는 스마트 자동차의 출현과 지진이나 각종 외란에 견고히 견딜 수 있는 스마트 교량과 건물 등의 등장으로 사회적·문화적 측면에서 많은 변화와 이득을 가져올 것으로 판단된다. 이렇게 제안된 기술은 여러 분야에서 무한한 응용 잠재력을 갖고 있고 21세기 새로운 차원의 기술로서 평가되고 있으며, 따라서 관련 기술의 국제적 지위 확보와 기술 우위 선점을 위해서 본 연구의 수행이 반드시 필요하다.

제3절 연구개발의 목표 및 내용

1. 최종목표



2. 단계별 연구개발 목표

기술명	구분	연구개발목표
ER유체조성 및 분석시험	1단계	항복응력 1.5kPa이상, 반응시간 5ms미만, 작동온도 10~100℃ ER유체 개발
	2단계	항복응력 1.8kPa이상, 반응시간 5ms미만, 작동온도 -10~120℃ ER유체 개발
설계, 해석, 제작기술	1단계	히스테리시스 모델 구축 및 무차원화 설계모델 개발
	2단계	최적설계 모델 개발 및 부품의 모듈화 개발
제어 시스템 구축	1단계	온도변화 등 각종 불확실성을 고려한 강건 제어기 개발
	2단계	ECU와의 인터페이스 기술 확립 및 실차 시험 완료

3. 연차별 연구목표 및 내용

기술명	구분	연구개발목표	연구 개발내용 및 범위
ER유체조성 및 분석시험	1차년도 (2001년)	항복응력:1.3kPa이상 온도범위:10~90℃	폴리아닐린 입자제조 및 코팅기술을 이용한 입자의 전기전도도 조절
	2차년도 (2002년)	항복응력:1.5kPa이상 온도범위:10~100℃	합성 폴리아닐린 입자와 계면활성제를 이용한 무수계 ER유체조성
설계, 해석, 제작기술	1차년도 (2001년)	히스테리시스 모델 구축	작동모드에 따른 히스테리시스 현상을 구축하고 Bouc-Wen모델 및 Herschel -Bulkley모델 등을 이용한 히스테리시스 현상 해석 (단품시험 결과와 비교)
	2차년도 (2002년)	무차원화된 일반화 설계 모델개발	ER 응용장치 특성을 나타내는 무차원 함수 정의 및 이를 이용한 모델 구축
제어시스템구축	1차년도 (2001년)	불확실성을 고려한 강건 제어기 개발	시스템 불확실성, 외란, 온도변화(작동기 불확실성) 등을 고려한 강건제어기 설계
	2차년도 (2002년)	입력 포화상태를 고려한 제어기 개발	고전압 증폭기의 한계와 연계된 제어로직개발 (단품 제어시험 실시)

제4절 연구개발의 추진전략 및 체계

본 연구목표의 성공적인 달성을 위하여 Fig. 1-4-1과 같이 3명의 교수가 각각의 핵심 기술을 담당하였으며, 각 핵심기술의 책임자들은 연구조원들과 함께 월 1회씩 정기적인 사업진행 회의를 통하여 연구 내용의 진척사항, 구체적인 문제점, 연구 결과의 활용방안 등에 대하여 논의하였으며, 특히 ER 유체 조성에 따른 응용장치의 설계 및 제어성능 평가 시 핵심기술간의 피드백과 수정을 통하여 유기적인 협력 관계를 도모하였다.

한편, 관련 기술의 국제적인 동향 분석과 세계 최고 수준의 기술 도모를 위하여 ER 유체 개발과 해당 응용장치 개발 측면에서 선도적인 연구 그룹으로 인정되고 있는 미국 University of Maryland의 Smart Structures Laboratory, 홍콩 The Chinese University of Hong Kong의 Smart Materials and Structures Laboratory, 그리고 중국 University of Science and Technology of China의 ER/MR Research Laboratory 등과 연구 협약을 맺어 적극적인 연구협력을 수행하고 있다. 구체적인 성과로는 Maryland 대학의 Wereley 교수를 초청하여 워크숍을 개최하였으며 지난 2002년 1월 29일부터 2002년 2월 10일까지 박사과정 1명이 Maryland 대학의 연구실에 방문연구를 수행하였고, 그 결과로 히스테리시스 모델 해석과 구축에 대한 국제 논문 1편을 공동으로 작성하여 제출하였다. 또한 GM대우로부터 실차 시험용 중형급 승용차 1대를 기증 받았다.

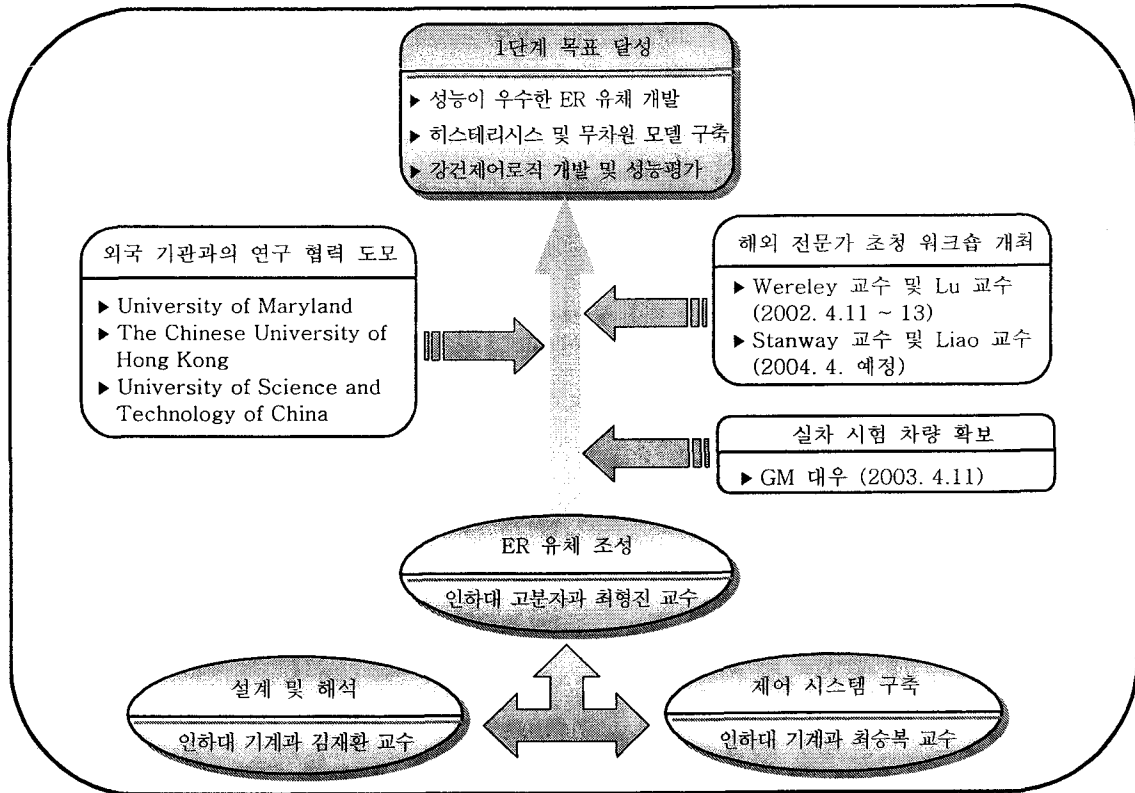


Fig. 1-4-1 Development strategy flow

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제1절 지금까지의 연구개발 실적

차량용 ER 유체 응용장치에 대한 연구개발은 지난 92년 이후 미국을 비롯한 여러 선진국에서 활발히 추진해오고 있으며, 국내에서도 95년 이후 몇몇 연구기관에서 이와 관련한 산·학 혹은 학·연 연구 프로젝트를 수행해오고 있다. 본 연구사업에서 제안하고 있는 세 가지 핵심기술과 직접 관련하여 지금까지 수행된 중요 연구내용을 대표적인 연구기관 별로 요약하면 Table 2-1-1~Table 2-1-3과 같다.

제2절 현 기술상태의 취약성

ER 유체를 이용한 각종 차량 응용장치는 설계와 성능면에서 기존 시스템과는 비교할 수 없을 정도로 매우 우수하고 독특한 장점을 갖고 있다. 미국의 GM사가 2003년 Cadillac 모델에 ER/MR 속 업소버를 장착할 예정으로 있지만, 과거 7년여 동안의 활발한 연구와 투자에도 불구하고 실용화단계에 이른 것이 영국 Advanced Fluid System사에서 개발된 트럭용 ER 시트 댐퍼 하나밖에 없다는 것은 관련기술이 해결해야 할 근본적인 취약점을 갖고 있다는 것을 단적으로 시사하고 있다. 이들 취약점을 본 연구사업에서 제안하고 있는 핵심 기술 분야별로 정리 요약하면 Table 2-2-1~Table 2-2-3 과 같다.

제3절 앞으로의 전망

최근 미국의 GE사로 인수된 Bayer ER 유체 사업본부(독일 레버쿠젠 소재)는 ER 유체 생산업체로서의 주도권을 유지하기 위하여 보다 적극적인 관심과 투자로 새로운 폴리머 계통의 ER 유체 개발에 박차를 가할 예정이며, 미국 GM사에서는 2003년 Cadillac 모델에 장착할 계획으로 ER/MR 속 업소버를 개발하고 있는 중이다. 한편 일본에서는 Nippon Shokubai, Asai Chemical, Bridgestone, Osaka 시립대학, Yamagata 대학 등 ER 관련 기술을 연구하고 있는 산·학 단체가 ER 컨소시움을 구성하여 정기적인 워크숍개최, 지식 및 정보의 공유 등 적극적이고 활발한 연구활동을 벌이고 있는 중이다.

한편, 본 연구에서 제안하는 ER 유체 관련기술은 어느 특정한 적용 대상품을 위한 것이 아니라 여러 부품 및 시스템에 공통적으로 적용이 가능한 원천기반기술이다. 따라서 ER유체기술의 적용분야는 승용차용 속 업소버에서부터 우주구조물에 이르기까지 매우 광범위하며 다양하다. 자동차 산업에서는 속 업소버, 엔진 마운트, ABS등에 적용이 가능하며 이와 관련된 국내 산업체는 약 50개 정도이다. 항공산업분야에는 스퀴즈필름 댐퍼, 헬기 블레이드, 랜딩기어 시스템 등에 적용이 가능하며 이와 관련된 국내업체는 약 5개

정도이다. 한편, 각종 제조산업 분야에서는 정밀 방진 테이블, 유압서보 시스템, 브레이크/클러치 시스템 등에 적용이 가능하며 이와 관련된 국내업체는 약 300개 정도이다. 이들 적용장치의 수요에 대한 국내 시장규모를 정확히 산출하기는 힘드나 국내외 시장규모로 보아 경제적 효과가 매우 크다는 것을 쉽게 예측할 수 있다.

성능이 우수한 ER 유체 개발을 위해 미국 GE사의 ER 유체 사업본부는 최근 폴리우레탄계 및 폴리아닐린계의 무수계 ER 유체 개발에 보다 많은 투자를 하고 있으며, Nippon Shokubai, Asai Chemical, Yamagata 대학 등이 참여하는 일본 ER 콘소시움 그룹에서는 휘발성이 없으며 내구성이 높은 무수계 ER 유체 개발을 위해 보다 적극적인 연구 협동체제를 구축해 나가고 있다. 한편, 미국 Nevada 대학 Gordaninejad 교수팀은 최근 ER 및 MR 유체를 이용한 Off-road 차량용 댐퍼를 개발하였으며, 영국 Sheffield 대학 Stanway 교수팀은 ER 응용장치의 제어성능을 향상시키기 위한 선형 제어로직을 개발하였고, China Univ. of Hong Kong의 Liao 교수팀은 중국 본토의 여러 대학 및 자동차 관련 산업체 등과 연계하여 차세대 차량 ER 부품(승용차량 및 철도차량) 개발을 위한 프로젝트를 시작하였다. 이외에 세계 각 대학에서는 성능이 우수한 ER 유체 개발 및 제어로직 연구에 보다 많은 관심과 투자를 계속하고 있는 실정이다.

한편, ER 유체와 매우 유사한 특성을 갖고 있는 MR 유체의 경우는 이를 이용한 속 업 소버를 Delphi에서 제작하여 2003년 전반기 GM Cadilac 모델에 장착되어 시판되고 있다. 이로부터 알 수 있는 것은 ER 유체와 MR 유체의 경우 단품에 대한 개발에서 시스템 적용기술로의 전환이 빠르게 이루어지고 있다는 점이다. 물론 시스템 적용 시 필요한 주요 핵심기술; 성능이 우수한 ER 유체, 일반화 설계/해석 모델, 그리고 강건 제어기법에 대한 내용이 연구되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구의 최종목표는 경제적 파급효과가 매우 크며, 핵심기술의 기반성이 매우 강한 차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어 기술을 완성하는 것이다. 이를 위하여 제 1단계에서는 세 가지 핵심기술; ER 유체 조성기술, ER 응용장치의 설계 및 해석기술, 강건 제어기 설계기술에 중점을 두었으며, 특히 단품에 대한 성능평가에 초점을 맞추었다. 이는 새로운 차원의 차세대 차량기술에 관한 국제경쟁력 확보와 막대한 경제적, 산업적 측면에서의 이득을 가져올 수 있으며 새로운 기술과 고급 인력 배양을 통한 고용창출의 효과를 기대할 수 있다. 또한, 본 연구에서 수행하고 있는 세 가지 핵심기술은 자동차 기술뿐만 아니라 항공, 토목 등 여러 산업에 응용될 수 있는 무한한 잠재력을 갖고 있다.

Table 2-1-1 The present research status of ERF fabrication and ERF characteristic analysis technologies

국가명	연구기관명	주요 연구내용 및 결과
독일	Bayer사 (※Bayer사 ER 유체 사업부를 2000년 미국 GE사가 인수)	저온용 폴리우레탄계 ER 유체개발 (TPAI 3565) 항복응력 : 1.7kPa ; 4kV/mm, 20℃, 반응시간 : 8ms 사용온도 : 10℃ ~ 60℃ 고온용 폴리우레탄계 ER 유체개발 (TPAI 3566) 항복응력 : 1.6kPa ; 4kV/mm, 80℃, 반응시간 : 15ms 사용온도 : 60℃ ~ 100℃ ※상기 두 ER유체는 1ℓ 당 약 80만원에 판매되고 있음
미국	Lord사	실리카계 ER 유체 개발 항복응력 : 1.4kPa ; 4kV/mm, 20℃, 반응시간 : 3ms 사용온도 : 10℃ ~ 80℃ ※연구용 샘플로 1ℓ 당 약 50만원에 판매되고 있음
일본	Nippon Shokubai사	Sulfonate계 ER 유체 개발 (TX-ER8) 항복응력 : 2.0kPa ; 4kV/mm, 20℃, 반응시간 : 5ms 사용온도 : 10℃ ~ 50℃ ※연구협력용 샘플로 구매 가능
영국	ER Fluids Development사	Formaldehyde계 ER 유체 개발 (Rheflex) 항복응력 : 1.5kPa ; 4kV/mm, 20℃, 반응시간 : 5ms 사용온도 : 10℃ ~ 80℃ ※연구용 샘플로 1ℓ 당 약 150만원에 판매되고 있음
한국	인하대학교 (당해연구기관)	아라빅검 및 화학전분계 ER 유체 개발(국내 특허) 항복응력 : 1.2kPa ; 4kV/mm, 20, 반응시간 : 3ms 사용온도 : 10℃ ~ 70℃ ※연구용 샘플로 1ℓ 당 약 20만원에 판매되고 있음
ER 유체개발 관련 기타 연구기관		영국 Cranfield공대, 일본 Bridgestone사, 미국Lubrizol사, 일본Asai Chemical사, 미국Michigan대학(Dr.Filisko), 러시아(Dr. Koroboko 등), 중국(Dr.Zhang 등), 한국 (KIST등)

Table 2-1-2 The present research status of ER application devices design, analysis, and manufacturing technologies for vehicle devices

국가명	연구기관명	주요 연구내용 및 결과
미국	RheoActive사	중형 승용차용 ER 속 업소버 개발 - 빙햄모델 이용 해석, - 실차 시험 1단계 완료 ※ 현재 자동차 제작회사와 계약 협의 중
영국	Advanced Fluid System사	오리피스형 트럭 ER 시트 댐퍼 개발 - 빙햄 모델 이용 해석, 유동모드 이용 해석 - 각종 특성 분석 시험 완료 ※현재 미국 시트 댐퍼 회사와 계약 완료
일본	Nissan자동차	소형 승용차용 ER 엔진 마운트 개발 - 유동모드 해석 이용, - 실차 시험 1단계 완료 ※98년 방문이후의 연구현황은 미공개로 추적하고 있지 못함
한국	인하대학교 (당해연구기관)	현대자동차와 공동으로 실린더형 ER 속 업소버 개발 - 빙햄 모델 이용 해석 - 실차 시험 1단계 완료 (각종 노면시험 및 환경시험 제외) 복합 모드형 ER 엔진 마운트 개발 중 - 빙햄 모델 이용 해석, 실험실 차원의 각종 특성시험 중 ER ABS의 이론적 모델 구축 완료
차량용 ER 응용장치 설계 및 제작 기술관련 기타 연구기관		미국 GM사, Tank Automotive Command 연구소, Maryland 및 Michigan대학, 영국 Liverpool 및 Sheffield대학, 독일 Saarland대학, 일본 Yokohama 국립대학, 한국(서강대, 만도기계, KIST 등)

Table 2-1-3 The present research status of ER application devices control technologies for vehicle devices

국가명	연구기관	주요 연구내용 및 결과
미국	RheoActive사	ER 속 업소비용 반능동 스카이훅 제어기 개발 - 기존 스카이훅 제어기와 최적제어기 결합 - 실차에 구현하여 각종 제어성능 시험 - 차량전용 고전압 증폭기 자체 개발 : 5ms의 반응속도
미국	Nevada대학	군용 차량용 ER 속 업소버 제어를 위해 스카이훅 제어기 사용 - 반능동 조건과 연계하여 제어 개인 결정 - 온도를 고려하여 제어성능 해석 - 1/4 차량 모델에 적용하여 실험실 차원의 시험 실시
영국	Sheffield대학	ER 댐퍼의 댐핑력 제어를 위한 PID 제어기 제안 - 비선형 보상을 위한 feedforward 제어기 개발 - 전기장에 의한 댐핑력 선형제어
일본	Yokohama국립대	ER 엔진 마운트 제어를 위한 신경망 제어기 제안 - 최적의 neuron 수 결정을 위한 알고리즘 개발 - 실험실 차원의 시험 실시
한국	인하대학교 (당해연구기관)	ER 속 업소버를 위한 제어 알고리즘 개발 - 스카이훅 제어 알고리즘 구축 및 실차시험 1단계 완료 - 슬라이딩 모드 제어기 설계 및 HILS 시험 1단계 완료 ER 엔진 마운트를 위한 제어 알고리즘 개발 - 스카이훅 제어기 구축 및 단품 시험 완료 - H _∞ 제어기 설계 및 HILS시험 1단계 완료 ER 시트 댐퍼를 위해 제어 알고리즘 개발 - 스카이훅 제어기 구축 및 HILS시험 1단계 완료 ※모든 제어기의 실험적 구현시 고전압 증폭기는 자체제작 : 7ms의 반응속도
차량용 ER관련 응용장치 제어기술 기타 연구기관		미국 Maryland 및 Michigan대학, 미국 Lord사, 영국 Liverpool대학, 독일 Saarland대학, 일본 오사카 시립대학, 한국(KIST, 서강대 등)

Table 2-2-1 Impending problems of ERF fabrication and ERF characteristic analysis technologies

주요기술내용	요구기술목표	현 기술상태 및 취약점
항복응력	1.8kPa이상, 4kV/mm	ER1 : 1.6 ~ 1.7kPa, ER2 : 1.4kPa, ER3 : 2.0kPa, ER4 : 1.5kPa, ER5 : 1.2kPa
반응시간	5ms 미만	ER1 : 8 ~ 15ms, ER2 : 3ms, ER3 : 5ms, ER4 : 5ms, ER5 : 3ms
작동온도	-10 °C ~ 120 °C	ER1 : 10 °C ~ 100 °C, ER2 : 10 °C ~ 80 °C, ER3 : 10 °C ~ 50 °C, ER4 : 10 °C ~ 80 °C, ER5 : 10 °C ~ 70 °C
입자크기	5 μ m ~ 15 μ m	ER1 : 10 μ m, ER2 : 15 μ m, ER3 : 보고없음, ER4 : 8 μ m, ER5 : 17 μ m
입자형상	구형	연구 수행보고가 없음
각종 기계적 및 화학적 특성	침전성 : 저	연구 수행보고가 없음
	내구성 : 고	연구 수행보고가 없음
	휘발성 : 무	ER3는 휘발성이 높기 때문에 공기와 차단하여 사용해야함
	독성 : 무	ER3과 ER4는 독성이 존재
	마모성 : 저	연구 수행보고가 없음
	부식성 : 무	연구 수행보고가 없음
종합적 기술수준 비교	독일(100), 일본(98), 영국(95), 미국(90), 한국(72)	

※상기표에서 ER1 : Bayer사 ER유체,
ER2 : Lord사 ER유체,
ER3 : Nippon Shokubai사 ER유체,
ER4 : ER Fluid Development사 ER유체,
ER5 : 인하대학교(당해연구기관) ER유체

Table 2-2-2 Impending problems of ER application devices design, analysis, and manufacturing technologies for vehicle devices

주요기술내용	요구 기술 목표	현 기술상태 및 취약점
동적 모델링 기법	빙햄특성, 작동모드특성, 히스테리시스 특성을 고려한 동적 모델	기관1~기관5 : 히스테리시스 현상을 고려한 정교한 모델은 구축하고 있지 못함. 또한 응용장치 내의 유동해석에 대한 정확한 이론 정립이 부족한 상태임
최적설계 기법	성능지수에 근거한 최적설계 변수 도출 및 무차원 해석을 통한 범용 프로그램코드 개발	기관1~기관5 : 기존장치에 근거하여 설계인자 도출, 최적설계기법에 대한 보고는 없음 *기관3에서 ER댐퍼에 대한 무차원 모델수립 및 해석 기법 연구 중
프로그램 코드	설계 및 해석을 위한 전용 및 범용 프로그램 코드 개발	기관1~기관5 : 특정한 장치와 조건하에서 사용 가능한 자체 프로그램 코드 개발
전극재질 선택	ER유체의 화학적 성분과 연계된 최적의 전극 재질 선택	기관1~기관4 : 연구 수행 보고 없음 기관5 : 전극 재질에 따른 ER 속 업소버의 댐핑력 특성고찰
기계적 내구성	100만 cycle이상의 시험조건 수립 및 성능 시험	기관1 및 기관5 : ER 속 업소버를 실험실 차원에서 100만 cycle시험
고무와 실재질의 선택	ER유체의 화학적 성분과 연계된 최적의 재질 선정	연구 수행 보고가 없음
조립 및 부품의 모듈화	제작, 분해, 수리를 위한 각 구성 품의 모듈화 구성	연구 수행 보고가 없음
종합적 기술수준 비교	영국(100), 미국(92), 일본(90), 한국(80)	

※상기표에서 기관1 : 미국 RheoActive사,
 기관2 : 영국 Advanced Fluid System사,
 기관3 : 영국 Sheffield대학,
 기관4 : 일본 Nissan자동차,
 기관5 : 인하대학교(당해연구기관)

Table 2-2-3 Impending problems of ER application devices control technologies for vehicle devices

주요기술내용	요구기술목표	현 기술상태 및 취약점
제어기 설계	각종 시스템 불확실성, 히스테리시스현상, 온도변화에 따른 항복응력변화 등을 고려한 강건제어 알고리즘 구축 필요	기관3: 비선형성을 고려한 제어기 설계 기관5: 시스템 불확실성을 고려한 제어기 설계 ※ 온도변화에 따른 항복응력 변화, 즉 작동기 불확실성을 고려한 연구보고는 없음. 또한 최대 전압 설정에 따른 제어성능 저하에 대한 이론적 해석모델이 부재
제어기의 실험적 구현	응용장치의 단품성능제어, 1/4차량제어성능, HILS를 통한 제어성능, 실차시험을 통한 각종 시험이 수행되어야 함	기관1~기관5 : 1/4차량시험 완료 기관1 및 기관5 : 실차시험(bump 및 random 노면에 대한 독립현가 제어성능 도출) 1단계 완료 ※ 제어성능의 내구성 및 여러 환경조건 변화에 따른 제어성능 고찰에 대한 연구보고는 없음
ECU와의 인터페이스 기술	기존 ECU와 각종 센서를 연계한 ER응용장치의 제어시스템 구축 필요	연구 수행 보고가 없음
고전압 증폭기	크기 : 10cm×10cm×5cm 출력 : 6kV, 10mA 반응시간 : 5ms미만	기관1 : 5kV, 5ms반응속도의 증폭기 자체개발 기관5 : 5kV, 7ms반응속도의 증폭기 자체개발
고전압 차단회로	고전압 공급으로 인한 DSP 보드 및 컴퓨터 회로 보호장치 구성	연구 수행 보고가 없음
종합적 기술수준 비교	미국(100), 영국(92), 일본(90), 한국(85)	

※상기표에서 기관1 : 미국 RheoActive사,
기관2 : 미국 Lord사,
기관3 : 영국 Sheffield대학,
기관4 : Yokohama국립대,
기관5 : 인하대학교(당해 연구기관)

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 ER 유체 조성기술

1. ER 유체의 정의 및 이론적 배경

가. 전기유변 현상

전기유변 현상은 1956년 Winslow에 처음으로 비수계 실리카 현탁액에 전기장 인가시 소량의 물 첨가로 현탁액의 고체화 현상을 발견하였다[1]. 그것은 전기장 인가시 분산된 입자들이 전기장 방향으로 체인 구조 또는 섬유구조를 형성함에 의하여 구현된다. 즉 ER 유체는 전기장의 유무에 따라 점도, 항복응력 그리고 점탄성과 같은 유변학적 거동이 급격하게 변화하는 유체를 말한다. 초기 ER 유체는 앞에서 말한 바와 같은 소량의 물을 첨가하는 수계 ER 유체가 대부분이었다. 그러나 수분으로 인한 제한적인 구동온도, 낮은 열안정성 등의 문제점이 대두되었다. 위의 단점을 극복하기 위해 수분을 넣지 않은 비수계 ER 유체가 대두되기 시작하였으며, 그 중 반전도성 고분자 입자의 ER 유체가 높은 구동력, 열안정성, 분산 안정성 등의 장점으로 인해 가장 집중적으로 연구되고 있다. Fig. 3-1-1은 ER 유체의 전기장 인가 시와 비인가 시에 따른 내부구조 변화를 보여주는 그림이다.

나. 이론적 배경

간단한 전기유변 현상의 메커니즘으로, 전기장내에서 입자들의 분극으로 인한 체인구조 형성을 들 수 있다[2]. 체인구조 현상은 입자들의 유전상수 ϵ_p 와 현탁 매질의 유전상수 ϵ_m 과 차이가 있을 경우 발생한다. 보통 $\epsilon_r = \epsilon_p / \epsilon_s > 1$ 이다. 만약 대전된 성분이 입자의 표면에 흡착되거나, 입자주변에 분극가능한 전기적 이중층이 있을 경우 입자의 유효 분극도는 더 커진다[3].

(1) 섬유 구조화(Fibrillation) Model

Fibril 구조화 모델은 ER 현탁액에서 전기장 인가 시 관측된 fibril 체인모양에 기초를 둔다. 전기장 하에서 입자들은 전기장의 방향으로 분극되고, 쌍극자의 전기장 배열과 함께 입자 자체도 전기장 방향으로 배향되며, 입자간의 상호작용이 현저히 증가되어 전기유변 현상을 야기한다. 비균일 분극 및 이온 흡착에 의해 입자는 전체적으로 대전되어, 전기이동에 의해 입자 재정렬을 위한 운동이 가능해진다. 입자 분극이 강조되어질 경우, 이 모델은 primary 분극 모델이라고도 할 수 있다.

(2) 전기적 이중층(Electric Double Layer-EDL) Model

전기적 이중층 모델은 초기에 전기유변 현상에서 수분의 작용과, 밀리초의 단위의 응답시간을 설명하기 위해 나왔다[4]. Klass 는 섬유화 모델은 ER 응답시간에 비해 다소 느려 ER을 설명하기에 부적절 하다고 제안했다. 소량의 수분 첨가시 각각의 입자들은 전기적 이중층에 둘러 쌓이게 된다. 전기적 이중층은 분극되고, 회전하여 옆의 비틀어진 이중층과 겹쳐져서 강한 정전기적 반발력을 일으켜, 전기유변 현상을 야기한다. 전하 운반체가 입자사이를 이동할 경우 전기유변 현상은 약해지는 반면, 입자내부의 영역만을 이동할 경우 전기유변 효과는 강해진다. 하지만 이러한 전기적 이중층 모델은 전기적 이중층의 겹침으로 인한 유변학적 물성의 증가를 설명하기에는 부적절하다.

(3) 물/계면활성제 가교 Model

수분 가교 메커니즘은 Stangroom에 의해 다음과 같은 필요성에 기초를 둔다.[5]: (a) 액상 미디움은 반드시 친수성이어야 하며; (b) 고체 입자들은 반드시 친수성이거나, 일정량의 수분을 흡수하고 유지할 수 있는 다공성 물질이어야 한다; (c) 입자 표면에 흡착된 수분의 양이 전기유변 효과를 결정한다. 전기장 하에서 입자에 흡착된 수분 속의 이온이 빠져나와 다른 입자로 이동한다. 그러므로 입자사이에 접착성의 수분 가교가 일어난다. 이러한 수분 가교는 물의 높은 표면 장력으로 인해 매우 강하다. Kim은 계면활성제 가교 모델을 발견하였고[6], See는 입자 주변에 정전기 에너지를 분포를 고려한 약간 변형된 모델을 제시하였다[7].

(4) 전도도 Model

분극 모델의 많은 제약으로 인해 여러 변형된 모델이 제시되었다. 직류전압이나 낮은 주파수의 교류전기장 인가시 입자와 미디움 간의 유전상수 차이보다는 전도도 차이가 좀더 클 것이라 생각된다[8,9]. 일반화된 분극 모델은 여러 면에서 결점이 나타난다; negative ER 효과 등을 설명할 수 없다. Atten과 Foluc는 전기유변 현상의 원인을 입자와 미디움 간의 전도도 차이, σ_p/σ_m 로 간주하였다[10,11]; 만약 $\sigma_p < \sigma_m$ 일 경우 negative 전기유변 현상이 가능하다. 이 모델은 Tang과 Wu에 의해 집중적으로 연구되었다[12,13]. 전도도 모델은 전장 인가시의 미세 구조의 변화와 상관없이 오직 섬유구조가 완전히 형성된 이후에만 적용이 가능하다. 즉, 전기유변 현상의 동적인 면은 설명할 수 없다. 전도도 모델 및 분극 모델의 가장 큰 단점은 둘 다 정지상에서만 해석이 가능하며 동적인 현상은 고려할 수 없다. Khusid 전도도 효과에 의해 유도된 입자 응집 현상과 입자 표면분극에 의한 전도도 효과의 동적인 측면을 제시하였다[14]. 비록 실제 실험 값과의 불일치가 있어도, 전도도 모델이나 분극 모델 보다 훨씬 더 정교하고, 가장 잘 맞는 이론이다. 실제 실험과의 불일치의 이유는 입자 및 미디움이 본성 분극 분산을 가지지 않은 것으로 가정

되었고, 전기장의 변화가 분극율에 비해 매우 낮다고 가정되었기 때문이다. 이제껏 여러 가지 전기유변 현상의 모델이 제시되었지만, 어떤 것도 현재의 전기유변 현상을 완벽히 설명할 수는 없다. 그것들은 여전히 여러 제한요소를 가지고 있다: 입자의 물리적 특성 및 전기장 세기, 온도, 주파수 등에 따른 항복응력 등을 예측할 수 없다.

(5) 분극 Model

전기적 이중층 모델 및 수분, 계면활성제 가교 모델은 비수계 ER 유체에 적용시 그 물리적 기반을 잃는다. 섬유구조화 모델은 다시 주목을 받기 시작했고 체인 구조내 입자들의 정전기적 분극력을 정량화하기 위한 많은 시도가 행해졌다. 여러 변형된 분극모델에 기초한 여러 결과들의 개관을 통해 새로운 분극모델이 Parthasarathy와 Klingenberg에 의해 제시되었다[15]. 이 모델의 목적은 입자 및 미디움의 유전상수들과 입자 부피분율, 전기장 세기 같은 물질 상수들과 유변학적 특성과 섬유구조 같은 미세구조 특성들을 연관시키는데 있다. Newtonian 유체(ϵ_m)에 분산된 구형의(유전상수 ϵ_p , 지름 $2r$) 강유전체와 같은 이상적인 물리적 모델을 이용하여 유도된 정전기력은 입자와 미디움 간의 유전상수 차이에 의존한다는 것을 유도하였다[16]. 일반적인 식은 다음과 같다.

$$F = k\epsilon_m(2r)^2 f^2 E^2 S^2 \quad (3-1-1)$$

F는 정전기력이며, k는 상수, $f=(g-1)/(g+2)$, $g=\epsilon_p/\epsilon_m$, S는 입자의 미세구조 상수이다. 전단 탄성율은 ϵ_p/ϵ_m 의 증가에 따라 선형적으로 증가할 것이다[9]. 다시 말하면, 높은 유전상수의 입자가 더 강한 전기유변 효과를 낸다. 그러므로 매우 높은 유전 상수를 가진 입자를 사용할 경우, 강한 전기유변 효과가 기대된다. 바륨 티타나이트(BaTiO₃, 유전상수는 결정화도에 의존하며 약 2000정도) 현탁액의 ER 유체의 경우 직류전기장 하에서 활성을 일으키지 않으며, 소량의 물이 첨가되거나, 교류전기장에 의한 활성 이후에나 전기유변 효과가 나타난다[17]. 이것은 분극 모델이 여전히 많은 개선과제를 가지고 있다는 것을 보여준다. 또한 분극 모델이 유변학적 특성, 교류 전기장의 주파수, 입자의 전도도 같은 전기유변학 실험시의 중요한 사항을 묘사하는데 적합하지 못하다는 것을 보여준다. 그럼에도 불구하고, 분극모델의 기본적인 사항은 다음과 같다. 정전기적 분극은 입자와 미디움 간의 유전상수 불일치에 기인하며, 전기장에 의한 입자의 분극이 주변의 입자에 힘을 가한다. 균일한 전기장이 가해질 경우, 입자와 미디움 사이의 계면에서 분극도 차이가 발생하고, 그에 의한 전기장 요동이 발생한다. 전위 (ψ) Laplace 식에 의해 구해진다[18].

$$\nabla^2 \psi = 0 \quad (3-1-2)$$

전기적 변위의 수직성분의 연속성과 전위의 연속성의 경계조건은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_p \frac{\partial \psi_p}{\partial n} = \epsilon_c \frac{\partial \psi_c}{\partial n} \quad (3-1-3)$$

$$\psi_p = \psi_c \quad (3-1-4)$$

아래첨자 p 와 c 는 각각 입자상과 연속상을 말한다. 하나의 입자외부의 전위는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\psi = -E_o r \cos\theta \left\{ 1 - \beta \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right\} \quad (3-1-5)$$

전기장은 구면 좌표계에서 z 축 방향으로 반지름 a 의 입자의 중심으로 가해진다. 입자의 쌍극자 계수 β 는 전기장 하에서 입자의 상대적인 분극도를 나타낸다.

만약 두개의 구형 입자가 Fig. 3-1-2와 같이 거리 r 만큼 떨어져 있고, 한 입자가 다른 입자의 중심으로부터 전기장의 방향에 θ 만큼 기울어져 있다면, 각각의 입자는 다른 입자의 분극으로부터 각각 힘을 받는다. 이 힘은 식(3-1-1), (3-1-2), (3-1-3)과 Maxwell의 응력 텐서로 구할 수 있다. 결과는 다음과 같다.

$$F_{el} = 12\pi\epsilon_o\epsilon_c\alpha^2\beta^2E_o^2\left\{ \left(\frac{a}{r}\right)^4 [2f_{||}\cos^2\theta - f_{\perp}\sin^2\theta]e_r + f_r\sin 2\theta e_{\theta} \right\} \quad (3-1-6)$$

F_{el} 은 r , θ 에 위치한 입자에 작용하는 정전기적 분극력을 의미하고, ϵ_o 는 진공에서의 유전상수이다. 외부에서 가해진 전기장은 $E=E_o e_z$ 의 형태를 갖는다. e_z , e_r , e_{θ} 는 각각 z , r , θ 성분의 단위 벡터를 의미한다. $f_{||}$ 은 ϵ_p/ϵ_c 의 범위에서 계산된 a/r 과 ϵ_p/ϵ_c 의 관계를 나타내는 무차원수이다[19]. 쌍극자적인 관점에서($r/a \gg a$ 또는 $\epsilon_p/\epsilon_c=1$ 인 경우) $f_{||}$ 은 1이 된다. 입자 사이가 조금 떨어질 경우, $f_{||}$ 은 ϵ_p/ϵ_c 의 증가에 따라 급격히 증가하다. 즉 $\epsilon_p/\epsilon_c \rightarrow \infty$, $r/a \rightarrow 2$ 일 때 $f_{||}$ 은 발산한다[20]. 위의 배열에서 두 입자 사이의 전기장 강화시, 유체 내에서 입자들의 유전파괴가 일어난다. 만약 전도성 입자가 접촉할 경우, 전하들의 재배치가 일어나며 인력만 존재하는 것이 아니며, 입자 크기에 따라 인력 또는 척력이 작용한다.

한편 Mason은 non-Brownian 전도성 구와 절연성 점성오일로 예상치와 실험치를 비교하여 매우 일치됨을 찾았다. 일반적으로, 유변학적 분석은 전압 공급기 용량 및 절연파괴 때문에 제한적인 주파수, 전기장 등에서만 실험이 가능하다. 차원해석법은 전기장과 진동 실험시의 주파수는 ω^2/E^2 의 조합으로 독립변수가 된다고 제안한다. Klingenberg는 다음과 같은 ER 유체의 정전기적 분극 이론에 기반을 두며, 차원해석법으로 구한 무차원수를 포함하는 방정식을 제안하였다[21].

$$\frac{G'}{\frac{3}{16} \pi_o \epsilon_s \beta^2 E^2} = f_1 \left\{ \frac{16 \eta_s \omega}{\epsilon_o \epsilon_s \beta^2 E^2} \right\}$$

$$\frac{G''}{\frac{3}{16} \pi_o \epsilon_s \beta^2 E^2} = f_1 \left\{ \frac{16 \eta_s \omega}{\epsilon_o \epsilon_s \beta^2 E^2} \right\} \quad (3-1-7)$$

전기유변 현상을 시뮬레이션 할 경우 정전기 인력, 수력학적 힘, 입체적 힘 등을 반드시 고려하여야 한다. 매우 작은 입자의 경우 Brownian 힘이 작용하지만, 입자가 충분히 클 경우(>1 μm) 억제 될 수 있다. 시뮬레이션은 point-dipole 가정 및 Stokes-drag가정 같은 여러 가정에 의해 매우 단순화된다. 위의 가정들은 오직 넓게 분산된 입자 시스템에만 유용하다.

다. ER 유체의 유변학적 측정

유변학적 물성은 Physica 사의 회전형 레오미터를 이용하여 측정되었다. 측정도구의 형태는 Couette Type Cylinder(Z3-DIN)이며, 고전압 발생기가 부착되었다(Meyport Series 230). 최대 측정 샘플량은 17ml이다. cylinder에서 cup 과 bob의 사이의 간격(gap size)은 Z3-DIN, Z-4DIN에서 각각 1.06mm 와 0.59mm이다. 온도 조절은 순환 오일(Viscotherm VT 100) 수조를 이용하여 -40℃에서 150℃까지 조절 가능하다. Fig. 3-1-3은 레오미터의 사진이며, Fig. 3-1-4는 전기장 하에서 cup과 bar 사이에 입자들의 체인구조 형성을 보여 준다.

유변물성 측정시 온도는 고정되어야 한다. 현탁액은 정지된 cup과 회전하는 bob 사이에 위치하며, 전기장은 고전압 발생기로부터 절연된 bob으로 공급된다. 전단력을 가하기 전, 좀더 안정적인 체인구조를 만들기 위해 전기장은 약 3분간 공급된다. 정확한 측정을 위해서 ER 유체는 각각의 측정시 재분산되며 모든 측정은 두 번 내지 세 번 반복된다. 전단 속력의 범위는 0.0072에서 1000sec⁻¹이다.

(1) 정상 전단 측정(Steady Shear Experiments)

ER 유체의 정상 전단 거동을 분석하기 위한 두 가지 측정법이 이용된다. 첫째, 전단 응력을 변화시키며, 전단 변형율을 기록하는 방법이 있다(전단 응력 조절 모드, CSS). CSS 모드에서는 토크와 전단응력이 먼저 정해지고 그에 따른 속도 즉 전단 변형율을 측정한다. 가장 중요한 측정값중의 하나는 항복점이며, CSS 모드에서는 항복점이 바로 측정 될 수 있다.

두 번째는 속도 즉, 전단 변형율이 정해지고 흐름 저항 정도인 토크가 측정되어 다시 전단 응력으로 변환된다(전단 변형율 조절 모드, CSR). 일반적인 레오미터는 이 CSR을 채택한다. CSR 모드의 흐름곡선에서($\tau=f(\dot{\gamma})$) 항복점은 y축 즉 전단응력 τ 축의 절편으

로 나타내어진다.

CSR 모드에서의 항복점은 CSS 모드에서의 항복점과 차이를 보인다. 그 이유는 준 플라스틱 물질에서는 매우 작은 전단변형률에서도 매우 큰 비틀림이 일어나기 때문이다.

(2) 진동 실험 (Dynamic Experiments)

점탄성 재료에서 주파수 $f(\text{Hz}$ 또는 ω)의 사인파형의 변형시, 응력 또한 주기적으로 변한다. 이러한 경우, 응력은 다음과 같은 두 가지 성분으로 나누어 질 수 있다. 즉, 변형과 동일한 위상을 가지는 탄성응력 τ' 과 위상이 틀린 점성응력 τ'' 이다. 탄성응력은 물질의 탄성 즉 고체의 성질을 나타내는 척도이며, 점성응력은 물질이 가진 이상 유체의 특성을 나타내는 척도이다. 탄성 및 점성응력은 변형과 응력의 비율을 나타내는 모듈러스(modulus)로 나타내어진다. 그러므로, 탄성응력과 변형의 비율은 저장 탄성율 G' 이며, 점성응력과 변형의 비율은 손실 탄성율 G'' 이다.

물질의 변형에 대한 전체 저항을 나타내는 복합 탄성율(complex modulus) G^* 는 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$G^* = G' + iG'' \quad (3-1-8)$$

i 는 허수 단위이다. 손실 탄성율과 저장 탄성율의 비율은 응력과 변화사이의 위상변화 δ 를 나타내는 탄젠트이며 이것은 물질의 댐핑력과 관계있다.

$$\frac{G''}{G'} = \tan \delta \quad (3-1-9)$$

진동 실험에서 ER 유체는 실린더형의 bob을 통해서 사인파형의 변형을 받으며, 점탄성 상수들은 자동적으로 측정된다.

일반적으로 진동실험은 두 가지 방식으로 측정된다. 주파수를 고정하고 진폭을 변형시키는 것과, 진폭을 고정하고 주파수를 바꾸는 방식이 있다.

2. ER 유체의 제조

가. 비수계 폴리아닐린 입자의 제조.

폴리아닐린(PANI)은 전기 전도성 고분자로서 제조가 쉽고, 좋은 전기적 특성 및 산화도에 따라 전기전도의 조절이 용이하기 때문에, EMI shielding, anti-oxidant 등의 다양한 분야의 전기 응답성 물질로 연구되었다. 또한, 앞에서 말한 전기 전도도의 조절이 용이하기에 반전도성의 영역으로 만들 수 있으며 그로 인한 분극을 유도할 수 있고, 낮은 밀도

로 인한 분산 안정성, 높은 열안정성 등으로 인해 ER 유체의 입자로의 응용이 가능하게 되었다.

(1) PANI 입자의 제조

일반적인 PANI의 중합법은 다음과 같다. Fig. 3-1-5는 PANI 중합시의 반응식이다. 아닐린 단량체와 1M HCl 의 혼합물을 교반하여 아닐리니움 이온(anilinium ion)을 만든다. 그 후 APS(ammonium persulfate)의 혼합물을 0°C에서 드로핑 시킨다. (PANI 의 중합은 발열과정이기때문에 온도를 0°C로 유지시켜 주기 위해 드로핑 한다). 드로핑 완료 후, 약 3시간 정도 더 교반시킨다. 개시제와 단량체의 비율은 여러 참고문헌과 지난 실험결과들을 참고하였으며, 낮은 밀도의 PANI를 합성하기 위하여 단량체:개시제=1.2:0.75로 하였다. 교반 후 고형분은 여과되어 걸러진다. 미반응 개시제는 증류수를 이용하여 씻겨지고, 미반응 단량체 및 올리고머는 methanol을 이용하여 씻겨진다. 앞에서 언급한바와 같이 PANI 그대로는 전도도가 너무 높기에 ER 유체로 이용할 수 없다. PANI의 전도도는 입자 산화도를 변화시켜 조절할 수 있다. 약 0.5M 의 NaOH 용액에 PANI 입자를 분산시켜 환원시킨다. 중요한 것은 PANI 입자내로의 확산시간 등에 의하여, PANI 입자와 NaOH solution 이 평형을 이루는 데는 약 70시간의 시간이 소요된다. 경험에 의해, pH가 약 8.5~9 사이에서 전기 전도도가 반전도성 영역인 $10^9 S/cm$ 정도 나온다. dedoping 후 고형분은 다시 여과된 후 60°C로 공기 중에서 건조되며, 40°C 진공에서 무게 변화가 없을 때까지 건조되었다. 건조된 입자들은 막자사발을 이용해서 갈고 100 μm 포어 사이즈의 체를 이용해서 걸러진다[22]. 일반적인 PANI의 중합 과정 및 각각의 산화도에 따른 외형적 특징을 Fig. 3-1-6에 나타내었다.

(2) PANI 과상중합시 단점 및 개선방향

앞에서 말한 바와 같이 PANI는 ER 유체로 적용되기 위해 dedoping이라는 과정이 하나 더 필요하다. 그러나 임계영역에서 산화도의 조절이 힘들고 입자와 미디움 간의 평형이 되기까지 오랜 시간이 필요하기에 비효율적이다. 그래서 우리의 연구 방향은 특별한 dedoping 없이 PANI의 전도도를 낮추기 위한 것으로 여러 시도를 했으며, 또한 계속 진행 중이다.

PANI는 불용성이다. 즉 녹여서 가공한다는 것은 불가능하다. 이제껏 녹일 수 있는 PANI를 만들기 위한 여러 노력들이 있었지만 어느 정도 한계는 있었다. 이후 용융성보다는 좀더 작은 나노 크기의 균일한 입자를 만들어 colloid 상태로 가공하는 방법들이 제시되었고 이에 대한 여러 연구도 있었다. 이번 우리의 연구는 나노 크기의 균일한 입자 크기와 또한 좋은 분산 안정성을 가진 PANI colloid ER 유체를 만드는 것이다.

나. PANI 로 둘러 쌓인 PMMA(poly methyl methacrylate)

이번 연구는 dedpdoping 처리 없이 PANI 전도도를 조절하기 위한 방법으로, PANI 와 절연성 물질과의 복합재료 재료중 하나인 PANI와 PMMA와의 복합재료(PA-PMMA)를 사용하겠다. 목표는 PANI 중심에 PMMA가 둘러 쌓인 입자가 목표이지만, 이번 연구에서는 PMMA와 PANI로 구성된 표면 전도성입자인 PA-PMMA를 합성하였다. PMMA는 안정제를 이용한 분산중합으로 단분산성, 균일한 입자를 얻을 수 있으므로, PMMA 구슬을 만든 후 그 표면에 PANI 코팅을 입히는 방법을 채택하였다. Fig. 3-1-7은 PMMA의 주변에 PANI가 코팅된 입자의 대략적인 그림이며, 전기장인가 시 PANI 및 PA-PMMA의 분극되는 모습을 나타낸다. 기존의 ER 유체의 입자들은 불규칙한 모양과 불 균일한 크기로 인하여 이론적인 모델을 만드는데 어려움이 있었다. PA-PMMA system은 구형이며 규칙적인 크기를 가지고 있기에, ER 유체의 이론적 모델 시스템으로도 많은 가능성이 있다.

(1) PA-PMMA입자의 제조

단분산성, 구형의 PMMA 입자는 분산중합을 이용해 제조되었다. 분산중합은 고분자의 크기가 일정한 구형입자를 제조하는데 가장 선호되는 방법으로 분산중합의 가장 핵심적인 요소는 계면활성제이다[23]. 그것의 역할은 중합 반응과정에서 성장하는 고분자 입자 표면에 흡착 또는 화학적으로 결합하여 정전기 또는 입체적인 안정화를 통하여 입자 상호간의 회합을 방지하여 균일한 크기의 구형입자를 만드는 것이다. 증류된 MMA(methyl methacrylate) 단량체와 라디칼 개시제인 AIBN(azobisbutyronitrile)을 25℃에서 10wt%와 0.1wt%로 각각 4wt% 의 PVP(poly vinyl pyrrolidone)를 함유한 methanol에 분산시킨다. PVP는 앞에서 언급한 안정제 역할을 하는 계면활성제이며 methanol은 분산매 이다. 반응물의 온도를 55℃로 올린 후 24시간 동안 교반한다. 합성된 2μm 크기의 단분산성 PMMA 입자는 methanol로 세척된다. PMMA 입자를 0.0095M의 SDS(sodium dodecyl sulfate) 수용액에 5wt% 로 분산시킨 후, SDS가 PMMA 표면에 흡착될 수 있도록 서서히 교반한다. PA-PMMA4와 PA-PMMA20을 만들기 위해 아닐린 단량체를 넣어준다. (PMMA 100g 당 각각 4g 과 20g의 아닐린 단량체를 넣어준다). PMMA 표면이 아닌 수용성 미디움 내에서의 아닐린의 중합을 최소화하기 위해서 중합억제제인 hydroquinone을 소량 첨가한다. 반응계는 HCl의 첨가로 산성화된다(아닐린 단량체가 아닌 아닐리니움 이온이 되어 중합이 가능하다). 그 후 개시제로 APS 용액을 드로핑 시키며 중합을 시작하였다. 기존의 과산중합시 단량체에 대한 개시제의 몰비율은 약 0.6이었지만, 이번 코팅 시스템에서의 단량체에 대한 개시제의 몰비율은 일반적인 PANI 중합시의 비율인 1.2로 하였다. PA-PMMA 복합체는 세척후 PANI와 마찬가지로 NaOH solution을 이용한 pH 조절로 전기 전도도를 약 10⁹에서 10¹⁰S/cm 정도로 조절되었고, 진공상태에서 25℃로 건조되었다. ER 유체는 실리콘 오일에 PA-PMMA 입자를 10vol% 로

분산시켜 제조되었다. 전기유변 특성 비교를 위한 PANI 균일 고분자도 위와 같은 방법으로 제조되었고, 마찬가지로 실리콘 오일이 10vol%로 분산되었다.

(2) PA-PMMA 입자 특성 분석

Fig. 3-1-8(a), (b)는 각각 단분산성 구형입자인 PMMA 및 PA-PMMA 입자의 주사 전자 현미경(SEM) 사진이다. (a)의 PMMA는 $2\mu m$ 크기의 단분산성인 구형 입자를 이루고 있으며, 부드러운 표면을 볼 수 있다. (b)의 PA-PMMA20의 주사전자 현미경 사진은 PA가 PMMA의 표면에 코팅되었다라는 증거를 보여준다(엄밀히 말하면 코팅보다는 encapsulation에 더 가깝다). 비록 입자 표면의 거칠기는 증가하였지만, 단분산성이며 균일한 크기를 갖는 PA-PMMA 입자가 되었으며 단분산성 또한 유지되었음을 확인하였다.

PA-PMMA의 PA 코팅의 두께는 TGA(thermogravimetric analysis)와 PA 층은 균일한 두께를 갖는다는 가정을 통해 측정, 분석되었다. PMMA는 $400^{\circ}C$ 에서 거의 남아있지 않는다는 점을 이용, 남아있는 PA를 통해 코팅의 두께를 계산하였다. 전도도 및 유전상수의 측정은 디스크 형태의 펠렛으로 측정되었다. 전도도는 2-probe의 picoameter(487, Keithley, USA)를 사용하였고, 유전상수는 impedance analyzer(4284A, HP, USA)를 사용하여 측정되었다. PA 및 PA-PMMA의 물리적 특성을 Table 3-1-1에 요약하였다. 유전상수는 1kHz에서 측정된 값이다.

(3) PA-PMMA 및 PA의 전기유변 특성 및 유전특성

PA-PMMA 및 PA ER 유체의 유변 특성은 회전형 레오미터(MC-120, Physica, Germany)를 사용해서 측정되었다. 고전압 발생기와 실린더 형태의 측정기를 사용하였다. 흐름특성 곡선은 전단 변형을 조절 모드(CSR)로 전단 변형을 $0.01s^{-1}$ 에서 $1000s^{-1}$ 까지의 단계적 증진시, 전단응력의 변화로 측정되었다. ER 유체의 유전 스펙트라(dielectric spectra)는 impedance analyzer와 liquid fixture(16452A, HP, USA)을 이용 주파수 범위 20Hz부터 10MHz까지 측정되었다.

Fig. 3-1-9는 실리콘 오일에 PANI와 PA-PMMA20이 각각 10vol%로 분산된 ER 유체의 흐름특성 곡선을 보여준다. 두 종류의 ER 유체는 둘 다 항복응력 τ_0 를 갖는 Bingham 유체의 거동을 보여준다. Bingham 유체의 일반식은 다음과 같다[24].

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (\tau > \tau_0) \quad (3-1-10)$$

여기서 τ 는 전단 응력을 말하고, τ_0 는 항복응력을 말한다. η 는 항복점 이후의 전단 점도이며, $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ 는 전단변형율을 나타낸다. 전단응력은 넓은 범위의 전단변형율 영역에서 증가한다; 그렇지만 낮은 전단변형율 영역에서 임계 전단변형율까지 전단변형율의 증가에 따라 조금씩 감소하는 것이 보인다. 여기서 임계전단변형율이란 ER 유체의 거동이

전단응력이 전단변형률에 선형으로 증가하는 Newtonian 유체의 거동으로 전이되는 전단 변형률을 말한다. 최근, See는 낮은 전단변형률에서의 전단변형률 증가시의 전단응력의 감소는 오직 직류 전압인가 시만 나타난다고 보고하였다. 전단응력의 증가는 전기장 인가 시 입자에 의해 형성되는 섬유구조에 의해 발생한다. 전단변형 인가 시 발달된 섬유구조는 가해진 전기장의 세기 및 입자간의 상호작용에 따라 파괴와 재형성을 반복한다. 전단 변형률이 증가함에 따라 섬유구조가 파괴되는 속도는 재형성되는 속도보다 빨라진다. 이것이 임계전단변형률 이전까지 전단응력이 감소하는 이유이다[25]. 임계전단변형률 이후에는 입자간 또는 입자들의 응집체 사이의 수력학적 상호작용이 섬유구조 재형성 보다 더 우세하기 나타나기 때문에 ER 유체는 희박 현탁액에서 나타나는 Newtonian 유체의 거동을 보인다.

전기장 인가시 PA-PMMA4의 ER 유체는 PA-PMMA20과 비슷한 흐름특성곡선을 보인다. 하지만 $3kV/mm$ 의 전기장 세기에서 비교해보면, PANI의 ER 유체는 PA-PMMA보다 더욱 향상된 전단응력의 흐름특성을 보인다. 이것은 최초의 예상과 반대되는 결과이며, 그것의 원인에 대해 다음과 같은 잠정적 결론을 내렸다.

ER 유체의 이론적 모델에서 표면분극이론은 ER 유체의 특성을 결정하는데 중요한 요소라고 제안되었다. Fig. 3-1-10의 Cole-Cole Plot이 위의 설명을 뒷받침한다. 외부의 교류 전기장에 의한 입자의 표면분극은 전기장의 주파수(ω)가 증가할수록 지연된다. 유전 스펙트럼에서, 유전 상수는 주파수의 증가에 따라 감소하며, 유전 손실(dielectric loss)은 특정 주파수에서 단일 피크를 보인다. Fig. 3-1-11은 유전 스펙트럼에서 얻은 결과를 아래와 같은 Cole-Cole식에 의거하여 도시한 결과이다[26].

$$\epsilon^* = \epsilon' + \epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + (i\omega\lambda)^{1-\alpha}}, \quad (0 \leq \alpha < 1) \quad (3-1-11)$$

($1-\alpha$)는 넓은 이완 시간분포를 나타내는 척도이며 $\alpha=0$ 일 경우, 식(3-1-11)은 유명한 Debye의 단일 이완시간 모델로 축소된다. 여기서 λ 는 특성시간을 의미한다. 식(3-1-11)에 나와있는 상수들을 Table 3-1-2에 정리하였다. 비록 ϵ_0 는 실험결과로부터 직접 구할 수 없지만 Cole-Cole 원에서 ϵ' 축의 2차 절편으로부터 구할 수 있다. $\Delta\epsilon = \epsilon_0 - \epsilon_\infty$ 는 ER 유체의 분극도를 나타내며, λ 는 전기장인가 시 항복응력 및 전단응력 증가와 관계있다. λ 가 적당한 영역으로 작아질 경우, 전단응력의 증가가 이루어진다. 나아가 Hao는 $\tan \delta$ (ϵ''/ϵ')가 ER 유체의 특성을 결정하는데 중요한 역할을 한다라고 제안하였다.

본 연구에서 비록 PANI 입자가 가장 작은 유전상수를 가지고 있지만, PANI ER 유체의 ϵ_0 , $\Delta\epsilon$ 가 가장 큰 값을 나타내었다. 이것은 PANI ER 유체의 표면분극이 PA-PMMA ER 유체의 표면분극보다 더 크다는 것을 의미한다. 입자 중심부의 절연성의 PMMA가 PA-PMMA ER 유체 입자의 PANI의 표면분극을 방해한다는 것을 알 수 있다. 또한 이번 시리즈에서 λ 는 ER 유체의 거동에 큰 영향이 없다는 것을 보여준다.

(4) 결 론

절연성 PMMA 구슬을 중심부에, 반전도성인 PANI가 둘러 쌓여 있는 균일한 크기의 구형입자를 만들었고(PA-PMMA), 절연오일에 분산시켜 ER 유체를 제조했다. SEM, TGA, impedance analysis,를 통해 PA-PMMA 입자의 물리적 특성을 분석하였다. PA-PMMA 입자로 구성된 ER 유체는 전형적인 ER 유체의 거동을 보였다. 입자 중심부의 절연성 PMMA는 PANI의 표면 분극을 간접한다라는 것을 유전 스펙트럼으로 확인하였다. 우리의 다음실험은 초기 목적대로 반전도성 PANI를 중심부로, 절연성 PMMA가 둘러 쌓인 구형 입자를 제조하여 그의 ER 특성분석을 하는 것이다.

다. 절연성 Clay에 층간 삽입된 Poly Ethoxyaniline

전도성 고분자인 PANI를 특별한 dedoping처리 없이 반전도성의 PANI 로 만드는 방법중 하나인 clay와의 복합재료를 들 수 있다. 본 연구의 결과 및 기존의 PANI/clay 나노복합재료를 다루기 전에, 우선 일반적인 고분자/clay 나노복합재료에 대해 알아보면 다음과 같다. 1990년대 초에 일본 도요타 그룹에서 나일론6과 유기화제로 개질된 clay로 나노 복합체를 만들어 상업적으로 이용할 수 있는 많은 가능성을 보인 이래로, 고분자/clay 나노 복합체에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔으며, 최근에는 상업적으로도 많은 응용이 되어지고 있다. 이는 고분자/유기화제로 치환된 clay(유기친화적 clay) 복합체의 물성이 기존의 고분자/무기충진제 복합체보다 가벼우면서도 뛰어난 기계적 물성을 나타내기 때문이다. 그밖에도 기체나 용매 투과성을 낮춰주고 열적 안정성을 보이는데, 이것은 고분자/유기친화적 clay 복합체의 독특한 구조에서 나오게 된다. 흔히 나노복합체에 사용되는 clay는 2:1 층간 구조를 가지는 smectite group에 속하는 MMT(montmorillonite)인데 (Fig. 3-1-10), 구조를 형성하는 알루미늄이나 실리콘 이온이 전하가 낮으면서 크기가 비슷한 이온과 치환되면 (동형치환) clay의 전체 구조는 전하의 불균형으로 인해 극성을 띠게 된다. 동형치환에 의한 전하 불균형은 결국 clay 내부 구조에 전하를 띠는 다른 이온의 침투를 가능하게 한다. 보통은 나트륨이온과 같은 금속성 이온 물질이 층간구조에 자리잡게 되는데, 유기물질을 salt형태로 전하를 띄게 하여 유기물을 삽입할 수 있다[27]. 이것이 바로 유기화제로 개질된 clay이다. 일반적으로 개질이 되지 않은 clay는 친수성을 띠는데, 이런 특성으로 인해 소수성이 높은 고분자와 혼화성(compatibility)이 낮아서 불 균일한 분산성을 가지게 되어 기존의 충진제 첨가 복합체와 유사한 특성을 보이게 된다. 그러나 유기화제로 개질된 clay는 고분자 matrix에 넣었을 때, 층 내부에 있는 유기물질로 인해 그들 스스로의 상호작용보다 고분자와의 친화력이 더 강하게 작용하여 clay의 각 실리케이트 층 사이로 고분자들이 침투하게 되고 결국에는 층이 박리(exfoliation)되며 고르게 분산이 되게 된다. 이 때 clay의 높은 aspect ratio와 1nm 정도의 층 간격은 고분자와의 상호작용을 증가시키며 나노스케일의 특수한 구조를 형성하게 하여 물성에도 큰 변화를 보이게 한다. 결국 나노복합체의 물성 향상은 고분자와 clay사이의 강한 상호작용에서 기

인되는 분산성에서 비롯된다고 할 수 있다.

고분자/clay 나노복합체를 제조하는 방법에는 크게 세 가지가 있는데, solvent casting 법, in-situ polymerization 법, melt mixing 법이 그것이다[28-30]. Solvent casting 법은 먼저 같은 용매에 각각 고분자와 clay를 넣은 후에 서로 혼합하는 것이다. 이 때 clay가 용매 속에서 팽윤되어 고분자가 clay의 층 사이로 침투하기가 용이해진다. 일정 시간 혼합 후에 용매를 제거하게 되면 필름형태의 복합체 샘플이 얻어지게 된다. 용매를 사용하고 제거하는 과정이 필요하기 때문에 실제 공정 상에서는 많이 쓰이지 않지만 실험적으로 사용하는 방법이다. In-situ polymerization은 고분자 중합에 사용되는 단위체 용액에 clay를 분산시킨 후 개시제를 넣어 중합시켜서 복합체를 제조하는 방법이다. 이 때 단위체 분자가 clay층 사이에서 중합을 일으켜서 반응이 일어나는데, 반응 과정 중 중합체의 분자량이 점차 증가하면서 그에 따른 탄성증가가 clay층을 서로 밀어내는 힘으로 작용하여 각 층들이 박리하게 된다. 보통 용매에 녹지 않는 열경화성 고분자의 복합체를 제조하기 위해 사용된다. 마지막으로 melt mixing법은 열가소성 고분자를 brabender나 extruder같은 가공기계에 넣고 용융된 상태에서 clay와 함께 mixing하여 복합체를 제조하는 방법이다. 이 때 용융된 고분자가 clay층 사이로 mass transport가 일어나 층간 삽입된 구조(intercalated structure)를 형성하고 복합체에 가해지는 전단응력은 clay층의 박리형성을 돕는다. 이런 복합체는 유리전이온도 이상에서의 온도에서 annealing이라는 추가과정이 필요하다. 용매를 사용하지 않아서 실제 공정에 유리한 방법이라 할 수 있다.

나노복합체의 구조적 특성을 분석하기 위해서 X-ray 회절 분석(XRD)을 많이 사용한다[31]. clay와 고분자의 내부 구조에 따른 XRD 피크 패턴이 Fig. 3-1-12에 나와있다. 실제로 고분자 사슬이 clay의 층 사이로 침투되어 삽입이 되었는지는 복합체의 회절 peak과 순수한 clay의 회절 peak를 서로 비교해 보면 알 수 있다. 이 때 복합체의 회절 peak이 clay의 회절 peak보다 저각에서 관찰되었다면 층간삽입이 확실하다. 만약 아무런 peak이 관찰되지 않았다면 박리되었다고 볼 수 있다. 이것을 투과전자현미경법(TEM)을 사용하여 관찰하면 clay가 고분자 matrix안에 공간적으로 분산되어있는 것을 잘 확인할 수 있다. 일반적으로 나노복합체는 박리된 구조와 층간 삽입된 구조 모두 갖고 있으며, X-ray 회절과 투과전자현미경을 이용하여 확인한다.

본 연구에서는 이러한 고분자/clay 나노복합체 시스템을 전기유변 현상을 나타내는 시스템에 도입하여 ER 유체를 제조하고 그것의 전기유변학적 특성을 일반적인 방법으로 제조된 ER 유체와 비교하여 보았다. 위에서 언급한 나노복합재료의 제조방법 중 본 연구의 PEOA/clay 나노복합재료는 solvent intercalation method의 방법으로 제조되었다.

이에 앞서 기존에 보고된 in-situ polymerization 방법으로 제조된 PANI/clay 나노복합재료에 대해 알아보면 다음과 같다. Clay는 Na⁺-Montmorillonite를 사용했고, 도판트역할을 하는 개시제로 DBSA(dodecylbenzenesulfonic acid) 와 CSA(camphorsulfonic acid)를 각각 사용했다[32]. clay의 영향을 알아보기 위해 clay가 없는 PANI도 중합되었다. 유화중합법을 사용하였고, 아닐린 단량체에 대한 clay의 무게비는 15wt%이다. Na-MMT는 증류수에 분산된 후 초음파 가진을 통해 팽윤된다. clay 팽윤시 유화된 아닐린의 층간 삽입

은 더욱 용이하다. DBSA는 도판트와 유화제(계면활성제)의 역할을 동시에 한다. DBSA는 수용액상에서 아닐린 수용액(증류수)에 녹인다. DBSA의 아닐린 단량체에 대한 몰비는 0.5, 1.25, 1.5, 2M이다. 유화액은 25°C에서 반응기 내에서 clay 현탁액과 혼합된다. 산화개시제는 APS이며, 수용액 상태로 반응기에 드로핑된다. 중합반응은 아세톤 첨가로 종결되며, 얻어진 고품분은 세척, 여과, 건조, 및 밀링과 시빙의 순서로 최종 입자가 된다. clay가 들어가지 않는 PANI도 위와 마찬가지로 유화중합을 통해 중합된다. PANI의 clay 층간 삽입은 XRD와 TEM을 통해 확인하였다. Fig. 3-1-13은 clay가 없는 PANI-DBSA, clay를 함유한 PANI-DBSA/clay와 clay 자체의 XRD 결과이다. clay gallery의 size는 다음과 같은 Bragg's 식을 사용하여 계산되었다.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3-1-12)$$

여기서 $n=1$ 이며, λ 는 광원의 파장으로 약 1.54nm 이며, d 는 d-spacing이며 clay의 gallery size를 나타낸다. clay의 XRD 결과를 보면 약 9° 에서 피크가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것을 식(3-1-12)를 이용해 계산하면 약 1nm 정도가 나오며, 이것은 각각의 clay 층 사이의 간격을 나타낸다. PANI-DBSA/clay를 보면 PANI-DBSA에서는 볼 수 없는 6° 에서 피크가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 식(3-1-12)로부터 약 1.5nm 라는 것을 알 수 있다. 이것은 PANI-DBSA가 clay 층간에 삽입되어 clay 층간의 간격이 증가한 것이라고 해석할 수 있다. 고분자의 clay 층간 삽입을 뒷받침하는 다른 도구로 TEM을 들 수 있다. Fig. 3-1-14는 200kV acceleration voltage로 촬영한 PANI-DBSA/clay의 TEM(Philips-CM30) 사진이다. 검은 실선들은 각각의 clay층을 의미하며, 회색의 배경은 PANI-DBSA를 의미한다. PANI-DBSA/clay는 전형적인 층간삽입 구조를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 전기적 특성분석은 4-probe picoameter(Keithley)를 이용하여 측정하였다. 상온 전도도 및 저온에서 온도변화에 따른 전도도 분석을 통해 구조분석 및 다른 전기적 특성분석도 하였다. 상온에서 PANI-DBSA(1.25M)와 PANI-DBSA/clay(1.25M)는 전도도는 각각 8.34S/cm 과 0.25S/cm 이다. 몰비율에 따른 전도도 변화를 Table 3-1-3에 요약하였다. 고분자 전도도의 온도 의존성 실험에서 PANI-DBSA 및 PANI-DBSA/clay는 1D-VRH(quasi-one dimensional variable range hopping)모델을 따른다. VRH의 식은 다음과 같으며 1차원 VRH에서 d 값은 1이다[33].

$$\sigma_{dc}(T) = \sigma_0 \exp[-(T_0/T)^{1/1+d}] \quad (3-1-13)$$

Fig. 3-1-15는 PANI-DBSA/clay 및 PANI-DBSA/clay의 1D-VRH 결과이다. σ_{dc} 는 전도도를 의미하며, $T_0=16/[L_{||}L_{\perp}^2 N(E_F)k_B]$ 로서 $L_{||}(L_{\perp})$ 고분자 체인에 평행한 편제 길이를 의미하며, $N(E_F)$ 는 Fermi 준위에서의 밀도상태를 의미한다. 그림에서 기울기 T_0 는 PANI-DBSA, PANI-DBSA/clay에서 각각 $\sim 900\text{K}$, $\sim 6600\text{K}$ 이다. 이것은 PANI-DBSA가 PANI-DBSA/clay보다 훨씬 더 높은 전도성 영역에 있다는 것을 보여준다. 이것은 clay가

효과적인 도핑을 방해하였으며, XRD 결과가 보여주듯이(15° 이후의 피크 세기 감소로 더욱 무질서한 상태를 알 수 있다.) 규칙성이 깨지며, 고분자 체인 내부의 상호작용이나 고분자 체인끼리의 상호작용이 상당히 감소하였음을 알 수 있다.

비록 clay의 첨가로 PANI-DBSA/clay의 전도도를 낮추기는 했지만 ER 유체에 필요한 반전도성 영역까지 내려가지는 않았다. 즉 초기의 목적과 달리(dedoping 처리 없이 바로 ER 유체의 입자를 만드는 것) PANI-DBSA/clay 또한 dedoping 처리를 필요로 한다. NaOH 용액을 이용해서 PANI-DBSA/clay의 산화도를 조절하여 반전도성 영역인 $10^9 S/cm$ 까지 전도도를 낮춘 후 전기유변 실험을 하였다. 레오미터 실험은 위의 PA-PMMA 실험과 동일하게 하였다. Fig. 3-1-16은 CSR 모드에서의 흐름특성 곡선을 나타낸다. 위의 PA-PMMA와 달리 낮은 전단병형율에서 전단변형을 증가 시 임전단변형을 까지, 전단응력의 감소는 보이지 않는다. ($1.2kV/mm$ 에서는 전단응력 감소가 보이는데 이 부분은 좀더 연구가 필요하다.) 이것은 전단 변형에 의해 섬유구조가 깨지는 힘보다 가해진 전기장에 의해 섬유구조가 재형성되는 힘이 더 크다는 것을 보여준다. Fig. 3-1-17은 PANI-DBSA/clay ER 유체의 전기장 세기에 대한 전류밀도를 나타낸다. 상업적 ER 유체의 전류밀도의 제한은 $6kV/mm$ 에서 약 $300mA/m^2$ 이다. PANI-DBSA/clay ER 유체는 상업적 제한보다 훨씬 작은 값이며, 이것은 좋은 적기적 안정성을 보여준다. Fig. 3-1-18은 PANI-DBSA/clay와 PANI-CSA/clay의 전기전도도 1-D VRH 모델의 결과를 보여준다. 전기전도적 특성의 감소를 보이는 PANI-DBSA/clay와 달리 PANI-CSA/clay의 경우는 별 차이를 보이지 않는다. 그것은 PANI-CSA/clay에서는 PANI가 clay의 층 사이로 삽입함과 동시에 clay의 주변을 둘러싸기 때문일 것이다[34].

(1) PEOA/clay ER 유체 입자의 제조

앞서 본 것은 PANI를 clay 존재하에 유화중합하는 즉 in-situ polymerization을 이용한 PANI/clay의 나노복합재료이다. 본 연구에서는 유기물질과 무기물질 재료가 복합된 나노복합고분자 재료를 합성하고 이 재료를 ER 유체의 제조에 사용하였다. 고분자-clay 복합재료는 기계적 물성이 좋고, 가스 투과도가 낮으며, 좋은 열적 성질을 가지고 있어서 여러 분야에서 사용되고 있으며, 전도성고분자-clay의 복합재료는 좋은 가공성과 향상된 특성을 갖는다. 전도성고분자인 폴리아닐린(PANI)은 합성이 쉽고, 도핑을 제어하기가 좋다는 장점을 가졌으나, 가공성이 떨어져 범용성 용매에 대한 용해도가 좋지 않아서 폴리아닐린에 $-CH_3$, $-OCH_3$, 또는 $-OC_2H_5$ 등을 대체하여 유도체를 합성할 수 있다. 폴리아닐린에 $-OC_2H_5$ 기를 도입하여 폴리에톡시아닐린(PEOA)을 합성하고 유기치환된 clay(OMMT)의 층간에 삽입하는 방법으로 solvent casting에 의해 층간 삽입된 나노복합체를 합성하고 실리콘 오일에 분산시켜 ER 유체를 제조했다. 합성된 PEOA 입자 자체의 최종 pH에 따른 도핑에 의해 유기치환된 clay내에 층간삽입의 조절과 그에 따른 전도도의 값을 살펴보았다.

(2) PEOA/clay입자의 특성분석

Fig. 3-1-19의 XRD 실험의 결과로서 층간 삽입된 PEOA에 의해 순수한 점토내 층간 거리의 증가한 정도를 확인할 수 있는데, OMMT의 2θ 의 값은 $4.8^\circ(1.84nm)$ 이며 PEOA-OMMT 나노복합체인 경우 PEOA 입자가 pH=1과 pH=7인 경우에 2θ 값은 $2.35^\circ(3.76nm)$ 와 $2.74^\circ(3.22nm)$ 로 각각 나타난다. d-spacing이 팽창되는 값은 층간의 거리가 더 넓어질수록 나타나는 피크의 위치는 좌측으로 이동하게 된다. PEOA/OMMT 나노복합체의 층간삽입은 투과전자현미경 사진으로 확인 가능하다.

PEOA 입자의 전도도는 pH=1인 경우 $4.7 \times 10^3 S/cm$ 와 pH=7일 때 $5.15 \times 10^3 S/cm$ 를 보이지만 PEOA/OMMT 나노복합체의 경우 $1 \times 10^{-10}(pH=1)$ 과 $2.56 \times 10^{-5}(pH=7)S/cm$ 를 보였다. pH=7인 PEOA의 나노복합체가 pH=1의 나노복합체보다 좀더 높은 전도도를 보였는데 이는 pH=1일때의 PEOA 입자가 pH=7인 입자보다 용매에 용해도가 낮아서 층간삽입이 적었다는 결론을 보였다.

(3) PEOA/clay 전기유변 특성 분석

합성된 나노복합체 입자의 전기전도도 영향은 전기유변 성질에 많은 영향을 미치는데, 외부로부터 전기장을 가했을 경우 Bingham 유동을 보이며, yield stress로 확인을 하였다. 전기유변 특성은 고전압 발생기가 장착된 회전형 레오미터(Physica MC-120, Germany)를 이용하여 유변학적 거동을 살펴보았다. Fig. 3-1-20은 PEOA/OMMT의 흐름특성 곡선이다. PEOA/OMMT 나노복합체를 이용하여 제조된 ER 유체는 낮은 전단영역에서는 전단응력이 일정하게 유지하다가 높은 전단영역에서는 Newtonian 유체의 거동을 보이는 전형적인 ER 유체의 거동을 보인다. 실리콘오일에 분산되어있는 나노복합체는 외부의 전기장으로부터 정적(static) 항복응력을 보여주는데 낮은 전기장 하에서는 PEOA/OMMT (pH=7)가 좀더 높은 값을 보여주는 반면, 전기장 $2kV/mm$ 이상에서는 PEOA/OMMT (pH=1)인 ER 유체가 좀더 높은 값을 보여주었다. 정적 항복응력은 전기장의 영역에서 polarization model 과 conduction model로 설명할 수 있다. 입자의 분극정도와 분산되어있는 유체와의 불일치에 의한 성질과 전도도에 따른 영향으로 해석할 수 있다. ER 유체에 사용되는 전도성고분자의 도핑정도는 기존의 산, 염기 처리의 후처리가 아닌, 무기물 입자인 OMMT 층간내에 삽입함으로써 전도도를 조절할 수 있음을 확인했다.

(4) 결론

유기용매에 용해 가능한 PEOA를 만들고 solvent casting 방법으로 PEOA/OMMT 나노복합체료를 만들었다. 기존의 in-situ polymerization으로 제조한 PANI-DBSA/clay 의 경우 비록 입자의 전기전도도를 줄일 수는 있지만 ER 유체의 범위인 반전도성까지는 줄일 수 없기에 뒤에 산화도 조절이 필요했다. 하지만 PEOA/OMMT 나노복합체료는 후의

특별한 산화도 조절없이 바로 ER 유체로의 적용이 가능하였다.

라. 안정제를 이용해 중합된 ER 유체의 특성

지금까지 PANI의 불용성의 PANI의 가공성 개선을 위한 여러 가지 시도가 있었다. HCl 도판트 대신에 benzenesulfonic acid, sulfosalicylic acid, camphor sulfonic acid, dodecylbenzene sulfonic acid 등의 도판트를 이용한 PANI 중합이 시도되었지만 아직은 여러 제약이 있다. 용용성의 PANI도 좋은 방법이지만, 좋은 분산상태를 가진 colloid 현탁액은 여러 산업분야에 직접 접목될 수 있기에 분산안정성을 높이는 것 또한 PANI의 가공성을 높이는 방법이라 할 수 있다[35]. 유화중합, micelle, 역상 유화중합 등의 방법으로 입체적 안정제를 이용한 여러 분산중합이 시도되었다. 지금까지 사용된 고분자 안정제는 poly vinyl alcohol, poly N-vinyl pyrrolidone, poly vinyl methyl ether, methyl cellulose 등으로, 이것들은 PANI 표면에 붙어 PANI 입자들이 응집되는 것을 방지한다 [36-38]. 본 연구에서는 고분자의 분산 안정성을 높이는 것을 목적으로, acid group(-COOH)이 붙어 있는 PMVEMA(poly methyl vinyl ether-alt-maleic acid)를 고분자 안정제로 사용하여, PANI를 중합하여, 그 외 여러 특성 및 전기유변 특성을 알아보는 것이다.

(1) PMVEMA stabilizer에 의한 PANI 나노입자 제조

분자량 216,000g/mole 의 PMVEMA(Aldrich)을 증류수에 천천히 녹인다. HCl과 아닐린 단량체의 수용액을 4°C에서 첨가 후 계속 교반한다. 산화제인 APS수용액을 약 3시간 동안 드로핑한다. 옅은 녹색의 용액은 차츰 어두워지며 결국은 도핑된 PANI의 전형적인 색인 짙은 녹색이 된다. 분산액은 아스피레이터를 통해 여과되고 미반응 단량체 및 개시제와 올리고머를 제거하기위해 증류수와 세척된다. NaOH 수용액을 이용하여 ER 유체에서 가장 선호되는 전도도인 반전도성 영역으로 ($10^9 \sim 10^{10} \text{S/cm}$) 맞추어 준다. 다시 한번 여과 및 건조 후 입자는 각각 10wt%와 15wt% 의 무게분율로 30cS 동점도의 실리콘 오일에 분산된다. 안정적인 분산상태를 유지하기 위해 ER 유체에 초음파 가동을 가해준 후 상온에서 한시간 정도 더 교반한다. Fig. 3-1-21은 위의 중합과정의 모식도이다.

(2) PANI 나노 입자의 특성분석

Table 3-1-4에 PANI 분산중합시 사용된 PMVEMA 안정제의 무게 및 무게비와 pH를 요약하였다. PANI 입자의 화학적 분석은 FT-IR(fourier transform infrared)을 이용하여 분석하였으며, 디스크 타입의 KBr pellet으로 분석하였다. 823cm^{-1} 에서 방향족 링의 H의 out of plane deformation과 $1,145\text{cm}^{-1}$ 와 $1,310\text{cm}^{-1}$ 의 방향족 아민 stretching으로부터 PANI를 확인할 수 있었다. PANI 입자의 모양과 크기는 고분자가 성장하는 속도와 안정

제가 고분자 입자의 표면에 흡착되는 속도의 비율로 결정될 수 있다. 안정제가 고분자 입자 표면에 흡착되는 속도가 빠를 경우 구형의 입자를 얻을 수 있다. Fig. 3-1-22의 투과전자현미경 사진으로부터 구형의 PANI 및 100nm의 크기를 갖는 다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3-1-23의 주사전자 현미경 사진을 보면, 입자들이 응집되어 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 건조시 입자들끼리 응집된 것으로 보인다.

(3) PANI 나노 입자의 전기유변 특성 분석

전기유변학적 특성은 위의 PA-PMMA 및 PEOA/clay 나노복합재료의 전기유변 실험과 마찬가지로 회전형 레오미터를 사용하여 측정되었다. 측정결과 100nm의 작은 크기의 PANI 입자도 일반적인 ER 유체의 특성을 갖는다는 것을 알 수 있었다. Fig. 3-1-24는 CSR모드에서 흐름특성 곡선이다. 전기장비인가 시 ER 유체는 일반적인 잔단 담화 유체의 특성을 보인다. 전단응력-전단변형율의 곡선에서 기울기는 0.86으로서 Newtonian 유체의 1과는 약간 차이를 보인다. 전기장인가 시 전체 전단변형율 영역에서 전단응력의 증가를 볼 수 있다. 낮은 전단변형율에서의 일정한 전단응력을 보인 후, 높은 전단변형율 영역에서는 일반적인 Newtonian 유체의 거동을 보인다. 이것은 높은 전단변형율에서 입자간의 수력학적 힘이 정전기 인력보다 더 강해지기 때문이다.

(4) 결 론

PANI 나노 입자는 고분자 안정제에 의해 나노 크기의 균일한 입자를 만들 수 있었으며, 나노크기에도 불구하고 일반적인 전기유변 특성을 보였다. 입자 건조시 입자들의 응집이 보였는데, 그러한 응집을 방지하는 것이 앞으로 나아갈 방향이다.

Table 3-1-1 PA layer thickness and electrical properties of PA-PMMA and PA

Smample code	PA layer thickness (nm)	Weight percent of PA	Conductivity (S/cm)	Dielectric constant
PA-PMMA 4	11	3.6	3.2×10^{-10}	6.82
PA-PMMA 20	52	17.7	8.0×10^{-9}	15.75
PA		100	1.0×10^{-11}	6.99

Table 3-1-2 Parameters in eqn. (3-1-11) obtained via the dielectric spectra of electrorheological fluids

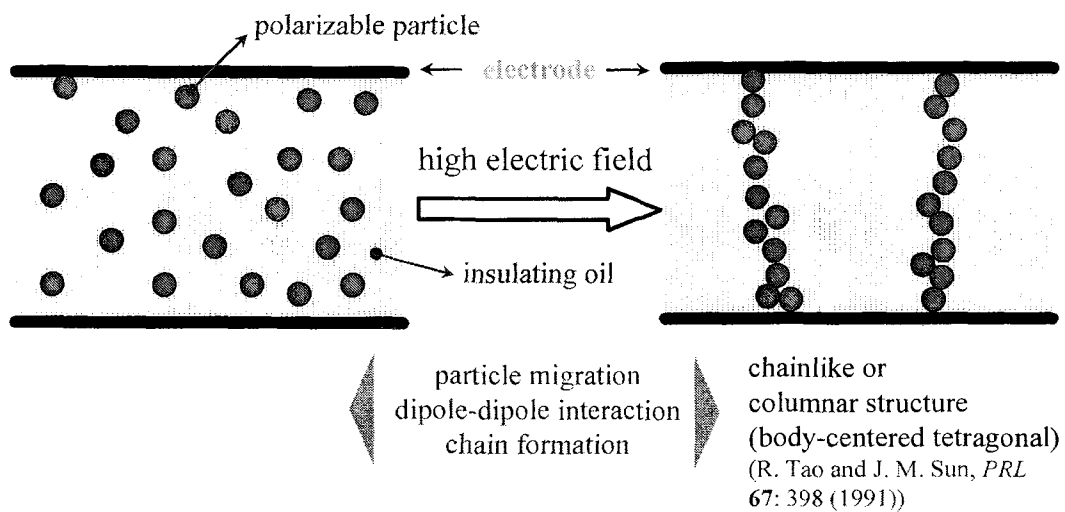
ER fluids	ϵ_0	ϵ_∞	$\Delta\epsilon = \epsilon_0 - \epsilon_\infty$	λ (s)	α
PA-PMMA4	3.6	2.72	0.88	0.002	0.50
PA-PMMA20	4.2	2.72	1.48	0.020	0.50
PA	5.7	2.96	2.74	0.040	0.41

Table 3-1-3 $\sigma_{dc}(RT)$ and the Slope of $\sigma_{dc}(T)$, T_o of the PAN-DBSA and PAN-DBSA/clay samples

Molar ratio (M)	PAN-DBSA		PAN-DBSA/clay	
	$\sigma_{dc}(S/cm)$	$T_o(K)$	$\sigma_{dc}(S/cm)$	$T_o(K)$
0.5	2.16	4500	0.19	8500
1.25	8.34	900	0.25	6600
1.5	0.33	2300	0.64	4800
2	0.32	4500	1.5	3600

Table 3-1-4 Dispersion polymerization of aniline with various weight fractions of PMVEMA stabilizer

Sample	PMVEMA	PMVEMA	pH
PANI-48	5.52	48	0.85
PANI-61	6.9	61	0.80
PANI-94	10.19	94	0.80



Winslow effect

(W. M. Winslow, *J. Appl. Phys.* 20: 1137 (1949))

Fig. 3-1-1 Scheme of electrorheological behavior

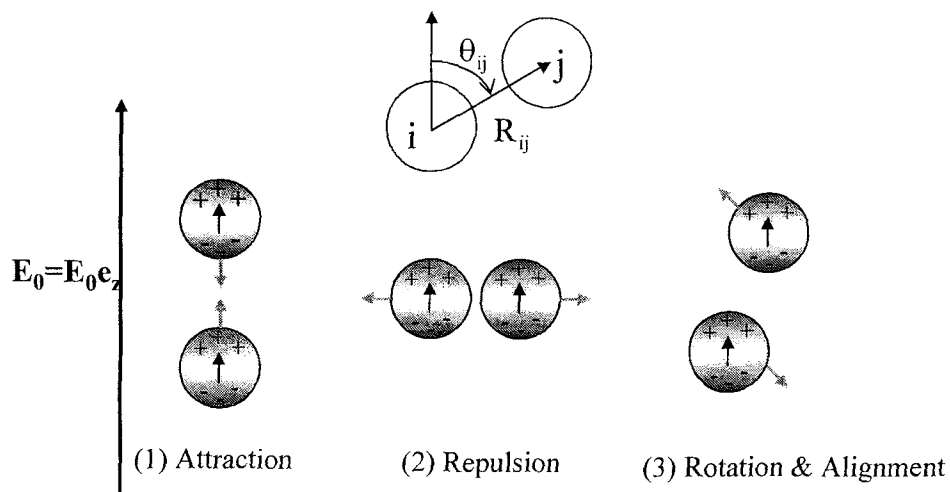


Fig. 3-1-2 Coordinate system for a pair of particles in electric field

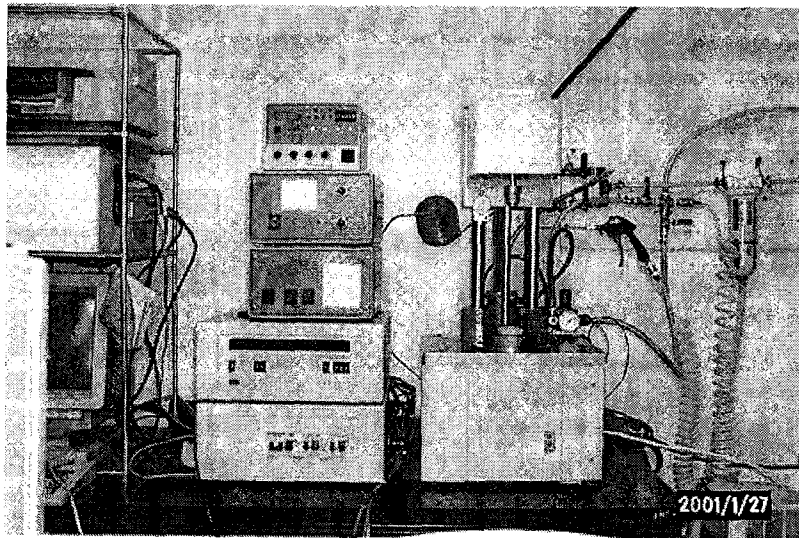


Fig. 3-1-3 The photograph of γ rheometer equipped with high voltage generator

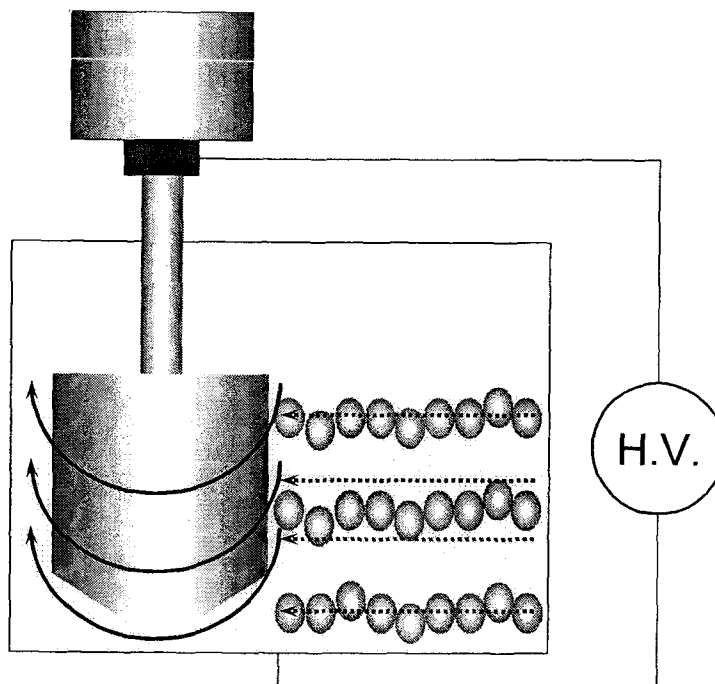


Fig. 3-1-4 The scheme of alignment of particle under applied electric field

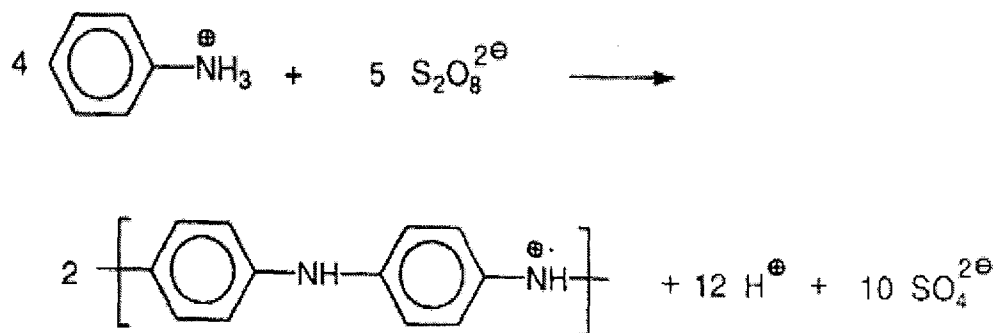


Fig. 3-1-5 Overall reaction of oxidation polymerization of PANI

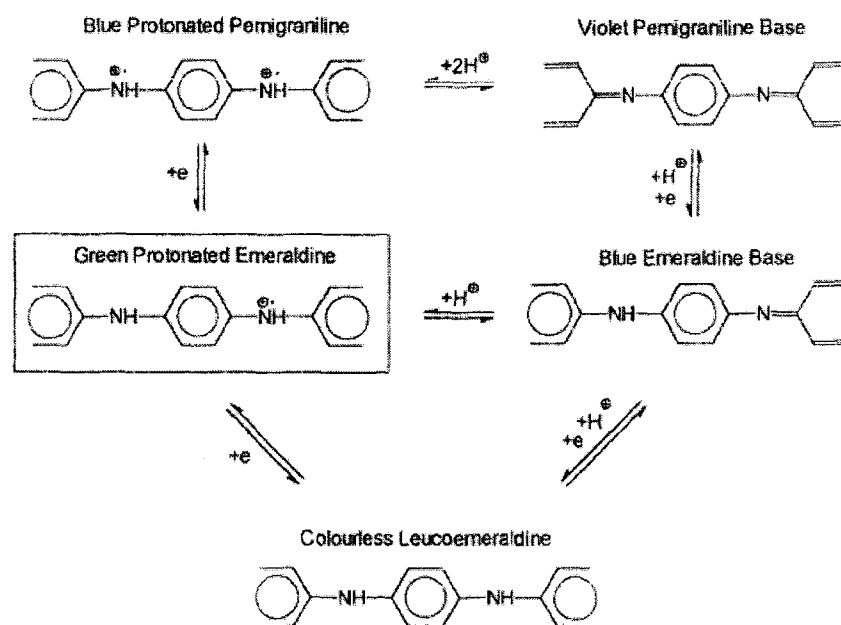


Fig. 3-1-6 PANI forms and their interconversions

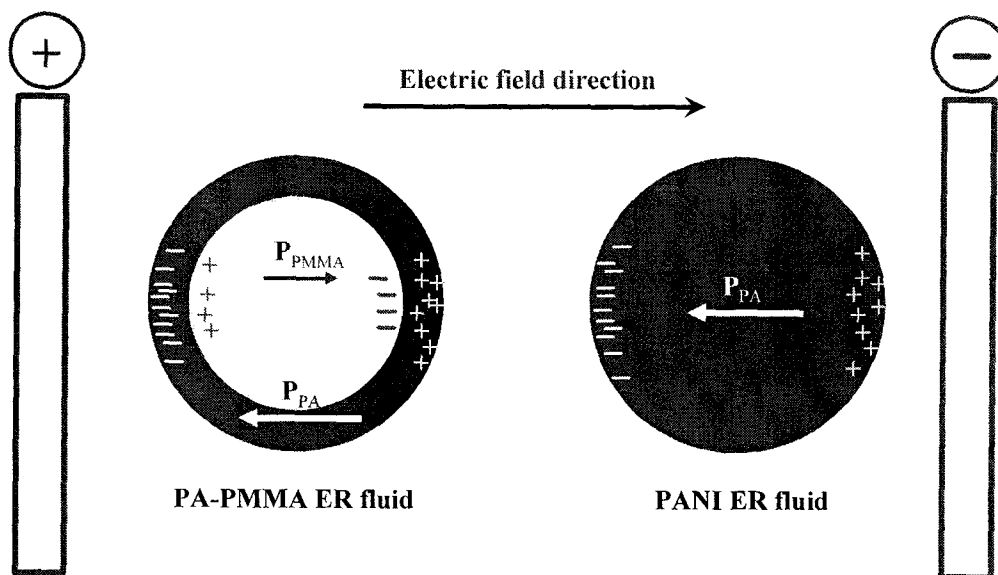


Fig. 3-1-7 Schematic comparison for polarization behavior between PA-PMMA and PANI particles under an electric field

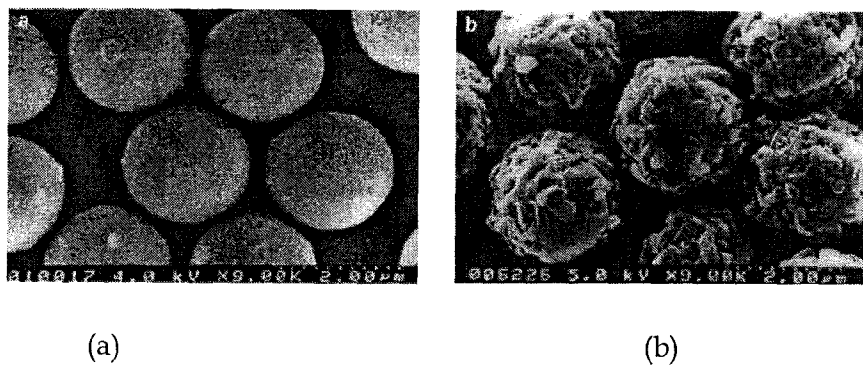


Fig. 3-1-8 Scanning electron microscopy photos of (a) PMMA seed particles and (b) PA-PMMA20 particles

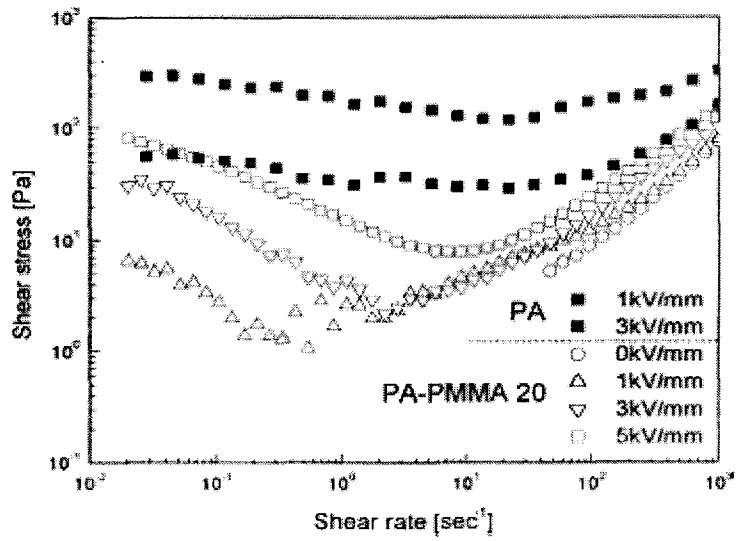


Fig. 3-1-9 Shear stress versus shear rate for PA and PA-PMMA based electrorheological fluids under various electric field strengths

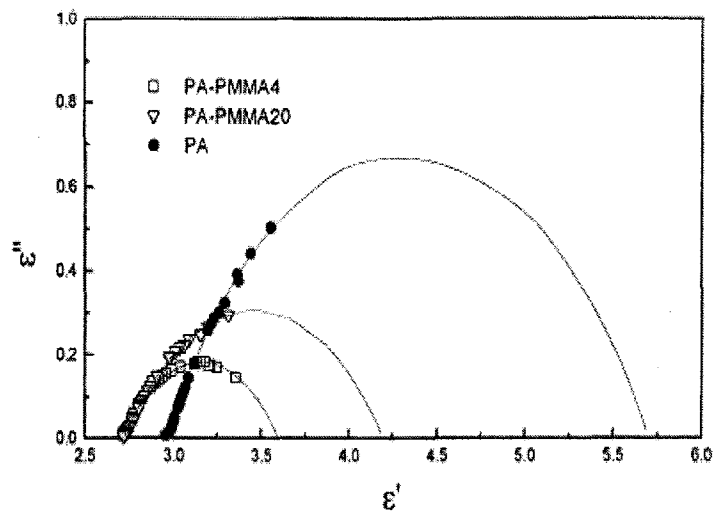


Fig. 3-1-10 Cole-Cole arc of electrorheological fluids

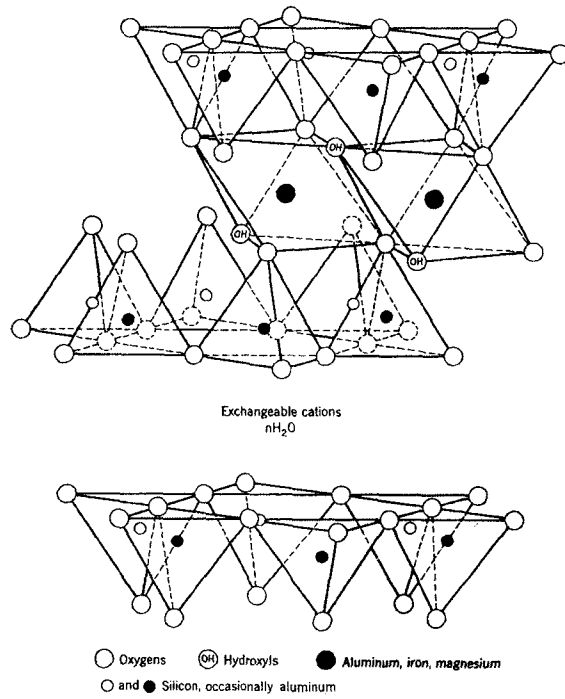


Fig. 3-1-11 Structure of smectite group clay

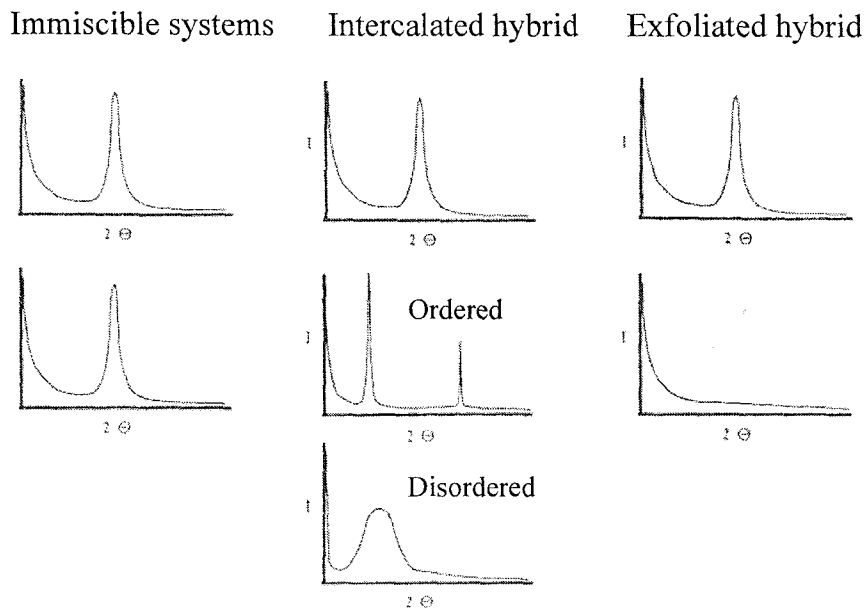


Fig. 3-1-12 XRD pattern of polymer/clay nanocomposite

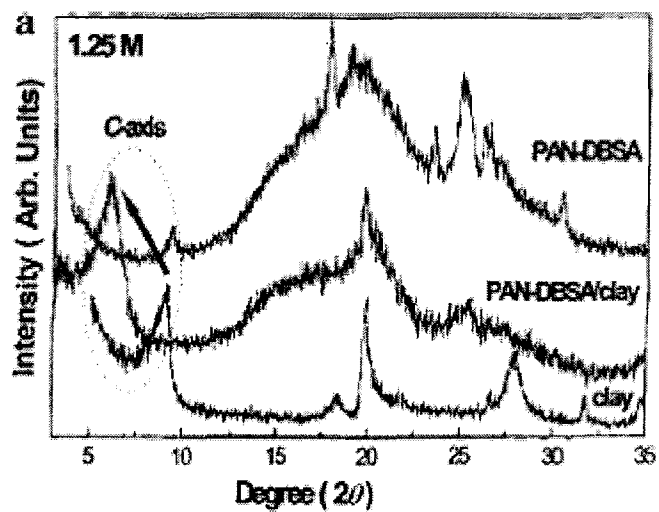


Fig. 3-1-13 Comparison of XRD patterns for the clay, PAN-DBSA and PAN-DBSA/clay samples

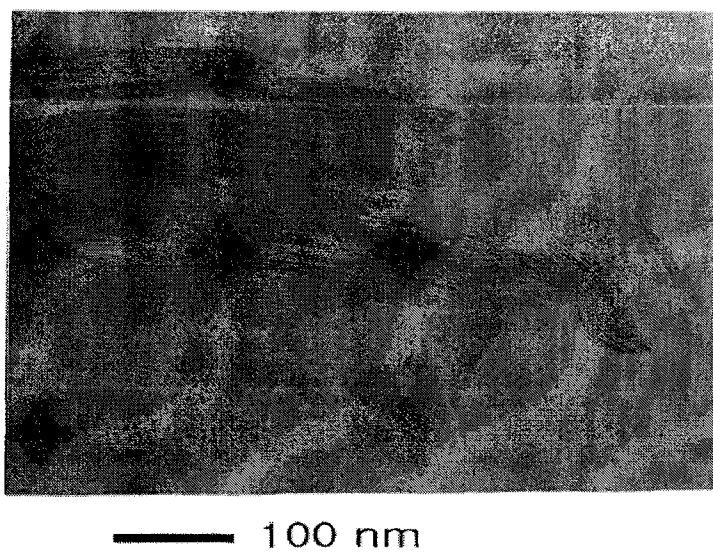


Fig. 3-1-14 TEM photograph of the nanocomposite of PAN-DBSA/clay sample

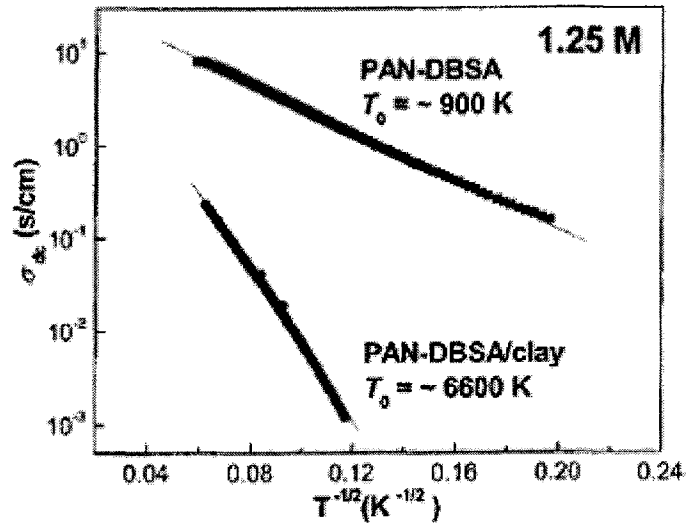


Fig. 3-1-15 Temperature dependence of σ_{dc} of PAN-DBSA and PAN-DBSA/clay samples

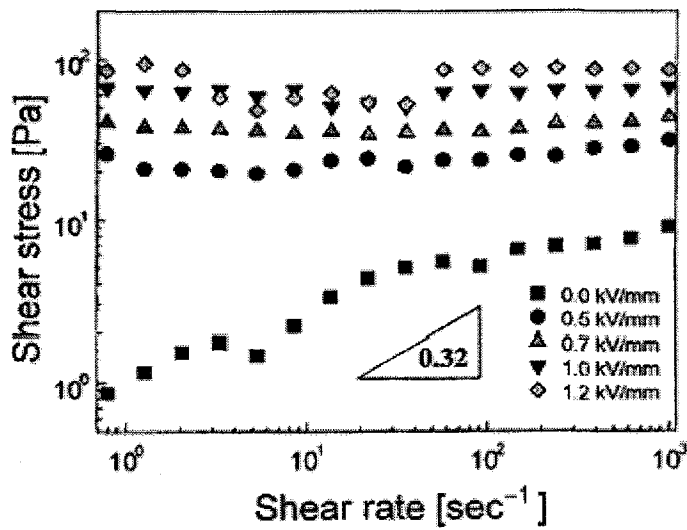


Fig. 3-1-16 Shear stress versus shear rate of PAN/clay composite suspensions at various electric field strengths

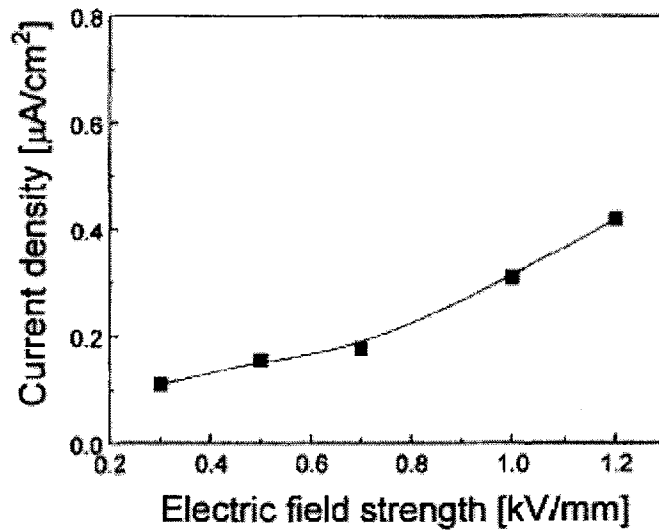


Fig. 3-1-17 Change in current density with varying electric field strengths

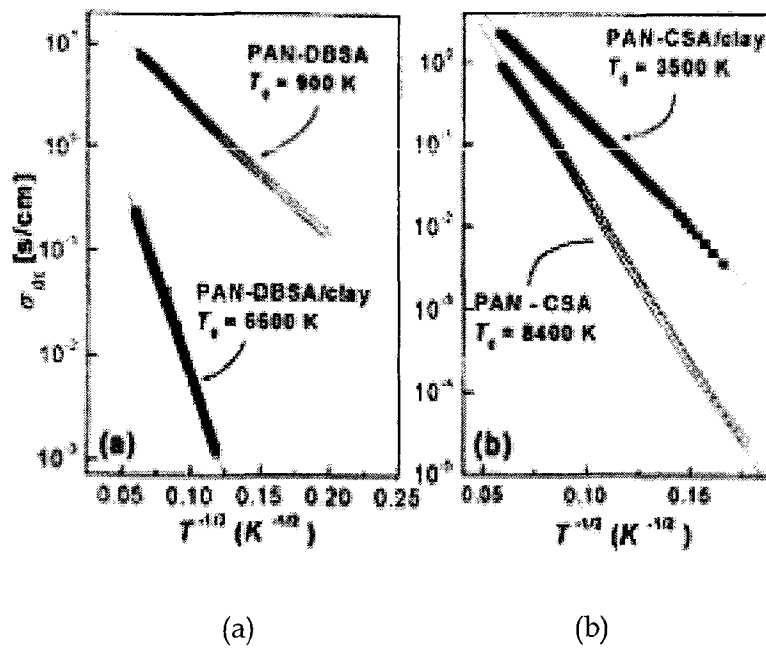


Fig. 3-1-18 Comparison of temperature dependence of σ_{dc} of (a) PAN-DBSA and PAN-DBSA/clay and (b) PAN-CSA and PAN-CSA/clay

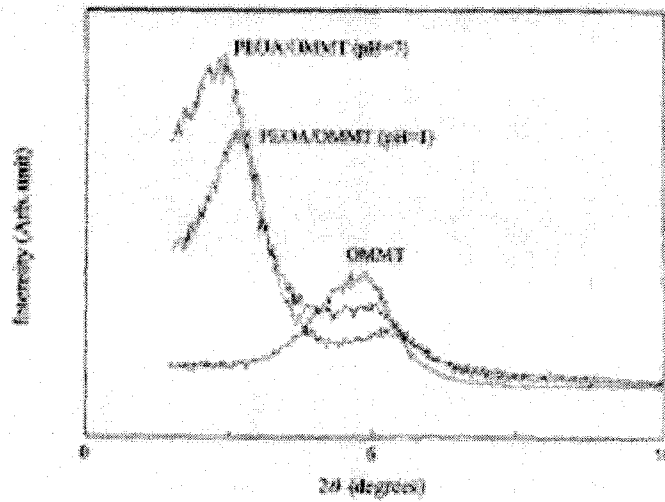


Fig. 3-1-19 XRD pattern of PEOA/clay nanocomposite

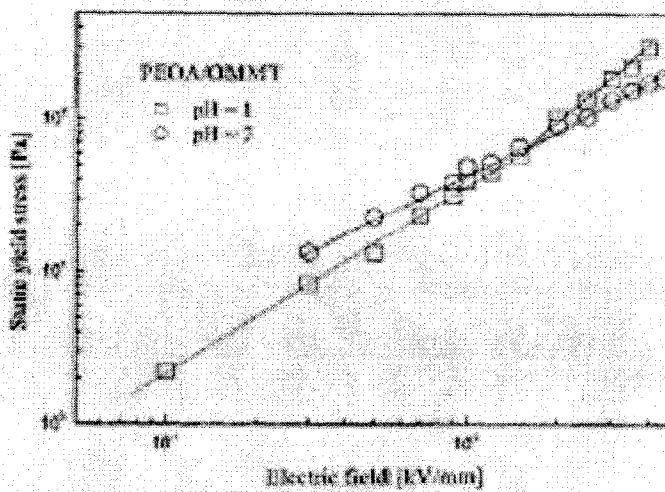


Fig. 3-1-20 Static yield stress versus electric field strength for PEOA/organoclay nanocomposite suspensions

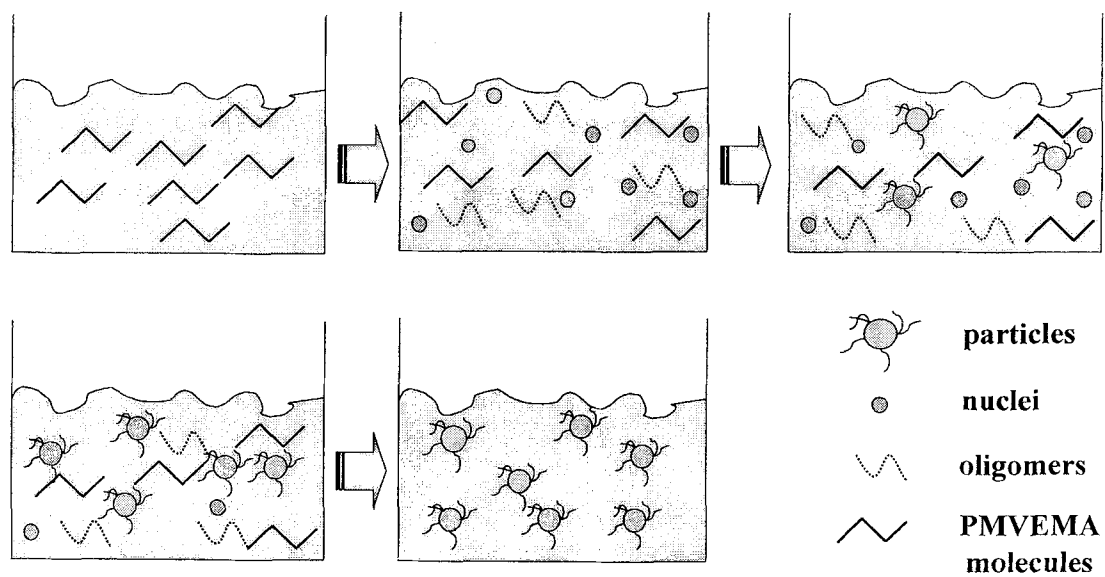


Fig. 3-1-21 The scheme of formation of PANI particles with PMVEMA stabilizer

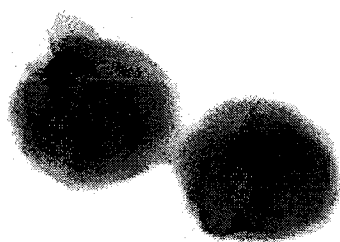


Fig. 3-1-22 A TEM photo of the PANI-48 PMVEMA dispersion

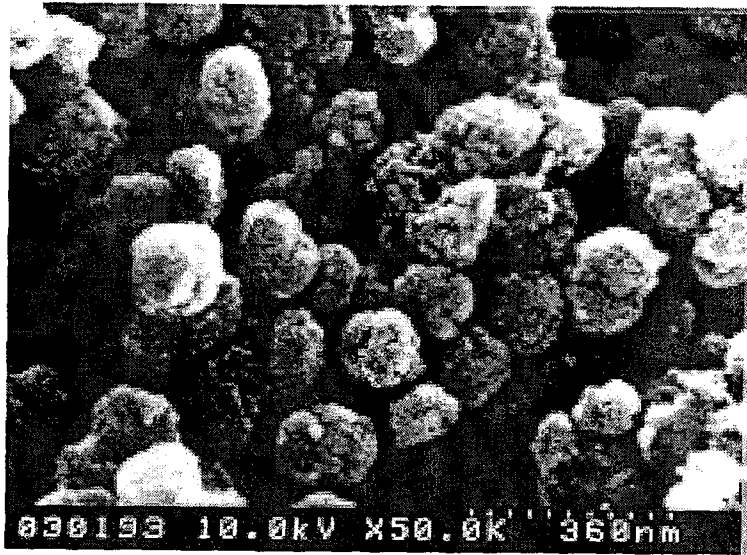


Fig. 3-1-23 A SEM photo of dried PANI-48 PMVEMA

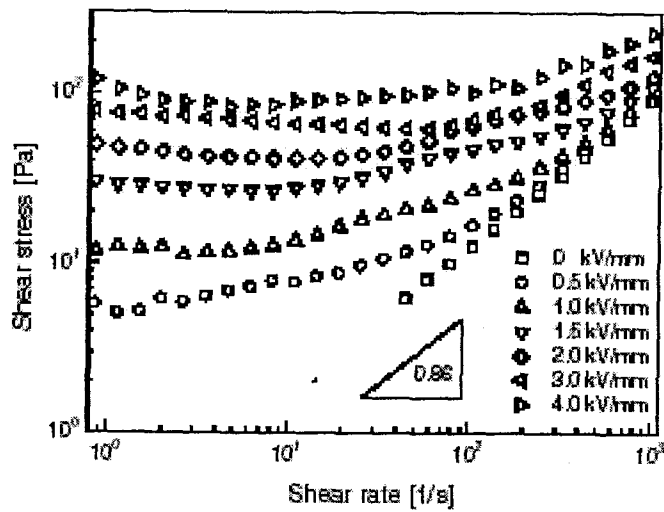


Fig. 3-1-24 Shear stress versus shear rate for 15wt% of PANI-48

제2절 ER 응용장치의 설계 및 해석기술

1. ER 유체의 히스테리시스 규명

ER 유체는 전기장 인가 시 부유 입자들이 체인형 구조를 형성하여 항복전단응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체로 고려된다. 그러나 보편적인 빙햄 모델은 간단하기는 하나 실제 ER 유체의 히스테리시스 거동을 표현하기에는 여러 가지 한계가 있다. 현재까지 ER 유체의 히스테리시스 연구는 댐퍼 등 ER 응용장치의 히스테리시스 모델 구축에 그 초점이 맞추어져 오고 있으며, 유체 자체의 히스테리시스 현상에 대한 규명은 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 세계 최초로 이를 규명하고 더욱 정확한 ER 유체의 모델을 구축하기 위해 프라이작(Preisach) 모델을 도입하였으며, ER 유체의 전단응력 추적제어를 수행하였다[39,40].

가. ER 유체의 히스테리시스

Fig. 3-2-1(a)의 현미경 사진은 등방향으로 분산된 ER 입자가 전기장 부하 시 체인형 구조를 형성함으로써 이방향의 역학적 성질로 바뀌게 되는 것을 보여준다. 이와 같이, ER 유체는 전기장 부하에 의해 항복응력을 갖게 되며, 이 때의 전단응력은 유체의 점성에 의한 전단응력과 전기장 부하에 의하여 연속적으로 변화되는 ER 유체의 항복응력의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 거동은 일반적으로 빙햄 모델로 표현되고, 수학적으로 표현하면 다음과 같다[41].

$$\begin{aligned}\tau &= \eta\dot{\gamma} + \tau_y(E) \\ \tau_y(E) &= aE^b\end{aligned}\quad (3-2-1)$$

여기서, η 는 유체의 점성계수, $\dot{\gamma}$ 은 유체의 전단속도비, E 는 ER 유체에 부하되는 전기장을 나타내며, 이 때 항복응력은 전기장에 따라 지수적으로 증가한다. 하지만, ER 유체는 유체 자체의 특성에 기인하는 히스테리시스 현상을 내포하고 있으며, 이러한 현상은 부하 전기장의 세기와 전단속도비에 의한 체인구조의 형성과 파괴에 따라 나타나게 된다.

Fig. 3-2-1(b)는 본 연구에서 조성하여 사용된 PMA계 ER 유체의 히스테리시스 특성을 실험을 통하여 확인한 것이다. 일반적으로 ER 유체는 온도에 따라 그 특성이 변하는 것으로 알려져 있으므로, 그에 따른 히스테리시스 현상의 변화도 확인하기 위해 항온 장치를 이용하여 설정온도를 유지하도록 하였다. 측정 결과로부터 전기장의 증감에 따른 ER 유체의 히스테리시스 현상을 극명하게 확인할 수 있으며, 온도에 따라 히스테리시스 루프에 왜곡이 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉, 온도가 감소함에 따라 히스테리시스는 점차 증가하여 10℃에서 가장 큰 히스테리시스를 나타낸다. 그리고 유체의 최대 전단응력은 온

도 증가에 따라 함께 증가하여 60℃에서 가장 큰 전단응력을 가지는 것을 보여준다.

나. ER 유체 히스테리시스의 프라이작 특성

본 연구에서는 이러한 ER유체의 히스테리시스 거동을 표현하기 위해 대표적인 강자성 재료의 히스테리시스 모델인 프라이작 모델을 도입한다. 즉, 전기장인가에 따른 ER 입자의 전기 분극에 의해 형성되는 체인 클러스터의 집합으로 ER 유체가 구성된다고 가정하고 각 체인 클러스터의 생성과 파괴 현상을 히스테리시스 릴레이로 표현하는 것이다. 이를 위해, ER 유체의 히스테리시스 거동이 프라이작 모델의 두 가지 특성(마이너루프 특성, 와이핑아웃 특성)[42,43]을 만족하는지를 실험을 통해 확인하였다.

- 마이너루프 특성: 페루프를 형성하는 입력 상한 값과 하한 값에 의해 형성되는 두 개의 마이너루프가 모양과 크기에서 서로 일치하여야 한다.
- 와이핑아웃 특성: 최근의 큰 극한값은 그 이전의 작은 극한값들이 현재 값에 미치는 영향을 소거하여야 한다.

Fig. 3-2-2는 이를 검증하기 위한 실험장치의 개략도이다. 전단응력을 측정하기 위해 모터와 직결된 회전형 토오크 센서와 동심축을 갖는 실린더로 구성된 couette형 전기점도계가 적용되었으며, 항온 장치를 이용하여 온도조건을 설정하고 유지하였다. 내부 실린더와 외부 실린더의 반경은 각각 12.5mm와 13.56mm이며, 전극의 길이는 37.5mm이다. 그리고 내부와 외부 실린더 사이의 간극은 1.06mm이다. 내부 실린더는 회전하고 외부 실린더는 고정되어 있는 형태이며, 전기장의 부하에 의해 발생하는 토오크는 모터와 직렬로 연결되어 있는 토오크 트랜스듀서를 통해 측정하여 전단응력을 구하도록 되어 있다. 이때 전단 속도비는 $1s^{-1}$ 로 고정되었다. ER유체를 조성하기 위해 사용된 실리콘 오일의 점도는 30cS, 입자 중량비는 15%이며, PMA 입자는 메틸아닐린 단위체와 HCl, APS(ammonium peroxy sulfate)를 화학적으로 산화중합 반응시킨 후 NaOH를 이용하여 pH 9로 맞추어 조성한 것이다[44].

Fig. 3-2-3(a)는 30℃의 온도조건 하에서 마이너루프 실험을 위해 인가된 전기장의 궤적과 측정결과를 나타낸 것이다. 측정된 두 마이너루프들은 만족할만한 수준에서 서로 잘 일치하고 있다. Fig. 3-2-3(b)는 와이핑아웃 실험을 위해 인가된 전기장과 그 결과이며, 두 구간으로 나뉘어진 전기장은 첫 번째 구간(a)에서 삼각파가 선형적으로 감소하며 세 개의 최대값을 가지도록 궤적이 구성되어 있고, 이후 두 번째 구간(\bar{a})에서 다시 같은 궤적이 반복된다. 측정 결과로부터 첫 번째 구간에서의 최대값($a_{1,2,3}$)은 두 번째 구간에서의 값($\bar{a}_{1,2,3}$)과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 히스테리시스에 영향을 미치던 최대값($a_{1,2,3}$)은 더 큰 입력 값인 두 번째 구간의 최대값(\bar{a})에 의해 그 영향이 소거되어 구간 \bar{a} 의 값들에는 더 이상 영향을 미치지 못함을 의미한다. 이러한 결과로부터 PMA계 ER 유체가 프라이작 모델의 주요한 특성들인 마이너루프 특성과 와이핑아웃 특성을 충분히 만

족함을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 프라이작 모델은 ER 유체의 히스테리시스 거동을 매우 잘 기술할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 프라이작 모델을 이용한 ER유체의 히스테리시스 모델을 구축하였다.

다. 프라이작 히스테리시스 모델구축 및 검정결과

본 연구에서 PMA계 ER 유체의 히스테리시스 거동을 기술하기 위해 채택된 프라이작 모델을 수학적으로 표현하면 다음과 같다[42].

$$\tau_y(t) = \iint_P \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[E(t)] d\alpha d\beta \quad (3-2-2)$$

여기서, $\gamma_{\alpha\beta}$ 는 히스테리시스 릴레이, P 는 프라이작 평면이며, $E(t)$ 와 $\tau_y(t)$ 는 각각 전기장과 항복응력을 나타낸다. 그리고 $\mu(\alpha, \beta)$ 는 가중함수로서 전체 히스테리시스에서 개별 릴레이가 차지하는 가중치이며, α 와 β 는 각각 릴레이를 상하로 전환시키는 입력 값이다. 전기장 입력이 시간에 따라 변하면 개별 릴레이들은 입력 값의 크기에 따라 상하로 전환되어 출력값을 결정하고, Fig. 3-2-4(a)와 같이 가중치를 고려하여 모든 릴레이들의 출력을 더하면 전체 시스템의 출력이 된다. ER유체에 적용될 수 있는 가장 간단한 히스테리시스 릴레이는 Fig. 3-2-4(b)와 같다. ER유체의 항복응력이 나타내는 히스테리시스 루프는 입력(전기장)과 출력(항복응력) 그래프 상의 제 1사분면에 항상 존재하므로, 릴레이는 0과 1의 출력 값을 갖도록 설정할 수 있다.

Fig. 3-2-5(a)는 프라이작 모델에서 전기장 입력의 한 예이다. 입력 전기장이 점진적으로 α_1 까지 증가한 후 β_1 으로 감소하면서 메이저루프 내에 하강 곡선을 만든다. 이러한 하강 곡선은 히스테리시스 출력의 변화와 함께는 프라이작 평면에서 삼각형 영역 Ω 가 감소하게 한다. 따라서 출력의 변화로 함수 $T(\alpha_1, \beta_1)$ 를 정의할 수 있다.

$$T(\alpha_1, \beta_1) = \tau_y^{\alpha_1} - \tau_y^{\alpha_1\beta_1} = \iint_{\Omega} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (3-2-3)$$

Fig. 3-2-5(b)와 같은 일련의 입력값들의 배열을 보여주는데, 이러한 입력에 대해 본 연구에서는 실험 데이터로부터 수치적으로 계산된 프라이작 함수를 적용하여 ER 유체의 프라이작 모델을 구축하였다. 여기서, P_k 는 사다리꼴 Q_k 의 집합으로 표현될 수 있으며, 기하학적으로 각각의 사다리꼴의 면적은 $T(\alpha_k, \beta_{k-1})$ 와 $T(\alpha_k, \beta_k)$ 로 형성되는 삼각형들의 차이로 표현될 수 있다.

$$\tau_y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)} \int_{\beta_k}^{\alpha_k} \int_{\beta}^{\alpha} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad \forall (\alpha_k, \beta_k) \in Q_k$$

$$\int_{\beta_k}^{\alpha_k} \int_{\beta}^{\alpha} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k) \quad \forall (\alpha_k, \beta_k) \in Q_k \quad (3-2-4)$$

따라서, 항복응력은 사다리꼴의 면적을 모두 더하여 실험 데이터로부터 결정되는 값으로 표현할 수 있으며, 최종 입력이 증가하고 있는 경우와 감소하고 있는 경우를 고려하면 히스테리시스 출력은 다음과 같이 수치적으로 표현된다[45,46].

$$\tau_y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k)] + T(E(t), \beta_{n(t)-1}), \quad \text{for increase}$$

$$\tau_y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k)] + [T(\alpha_{n(t)}, \beta_{n(t)-1}) - T(\alpha_{n(t)}, E(t))], \quad \text{for decrease} \quad (3-2-5)$$

프라이작 모델의 수치적 적용을 위해 실험을 통해 측정된 FOD(first order descending) 데이터로부터 프라이작 평면내의 유한한 격자점 상에서 $T(\alpha_k, \beta_k)$ 를 구해야 한다. 실제적으로 유한한 수의 격자점과 그에 상응하는 유한한 측정값 데이터는 실제 적용 시 격자점을 형성하지 않는 전기장 입력 값에 대해 측정 데이터를 보유하지 못하는 상황을 발생시킨다. 따라서 보간함수를 적용하여 입력 전기장이 격자점 상에 존재하지 않을 때는 다음과 같이 $\tau_y^{\alpha_k, \beta_k}$ 를 구하고, 이로부터 $T(\alpha_k, \beta_k)$ 를 계산한다.

$$\tau_y^{\alpha_k, \beta_k} = c_0 + c_1 \alpha_k + c_2 \beta_k + c_3 \alpha_k \beta_k, \quad \text{for square cells}$$

$$\tau_y^{\alpha_k, \beta_k} = c_0 + c_1 \alpha_k + c_2 \beta_k, \quad \text{for triangular cells} \quad (3-2-6)$$

본 연구에서 제안한 모델을 검증하기 위해 FOD 곡선을 실험을 통해 구하였으며, Fig. 3-2-6(a)는 FOD 곡선을 측정하기 위해 인가된 전기장을 나타낸다. 전기장의 범위는 $0kV/mm$ 에서 $5kV/mm$ 이며, 모두 10개의 구간으로 분할하였다. 먼저, 전기장은 각 구간의 최대값으로 상승한 후 계단입력으로 $0.5kV/mm$ 씩 감소하여 20초 동안 일정하게 유지함으로써 정상상태에 도달하도록 하였다. 그리고 각 계단입력 마다 항복응력을 측정하여 FOD 데이터를 구한 후 다음 계단입력을 인가하였으며, 이를 각 구간에 대해 반복하도록 하였다. Fig. 3-2-6(b), (c)는 각각 공칭온도와 섭동온도에서 구한 FOD 곡선을 보여주며, 각 FOD 곡선은 66개의 데이터와 10개의 곡선으로 구성되어 있다. Fig. 3-2-6(d)는 적용된 빙햄모델을 구하기 위해 측정된 ER 유체의 빙햄 특성이며, 일반적으로 적용되는 $30^\circ C$ 의 온도조건 하에서 측정하였고, 이 때 $\tau_y(E)$ 는 $21.3E^{1.7}$ 이다.

Fig. 3-2-7(a)는 히스테리시스 추정 결과를 확인하기 위해 인가된 전기장의 궤적이다. 먼

저, Fig. 3-2-7(b)는 30℃의 온도조건에서 실제 값과 추정 값의 히스테리시스 결과를 나타낸다. 결과로부터 빙햄 모델에 비해 프라이작 모델에 의한 추정결과가 실제 실험결과와 더 잘 일치함을 알 수 있으며 이는 시간이 경과함에 따라 극명하게 나타나고 있다. 그리고 Fig. 3-2-7(c)는 프라이작 모델의 추정오차가 빙햄 모델의 오차보다 현저히 적음을 보여준다. 이때 빙햄 모델과 제안된 프라이작 모델의 최대추정오차는 각각 48.3Pa과 17.3Pa로 나타났다. 그리고 Fig. 3-2-7(d)는 히스테리시스 루프를 나타낸 것이다. 이로부터 프라이작 모델이 PMA 계 ER 유체의 히스테리시스 거동을 잘 추정함을 알 수 있다.

라. 전단응력 추적제어 및 결과

ER 유체를 적용한 시스템에서 요구 전단(또는 항복) 응력에 대한 우수한 추적 성능을 얻기 위해서는 적절한 제어 알고리즘의 적용이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 히스테리시스 보상을 위해 제안된 프라이작 모델을 이용한 역모델 보상기를 구성하여 피드포워드 제어를 하고, 온도에 따른 히스테리시스의 왜곡을 왜란으로 간주하여 간단한 PID 피드백 제어를 동시에 적용함으로써 강건하고 정밀한 추적제어 성능을 얻고자 한다.

Fig. 3-2-8은 역프라이작 모델 보상기와 더불어 PID 피드백 제어가 동시에 적용된 제어 로직을 나타낸 것이다. 요구 전단응력을 추적하기 위해 피드포워드 루프에서 역프라이작 모델에 의한 제어입력 $u_f(k)$ 가 ER 시스템에 인가되고 있다. 이 보상기의 역할을 히스테리시스를 적절히 보상함으로써 추적 성능을 향상시키는데 있다. 그리고 온도변화에 따른 왜란의 영향을 최소화하기 위해 왜란에 의해 나타나는 오차 신호가 PID 제어기에 보내져서 부가적인 제어입력 $u_b(k)$ 가 계산된다. 따라서 최종적인 제어입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다[45].

$$u(k) = u_f(k) + u_b(k)$$

$$u_f(k) = E_d(k) + \Delta E, \quad \Delta E = \sum_{i=1}^m \left(\frac{|\tau_d(k) - \tau_r(k)|_i}{21.3} \right)^{\frac{1}{1.7}}, \quad \text{increase } i \text{ until } |\tau_d(k) - \tau_r(k)| < \varepsilon$$

$$u_b(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{i=1}^k e(k) + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (3-2-7)$$

여기서, $\tau_d(k)$ 와 $E_d(k)$ 는 각각 요구 전단응력 궤적과 요구 전기장을 나타내며, $\tau_r(k)$ 는 요구 전기장에 대해 프라이작 모델로부터 예측된 전단응력이다. 그리고, T_s 와 $e(k)$ 는 각각 샘플링 타임과 오차이며, k_p , k_i , k_d 는 각각 PID 제어기의 비례, 적분, 미분 이득을 나타낸다. 도입된 PID 제어기는 이산화 하여 적용되었으며, Fig. 3-2-9는 제안된 역프라이작 모델 보상기의 순서도를 보여주고 있다.

제안된 제어로직은 실험적으로 구현되었으며, 먼저 역프라이작 모델 보상기만을 사용하여 두 개의 서로 다른 전단응력 요구궤적에 대한 추적성능을 평가하였다. Fig. 3-2-10(a)는

사각 요구케적에 대한 추적제어 응답을 나타낸 것이다. 결과로부터 제안된 역프라이작 모델이 기존의 역빙햄 모델 보상기에 비해 보다 만족스러운 것을 알 수 있다. 각각의 정상 상태 추적오차는 $\pm 5\%$ and $\pm 18\%$ 이내로 나타났다. 3-2-10(b)는 역프라이작 모델 보상기에 의한 입력 전기장이 히스테리시스의 영향을 보상하기 위해 내려가는 계단에서는 적절히 조정되고 있음을 보여준다. Fig. 3-2-11은 사인파 요구케적에 대한 추적제어 응답이다. 역프라이작 모델 보상기에 의해 요구케적을 잘 추적하고 있음을 보여준다. 하지만 역빙햄 모델에 의한 오차는 시간이 지남에 따라 점점 증가하고 있다. 이러한 결과로부터 제안된 역프라이작 모델 제어로직이 ER 유체의 히스테리시스 영향을 효과적으로 보상할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 이러한 개루프 제어로직은 온도환경이 변하는 보다 실제적인 상황에서는 성능의 한계를 가지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 PID 피드백 제어가 역프라이작 모델과 통합되어 적용되었다. 이 때 PID 제어기의 이득, k_p , k_i , k_d 는 각각 0.012, 0.01, 0으로 선택되었으며, 공칭온도 30°C에서 섭동온도 10°C로의 온도 변화에 따른 섭동을 외란으로 간주하였다. Fig. 3-2-12와 13은 서로 다른 두 가지 모양의 케적에 따른 추적 응답을 보여준다. 결과들로부터 역프라이작 모델이나 PID 제어기를 단독으로 적용한 경우 큰 오차나 위상차가 발생하는데 반해, 제안된 제어로직은 온도변화에 따른 외란하에서도 비해 매우 우수하고 강건한 추적성능을 보여주고 있음을 극명하게 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 본 연구에서는 프라이작 히스테리시스 모델을 적용하여 ER 유체의 히스테리시스 거동을 표현할 수 있음을 확인하였으며, 그 모델로부터 구성된 역프라이작 모델 보상기로 ER 유체의 전단(혹은 항복) 응력의 추적제어가 가능함을 입증하였다. 나아가, 온도 환경의 변화와 같은 보다 실제적인 상황을 고려하기 위해 제안된 피드포워드 보상기와 연계된 PID 피드백 제어기를 적용함으로써 외란 하에서도 강건하고 우수한 추적 제어 성능을 도출하였다.

2. ER 응용장치의 히스테리시스 모델

가. 서론

ER(electro-rheological) 유체는 부하 되는 전기장의 강도에 따라 역학적 특성이 변하는 유체를 말하며, 비전도성 용매에 전도성을 갖는 입자들을 분산시킨 콜로이드(colloidal) 용액이다. ER 유체는 전기장 무 부하 시 랜덤구조를 갖고 있는 뉴토니안(Newtonian)유체 특성을 갖지만, 전기장 부하 시 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham)유체로 변하게 된다. ER 유체는 액상이나 고상으로 빨리 변화하는 가역적인 유동성질을 가지고 있으며 전기장의 세기를 조절하여 항복응력을 연속적으로 변화시킬 수 있다. 이러한 특성을 가진 ER 유체를 이용한 자동차용 ER 댐퍼 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[47~49]. ER 댐퍼는 전항복(pre-yield)영역에서 가진 속도가 증가할 때와 감소할 때 댐핑력의 차이를 보이는 이력현상(hysteresis)을 가지고 있다[50,51]. 이러한 특성을 갖는 ER 댐퍼의 설계를 위해서는 전기장에 따른 ER 댐퍼의 거동을 정교하게 묘사할 수 있는 모델의 수립이 요구

된다. 일반적으로 적용되고 있는 빙햄모델은 간단하지만, ER 댐퍼가 나타내는 이력현상은 표현하지 못한다. 한편, 부하되는 자기장에 의하여 항복응력이 변화하는 MR(magneto-rheological) 유체를 이용한 댐퍼의 경우에도 ER 댐퍼와 비슷한 이력현상을 보이고 있다[51]. 이러한 ER 및 MR댐퍼의 이력현상을 해석하기 위하여 nonlinear hysteretic biviscous모델[50,51], nonlinear viscoelastic plastic모델[50], Bouc-Wen모델[52], polynomial모델[53] 등이 제안되었다.

본 연구에서는 실제 중형급 승용차에 설치될 수 있는 댐퍼의 제원을 근거로 한 실린더형 ER 댐퍼를 제작하였으며, 단품실험을 통하여 부하되는 전기장의 크기에 따른 댐핑력의 변화를 고찰하였고, 가진 속도 변화에 의하여 댐핑력의 이력현상이 나타나고 있는 것을 실험적으로 확인하였다. 이력현상을 표현하지 못하지만 단순한 Bingham 모델, 그리고 ER 댐퍼의 상하부챔버와 가스챔버의 컴플라이언스(compliance) 효과가 고려된 유체역학적 모델링에 근거한 Hydraulic모델을 이용하여 ER 댐퍼의 댐핑력 모델링을 수행한 후, 실험결과와 두 모델을 비교함으로써 각 모델의 장단점과 타당성을 검증하였다.

나. ER 댐퍼의 이력현상

본 연구에서 제안된 실린더형 ER 댐퍼의 구조를 Fig. 3-2-14에 도시하였다. ER 댐퍼는 외측실린더, 내측 실린더 그리고 피스톤으로 구분할 수 있으며, 내외측 실린더 사이에는 ER유체가 유동하도록 덕트(duct)로 구성되었다. 내측 실린더와 외측실린더는 각각 (+), (-) 전원이 연결되어 전극사이를 유동하는 ER유체에 전기장을 부하하는 전극판의 역할을 한다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부챔버, 아래쪽을 하부챔버로 정의하였고, 이 두 챔버에 ER유체가 충전되어 있다. 외부가진에 의하여 피스톤로드(piston rod)와 피스톤은 상하 운동을 하게 되어 한쪽 챔버의 유체는 내외측 실린더 사이에 구성된 원형 덕트를 통하여 다른 쪽의 챔버로 유동하게 된다. 하부챔버는 크게 두 부분, 즉 댐퍼 내부의 피스톤 하부와 댐퍼 외부의 가스챔버로 구성된다. 부동피스톤(floating piston) 타입 가스챔버는 급격한 피스톤 로드 운동으로 하부챔버로 전해지는 급격한 압력변화를 흡수하고 이때 발생할 수 있는 기포 등의 영향을 방지하는 역할과 열팽창에 따른 유체 부피를 수용하는 축압기(accumulator)로 작동하게 된다.

제작된 ER 댐퍼의 전극길이 300mm, 외측 실린더 내경 37mm, 내측 실린더 외경은 35mm이다. 전극간격은 유체의 원활한 유동과 고전압증폭기의 용량을 함께 고려하여 1.0mm로 설계되었다. ER 댐퍼의 댐핑력 시험을 위하여 유압서보밸브로 구동되는 댐퍼 시험기를 구성하여 댐퍼를 가진시키며, 전기장 변화에 따른 댐퍼의 댐핑력 변화를 고찰하였다. 실험장치 구성과 실험과정은 참고문헌[53]에 자세히 기술되어 있으므로 생략한다. 실험조건으로 가스챔버의 가스압은 피스톤로드의 최대 신장상태에서 30bar이며, 댐퍼의 가진 변위는 진폭20mm의 정현파형으로 설정하였다. ER 댐퍼가 인장(rebound) 운동을 할 때의 댐핑력을 (+)값으로, 반대방향인 압축(jounce)운동일 때의 댐핑력을 (-)값으로 표시하였다.

Fig. 3-2-15는 1.4Hz의 정현파로 ER 댐퍼를 가진하여 얻은 댐핑력을 피스톤 로드의 속도에 대하여 도시한 것이다. 전기장 무 부하 시 최대 200N의 댐핑력이 발생되었으나, 4kV/mm의 전기장 부하 시 최대 1200N의 댐핑력이 발생되어 약 1000N의 제어 가능한 댐핑력을 얻을 수 있었다. 실험결과에서 볼 수 있듯이 속도의 부호가 바뀌는 낮은 속도 영역에서 이력현상이 나타나고 있다. 이러한 ER 댐퍼의 이력현상에 영향을 미치는 요인은 여러 가지가 있는데 그 중에 ER 유체 자체의 특성에 의한 영향이 있다. 전기장이 부하되면 ER 유체내의 입자는 체인형 구조를 형성하는데, 유체의 속도가 증가함에 따라 체인형 구조가 끊어지는 상태와 유체의 속도가 감소함에 따라 체인형 구조가 형성되는 상태 사이의 물리적 현상이 다르기 때문에 이력현상이 발생하게 되는 것이다. 한편, 가스챔버의 압력 및 ER 유체의 압축성 즉 스프링 특성에 의한 영향이 있다. 또한, ER 유체의 관성, 실링 부분의 동적마찰에 의한 영향 등이 있다.

다. 댐핑력 모델

(1) Bingham 모델

ER 유체의 거동은 일반적으로 다음과 같은 빙햄 모델로 표현할 수 있다[54].

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y(E) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}), \quad \tau_y(E) = \alpha E^\beta \quad (3-2-8)$$

여기서, τ 는 ER 유체의 전단응력, η 는 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 전단비, $\tau_y(E)$ 는 항복전단응력으로서, 전기장 E 에 대하여 지수함수적으로 증가한다. 비례상수 α 와 지수 β 는 ER 유체에 사용된 용매와 입자의 종류, 조성비, 조성환경 등에 의하여 결정되는 고유 특성치이다. 빙햄 모델을 이용하여 ER 댐퍼의 댐핑력을 표현하기 위하여, ER 유체는 비압축성으로 가정하였고, 각 챔버의 내부압력은 모든 방향으로 균일하게 작용하여, 유로형상에 따른 압력손실은 없는 것으로 가정하였다. 빙햄 모델에 기초한 ER 댐퍼의 댐핑력($F(t)$) 특성을 Fig. 3-2-16에 나타내었으며, 댐핑력에 대한 지배방정식은 다음과 같다[51,53].

$$F = c_0 \dot{x} + F_{ER}(E) \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (3-2-9)$$

여기서 c_0 는 댐핑계수, v_p 은 피스톤 속도, $F_{ER}(E)$ 은 전기장 부하를 통하여 조절되는 가변댐핑력으로서 전기장 (E)의 함수이며, 전극 설계변수와 식(3-2-8)에 나타낸 빙햄 모델을 이용하여 예측 될 수 있다.

(2) Hydraulic 모델

Fig. 3-2-17은 본 연구에서 제안한 hydraulic 모델의 hydraulic-mechanical 선도를 나타낸다. Hydraulic 모델은 ER 댐퍼의 유체역학적 모델링을 통하여 하·상부챔버의 컴플라이언스 (C_1, C_2), 가스챔버의 컴플라이언스 (C_g), 전극사이를 유동하는 ER 유체의 관성 (I_f) 이 고려된다. 또한, 유체점성에 의한 유동저항과 전기장에 의한 가변댐핑력이 ER 유체의 빙햄 모델에 근거하여 Hydraulic 모델에 고려된다.

먼저, ER 유체가 간극을 통하여 유동할 때 발생하는 전체 압력강하 (ΔP)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = I_f A_f \ddot{x}_f + R_f A_f \dot{x}_f \Delta P_{ER} \text{sgn}(\dot{x}_f) \quad (3-2-10)$$

여기서

$$I_f = \frac{\rho l}{A_f}, \quad R_f = \frac{12\eta l}{bh^3}, \quad \Delta P_{ER} = 2 \frac{l}{h} \tau_y(E) \quad (3-2-11)$$

상기 식에서, P_1 은 하부챔버의 압력, P_2 는 상부챔버의 압력, ΔP_{ER} 은 ER 유체의 항복응력에 의한 압력강하이다. x_f 는 ER 유체 관성의 변위, A_f 는 전극간극의 단면적, l 은 전극 길이, h 는 전극간격, b 는 전극의 폭을 나타낸다. ρ 와 η 는 ER 유체의 밀도와 점성계수이다. 한편, 상부챔버와 하부챔버에서 발생하는 유체유동에 대한 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$C_1 \dot{P}_1 = -A_f \dot{x}_f + A_1 \dot{x} - A_c \dot{y} \quad (3-2-12)$$

$$C_2 \dot{P}_2 = A_f \dot{x}_f - A_2 \dot{x} \quad (3-2-13)$$

$$C_g \dot{P}_g = A_c \dot{y} \quad (3-2-14)$$

여기서, A_1, A_2 는 하·상부챔버에 대한 피스톤면적, A_c 는 가스챔버의 피스톤면적, y 는 가스챔버 내의 부동피스톤의 속도, P_g 는 가스챔버의 압력이다. 식(3-2-12)~(3-2-14)에서, P_1, P_2, P_g, y 를 소거하여 ER댐퍼의 댐핑력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= A_f \Delta P = m_f \ddot{x}_f + c_f \dot{x}_f + F_{ER} \text{sgn}(\dot{x}_f) \\ m_f \ddot{x}_f + c_f \dot{x}_f + F_{ER} \text{sgn}(\dot{x}_f) + k_1 x_f &= k_1 \lambda x \end{aligned} \quad (3-2-15)$$

여기서,

$$A_p \approx \frac{A_1 + A_2}{2}, \quad m_f = I_f A_f A_p, \quad c_f = R_f A_f A_p, \quad F_{ER} = A_p \Delta P_{ER}, \quad k_1 = \left(\frac{A_f A_p}{C_1^*} + \frac{A_f A_p}{C_2^*} \right)$$

$$k_2 = \left(\frac{A_1 A_p}{C_1^*} + \frac{A_2 A_p}{C_2^*} \right), \quad C_1^* = C_1 + C_g, \quad C_2^* = C_2, \quad \lambda = \frac{k_2}{k_1} \quad (3-2-16)$$

상기 식에서 m_f 와 c_f 는 전극 내 ER 유체의 질량과 댐핑을 나타낸다. 식(3-2-15)로 표현된 Hydraulic 모델을 스프링, 댐핑, 쿨롱마찰요소로 표현하여 Fig. 3-2-18에 나타내었다.

라. 결과 및 고찰

(1) Bingham 모델

일반적으로, 빙햄 모델의 파라미터와 전극설계변수로부터 식(3-2-9)에 나타난 ER 댐퍼의 댐핑력 모델파라미터를 예측할 수 있다. 하지만, 예측치와 실험치는 다소 오차를 보이게 되며, 실제 자동차 현가시스템에 댐퍼를 적용할 시에는 실험으로부터 얻어낸 파라미터를 적용하는 것이 보다 적절하다. 따라서, 본 연구에서는 각 모델의 파라미터를 전적으로 실험데이터로부터 도출한다. Matlab의 optimization tool를 이용하여 모델파라미터의 최적화를 수행하였으며, Bingham 모델의 최적화성능지수는 다음과 같다.

$$J(c_0, F_{ER}) = \sum_{k=1}^n [f(t_k) - \hat{f}(t_k)]^2 \quad (3-2-17)$$

여기서, $f(t_k)$ 와 $\hat{f}(t_k)$ 는 각각 시간 t_k 에서 실제로 측정된 댐핑력과 모델파라미터와 가진 조건에 의하여 모델로부터 계산되는 댐핑력을 의미한다.

Fig. 3-2-19는 Bingham 모델의 최적화를 통하여 얻은 모델파라미터를 도시한 것으로서, c_0 가 증가하는 경향을 보이므로, ER 댐퍼의 후향복 댐핑계수가 전기장이 높아짐에 따라 함께 증가하는 것을 알 수 있다. F_{ER} 은 전기장에 대하여 지수함수적으로 증가하고 있다. 한편, 0kV에서의 F_{ER} 은 ER 댐퍼 내부의 실(seal)에서 작용하는 Coulomb마찰에 의한 값이다. 한편, Fig. 3-2-19에 도시된 측정된 댐핑력과 모델로부터 계산된 댐핑력의 차이를 나타내는 오차는 다음의 수식을 이용하였으며, 약 10%로 계산되었다.

$$Error[\%] = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^n [f(t_k) - \hat{f}(t_k)]^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^n [f(t_k)]^2}} \times 100 \quad (3-2-18)$$

Fig. 3-2-20은 Fig. 3-2-19에 나타난 모델파라미터를 이용하여 계산한 댐핑력과 실험으로부터 얻은 댐핑력을 함께 도시하여 비교한 것이다. Bingham 모델의 경우 후항복(post-yield)영역에서의 댐핑력은 실험치와 잘 부합하지만, 속도가 낮은 전항복(post-yield) 영역에서의 이력현상은 표현하지 못하여 속도의 부호가 바뀌는 0m/sec에서 댐핑력의 오차가 급격히 커진다. 결국, Bingham 모델은 ER 댐퍼의 전항복 영역에서의 이력현상을 표현하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이와 같이 Bingham 모델은 ER 댐퍼의 이력현상을 정확하게 표현하지는 못하지만 물리적인 이론에 근거한 모델링 방법이며 다른 이력현상 모델이나 hydraulic 모델에 비하여 매우 간단한 수식으로 구성되므로 제어알고리즘 구현 시 많이 사용되고 있다.

(2) Hydraulic 모델

식(3-2-15)에 나타난 Hydraulic 모델의 파라미터를 구하기 위하여 다음과 같은 성능지수를 도입하였다.

$$J(m_f, c_f, F_{ER}, k_1, k_2) = \sum_{k=1}^n [f(t_k) - \hat{f}(t_k)]^2 \quad (3-2-19)$$

Fig. 3-2-21은 Hydraulic 모델의 최적화된 파라미터를 도시한 것이다. 파라미터 m_f, c_f, k_1 는 증가하거나 감소하는 경향을 보이지 않으며, k_2 (상부챔버의 강성)이 전기장과 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다. F_{ER} 은 식(3-2-16)에서 알 수 있듯이, 전기장에 대하여 지수함수적으로 증가하는 것으로 나타났다. 댐핑력과 모델로부터 계산된 댐핑력의 차이를 나타내는 오차의 계산은 식(3-2-18)을 이용하였으며, 1%이하로 나타나 빙햄 모델보다 정확도가 상당히 높음을 확인할 수 있다. 최적화된 Hydraulic 모델의 파라미터와 가진조건으로부터 계산된 댐핑력을 실험적으로 얻은 댐핑력을 함께 도시하여 Fig. 3-2-22에 나타내었다. 전 속도영역에서 실험치와 모델이 잘 부합하는 것을 확인할 수 있다. 특히, Preyield영역에서 ER 댐퍼의 이력현상이 효과적으로 나타나고 있다. Hydraulic 모델은 물리적 근거로부터 유도된 모델임과 동시에 ER 댐퍼의 이력현상을 잘 나타낼 수 있다. Fig. 3-2-23은 전기장 및 가진조건을 변화시킨 경우의 댐핑력을 앞서 얻은 Hydraulic 모델 파라미터를 이용하여 예측한 결과를 나타낸 것이다. m_f, c_f, k_1 은 산술평균값을 적용하였으며, k_2 는 전기장에 대한 일차함수, F_{ER} 은 전기장에 대한 지수함수로 표현하여, 앞서 시험하지 않은 전기장세기에 대한 파라미터를 추정할 수 있도록 하였다. 이때의 전기장은 2.5kV/mm, 가진변위는 25mm, 가진주파수는 0.8Hz이다. 예측치와 실험치가 잘 부합하는 것을 확인할 수 있다.

마. 결론

본 연구에서는 ER 댐퍼의 댐핑력에 나타나는 이력현상이 표현할 수 있으며, 기계적 요소로 구성되어 물리적 의미를 갖는 Hydraulic 모델을 유도하였다. 실린더 형태의 중형급 승용차용 ER 댐퍼를 제작하여 댐핑력 측정 실험으로부터 얻은 실험데이터를 이용하여, hydraulic모델의 주요 파라미터를 추출할 수 있었다. 또한, 간단한 Bingham 모델과의 비교를 통하여 전향복영역의 이력현상을 정교하게 표현하는 우수성을 입증하였으며, 특정 시험조건에서 얻어진 모델파라미터를 이용하여 다른 가진조건과 전기장세기에서 전향복영역의 이력현상 및 후향복 영역에서의 댐핑력을 우수하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

3. ER 속업소버 설계를 위한 무차원 모델

가. 서론

ER 유체는 부하되는 전기장에 대하여 가역적이고, 신속하게 유변학 적인 변화를 나타낸다. 이는 전기장 세기에 따른 항복응력의 강도를 연속적으로 변화시킬 수 있는 것을 의미한다. 이러한 ER 유체를 이용하여 ER 속업소버를 설계할 수 있으며, ER 속업소버는 다양한 동적 시스템에 적용되어 진동제어에 효과적으로 활용될 수 있다[55~58]. ER 속업소버의 설계변수를 효과적으로 결정하기 위해서는 전기장에 따른 ER 속업소버의 댐핑력을 예측할 수 있는 무차원모델이 필요하여, 지금까지 다양한 무차원모델이 개발되어 왔다 [59~65].

Phillips[59]는 평판사이를 유동하는 ER 유체의 빙햄(Bingham) 유동식을 제안하였다. 이 무차원식을 이용하여 ER 효과에 의한 압력 구배를 예측할 수 있으며, 무차원항복응력, 무차원압력구배, 무차원속도로 구성되어 ER 유체의 빙햄 거동을 해석할 수 있다. Makris et al.[60]과 Gavin et al.[61]은 Phillips가 제안한 무차원식을 이용하여 ER 댐퍼의 댐핑력을 해석하였다. 특히, Makris et al.[60]은 무차원식을 차원식으로 변환하여 ER 유체를 이용한 바이패스밸브의 압력강하량을 예측하였다. 차원식은 많은 설계변수가 복잡하게 구성되어 있어서, 요구되는 댐핑력을 만족시키는 설계변수를 결정하는 것이 수월하지 않지만, 주어진 설계변수를 이용하여 댐핑력이나 압력강하량을 예측하는 것에는 효과적으로 활용될 수 있다. Gavin et al.[61]은 복잡한 형태의 무차원함수를 간단한 일차함수로 근사화시키는 연구를 수행하였으며 근사식의 유효성을 입증하였다. 한편, Gavin[62]은 무차원식을 이용하여 지진에 대비한 대용량 ER 댐퍼를 다양한 형태로 설계하였다. Stanway et al.[55,63]은 무차원수의 개수를 획기적으로 감소시킨 새로운 무차원함수를 개발하여 유동 모드형 ER응용장치의 해석에 활용하였다. 이 무차원함수는 마찰계수, 레이놀즈넘버, 헤드스트롬 넘버로 구성된다. Wereley et al[64,65]은 ER/MR 댐퍼의 등가댐핑계수를 특징으로 하는 무차원식을 제안하였으며, 무차원식은 빙햄 넘버, 무차원 플러그 두께, 면적계수로 구성되어 있다.

본 연구에서는 ER 속업소버의 효율적인 설계를 위하여 무차원해석을 수행하였다. Phillip[59]가 제안한 무차원식에 ER 속업소버 특성을 부여하여 새로운 무차원식을 개발하였다. 제안된 무차원식은 빙햄넘버, 무차원댐핑력, 제어비, 무차원전극변수로 구성된다. ER 속업소버의 설계지표를 설정하기 위하여 1/4차량의 제어성능 해석을 수행하였으며, 이로부터 최대 요구댐핑력과 가변댐핑력을 구하였다. 요구 설계조건을 만족시키는 전극 설계변수를 효율적으로 구하기 위하여 무차원설계방법을 제시한 후, 이에 근거하여 ER 속업소버를 제작하였다. 실험과 해석을 통하여 무차원댐핑력과 제어비를 비교함으로써, 제안된 무차원설계식을 유효성을 고찰하였다.

나. 무차원 해석

Fig. 3-2-24는 유동모드형 ER 속업소버의 구조를 나타낸다. ER 속업소버는 피스톤의 운동에 따라 내외측실린더 사이의 덕트를 통하여 ER유체가 유동할 수 있도록 한다. 내측실린더와 외측실린더는 ER 유체에 전기장을 부하하는 전극판의 역할을 한다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부챔버, 아래쪽을 하부챔버로 정의하며, 두 챔버에는 ER유체가 충전되어 있다. 가스챔버는 급격한 피스톤로드의 운동으로 하부챔버로 전해지는 급격한 압력변화를 흡수하고 캐비테이션을 방지하는 역할과 열팽창에 따른 유체의 부피를 수용하는 역할을 한다.

피스톤반지름이 전극간극에 비하여 상대적으로 크면, 평판 사이를 유동하는 ER유체의 유변학적 거동은 실린더형태의 전극간극에 근사적으로 적용될 수 있다[61,64]. 평판 사이를 유동하는 ER유체의 압력구배는 다음의 무차원식으로 표현된다[59].

$$P = \frac{P'}{P_n'} \quad (3-2-20)$$

$$T = \frac{P_c'}{2P_n'} \quad (3-2-21)$$

여기서,

$$P_n' = \frac{12Q\eta}{wh^3}, \quad P_c' = \frac{2\tau_y(E)}{h} = \frac{2\alpha E^\beta}{h} \quad (3-2-22)$$

P 와 T 는 전체 무차원압력구배와 항복응력에 의한 무차원압력구배를 의미한다. P' 는 전체압력구배, P_n' 는 Newtonian 유동의 압력구배, P_c' 는 ER 유체의 항복이 시작되는 압력구배이다. Q 는 유체유량, w 는 전극의 폭, h 는 전극간극을 나타낸다. η 와 $\tau_y(E)$ 는 ER 유체의 기본점도와 항복응력을 각각 나타낸다. 비례상수 α 와 지수 β 는 ER유체의 고유특성치로서 빙햄 실험을 통하여 얻어낼 수 있다. 무차원압력구배 P 는 전기장 부하 시의 최대 압력구배와 전기장 무 부하 시의 최소 압력구배의 비로 정의된다. P 와 T 의 값이 클수록 ER 속업소버의 진동제어 효과가 향상된다. P 와 T 는 다음과 같이 3차의 무차원함수로

표현된다[59].

$$P^3 - (1 + 3T)P^2 + 4T^3 = 0 \quad (3-2-23)$$

식(3-2-23)의 근은 3개로 나타나며, 1개의 근만이 물리적으로 의미가 있으며, 이는 다음의 1차 함수로 근사화 될 수 있다.

$$P = a + bT \quad (3-2-24)$$

무차원항복응력 T 의 함수로 표현된 무차원압력구배의 근사화 오차를 낮게 하기 위해서는 T , P 의 영역을 잘 고려하여 계수 a 와 b 를 선정하여야 하며, 본 연구에서 a 와 b 를 1과 2.47로 적용하였다. 이는 $0 < T < 15$ 의 조건에서, 식(3-2-24)가 식(3-2-23)에 대하여 8% 이하의 오차를 보인다.

ER 속업소버에서 ER 유체의 유량 Q 와 전극 폭 w 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = A_p v_p, \quad A_p = \pi r^2 \quad (3-2-25)$$

$$w = 2\pi(r + t + h/2) \approx 2\pi r \quad (3-2-26)$$

여기서, A_p 는 유효피스톤면적, r ($\gg h$)는 피스톤헤드반지름이다. 한편, ER 속업소버 내부에서 간극을 제외한 유체유로에서의 부차적인 수두손실은 고려되지 않았다. 이렇게 무시된 모델로 인하여 댐핑력의 예측치와 실험치가 다소 오차를 보이게 되지만, ER 속업소버의 댐핑력은 주로 전극에서의 유체유동에 의하여 지배적으로 영향을 받는다. v_p 는 피스톤속도, t ($\ll r$)는 내측전극의 두께이다. 식(3-2-20,21,22,25,26)을 식(3-2-24)에 대입하여, 전기장 부하 시의 댐핑력과 전기장 무부하시의 댐핑력의 비로 정의한 제어비(dynamic ratio, control ratio) ϕ_D 는 다음 식으로 유도 될 수 있다.

$$\phi_D = a + \frac{b}{6} \frac{\phi_c}{\phi_r} \quad (3-2-27)$$

여기서,

$$\phi_D = \frac{F_t}{F_v}, \quad \phi_c = \frac{\tau_y(E)h}{\eta v_p}, \quad \phi_r = \frac{r}{h} \quad (3-2-28)$$

무차원변수 ϕ_c 는 널리 알려진 빙햄넘버(Bi)로서 항복응력과 점성응력의 비로 정의된다 [64~66]. 또한, ϕ_c 는 전기장의 세기가 ER 속업소버에 미치는 영향을 의미하기도 한다. 무차원변수 ϕ_r 은 피스톤반지름 r 과 전극간극 h 로 구성된 무차원전극변수이다. 한편, ER 속업소버의 댐핑력은 다음 식으로 주어진다.

$$F_t = p'LA_p \quad (3-2-29)$$

여기서, L 은 전극길이를 나타낸다. 식(3-2-21,26,28)를 식(3-2-29)에 대입하여 정리하면, 무차원변수 ϕ_c 와 ϕ_r 로 표현되는 무차원댐핑력 ϕ_F 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\phi_F = a \phi_r^3 + \frac{b}{6} \phi_c \phi_r^2 \quad (3-2-30)$$

여기서,

$$\phi_F = \frac{F_t}{6\pi\eta v_p L} \quad (3-2-31)$$

전극길이 L 은 여러 무차원변수 중에서 무차원댐핑력 ϕ_F 에만 영향을 받는 곳을 알 수 있다. 이는 댐핑력 F_t 는 전극길이 L 로 직접 설계될 수 있음을 의미한다. ϕ_c 가 0이면, 식(3-2-30)은 전기장 무부하시의 Newtonian 유동에 의한 댐핑력 식과 동일하게 된다.

Fig. 3-2-25(a)는 ϕ_c 의 변화에 따른 제어비 ϕ_D 와 무차원전극변수 ϕ_r 의 관계를 나타낸 것이다. 피스톤속도 v_p 가 작거나, 항복응력 τ_y 가 클수록 빙햄 넘버 ϕ_c 는 높아지게 되며, 물리적으로 ER 속 업소버에 충전된 ER유체가 항복점에 가까운 조건에서 운동하고 있음을 나타낸다. ϕ_c 를 증가시키거나 ϕ_r 를 감소시키면 높은 제어비 ϕ_D 를 얻을 수 있다. 항복응력 τ_y 가 0이거나 피스톤속도가 무한대로 증가하면, 무차원항복응력 ϕ_c 와 제어비 ϕ_D 는 각각 0과 1로 접근하게 되며, Newtonian 유동을 의미한다. 피스톤면적 $A_p(\propto r^2)$ 를 증가시키면, ER속업소버의 전체댐핑력도 증가하지만 제어비를 감소시키므로 진동제어성능에는 비효율적이다. 한편, 전극간극 h 는 무차원변수 ϕ_c 와 ϕ_r 에 큰 영향을 준다. 간극 h 를 증가시키면, 빙햄넘버 ϕ_c 는 증가하고, 무차원전극변수 ϕ_r 는 감소하게 된다. 결국, 간극 h 를 증가시킴으로써 높은 제어비 ϕ_D 를 얻을 수 있다. Fig. 3-2-25(b)는 ϕ_c 의 변화에 따른 무차원댐핑력 ϕ_F 와 기하학적변수 ϕ_r 의 관계를 나타낸 것이다. ϕ_c 와 ϕ_r 가 증가하면, 무차원댐핑력 ϕ_F 도 함께 증가한다. 이는 큰 무차원댐핑력을 위해서는 높은 항복응력과 넓은 피스톤면적이 필요함을 의미한다.

다. ER 속 업소버의 무차원설계

제어비와 최대댐핑력은 ER 속 업소버의 가장 중요한 설계지표이다. 따라서, 제안된 무차원식(3-2-27,30)을 이용하여 요구설계조건을 충족시킬 수 있는 효과적인 무차원 설계방법을 다음과 같이 수립하였다.

- (i) 제어비 $\phi_D (= F_t/F_v)$ 선정.

- (ii) 최대댐핑력 F_f 과 피스톤속도 v_p 선정.
- (iii) ER 속업소버에 주입할 ER 유체의 빙햄특성치(τ_y, η)도출.
- (iv) 적정한 전극간극 h 선정. 식(3-2-28)를 이용하여 빙햄 넘버 $\phi_c^*(= \tau_y(E)h/\eta v_p)$ 계산.
- (v) 식(3-2-27)과 (iv)를 이용하여 ϕ_D 를 만족시키는 ϕ_r 을 구함.
 ϕ_r 로부터 피스톤반지름 r 을 구함.
- (vi) 식(3-2-30)에 (iv)의 ϕ_c^* 와 ϕ_r 을 대입하여 무차원댐핑력 ϕ_F 을 구함.
- (vii) (iii)의 η , (ii)의 F_f 와 v_p 를 식(3-2-31)에 대입하여 전극길이 L 을 구함.

본 연구에서는 위에 제시한 무차원설계법을 이용하여 승용차용 ER 속업소버를 설계하였다. 먼저, (i)의 최대댐핑력 F_f , 피스톤속도 v_p , 제어비 ϕ_D 를 구하기 위하여 Fig. 3-2-26의 1/4차량모델을 고려하였다. 1/4차량모델의 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{x}_s + c(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + F_f \operatorname{sgn}(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + U + k_s(x_s - s_u) &= 0 \\ m_u \ddot{x}_u + c(\dot{x}_u - \dot{x}_s) + F_f \operatorname{sgn}(\dot{x}_u - \dot{x}_s) - U + k_s(x_u - s_s) + k_t(x_u - x_r) &= 0 \end{aligned} \quad (3-2-32)$$

여기서, m_s 는 sprung 매스, m_u 는 unsprung 매스, c 는 댐핑상수, F_f 는 마찰력, k_s 는 서스펜션스프링상수, k_t 는 타이어의 스프링상수이다. x_s, x_u, x_r 은 sprung 매스, unsprung 매스, 노면가진의 변위를 각각 나타낸다. U 는 ER 속업소버가 발생시키는 가변댐핑력을 의미한다. 1/4차량모델에 적용된 파라미터 $m_s=250\text{kg}$, $m_u=29.5\text{kg}$, $c=1000\text{Nsec/m}$, $F_f=70\text{N}$, $k_s=20.6\text{kN/m}$, $k_t=200\text{kN/m}$ 이다. F_f 은 기존의 ER 속업소버시험에서 얻어진 값을 이용하였다.

ER 속업소버의 진동제어성능을 확인하기 전에, 제어를 수행하지 않을 시의 기본적인 성능을 고찰하였다. 노면 가진속도 \dot{x}_r 의 진폭은 0.1m/sec로 설정하였다. sprung 매스의 속도 \dot{x}_s 과 피스톤속도 $v_p = (\dot{x}_s - \dot{x}_u)$ 를 Fig. 3-2-27(a), (b)에 도시하였다. 1000Nsec/m의 댐핑상수는 sprung 매스의 최대 속도를 0.2m/sec로 제한한다. Fig. 3-2-27(c)는 댐핑상수와 피스톤속도의 곱으로부터 얻어진 유체 댐핑력을 나타낸다. 최대피스톤속도 0.17m/sec인 경우 최대 유체 댐핑력은 170N이다. 다음으로는 ER 속업소버의 가변 댐핑력을 이용하여 진동제어성능을 고찰하였다. 진동제어를 위하여 효과적이고 간단한 스카이훅(sky-hook)제어기를 적용하였다. 가변댐핑력을 의미하는 제어입력은 다음과 같이 주어진다.

$$U = c_{sky} \dot{x}_s(t) \quad (3-2-33)$$

여기서, c_{sky} 는 물리적으로 댐핑상수를 의미하는 스카이훅 제어 계인이다. 제어입력은 다음과 같은 반응동조건을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned}
 U &= U & \text{for } \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) > 0 \\
 U &= 0 & \text{for } \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \leq 0
 \end{aligned}
 \tag{3-2-34}$$

Fig. 3-2-28(a)는 진동제어를 수행한 경우와 수행하지 않은 경우 sprung 매스의 속도를 비교한 것이다. 진동제어를 수행한 경우 공진점 근처에서 sprung 매스의 속도가 효과적으로 저감된 것을 확인할 수 있다. Fig. 3-2-28(b)는 스카이훅 제어 수행에 요구되는 가변 댐핑력을 도시한 것이다. 1/4차량의 진동제어성능해석으로부터 최대 요구댐핑력은 600N임을 알 수 있다. 또한, ER 속업소버의 설계지표는 다음과 같다. $F_v=170N$, $v_p=0.17m/sec$, $U=720N$. 여기서, 요구 제어력은 안전계수 1.2가 고려되었다. 결국, 최대요구댐핑력 F_t 와 제어비 ϕ_D 는 890N과 5.2로 설정되었다.

(i), (ii)의 설계지표, 즉, 제어비 ϕ_D , 최대댐핑력 F_p , 피스톤속도 v_p 는 1/4차량의 진동제어 성능을 고찰함으로써 결정되었다. 그리고, (iii)에서 ER 유체의 빙햄 특성치 α 와 β 는 각각 195와 1.5로 구하여졌다. 최대 전기장은 $4kV/mm$ 로 제한하여 ER 유체의 절연과괴를 방지하였으며, $4kV/mm$ 의 전기장에 의하여 ER 유체는 1560Pa의 항복응력을 발생시켰다. (iv)의 빙햄 넘버 ϕ_c 는 152로 계산되는데, 전극간극 h 는 경험치인 $1mm$ 로 설정되었다. Fig. 3-2-29(a)는 ϕ_c 가 152인 경우의 제어비 ϕ_D 를 무차원전극변수 ϕ_r 의 변화와 함께 도시한 것이다. (v)로부터 요구되는 제어비 ϕ_D 를 5.2로 만족시키는 무차원전극변수 ϕ_r 의 값은 15로 얻어진다. 따라서, 피스톤반지름 r 은 15mm로 결정할 수 있다. Fig. 3-2-29(b)는 무차원댐핑력 ϕ_F 와 무차원전극변수 ϕ_r 의 관계를 도시한 것이다. 무차원전극변수 ϕ_r 이 15인 경우의 무차원댐핑력 ϕ_F 는 17540으로 얻어지며, (vi, vii)로부터 전극길이 L 은 246mm로 도출된다.

무차원설계법으로부터 구하여진 전극설계변수(L, r, h)에 근거하여, 유동모드형 ER속업소버를 제작하였으며, Fig. 3-2-30에 나타내었다. Fig. 3-2-31은 무차원제어비 ϕ_D 와 무차원댐핑력 ϕ_F 의 예측치와 실험치를 비교한 것이다. 전기장에 따른 무차원변수의 영향도 함께 도시하였다. 예측치와 측정치가 비교적 잘 부합하고 있다. Fig. 3-2-32(a)는 측정된 댐핑력을 시간영역에서 나타낸 것이다. 가진속도의 크기는 $0.17m/sec$ 이며, 가진주파수는 1.4Hz이다. 댐핑력-속도 선도를 Fig. 3-2-32(b)에 나타내었다. 전기장에 따른 댐핑력이 측정치가 예측치에 잘 부합하고 있다. 따라서, 제안된 무차원해석 및 설계법의 타당성과 유용성이 입증되었다.

라. 결론

ER 속업소버의 효과적인 설계를 위한 무차원해석과 설계방법이 개발되었다. 제안된 무차원식은 빙햄넘버, 무차원댐핑력, 무차원전극변수로 구성하였다. 무차원해석을 통하여 전기장에 따른 댐핑력과 제어비를 예측할 수 있도록 하였다. ER 속업소버 설계지표를 설정

하기 위하여 1/4차량의 진동제어성을 고찰하였다. 이로부터, 최대댐핑력, 피스톤속도, 제어비와 같은 중요 설계지표를 얻어낼 수 있었으며, 전극설계변수를 도출하기 위한 무차원설계를 단계적으로 수행하였다. 무차원설계를 통하여 얻어진 전극설계변수에 근거하여 ER 속업소버를 제작하여 댐핑력 시험을 수행하였다. ER 속업소버의 무차원식을 이용한 예측치와 실험을 통하여 얻어진 실험치가 비교적 잘 부합하여 제안된 무차원해석 및 설계방법의 유용성을 입증하였다.

4. ER 시트 댐퍼

최근 산업발전에 따라 상업용 차량의 수요가 급증하면서 차량의 성능을 향상시키는 연구와 아울러 운전자가 편안하게 운전할 수 있도록 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 차량을 운전하는 운전자는 필연적으로 피로를 느끼게 되는데, 특히 대형 상업용 차량의 경우 장거리, 장시간의 운행, 거친 환경 등으로 인하여 이를 운전하는 운전자는 승용차를 운전하는 일반인보다 훨씬 큰 피로를 느끼게 된다. 이에 상업용 차량 개발의 중요한 요인 중 하나인 운전자의 피로감을 줄이는 장치에 대한 연구 개발이 필수적이다. 운전자가 피로를 느끼게 되는 가장 큰 요인은 운전자에게 전달되는 진동 때문이며 이를 적절히 절연시키기 위한 장치로는 주 현가장치(primary suspension), 캐빈 현가장치(cabin suspension), 운전석 현가장치(seat suspension)등이 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[69] 이에 본 연구에서는 PMA계열의 ER유체를 이용한 운전석용 반능동형 현가 장치를 제안하고, 이에 대한 제어기로, 스카이훅 제어기를 적용하여 운전자로 전달되는 진동을 효율적으로 절연하고자 한다.

가. ER댐퍼 모델링

ER유체의 특성은 일반적으로 전기장이 가해짐에 따라 유체의 전단응력이 변화되는 것으로, 전기장 무 부하 시에는 유체입자가 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian) 유체 상태에서, 전기장 부하 시에는 입자가 체인형의 구조를 형성하여 유체가 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체 상태로 변화하게 된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y(E) \quad (3-2-35)$$

여기서, τ 는 유체의 전단응력(shear stress)을 나타내고 $\dot{\gamma}$ 은 전단 속도비(shear rate)이며, η 는 ER 유체의 점성계수를 나타낸다. $\tau_y(E)$ 는 ER 유체의 항복응력을 표현한 것으로 전기장 E의 크기에 지수 함수의 관계를 갖는다. 따라서 식(3-2-35)을 다시 쓰면, 다음과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + aE^\beta \quad (3-2-36)$$

여기서 α 와 β 값은 ER 유체의 고유치로서, 본 연구에 적용된 PMA계열 ER 유체의 항복 응력은 $184E^{1.82}Pa$ 의 관계식으로 표현할 수 있다.

본 연구에서 제안된 ER 댐퍼의 구조는 Fig. 3-2-33에서 보는 바와 같다. ER유체가 원형 덕트 사이로 유동할 때 발생하는 유체저항은 다음과 같이 주어진다.

$$R_e = \frac{12\eta L}{bh^3} \quad (3-2-37)$$

L은 전극길이, b는 전극폭, h는 전극간극이다. 한편 전기장 부하시 ER 유체의 전단응력 증가에 따른 압력강하 P_{ER} 은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{ER} = 2\frac{L}{h}\tau_y(E) = 2\frac{L}{h}\alpha E^\beta \quad (3-2-38)$$

다음과 같은 ER 댐퍼의 댐핑력 모델을 얻을 수 있다.

$$F_d = \frac{A_r^2}{C_g}x_p + (A_p - A_r)^2 R_e \dot{x}_p + (A_p - A_r)P_{ER} \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3-2-39)$$

여기서 x_p 와 \dot{x}_p 는 피스톤의 변위 및 속도이고, c_g 는 가스챔버의 컴플라이언스이고, A_r 와 A_p 는 피스톤 로드와 피스톤의 단면적을 나타낸다. 또한, F_d 는 ER 댐퍼의 댐핑력, V_p 는 피스톤 속도, 그리고 V_r 은 피스톤 로드의 속도이다.

나. ER 시트 댐퍼의 성능

상용차용 ER 시트 댐퍼의 시작품을 설계, 제작하였다. ER 시트 댐퍼의 기본 댐핑 (전기장 무 부하 시의 댐핑), 길이, 크기 등 제반사항은 실제 상용차량을 기준으로 설계되었다. 모델링을 통하여 도출된 지배 방정식을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 ER 댐퍼 설계 파라미터를 도출하였다. Table 3-2-1은 설계된 ER 시트 댐퍼 각각의 파라미터 값이다.

제작된 ER 시트 댐퍼의 성능을 실험적인 성능을 고찰하고자 Fig. 3-2-34와 같은 실험장치를 구성하였다. 서보밸브를 사용한 유압시스템으로 댐퍼를 가진하게 되면 댐퍼 내의 유동이 발생한다. 이때 가진입력은 LVDT(linear variable differential transducer)에 의하여 측정되며 댐핑력은 상부에 구성된 로드셀(loadcell)에 의해 측정된다. 컴퓨터의 계산에 의하여 결정된 전기장의 크기는 D/A 변환기를 거쳐 ER 댐퍼에 전기장을 공급하게 된다.

Fig. 3-2-35, 36은 ER 댐퍼에 전기장 크기를 0, 1, 2, 3kV/mm로 증가시켰을 때의 성능을

시간영역에서 시뮬레이션과 실험결과를 도시한 것이다. 이때의 가진 조건으로 진폭은 $\pm 15mm$ 이며, 주파수는 $1.4Hz$ 이다. 이때의 최대 피스톤 속도는 $0.1319m/s$ 이다. 이때의 결과로 전기장 무 부하 시 리바운드 운동에서 최대 $370N$ 의 댐핑력이 발생되었으나, $3kV/mm$ 의 전기장 부하 시 $640N$ 의 댐핑력이 발생되어 $270N$ 의 댐핑력 변화가 발생되었다. ER 유체를 사용할 경우 전기장 부하에 따라 댐핑력의 크기가 전기장 무 부하 시에 비하여 크게 증가됨을 확인할 수 있으며 전기장만의 변화로 댐핑력을 연속적이고 폭 넓게 제어할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 3-2-37, 38은 피스톤 변위에 따른 댐핑력 곡선의 시뮬레이션 및 실험결과를 나타낸 것이다. 전기장 무부하시 댐핑력 곡선은 작은 폐곡선을 그리지만 인가된 전기장의 크기가 증가함에 따라 폐곡선의 면적이 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 전기장 무 부하 시 유체 점성력만 존재한다면 양쪽이 대칭을 이루지만 본 연구의 댐퍼는 가스의 강성효과에 의한 반발력으로 반 시계 방향으로 회전하고, 금속 부싱과 피스톤 로드 등에 작용하는 Coulomb 마찰력에 의한 댐핑력이 더해지므로 폐곡선이 타원이 아니 마름모 형태를 이루어짐을 알 수 있다. 전기장인가 시 ER 유체의 항복응력에 의한 댐핑력은 Coloumb마찰력 형태로 증가하게 되므로 변위에 수직하게 증가함을 알 수 있다. 이때 그래프에서 폐곡선 면적의 증가는 가진 에너지의 소모가 증가됨을 의미한다.

Fig. 3-2-39, 40은 피스톤 속도에 따른 댐핑력 곡선의 시뮬레이션 및 실험결과를 나타낸 것이다. 전기장 무 부하 시 피스톤 속도 $0.0377m/s$ 에서 $115N$ 의 댐핑력을, $0.26389m/s$ 에서 $442N$ 의 댐핑력을 발생시켰다. 그러나, 전기장 $3.0kV/mm$ 인가 시 ER 유체의 전단 항복응력에 의해 피스톤 속도 $0.0377m/s$ 에서 댐핑력은 $356N$ 으로 증가하고 $0.26389m/s$ 에서는 $665N$ 으로 증가하였다. 두 결과 모두, 낮은 피스톤 속도에서 뿐 아니라 높은 피스톤 속도에서도 높은 댐핑력을 유지하였다. 따라서 피스톤 속도에 관계없이 전기장만의 제어만으로도 넓은 제어영역을 가짐을 알 수 있다.

다. 현가장치 모델링

본 연구에서 제안된 운전석 현가장치 모델은 Fig. 3-2-41에서 보는 바와 같다. 위의 모델로부터 동적 지배 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) - k_1(x_1 - x_0) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) - u \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) \end{aligned} \quad (3-2-40)$$

여기서 m_1 은 시트의 질량, m_2 는 운전자의 질량, c_2 와 k_2 는 각각 시트 쿠션의 댐핑계수와 스프링상수이며, u 는 제어입력을 나타낸다. 상태변수 $X = [x, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2]^T$ 로 정의하면, 식(3-2-40)은 다음과 같은 상태 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$X = AX + BU + D \quad (3-2-41)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1+k_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{c_1+c_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{m_1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{c_1}{m_1} \dot{q}_0 + \frac{k_1}{m_1} q_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

라. 제어기 설계

본 연구에서는 차량의 진동제어성능을 고찰하고자 스카이훅(skyhook) 제어기를 설계하였다. [70] 스카이훅 알고리즘은 Karnopp에 의하여 제안되었으며, 차체 위의 공간상에 절대 고정변위를 갖는 천정과 차체사이에 가상의 댐퍼를 설치하고 이때 발생하는 가상 댐퍼의 댐핑력을 요구 댐핑력으로 사용하는 것이다. ER 댐퍼의 모델링을 통하여 도출된 수식을 이용하여 요구 댐핑력과 관계된 전기장 E를 결정하고 이를 ER 현가장치의 요구 댐핑력으로 사용하였다. 스카이훅 알고리즘의 요구 댐핑력은 다음과 같이 정의하였다.

$$u = C_{sky} \cdot \dot{x}_1 = F_{ER} \quad (3-2-42)$$

여기서 C_{sky} 는 스카이훅 제어 게인 값을 나타내며 물리적으로 댐핑계수를 나타낸다. 이때 ER 현가장치는 반능동형이므로 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} \text{If } u \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) > 0, u &= u \\ \text{If } u \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) < 0, u &= 0 \end{aligned} \quad (3-2-43)$$

ER 댐퍼의 모델링을 통하여 도출된 수식을 이용하여 요구 댐핑력과 관계된 전기장을 결정하고 이를 ER 현가장치의 요구 댐핑력을 발생하는 제어입력으로 사용한다. 제어 전기장은 다음과 같다.

$$E = \left[\frac{u}{A_p - A_r} \cdot \frac{h}{2L\alpha} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3-2-44)$$

마. 실험결과

ER 댐퍼를 적용한 상용차 운전석의 반능동형 현가장치의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 3-2-42와 같은 시험장치를 구성하였다. 주파수 영역 및 시간 영역에서 제어 결과를 나타

내었다. Fig. 3-2-43~46은 가진입력 x_0 를 15mm의 정현파로 하였을 경우 주파수에 따른 시트의 변위 및 가속도 전달률을 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 전기장 무 부하 시 공진 주파수에서의 전달률이 약 1.2이며, 스카이훅 제어기 사용 시에는 전 영역에서 전달률이 1이하의 우수한 성능을 발휘하였다. Fig. 3-2-47은 시간영역에서 첫 번째 공진주파수에서의 시트 변위의 변화, 그리고 Fig. 3-2-48은 스카이훅 제어 시 ER댐퍼에 인가되는 전기장을 보였다. 첫 번째 공진 주파수에서 스카이훅 제어 시 변위의 줄어듦을 볼 수 있다.

바. 결론

본 연구에서는 상용차 운전시 운전자에게 전달되는 진동을 줄여 승차감을 향상시키기 위하여, PMA계열 ER 유체를 이용한 상용차 운전석용 반능동형 현가장치를 제안하여 모델을 구성하였으며, 빙햄 거동과 연관된 ER 댐퍼의 지배 방정식으로부터 시뮬레이션에 필요한 댐퍼의 각 파라미터를 도출하였다. 또한, ER 댐퍼의 제어를 위한 제어기로는 스카이훅 제어기를 사용하였다. 상용차 운전석 현가장치에 ER 댐퍼를 적용하였을 때, 스카이훅 제어를 수행하였을 때에는 공진 주파수에서의 진동을 효율적으로 억제할 뿐만 아니라 주파수가 높아져도 진동 전달률이 증가하지 않았다. 따라서, ER 댐퍼를 장착한 상용차 운전석의 반능동형 현가장치는 적절한 제어시, 운전자에게 전달되는 진동을 효과적으로 절연하여 승차감을 크게 증진하였다. 향후 인체진동 모델과 강건제어 알고리즘을 도입하고, 1/4차량과 전체차량의 HILS를 통하여 제안된 시트 현가장치의 제어성능을 비교 평가할 예정이다. 또한 표준화된 ISO2631기준에 의한 승차감 지수를 정량화 할 예정이다.

5. ER ABS

차량의 ABS(anti-lock brake system)는 타이어의 고착을 방지하여 차량의 자세안정과 조향능력 확보, 그리고 다양한 노면 조건에서 제동거리를 단축함으로써 제동하는 과정에서 발생하는 위험성을 배제하기 위한 수단으로 사용된다. ABS의 성능은 제어 방법에 따라 달라지며 현재까지 제안된 대표적 제어방법들은 다음과 같다. Drakunov[71]등은 SMC(sliding mode control)로 최적 슬립율을 결정한 후 이 때의 요구 압력과 현재 브레이크 압력을 비교하여 밸브의 신호를 결정하였고, Chin[72]등은 슬립율을 이용하여 슬라이딩 서피스를 설계한 후 그 부호에 따라 제동 압력을 결정하였다. Mauer[73]는 여러 정보를 이용하여 노면을 파악한 후 퍼지 알고리즘을 이용하여 노면 조건에 따라 브레이크 토오크를 결정하였으며, Layne[74]등은 퍼지 학습 제어기로 슬립제어를 수행하였고, Ohba[75]등은 최적제어 기법을 이용하여 제동압력을 결정하였다. 또한 국내에서도 Song[76] 등은 TCS(traction control system)와 연계된 최적 슬립율을 연고자 반와인드업(antiwindup) 기능을 갖는 디지털 방식의 PID 제어기를 제안하였다. 이들 대부분의 연구에서 제안된 ABS는 유압작동기로서 솔레노이드(solenoid) 혹은 비례 밸브(proportional

valve)를 사용하고 있으며, 요구 값의 만족을 위하여 밸브의 개/폐 신호만을 결정하여 제어한다. 이러한 경우 밸브의 응답속도가 ABS 성능에 가장 중요한 영향을 주며, 특히 개/폐 신호의 반복에 의한 떨림(chattering) 현상 등이 발생하여 브레이크 페달 감각이 나빠지는 경향이 있다[71]. 본 연구에서는 이러한 문제점에 대한 해결책의 하나로 빠른 응답 특성과 연속 제어성을 갖고 있는 스마트 재료 중에 하나인 ER(electro-rheological) 유체로 작동되는 새로운 형태의 ABS를 제안한다.

지금까지의 ER 밸브에 관한 연구는 ER 밸브 자체의 모델링과 전기장에 따른 압력강하에 대한 성능시험[78], 그리고 ER 밸브를 이용한 실린더-위치제어[79]가 대부분이며 이를 이용한 자동차 브레이크 시스템의 차륜 슬립 제어에 관한 연구는 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 ER 밸브를 자동차 브레이크 시스템에 적용함으로써 제안된 시스템의 응용 가능성 및 성능의 우수성을 입증하고자 한다. 이를 위해 먼저 ER 유체의 빙햄 특성을 실험적으로 측정하고 이를 근거로 ER 밸브를 모델링하였다. 한쌍의 ER 밸브를 이용하여 자동차 각 차륜의 브레이크 시스템을 구성한 후, 제안된 시스템의 동적 모델링을 통해 운동 지배 방정식을 도출하였다. 슬립 제어를 통한 제동거리 단축과 yaw rate 제어를 통한 차량 안정성 향상을 위하여 시스템 불확실성에 강건한 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 제어기에 사용되는 변수는 대부분 측정이 가능하지만 마찰력은 직접 측정할 수 없다. 따라서 퍼지알고리즘과 연계한 슬라이딩 모드 관측기를 통하여 마찰력을 추정하였다. 제안된 ABS의 유용성을 입증하기 위하여 여러 노면 조건 하에서 제동성과 조향 안정성에 관하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

가. ER 밸브 설계 및 브레이크 시스템의 모델링

ER 유체는 일반적으로 비전도성 용매에 전도성을 갖는 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액으로써, 다음과 같은 빙햄 모델링을 통하여 전단 거동을 나타낼 수 있다[77].

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma}, \tau_y(E) = \alpha E^\beta \quad (3-2-45)$$

여기서, τ 는 ER 유체의 전단응력을 나타내고, η 는 ER 유체의 점성계수이며, $\dot{\gamma}$ 는 전단비(shear rate)를 나타낸다. 그리고 $\tau_y(E)$ 는 ER 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로 전기장 E 의 증가와 더불어 증가하며, αE^β 의 함수 관계로 표현된다. ER 유체의 전단 거동식 (3-2-45)에서 비례상수 α 와 지수 β 는 고체 입자 농도와 전기장 크기, 사용되는 입자와 용매의 종류, 수분 함유량, 사용 온도 등에 따라 달라지는 ER 유체의 고유 특성치이다. 본 연구에서 사용된 ER 유체는 폴리우레탄(polyurethane) 입자와 실리콘 오일을 사용하여 합성된 것으로 입자크기는 $10 \mu m$ 내외이다. 독일 Haake-VT500 전기점도계를 이용하여 ER 유체의 온도를 $25^\circ C$ 로 유지하면서 전기장에 따른 전단응력을 측정한 후 전단비 영(zero)에서의 값을 항복응력으로 도출하였다[79]. 도출된 항복응력을 식(3-2-45)의 빙햄

모델로 표현하면 $13.63E^{2.43}\text{Pa}$ 과 같다. 여기서 E 의 단위는 kV/mm 이다. 한편, 본 연구에서 사용된 ER 유체는 독일 Bayer사의 TP AI 3566으로서 온도가 $20^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$ 까지 전기장에 따른 ER 유체의 항복응력이 증가되며 90°C 이상에서는 조금씩 감소되는 경향을 보이고 있다. 따라서 제안된 ABS의 실제 적용시 브레이크 마찰에 의한 온도상승문제와 온도에 따른 ER 유체의 빙햄 특성이 고려되어야 할 것이다.

본 연구에서 제안된 ER 밸브의 기하학적 형상을 간략하게 도시하면 Fig. 3-2-49와 같다. 그림과 같이 튜브형태의 전극을 갖고 있는 실린더형 ER 밸브의 압력강하 ΔP_E 는 유체 점성에 의한 성분과 전기장 부하에 따른 성분으로 구성되며, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta P_E = \Delta P_{ER} + \Delta P_\eta \quad (3-2-46)$$

여기서 ΔP_{ER} 은 ER유체에 전기장이 가해짐으로써 생성되는 항복응력에 의한 압력강하이므로, ΔP_η 는 유체의 흐름에 따른 유체점성에 의한 압력강하이다. 유체가 유동할 때 발생될 수 있는 형상 변화에 따른 압력 손실을 무시하고, 동일 단면적에서의 내부 압력은 모든 방향으로 균일하게 작용한다고 가정한다면, 식(3-2-46)은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta P_E = 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) + 12\eta \frac{L}{bh^3} Q_E \quad (3-2-47)$$

여기서, L 은 밸브 전극의 길이, b 는 평판으로 환산한 전극의 유효 너비, h 는 전극 사이의 간극, η 는 ER 유체의 점성계수, 그리고 Q_E 는 전기장이 부하될 경우에 간극 사이를 통과하는 유량을 나타낸다. 소형 승용차 ABS에서 요구되는 압력을 기준으로 설계변수를 결정하기 위하여 실험적으로 도출된 빙햄 모델을 식(3-2-47)에 대입한 후 전기장에 따른 압력강하를 해석하였다. 이로부터 전기장이 작용하는 유효 전극 길이 L 은 534mm , 유효 반지름 r_e 는 3.25mm , 간극 h 는 0.5mm 로 결정하였다. 최대 사용 전기장을 8kV/mm 로 할 때 설계된 ER 밸브의 최대 압력강하는 약 10MPa 까지 얻을 수 있으므로 소형 승용차 브레이크 시스템에서 요구되는 작동 압력범위로 충분하다.

본 연구에서 제안한 ER 밸브를 이용한 자동차 ABS의 구성도를 보면 Fig. 3-2-50과 같다. 기존의 솔레노이드 밸브 대신에 감압과 가압을 위한 2개의 ER 밸브가 사용되고 있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 유압라인의 직경이 크고 짧음으로 라인에서 발생하는 유체 저항과 유체관성력을 무시하면 식(3-2-47)과 그림으로부터 ER 밸브 1과 ER 밸브 2의 압력강하 수식이 각각 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} P_m - P_b &= \Delta P_{ER}(E_1) + RQ_1 \\ P_b - P_r &= \Delta P_{ER}(E_2) + RQ_2 \end{aligned} \quad (3-2-48)$$

$$Q_b = Q_1 - Q_2$$

급제동시에 마스터 실린더에서 들어오는 압력 P_m 은 일정하므로 상수인 최대 압력값을 갖는다고 가정하고, 유체를 저장하는 유조(reservoir)에서의 압력 P_r 은 0이라 가정한다. Q_1 과 Q_2 는 각각 ER 밸브 1과 2를 지나는 유량이며, R은 식(3-2-47)에서 $12\eta L/bh^3$ 으로 주어진다. 따라서, ER 밸브의 압력 강하식은 브레이크 압력 P_b 에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$P_m - 2P_b = R(Q_1 - Q_2) + \Delta P_{ER}(E_1) - \Delta P_{ER}(E_2) \quad (3-2-49)$$

일반적으로 브레이크 피스톤의 행정은 0.15mm정도로 매우 작으므로 브레이크 휠 실린더의 검사체적(control volume) V_b 의 변화는 무시할 수 있다. 또한 유압라인에서 발생하는 압축성효과가 실린더 체적에서 발생하는 압축성효과에 비해 작으므로 유압라인의 압축성효과는 무시하였다. 따라서 브레이크 압력의 변화에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$C_f \frac{dP_b}{dt} = Q_1 - Q_2, \quad C_f = \frac{V_b}{\beta_{ER}} \quad (3-2-50)$$

여기서 β_{ER} 은 ER 유체의 체적탄성계수(bulk modulus)이다. 위 식을 식(3-2-49)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 전기장에 대한 브레이크 유압의 동적 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{P}_b = \frac{2}{RC_f} P_b + \frac{1}{RC_f} (\Delta P_{ER}(E_2) - \Delta P_{ER}(E_1)) + \frac{P_m}{RC_f} \quad (3-2-51)$$

일반적으로 브레이크 시스템의 제동효과는 타이어와 지면 사이의 마찰로부터 발생한다. 마찰력에 관한 여러 요소 중 노면의 마찰계수(friction coefficient)와 슬립률의 관계는 ABS 작동 성능 향상에 매우 중요한 자료가 된다. 다시 말하여 슬립률의 값에 따라 ABS의 작동원리가 결정된다. 차량의 제동시 구동륜의 미끄러지는 정도를 나타내는 슬립률 λ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{V_x - V_w}{V_x} \quad (3-2-52)$$

여기서 V_x 차량의 종축 속도이며, V_w 는 차륜속도이다. 식(3-2-52)로부터 차륜 각속도와 차륜 각가속도는 각각 다음과 같이 유도된다.

$$w = \frac{V_w}{R_w} = (1 - \lambda) \frac{V_x}{R_w} \quad (3-2-53)$$

$$\dot{w} = (1 - \lambda) \frac{\dot{V}_x}{R_w} - \lambda \frac{V_x}{R_w} \quad (3-2-54)$$

여기서 R_w 는 차륜의 반경을 나타낸다. 한편, Fig. 3-2-51에서 구동 토크 T_d , 제동 토크 T_b , 지면과의 마찰력 F_{xw} 그리고 차륜 각속도와와의 관계를 나타내면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$I_w \dot{w} = (-F_{xw} R_w - T_b + T_d) \quad (3-2-55)$$

$$T_b = A_{wc} \eta_m B_F r_r P_b \quad (3-2-56)$$

여기서 I_w 는 휠 관성모멘트, r_r 는 로터의 유효 반지름, A_{wc} 는 휠 실린더 면적, η_m 은 기계효율(mechanical efficiency), B_F 는 브레이크 계수(brake factor)이다. 가속도 \dot{V}_x 를 a_x 라 표기하고, 브레이크 작동시 구동 토크의 영향이 없다고 할 때 식(3-2-54,55,56)으로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\dot{\lambda} = -\frac{a_x}{V_x} \lambda + \frac{R_w A_{wc} \eta_m B_F r_r}{V_x I_w} P_b + \frac{a_x}{V_x} + \frac{R_w^2 F_{xw}}{V_x I_w} \quad (3-2-57)$$

이제 하나의 차륜에 대한 브레이크 운동 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\lambda} = a_{11} \lambda + a_{12} P_b + f_1$$

$$\dot{P}_b = a_{22} P_b + b_2 u_\lambda + f_2 \quad (3-2-58)$$

여기서,

$$u_\lambda = \Delta P_{ER}(E_2) - \Delta P_{ER}(E_1)$$

$$a_{11} = -\frac{a_x}{V_x}, \quad a_{12} = \frac{R_w A_{wc} \eta_m B_F r_r}{V_x I_w}, \quad a_{22} = -\frac{2}{RC_f}, \quad b_2 = \frac{1}{RC_f}$$

$$f_1 = \frac{a_x}{V_x} + \frac{R_w^2 F_{xw}}{V_x I_w}, \quad f_2 = \frac{P_m}{RC_f}$$

나. Yaw rate 제어를 위한 차량 모델링

브레이크 작동시 제동거리 뿐만 아니라 차량의 안정성을 동시에 고려해야 한다. 본 연

구에서는 그 방법으로 yaw rate을 제어한다. 차량 시스템은 Fig. 3-2-52에서 보이는 것과 같이 전체 차량모델을 고려하였다[80]. 차량 질량은 M , 차량의 횡속 속도는 V_y , 차륜에 작용하는 마찰력은 F_{xwi} 및 F_{ywi} (여기서 i 는 i 번째 차륜을 의미하며 이하 같은 의미로 사용함)로 나타내었으며, α_f 는 앞바퀴 슬립각(slip angle), α_r 은 뒷바퀴 슬립각, δ_w 은 휠 회전각(wheel angle), r 은 yaw rate, l_f , l_r 은 무게중심(CG)에서 앞축, 뒷축과의 거리, l_i 는 윤거(tread), I_v 는 차량 관성 모멘트이다. 이 모델로부터 힘 및 모멘트 방정식은 다음과 같이 도출된다[80].

$$\begin{aligned}\sum F_x &= \sum_{i=1}^4 F_{xi} = M(\dot{V}_x - V_y r) \\ \sum F_y &= \sum_{i=1}^4 F_{yi} = M(\dot{V}_y + V_x r) \\ \sum M_z &= l_i(F_{x2} - F_{x1} + F_{x4} - F_{x3}) + l_f(F_{y1} + F_{y2}) - l_r(F_{y3} + F_{y4}) = I_v \dot{r} \quad (3-2-59)\end{aligned}$$

여기서 F_{xi} , F_{yi} 는 각 차륜에서의 차량의 벡터방향 힘이고, δ_w 값이 작게 변한다고 가정하면 F_{xwi} , F_{ywi} 와 같게 된다. 각 차륜은 독립적으로 작동하기 때문에 yaw rate 제어를 수행하기 위해서 각 차륜에 대한 yaw rate 방정식을 유도하여야 하는데 이것은 식 (3-2-55)만으로는 불가능하다. 그러나 전륜은 제동력을, 후륜은 차량의 안정성을 우선적으로 고려한다면 전륜 슬립률은 특정 요구 슬립률 부근(일반적으로 약 0.2)으로 제어하도록 영역을 확보하여야 하고, 후륜 슬립률은 yaw rate 오차에 따라 제어 입력을 결정하여야 한다.

타이어의 종마찰력은 슬립각보다 슬립률에 보다 큰 영향을 준다. 따라서 이 힘이 특정 슬립률 이하 안정영역에서 슬립률과 선형이라고 가정하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{xwi} = \mu_x N_{vi} = \alpha_\mu \lambda_i N_{vi} \quad (3-2-60)$$

여기서 α_μ 는 슬립률 λ_i 와 종마찰계수 μ_x 의 함수에서 기울기를 나타내며, 지면 마찰계수가 높아질수록 이 값은 증가하게 된다. 슬립을 제어에서는 마찰력을 관측기로 예측하지만 yaw rate 제어 수행 시 제어입력을 전기장으로 하기 위하여 마찰력을 슬립율의 함수로 나타낸다. 차륜에 작용하는 하중 N_{vi} 는 차량의 피칭(pitching)과 롤링(rolling)에 의해 그 값이 변하게 되는데 여기서는 정적 모델의 근사값[72]을 사용함으로써 각 차륜에 작용하는 하중이 차량의 상태에 따라 변하게 하였다. 노면의 고저가 없고 제동이 일정하고 또한 급격한 조향이 없다고 가정하면 정적모델의 근사값을 사용하여도 시간이 변함에 따라 각 차륜 하중이 변하게 하려는 의도를 충분히 반영하여 준다.

횡마찰력의 경우 일반적으로 횡마찰계수는 슬립율보다는 슬립각에 보다 큰 영향을 준

다. 따라서, 과도한 슬립각이 일어나지 않는다는 가정하에 다음과 같은 선형방정식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{ywi} = -\mu_y N_{vi} = -C\alpha_f \quad (\text{or } -C\alpha_r) \quad (3-2-61)$$

여기서 C 는 각 타이어의 강성(stiffness)이며, 슬립각 α_f 및 α_r 은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_f = \frac{V_y + l_f r}{V_x} - \delta_w, \quad \alpha_r = \frac{V_y - l_r r}{V_x} \quad (3-2-62)$$

식(3-2-60,61)과 식(3-2-62)을 식(3-2-59)의 모멘트 방정식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 yaw rate 운동 방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{r} = a_{r1}r + a_{r2}\lambda_i + f_r \quad (3-2-63)$$

여기서,

$$a_{r1} = -\frac{2C(l_r^2 + l_f^2)}{V_x I_v}, \quad a_{r2} = \frac{x_{i1} l_{i1} N_{vi}}{I_v}, \quad f_r = \frac{2C(l_r - l_f)V_y}{V_x I_v} + \frac{2Cl_f}{I_v} \delta_w + \frac{l_t}{I_v} F_{sum}$$

(1) if $r > r_d$

$$\lambda_i = \lambda_3, \quad N_{vi} = N_{i3}, \quad F_{sum} = F_{xu2} - F_{xw1} + F_{xu4}$$

(2) if $r < r_d$

$$\lambda_i = -\lambda_4, \quad N_{vi} = N_{i4}, \quad F_{sum} = F_{xu2} - F_{xw1} - F_{xu3}$$

상기 식에서 사용되는 요구 yaw rate r_d 는 차량 종속도와 휠회전각에 비례하는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$r_d = \frac{V_x \cdot \delta_w}{(l_f + l_r) \left(1 + \frac{V_x}{V_{CH}} \right)} \quad (3-2-64)$$

여기서 V_{CH} 는 차량의 속도 특성치(characteristic velocity)이다. 식(3-2-63)에서 조건 (1)과 (2)를 설명하면 다음과 같다. yaw rate을 고려하지 않는 브레이크 제어에서는 모든 차륜의 압력을 적정 압으로 조절하여 슬립율을 요구 슬립율로 제어하지만, yaw rate을 고려하게 되면 $r > r_d$ 인 경우에는 좌측 후륜에 브레이크 압을 적게 가하고, $r < r_d$ 인 경우에는

우측 후륜에 브레이크 압을 적게 가함으로써 yaw rate 오차를 보상하여 차량의 안정성을 보장하게 된다. 이는 식(3-2-58)와 식(3-2-63)을 연계하는 제어기를 구성함으로써 달성할 수 있다.

다. 슬라이딩 모드 제어기 설계

(1) 슬립을 제어기

최대가 되는 특정 슬립율을 요구 슬립율 λ_d 로 설정하고, 오차를 $e_{\lambda 1} = \lambda - \lambda_d$ 로 정의하면, 식(3-2-54)로부터 다음과 같은 오차방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_{\lambda 1} &= e_{\lambda 2} \\ \dot{e}_{\lambda 2} &= \dot{a}_{11}\lambda + a_{11}\dot{\lambda} + \dot{a}_{12}P_b + a_{12}\dot{P}_b + \dot{f}_1 - \ddot{\lambda}_d \end{aligned} \quad (3-2-65)$$

동일한 도로노면 상태에서 급제동시 차량속도는 거의 일정한 기울기를 갖는 직선형태로 감소됨으로 가속도의 미분값 \dot{a}_x 를 0으로 간주하면 $\dot{a}_{11} = a_{11}^2$, $\dot{a}_{12}/a_{12} = a_{11}$, $\dot{f}_1 = a_{11}f_1$ 을 얻을 수 있으며, 이 관계식들과 식(3-2-65)로부터 다음과 같은 슬립율 제어 시스템을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_{\lambda 1} &= e_{\lambda 2} \\ \dot{e}_{\lambda 2} &= -a_{11}a_{22}e_{\lambda 1} + (2a_{11} + a_{22})e_{\lambda 2} + a_{12}b_2u_{\lambda} + f_{\lambda} \end{aligned} \quad (3-2-66)$$

여기서 $f_{\lambda} = -a_{22}f_1 + a_{12}f_2 - a_{11}a_{22}\lambda_d + (2a_{11} + a_{22})\dot{\lambda}_d - \ddot{\lambda}_d$, 따라서 안정된 슬라이딩 서피스를 $s_{\lambda}(t) = e_{\lambda 2} + c_{\lambda}e_{\lambda 1} = 0$ 으로 설정하고 알맞은 제어기를 사용하여 임의의 오차 공간상에 있는 RP (representative point)를 이 슬라이딩 평면 위로 보낼 수 있다면 추적 오차는 점근적으로 영이 될 것이다. 이것은 다음과 같은 슬라이딩 모드 존재 조건을 만족함으로써 성취할 수 있다.

$$s_{\lambda}(t) \cdot \dot{s}_{\lambda}(t) < 0 \quad (3-2-67)$$

이 조건을 만족하기 위해 식(3-2-66)과 (3-2-67)을 이용하여 등가제어법칙으로부터 다음과 같은 불연속 제어기를 설계할 수 있다.

$$u_{\lambda}(t) = \frac{-a_{11}a_{22}e_{\lambda 1} + (2a_{11} + a_{22} + c_{\lambda})e_{\lambda 2} + \dot{f}_{\lambda} + K_{\lambda}\text{sgn}(s_{\lambda})}{-a_{12}b_2}, \quad K_{\lambda} > 0 \quad (3-2-68)$$

제안된 제어기(3-2-68)는 슬라이딩 모드 존재 조건(3-2-67)을 만족시킨다. 설계된 제어기 u_λ 로부터 ER 밸브에 공급하기 위한 입력전기장은 ER 밸브의 압력강하 수식을 고려하여 다음과 같은 조건을 통하여 결정하게 된다.

(가) Braking mode : $u_\lambda \geq 0$:

$$E_1 = 0, \quad E_2 = \left(\frac{h}{2L\alpha} (u_\lambda) \right)^{1/\beta}$$

(나) Releasing mode : $u_\lambda < 0$

$$E_1 = \left(\frac{h}{2L\alpha} (-u_\lambda) \right)^{1/\beta}, \quad E_2 = 0 \quad (3-2-69)$$

기존의 솔레노이드 밸브와 달리 상기 조건과 같이 u_λ 를 통하여 어느 한 ER 밸브에 가변적인 전기장 입력을 연속적으로 가함으로써 정확하고 빠른 요구압력제어를 가능하게 한다.

(2) Yaw rate 제어기

요구 yaw rate을 r_d 로 설정하고, 오차를 $e_{r1} = r - r_d$ 로 정의하면, 식(3-2-58)과 (3-2-63)으로부터 다음과 같은 yaw rate 제어 시스템 모델을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_{r1} &= e_{r2} \\ \dot{e}_{r2} &= e_{r3} \\ \dot{e}_{r3} &= -a_{22}(a_{r1} + a_{11})e_{r2} + (2a_{11} + a_{r1} + a_{22})e_{r3} + a_{r2}a_{12}b_2u_r + f \end{aligned} \quad (3-2-70)$$

여기서,

$$\begin{aligned} f &= a_{11}a_{22}f_r - (2a_{11} + a_{22})\dot{f}_r + \ddot{f}_r - a_{r2}(a_{22}f_1 - a_{12}f_2) \\ &\quad - a_{22}(a_{r1} + a_{11})\dot{r}_d + (2a_{11} + a_{r1} + a_{22})\ddot{r}_d - r_d''' \end{aligned}$$

본 연구에서 차량의 불확실성으로 고려된 변수는 M, I_v, C, x_μ 이다. $a_{r2} = x_\mu l_\mu N_{vi} / I_v$ 에서 N_{vi} 가 a_x, a_y 의 영향보다 M 의 영향이 더 크다고 가정하면, 입력 계수 a_{r2}, a_{12}, b_2 에서 불확실성을 갖는 변수는 x_μ 뿐이다. 입력 불확실성을 고려한 제어기를 구성하기 위해 다음과 같은 정합조건(matching condition)을 가정한다[82].

$$x_\mu = x_o + \Delta x = x_o(1 + \gamma) \quad (3-2-71)$$

여기서 x_o 는 공칭부(nominal part), Δx 는 불확실성부(uncertainty part)를 나타내며, γ 는 다음의 경계를 갖는다.

$$|\gamma| < \phi_x < 1 \quad (3-2-72)$$

그리고 δa_{r1} 는 다음과 같은 경계를 갖는다고 가정한다.

$$\hat{a}_{r1} \leq \delta a_{r1} \leq \tilde{a}_{r1} < \infty \quad (3-2-73)$$

정합조건 하에서 안정된 슬라이딩 서피스를 $s_r(t) = c_{r1}e_{r1} + c_{r2}e_{r2} + e_{r3} = 0$ 으로 설정하고, yaw rate 제어기를 설계하면 다음과 같다.

$$u_r = -\frac{1}{(1-\phi_x)x_o l_d N_{vi} a_{12} b_2} [\{ |(c_{r1} - a_{22}(\bar{a}_{r1} + a_{11}))e_{r2}| + |(2a_{11} + \bar{a}_{r1} + a_{22} + c_{r2})e_{r3}| + |(-a_{22}e_{r2} + e_{r3})\bar{a}_{r1}| + k_r \} \cdot \text{sgn}(s_r) + (-a_{22}e_{r2} + e_{r3})a_{r1o}] , \quad k_r > \dot{f}_r / \Psi \quad (3-2-74)$$

여기서,

$$a_{r1o} = \frac{\hat{a}_{r1} + \tilde{a}_{r1}}{2}, \quad \bar{a}_{r1} = \tilde{a}_{r1} - a_{r1o}, \quad \Psi = \frac{(1+\gamma)}{(1-\phi_x)}$$

제안된 제어기(3-2-74)를 갖는 불확실 시스템(3-2-70)은 다음과 같이 슬라이딩 모드 존재 조건(3-2-67)을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} s_r \cdot \dot{s}_r &= s_r \cdot ((c_{r1} - a_{22}(a_{r1} + a_{11}))e_{r2} + (-a_{22}\delta a_{r1})e_{r2} \\ &\quad + (2a_{11} + a_{r1} + a_{22} + c_{r2})e_{r3} + \delta a_{r1}e_{r3}(1+\gamma)a_{r2}a_{12}b_2u_r + \dot{f}_r) \\ &= (c_{r1} - a_{22}(a_{r1} + a_{11}))e_{r2} \cdot s_r - \Psi |(c_{r1} - a_{22}(a_{r1} + a_{11}))e_{r2}| |s_r| \\ &\quad + (2a_{11} + a_{r1} + a_{22} + c_{r2})e_{r3} \cdot s_r - \Psi |(2a_{11} + a_{r1} + a_{22} + c_{r2})e_{r3}| |s_r| \\ &\quad + ((-a_{22}\delta a_{r1}e_{r2}) - \Psi(-a_{22}a_{r1o}e_{r2})) \cdot s_r - \Psi |(-a_{22}\bar{a}_{r1}e_{r2})| |s_r| \\ &\quad + (\delta a_{r1}e_{r3} - \Psi(a_{r1o}e_{r3})) \cdot s_r - \Psi |\bar{a}_{r1}e_{r3}| |s_r| + \dot{f}_r - \Psi k_r |s_r| < 0 \end{aligned} \quad (3-2-75)$$

식(3-2-63)의 조건 (가)과 (나)에서 언급한 바와 같이 yaw rate 제어기(식 3-2-74)는 실제 yaw rate이 요구 yaw rate과 오차를 가질 때만 시스템에 관여하므로 다음의 구속 조건을

갖는다.

$$\begin{aligned} \text{IF } r > r_d \text{ and } u_r < u_{\lambda 3}, \text{ THEN } u_r = u_{\lambda 3} \\ \text{IF } r < r_d \text{ and } u_r < u_{\lambda 4}, \text{ THEN } u_r = u_{\lambda 4} \end{aligned} \quad (3-2-76)$$

여기서 $u_{\lambda 3}, u_{\lambda 4}$ 는 식(3-2-68)의 값으로 각각 후륜 좌우측 차륜의 슬립을 제어입력이다.

라. 마찰력 관측기를 위한 퍼지 알고리즘

제안된 슬라이딩 모드 제어기(3-2-68)과 (3-2-74)의 실행을 위해서는 마찰력 F_{xw} 를 얻어야 하는데 이는 직접 측정할 수 없는 값이다. 따라서 이를 다음과 같은 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 추정할 수 있다[71].

$$\hat{F}_{xw} = W_f(s) F_{\max} \text{sat}(w - \hat{w}) \quad (3-2-77)$$

여기서 w 는 센서를 통해 들어오는 각속도, \hat{w} 는 시스템 모델로부터 예측된 값이고, F_{\max} 는 차륜에 작용될 수 있는 최대 마찰력이다. 그리고 $W_f(s)$ 는 1차 필터로 다음과 같다.

$$W_f(s) = \frac{1}{T_F s + 1} \quad (3-2-78)$$

여기서 시상수 T_F 는 그 값이 너무 작으면 필터 역할을 제대로 수행할 수 없으며, 그 값이 너무 크면 관측기의 추적 성능이 저하된다. 따라서 본 연구에서는 알맞은 시상수 값을 결정하기 위하여 퍼지 알고리즘을 도입한다. 각속도에 대한 오차 및 오차의 변화율에 대한 정보를 나타내는 퍼지 알고리즘 변수를 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} \alpha_F &= w(t) - \hat{w}(t) \\ \beta_F &= \alpha_F(t) - \alpha_F(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (3-2-79)$$

여기서 Δt 는 시간간격이다. 퍼지 집합들의 멤버십 함수와 입출력에 관한 언어적 관계는 참고문헌 [82]와 동일하게 사용하였다. Fig. 3-2-53은 전체 입출력의 3차원 평면을 나타낸 것으로 고려된 T_F 값이 α_F 와 β_F 에 따라 변하며, $(\alpha_F, \beta_F) = (0, 0)$ 에서 안장점(saddle point)을 갖는 것을 알 수 있다. Fig. 3-2-54는 제안된 퍼지 알고리즘을 도입한 필터의 반응 속도를 기존의 필터와 비교하였다. 시상수 값이 작을 경우($T_F=0.15$) 추적 시간은 짧

지만 떨림 현상을 동반하고, 그 값이 클 경우($T_F=0.3$) 떨림 현상은 없지만 추적 시간이 길어진다. 한편 제안된 퍼지 알고리즘을 도입함으로써 각각의 장점을 얻게 됨을 확인할 수 있다.

마. 제어 결과 및 고찰

ER 밸브를 장착한 ABS(이하 ER ABS라 칭함)의 성능평가를 위해 급제동시 제동거리와 비대칭 노면에서 차량의 안정성, 또한 저마찰 노면에서 고마찰 노면으로 진행시 반응속도 및 제동 중 조향각이 주어졌을 때 차량의 안정성을 고찰하였다. 고려된 M 은 1200kg 으로 불확실성을 $\pm 20\%$ 로 설정하였고, I_v 는 약 $4000\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 으로 질량 분포가 균일하다고 할 때 질량에 비례하므로 불확실성은 공칭값의 $\pm 20\%$, C 와 x_μ 는 각각 5850 N/rad 과 3으로 노면조건에 따라 불확실성의 범위를 $\pm 55\%$, $\pm 70\%$ 로 설정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 모든 시스템 파라미터 및 제어 변수값은 부록에 있다. 비교 대상이 되는 기존의 ABS는 참고문헌 [71]의 유압모델과 참고문헌 [72]의 슬라이딩 모드 제어를 연계하여 구성하였다. 노면조건은 Fig. 3-2-55와 같이 고마찰노면(road1)과 저마찰노면(road2)으로 구성하였다. 실제노면과 비교하여 볼 때 고마찰노면은 대략 젖은 아스팔트와 비슷하며, 저마찰노면은 눈길과 비슷하다.

Fig. 3-2-56은 고마찰 노면(road1)에서 초기속도 100km/h 인 차량이 급제동 하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 속도 그래프에서 전륜과 후륜의 제어 수행결과 차이는 차량의 피칭(pitching)으로 차량 무게중심이 전륜으로 치우치기 때문이다. 또한 속도가 0에 가까울수록 시스템이 불안정해지므로 제어 수행 제한속도(threshold velocity)는 3m/s 로 설정하였다. 제어 상태변수인 슬립률과 압력 그래프를 살펴보면 기존의 ABS는 밸브의 작동 특성상 시스템에 떨림 현상을 동반하고 있음을 볼 수 있다[71]. 반면 ER ABS에서는 슬립률 제어가 ER 밸브에 정량적인 전기장 입력을 가함으로써 시스템의 떨림 현상을 완벽하게 제어할 수 있어 페달 감각등을 향상시킬 수 있다.

Fig. 3-2-57은 초기속도 85km/h 인 차량이 비대칭노면에서 급제동하였을 때의 제어 결과이다. 이때의 yaw rate을 살펴보면 yaw rate 제어가 후륜만을 제어한다는 구속 조건으로 완벽한 자세 제어를 수행하지 못하였지만 ER 밸브를 장착한 차량이 슬립률 제어 수행 능력 향상으로 yaw rate을 더욱 안정적으로 제어함으로써 차량 안정성 및 승차감을 향상시키는 것을 알 수 있다. Fig. 3-2-58은 Fig. 3-2-57의 시뮬레이션 결과 자료를 이용하여 0.5초 간격으로 차량의 위치 및 모습을 배열한 것이다. 기존 ABS의 경우 yaw rate 제어를 수행하지 않을 때에는 좌우 지면의 마찰력 차이로 안정성을 잃어버리게 됨을 볼 수 있다. yaw rate 제어를 통하여 차량의 안정성을 확보할 수 있으며, 제안된 ABS가 기존의 ABS보다 우수한 제동 효과 및 안정성을 가져옴을 알 수 있다.

노면 상태가 일정하지 않을 때는 지면 마찰계수가 수시로 바뀌게 된다. 이 때는 변화하는 각 노면 상태에 즉각 대처할 수 있는 능력, 즉 제어기의 빠른 반응 속도가 요구된다. Fig. 3-2-59(a)는 초기속도 85km/h 를 갖는 차량이 저마찰 노면에서 30m 진행 후 다시 고마

찰 노면으로, Fig. 3-2-59(b)는 고마찰 노면에서 30m 진행 후 저마찰 노면으로 진행하는 경우를 시뮬레이션한 결과이다. 노면이 바뀌는 순간 슬립률 및 압력에 약간의 과도 현상이 생기지만 그 후에는 떨림 현상 없이 제어가 잘 수행되고 있음을 알 수 있다. ABS가 장착되지 않은 차량은 급제동시 장애물을 만났을 때 조향 능력의 상실로 사고를 유발하게 된다. 그러므로 Fig. 3-2-60은 ER ABS의 이러한 능력을 살펴보기 위하여 초기속도 100km/h인 차량에 제동을 가하며 조향하였을 때 제어결과를 나타낸다. 이때의 제어결과는 주행하던 차량이 장애물을 만나 급제동하면서 차량의 초기 주행차선의 왼쪽 차선으로 주행방향을 변경하여 장애물을 피한 후 다시 초기 주행차선으로 조향했을 때이다. 최대 요레이트 변화율은 초당 0.36rad/s로 설정하였다. 그림에서 보듯이 안정적이고 떨림현상이 없는 슬립율과 yaw rate 제어 결과로 우수한 제동 효과와 차량의 조향 안정성을 가져올 수 있음을 알 수 있다.

바. 결론

본 연구에서는 ER 밸브를 특징으로 하는 승용차용 ABS를 제안하여 여러 노면 조건에서 슬립률과 yaw rate을 제어하였다. 현 시점에서 개발되어있는 ER 유체의 빙행 모델과 소형 승용차용 ABS에서 요구되는 제동력을 바탕으로 알맞은 크기의 ER 밸브를 설계한 후 브레이크 시스템에 대한 동적 모델을 구축하였다. 또한 ABS 작동 시 요구되는 차량의 안정성 확보를 위하여 yaw rate에 대한 제어 시스템모델은 여러 불확실성을 고려하여 도출하였다. 슬립율과 yaw rate 제어를 위해 슬라이딩 모드 제어를 구성하였고, 직접 측정이 불가능한 지면과 타이어 사이에서 발생하는 마찰력을 퍼지 알고리즘과 연계한 슬라이딩 모드 관측기를 통하여 추정하였다. 제안된 ABS의 효율성과 우수성을 입증하기 위하여 비대칭 노면 시험 등 여러 제동 성능을 기존 ABS와 비교하였다. 그 결과 기존 ABS에서 발생하는 떨림 현상을 제거하여 제동능력과 차량 안정성 면에서 우수한 효과를 가져왔다. 현재 제안된 ER ABS의 실험적 구현을 위하여 ER 밸브 제작이 진행 중에 있으며, 또한 여러 온도 조건 하에서의 ER 유체 빙행 모델 도출과 이에 따른 제어기법의 강건성이 연구되고 있다.

6. ER 엔진 마운트

일반적으로 승용차용 엔진 마운트는 엔진의 지지와 함께 엔진에서 발생하는 소음 및 진동을 절연하는 역할을 한다. 차량에서의 진동과 소음의 주된 원인 중 하나는 엔진 구동계로 엔진에서 발생하는 가스폭발력과 불균형력이고 이는 승차감 및 내구성을 저하시키는 요인들로 작용한다. 따라서 엔진의 움직임에 기인되는 자동차의 소음, 진동 문제를 해결하기 위해 최근 엔진 마운트의 최적위치 결정과 우수한 성능의 엔진 마운트 설계 및 제어를 위한 연구와 개발이 고무 마운트, 유체봉입 마운트와 같은 수동형 마운트에서 능동형 마운트까지 활발히 진행되고 있다[83,84]. 지능재료의 하나인 전기유동유체

(electrorheological fluid)를 이용한 반능동형 ER 엔진 마운트는 전기장 부하에 따라 폭 넓고 연속적인 감쇠력을 발생시킬 수 있는 장점을 가지며, 본 연구에서는 유동모드 형태를 갖는 ER 엔진 마운트에 대한 연구를 수행하였다. 진동절연 성능과 더불어, 엔진룸에 장착되어 있는 엔진 마운트는 기후, 엔진 운전 시 열에 대한 노출 등 여러 가지 혹한 조건에 접해있으므로 ER 유체를 이용한 엔진 마운트의 온도에 따른 성능연구를 수행하였다.

가. 시스템의 모델링 및 제작

본 연구에서 사용된 ER 유체는 전기장 부하에 따라 유체의 항복응력이 변하는 특성을 가지고 있으며 PMA계열의 ER 유체를 사용하였다. ER 유체의 거동은 Bingham 모델을 이용하여 다음과 같이 수식으로 표현 할 수 있다.[85]

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + \tau_y(E) = \eta\dot{\gamma} + \alpha E^\beta \quad (3-2-80)$$

여기서 $\tau_y(E)$ 는 ER 유체의 항복응력을 나타내고 η 는 ER 유체의 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 전극에 대한 유체의 전단 속도비, α , β 는 ER유체의 고유 특성치로서 입자의 종류, 점도, 조성, 수분함유량, 용매의 종류에 의해 결정되고 전기장 증가에 따라 항복응력이 지수적으로 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 3-2-61은 본 연구에서 제안된 ER 엔진 마운트의 구조를 나타낸다. ER 엔진 마운트는 크게 주장성을 담당하는 고무, ER유체가 담겨지게 되는 상/하부챔버, 전기장 부하에 의해 ER효과를 발생시키게 되는 +/-전극 그리고 유체 유동시 유체의 흐름을 원활하게 해주고 이를 담고 있는 역할을 해주는 다이어프램으로 구성되어 있다. -전극은 재질을 두랄루민으로 하였고 +전극은 도체재질로서 MC플라스틱 위에 유로를 따라 설치되어 있다. 이때 +/- 전극 간극은 1.0mm로 하였고 유체의 흐름이 발생하는 유로는 2개로서 전기장 무 부하 상태에서도 기본적인 역할을 할 수 있도록 설계하였다. Fig. 3-2-62는 제작된 ER 엔진 마운트의 사진을 보여 주고있다.

차량시스템에서 엔진은 ER 엔진 마운트의 주장성을 담당하는 고무상단에 위치하게 되고 엔진의 운동시 상부 및 하부 챔버 내부에 채워져 있는 ER 유체는 전극사이로 유동을 하게된다. 이때 전기장을 부하 하게 되면 전극사이로 유동하는 유체는 항복응력이 발생하게 되고 ER 엔진 마운트의 댐핑력을 증가시키게 된다. 이러한 원리를 이용하여 전기장을 적절하게 부하 하여 연속적으로 원하는 댐핑력을 발생시킬 수 있다.

ER 엔진 마운트의 유체역학적 모델이 Fig. 3-2-63에 도시되어 있고 이때 ER 유체는 비압축성으로 하여 해석을 하였다.[86] 이 모델로부터 다음과 같은 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$M\ddot{x}_1 + K_R(x_1 - x_2) + C_R(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - A_P P_1 = 0 \quad (3-2-81)$$

여기서 M 은 ER 엔진 마운트의 상부에 장착되는 질량, K_R 은 고무의 강성, A_P 는 피스톤 단면적, C_R 은 고무의 댐핑, P_1 은 상부 챔버의 압력이다. 챔버내부에서 유체의 유동 시 발생하는 전체 압력강하는 유로를 통한 유동시 발생하는 압력강하(ΔP_i)와 전기장 인가 시 발생하는 ER 효과에 의한 압력강하(ΔP_{ER})의 합으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P_2 - P_1 = \Delta P_i + \Delta P_{ER} = R_i Q + 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) \quad (3-2-82)$$

여기서 R_i 는 ER 유체의 점성, 유로의 간극, 길이에 의해 결정되는 유동저항이고, Q 는 엔진 마운트 내의 전극간극에서 발생하는 총 유량을 나타낸다. 유동발생 시 연속방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_1 \dot{P}_1 &= -A_P(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + QP_1 \\ C_2 \dot{P}_2 &= -Q \end{aligned} \quad (3-2-83)$$

여기서 P_2 는 하부챔버의 압력강하, C_1 , C_2 는 각각 상부챔버, 하부챔버의 컴플라이언스를 나타낸다.

위의 식으로부터 식(3-2-81)을 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{x}_1 + K_T(x_1 - x_2) + C_T(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = -F_{ER} \quad (3-2-84)$$

여기서 $K_T = K_R + \frac{A_P^2}{C_1 + C_2}$, $C_T = C_R + \left(\frac{A_P C_2}{C_1 + C_2}\right)^2 R_i$ 이다.

또한 이 모델로부터 ER 엔진 마운트에서 발생하는 총 댐핑력을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{total} = K_T(x_1 - x_2) + C_T(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + F_{ER} \quad (3-2-85)$$

나. ER 엔진 마운트의 성능

승용차량의 엔진 마운트 시스템에서 엔진마운트의 지지 방식은 3점지지 또는 4점지지 방식이 많이 사용되고 이때 마운트 하나에 작용되는 하중은 60~70kg에 해당한다. 이에 따라 ER 엔진 마운트 성능 시험시 60kg의 프리로드(preload)를 가하여 실험을 수행하였고 ER 마운트에 가해지는 전기장은 ER 유체의 절연 파괴를 고려하여 2kV/mm로 제한하였다.

Fig. 3-2-64는 실험장치의 사진을 나타낸다. 비접촉식 변위센서(proximito)의 신호를 이용하여 가진기의 가진 진폭은 1.0mm로 일정하게 제어하였고 이때 ER 엔진 마운트로부터 발생하는 댐핑력은 마운트 상단에 고정 되어있는 로드셀(loadcell)로부터 측정된다. 온도 챔버내에 설치되어 있는 ER 엔진 마운트는 챔버의 온도를 조절함으로써 일정온도에 다르게 할 수 있고 온도제어를 센서로 열전대를 이용하였다. Fig. 3-2-65는 온도에 따른 엔진 마운트 주고무부분(main rubber)의 동적 특성을 보여주고 있다. 온도 증가에 따라 동강성(dynamic stiffness)의 변화가 조금 보여지고 있다. 이는 온도에 따른 영향이 작은 것으로 볼 수 있고 온도에 따른 강성의 변화가 없는 것으로 가정하여 이 실험 결과로부터 고무의 강성을 일정한 값(286613.0N/m)으로 고려하였다.

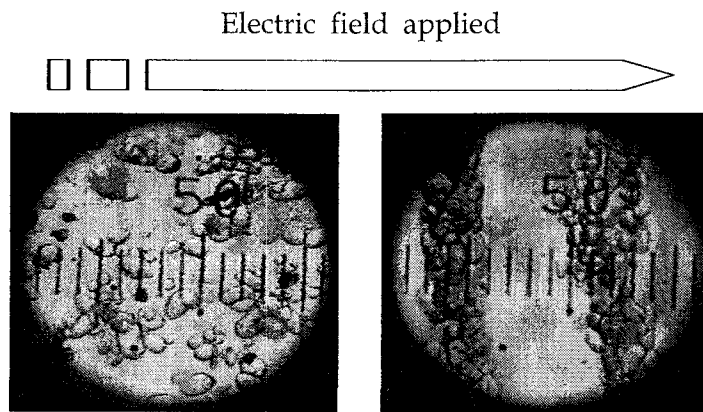
Fig. 3-2-66은 주파수 영역에서 온도에 따른 동특성 변화를 보여주고 있다. 가진 주파수는 3~30Hz로 하였으며 (a)는 상온(21℃)일 때의 동특성 변화를 보여주고 있다. 각각 전기장을 0, 1, 2kV/mm로 하였을 때의 동강성은 전기장 부하에 따라 증가하는 것을 알 수 있고 이는 전극부분에서의 항복응력 증가로 인해 댐핑력이 커졌기 때문이다. (b), (c)는 각각 50, 100℃에서 동특성의 변화를 보여주고 있다. 동일한 전기장을 부하 하였을 때 동강성 계수가 약간씩 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 온도가 상승함에 따라 ER 유체의 특성치를 나타내는 α, β 값이 증가하여 상대적으로 항복응력이 커졌기 때문이다. 여기에서 사용된 PMA계열의 ER 유체가 100℃까지 온도변화를 가지는 시스템에 적용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

다. 결론

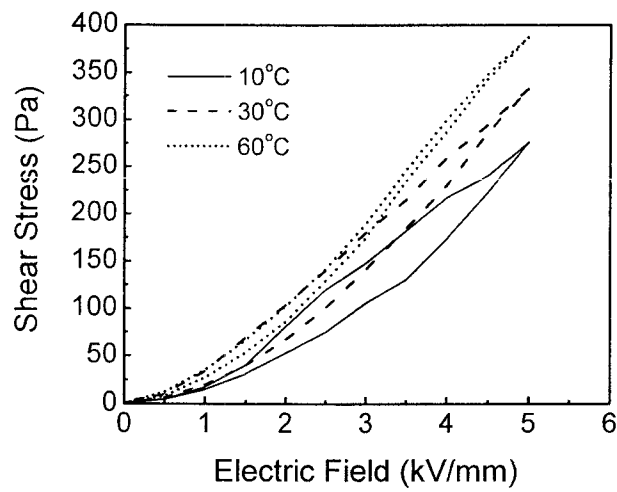
본 연구에서는 온도 변화가 수반되는 조건 속에서도 진동절연을 할 수 있는 유동모드형 ER 엔진 마운트를 제안하였고 모델링을 통해 파라미터 설계를 수행하여 제작하였다. 제작된 ER 엔진 마운트는 PMA계열의 ER 유체를 이용하여 온도 및 전기장에 따른 동강성계수의 변화를 통해 동적 특성을 고찰하였다. 대부분의 ER 유체가 고온에서는 과전류로 인하여 절연파괴가 수반되어 항복응력을 원하는 크기의 항복응력을 발생시키기 어렵지만 실험을 통해 전기장에 따른 동강성계수 변화를 보면 성공적으로 ER 엔진 마운트에 적용될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 불확실한 온도변화 상태에서 원하는 댐핑력을 얻을 수 있는 제어기를 적용 실험하여 제어성능을 고찰하고 1자유도 시스템 및 전체 차량시스템에 적용하여 진동절연 성능을 고찰 할 예정이다.

Table 3-2-1 Design parameter of ER seat damper

Design factor	Parameter
Piston rod diameter	10 mm
Inner cylinder diameter	40 mm
Electrode length	85 mm
Electrode gap	0.9 mm
Gas chamber pressure	15 bar



(a) micro photograph of chain structure



(b) hysteresis of the PMA-based ER fluid

Fig. 3-2-1 Phenomenological behavior of the ER fluid

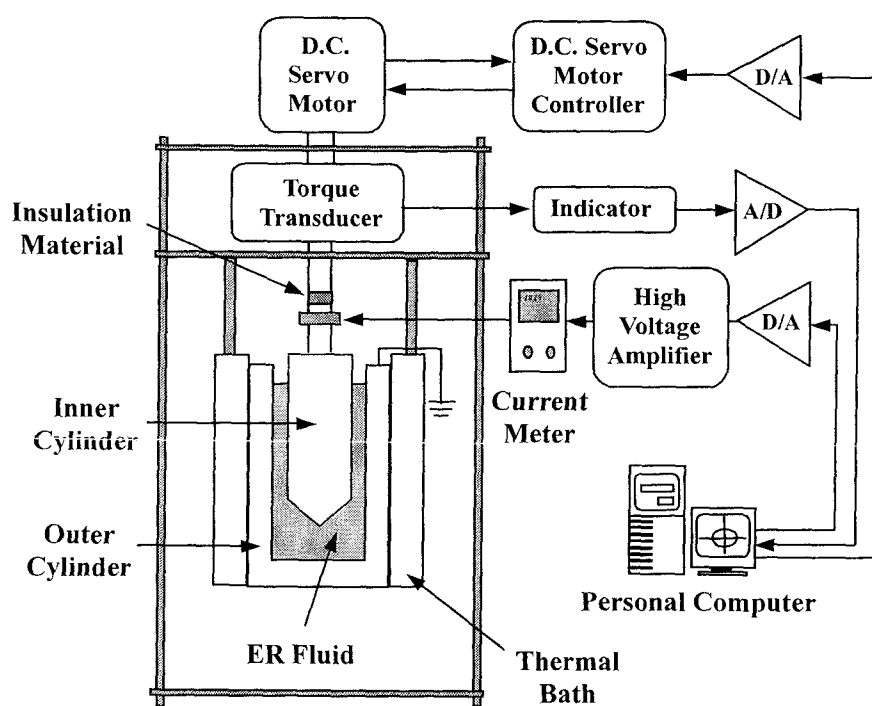
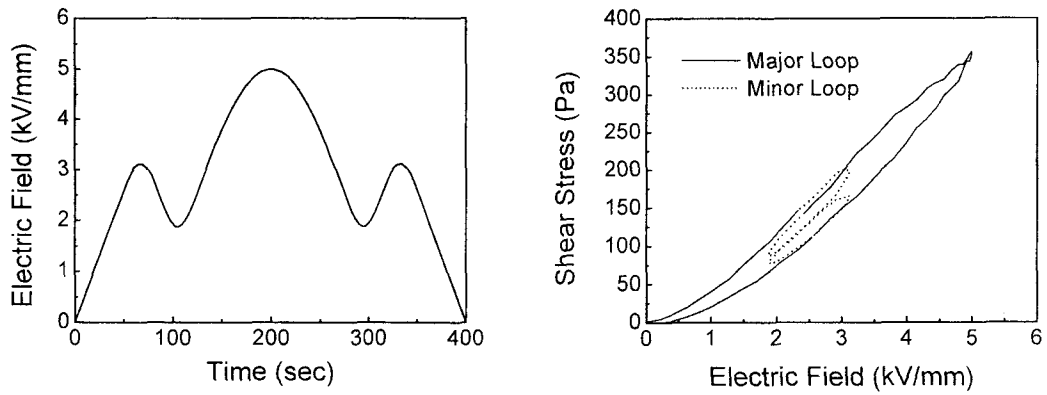
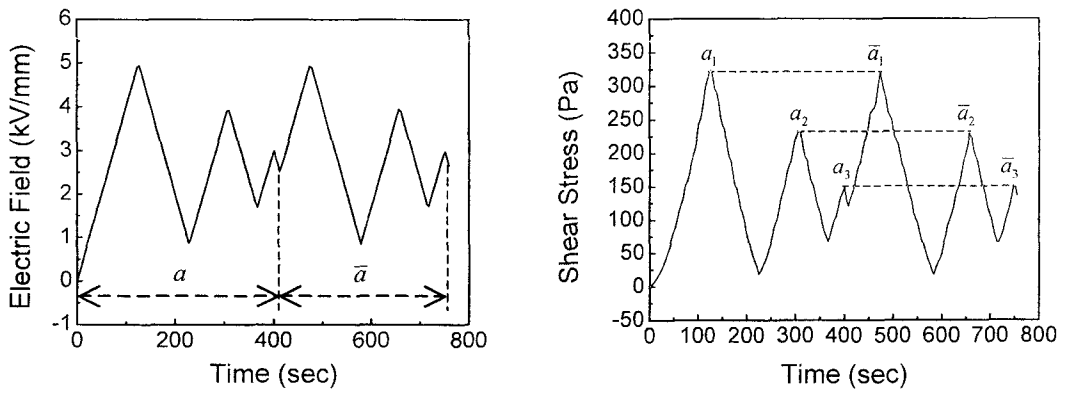


Fig. 3-2-2 Schematic diagram of experimental apparatus

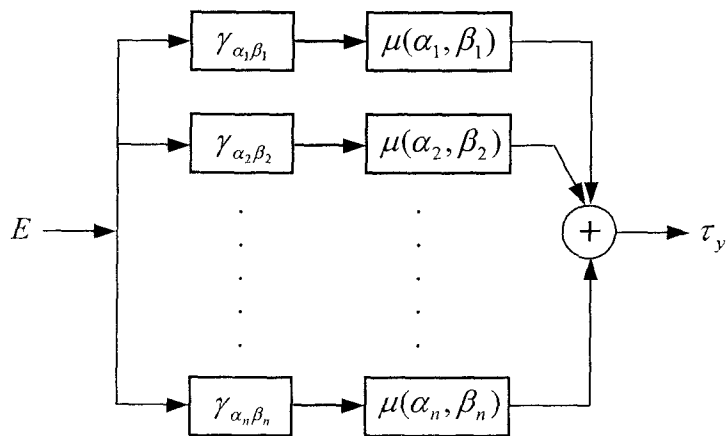


(a) minor loop

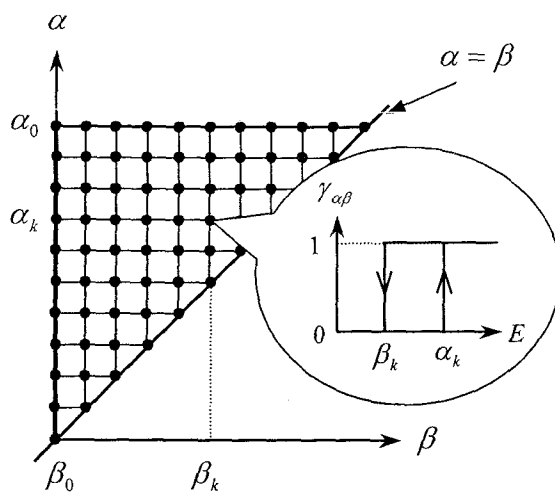


(b) wiping-out

Fig. 3-2-3 Preisach properties (30°C)

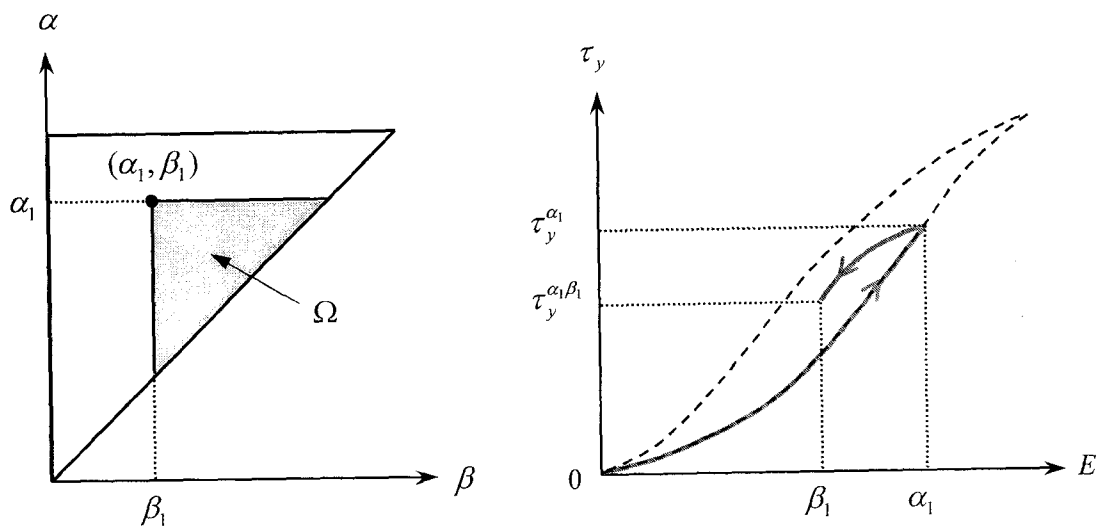


(a) block diagram

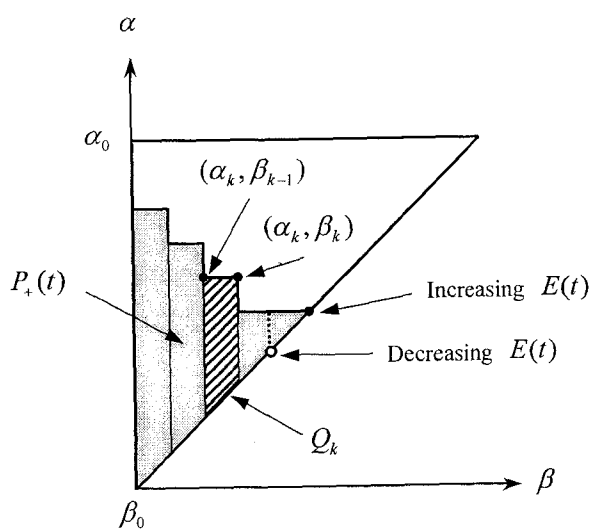


(b) hysteresis relay

Fig. 3-2-4 Configuration of the Preisach model

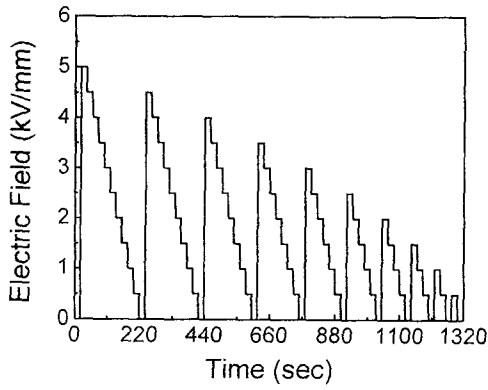


(a) experimental identification

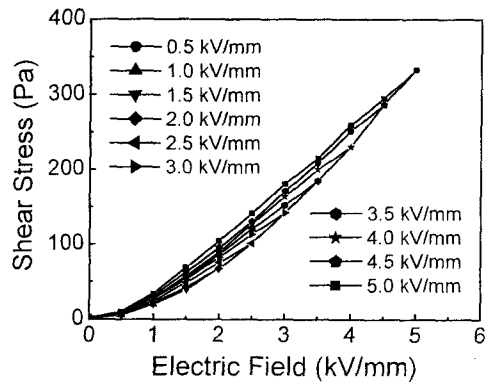


(b) numerical implementation

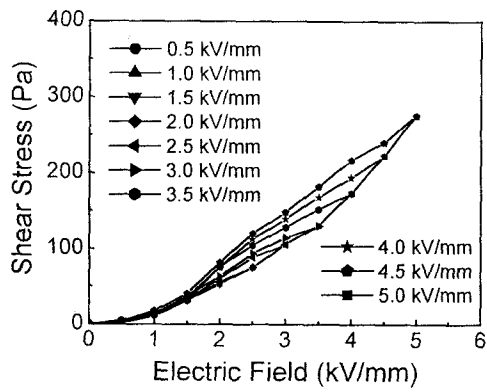
Fig. 3-2-5 Numerical identification and implementation of the Preisach model



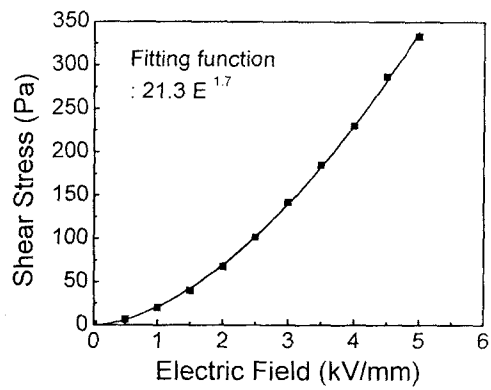
(a) electric field for FOD curves



(b) measured FOD curves (30°C)

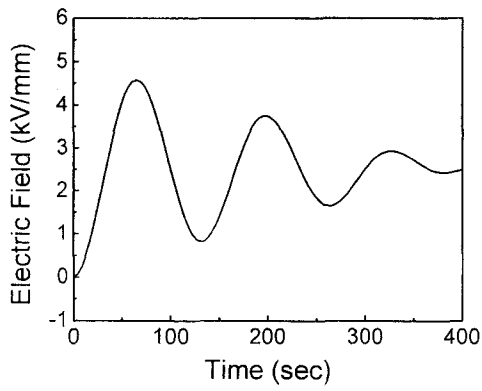


(c) measured FOD curves (10°C)

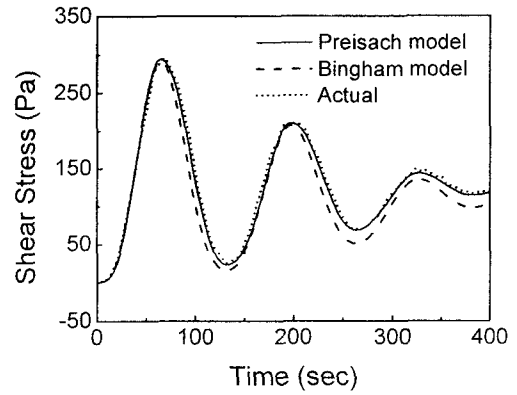


(d) Bingham characteristics

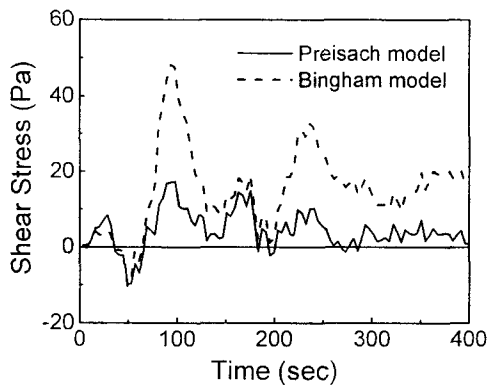
Fig. 3-2-6 Measured FOD curves and Bingham characteristics



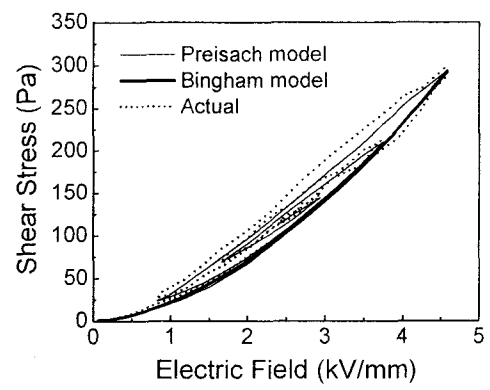
(a) electric field input



(b) hysteresis response



(c) prediction error



(d) hysteresis loop

Fig. 3-2-7 Actual and predicted hysteresis responses

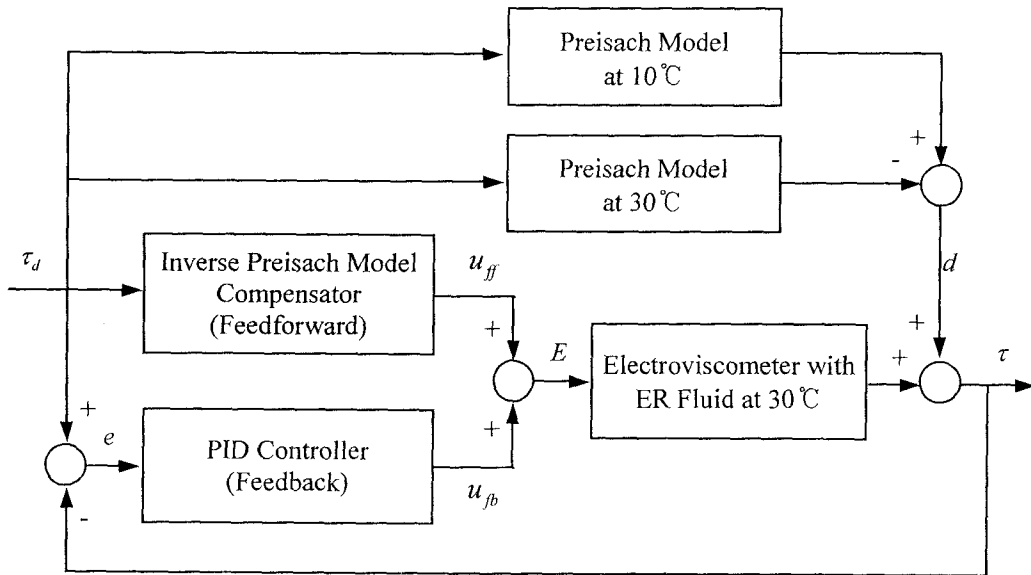


Fig. 3-2-8 The proposed control strategy

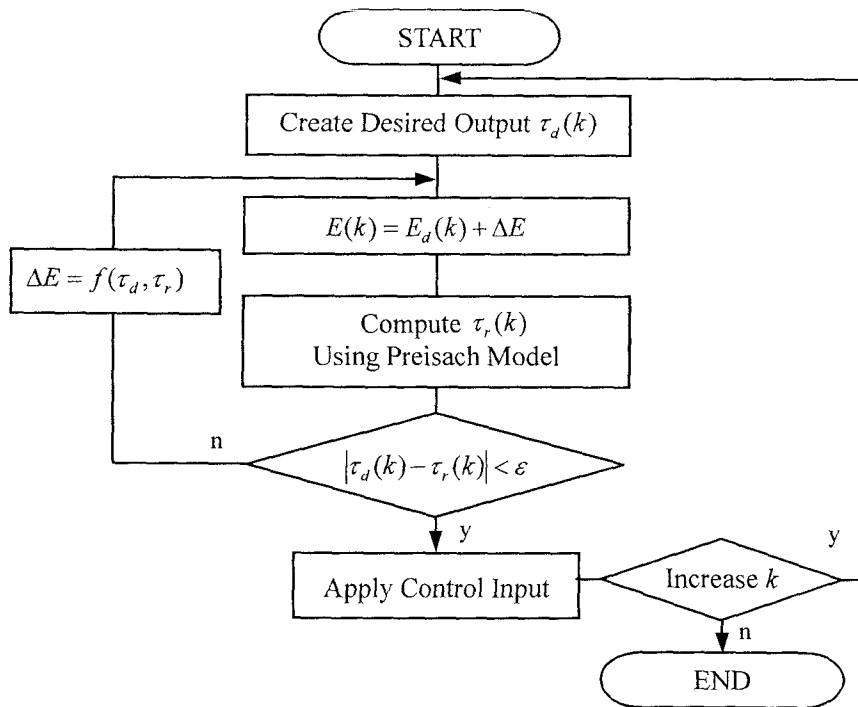
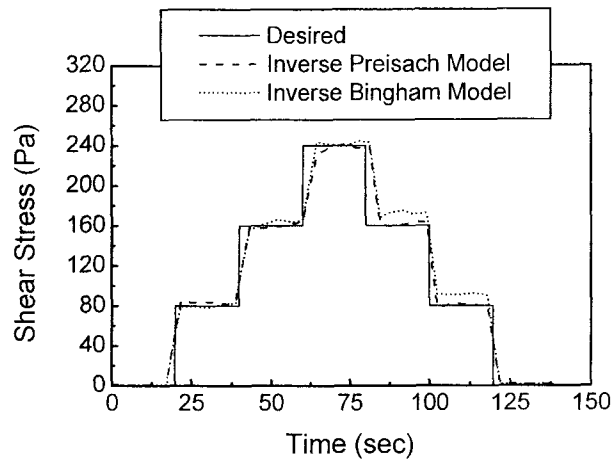
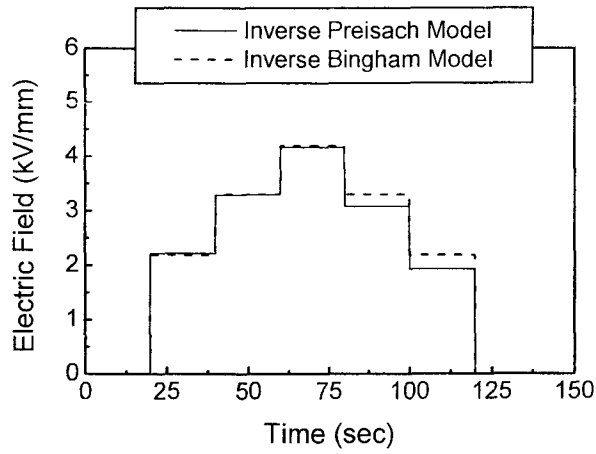


Fig. 3-2-9 Flow chart of the inverse Preisach model compensation

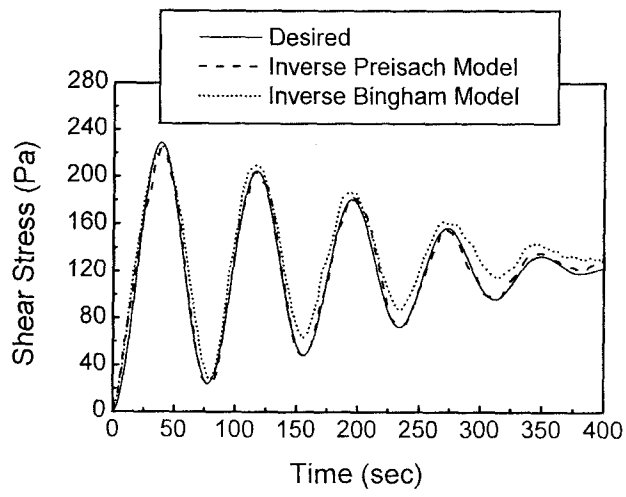


(a) tracking results

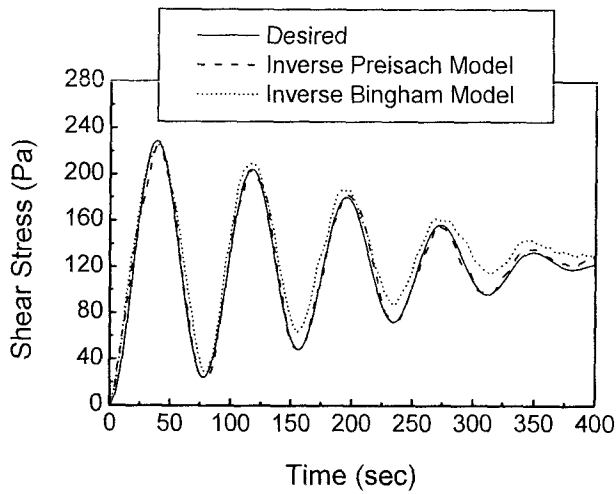


(b) control input

Fig. 3-2-10 Tracking control results for rectangular trajectory using the inverse Preisach model compensator

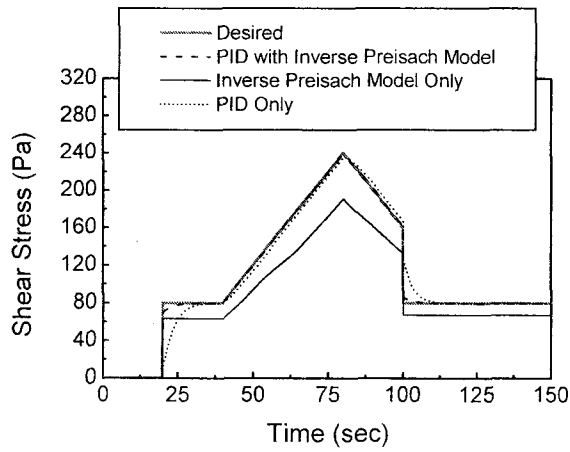


(a) tracking results

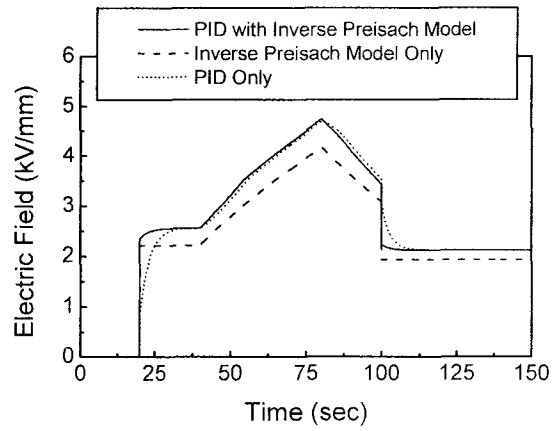


(b) control input

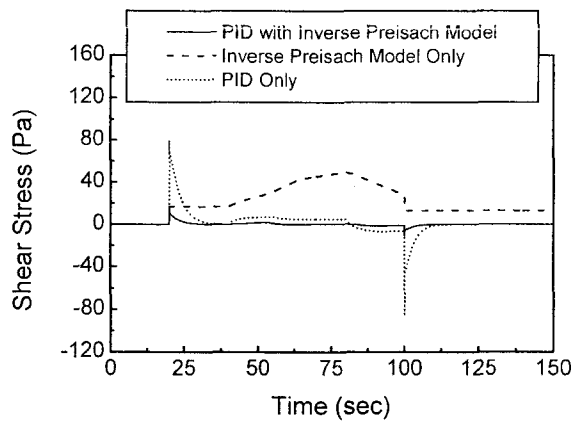
Fig. 3-2-11 Tracking control results for sinusoidal trajectory using the inverse Preisach model compensator



(a) tracking results

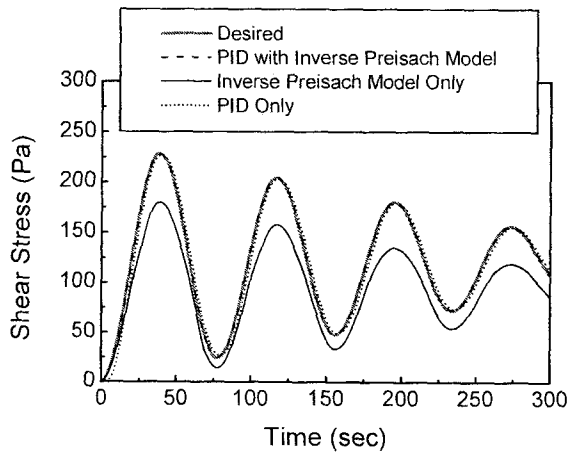


(b) control input

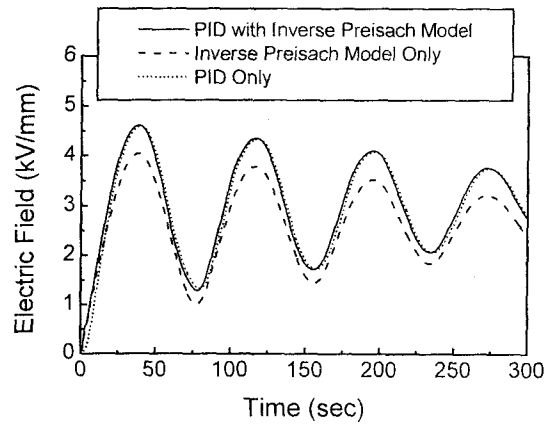


(c) tracking error

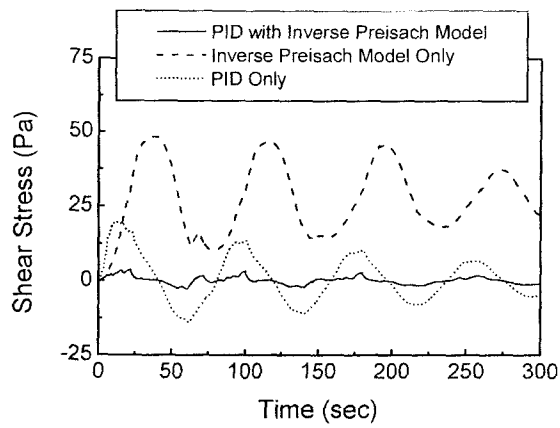
Fig. 3-2-12 Tracking control results for triangle-like input using the PID controller with inverse Preisach model



(a) tracking results



(b) control input



(c) tracking error

Fig. 3-2-13 Tracking control results for sinusoidal trajectory using the PID controller with inverse Preisach model

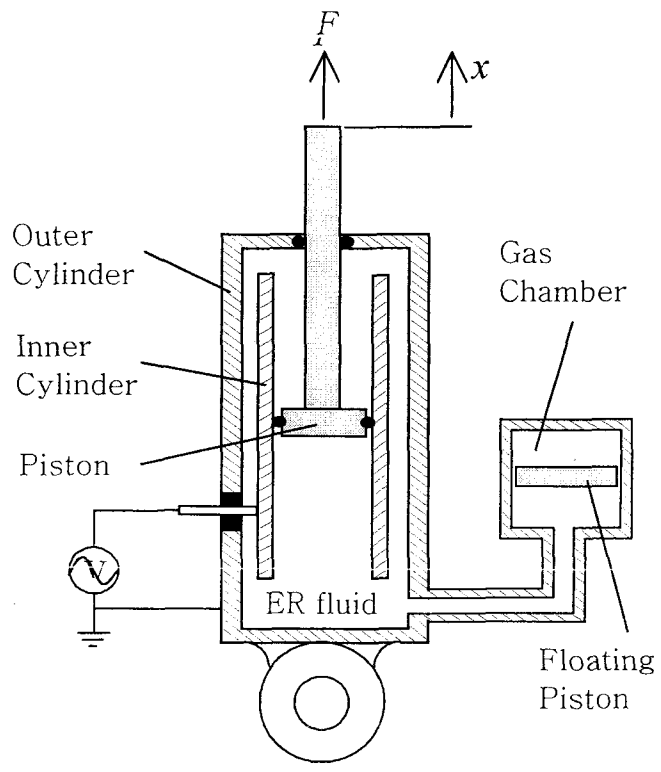


Fig. 3-2-14 Configuration of ER damper

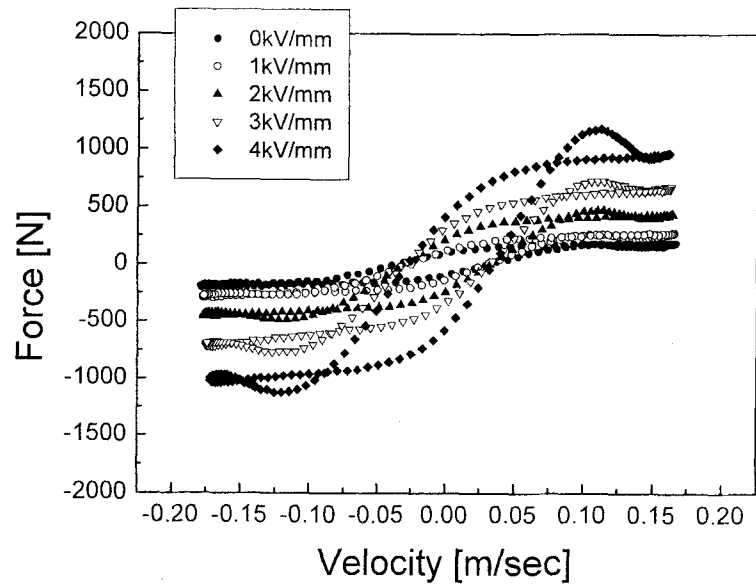


Fig. 3-2-15 Measured damping force characteristic

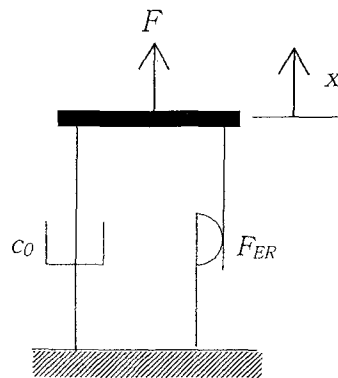


Fig. 3-2-16 Bingham model of ER damper

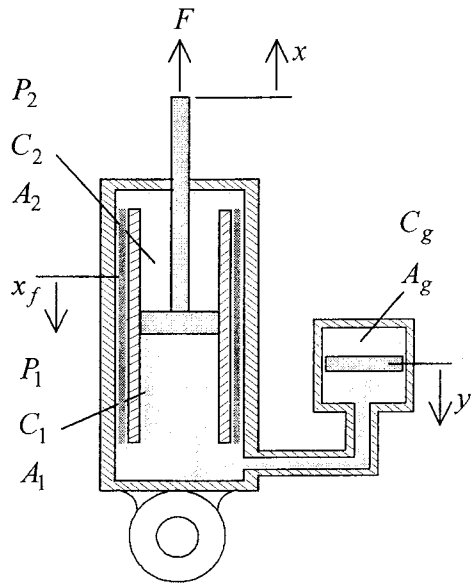


Fig. 3-2-17 Hydro-mechanical diagram of ER damper

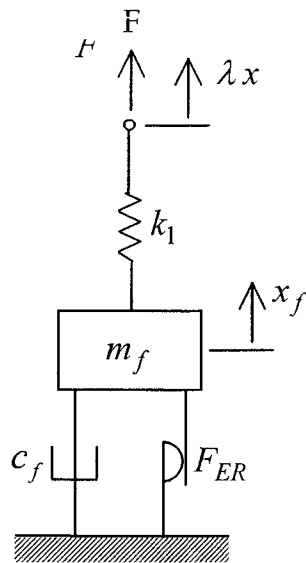


Fig. 3-2-18 Equivalent mechanical model of Hydraulic model

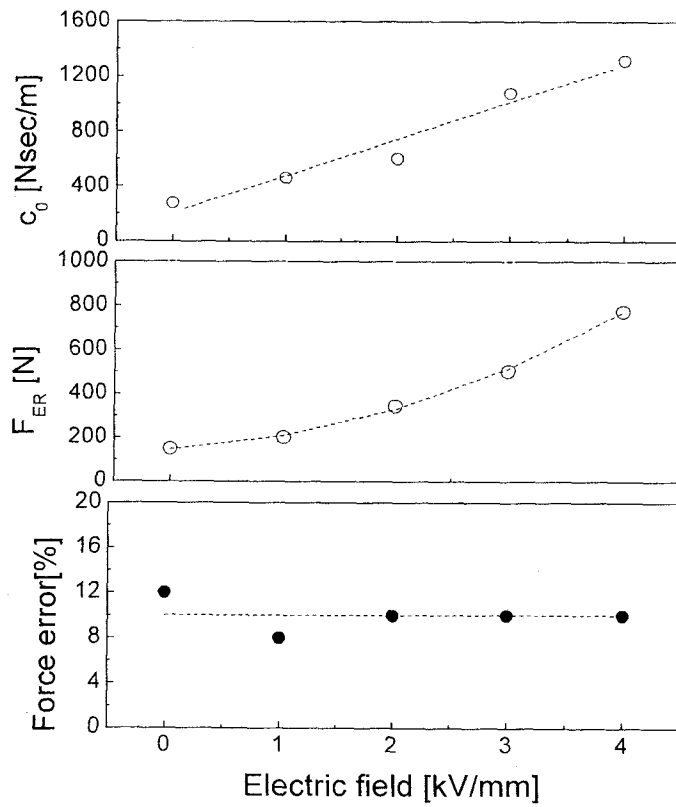


Fig. 3-2-19 Parameter optimization results of Bingham model

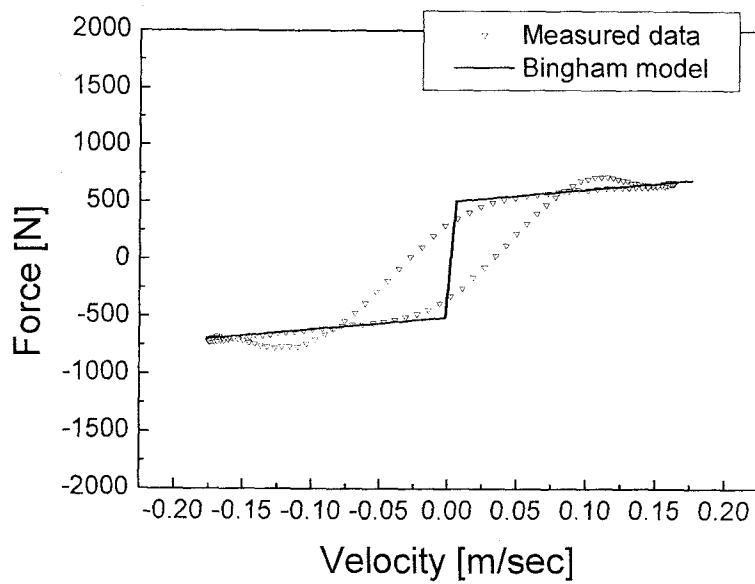


Fig. 3-2-20 Bingham model reconstruction shown with measured data
(Electric field : $3kV/mm$)

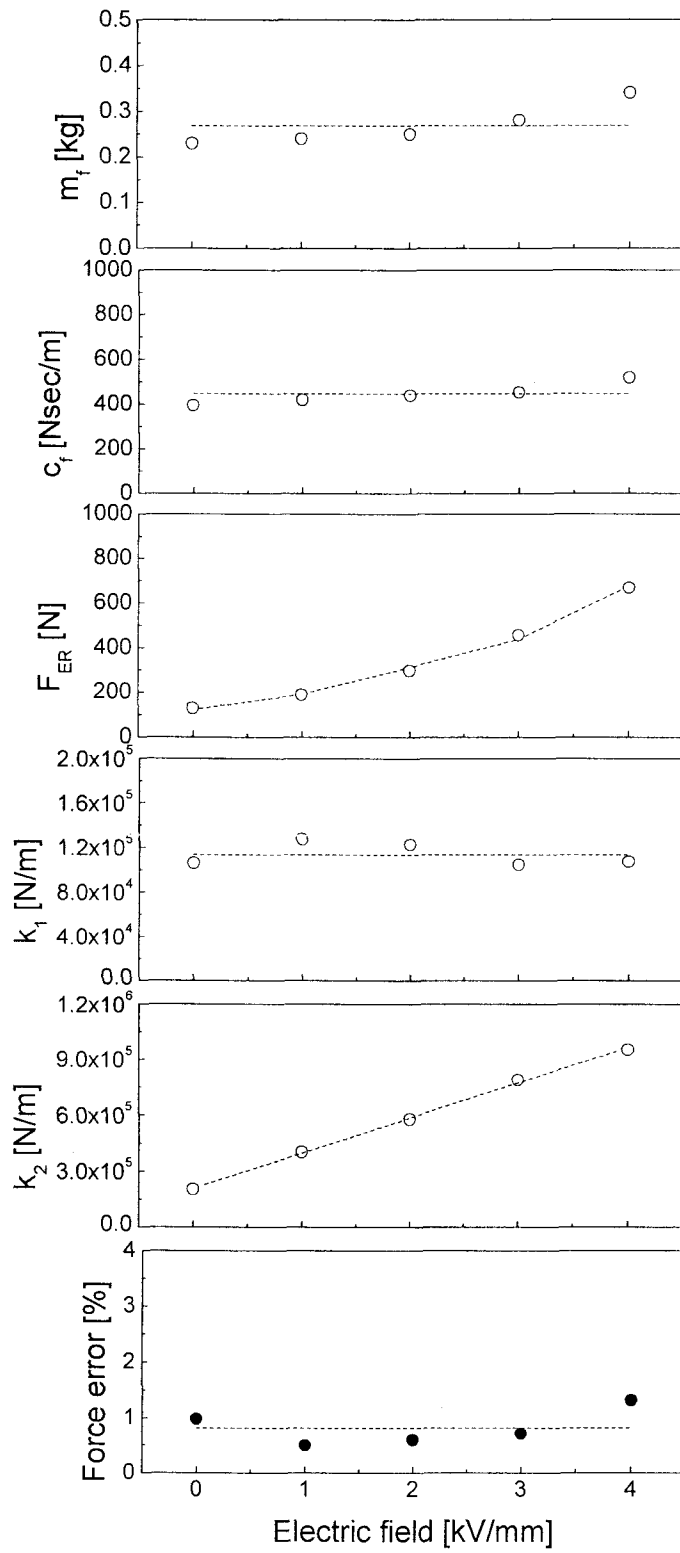


Fig. 3-2-21 Parameter optimization results of hydraulic model

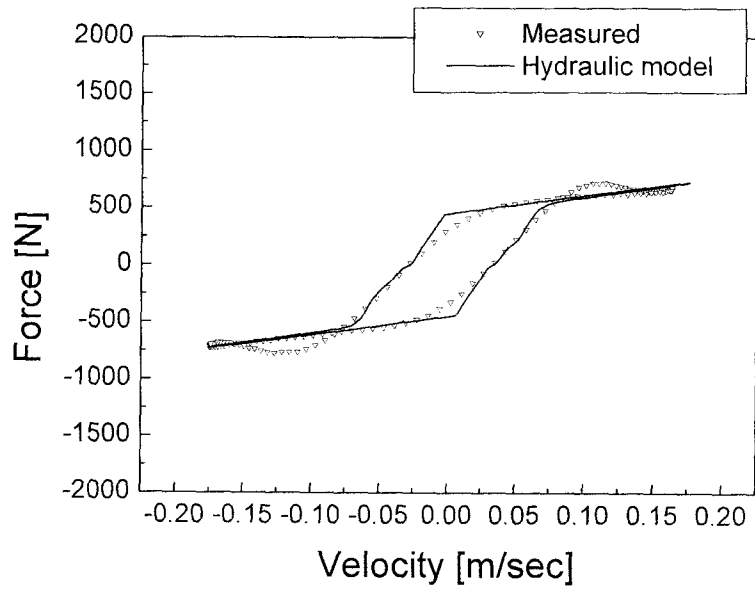


Fig. 3-2-22 Hydraulic model reconstruction shown with measured data
(Electric field : $3kV/mm$)

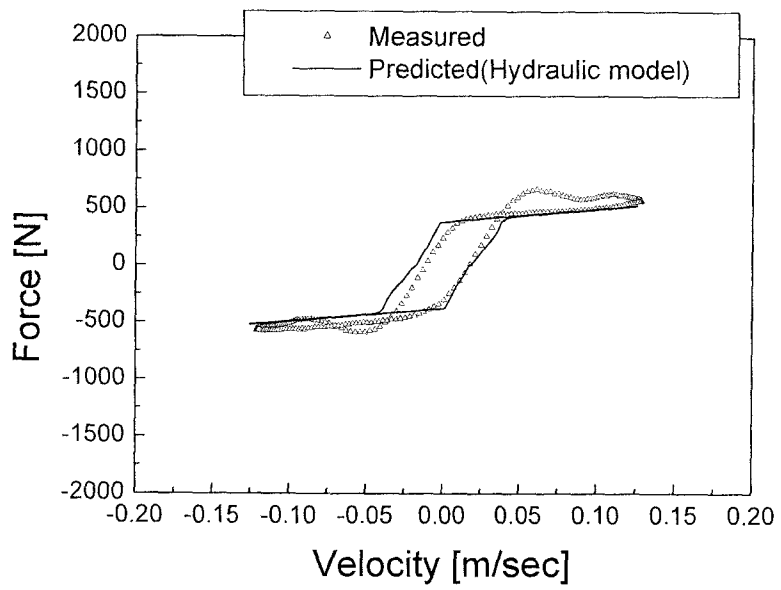
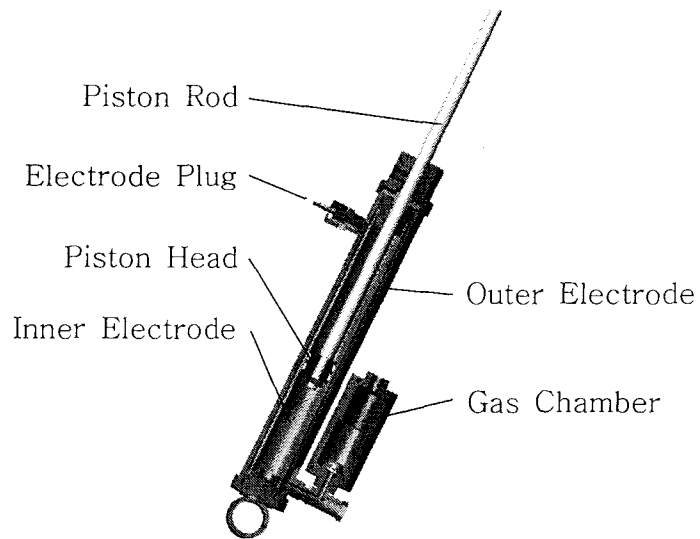
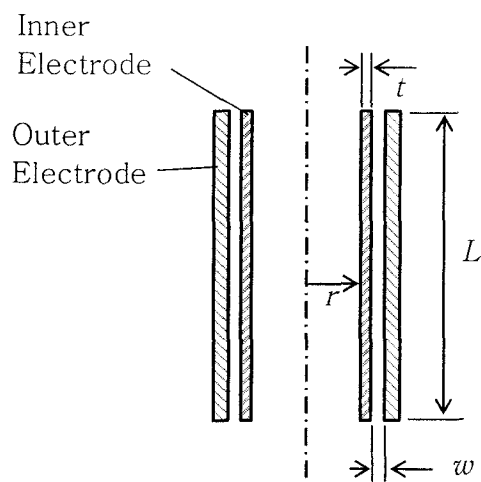


Fig. 3-2-23 Comparison of predicted and measured damping force

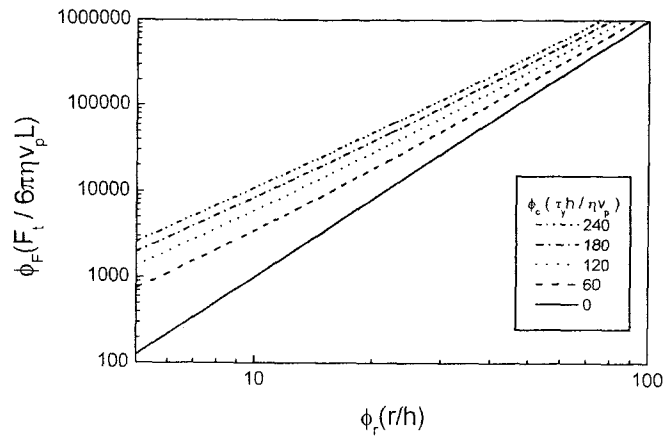


(a) schematic diagram

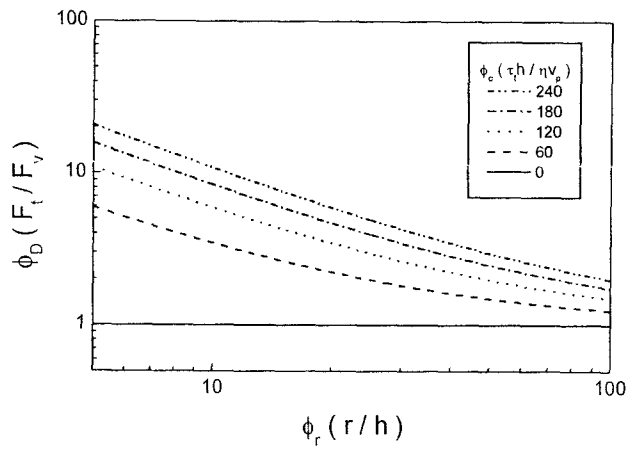


(b) geometry of electrodes

Fig. 3-2-24 Configuration of the ER shock absorber



(a) ϕ_D and ϕ_r at various ϕ_C



(b) ϕ_F and ϕ_r at various ϕ_C

Fig. 3-2-25 Analytical verification of nondimensional equations

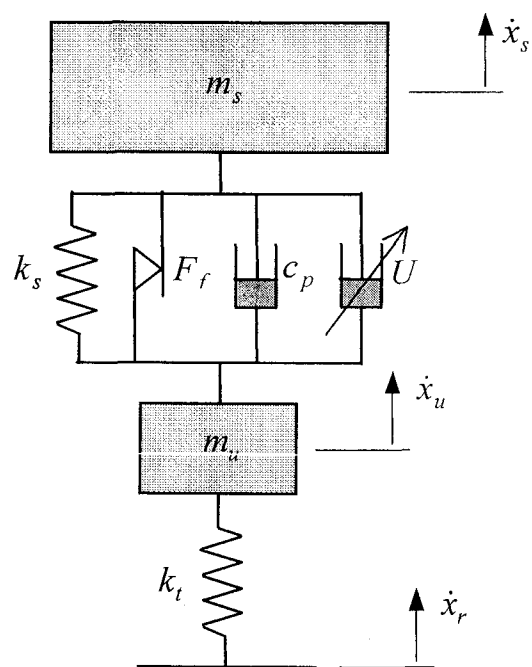
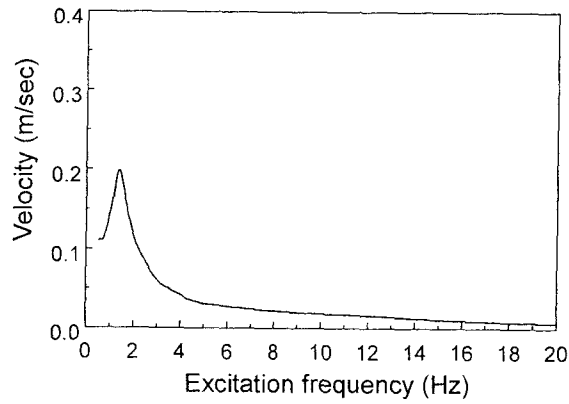
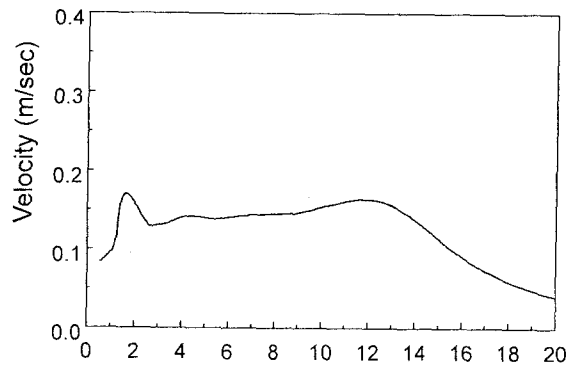


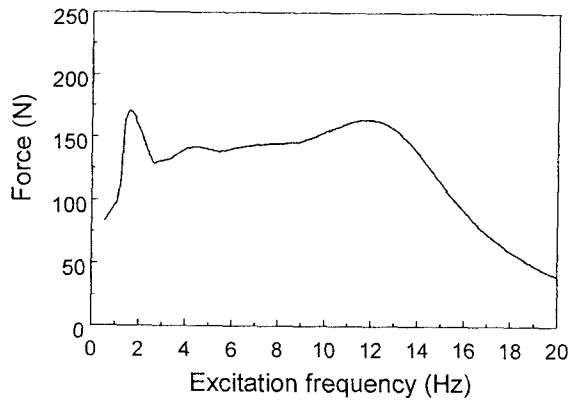
Fig. 3-2-26 Schematic diagram of a quarter car suspension system with ER shock absorber



(a) sprung mass velocity \dot{x}_s

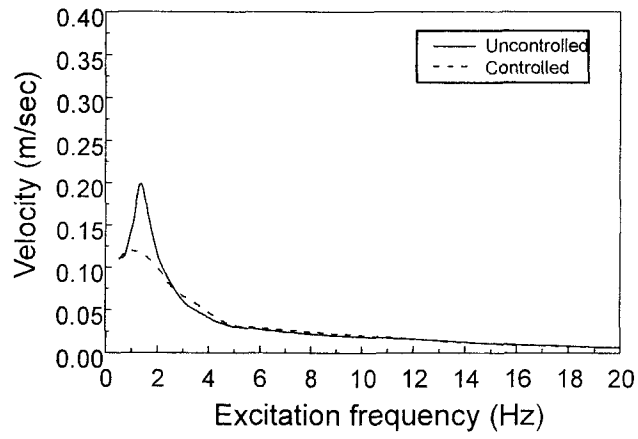


(b) piston velocity v_p

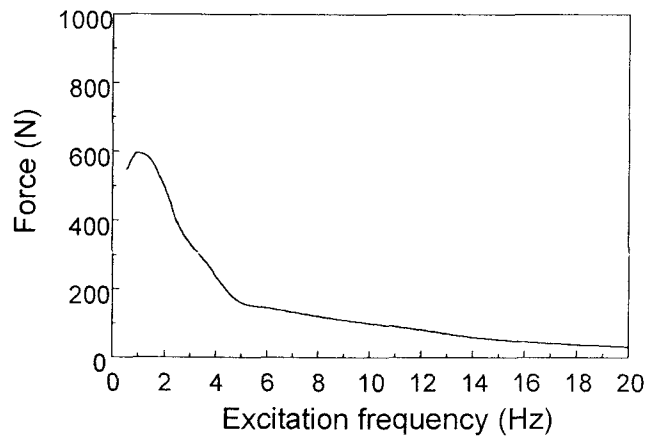


(c) viscous damping force F_v

Fig. 3-2-27 Uncontrolled response of a quarter car suspension system

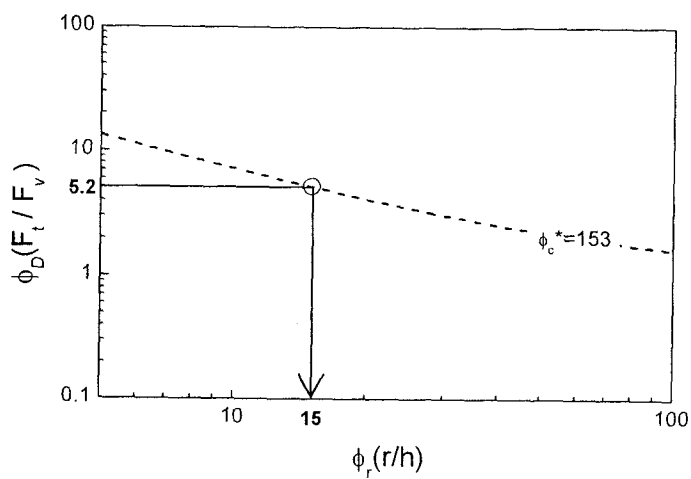


(a) sprung mass velocity \dot{x}_s

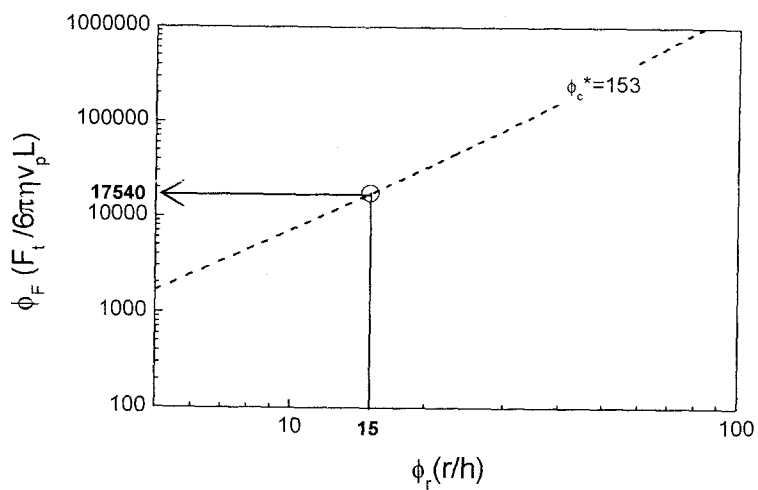


(b) control force U

Fig. 3-2-28 Controlled response of a quarter car suspension system

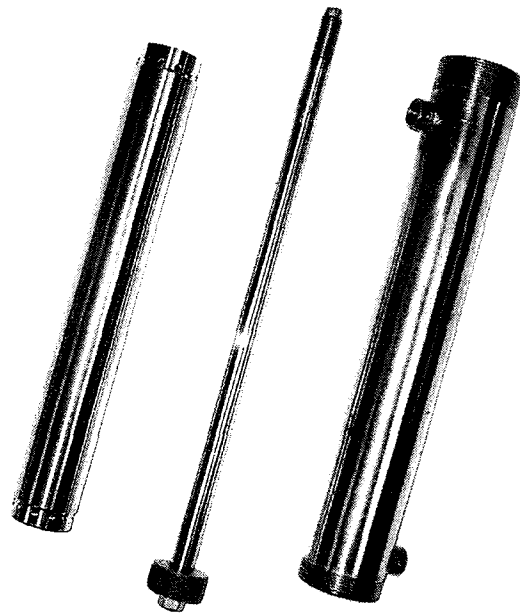


(a) ϕ_D and ϕ_r at ϕ_C^*

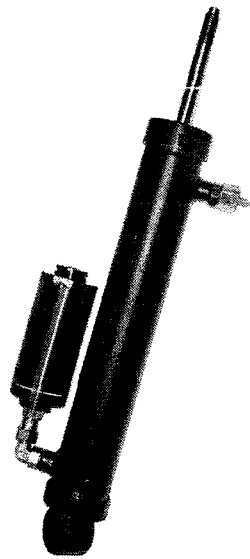


(b) ϕ_F and ϕ_r at ϕ_C^*

Fig. 3-2-29 Nondimensional design of the ER shock absorber

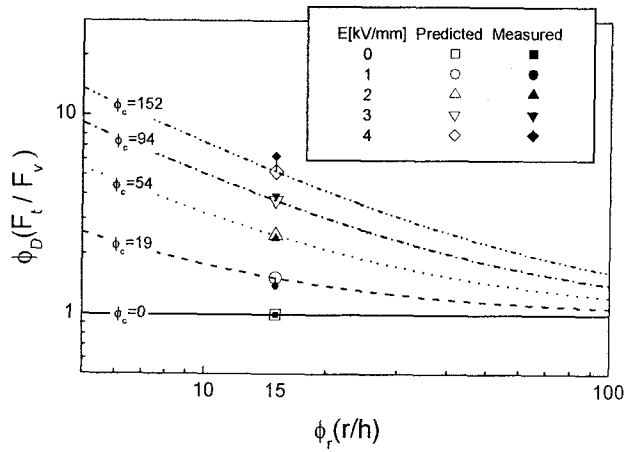


(a) electrodes and piston

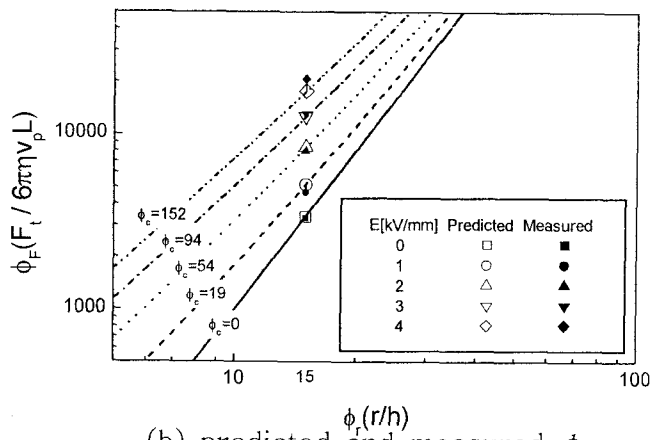


(b) assembly

Fig. 3-2-30 Photograph of the ER shock absorber

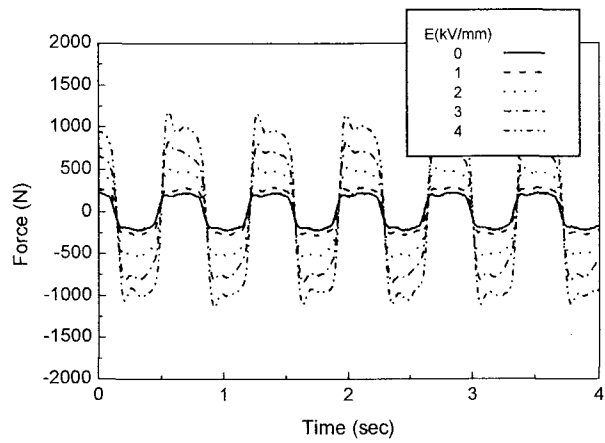


(a) predicted and measured ϕ_D

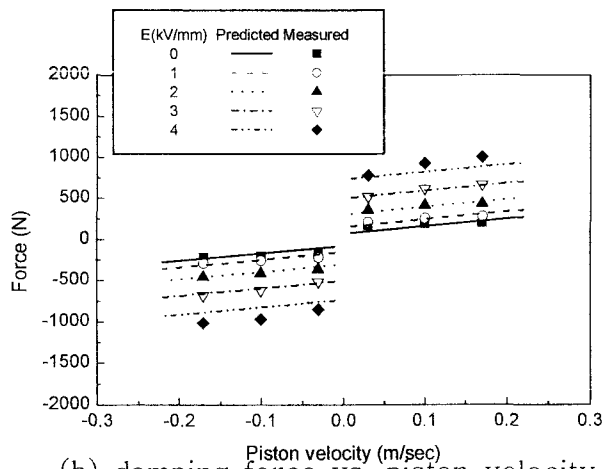


(b) predicted and measured ϕ_F

Fig. 3-2-31 Nondimensional analysis of the ER shock absorber

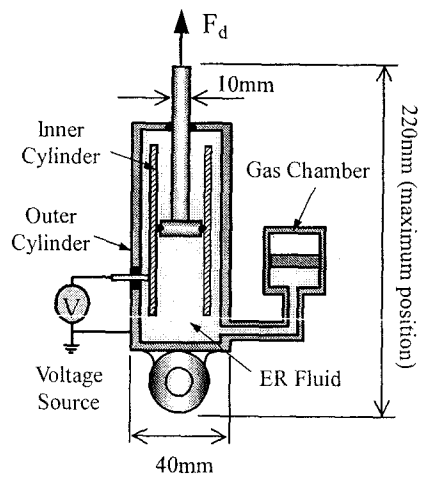


(a) time response of the measured force

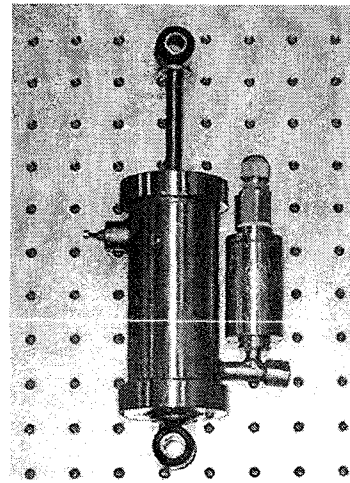


(b) damping force vs. piston velocity

Fig. 3-2-32 Measured damping force of the ER shock absorber



(a) Schematic configuration



(b) photograph

Fig. 3-2-33 Schematic configuration and photograph of ER seat damper

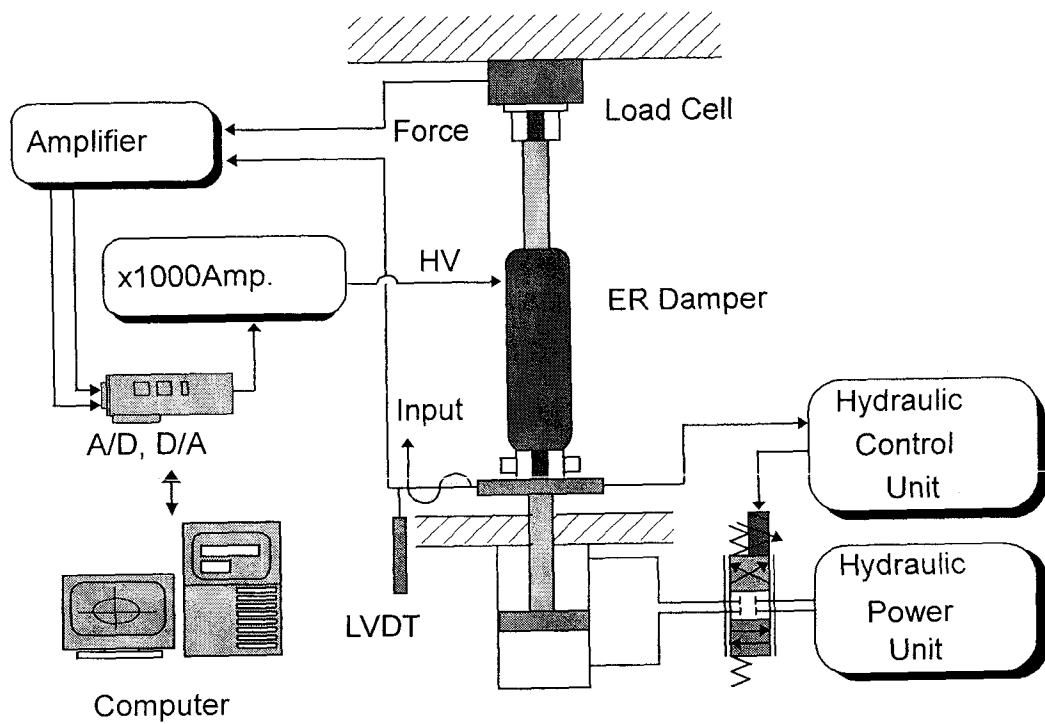


Fig. 3-2-34 Experimental configuration of the ER damper testing

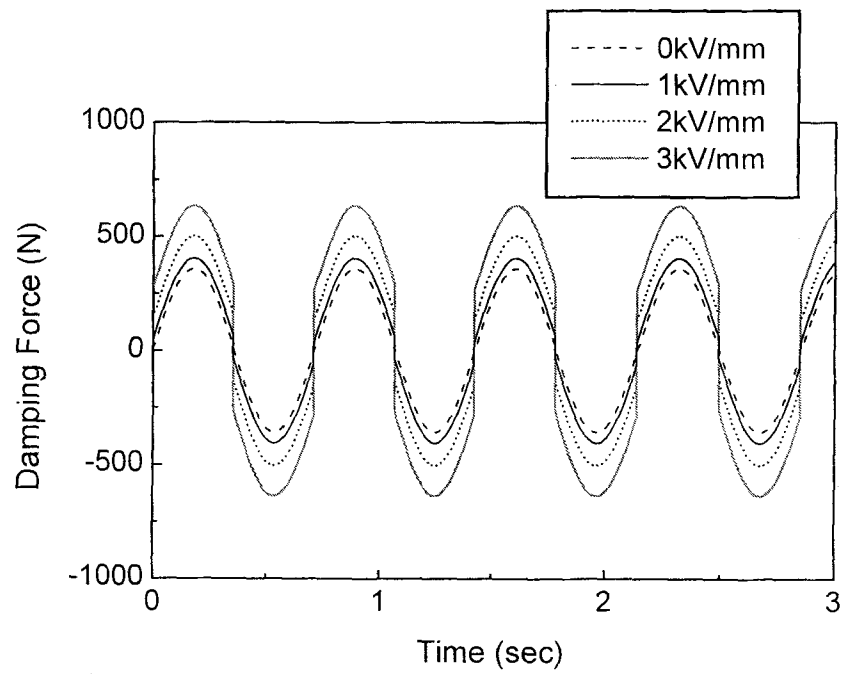


Fig. 3-2-35 Simulated field dependent damping force

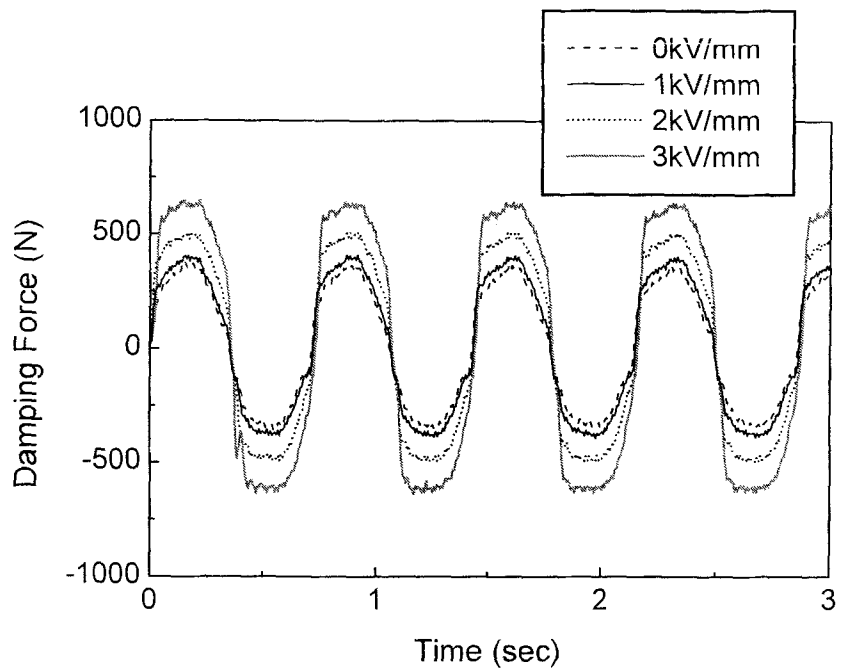


Fig. 3-2-36 Experimental field dependent damping force

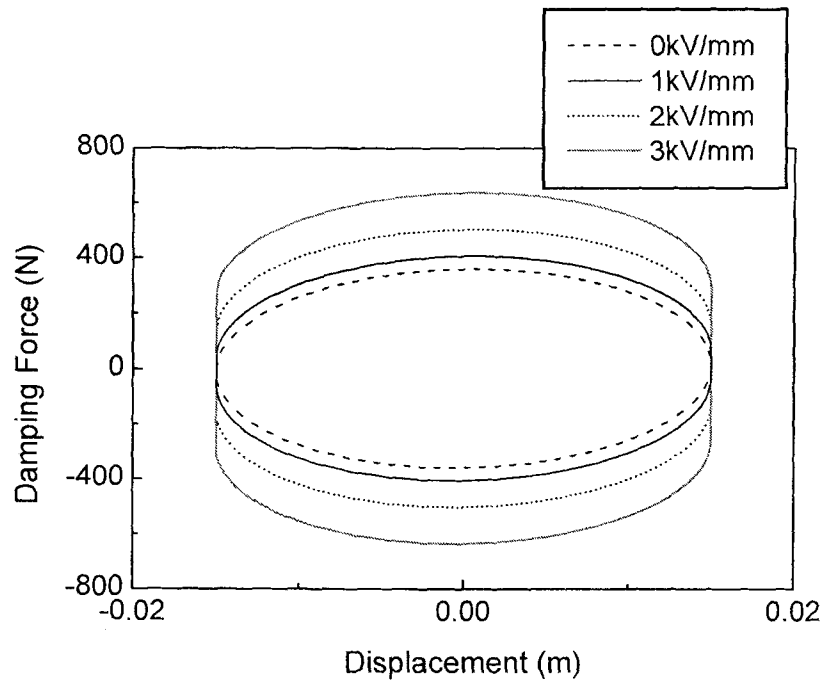


Fig. 3-2-37 Simulated damping force vs. displacement

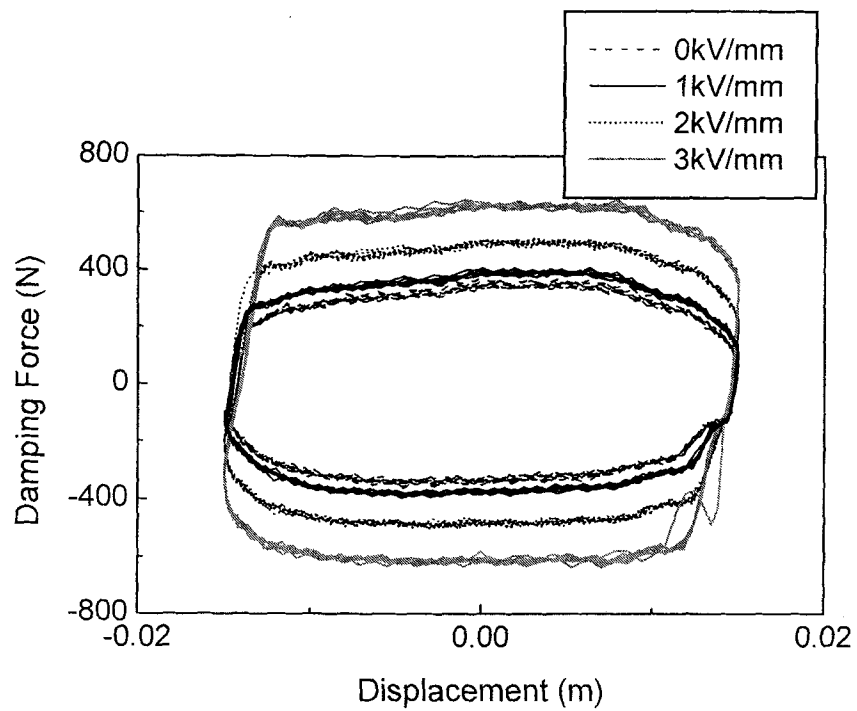


Fig. 3-2-38 Experimental damping force vs. displacement

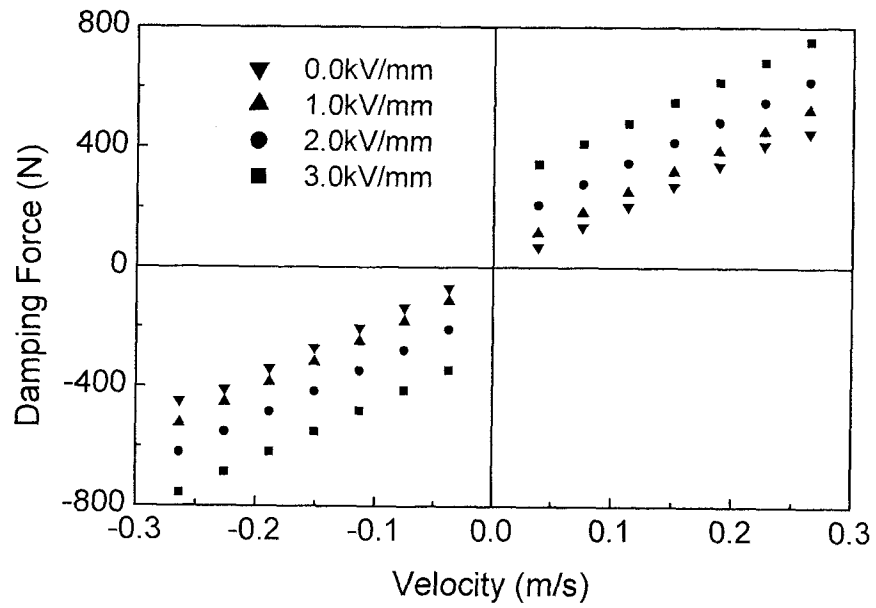


Fig. 3-2-39 Simulated damping force vs. piston velocity

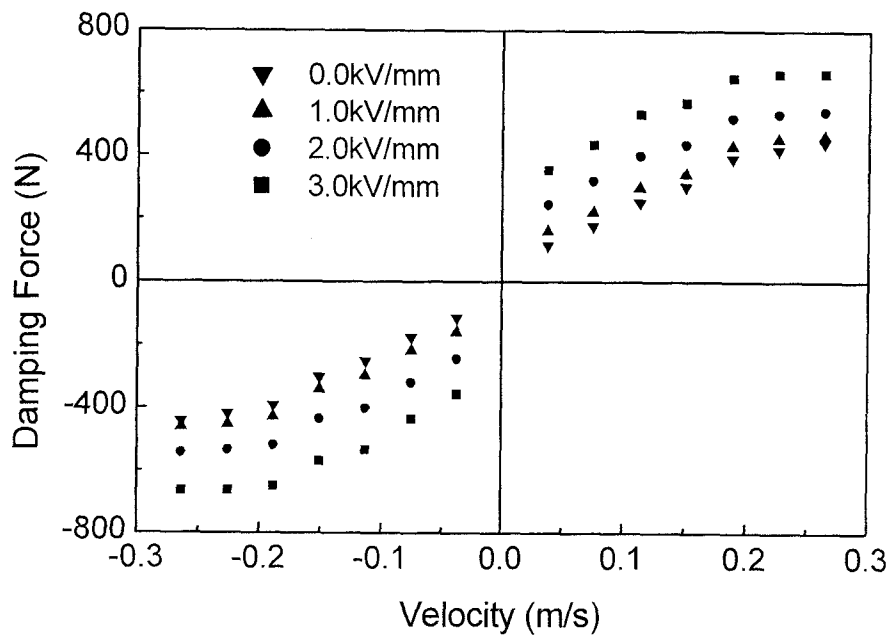


Fig. 3-2-40 Experimental damping force vs. piston velocity

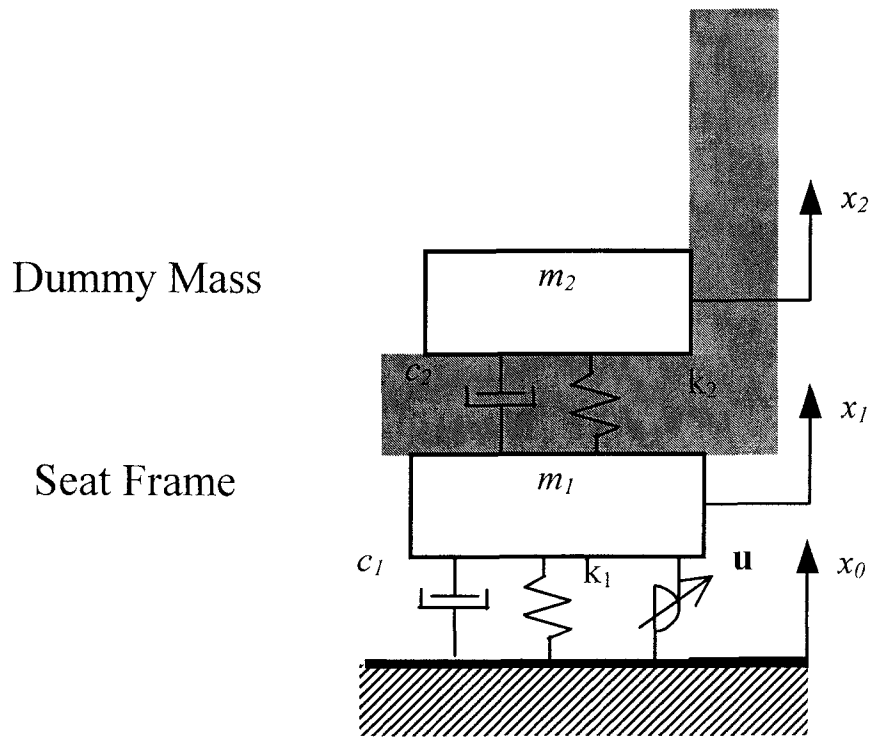


Fig. 3-2-41 Model of ER seat suspension system

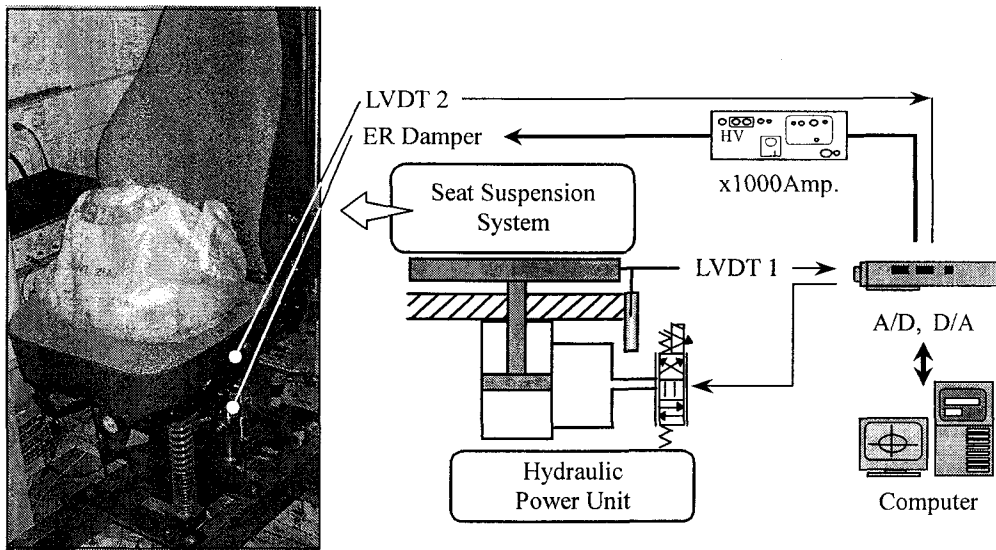


Fig. 3-2-42 Schematic configuration of proposed ER seat suspension system

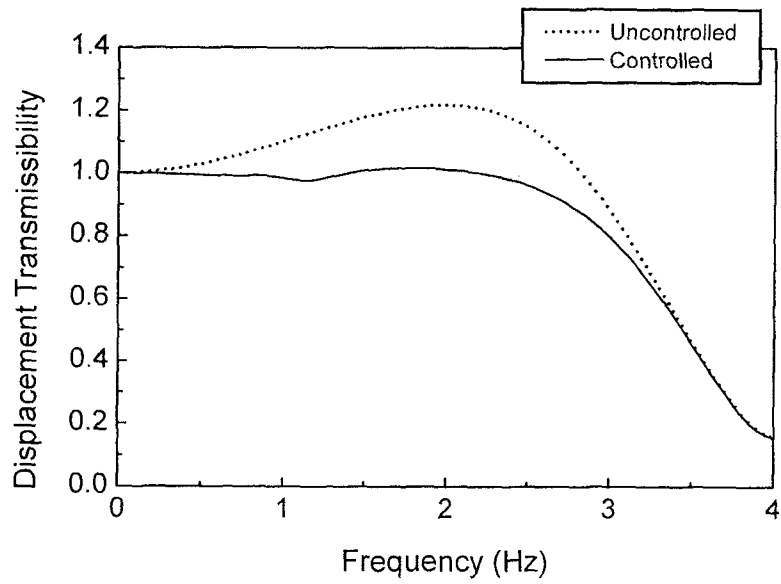


Fig. 3-2-43 Simulated transmissibility of seat displacement

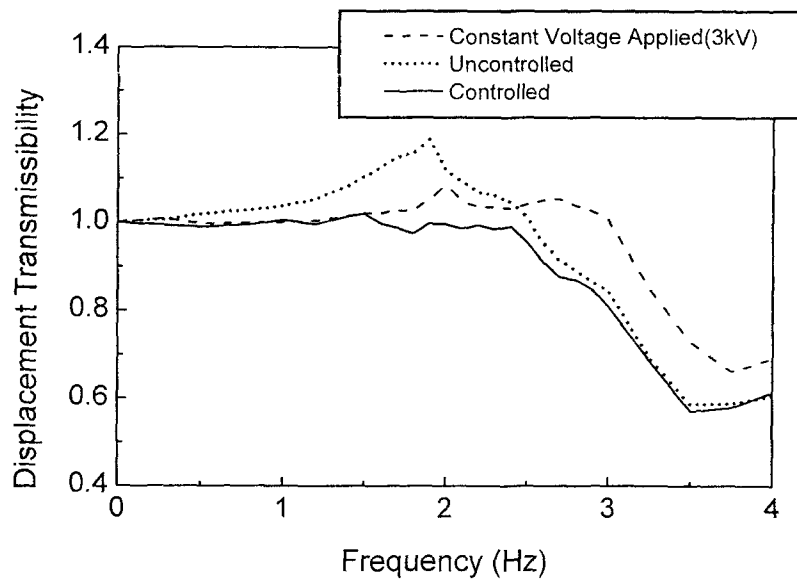


Fig. 3-2-44 Experimental transmissibility of seat displacement

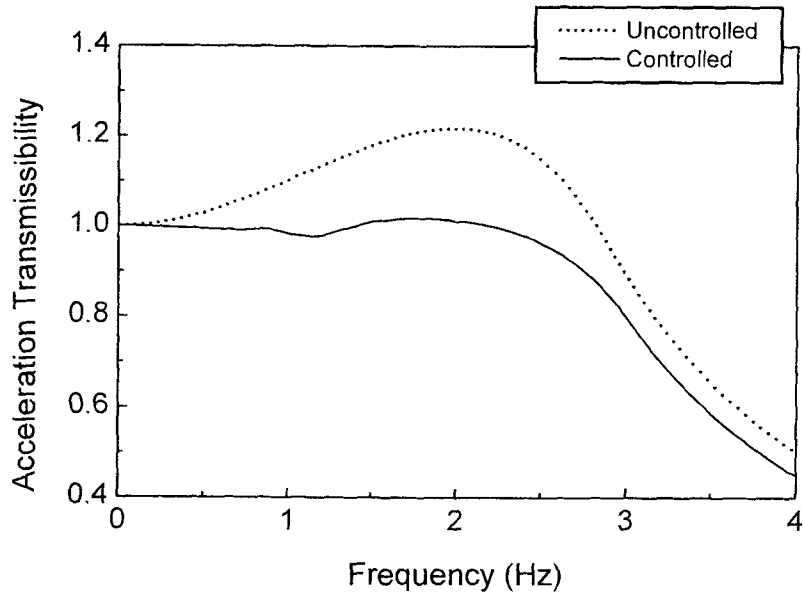


Fig. 3-2-45 Simulated transmissibility of seat acceleration

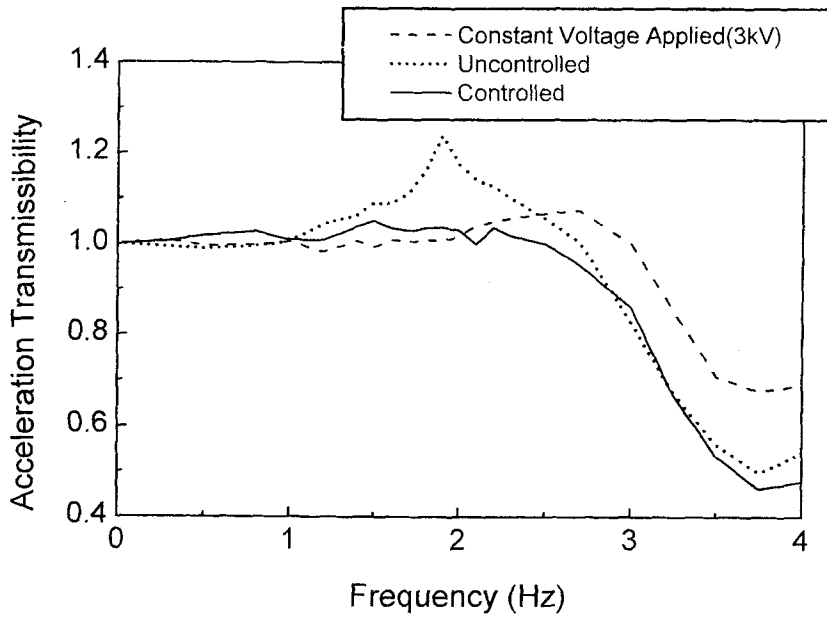


Fig. 3-2-46 Experimental transmissibility of seat acceleration

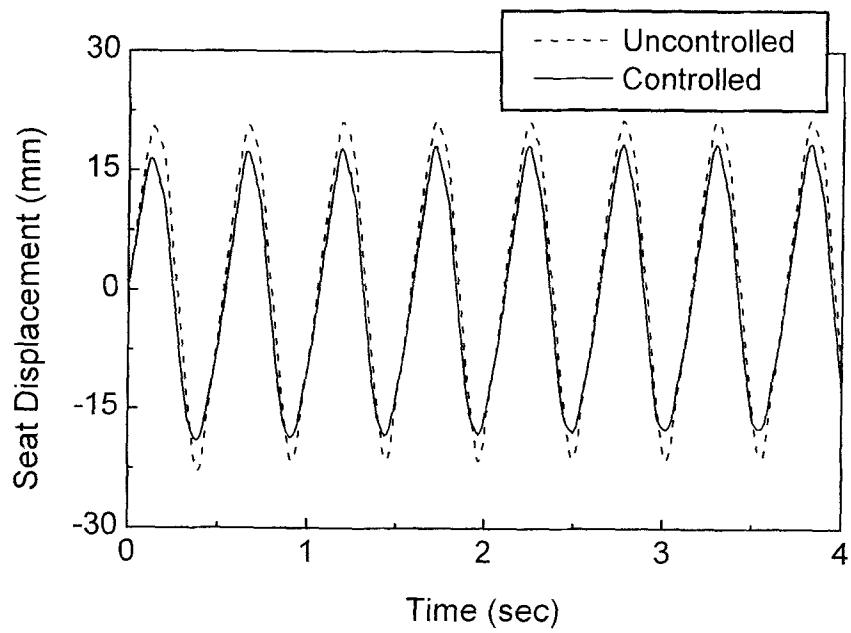


Fig. 3-2-47 Control response of seat in time domain

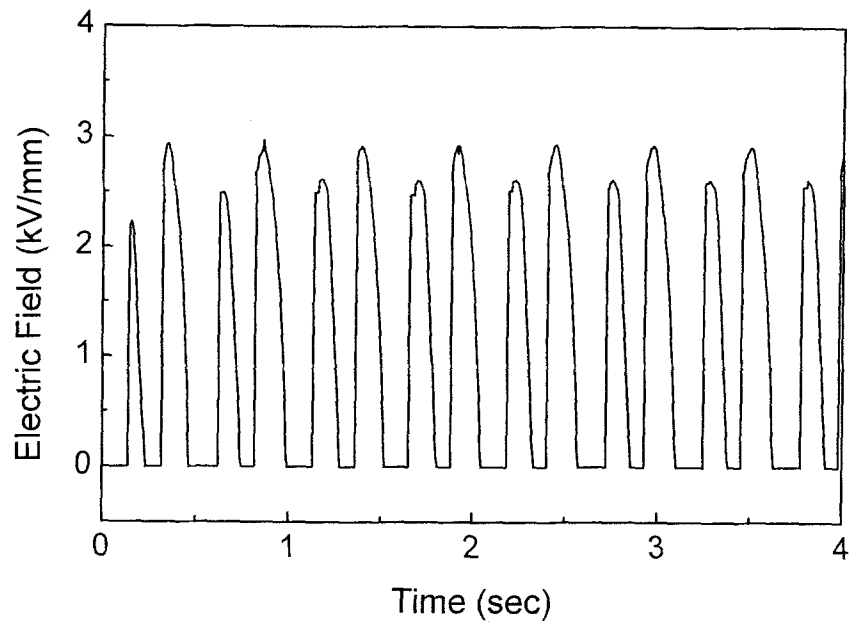


Fig.3-2-48 Control input

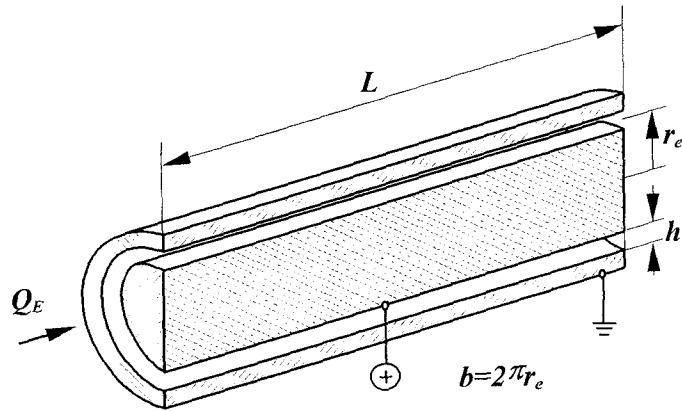


Fig. 3-2-49 Geometry of the cylindrical ER valve

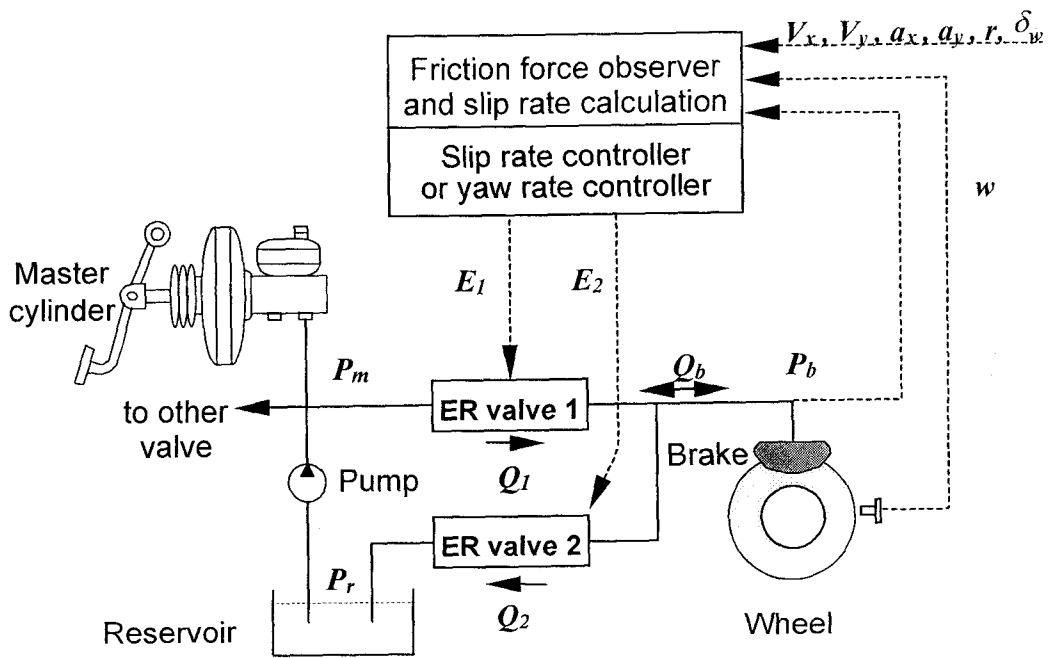


Fig. 3-2-50 The proposed ABS using ER valves

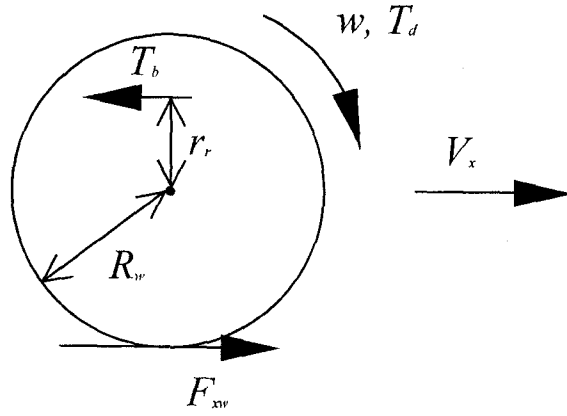


Fig. 3-2-51 Wheel Rotational motion

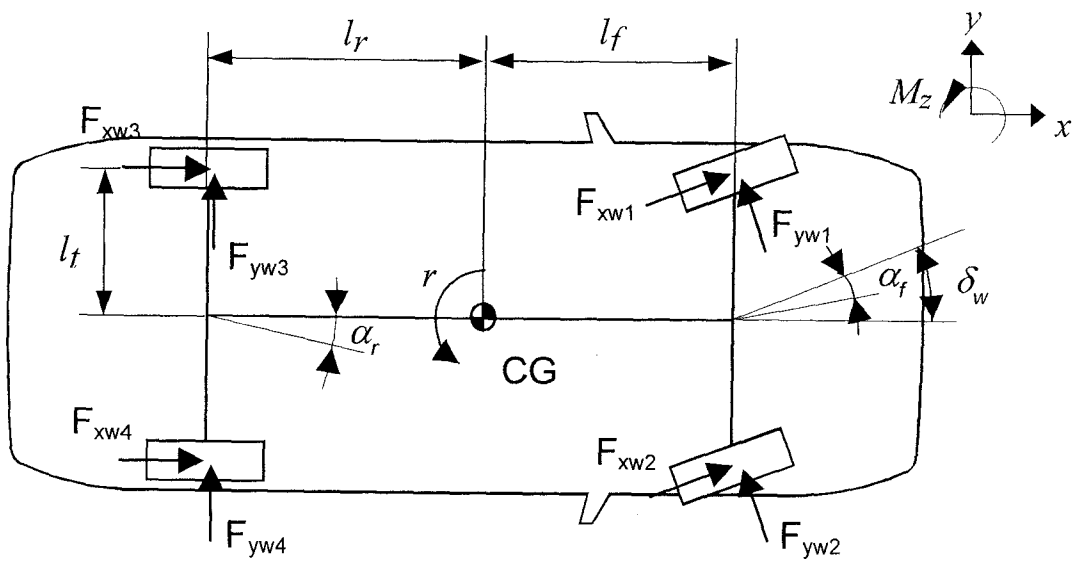


Fig. 3-2-52 Vehicle model for yaw rate control

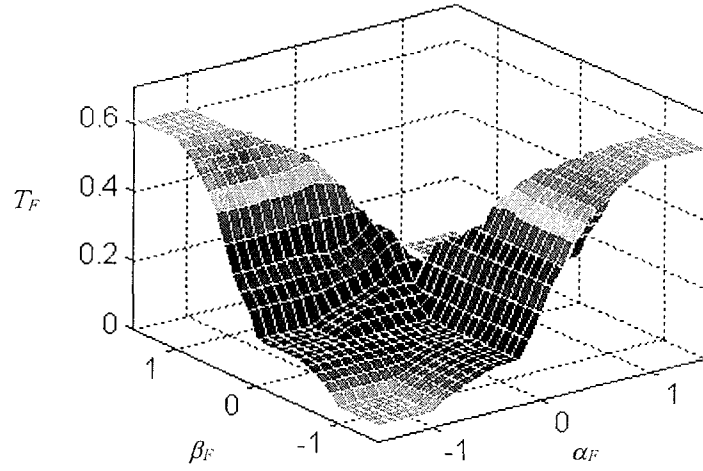
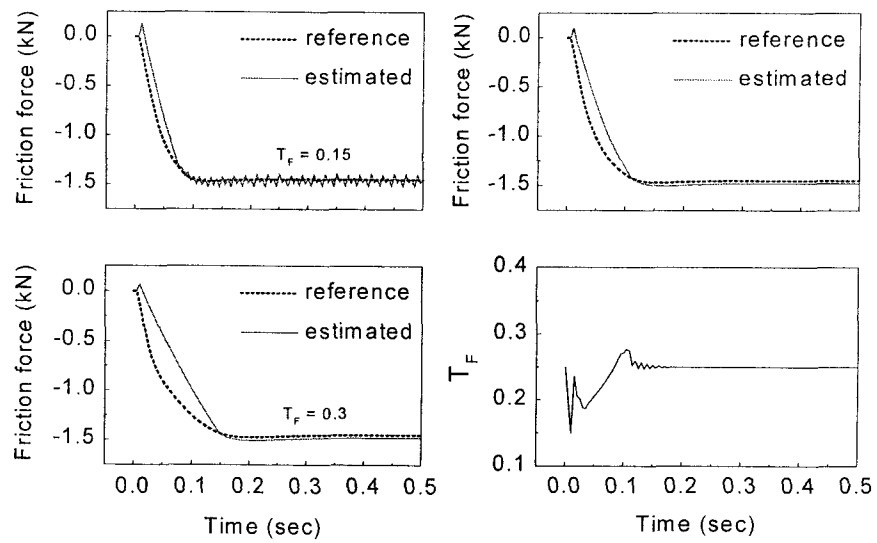


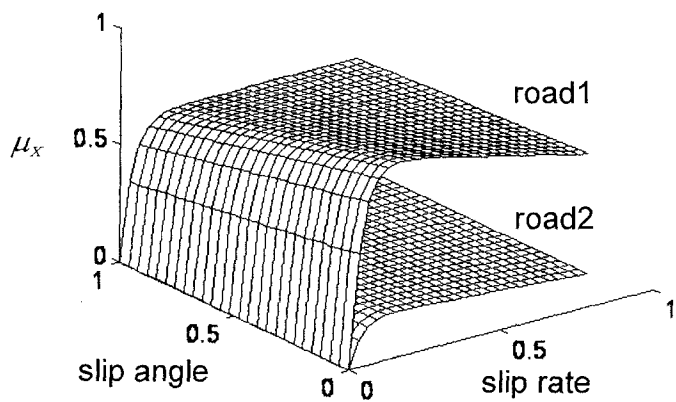
Fig. 3-2-53 Overall input-output surface



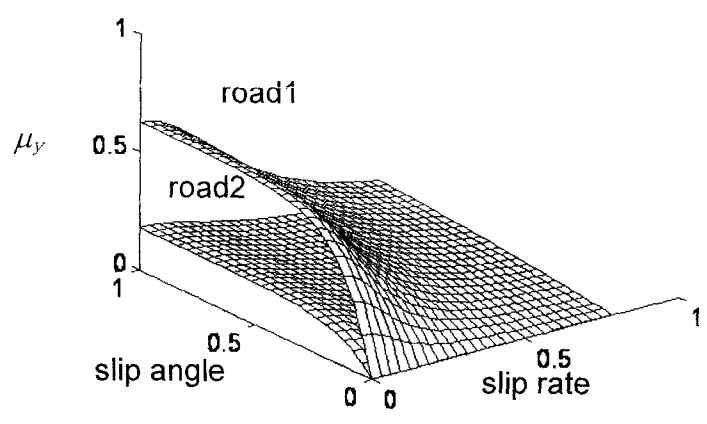
(a) fixed

(b) fuzzy

Fig. 3-2-54 Responses of the sliding mode observer

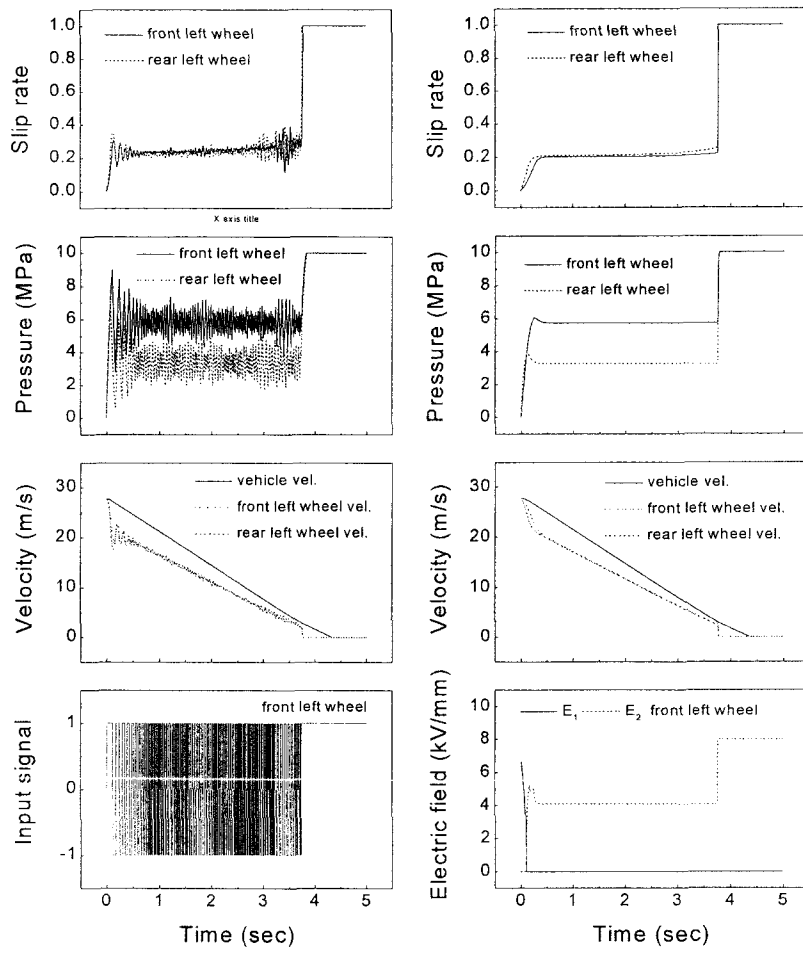


(a) longitudinal friction coefficient



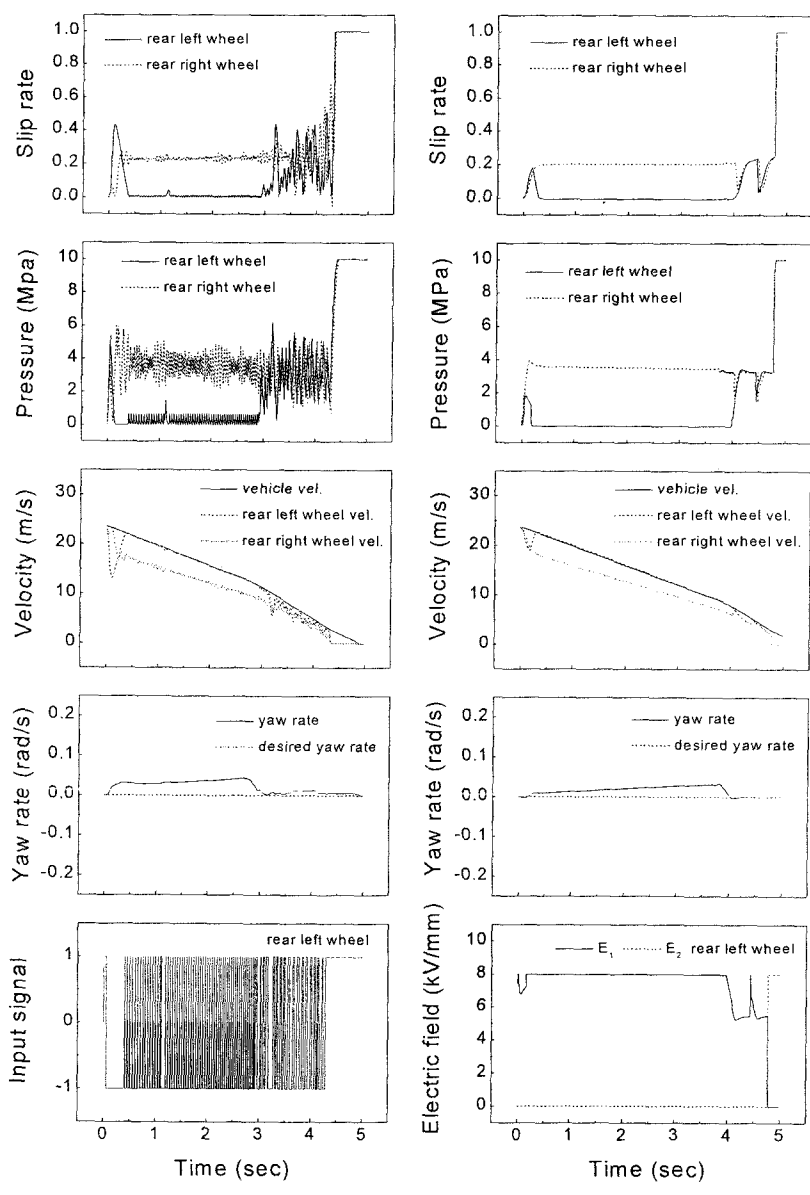
(b) lateral friction coefficient

Fig. 3-2-55 Surfaces for friction coefficients



(a) conventional ABS (b) ER ABS

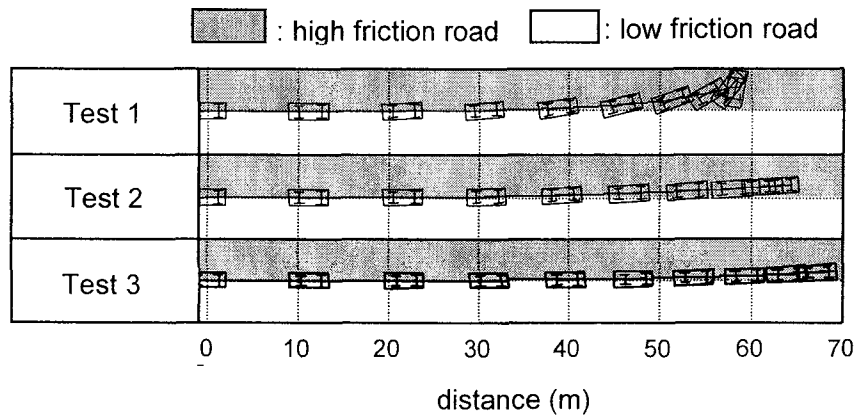
Fig. 3-2-56 Control responses of braking at high friction road (road 1)



(a) conventional ABS

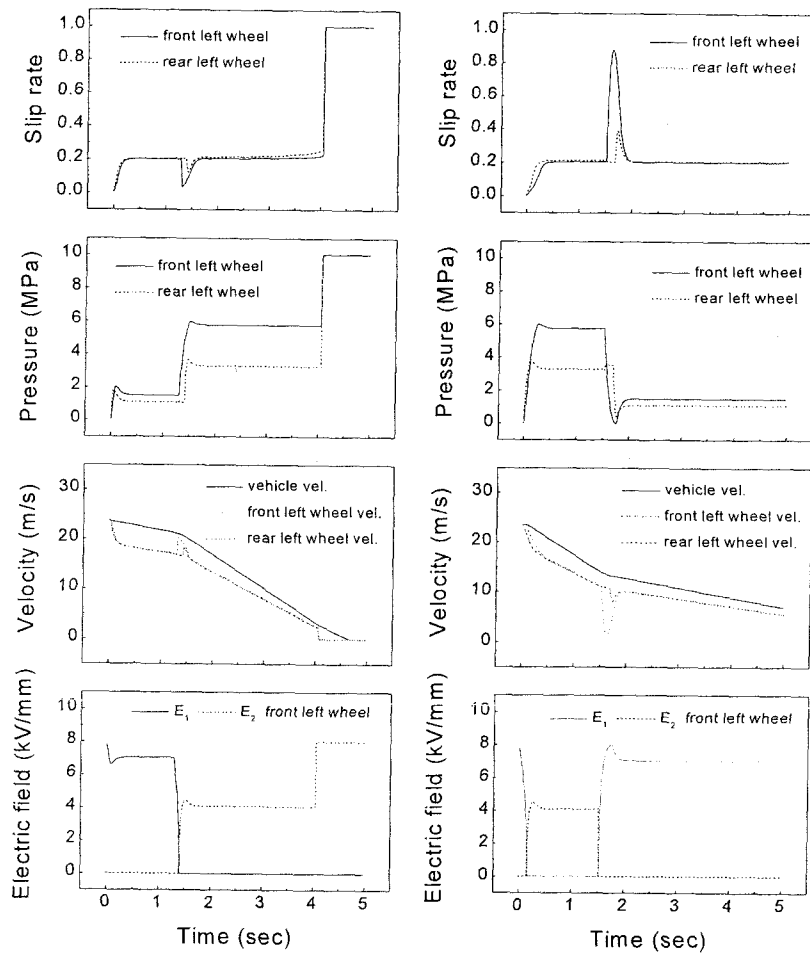
(b) ER ABS

Fig. 3-2-57 Control responses of split- μ test



- Test 1 : Conventional ABS without yaw-rate controller
- Test 2 : Conventional ABS with yaw-rate controller
- Test 3 : ER ABS with yaw-rate controller

Fig. 3-2-58 Comparison of vehicle motions during split- μ test



(a) from low friction road to high friction road (b) from high friction road to low friction road

Fig. 3-2-59 Transition responses of ER ABS

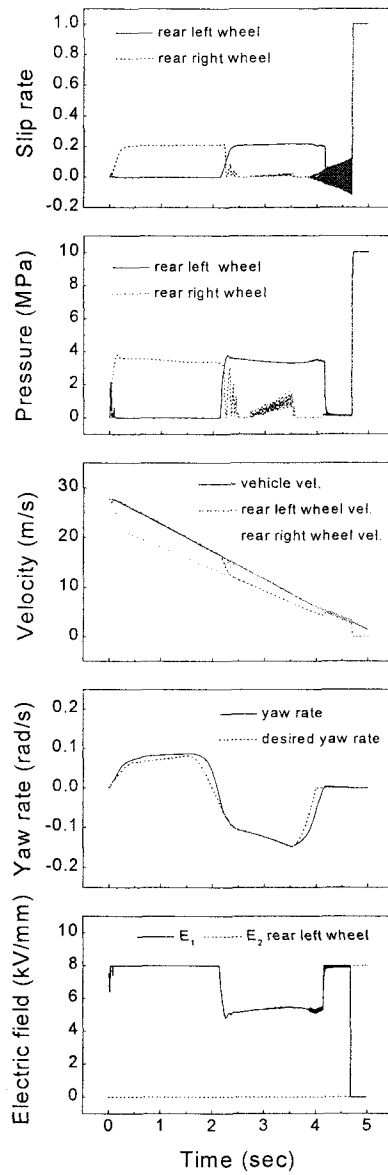


Fig. 3-2-60 Control responses of braking with steering at high friction road (road 1)

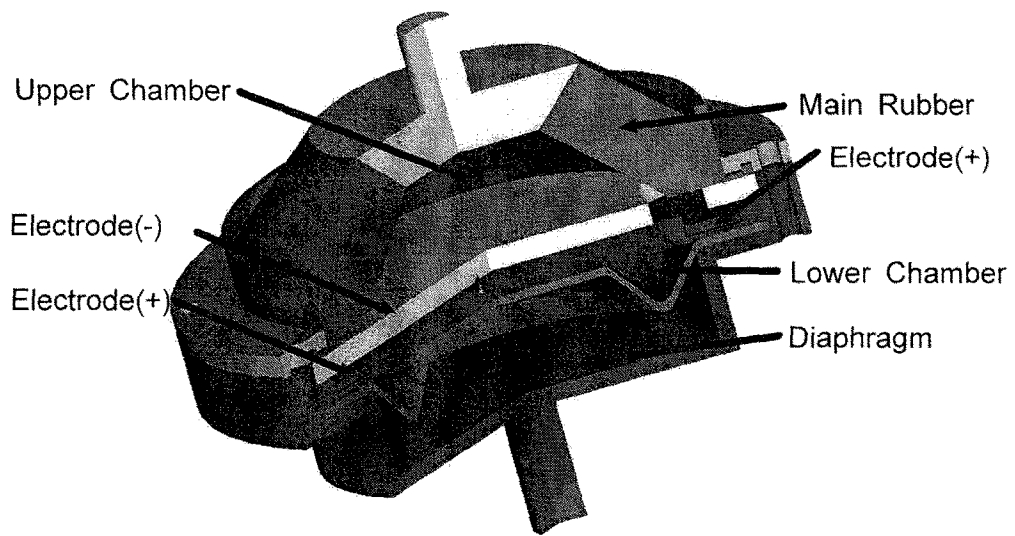


Fig. 3-2-61 Schematic diagram of ER engine mount

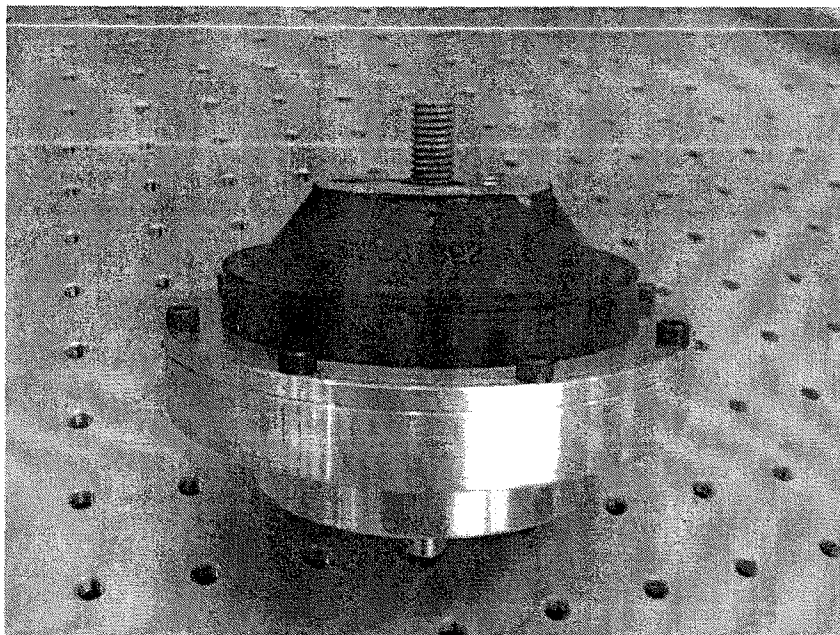


Fig. 3-2-62 Photograph of manufactured ER engine mount

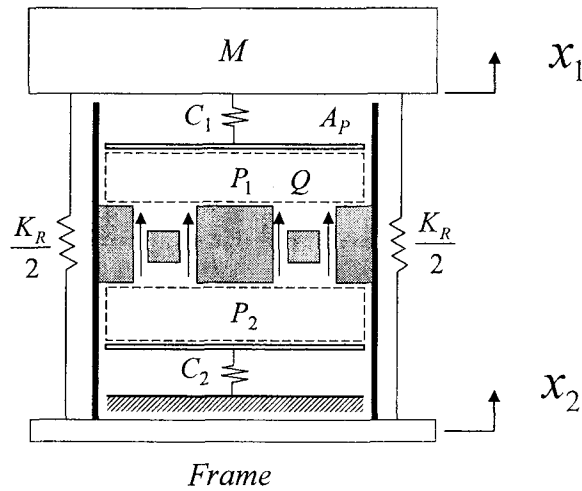


Fig. 3-2-63 Hydraulic model of ER engine mount

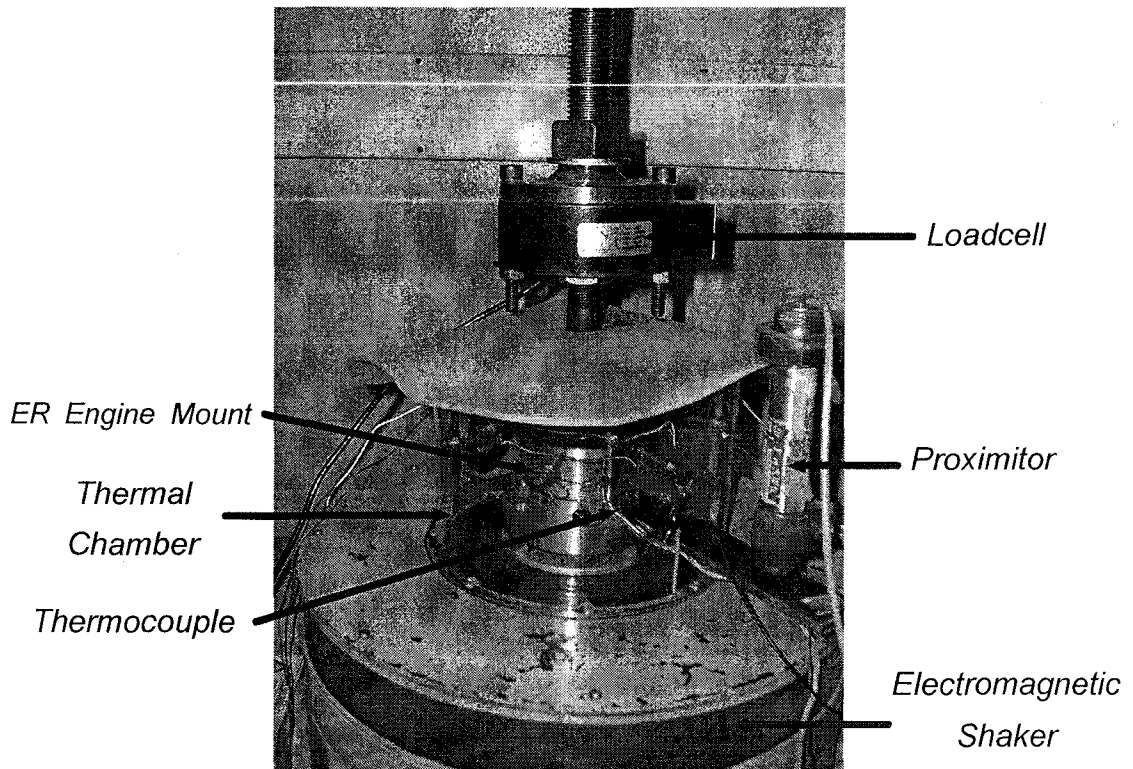


Fig. 3-2-64 Photograph of experimental setup

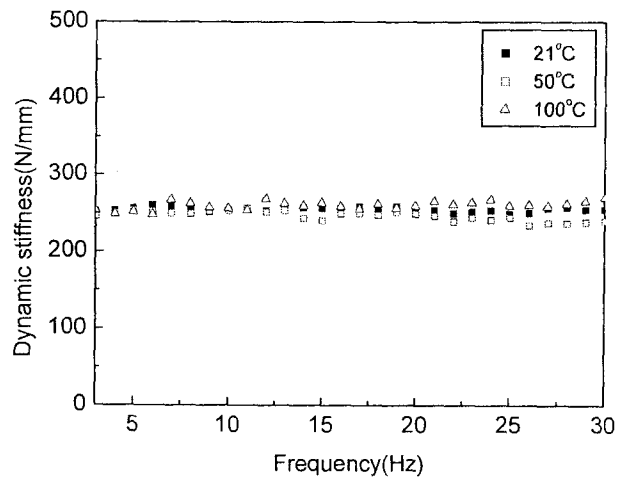
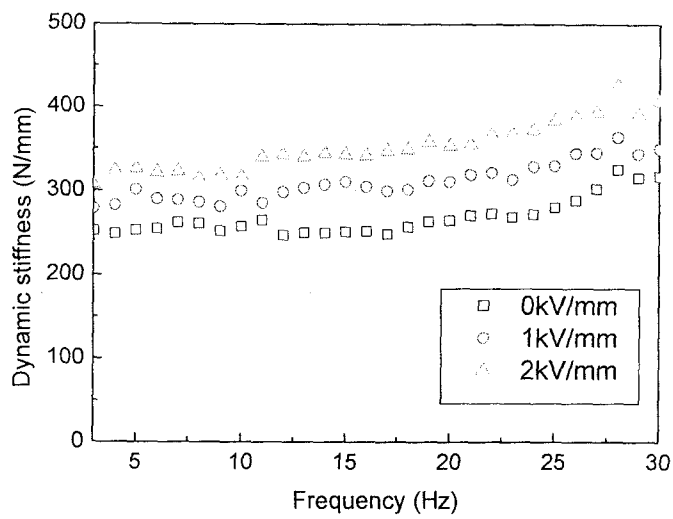
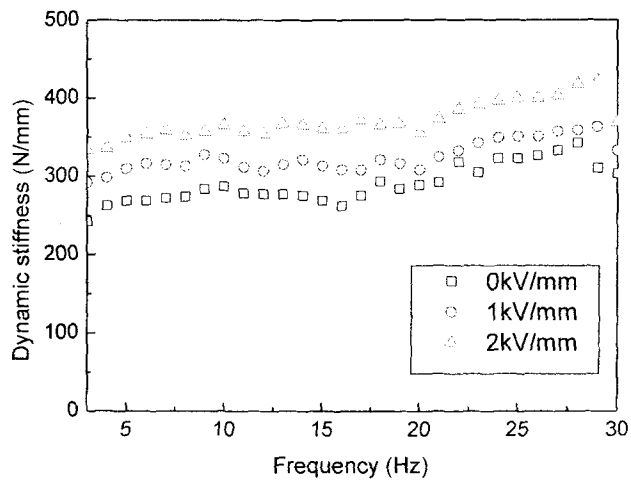


Fig. 3-2-65 Dynamic characteristics of rubber

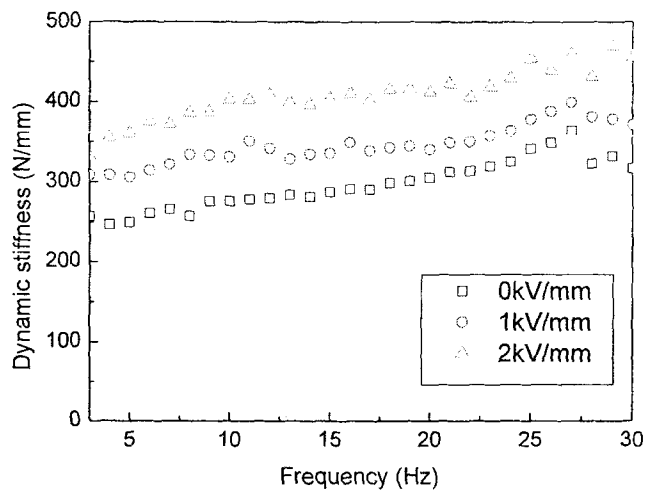


(a) Normal temperature

Fig. 3-2-66 Dynamic characteristics for temperature variation



(b) 50 °C



(c) 100 °C

Fig. 3-2-66 Dynamic characteristics for temperature variation(Continued)

제3절 강건 제어기 설계기술

다양한 환경과 노면조건에서 ER 응용장치의 안정성을 확보하고 성능 보장을 위해서 각각의 장치가 갖는 작동기 시상수 변동, 차량의 질량변화나 온도변화에 따른 ER 유체 항복응력의 변화 등 제어 성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 주요 변수들을 규명하고 강건한 제어시스템을 구축하였다.

1. 시스템 불확실성을 고려한 1/4 차량의 진동제어

가. 시상수 및 차체질량의 변동을 고려한 1/4 차량의 진동제어

(1) ER 서스펜션 시스템

(가) ER 댐퍼의 동적 모델링

Fig. 3-3-1과 같은 실린더 형태의 ER 댐퍼를 설계, 제작하였다. 피스톤의 운동에 의해서 ER 유체는 내부 실린더와 외부 실린더 사이의 유로를 통해 흐르게 된다. 고전압 발생기로부터 양전압은 내부 실린더에 걸리게 되고, 음전압은 외부 실린더로 통하게 된다. 외부의 가스 챔버는 피스톤 운동에 의해 생긴 ER 유체의 축압기 역할을 하게 된다. 제작된 ER 댐퍼는 중형 승용차용에 적합하게 설계되었고, 전극길이(L)는 258mm, 전극간격(h)은 0.75mm, 외경은 24mm로 제작되었다.

전기장 무부하시, ER 댐퍼는 유체의 저항에 의한 댐핑력만을 갖게 된다. 그러나, ER 댐퍼에 전기장이 가해지게 되면 ER 유체의 항복응력에 의한 댐핑력을 추가적으로 가지게 된다. 따라서 ER 댐퍼의 댐핑력은 전기장의 밀도를 제어함으로써 연속적인 조절이 가능해진다. ER 댐퍼의 댐핑력은 다음과 같이 얻어진다[87]:

$$F = k_e x_p + c_e \dot{x}_p + F_{ER} \quad (3-3-1)$$

k_e 는 가스 챔버에 의한 유효강성이고, c_e 는 유체의 점성에 의한 유효댐핑, x_p 는 가진 변위, F_{ER} 은 전기장에 의해 발생한 댐핑력이다. 제어 가능한 댐핑력 F_{ER} 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_{ER} = (A_p - A_r) 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta \text{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3-3-2)$$

여기서 A_p 와 A_r 는 각각 피스톤과 피스톤 로드 면적을 나타내고, $\text{sgn}(\cdot)$ 는 부호함수, L은 전극길이, h는 전극간격, E는 전기장을 나타낸다. α 와 β 는 ER 유체 고유의 값으로

실험적으로 결정하게 된다. 내부 실린더와 외부 실린더 사이의 ER 유체의 운동은 유동 모드로 가정하여, 유동모드형 전기점성측정기를 이용한 실험에서 α 와 β 값을 얻게 결정하게 된다[88]. 본 연구에서는 반응속도가 느린 ER 유체(ERF-I)와, 반응속도가 빠른 ER 유체(ERF-II), 두 가지 유체를 적용하였다. ERF-I의 항복응력은 $562.2 E^{1.55}$ Pa이고, ERF-II의 항복응력은 $878.1 E^{1.42}$ Pa이다. 여기서 E 의 단위는 kV/mm이다.

전기장의 가진 주파수에 따른 측정된 댐핑력의 변화를 Fig. 3-3-2에 나타내었다. Fig. 3-3-2(a)와 (b)에서 ERF-II의 반응속도가 ERF-I의 반응속도보다 더 빠른 것을 볼 수 있다. Fig. 3-3-2에 나타난 결과로부터 식(3-3-2)의 댐핑력은 동적 특성을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\tau \frac{d}{dt} F_{ER} + F_{ER} = (A_b - A_r) 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta \text{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3-3-3)$$

여기서 τ 는 작동기의 시상수인데, ERF-I의 시상수는 380ms이고, ERF-II는 12ms의 시상수를 갖는 것을 실험적으로 구하였다. Fig. 3-3-3은 주파수 영역에서의 댐핑력의 동적 특성을 나타낸 것이다. ERF-I의 동적 주파수 대역폭은 2.63Hz이고, ERF-II의 동적 주파수 대역폭은 80Hz이다.

(나) 1/4 차량의 ER 서스펜션 시스템 모델링

1/4 차량의 ER 서스펜션 시스템을 구성하여 제어시스템의 성능과 강건성을 평가하였다. Fig. 3-3-4와 같이 2자유도 1/4차량의 ER서스펜션 시스템을 모델링하였다. m_s 와 m_u 는 각각 sprung 질량과 unsprung 질량을 나타낸다. 서스펜션의 스프링은 선형으로 가정하였고, 타이어도 선형 스프링으로 모델링 하였다. 식(3-3-3)으로부터 다음과 같은 상태 공간 모델을 구성하였다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}z_r \quad (3-3-4)$$

여기서

$$\mathbf{x} = \left[z_s \quad \dot{z}_s \quad z_u \quad \dot{z}_u \quad F_{ER} \right]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & \frac{1}{m_s} \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_t + k_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} & \frac{1}{m_u} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{\tau} \right]^T$$

$$u = F_{ER}, \quad \mathbf{L} = \left[0 \ 0 \ 0 \ \frac{k_t}{m_u} \ 0 \right]^T$$

이고, k_s 는 서스펜션의 강성계수, c_s 는 서스펜션의 댐핑계수, k_t 는 타이어의 강성계수 z_s, z_u, z_r 은 각각, sprung 질량, unsprung 질량, 가진의 수직 변위를 나타낸다.

(2) H_∞ 제어기 설계

실제 시스템에 있어서, sprung 질량은 탑승자의 수나, 적재하중의 상태에 따라 달라지게 되고, 시상수 역시 정확하게 측정하기가 어려우며, 작동 온도와 같은 요인에 의해 쉽게 변하게 된다. 이러한 시스템의 불확실성을 고려하기 위하여 McFarlane과 Glover이 제안한 LSDP(loop shaping design procedure) H_∞ 를 적용하였고, 그 결과 다음과 같은 제어기를 설계하였다[89].

먼저, 1/4 차량의 플랜트를 다음과 같이 구성하였다.

$$G(s) = \overline{M}^{-1} \overline{N} = \frac{z_s(s)}{u(s)} = \frac{k_t + m_{s0} s^2}{(\tau_0 s + 1) D(s)} \quad (3-3-5)$$

여기서,

$$D(s) = m_{s0} m_u s^4 + c_s (m_{s0} + m_u) s^3 + (m_{s0} k_t + (m_{s0} + m_u) k_s) s^2 + c_s k_t s + k_s k_t$$

이고, u 는 제어 가능한 댐핑력 F_{ER} 을 나타낸다.

여기에 불확실성을 가지는 섭동 플랜트는 다음과 같이 정의한다.

$$G_d(s) = \overline{M}_d^{-1} \overline{N}_d = (\overline{M} + \Delta M)^{-1} (\overline{N} + \Delta N) = \frac{k_t + (m_{s0} + \Delta m_s) s^2}{((\tau_0 + \Delta \tau) s + 1) D_d(s)} \quad (3-3-6)$$

여기서,

$$D_d(s) = (m_{s0} + \Delta m_s) m_u s^4 + c_s ((m_{s0} + \Delta m_s) + m_u) s^3 \\ + ((m_{s0} + \Delta m_s) k_t + ((m_{s0} + \Delta m_s) + m_u) k_s) s^2 + c_s k_t s + k_s k_t$$

이고, Δm_s 는 sprung 질량 변화, $\Delta \tau$ 는 시상수 변화를 나타낸다.

(가) 시상수를 고려한 1/4 차량 시스템의 제어기;

ERF-I:

$$K_I = W_I K_I \infty = (3.55 \times 10^9 s^6 + 3.17 \times 10^{12} s^5 + 1.67 \times 10^{12} s^4 + 2.42 \times 10^{16} s^3 \\ + 3.15 \times 10^{17} s^2 + 1.29 \times 10^{18} s + 1.67 \times 10^{18}) / (s^7 + 8.22 \times 10^3 s^6)$$

$$+ 1.29 \times 10^7 s^5 + 6.25 \times 10^9 s^4 + 5.60 \times 10^{11} s^3 + 5.20 \times 10^{13} s^2 \\ + 2.28 \times 10^{15} s + 6.39 \times 10^{15})$$

ERF-II:

$$K_{II} = W_{II} K_{II}^{\infty} = (1.33 \times 10^6 s^6 + 3.10 \times 10^8 s^5 + 3.40 \times 10^{10} s^4 + 2.47 \times 10^{12} s^3 \\ + 9.37 \times 10^{13} s^2 + 6.79 \times 10^{14} s + 5.67 \times 10^{14}) / (s^7 + 1.44 \times 10^3 s^6 \\ + 4.26 \times 10^5 s^5 + 6.27 \times 10^7 s^4 + 5.64 \times 10^9 s^3 + 3.41 \times 10^{11} s^2 \\ + 1.14 \times 10^{13} s + 6.61 \times 10^{13})$$

(나) 시상수를 고려하지 않은 1/4 차량 시스템의 제어기;

ERF-I:

$$K_I' = W_I' K_I'^{\infty} = (7.13 \times 10^6 s^5 + 6.67 \times 10^9 s^4 + 2.79 \times 10^{11} s^3 + 4.81 \times 10^{13} s^2 \\ + 10.00 \times 10^{13} s - 1.262 \times 10^{14}) / (s^6 + 2.43 \times 10^3 s^5 + 1.98 \times 10^6 s^4 \\ + 5.75 \times 10^8 s^3 + 3.004 \times 10^{10} s^2 + 4.02 \times 10^{12} s + 8.71 \times 10^{12})$$

ERF-II:

$$K_{II}' = W_{II}' K_{II}'^{\infty} = (4.50 \times 10^5 s^5 + 6.68 \times 10^7 s^4 + 5.83 \times 10^9 s^3 + 3.43 \times 10^{11} s^2 \\ + 2.61 \times 10^{12} s + 1.66 \times 10^{12}) / (s^6 + 7.87 \times 10^2 s^5 + 1.66 \times 10^5 s^4 \\ + 1.74 \times 10^7 s^3 + 1.26 \times 10^9 s^2 + 5.11 \times 10^{10} s + 2.90 \times 10^{11})$$

ER 댐퍼에 입력되는 제어 입력은 H_{∞} 제어기에서 결정되게 되고, 다음과 같은 반능동 작동상태가 부가된다.

$$u = \begin{cases} u & \text{for } u(\dot{z}_u - \dot{z}_s) > 0 \\ 0 & \text{for } u(\dot{z}_u - \dot{z}_s) \leq 0 \end{cases} \quad (3-3-7)$$

이것은 제어입력 u 의 활성화는 안정된 시스템에서 소산되는 에너지 양의 증가만을 보장한다는 것이다. 제어입력 u 가 결정되면, 부가되는 전기장은 다음과 같이 얻어진다.

$$E = \left[u \frac{h}{2\alpha L(A_p - A_r)} \right] \quad (3-3-8)$$

(3) 결과 및 토의

LSDP H_{∞} 제어기의 설계를 위하여 MATLAB의 제어 시스템과 강건제어 툴박스 패키지를 사용하였으며, SIMULINK를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 두 가지 형태의 노면 조건에 대하여 1/4차량 ER 서스펜션 시스템의 진동제어 특성을 평가하였다. 첫 번째 조

건은 일반적으로 과도 응답특성을 나타내는 것으로, 다음과 같이 표현되는 범프가진이다.

$$z_r = z_b[1 - \cos(w_r t)] \quad (3-3-9)$$

여기서, $w_r = 2\pi V/D$ 이고, $z_b (=0.034m)$ 는 범프 높이의 절반, $D (=0.8m)$ 는 범프의 폭을 나타낸다. 범프가진에서 자동차는 $3.08km/h$ 의 일정한 속도로 지나간다고 가정하였다. 두 번째 조건은 다음과 같이 표현되는 조화가진이다.

$$z_r = z_e \sin wt \quad (3-3-10)$$

여기서 w 는 가진 주파수($0.4-03.0$ Hz)이고, $z_e (=0.015m)$ 는 가진 크기이다. 1/4 차량의 시스템 변수는 일반적인 승용차의 서스펜션 시스템에 바탕을 두었고 Table 3-3-1과 같다.

Fig. 3-3-5는 시스템의 시상수를 고려하지 않고, 범프가진에 대한 ER 서스펜션 시스템의 제어응답 특성을 나타낸다. 일반적으로 sprung 질량의 수직 가속도는 승차감을 나타내고, 타이어 변형은 차량의 노면 접지력을 나타내는데, Fig. 3-3-5에서 보는 바와 같이 두 가지 유체 ERF-I과 ERF-II 모두에서 제안된 제어 알고리즘의 적용으로 범프가진에 의해 발생한 불필요한 진동을 감소시킬 수 있었다. Fig. 3-3-6은 시상수를 고려한 ER 서스펜션 시스템의 범프가진 응답을 나타낸다. Fig. 3-3-6(a)에서는 느린 응답 속도에 따른 제어 성능의 저하가 발생하였으나, 빠른 응답 속도를 가지는 Fig. 3-3-6(b)의 ERF-II에서는 제어 성능의 저하가 발생하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 3-3-7은 ER 서스펜션 시스템의 조화가진 시 주파수 영역에서의 응답특성을 나타내는 그림이다. 입력과 출력 변위의 RMS 값으로 주파수 영역에서의 전달률을 나타내었다. 결과에서 보듯이 ERF-I에서는 제어 성능의 저하가 발생하였으나, ERF-II에서는 시상수에 의한 제어 성능의 저하는 발생하지 않았다. 이것은 충분히 빠른 응답특성을 가질 경우 댐핑력의 동적 대역폭을 고려하지 않아도, ER 서스펜션 시스템의 제어를 설계할 수 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 3-3-8은 ER 서스펜션 시스템의 불확실성을 고려하였을 때, 범프가진 응답특성을 나타낸다. 스프링 질량의 수직 변위와 수직 가속도, 타이어의 변형은 변수의 변화($\Delta m_s = 70$ kg, $\Delta \tau = 0.3\tau_0 ms$)가 있을 때에도 제어입력에 의해 감소되는 것을 볼 수 있다. 이는 ER 서스펜션 시스템이 좋은 승차감과 운행 안정성을 제공할 수 있음을 나타낸다. Fig. 3-3-9는 조화가진에 대한 H_∞ 제어를 통한 제어된 주파수 응답특성을 나타낸다. 입력과 출력변위의 RMS 값으로 전달율을 나타내었으며, 불확실성이 존재할 경우에도, H_∞ 제어를 통한 추가되는 전기장의 제어로 차체 공진(1.4 Hz) 부근에서 sprung 질량의 전달율이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

나. 작동온도에 따른 항복응력의 변화를 고려한 1/4차량의 진동제어

(1) ER 서스펜션 시스템

(가) ER 댐퍼

Fig. 3-3-1과 같은 댐퍼를 사용하여 연구를 수행하였다. 가스 챔버에 의한 스프링 효과를 무시하고, ER 댐퍼의 댐핑력 f_d 를 다음과 같이 구하였다.

$$f_d = c_s \dot{x}_p + F_{ER} \text{sgn}(\dot{x}_p) = (A_p - A_r)^2 \frac{12\eta L}{b h^3} \dot{x}_p + 2(A_p - A_r) \frac{L}{h} \alpha E^\beta \text{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3-3-11)$$

여기서 η 는 유체의 점성이다.

ER 댐퍼의 실린더 내부와 외부 사이의 ER 유체의 유동은 유동 모드로 고려할 수 있기 때문에, ER 유체의 고유 값인 α 와 β 는 유동 모드 전기점성측정기로 실험적으로 측정할 수 있다. Fig. 3-3-10에서 ER 유체의 작동온도가 증가함에 따라 ER 유체의 전기장에 따른 항복응력의 크기가 증가함을 볼 수 있다. ER 댐퍼가 자동차에 장착된다면 ER 댐퍼 내에 가득찬 ER 유체의 운동과 가해지는 전기장 등의 이유로 불가피하게 ER 댐퍼의 작동온도가 증가할 것이다. 결과적으로 ER 유체의 고유값 α 와 β 도 다음과 같이 수정하여야 한다. $\tau_y|_{30^\circ C} = 192E^{1.76}[Pa]$, $\tau_y|_{50^\circ C} = 361E^{1.73}[Pa]$, $\tau_y|_{70^\circ C} = 566E^{1.65}[Pa]$, $\tau_y|_{100^\circ C} = 763E^{1.59}[Pa]$. 이 때 작동 온도에 따라 β 값은 1.76에서 1.59로 조금 감소하지만 α 값은 최소값(192)보다 최대 400%까지 크게 증가한다. Fig. 3-3-11은 각 변수(α , β)에 따른 ER 유체의 항복응력의 변화를 보여주고 있다. 본 연구에서 전기장의 크기는 관심사가 아니기 때문에 전기장을 3 kV/mm로 고정하였다. Fig. 3-3-11에서 보듯이 변수 α 의 변화가 확실하게 항복 응력에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러므로 ER 댐퍼의 댐핑력 식인 식(3-3-1)은 다음과 같이 불확실성 항 $\Delta\alpha$ 를 포함하여 다음과 같이 표현된다.

$$f_d = c_s \dot{x}_p + 2(A_p - A_r) \frac{L}{h} (\alpha + \Delta\alpha) E^\beta \text{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3-3-12)$$

위의 식은 온도의 변화가 ER유체의 점성 변화에 영향을 주게 되어 있음을 알 수 있다. 실험에서 점성 변화의 차이가 무시할 만큼 작아서 그 차이 η (i.e. c_s)는 고려하지 않는다.

(나) ER 서스펜션 시스템의 모델링

Fig. 3-3-12와 같이 1/4 차량 ER 서스펜션 시스템의 수학적 모델링을 수행하였다. 제안된 1/4 차량 ER 서스펜션 시스템은 2자유도를 갖는 반능동 ER서스펜션 시스템이다. m_s 과 m_u 는 각각 sprung 질량과 unsprung 질량이다. 서스펜션의 스프링은 선형적이고, 타이어는 선형 스프링의 성질을 갖는다고 가정한다. 따라서 1/4 차량의 ER 완충 시스템의 지배 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s &= -k_s(z_s - z_{us}) + f_d \\ m_{us} \ddot{z}_{us} &= k_s(z_s - z_{us}) - k_t(z_{us} - z_r) - f_d \end{aligned} \quad (3-3-13)$$

k_s 는 전체 서스펜션 시스템의 스프링 상수(강성)이고, k_t 는 타이어의 스프링 상수이다. 또한 z_s , z_u 와 z_r 는 각각 sprung 질량, unsprung 질량, 그리고 가진의 수직 변위이다.

상태 변수는 다음과 같이 정의하고,

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [z_s \ \dot{z}_s \ z_u \ \dot{z}_u]^T$$

제어 입력은 $u = E^\beta$ 이다. 다음과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{D}z_r \quad (3-3-14)$$

여기서,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_t+k_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{P_{ER}}{m_s} & 0 & -\frac{P_{ER}}{m_{us}} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_t}{m_{us}} \end{bmatrix}^T, \quad P_{ER} = 2 \frac{L}{h} (A_b - A_r) \alpha$$

이다. 실제 시스템에서 sprung 질량은 적재량과 탑승 인원 에 따라 변화하므로 sprung 질량의 섭동을 시스템에 고려하여야 한다. 기존 중형차의 탑승 인원과 적재량 등에 대한 경험적 지식을 이용하여 시스템 불확실성의 크기를 한정하여 표현할 수 있다.

$$m_s = m_0 + \Delta m_s, \quad |\Delta m_s| \leq 0.3m_0 \quad (3-3-15)$$

여기서 m_0 는 공칭 질량이며, Δm_s 는 불확실성 항이다. 불확실성이 시스템에 아주 큰 영향을 주지 않는다는 가정을 하면 matching condition을 만족한다고 할 수 있고, 따라서 불확실성은 다음과 같이 표현될 수 있다[90].

$$\frac{1}{m_s} = \frac{1}{m_0 + \Delta m_s} = \frac{1}{m_0} (1 + \gamma), \quad |\gamma| \leq 1 \quad (3-3-16)$$

한편 제어 입력 행렬의 불확실성은 ER유체의 온도 변화에 기인한다. 앞 절에서 보듯이 본 연구에서 이 불확실성 변수는 제어 입력 행렬의 50%정도가 존재한다고 가정하므로, 식(3-3-12)와 식(3-3-16)을 이용하여 불확실성이 있는 상태 방정식을 유도할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{D}z_r = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})u + \mathbf{D}z_r \quad (3-3-17)$$

여기서,

$$\mathbf{A}_0 + \Delta\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_0 + \Delta m_s} & -\frac{c_s}{m_0 + \Delta m_s} & \frac{k_s}{m_0 + \Delta m_s} & -\frac{c_s}{m_0 + \Delta m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_t + k_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{2L(A_p - A_r)(\alpha + \Delta\alpha)}{(m_0 + m_s)h} & 0 & -\frac{2L(A_p - A_r)(\alpha + \Delta\alpha)}{m_{us}h} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_t}{m_{us}} \end{bmatrix}^T$$

이다.

\mathbf{A}_0 와 $\Delta\mathbf{A}$ 는 각각 시스템의 공칭 행렬과 불확실성 행렬이다. \mathbf{B} 와 $\Delta\mathbf{B}$ 는 각각 제어 입력의 공칭 행렬과 불확실성 행렬이다. 위에서 언급하였듯이 제어 입력의 불확실성 행렬은 p 를 이용하여 $\Delta\mathbf{B} = p\mathbf{B}_0$ 와 같이 표현할 수 있다. 단 p 는 $|p| \leq \phi < 1$ 와 같은 조건을 갖는다.

(2) 슬라이딩 모드 제어기 설계

강건한 진동 제어를 위해 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였다. 먼저 다음과 같은 슬라이딩 평면을 정의한다.

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}) = \mathbf{G}\mathbf{x} = [g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4] \mathbf{x} \quad (3-3-18)$$

여기서 슬라이딩 평면의 기울기 \mathbf{G} 는 $\mathbf{G} \in R^{1 \times 4}$ 이며 평면 자체가 점근적 안정성을 가지는 값으로 결정된다. $\mathbf{W} \in R^{4 \times 3}$ 행렬의 고유벡터를 결정함으로써 \mathbf{G} 행렬을 얻을 수 있다[91].

$$\mathbf{A}_0\mathbf{W} - \mathbf{W}\mathbf{J} = \mathbf{B}_0\mathbf{L} \quad (3-3-19)$$

여기서 $\mathbf{J} \in R^{3 \times 3}$ 는 조단 케노니컬 형태의 고유벡터이고, $\mathbf{L} \in R^{1 \times 3}$ 는 \mathbf{B}_0 의 선형 조합에 의한 행렬이다. 여기서 \mathbf{G} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{G} = \mathbf{B}_0^{-1} \quad (3-3-20)$$

여기서 \mathbf{B}_0^{-1} 는 \mathbf{B}_0 의 역행렬 연산에서 얻게 된다. 여기서 우리가 원하는 고유값 -3을 선택하였고, 결과적으로 $\mathbf{G} = [0.056 \quad -0.0034 \quad 0.0625 \quad -0.2423]$ 를 결정하였고, 따라서 변환 평면은 다음과 같게 된다.

$$0.056x_1 - 0.0034x_2 + 0.0625x_3 - 0.2423x_4 = 0 \quad (3-3-21)$$

슬라이딩 모드 제어기의 안정성과 불확실성에 대한 성능을 확보하기 위하여 불확실성 항 $\Delta\mathbf{A}$ 를 $|\delta a_{ij}| \leq \overline{a_{ij}} < \infty$ 와 같이 가정하고, 불확실성 행렬 $\overline{\mathbf{A}}$ 은 $\overline{a_{ij}}$ 의 상한을 갖는다고 정의한다[92]. 결과적으로 슬라이딩 모드 조건 $\mathbf{s}(\mathbf{x}) \frac{d}{dt} \mathbf{s}(\mathbf{x}) < 0$ 을 만족하는 슬라이딩 모드 제어기를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$u = -\frac{(\mathbf{GB}_0)^{-1}}{1-\phi} \left\{ \left[\|\mathbf{GA}_0\mathbf{x}\| + \|\mathbf{G}\overline{\mathbf{A}}\mathbf{x}\| \right] \text{sgn}(\mathbf{s}(\mathbf{x})) + k \text{sgn}(\mathbf{s}(\mathbf{x})) \right\} \quad (3-3-22)$$

여기서 $\text{sgn}(\cdot)$ 는 부호 함수이고, 외란의 최대 크기보다 크게 설정하기 위하여 $k = v|\mathbf{GD}|$, $v \geq |z_s|$ 와 같이 설정하였다. 따라서 불확실성이 포함된 시스템 식(3-3-14)에 대한 슬라이딩 모드 조건을 만족하는 제어 입력 u 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}) \frac{d}{dt} \mathbf{s}(\mathbf{x}) = \mathbf{s}(\mathbf{x})\mathbf{G}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{s}(\mathbf{x})\{\mathbf{G}(\mathbf{A}_0 + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} + \mathbf{G}(\mathbf{B}_0 + \Delta\mathbf{B})\mathbf{x} + \mathbf{GD}z_s\} \quad (3-3-23)$$

제어 입력 u 는 부호 함수를 포함하기 때문에 제어 시에 채터링 현상이 나타날 수 있다. 따라서 부호 함수를 ε 의 범위를 갖는 포화 함수로 대체함으로써 채터링 현상을 줄일 수 있다. 식(3-3-22)의 제어 입력은 능동 제어기로 설계되었다. 그러나 ER댐퍼는 반능동 작동기이므로, 제어 입력을 ER완충 시스템에 적용할 때 다음과 같은 작동 조건을 적용하여야 한다.

$$u = \begin{cases} u & \text{for } u(z_{us} - z_s) > 0 \\ u & \text{for } u(z_{us} - z_s) \leq 0 \end{cases} \quad (3-3-24)$$

이 조건은 제어 입력 u 가 오직 안정한 시스템의 에너지가 감소가 증가할 때만 작동하도록 한다[93]. 이 연구에서 ER댐퍼에 적용 가능한 최대 전기장은 3 kV/mm이고 슬라이딩 모드 제어 변수는 $\phi = 0.5$, $k = 120$ 와 $\varepsilon = 0.01$ 로 설정하였다.

(3) 결과 및 토의

두 가지 형태의 노면 조건에 대하여 1/4차량 ER 서스펜션 시스템의 진동제어 특성을 평가하였다. 첫 번째는 일반적으로 과도 응답특성을 나타내는 것으로, 다음과 같이 표현되는 범프가진이다.

$$z_r = z_b [1 - \cos(\omega_r t)] \quad (3-3-25)$$

여기서, $\omega_r = 2\pi V/D$ 이고, $z_b (=0.035m)$ 는 범프 높이의 절반, $D (=0.8m)$ 는 범프의 폭을 나타낸다. 범프가진에서 자동차는 3.08km/h의 일정한 속도로 지나간다고 가정하였다. Fig. 3-3-13은 범프가진을 시간영역에서 나타낸 것이다. 두 번째 조건은 다음과 같이 표현되는 조화가진이다.

$$z_r = z_e \sin \omega t \quad (3-3-26)$$

여기서 ω 는 가진 주파수(0.4-03.0 Hz)이고, $z_e (=0.015m)$ 는 가진 크기이다. 1/4 차량의 시스템 변수는 일반적인 승용차의 서스펜션 시스템에 바탕을 두었고 표 3-3-1과 같다.

Fig. 3-3-14는 범프가진에 대한 제어응답을 나타낸 것이다. 50 °C에서 측정된 ER 유체의 $\alpha (=361)$ 값과, 추가적인 질량의 증가 없는 $m_s (=377kg)$ 값을 제안된 시스템의 공칭 값으로 하였고, 제안된 슬라이딩 모드 제어기의 강건성을 확인하기 위해 30 °C에서의 ER 유체의 $\alpha (=192)$ 값과, 사람이 승차한 경우를 고려하여 70kg의 질량 증가를 한 $m_s (=447kg)$ 값을 섭동으로 설정하였다. α 값의 증가는 ER 댐퍼의 댐핑력의 감소를 의미한다. Fig. 3-3-14(a)에서 보듯이 섭동이 없을 경우, 범프가진에 의해 발생한 진동이 제안된 제어 알고리즘을 통해 잘 제어되는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 3-3-14(b)와 같이 섭동이 있을 경우에도 수직 변위, 수직 가속도, 타이어 변형이 감소하여 진동이 효과적으로 제어됨을 알 수 있다. 이는 제안된 슬라이딩 모드 제어기를 통해 ER 서스펜션 시스템을 제어함으로써 좋은 승차감과 안정성을 가질 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 3-3-15는 섭동을 고려하지 않았을 때, 주파수 영역에서의 응답을 나타낸 것이다. 입력과 출력의 RMS 값으로부터 전달률을 계산하였다. 서스펜션 트래블($z_s - z_{us}$)과 sprung 질량의 가속도의 전달률 모두 차제 공진(1-1.5 Hz) 부근에서 감소하였다. Fig. 3-3-16은 섭동을 고려한 상태의 주파수 영역에서의 응답 특성이다. 범프 가진 때와 같은 섭동이 고려되었으며, 섭동이 있을 때에도 제안된 제어 알고리즘을 통해 효과적으로 진동을 제어할 수 있음을 볼 수 있다.

2. 입력포화를 고려한 강건제어 시스템

가. ER 서스펜션 시스템

(1) ER 댐퍼의 동적 모델링

Fig. 3-3-1과 같은 실린더 형태의 ER 댐퍼를 설계, 제작하였다. 피스톤의 운동에 의해서 ER 유체는 내부 실린더와 외부 실린더 사이의 유로를 통해 흐르게 된다. 고전압 발생기로부터 양전압은 내부 실린더에 걸리게 되고, 음전압은 외부 실린더로 통하게 된다. 외부의 가스 챔버는 피스톤 운동에 의해 생긴 ER 유체의 축압기 역할을 하게 된다. 제작된 ER 댐퍼는 중형 승용차용에 적합하게 설계되었고, 전극길이(L)는 258mm, 전극간격(h)은 0.75mm, 외경은 24mm로 제작되었다.

전기장 무부하시, ER 댐퍼는 유체의 저항에 의한 댐핑력만을 갖게 된다. 그러나, ER 댐퍼에 전기장이 가해지게 되면 ER 유체의 항복응력에 의한 댐핑력을 추가적으로 가지게 된다. 따라서 ER 댐퍼의 댐핑력은 전기장의 밀도를 제어함으로써 연속적인 조절이 가능해진다. ER 댐퍼의 댐핑력은 다음과 같이 얻어진다[87]:

$$F = k_e x_p + c_e \dot{x}_p + F_{ER} \quad (3-3-27)$$

k_e 는 가스 챔버에 의한 유효강성이고, c_e 는 유체의 점성에 의한 유효댐핑, x_p 는 가진 변위, F_{ER} 은 전기장에 의해 발생한 댐핑력이다. 제어 가능한 댐핑력 F_{ER} 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_{ER} = (A_p - A_r) 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3-3-28)$$

여기서 A_p 와 A_r 는 각각 피스톤과 피스톤 로드 면적을 나타내고, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 는 부호함수, L 은 전극길이, h 는 전극간격, E 는 전기장을 나타낸다. α 와 β 는 ER 유체 고유의 값으로 실험적으로 결정하게 된다. 내부 실린더와 외부 실린더 사이의 ER 유체의 운동은 유동모드로 가정하여, 유동모드형 전기점성측정기를 이용한 실험에서 α 와 β 값을 얻게 결정하게 된다[88]. 본 연구에서 사용된 ER 유체의 항복응력은 $878.1 E^{1.42} \text{Pa}$ 이다. 여기서 E 의 단위는 kV/mm이다.

식(3-3-28)의 댐핑력은 동적 특성을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\tau \frac{d}{dt} F_{ER} + F_{ER} = (A_p - A_r) 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3-3-29)$$

여기서 τ 는 작동기의 시상수인데, 본 연구에서 사용된 ER 유체의 시상수는 380ms이다.

(2) 1/4 차량의 ER 서스펜션 시스템 모델링

1/4 차량의 ER 서스펜션 시스템을 구성하여 제어시스템의 성능과 강건성을 평가하였다. Fig. 3-3-4와 같이 2자유도 1/4차량의 ER서스펜션 시스템을 모델링하였다. m_s 와 m_u 는 각각 sprung 질량과 unsprung 질량을 나타낸다. 서스펜션의 스프링은 선형으로 가정하였고, 타이어도 선형 스프링으로 모델링 하였다. 식(3-3-29)로부터 다음과 같은 상태 공간 모델을 구성하였다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}z_r \quad (3-3-30)$$

여기서

$$\mathbf{x} = [z_s \quad \dot{z}_s \quad z_u \quad \dot{z}_u \quad F_{ER}]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & \frac{1}{m_s} \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_t+k_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} & \frac{1}{m_u} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{\tau} \right]^T$$

$$u = F_{ER}, \quad \mathbf{L} = \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{k_t}{m_u} \quad 0 \right]^T$$

이고, k_s 는 서스펜션의 강성계수, c_s 는 서스펜션의 댐핑계수, k_t 는 타이어의 강성계수, z_s, z_u, z_r 은 각각, sprung 질량, unsprung 질량, 가진의 수직 변위를 나타낸다.

나. H_∞ 제어기 설계

실제 시스템에 있어서, sprung 질량은 탑승자의 수나, 적재하중의 상태에 따라 달라지게 되고, 시상수 역시 정확하게 측정하기가 어려우며, 작동 온도와 같은 요인에 의해 쉽게 변하게 된다. 이러한 시스템의 불확실성을 고려하기 위하여 McFarlane과 Glover이 제안한 LSDP(loop shaping design procedure) H_∞ 를 적용하였고, 그 결과 다음과 같은 제어기를 설계하였다[89].

먼저, 1/4 차량의 플랜트를 다음과 같이 구성하였다.

$$G(s) = \overline{M}^{-1} \overline{N} = \frac{z_s(s)}{u(s)} = \frac{k_t + m_{s0} s^2}{(\tau_0 s + 1) D(s)} \quad (3-3-31)$$

여기서,

$$D(s) = m_{s0} m_u s^4 + c_s (m_{s0} + m_u) s^3 + (m_{s0} k_t + (m_{s0} + m_u) k_s) s^2 + c_s k_s s + k_s k_t$$

이고, u 는 제어 가능한 댐핑력 F_{ER} 을 나타낸다.

1/4 차량의 제어기는 다음과 같이 설계하였다.

$$\begin{aligned} K = WK\infty = & (4.50 \times 10^5 s^5 + 6.68 \times 10^7 s^4 + 5.83 \times 10^9 s^3 + 3.43 \times 10^{11} s^2 \\ & + 2.61 \times 10^{12} s + 1.66 \times 10^{12}) / (s^6 + 7.87 \times 10^2 s^5 + 1.66 \times 10^5 s^4 \\ & + 1.74 \times 10^7 s^3 + 1.26 \times 10^9 s^2 + 5.11 \times 10^{10} s + 2.90 \times 10^{11}) \end{aligned}$$

다. 반와인드업 제어기의 설계

ER 속 업소버를 비롯한 각종 차량용 ER 응용장치의 제어를 위해 시스템이 갖는 불확실성이나 변수변동을 고려한 강건제어 알고리즘을 적용할 경우, 강건제어기의 특성 상 과도입력이 인가되는 경우가 종종 발생하며 이는 절연파괴 현상 및 차량 승차감에 악영향을 미칠 수 있다. 뿐만 아니라, 고전류밀도/고전압의 요구사항을 동시에 만족시키는 고전압 공급장치의 경우 제작 단가가 크게 상승하는 문제점을 안고 있다. 따라서 이러한 문제들을 극복하기 위해서는 제어를 위한 입력 전기장의 크기를 일정 수준 이하로 제한할 필요가 있다. 기존의 ER 응용장치 관련 연구에서는 이러한 과도 제어입력을 방지하기 위해 포화함수(saturation function)만을 적용하여 입력값의 수치적 제한을 가하는 단순한 방식을 택하여 왔으나 이는 설계된 제어기의 안정성을 보장할 수 없을 뿐만 아니라 제어성능의 악화를 가져올 수 있는 원인이 되기도 한다. 따라서, 본 연구에서는 고전압 장치의 과도한 입력을 방지하고 ER 응용장치의 안정성을 보장하기 위해 관측기 시스템에 기반한 반와인드업(observer-based anti-windup) 제어기법을 도입하였다.

$sat(u) = u$ 일 때는 보상기의 변형이 필요하지 않고, $A_c - LC_c$ 가 안정하여, 제한된 e 에 대해서는 x_c 도 제한을 가지는 L 을 가질 수 있는 보상기를 다음과 같이 구성하였다[97].

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c e + L[sat(u) - u] \\ u &= D_c x_c + D_c e \end{aligned} \quad (3-3-32)$$

포화입력을 고려한 선형 시스템이 다음과 같다고 하면,

$$\dot{x} = Ax + B_1 sat(u) + B_2 d, \quad x(0) = x_0, \quad (3-3-33)$$

$$y = Cx$$

입력포화를 고려하지 않은 폐회로 시스템은 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$\bar{x} = A\bar{x} + B_1\bar{u} + B_2d, \quad \bar{x}(0) = x_0, \quad (3-3-34)$$

$$\bar{x}_c = A_c\bar{x}_c + B_c(\bar{y} - r), \quad \bar{x}_c(0) = x_{c0}, \quad (3-3-35)$$

$$\bar{y} = C\bar{x}, \quad \bar{u} = C_c\bar{x}_c + D_c(\bar{y} - r) \quad (3-3-36)$$

L 의 효과를 보기 위하여 입력포화가 없을 때의 폐회로 시스템을 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{x}_c \end{bmatrix} = A_{cl} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{x}_c \end{bmatrix} + B_r r + B_d d, \quad \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{x}_c \end{bmatrix} (0) = \begin{bmatrix} \bar{x}_0 \\ \bar{x}_{c0} \end{bmatrix}, \quad (3-3-37)$$

$$\bar{y} = C_e \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{x}_c \end{bmatrix}, \quad \bar{u} = \bar{K} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{x}_c \end{bmatrix} - D_c r \quad (3-3-38)$$

여기서, A_{cl}, B_r, B_d, C_e, K 는 각각 다음과 같다.

$$A_{cl} = \begin{bmatrix} A + B_1 D_c C & B_1 C_c \\ B_c C & A_c \end{bmatrix}, \quad B_r = \begin{bmatrix} -B_1 D_c \\ -B_c \end{bmatrix}, \quad B_d = \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad K = [D_c C \quad C_d] \quad (3-3-39)$$

$TA_{cl} = HT$ 를 만족하는 T 가 존재한다고 가정하면, $L = -T_2^{-1}T_1B_1$ 을 만족하는 L 을 선택함으로써, 다음과 같이 표현되는 입력포화를 고려한 시스템과, 입력포화를 고려하지 않은 시스템의 차이를 막을 수 있다.

$$\dot{X} = AX + B[\text{sat}(K_1X + \bar{u}) - \bar{u}], \quad X(0) = 0 \quad (3-3-40)$$

$$Y = CX, \quad U = K_1X$$

여기서 X, Y, U 는 다음과 같다.

$$X = \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{x}_c \end{bmatrix}, \quad Y = y - \bar{y}, \quad U = u - \bar{u} \quad (3-3-41)$$

같은 방법으로, 입력포화가 있을 때의 시스템을 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = A_{cl} \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ L \end{bmatrix} [\text{sat}(u) - u] + B_{cl}r + B_{cd}, \quad (3-3-42)$$

$$y = C_e \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix}, \quad u = K \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} - D_c r$$

$X = x - \bar{x}, X_c = x_c - \bar{x}_c$ 의 관계를 이용하여, 시스템을 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{X}_c \end{bmatrix} = A_{cl} \begin{bmatrix} X \\ X_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ L \end{bmatrix} [\text{sat}(u) - u] \quad (3-3-43)$$

앞에서와 같은 방법으로, $TA_{cl} = HT$ 를 만족하는 T 가 존재한다면, $L = -T_2^{-1}T_1B_1$ 을 만족하는 L 을 선택할 수 있다. 또한, $Z = T \begin{bmatrix} X \\ X_c \end{bmatrix}$ 의 좌표축 변화를 하게 되면, 시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{X} = AX + B_1[\text{sat}(K_1X + K_2Z + \bar{u}) - \bar{u}], \quad \dot{Z} = HZ \quad (3-3-44)$$

여기서, K_1 과 K_2 는 다음과 같다.

$$K_1 = D_c C - C_c T_2^{-1} T_1, \quad K_2 = C_c T_2^{-1} \quad (3-3-45)$$

따라서, y 와 \bar{y} , u 와 \bar{u} 의 불일치를 다음과 같은 시스템으로 제어할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + B[\text{sat}(K_1X + \bar{u}) - \bar{u}], \quad X(0) = 0 \\ Y &= CX, \quad U = K_1X \end{aligned} \quad (3-3-46)$$

라. 결과 및 토의

Fig. 3-3-17~19에 나타난 그림은 PANI ER 유체를 사용한 1/4 차량의 HILS 모델을 구축하고 H_∞ 강건제어 시스템과 연계된 반와인드업 제어코드를 개발하여 차량이 3.08km/h의 속도로 최대높이 15cm, 폭 75cm의 정현파 형태의 범프를 통과할 때, 본 연구에서 개발된 반와인드업 제어기를 이용하여 그 성능을 해석한 것이다. Fig. 3-3-19에 나타난 제어 입력의 형상으로부터 확인할 수 있듯이 반와인드업(AW)을 적용한 경우 입력포화점으로 설정한 5kV/mm 미만으로 제어전기장이 유지되며 안정적인 제어가 이루어진 것을 확인할 수 있다. 또한, 반와인드업을 적용하지 않은 경우에는 최대 약 7kV/mm의 상대적으로 큰 전기장이 인가되었으나, 차체의 변위나 가속도 측면에서 반와인드업을 적용한 경우와 비

교해볼 때 별다른 성능차이를 나타내지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 반와인드업과 연계된 강건제어 알고리즘은 제어성능의 저하 없이 입력을 요구 정도 미만으로 유지할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 본 연구에서 수행된 연구결과는 ER 속업소버뿐 아니라 ER 엔진 마운트, ER ABS, ER 시트 댐퍼 등 다양한 ER 응용장치의 강건제어에 적용할 수 있으므로 그 의미가 대단히 크다고 할 수 있다.

3. 결 론

이상의 결과에서 본 연구를 통해 제안된 H_{∞} 제어기와 슬라이딩 모드 제어기 모두 범프 가진 및 조화 가진 하에서 작동기 시상수의 불확실성, 차체 무게 변화에 의한 불확실성, 온도변화에 따른 항복응력의 변화 등의 여러 외란이 존재하여도 우수한 제진 성능과 안정성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

Table 3-3-1 Parameter of the quarter car ER suspension system

Parameter	Value
m_s	250 kg
m_u	29.5 kg
k_s	20,580 N/m
k_t	200,000 N/m
c_s	946 Ns/m (for ERF-I)
c_s	1418 Ns/m (for ERF-II)
A_p	0.00071 m^2
A_r	0.00025 m^2
L	0.258 m
h	0.00075 m

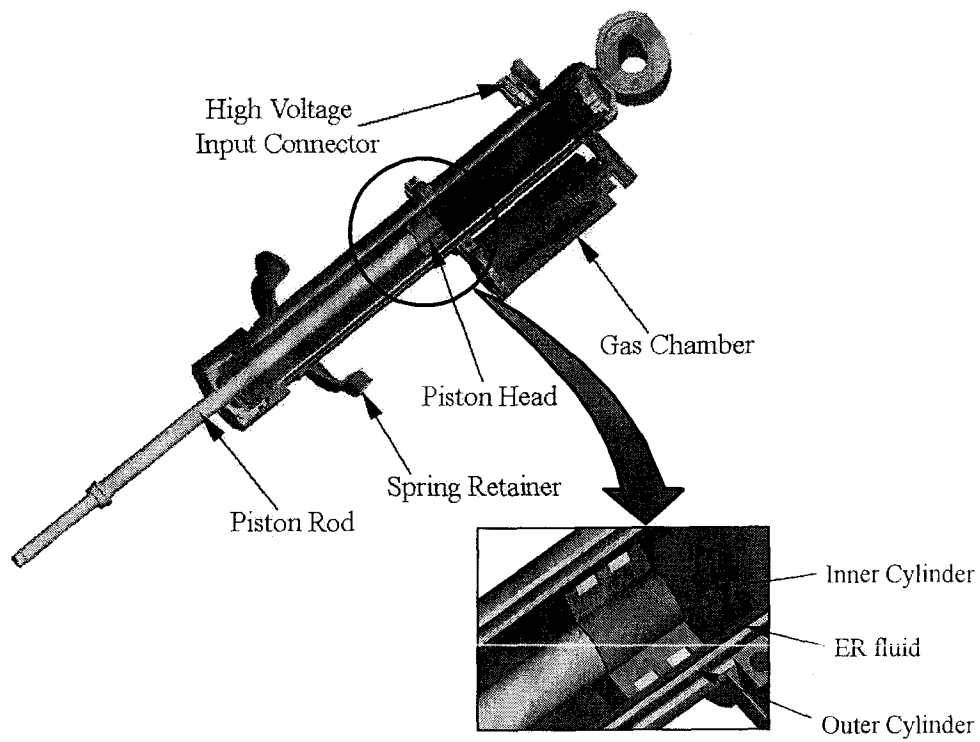


Fig. 3-3-1 An electro-rheological damper for a middle-sized passenger vehicle

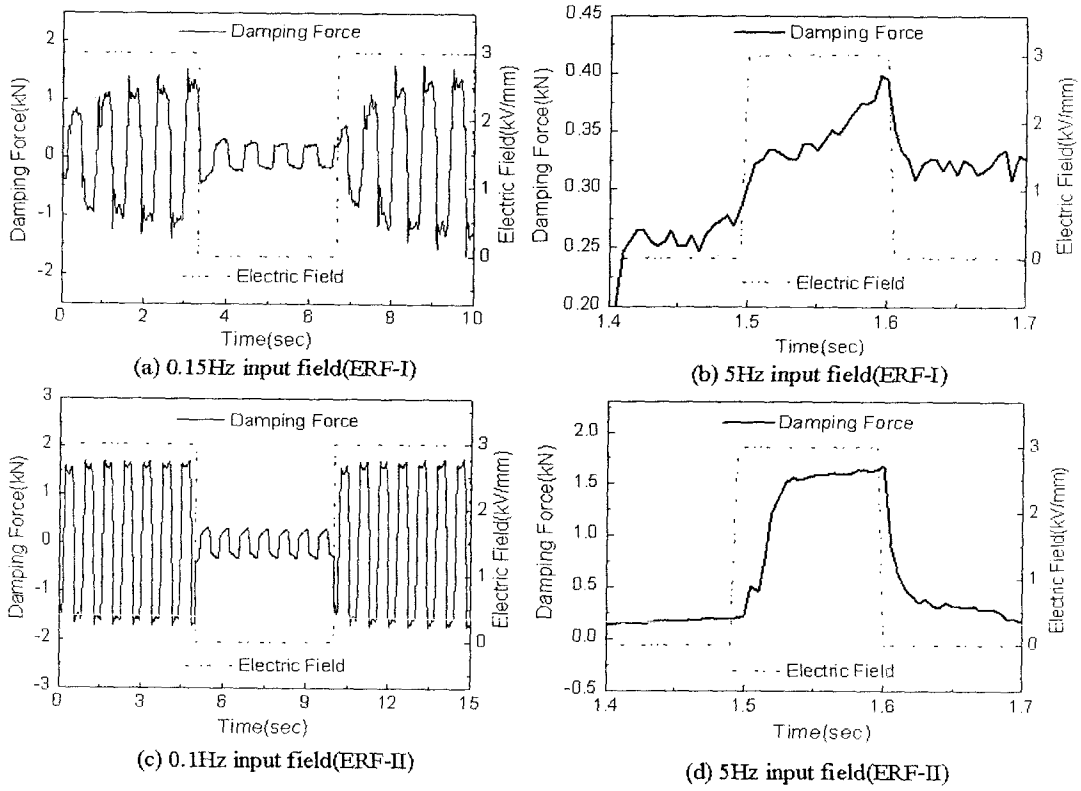


Fig. 3-3-2 Measured damping forces. (a) 0.15 Hz input field (ER F-I), (b) 5 Hz input field (ER F-I), (c) 0.1 Hz input field (ER F-II), (d) 5 Hz input field (ER F-II)

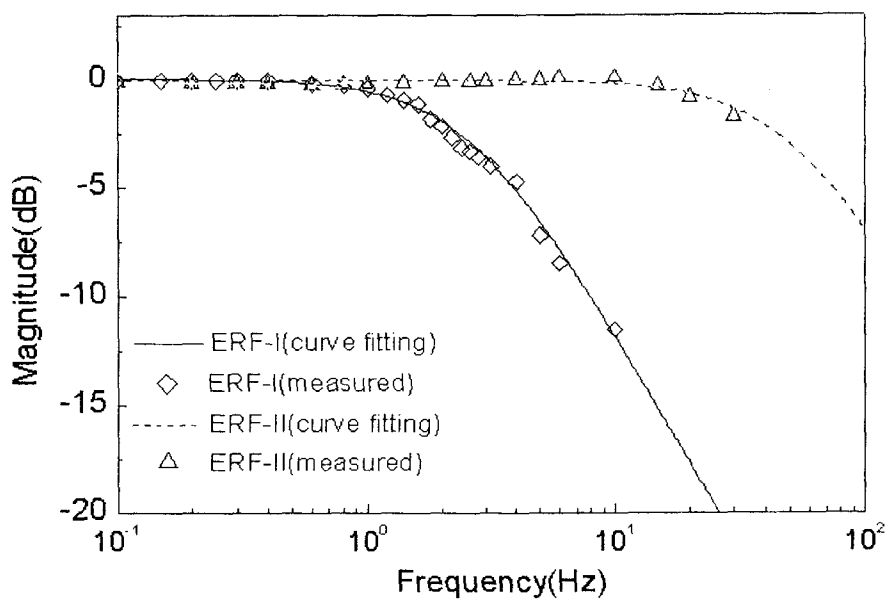


Fig. 3-3-3 Frequency responses of the damping force

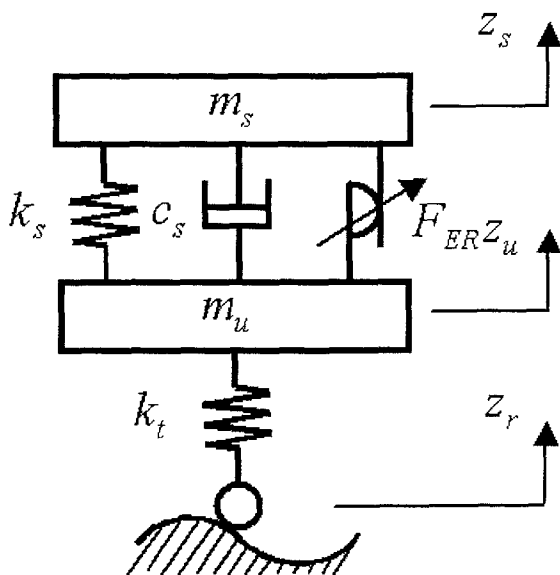


Fig. 3-3-4 Quarter car model of semiactive ER suspension system

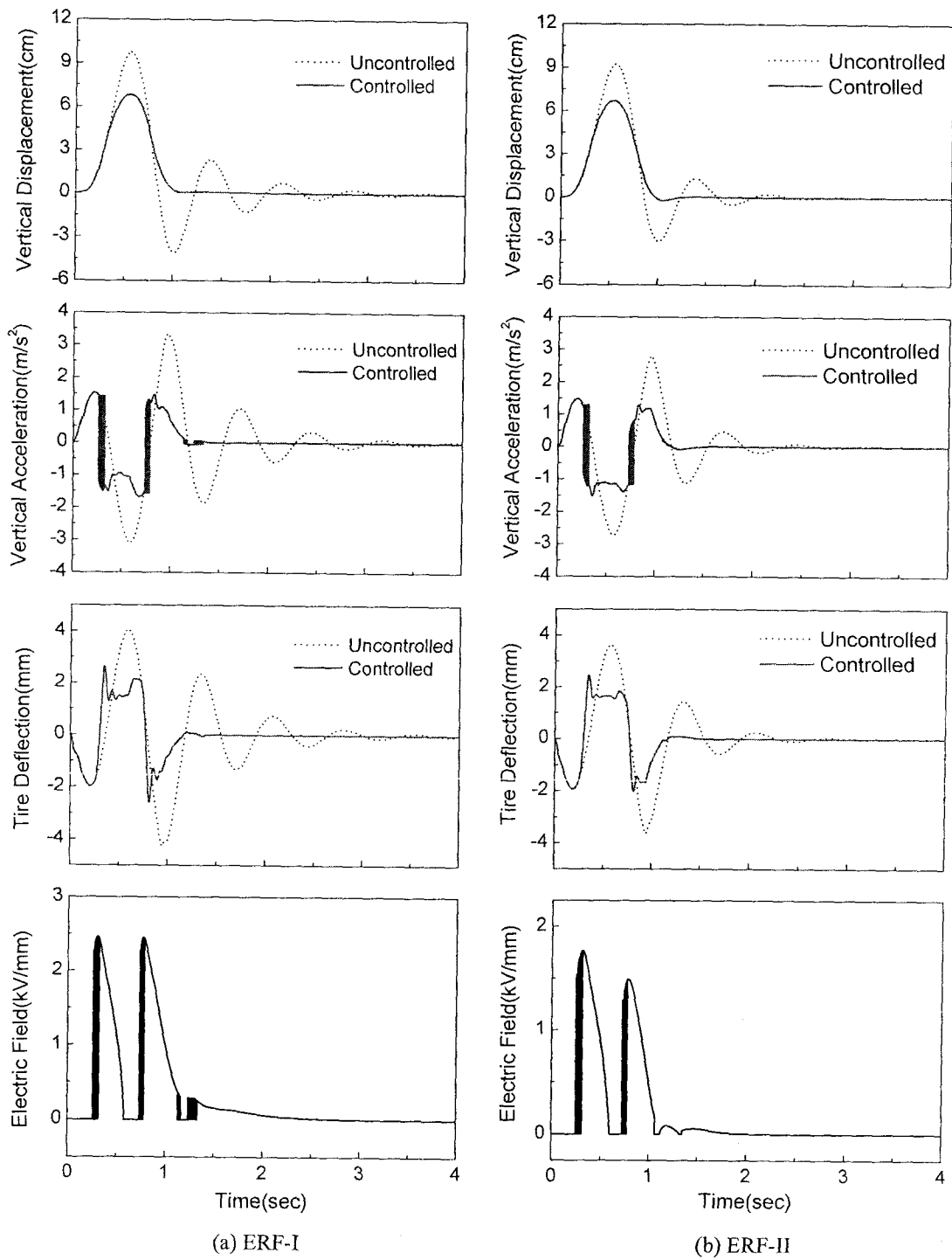


Fig. 3-3-5 Bump responses of ER suspension system without time constant

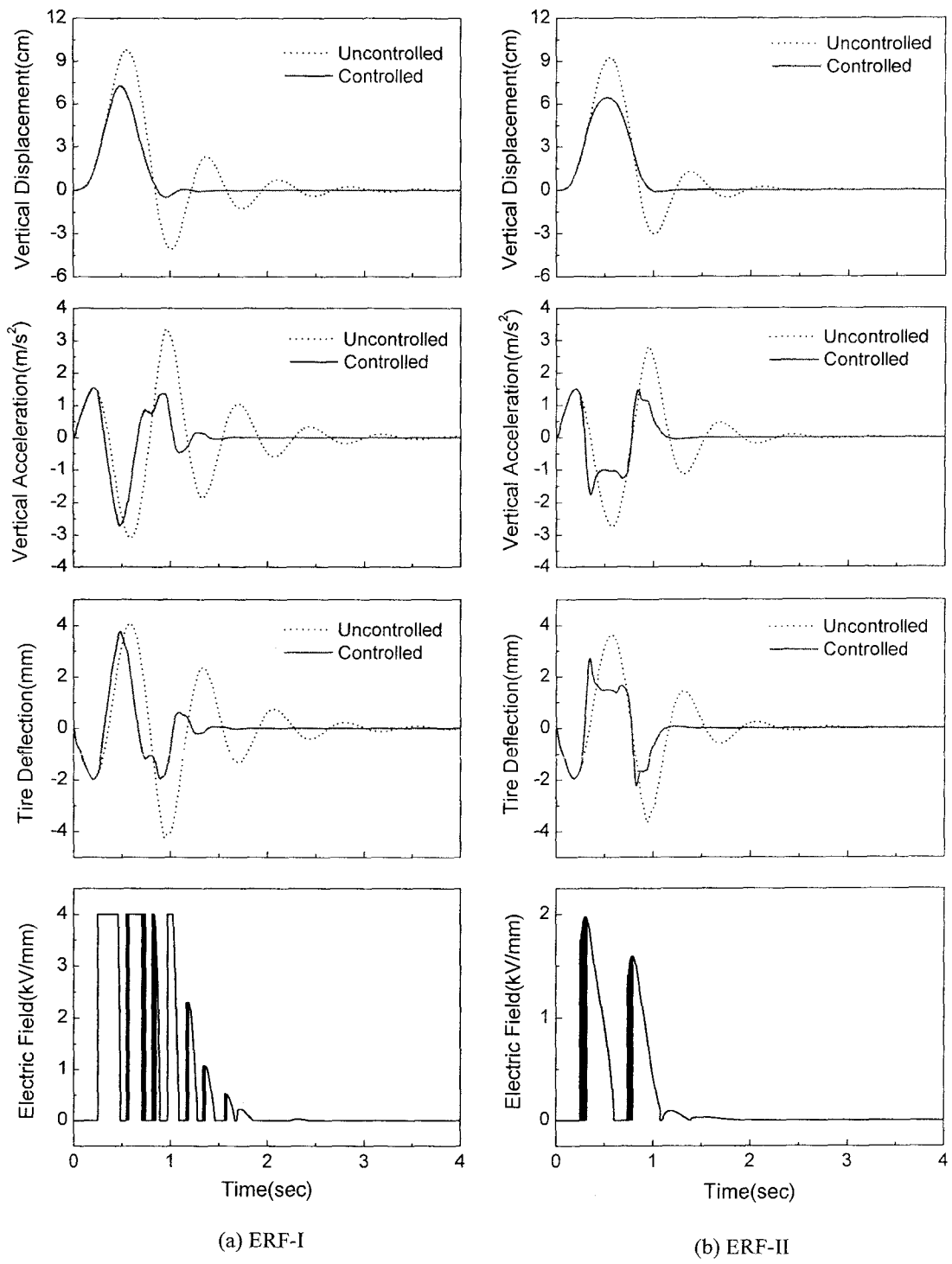
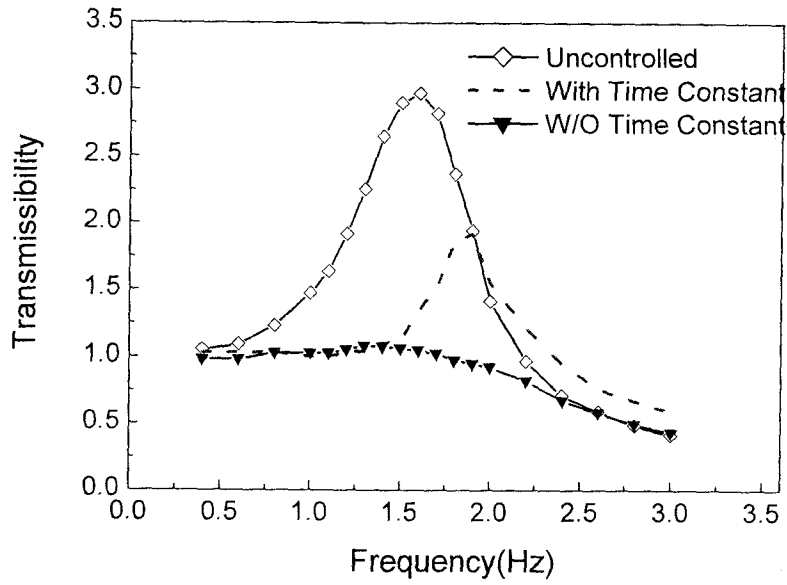
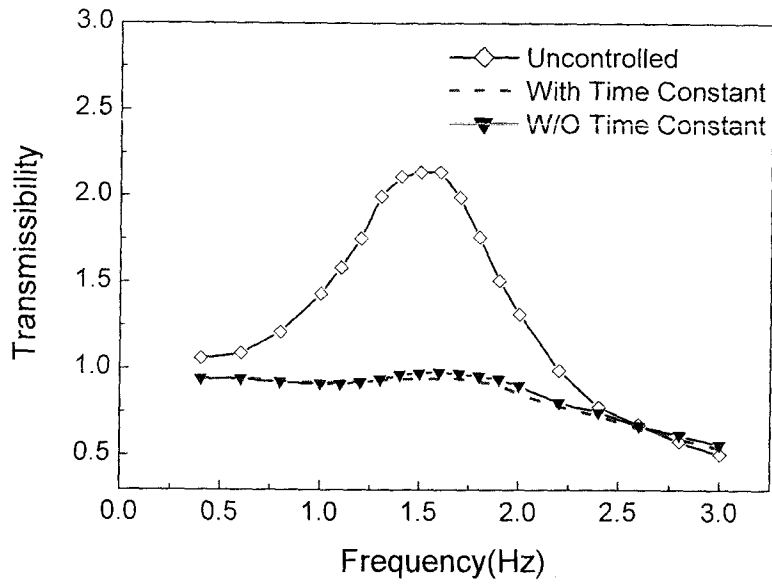


Fig. 3-3-6 Bump responses of ER suspension system with time constant



(a) ERF-I



(b) ERF-II

Fig. 3-3-7 Frequency responses of ER suspension system

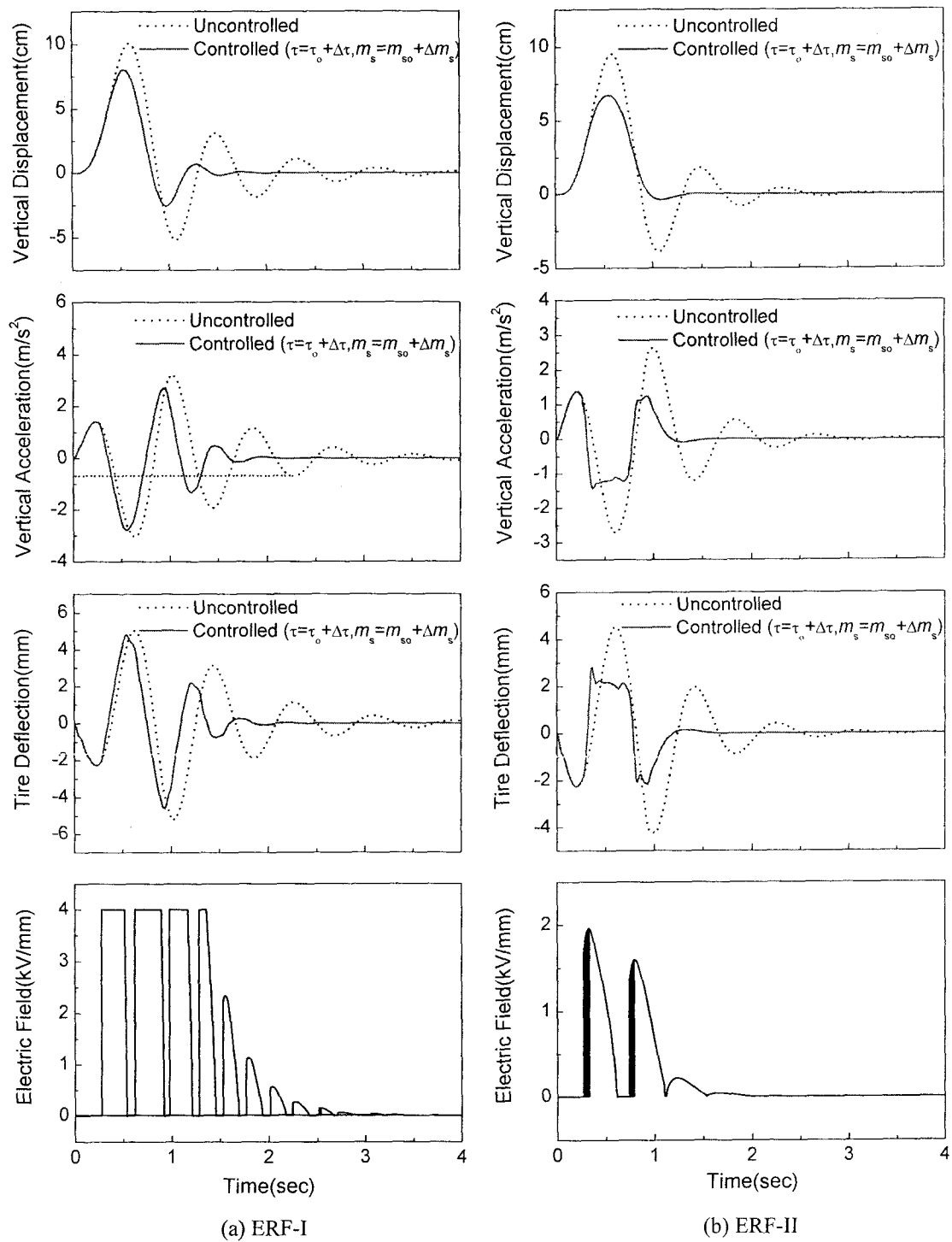
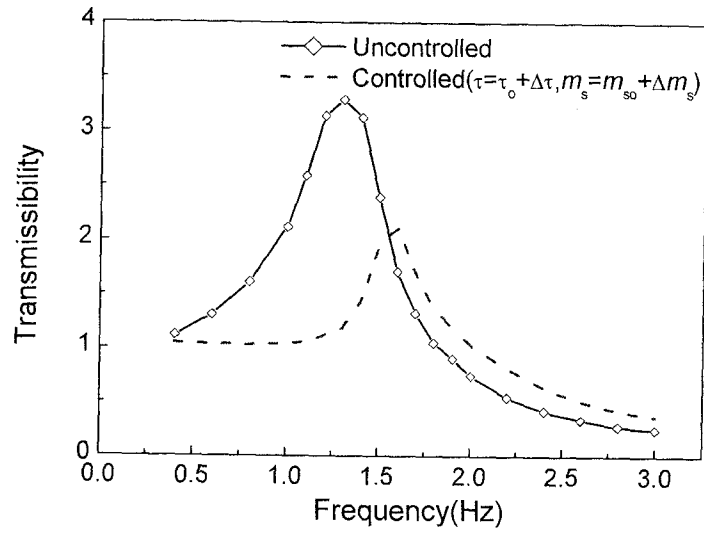
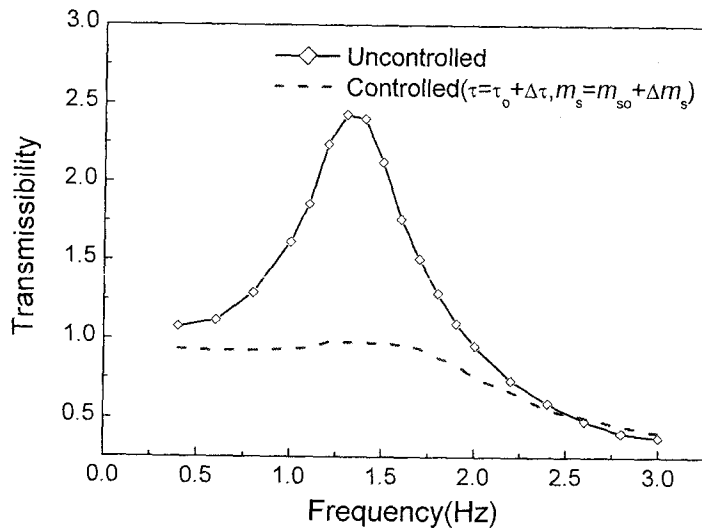


Fig. 3-3-8 Bump responses of ER suspension system subjected to uncertainties



(a) ERF-I



(b) ERF-II

Fig. 3-3-9 Frequency responses of ER suspension system subjected to uncertainties

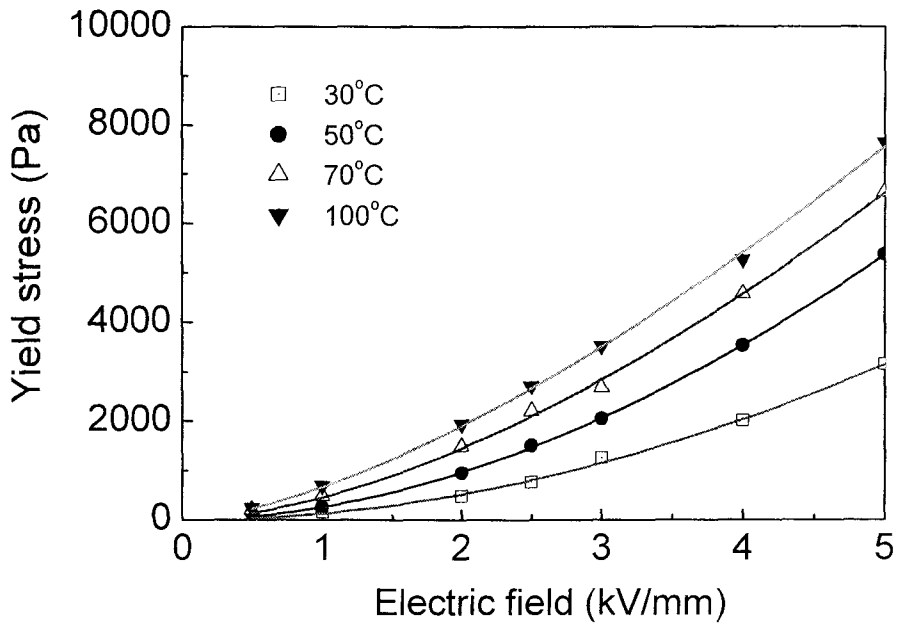


Fig. 3-3-10 Field-dependent yield stress of the ER fluid with various temperature conditions

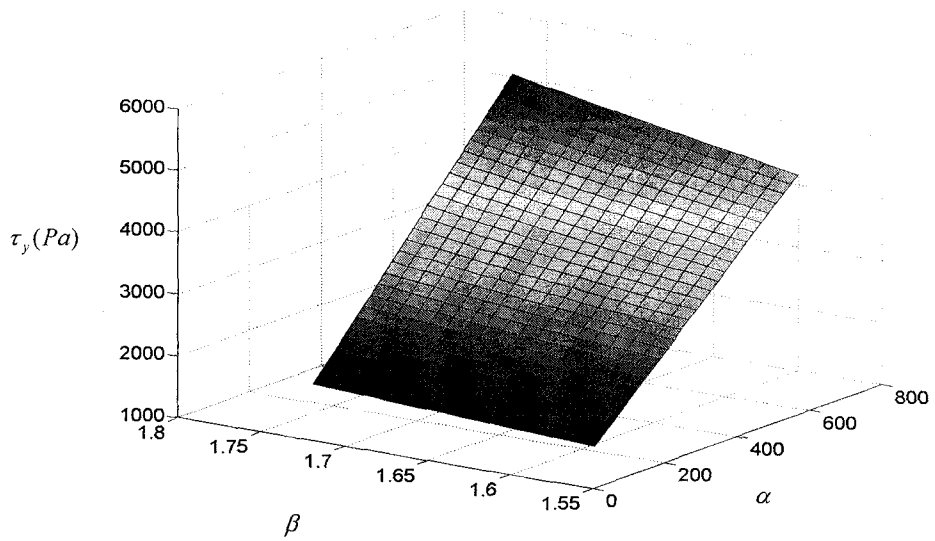


Fig. 3-3-11 The effect of α and β to the yield stress τ_y

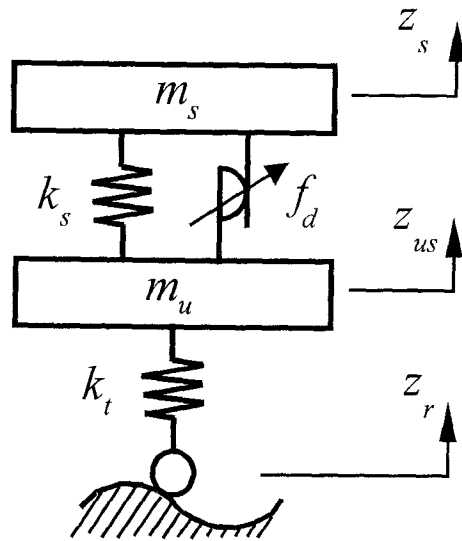


Fig. 3-3-12 Quarter-vehicle semiactive ER suspension system

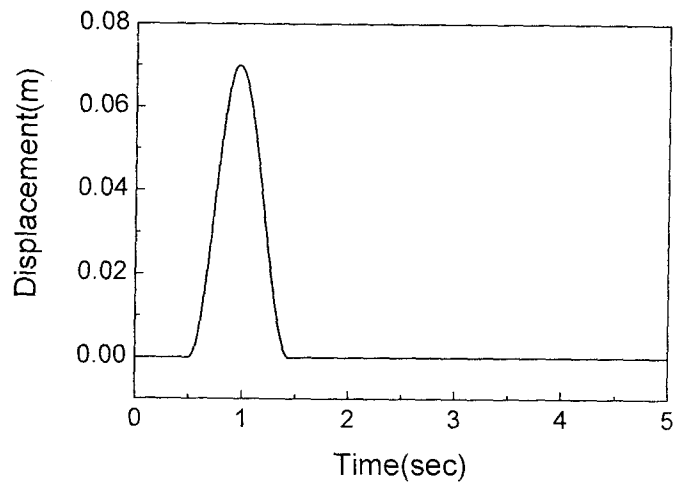
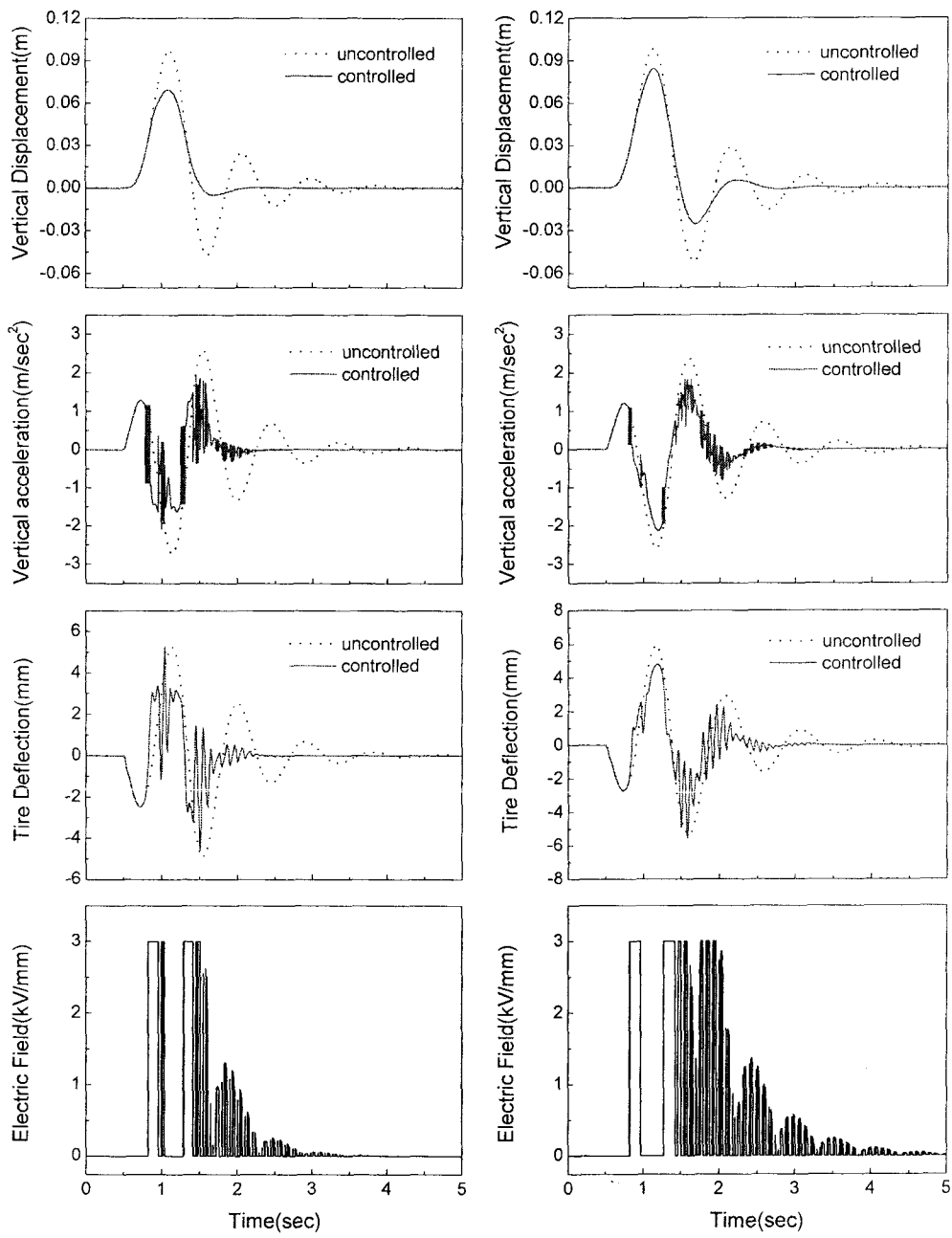


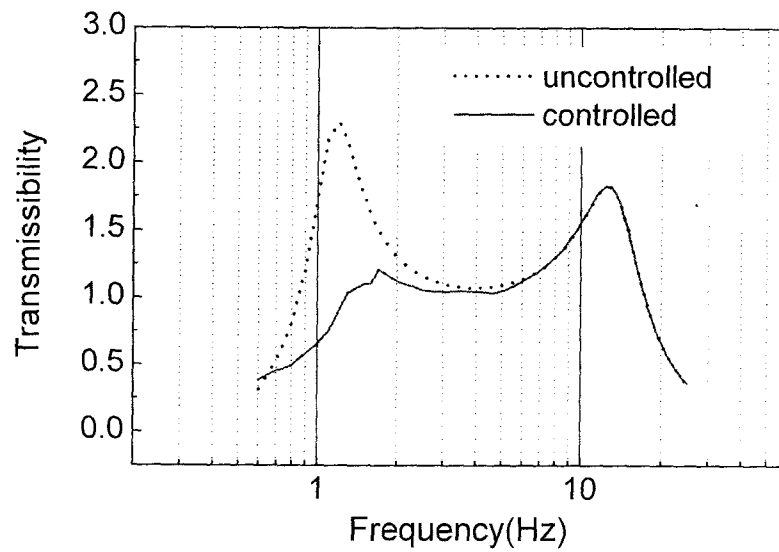
Fig 3-3-13 Bump excitation profile



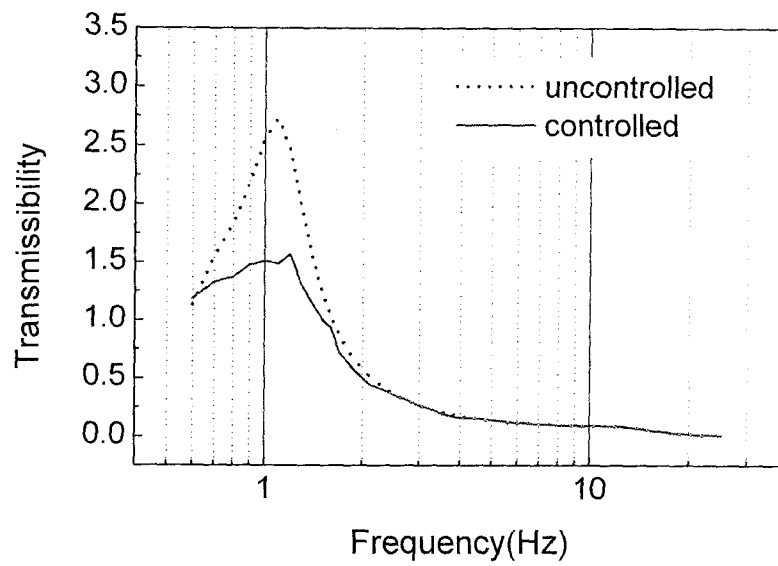
(a) Without perturbation

(b) with perturbation

Fig. 3-3-14 Time responses of the ER suspension system for bump excitation

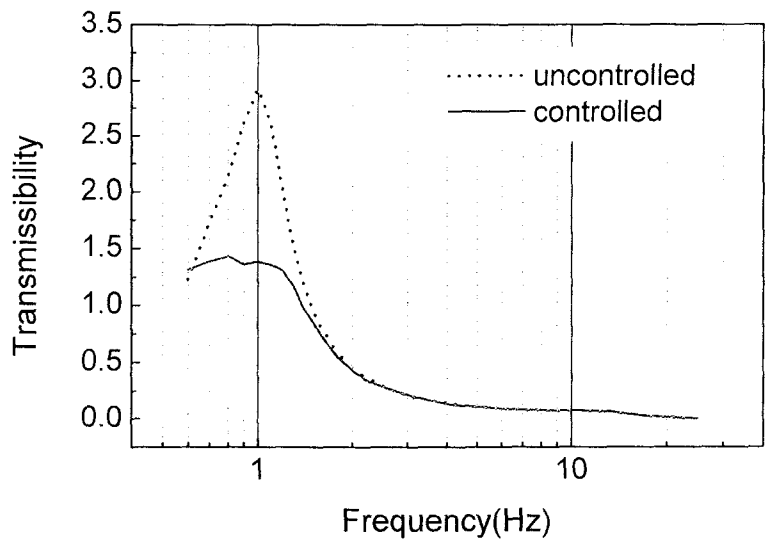
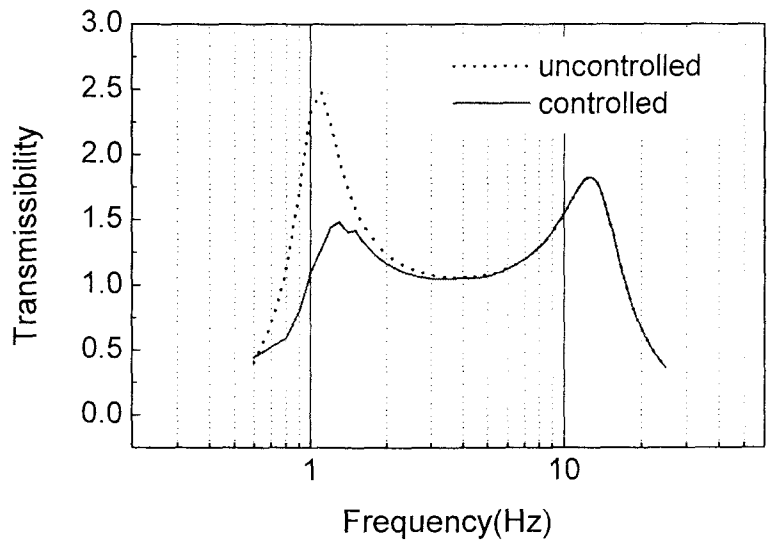


(a) Suspension travel



(a) Vertical acceleration

Fig. 3-3-15 Frequency responses of the ER suspension system
(without parameter perturbation, 50°C, $m_s=377\text{kg}$)



(b) Vertical acceleration

Fig. 3-3-16 Frequency responses of the ER suspension system
(with parameter perturbation, 30°C, $m_s=447\text{kg}$)

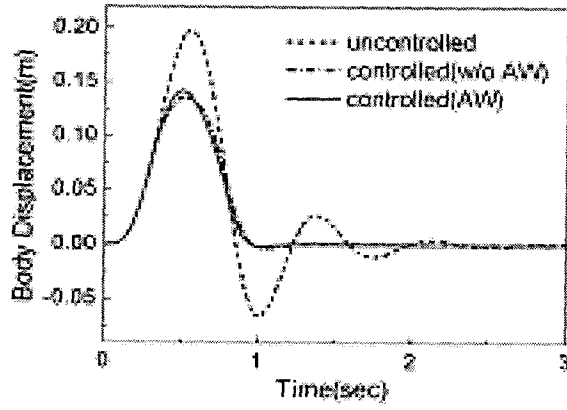


Fig. 3-3-17 Body displacement

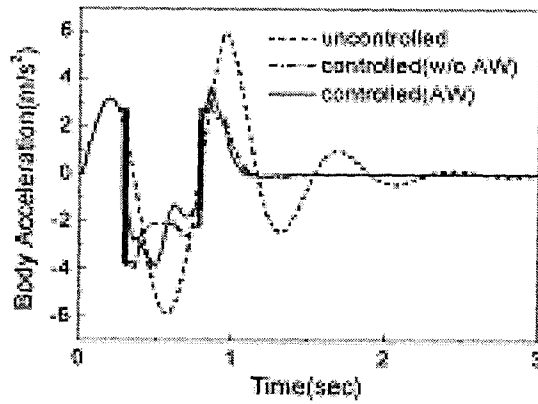


Fig. 3-3-18 Body acceleration

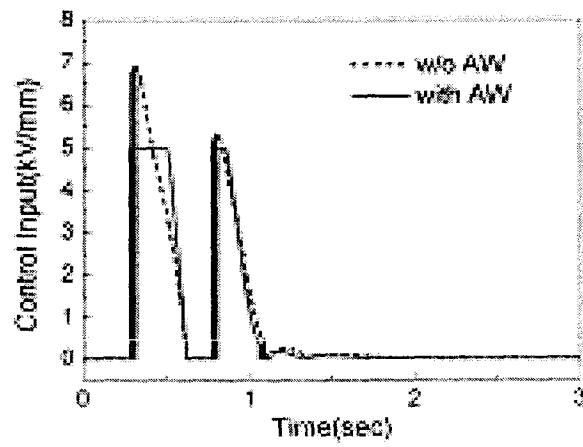


Fig. 3-3-19 Control input

제4절 차량용 ER 응용장치 설계 프로그램 개발

차량용 ER 응용장치들은 그 동안 많은 연구들이 진행되어 왔다. 특히, ER 유체 자체의 특성연구, ER 응용장치의 해석 및 평가 방법, 해당 응용장치의 제어기법 연구 등에서는 괄목할만한 연구가 진행되어 왔으며 몇몇 응용장치들의 경우 실용화를 앞두고 있다. 그러나 해당 응용장치의 설계변수 결정 및 설계기법 등에 관한 연구는 미진하였으며, 이미 제작된 응용장치에 대한 여러 가지 실험 데이터를 토대로 경험적인 설계가 이루어져 왔다. 이처럼 해당 응용장치의 설계가 경험적, 실험적으로만 이루어질 경우 해당 장치의 요구 성능을 보장할 수 없으며 최악의 경우 응용장치를 다시 설계하게 됨으로써 재원과 시간의 낭비가 필연적으로 발생하였다.

따라서 본 연구에서는 핵심적인 차량용 ER 응용장치인 ER 속업소버, ER 시트댐퍼, ER 엔진마운트, ER ABS에 대하여 설계자로 하여금 각종 설계 변수에 대한 ER 응용장치의 성능을 쉽게 확인할 수 있도록 하여 ER 응용장치의 효율적인 설계가 이루어지도록 하는 차량용 ER 응용장치 전용 설계프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 설계자가 전극 길이, 전극 간격 등과 같은 ER 응용장치 전용의 설계변수와 해당 응용장치의 설계에 필요한 일반적인 설계변수를 입력하면 이를 응용장치의 동적 모델링과 연계시켜 응용장치의 성능을 도시하도록 설계되었다. 따라서 설계자는 도시된 ER 응용장치의 성능곡선을 이용하여 해당 응용장치가 요구 성능을 만족하는가를 바로 확인할 수 있으므로 설계된 변수들의 적합성을 즉각 파악할 수 있다. 이러한 피드백 개념의 ER 응용장치의 설계과정은 설계자로 하여금 해당 응용장치가 최상의 성능을 발휘할 수 있도록 설계변수를 결정하도록 유도함으로써 최적화 된 ER 응용장치를 설계할 수 있도록 하여, 궁극적으로 기존의 경험적, 실험적으로 얻어진 설계변수들에 비해 정확하고 시간 및 재원의 낭비를 줄일 수 있도록 한다. 또한 본 프로그램은 각각의 차량용 ER 응용장치를 하나의 프로그램에 통합함으로써 설계자의 편의성 및 설계의 효율성을 증대시킬 수 있도록 하였다.

1. 프로그램 Layout

본 연구에서 개발된 설계 프로그램의 모든 환경은 GUI(graph user interface) 환경으로 구성되어 설계자에게 보다 효율적인 설계환경을 제공하도록 하였다. Fig. 3-4-1은 개발된 설계 프로그램의 초기 실행 화면을 나타낸 것이다. 전체 프로그램은 ER 속업소버, ER 시트댐퍼, ER 엔진마운트, ER ABS 각각에 해당되는 4개의 프로그램 모듈로 이루어져 있으며, 초기화면으로부터 설계자는 개발 프로그램에 대한 간단한 정보와 함께 원하는 응용장치를 선택할 수 있다. Fig. 3-4-2는 개발된 프로그램을 이용하여 설계자가 어떠한 설계 흐름을 가지고 해당 ER 응용장치가 원하는 성능을 가지도록 하는가를 나타낸 흐름도이다. 각각의 응용장치 설계모듈은 크게 설계변수 입력요소, 수학적/동적 모델요소, 성능평가요소로 나누어져 있다. 설계변수 입력요소는 Fig. 3-4-2로부터 알 수 있듯이 응용장치 설

계변수, ER 유체의 Bingham 특성 값, 성능평가 조건을 포함하며, 각각의 응용장치에 적합하도록 특성화되어 있다. 수학적/동적 모델요소는 Fig. 3-4-2와 같이 응용장치 모델(device model), 제어기 모델(control model), 차량 모델(vehicle model)로서 주어진 설계 변수 값을 이용하여 응용장치의 성능치를 계산하게 된다. 응용장치 모델은 해당 응용장치의 수학적 모델링으로부터 얻어진 동적 지배 방정식 구성되어 있으며, 차량모델은 해당 응용장치가 실제 차량에 장착되었을 때의 모델링을 포함하게 된다. 또한, 차량에 장착된 응용장치의 제어 성능을 확인하기 위하여 해당 응용장치마다 적절한 제어가 프로그램 되어 있다. 해당 응용장치 모델에 대한 특성화된 차량 및 제어기 모델은 Fig. 3-4-2에 응용장치별로 나타내었다. Fig. 3-4-2를 이용하여 ER 응용장치의 설계과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 먼저 사용자는 프로그램 시작과 함께 설계 응용장치를 선택하게 된다. 이후 설계자는 응용장치의 적용 대상 조건을 선정하게 되는데, 이로부터 응용장치의 설계 변수에 구속조건이 부과된다. 즉, 적용 대상 차량이 소형차인지 중형차인지에 따라 응용장치의 크기, 형태 등이 구속받게 된다. 설계 구속 조건을 만족시키면서 나머지 설계 변수를 조절함에 따라 프로그램은 응용장치의 성능변화를 계산하고, 설계자의 선택에 따라 적당한 성능곡선을 도출한다. 주어진 설계변수 변동에 대한 응용장치의 성능 변화는 각각의 응용장치의 특성에 따라 적절하게 표현할 수 있는 성능지표(performance index)로 출력된다. 이때 성능지표는 여러 가지 포맷으로 도출되는데 이것은 설계자가 성능변화를 쉽게 파악할 수 있도록 한다. 예를 들면, ER 속업소버의 경우 전기장 변화에 따른 발생 댐핑력이 중요한 성능지표가 되며 설계자의 선택에 따라 시간영역, 변위영역, 속도영역에서 도출된다. 이로부터 설계자는 응용장치의 구속조건을 만족하면서도 요구 성능을 만족하는지를 쉽게 판단할 수 있게 된다. 만약 요구 성능을 만족하지 않으면 설계 변수를 조절하게 되고 성능곡선은 즉각적으로 도출됨으로써 요구 성능을 만족시키는 응용장치의 설계변수 값을 얻게 된다. 응용장치의 성능이 일단 만족되면 모든 설계 변수 데이터는 해당 차량모델로 로드되며 차량모델은 해당 응용장치가 실제 차량에 장착되었을 때 만족할만한 성능을 나타내는지 확인할 수 있다. 이때 해당 프로그램 모듈이 가지고 있는 제어기 모델의 제어 계인을 조절함으로써 설계자는 차량모델의 제어성능을 평가하게 된다. 만약 제어 계인의 조절로 원하는 차량모델의 제어성능을 얻지 못한다면 이는 결국 설계된 응용장치의 성능이 해당 차량모델에는 적절치 못하다는 것을 의미하므로 설계과정은 응용장치의 설계로 다시 피드백되게 되며, 궁극적으로 실제 차량에 적합한 ER 응용장치를 설계하게 된다. 이러한 피드백 개념의 설계방법은 설계자에게 설계의 편이성을 제공함은 물론 설계변수 값에 의한 성능변화의 경향을 쉽게 파악 가능하도록 하여 중요 설계의 용이성을 제공하게 된다.

현재 프로그램은 각각의 ER 응용장치의 성능지수를 이용하여 응용장치 단품에 대한 설계가 가능하도록 완료되었으며, 차량모델과 제어기 모델을 연계하여 개발이 완료단계에 있다.

2. ER 속업소버(ER 시트댐퍼) 설계 Module

개별 ER응용장치 중 ER 속 업소버와 ER 시트 댐퍼의 경우 응용장치 단품에 대한 설계 프로그램은 매우 유사하게 구상되어 있으므로 ER 속업소버에 대해서만 설명한다. Fig. 3-4-3은 본 ER 속 댐퍼 설계 프로그램에서 고려한 댐퍼의 개략도를 나타낸 것으로서 내측전극과 외측전극사이의 ER 덕트(duct)를 흐르는 ER 유체에 제어 전기장을 가함으로써 댐핑력을 제어할 수 있도록 구성되어 있다. 전기장을 변화시키면 ER 덕트를 흐르는 유체가 젤(gel)과 같은 형태로 변화하면서 유로 양단의 압력 차가 발생하게 되며, 이때 ER의 특성을 변화시키기 위한 전압은 플러그를 통해 전극에 인가된다. ER 속 댐퍼에 장착되어 있는 가스 챔버는 피스톤 운동에 의해 댐퍼 내부로 진입하는 피스톤 로드, 또는 온도변화에 의한 부피변화, 급격한 피스톤 운동의 변화에 따른 기포형성을 방지하는 역할을 한다. 가스 챔버는 다이어프램에 의해 유체와 구분되어지며 내부는 질소 가스에 의해 충전되어 있다. ER 유체는 전기장의 변화에 대해 수밀리초(msec)의 빠른 반응속도를 가지므로 제어성이 우수하며, 이를 이용한 ER 속 댐퍼는 전기장을 연속적으로 변화 시킬 수 있으므로 진동 절연에 필요한 요구 댐핑력을 발생시키게 된다. 전기장인가에 의해 ER 댐퍼에서 발생하는 전체 댐핑력은 식 (3-4-1)과 같다. 이때 ER유체는 비 압축성으로 가정하였으며 관심 작동 주파수를 고려하여 유체 관성은 무시하였다[98].

$$F_e = \frac{(\pi R_r)^2}{C_g} x_p + \pi^2 (R_p^2 - R_r^2)^2 R_e \dot{x}_p + \pi (R_p^2 - R_r^2) P_{ER} \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3-4-1)$$

위 식에서 첫째 항은 가스챔버에 의한 힘, 두 번째 항은 ER유체의 점성에 의한 댐핑력에 관계된다. 마지막 항은 전기장이 인가된 상태에서 ER유체에 의해 얻어지는 댐핑력으로서 α 와 β 값은 병행특성 실험을 통하여 얻어지는 실험값이다. 식(3-4-1)에서 모든 변수값은 ER유체 자체의 특성 값과 속업소버의 기하학적 변수 값에 의존하므로 설계자는 설계변수 값을 변화시켜 원하는 댐핑력을 가지는 ER 속업소버를 설계할 수 있다. 즉, 본 프로그램 모듈에서는 ER 속업소버가 요구 댐핑력을 충족하도록 설계하기 위해서 Table 3-4-1과 같이 ER 속업소버의 설계변수, ER 유체자체의 고유 특성 값, 측정 실험조건 의 3가지 설계 조건을 입력하도록 되어 있다. 각각의 입력조건은 일반적으로 ER 속업소버에 적용되는 승용차의 조건에 좌우된다. 즉, 적용 대상 승용차에 따라 속업소버의 크기, 요구 최대 댐핑력, 실험 조건 등이 달라지게 된다. 이때 설계된 ER 속 업소버가 실제 상용 차량에 장착되기 위해서는 전극의 길이와 지름이 제약받게 되는데 이것은 설계 제약 조건으로 작용하게 된다. 설계자는 이를 고려하여 나머지 설계변수 값을 조절함으로써 원하는 댐핑력을 갖도록 설계하게 된다. Fig. 3-4-4는 개발된 ER 속업소버 설계 프로그램 모듈을 나타낸 것이다. Table 3-4-1과 같이 세 가지 조건의 변수 입력이 가능하며, 설계자가 새로운 설계값을 입력하면 프로그램은 그에 해당하는 댐핑력 곡선을 실시간으로 출력하게 된다. 이때 만약 도시된 댐핑력의 크기가 요구 댐핑력을 만족시키지 못하면 설계자는 단순히 입력 값을 조절하게 된다. 또한 전기장 변화에 따른 댐핑력의 변화는 세 가지 관심영역에서 출력되게 된다. 즉, 프로그램의 설계자는 Fig. 3-4-4와 같이 "optional output tab"

을 이용하여 댐핑력 변화를 시간영역, 변위영역, 속도영역에서 확인함으로써 설계된 ER 속업소버의 성능 변화를 쉽게 파악할 수 있다. Fig. 3-4-4(a)는 시간영역에서 Fig. 3-4-4(b)는 변위영역에서 댐핑력 변화를 출력한 것이다.

본 프로그램에서는 Table 3-4-1과 같이 중용 승용차에 적용하는 ER 속업소버의 기본 설계 값이 입력되어 있다. 여기서 전극의 길이 및 피스톤 헤드의 반지름 값은 댐퍼의 길이와 지름의 값을 고려하여 각각 구속된 값을 가지도록 하였으며, 4kV/mm의 최대 전기장에 대해서 약 1,000N의 최대 댐핑력이 발생되도록 하였다. 이는 Fig. 3-4-4(a)로부터 확인할 수 있다. 댐핑력 측정 실험 조건 또한 일반적인 중용 승용차의 공진 모드를 기준으로 하였으며, ER 유체의 특성을 나타내는 α 와 β 값은 본 연구실에서 개발한 ER유체에 대한 빙햄 특성 실험을 통하여 얻은 값을 사용하였다. 또한, 나머지 중요 설계 값을 Table 3-4-1에 나타내었다.

3. ER 엔진마운트 설계 Module

승용차의 엔진의 구동에 의해 발생하는 진동과 소음의 경우, 가진 진폭이 큰 저주파수 영역의 가진을 포함하고 있어 차체로 전달되는 충격력이 크므로 승차감에 큰 영향을 주게 된다. 또한 고주파수 영역의 가진은 주로 소음문제를 유발시킨다. 따라서 엔진마운트의 성능조건은 주파수 대역에 따라 달라지므로, 기존의 고무 엔진마운트나 유체봉입 마운트로서는 가진의 절연에 한계가 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 ER유체를 이용한 엔진 마운트에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 엔진마운트는 적용 대상 특성상 ER 속업소버 등과 비교하여 상대적으로 전극 길이와 작동 변위가 매우 짧으며 이에 비하여 요구 댐핑력은 큰 편이다. 따라서 일반적으로 복수개의 전극을 사용한다. Fig. 3-4-5(a)와 (b)는 각각 ER 엔진마운트 설계프로그램에서 고려한 유동모드(flow-mode) 형태와 복합모드(mixed-mode) 형태의 엔진마운트의 개략도이다. ER 유체는 전극에 의해 상부챔버와 하부챔버로 나누어지며 엔진질량을 지지하는 고무커버와 ER 유체를 충전하는 다이어프램이 장착되어 있다. ER 엔진마운트 해석은 일반적으로 고무커버와 다이어프램의 컴플라이언스를 고려하여 유체역학적 모델을 사용한다. 이때 ER 유체는 비압축성으로 가정하며 전기장 증가에 따른 항복응역 모델은 빙햄 모델을 사용하였으며, ER 유체의 시간응답은 매우 빠르기 때문에 이에 대한 동적 모델은 고려하지 않았다. 따라서 Fig. 3-4-5(a)와 (b)의 유체 역학적 지배방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.[99, 100]

$$M\ddot{z}_d + (k_R + k_1)(z_d - z_e) + (c_R + c_1)(\dot{z}_d - \dot{z}_e) + 2\left(\frac{A_p C_2}{C_1 + C_2}\right) \frac{L_e}{h} \tau_{yf} \operatorname{sgn}(\dot{z}_d - \dot{z}_e) = 0 \quad (3-4-2)$$

$$M\ddot{z}_d + (k_R + k_1)(z_d - z_e) + (c_R + c_s + c_1 - c_2)(\dot{z}_d - \dot{z}_e) + \left[A_e \tau_{ys} + 2\left(\frac{A_p C_2}{C_1 + C_2}\right) \frac{L_e}{h} \tau_{yf} \right] \operatorname{sgn}(\dot{z}_d - \dot{z}_e) \quad (3-4-3)$$

$$k_1 \equiv \frac{A_p^2}{C_1 + C_2}, \quad c_1 = \left(\frac{A_p C_2}{C_1 + C_2}\right)^2 R_f, \quad c_2 \equiv \frac{A_p A_s C_2}{C_1 + C_2} R_f, \quad c_s = A_e \eta \frac{\dot{z}_e}{h}$$

여기서 k_R 와 c_R 는 각각 고무커버의 강성계수와 댐핑계수를 나타내며, C_1 과 C_2 는 고무커버와 다이어프램의 컴플라이언스이다. 또한, τ_{ys} 와 τ_{yf} 는 각각 전단모드와 유동모드에 의해 발생하는 항복응력을 나타낸다.

ER 엔진 마운트의 설계를 위한 입력 변수들은 Table 3-4-2와 같다. 유동모드와 복합모드의 마운트에서, 마운트 자체의 변위가 전극길이에 비해 작다면 복합모드의 전극의 길이는 일정한 값을 가지는 것으로 가정할 수 있으며 따라서 Table 3-4-2와 같이 두 개의 모델에 대해 같은 설계변수 값을 입력할 수 있다. 각각의 입력조건은 일반적으로 ER 엔진 마운트가 적용되는 승용차의 조건에 좌우된다. 또한 설계조건을 고려하여 유동모드와 복합모드형태의 마운트를 선택하고 나머지 설계변수 값을 조절함으로써 원하는 성능을 가지는 ER 엔진마운트를 설계하게 된다. Fig. 3-4-6은 개발된 ER 엔진마운트 설계 프로그램 모듈을 나타낸 것으로서 유동모드 형태의 엔진 마운트에 대한 설계 화면이다. 먼저 설계자는 입력된 설계변수에 대한 엔진마운트의 댐핑력을 시간영역에서 전기장에 따라 파악하게 된다. 이후 최대 댐핑력이 요구 성능을 만족한다면 Fig. 3-4-6(a)의 'Optional Output Tab'을 이용하여 Fig. 3-4-6(b)와 같이 ER 엔진 마운트가 1자유도 시스템에 대한 변위 전달율을 전기장에 따라 관찰하게 된다. 만약 최대 전기장에 대한 전달율이 원하는 성능을 나타내지 못하면 설계변수를 조절함으로써 결국 원하는 전달율을 가지는 ER 엔진 마운트를 설계할 수 있다.

4. ER ABS 설계 Module

Fig. 3-4-7은 ER ABS 성능평가 프로그램에서 적용한 ER ABS 시스템의 개략도이다. Fig. 3-4-7에서 볼 수 있듯이 ER ABS는 크게 마스터 실린더, 브레이크 실린더, 그리고 기존의 솔레노이드 밸브로 구성된 hydraulic unit의 기능을 하는 ER 밸브와 압력 부스터로 구성된 pressure modulator로 구성되어 있다. 마스터 실린더와 브레이크 실린더는 중형급 승용차에 적합하도록 구성하였다. 작동 원리를 간단히 설명하면 다음과 같다. 우선 브레이크 페달을 밟게되면 마스터 실린더에서의 압력이 상승하게 되고 초기에 이 압력은 브레이크 실린더에 곧바로 전달된다. 이렇게 형성된 브레이크 실린더 압력에 의해 휠에 브레이크 토크를 발생시켜 준다. 이때 과도한 슬립이 일어나게 되면 브레이크 실린더의 압력을 낮추어 주어야 하는데 이러한 역할을 pressure modulator에서 담당하게 된다. Fig. 3-4-7에서 알 수 있듯이 우선 ER 밸브에 가해지는 전기장에 의해 우측 실린더에 압력 차이를 발생시키게 되고, 이 압력 차는 실린더 로드를 통하여 좌측 실린더 압력 P_1 을 낮추게 된다. P_1 의 압력이 낮아지면 브레이크 실린더의 압력도 자연스럽게 낮아진다. 이와 반대로 우측 실린더에서 생성되는 힘을 빼주면 P_1 의 압력은 상승한다. 이러한 원리로 브레이크 실린더의 압력을 제어하여 결국 최적의 슬립율을 유지할 수 있게 된다. 이때 브레이크 실린더에서의 압력 변화에 대한 동적 방정식은 아래와 같이 나타내어진다.

$$R_1 C_1 \dot{P}_b = P_1 - P_b \quad (3-4-4)$$

여기서 P_b 는 브레이크 실린더에서의 압력이며 R_1 은 유체 점성에 의한 저항과 관련된 계수이고 C_1 은 유체 체적 탄성과 관련된 계수이다. 또한 압력 부스터에서의 압력 변화량은 아래와 같이 나타내어진다.

$$\gamma \Delta P = P_1 - P_2 \quad (3-4-5)$$

$$\gamma \Delta P = 2 \Delta P_1$$

여기서 $\gamma = A_3/A_1$ 로서 단면적의 비를 나타낸다. 이때 양쪽 실린더의 피스톤 단면적의 비에 따라 압력 증폭 비율이 결정되어짐을 알 수 있다. 이때 ΔP 는 ER 밸브에 의해 생성된 피스톤 양쪽 챔버의 압력 차를 나타낸다. 다음으로 ER 밸브에서 인가된 전기장에 의해 발생된 압력차와 이로 인해 생성된 우측 실린더 양쪽 챔버에서의 압력차의 관계를 정리해보면 다음과 같다.[101]

$$\tau_v \Delta \dot{P} = -\Delta P + \Delta P_{ER} \quad (3-4-6)$$

$$\tau_v = \frac{R_3 C_3}{2}, \quad \Delta P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta$$

결국, 식 (3-4-4)~(3-4-6)으로부터 전체 브레이크 시스템의 전달함수를 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_b}{U} = \frac{\gamma}{\tau_v R_1 C_1 s^2 + (\tau_v + R_1 C_1) s + 1}, \quad U = \Delta P_{ER} \quad (3-4-7)$$

따라서 ER ABS 성능평가 프로그램 모듈은 Fig. 3-4-7과 시스템의 전달함수 식(3-4-6)을 구성하는 설계변수들의 값을 조절함으로써 ER ABS로서의 성능을 검증할 수 있도록 하였다. Table 3-4-3은 이러한 설계 변수 값들을 나타내고 있으며, 이러한 기본 설계 변수 값을 바탕으로 여러 가지 다양한 변수 값을 설정함으로써 ABS의 성능을 예측할 수 있게 된다. 이러한 예측을 바탕으로 다양한 결과를 비교 분석하여 요구되어지는 설계변수 값을 결정할 수 있게 된다.

Fig. 3-4-8은 ER ABS 성능평가 프로그램 모듈 화면과 실행 예를 나타낸 것이다. 좌측상단 첫 번째 pressure drop을 선택하면 ER 밸브자체에서 형성된 압력 차를 알 수 있고 두 번째 brake pressure를 선택하면 ER 밸브에 의해 형성된 압력이 압력 부스터에서 증폭되어 초기 브레이크 압력을 감압시킨 결과를 알 수 있다. 마지막으로 bode plot을 선택하면 전체 시스템의 압력 조절 대역폭을 알 수 있게 된다. 이때 입력 변수는 크게 ER 유체 고유 특성값, ER 밸브 설계 변수 그리고 압력 증폭비로 나뉘어 진다. 우선 실제 실험과 시뮬레이션을 비교 평가해보기 위해 실제 실험장치에 설계된 변수값을 입력하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 입력 변수 값들은 다음과 같다. ER 밸브 설계 변수로서 전극의

길이는 26cm, 전극 간격은 1mm로 입력하였으며 ER 유체의 특성을 나타내는 α 와 β 값은 각각 312, 1.313, 점도는 0.09, 그리고 압력 증폭비는 2로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 시뮬레이션 결과와 실제 실험결과가 거의 유사함을 확인하였다. 이러한 결과로부터 실제 ER ABS 설계시 여러 가지 설계 조건의 변화에 따른 성능을 미리 테스트 해봄으로써 원하는 설계 변수를 도출할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 과정을 통해 여러 설계 변수에 대한 성능을 검증한 후 이를 바탕으로 실제 시스템을 설계하는데 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 3-4-1 Design and default input values of the ER shock absorber design program

Design Inputs	Input Parameters		Values(default)
Device Variables	Piston Radius (R_p)		0.015
	Piston Rod Radius (R_r)		0.00625
	Electrode Length (L)		0.23
	Electrode Gap (h)		0.001
	Gas Chamber Volume (V_0)		1.096e-5
	Gas Chamber Pressure (P_0)		25bar
ER Properties	Bingham Model	Alpha (α)	312
		Beta (β)	1.313
	Viscosity (η)		0.09
Test Conditions	Excitation Amplitude (x_p)		0.02 m
	Excitation Frequency (f)		1.4 Hz
	Applied Voltage (E)		0~5 kV/mm

Table 3-4-2 Design and default input values of the ER engine mount design program

Design Inputs	Input Parameters		Values(default)
Device Variables	Electrode Length (L)		0.04m
	Electrode Gap (h)		0.0015m
	Number of Electrode(n)		2
	Inner Radius(r)		0.03m
	Main Rubber Compliance (C_1)		4e-11
	Diaphragm Compliance (C_2)		2e-10
	Main Rubber Stiffness (k_R)		286613N/m
	Main Rubber Damping (c_R)		1080Ns/m
Effective Engine Mass (M)		60kg	
ER Properties	Bingham Model	Alpha (α)	312
		Beta (β)	1.313
	Viscosity (η)		0.09
Test Conditions	Excitation Amplitude (x_p)		0.001 m
	Excitation Frequency (f)		0~40 Hz
	Applied Voltage (E)		0~5 kV/mm

Table 3-4-3 Design inputs and default input values of the ER ABS design program

Design Inputs	Input Parameters		Values(default)
Device Variables	Electrode Length (L)		0.26
	Electrode Gap (h)		0.001
	Area Ratio(A_3/A_1)		2
ER Properties	Bingham Model	Alpha (α)	312
		Beta (β)	1.313
	Viscosity (η)		0.09
Test Conditions	Initial Pressure (P_b)		80 bar
	Applied Voltage (E)		0~5 kV/mm

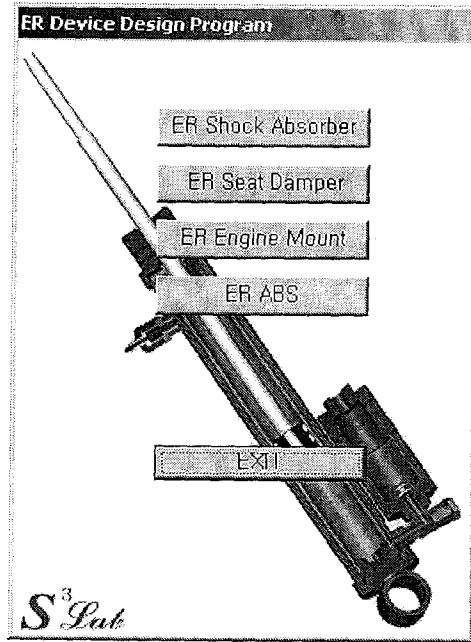


Fig. 3-4-1 Initial view of the developed program

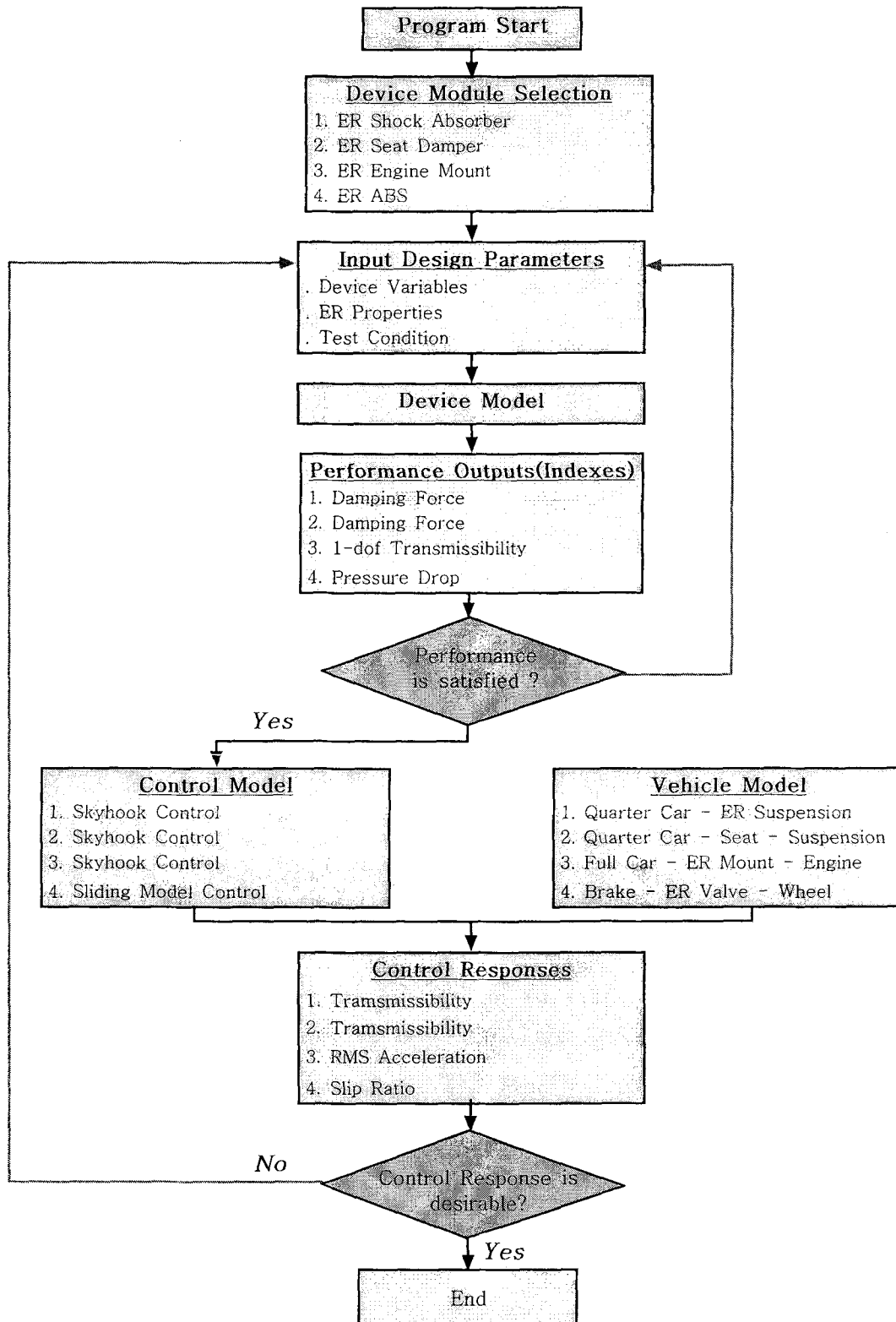


Fig. 3-4-2 Overall design flow of the developed ER device design program

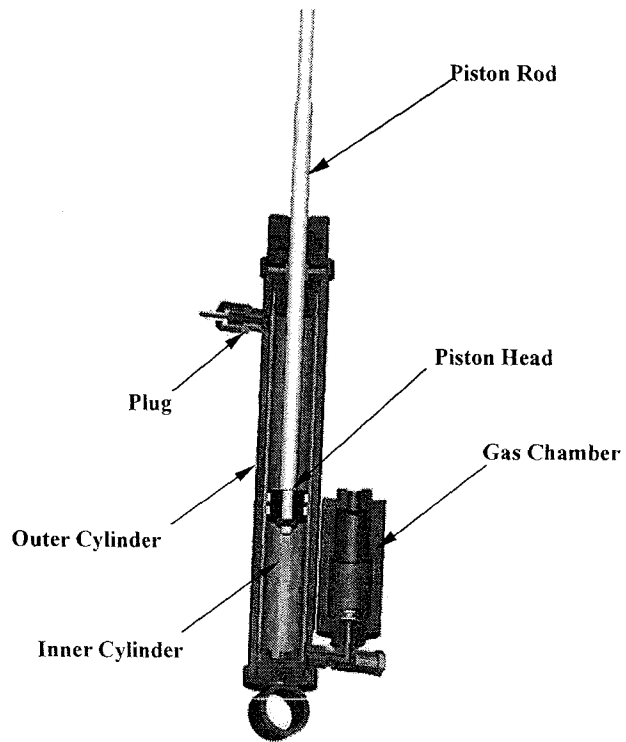
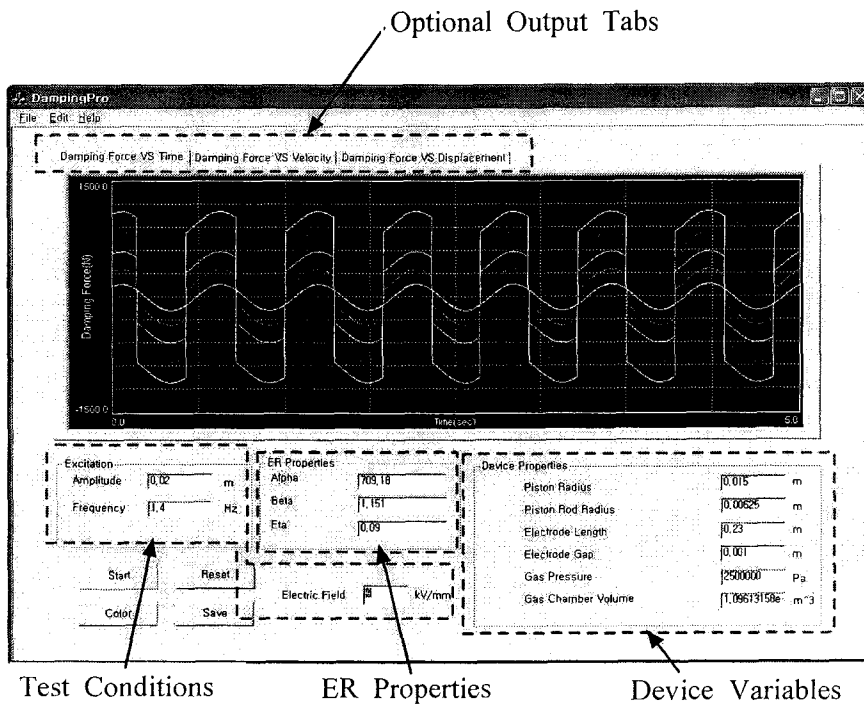
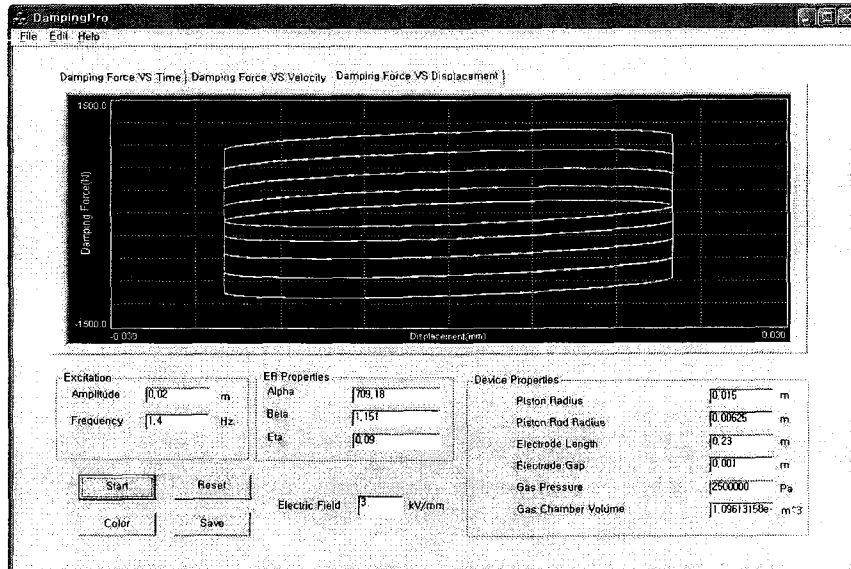


Fig. 3-4-3 Schematic diagram of the ER shock absorber model

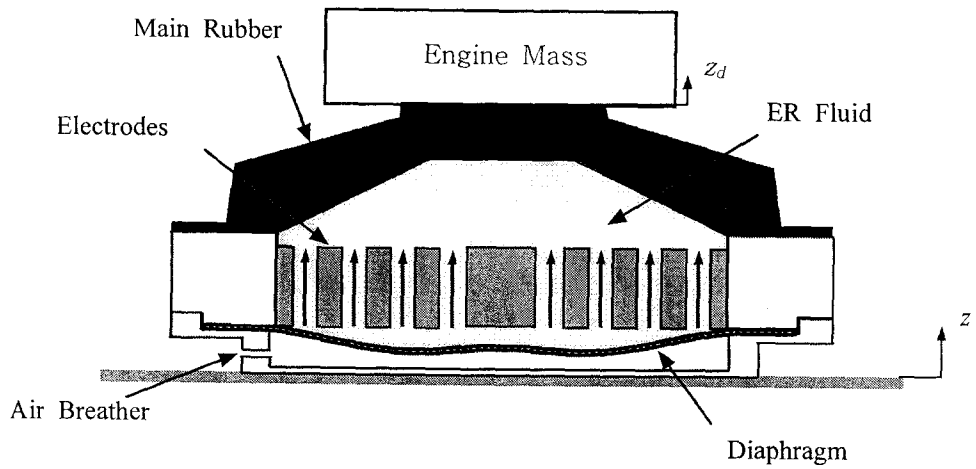


(a) damping force vs. time

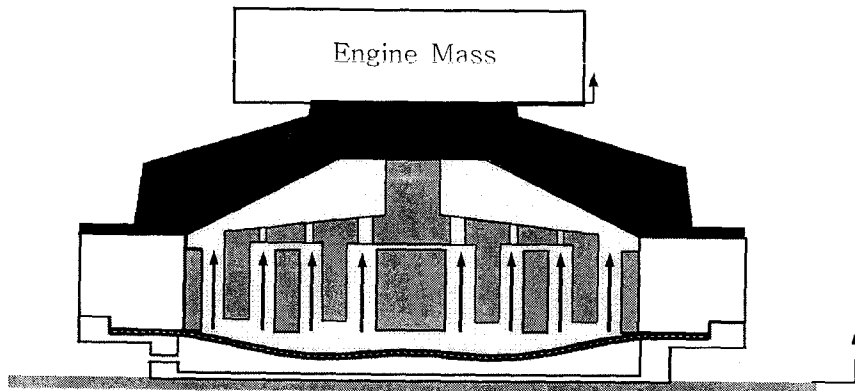


(b) damping force vs. displacement

Fig. 3-4-4 Window view of the ER shock absorber design program module



(a) flow-mode type



(b) mixed-mode type

Fig. 3-4-5 Schematic diagrams of the ER engine mounts

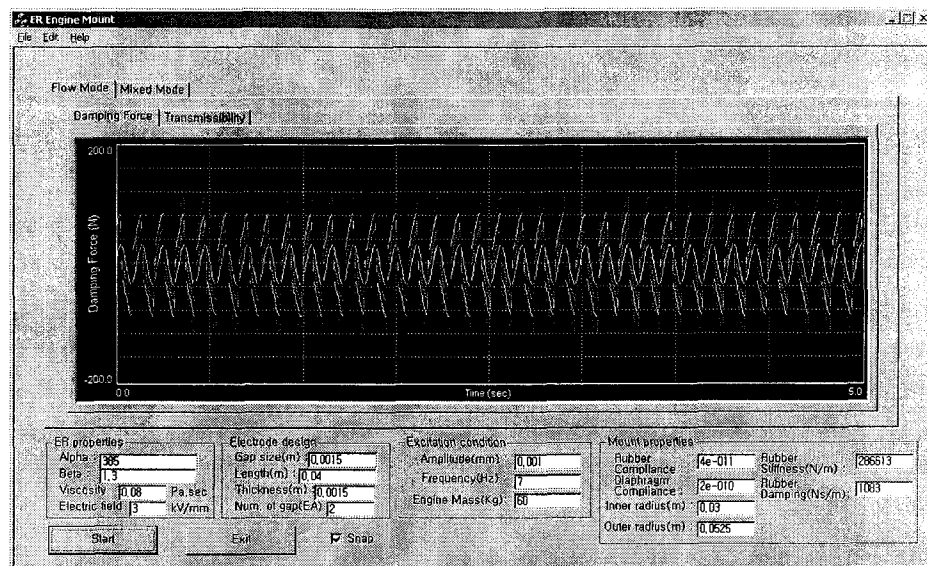
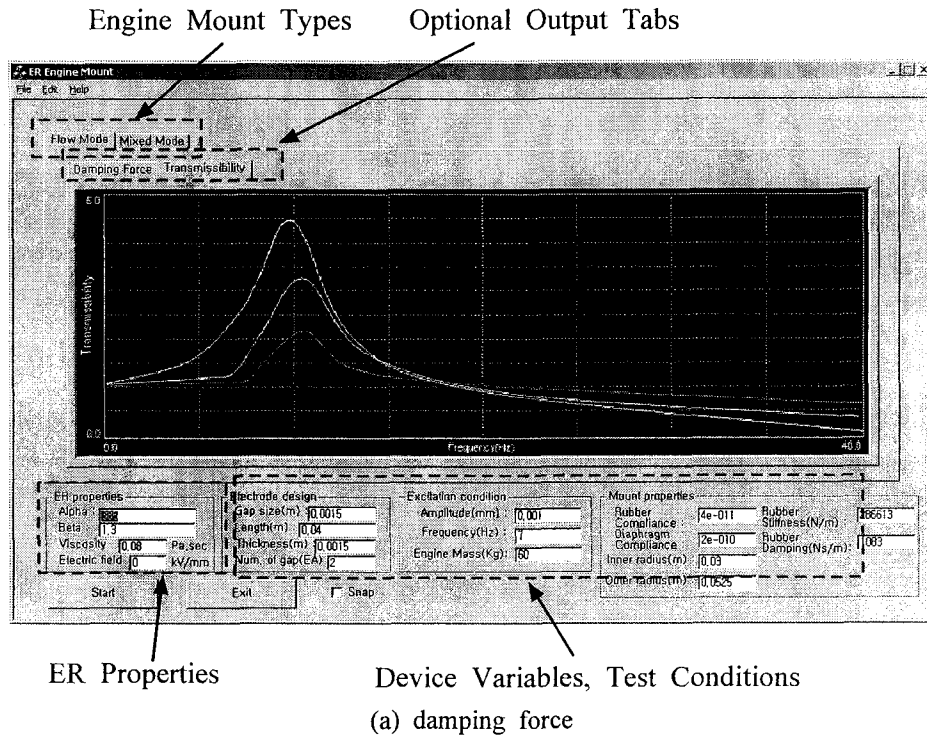


Fig. 3-4-6 Window view of the flow-mode ER engine mount design program module

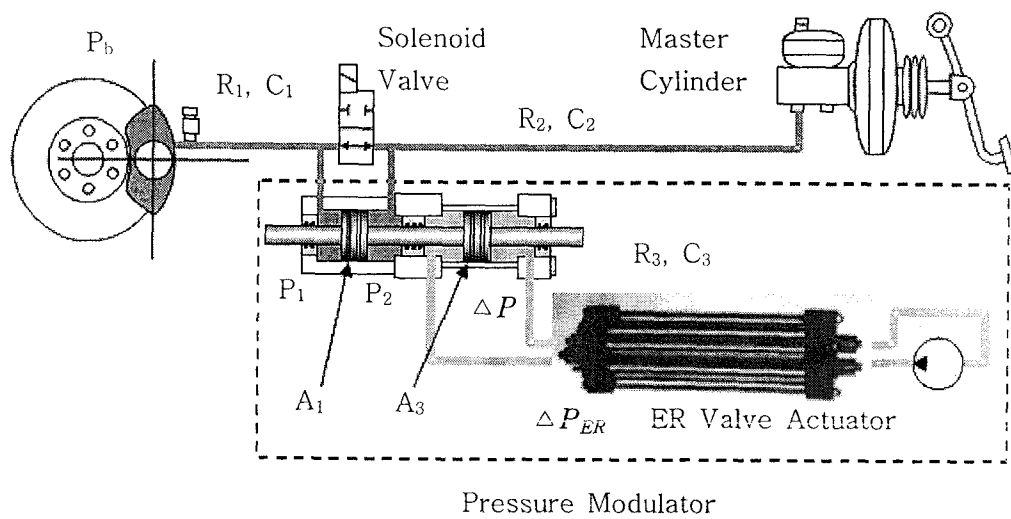
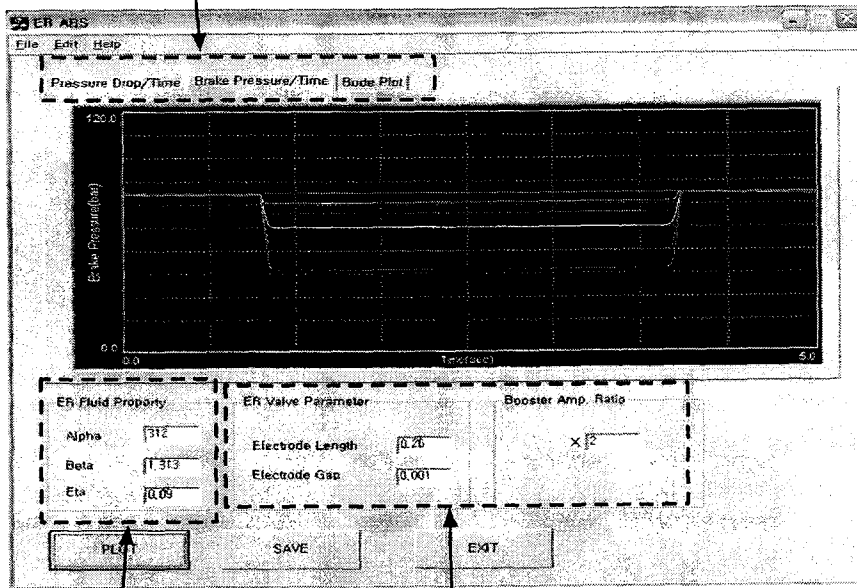


Fig. 3-4-7 Schematic diagram of the proposed ER ABS system

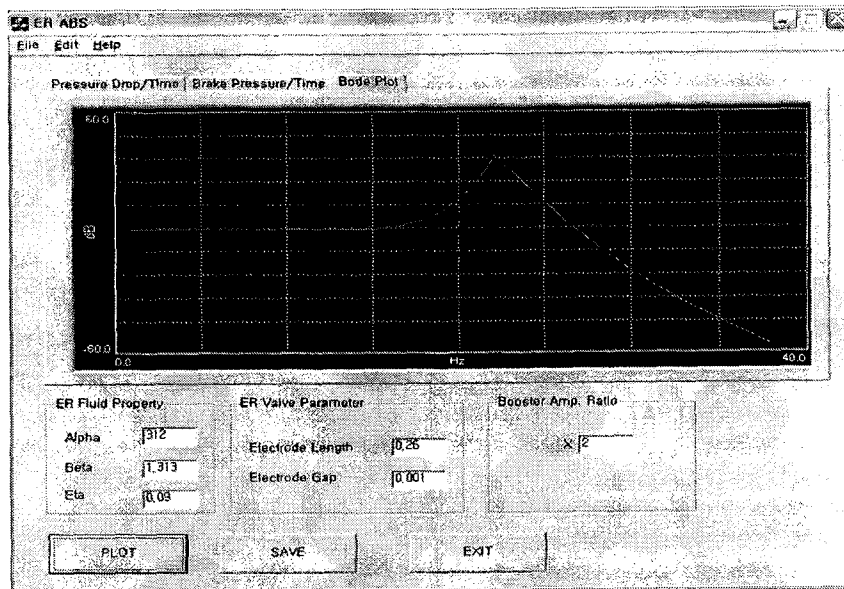
Optional Output Tabs



ER Properties

Device Variables

(a) brake pressure vs. time



(b) bode plot

Fig. 3-4-8 Window view of the ER ABS design program

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제1절 계획대비 달성도

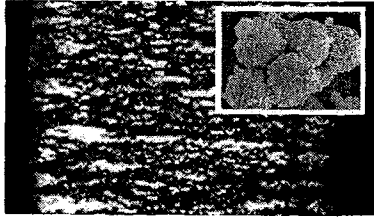
1. 계획대비 달성도

번호	세부연구개발목표 (연구계획서상의 목표)	달성내용	달성도 (%)
1	<ul style="list-style-type: none"> ● ER 유체 조성 ① 항복응력 : 1.5kPa 이상 ② 온도범위 : 10~100℃ ③ 반응시간 : 5ms 미만 	<ul style="list-style-type: none"> ① 항복응력 : 1.8~2.2kPa ② 작동온도 : 10~100℃ ③ 반응시간 : 4.8msec <p>ER 유체의 항복응력은 온도에 따라 변화하며 본 연구에서는 아래와 같다.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 최저 항복응력 : 1.8kPa - 40℃ ▶ 최고 항복응력 : 2.2kPa - 100℃ 	100%
2	<ul style="list-style-type: none"> ● ER 유체의 히스테리시스 특성연구 	ER 유체의 히스테리시스 현상 규명을 위해 Preisach 모델을 개발하고 실험결과를 통해 입증	100%
	<ul style="list-style-type: none"> ● ER 응용장치의 히스테리시스 모델 구축 	ER 응용장치의 히스테리시스 현상을 규명하기 위해 Hydraulic 모델을 자체 개발하고 기존의 Bingham 모델 등과 비교	100%
	<ul style="list-style-type: none"> ● ER 응용장치의 무차원화 설계모델 구축 	ER 응용장치의 효율적인 설계를 위하여 무차원화된 일반화 모델을 도출하고 ER 응용장치의 설계에 적용한 후, 무차원 모델의 유효성을 실험으로 검증	100%
3	<ul style="list-style-type: none"> ● 불확실성을 고려한 강건 제어기 설계 	ER 응용장치가 갖는 작동기 시상수를 실험적으로 규명하고 이를 고려한 동적 모델을 구축한 후, 시상수 및 차체질량 변화 등 시스템이 갖는 불확실성을 보상하기 위한 강건제어 알고리즘을 1/4 차량을 통해 제어성능 검증	100%
	<ul style="list-style-type: none"> ● 전기장 입력 포화상태를 고려한 제어기 개발 	강건제어 알고리즘 적용시 발생할 수 있는 제어 입력포화를 방지하고 제어성능 및 안정성을 확보하기 위해 관측기 시스템에 기반한 반와인드업 제어이론을 도입하고 제어코드를 개발한 후 1/4 차량을 통해 제어 성능 검증	100%

2. 평가 착안점에 입각한 연구개발 목표의 달성도

연도	세부연구목표	평가의 착안점	자체평가
1차년도	· ER 유체 조성 항복응력 : 1.3kPa이상 온도범위 : 10~90℃	성능을 만족하는 ER 유체	항복응력 1.3kPa 이상, 작동온도 범위 10~90℃를 만족하는 폴리아닐린 ER 유체개발 (목표 100% 달성)
	· 히스테리시스 모델 구축	기존 모델과의 비교 및 실험 검증	Hydraulic 히스테리시스 모델을 구축하여 기존 모델과 성능비교를 수행하고 실험결과와의 비교를 통하여 효율성 검증 (목표 100% 달성)
	· 불확실성을 고려한 제어기 개발	시뮬레이션과 실험을 통한 성능 평가	작동기의 시상수 변수와 ER 유체의 항복응력 변화 등에 강건함을 입증 (목표 100% 달성)
2차년도	· ER 유체 조성 항복응력 : 1.5kPa이상 온도범위 : 10~100℃	성능을 만족하는 ER 유체	항복응력 1.5kPa이상, 작동온도 범위 10~100℃를 만족하는 폴리아닐린 ER 유체개발 (목표 100% 달성)
	· ER 응용장치의 무차원 설계모델 개발	실험을 통한 설계모델의 타당성 검증	제안된 무차원 모델에 근거한 ER 속 업소버 설계 및 실험을 통한 성능 검증 (목표 100% 달성)
	· 입력 포화상태를 고려한 제어기 개발	시뮬레이션과 실험을 통한 성능 평가	전기장의 포화 상태를 고려한 제어기법을 1/4 차량 모델에 적용하여 성능 평가 (목표 100% 달성)
종합	· 성능이 우수한 ER 유체 조성	성능을 만족하는 ER 유체 제시	제안된 항복응력, 온도범위, 반응시간 등의 목표를 달성하였으며 2단계 목표달성을 위한 핵심연구내용 확보
	· ER 응용장치의 히스테리시스 및 무차원 모델 구축	시뮬레이션과 실험을 통하여 구축된 모델의 유용성 검증	제안된 모델의 일반성과 유용성을 검증하였으며 이를 통해 부품 모듈화 설계가 가능할 것으로 확신
	· 시스템 불확실성과 입력 포화를 고려한 강건 제어기법 개발	1/4 차량 모델에 적용하여 제어 성능 평가	ER 속 업소버를 장착한 1/4 차량에 적용하여 강건 진동제어 성능을 검증하였으며 전체 차량모델에 적용할 예정임

제2절 대표적 성공사례



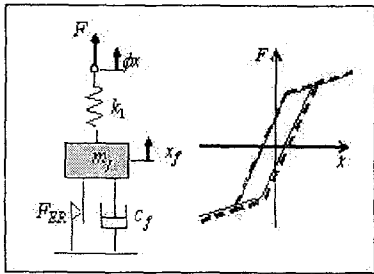
폴리아닐린이 코팅된 입자 모양 및 분산액의 ER 현상

1. 비수계 폴리아닐린 ER 유체 개발

화학적인 중합방법을 이용하여 합성한 폴리아닐린을 이용하여 제조한 ER 유체이며, 산도를 조절하여 반응시간과 항복응력을 최적으로 조절하였다. 6kV/mm까지 매우 안정적이며, 특히, ER 특성이 10°C에서 100°C까지 1.8~2.2kPa 영역으로 일정하게 유지되었다. 이러한 높은 온도 안정성은 현재 상업화된 ER 유체에서는 아직 보고된 예가 없는 뛰어난 성능이다.

* 결과 : 특허 1건 출원 및 SCI 논문 1편 게재

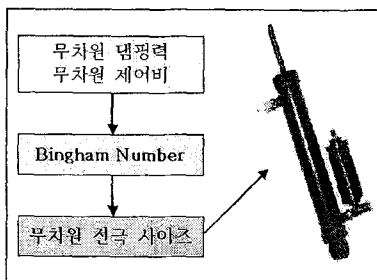
2. Hydraulic 히스테리시스 모델 개발



ER 속업소버의 각 챔버에서의 압력, 이너턴스, 유동저항, 컴플라이언스를 각 챔버간의 압력강하량과 연속방정식에 적용하면, 유체관성, 댐핑, 컴플라이언스, ER 효과에 의한 압력으로 구성된 2차 미분방정식으로 표현되는 Hydraulic 모델이 얻어진다. 이 모델을 이용하여 ER 속업소버의 히스테리시스 현상을 정교하게 묘사할 수 있으며, 각 챔버에서의 유체요소가 히스테리시스에 미치는 영향도 물리적으로 해석이 가능하다.

* 결과 : SCI 논문 1편 게재

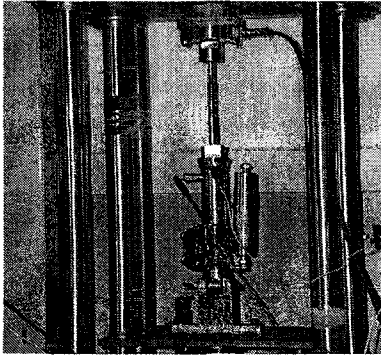
3. ER 속업소버 설계를 위한 무차원 모델 개발



댐핑력에 대한 무차원수와 제어 수행시 요구댐핑력/전기장 무부하시 기본댐핑력에 대한 무차원수를 표현하는 무차원식을 개발하였으며, 두 무차원식은 ER 효과를 나타내는 Bingham number와 전극설계조건을 나타내는 기하학적 무차원변수로 구성되어 있다. 이 무차원화된 일반화 모델을 이용하여 ER 유체의 특성과 진동제어 성능이 고려된 다양한 사이즈의 차량용 ER 속업소버를 효과적으로 설계할 수 있다.

* 결과 : SCI 논문 1편 투고(심사중)

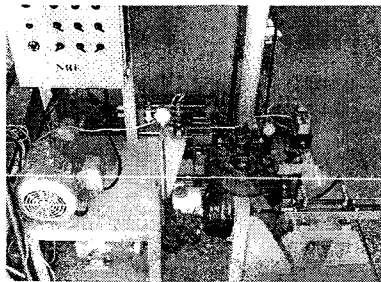
4. 시스템 불확실성을 고려한 제어기 설계



ER 응용장치는 온도변화 뿐 아니라 시상수, 차량 무게 등 각종 외란에 대해 요구되는 ER 유체의 항복응력 크기가 변화하므로 실제 차량에 ER 응용장치를 장착하여 운전하는 경우 다양한 외란에 의해 제어성능에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 이러한 ER 유체의 온도에 따른 변화 및 차량의 질량변화 등 변수변동에도 강건한 성능을 보장하기 위한 제어알고리즘을 세계최초로 개발하였다.

* 결과 : SCI 논문 3편 게재

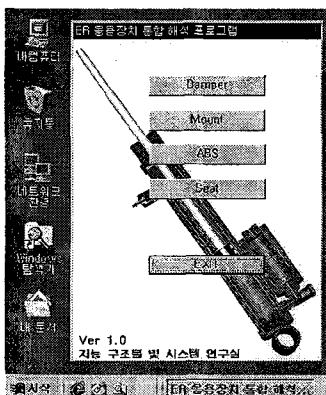
5. ER 밸브를 이용한 ABS 시스템 개발



ER 유체를 작동유체로 하는 ER 밸브를 적용한 ABS 시스템으로, 전기장에 따른 제동압력과 차륜의 슬립율을 연속적으로 제어함으로써 차량의 제동 성능과 제동시 안정성의 개선에 우수한 성능을 보일 수 있으며, 후륜의 조기 고착 방지와 효과적인 노면 이용을 위한 제동력 배분 시스템의 기능까지 수행할 수 있는 혁신적인 기술이다.

* 결과 : 특허 1건 출원 및 SCI 논문 1편 게재

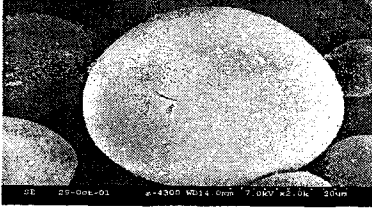
6. ER 응용장치의 설계 및 해석 프로그램 코드 개발



국가 지정 연구실인 지능구조물 및 시스템 연구실에서는 ER 응용장치의 효율적인 설계를 위하여 세계최초로 ER 응용장치 통합 해석 프로그램을 개발하였다. 이 통합 프로그램에는 차량용 댐퍼, 마운트, ABS, 시트 댐퍼 등 차량에 관련된 ER 응용장치의 해석 프로그램이 모듈화 되어 장착 되어있고 금년 하반기에는 Web 기반 서비스를 시작할 예정이다. 한편, 연구용 목적으로 본 프로그램을 사용할 경우, 지능구조물 및 시스템 연구실에 연락을 취하면 본 프로그램을 무상으로 제공받을 수 있다.

* 결과 : 프로그램 등록 추진 예정

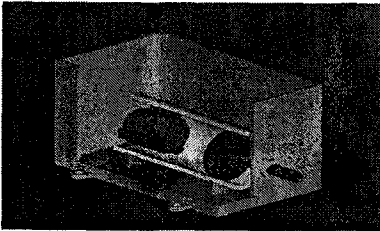
7. 인산화 전분을 이용한 ER 유체 개발



비수계 ER 유체로서 인산화 전분을 입자로 사용하는 ER 유체를 개발하였다. 수분이 전혀 포함되지 않으며 0~100°C의 온도범위에서 1kPa이상의 항복응력을 얻을 수 있다.

* 결과 : 특허 1건 출원

8. ER/MR 유체를 이용한 Linear Dynamometer 개발



삼성전자와 LG전자에서 연구/개발하고 있는 선형 압축기의 성능 파악을 위한 측정 기술의 개념 확립과 원천기술 확보를 위하여 세계 최초로 ER/MR 유체를 이용한 선형 다이내모미터를 개발하였다.

* 결과 : 특허 1건 출원

제3절 기타 계획하지 않은 연구성과

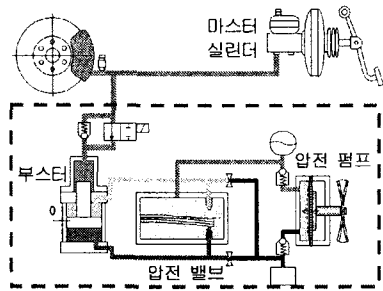


1. Carbonyl iron 입자를 이용한 MR 유체 개발 및 특성연구

Carbonyl iron을 입자로 이용하는 MR 유체를 개발하였고, 낮은 자기장 하에서의 MR 특성을 실험적으로 고찰하였다.

* 결과 : SCI 논문 1편 게재 (in press)

2. 압전 밸브를 이용한 ABS 시스템 개발



빠른 응답특성과 우수한 미소변위 분해능력을 갖는 압전 재료를 이용하여 압전 펌프 및 밸브를 제작하였으며, 압력제어와 연계된 차륜의 슬립을 제어기 설계를 통해 차량의 제동 성능과 제동시 안정성의 개선에 우수한 성능을 보일 수 있는 ABS를 개발하였다.

* 결과 : 특허 1건 출원

제4절 관련분야에의 기여도

1. ER 유체의 활용

본 연구에서 개발한 ER 유체는 비수계 ER 유체로서 기존의 수계 ER 유체(실리카겔 등)에 비하여 온도에 덜 민감하면서 저침전성을 보이고 있기 때문에 차량뿐만 아니라 항공기의 랜딩기어, 교량 댐퍼, 정밀 테이블 댐퍼 등에 활용될 수 있으며, 나아가서 초정밀 가공에도 적용될 수 있다. 본 연구에서 개발한 ER 유체를 이용하여 타 연구개발사업 및 연구활동에 활용한 사례를 요약하면 아래의 표와 같다.

제 공 기 관	연구 책임자	사 용 목 적
한국기계연구원	김선호 박사	Si Wafer 평탄화 가공에 대한 연구용
연세대학교	이상조 교수	초정밀 연마 기술개발에 관한 연구용
Sydney University	Dr. Howaard See	연구용 Polyaniline 입자제공
단국대학교	김형수 교수	연구용 샘플제공
경남대학교	한상보 교수	연구용 샘플제공
한국 중공업	김영춘 과장	ER 유체를 이용한 베어링에 관한 연구용
명지대학교	임승철 교수	ER 유체를 이용한 응용장치 연구용
고려대학교	주진수 교수	연구용 샘플제공

※ 상기 연구사업 및 연구활동을 위해 본 연구실에서 개발된 ER 유체 및 ER 입자를 무상 제공하였음.

2. 관련 기술의 일반화

본 연구의 내용 및 결과는 홈페이지를 통해 홍보함은 물론 최신의 ER 유체 관련 기술 동향 보고를 통하여 ER 관련 분야의 저변 확대는 물론 관련 기술의 일반화에 기여하였다. ER 유체 관련 기술동향 보고는 아래와 같은 매체를 통하여 이루어졌다.

활 동 내 용	일시
최승복, 임수철, "스마트 재료를 이용한 정보저장기기", 한국정밀공학회지, 제18권, 12호, pp.11~21	2001. 12
최승복, 스마트 재료 백과사전, Encyclopedia of Smart Materials, John Wiley and Sons, contributed page : 1085~1098	2002. 02
최승복, 홍성룡, 송현정, "스마트 ER 유체의 응용기술", 기계와 재료, 한국기계연구원, Vol.14, No.4, 2002. 12, pp.35~48	2002. 12
최승복, "차세대 지능 재료 시스템 기술", 기술동향 보고서, 한국과학기술평가원	2003. 05

3. 관련 기술 세미나

본 연구를 통하여 이루어진 모든 성과와 관련 기술들 그리고 세계적인 연구자들의 관련 기술 연구결과는 아래의 세미나를 통하여 관련 업계, 연구소 및 일반에게 제공되어 관련 분야의 최첨단 기술을 확산시키는 데 기여하였다.

연 사	소 속	강 연 제 목	일시
Dr. Norman M. Wereley	Prof, Department of Aerospace Engineering, University of Maryland, USA	· Modeling Issues of ER Devices · Control Issues of ER Devices	2002. 04
Dr. Kunquan Lu	Senior Researcher, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, China	· Micromechanism of ER Fluids · Properties of ER Fluids	2002. 04
최승복	인하대학교 기계공학과 교수	· ER 응용장치의 히스테리시스 모델링 기법 · 불확실성을 고려한 ER 댐퍼의 강건제어	2002. 11
최형진	인하대학교 고분자공학과 교수	· 폴리아닐린 입자 구성 무수계 ER 유체의 제조와 응답특성	2002. 11
김재환	인하대학교 기계공학과 교수	· ER 유체 구조물의 음 전달 특성	2002. 11

4. 대외 홍보

최근, 이공계 기피현상과 관련한 KBS 9시 뉴스에서 본 연구실에서 수행하고 있는 ER 속 업소버 실험장면을 방영하여 국내 관련 연구자들에게 많은 격려와 문의가 오고 있다. 2003년 4월 12일자 동아일보에는 GM대우에서 본 연구실에 연구용 승용차를 기증한 기사가 게재되어 연구실 및 관련기술 홍보에 큰 기여를 하였다.

홍 보 내 용	일시
KBS 9시 뉴스 방영	2002. 04. 11
동아일보 기사	2003. 04. 12

5. 대외 협력

본 연구실은 NRL 과제를 수행하고 있는 타 연구기관에 세미나를 개최하여 본 연구실의 ER 유체 관련기술을 전파하고 해당 연구기관과의 활발한 정보 교류의 장을 이끌어가고 있으며 세계적인 연구기관과의 연구 협약을 통해 최신 관련 기술의 체계적이고 신속한 습득, 연구 논문 공동 발표 및 정보 교류에 선도적 역할을 하고있다. 국내 타 연구기관에서의 세미나 개최 실적과 국제적 연구기관과의 연구협약 실적은 아래와 같다.

세미나 기관	세미나 제목 및 날짜
한국기계연구원 (정밀가공그룹 : 이응숙박사)	ER 유체의 특성과 응용 (2002. 2. 6)
한국기계연구원 (진동그룹 : 김병현 박사)	스마트 재료를 이용한 진동제어 (2002. 2. 6)
건국대학교 (능동구조재료 연구실 : 윤광준 교수)	ER/MR 유체의 특성과 잠재적 응용 (2002. 2. 21)
부산대학교 (컴퓨터이용공학 연구실 : 유완석 교수)	ER 유체 이용 자동차 응용 기술 (2002. 10. 11)

협력기관명	연구실 책임자	주요협력내용
University of Maryland (Smart Structures Laboratory)	Wereley 교수	· 교수 교환 세미나 개최 실시 (2002. 4) · 학생 파견 연구 (2002. 1) · 논문 공동 집필 (SCI논문 1편 게재, 1편 투고(심사중))
University of Science and Technology of China (ER/MR Research Laboratory)	Tang 교수	· 논문 교환 실시 · 정보 교환 실시
The Chinese University of Hong Kong (Smart Materials and Structures Laboratory)	Liao 교수	· 교수 교환 세미나 실시 예정 (2004. 4) · 논문 교환 실시 · 정보 교환 실시

이 외에도 본 연구실은 국내는 물론 13개 국, 28개 기관에 ER 유체 제조 및 ER 유체 응용장치에 대한 연구 자문을 수행하여 ER 관련 분야의 기술발전에 기여하고 있다

한편, 본 연구에서 구축한 차량용 ER 응용장치의 히스테리시스 모델과 무차원 설계모델은 ER 혹은 MR 유체를 이용하여 만들 수 있는 각종 응용장치의 설계 및 동적 해석에 효율적으로 사용될 수 있으며, 시스템 불확실성과 입력초과를 고려한 제어기술 개발은 차량제어 뿐만 아니라 인공위성제어, 로봇제어 등 여러 분야의 제어시스템에 적용할 수 있는 매우 중요한 기반 기술이다. 2단계 완료 후의 활동 계획으로는 ER 유체 생산과 이를 응용한 응용제어 매커니즘 분야로 벤처기업을 설립할 예정이고, 또한 관련 분야 업체에 중요 핵심 기술을 이전하여 세계 최고 수준의 ER 유체 기술을 상용화 할 수 있는 획기적인 전기를 마련할 계획이다.

6. 홈페이지 활용현황

본 사업팀은 2001년 7월 국가지정연구실로 지정된 이후, 당해 10월부터 국가지정연구실 사업 관련 홈페이지를 독립적으로 가동하고 있으며, ER 유체 관련 기술 분야에 대한 심도 있는 내용을 다루고 있다. 특히, 차량용 ER 응용장치에 초점을 맞추어 관련 기술의 국내외 기술동향, 차량용 ER 응용장치의 설계부터 성능고찰까지의 주요 연구내용을 포함하고 있다. 또한 홈페이지에 접속하는 방문자로 하여금 원활한 정보 습득을 위하여 홈페이지의 구성요소가 독립적이면서도 유기적으로 연결되도록 하였으며 주요 연구내용의 PDF 파일 제공 및 다양한 질의에 대한 전문가적 답변에 노력하고 있다. 다음 표는 본 사업팀의 홈페이지 운영 및 활용 현황에 대한 개요를 나타낸 것이다.

홈페이지 주소	http://www.ssslab.com
홈페이지 개설	2001년 10월
운영 목적	ER 유체 관련 핵심기술의 효과적 유지발전 및 효율적 활용
주요 내용	ER 유체 및 차량용 ER 응용장치의 개발 - 연구개발 목표 및 관련 기술 동향 - 핵심 요소 기술 및 보유 핵심 기술 - 중요 연구 개발 성과
구성 규모	일반 문서 110여 페이지
총 방문 횟수	총 7104번 (2003년 8월 30일 현재)
일일 평균 방문 횟수	평균 24.9번 (2001년 10월 ~ 2003년 8월 30일 현재)
방문자 질의 횟수	183회의 질의 및 답변(2003년 8월 30일 현재)
연구 결과물 제공	SCI 국제 학술지 등의 연구 논문 PDF 파일로 제공 연구 세미나 자료 OHP 파일 제공 기타 보유 특허 기술 내용 제공
주요 관련단체 링크	120여 단체

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제1절 연구목표 및 내용

본 과제의 최종 연구목표는 지능재료 중의 하나인 ER 유체를 사용하여 경제적 파급 효과가 크고 핵심기술의 기반성이 매우 강한 차량관련 ER 응용장치의 설계 및 제어기술을 제안하고 이를 이용하여 속 업소버, 시트 댐퍼, 엔진 마운트, 대쉬 패널, ABS 등 차량용 ER 부품을 개발하는 데 있다.

1단계 연구의 세부목표는 항복응력 1.5kPa 이상, 반응시간 5msec. 미만, 작동온도범위 10℃~100℃인 ER 유체를 개발하고 ER 유체 및 ER 응용장치의 히스테리시스 모델링 기법 및 무차원화 설계 기법을 확보하며 ER 유체 및 주위 환경 변수를 고려한 강건제어 기법을 적용한다. 2단계 연구는 항복응력 1.8kPa 이상, 반응시간 5msec. 미만, 작동온도범위 -10℃~120℃인 ER 유체 및 ER 응용장치의 최적설계 모델과 모듈화 설계 기법을 개발하고 차량용 ECU와의 인터페이스화 그리고 실차 시험을 시행할 예정이다.

제2절 연구수행결과 현황

1. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록) 일자	발명자 (출원인)	출원국
선형모터 성능평가용 다이내모미터	10-2002-0012007	2002. 3. 6	최승복	한국
압착모드형 전기유동유체 마운트 장치	10-2002-0021815	2002. 4.20	국방과학 연구소	한국
폴리아닐린 코팅된 폴리메틸메타아크릴 레이트 입자형 전기유변유체 및 이의 제조방법	제2002-32795호	2002. 6.12	학교법인 인하학원	한국
인산화 전분을 전도성 입자로 구성한 전기유변유체 및 그의 제조방법	제2002-33104호	2002. 6.14	학교법인 인하학원	한국
압전밸브 모듈레이터 및 이를 포함하는 안티록 브레이크 시스템	제2003-1420호	2003. 1. 9	학교법인 인하학원	한국
ER 밸브 모듈레이터 및 이를 포함하는 안티록 브레이크 시스템	제2003-1421호	2003. 1. 9	학교법인 인하학원	한국
폴리아닐린 유도체를 전도성 입자로 구성한 전기유변유체	10-2003-0029655	2003. 5.10	학교법인 인하학원	한국

2. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고

3. 노하우 내역

- 비수계 폴리아닐린 ER 유체 조성 기술
- ER 유체 및 그 응용장치의 히스테리시스 모델 구축
- ER 응용장치의 설계 및 해석 프로그램 코드 개발 기술
- ER/MR 유체를 이용한 선형 다이내모미터 개발 기술

4. 발생품 및 시작품 내역

- Microprocessor Development System (1set)
- ER 패널 성능평가 장치 (1set)
- ER 유체 인장/압축 시험기 (1set)
- 고전압 앰프 (3set) 및 고전압 차단회로 (1set)
- ER 속업소버 (4set)
- ER 엔진마운트 (2set)
- ER 시트댐퍼 (2set)
- ER ABS (1set) 및 ABS용 ER 밸브 (2set)
- ER 대쉬패널 (2set)

5. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적

학술지 명칭	제목	게재 연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
Journal of Industrial and Engineering Chemistry	Damping Characteristics of Polyaniline Based Electrorheological Fluid	2001. 7	7, 4	Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry	한국	○
Journal of Intelligent Material Systems and Structures	Vibration Control of a CD-ROM Feeding System Using Electrorheological Mounts	2001. 9	12, 9	Sage Publication	영국	○
International Journal of Vehicle Design	Control Performance of an Electrorheological Suspension System Considering Actuator TimeConstant	2002. 3	29, 3	Inderscience Enterprise	스위스	○
Polymeric Materials; Science and Engineering	Synthesis and Electrorheology of Polyaniline : Effect of Poly(methyl vinyl ether-alt-maleic acid) Stabilizer	2002. 4	87	ACS	미국	○
Synthetic Metals	Synthesis and Characterization of Organoclay Nanocomposite with Poly(o-ethoxyaniline)	2002. 4	135-136	Elsevier Science	스위스	○
Macromolecular Chemistry and Physics	Synthesis and Electrorheology of Semiconducting Poly(naphthalene quinone) Radical Particles	2002. 5	203, 8	John Wiley & Sons Inc.	독일	○
Vehicle System Dynamics	Vibration Control of a Passenger Vehicle Utilizing a Semi-Active ER Engine Mount	2002. 5	37, 3	Swets & Zeitlinger	네덜란드	○
Journal of Intelligent Material Systems and Structures	Electrorheological Semi-Active Damper : Polyaniline Based ER System	2002. 7	13, 7	Elsevier Science	스위스	○
Journal of Intelligent Material Systems and Structures	Vibration Control Evaluation of a Commercial Vehicle Featuring MR Seat Dampers	2002. 9	13, 9	Sage Publication	영국	○
Journal of Intelligent Material Systems and Structures	An Experimental Investigation on Mechanical Fatigue Property of Chemical Starch-Based ER Fluids	2002.10	13, 10	Sage Publication	영국	○
International Journal of Mechanical Science	Vibration Control of a Frame Structure Using Electrorheological Fluid Mounts	2002.10	44, 10	Elsevier Science	스위스	○
Vehicle System Dynamics	H _∞ Control Performance of a Full-Vehicle Suspension Featuring Magnetorheological Dampers	2002.11	38, 5	Swets & Zeitlinger	네덜란드	○

학술지 명칭	제목	계재 연월일	호	발행기관	국명	SCI계재 여부
Proceedings of the Institution Mechanical Engineers : Part D - Journal of Automobile Engineering	Sliding Mode Control for Anti-lock Brake System of Passenger Vehicle Featuring Electrorheological Valves	2002.11	216, D11	IMechE	영국	○
Colloid and Polymer Science	Electrorheological Characterization of Polyaniline-Coated Poly(methyl methacrylate) Suspensions	2002.11	280	Springer -Verlag	독일	○
Smart Materials and Structures	Noise Reduction of Passive and Active Hybrid Panels	2002.12	11, 10	Institute of Physics Publishing	영국	○
Materials Chemistry and Physics	Electrorheological Response of Biocompatible Chitosan Particles in Corn Oil	2003. 1	77	Elsevier Science	스위스	○
Materials & Design	Hysteresis Identification of Polymethylaniline-Based ER Fluid Using Preisach Model	2003. 2	24, 1	Elsevier Science	스위스	○
Materials Research Innovations	Synthesis and Characterization of Polysaccharide Phosphates Based Electrorheological Fluids	2003. 6	7, 3	Springer -Verlag	독일	○
Journal of Material Science Letter	Liquid Crystal Added Electrorheological Fluid	2003. 6	22, 11	Kluwer Academic Publication	네델란드	○
International Journal of Vehicle Design	Vibration Control of a Passenger Vehicle Featuring Magnetorheological Engine Mount	2003. 7	33, 1	Inderscience Enterprise	스위스	○
International Journal of Vehicle Design	Comparison of Damping Force Models for an Electrorheological Fluid Damper	2003. 7	33, 1	Inderscience Enterprise	스위스	○
International Journal of Vehicle Design	Robust Sliding Mode Control of an Electrorheological Suspension System with Parameter Perturbations	2003. 7	33, 3	Inderscience Enterprise	스위스	○
International Journal of Vehicle Design	ER Inserts for Shock Wave Reduction in Structures	2003. 7	33, 3	Inderscience Enterprise	스위스	○
International Journal of Vehicle Design	MR Seat Suspension for Vibration Control of a Commercial Vehicle	2003. 7	31, 2	Inderscience Enterprise	스위스	○
Mechatronics	H_{∞} Control of Electrorheological Suspension System Subjected to Parameter Uncertainties	2003. 9	13, 7	Elsevier Science	스위스	○
한국정밀공학회지	압착모드 하에서 ER 유체의 빙헴특성 및 댐핑력 제어	2002.11	19, 11	한국정밀공학회	한국	X
한국소음진동공학회지	Preisach 모델을 이용한 ER 유체의 온도별 히스테리시스 특성 고찰	2002. 8	12, 8	한국소음진동공학회	한국	X
계: 27건수						

○ 학술회의 발표 실적

학술회의 명칭	제목	계재연월일	호	발행기관	국명
The eighth International Conference on ER Fluids and MR Suspensions	An Experimental Investigation on Mechanical Fatigue Property of Chemical Starch-Based ER Fluids	01. 7. 9 ~ 13		World Scientific	프랑스
The eighth International Conference on ER Fluids and MR Suspensions	Vibration Control Evaluation of a Commercial Vehicle Featuring MR Seat Dampers	01. 7. 9 ~ 13		World Scientific	프랑스
The eighth International Conference on ER Fluids and MR Suspensions	Electrorheological Semi-Active Damper : Polyaniiline Based ER System	01. 7. 9 ~ 13		World Scientific	프랑스
SPIE International Symposium	Vibration Control of a Passenger Car Using MR Engine Mounts	02. 3.17 ~ 21		SPIE	미국
한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회	ER 댐퍼의 이력현상을 고려한 댐핑력 특성 고찰	02. 5.29 ~ 31		한국소음진동공학회	한국
한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회	Preisach 모델을 이용한 ER 유체의 온도별 히스테리시스 특성 고찰	02. 5.29 ~ 31		한국소음진동공학회	한국
SPIE International Symposium	Electrically Activated Paper Actuators	02.10. 2		SPIE	호주
SPIE's 10th Annual International Symposium	Position Control System Using ER Clutch and Piezoactuator	03. 3. 5		SPIE	미국
SPIE's 10th Annual International Symposium	Paper Fiber Studies for Electro-Active Paper Actuators	03. 3. 5		SPIE	미국
SPIE's 10th Annual International Symposium	Design and Control Issues on a Hybrid Linear Motor Working on Selfmoving Cell Concept	03. 3. 6		SPIE	미국
2003 춘계 소음진동 학술대회	다구찌법을 이용한 ER 댐퍼의 강건설계	03. 5.22		한국소음진동공학회	한국
The Thirteenth(2003) International Offshore and Polar Engineering Conference	ER/MR Smart Structures for Shock Wave Reduction	03. 5.25 ~ 30		International Offshore and Polar Engineering Conference	미국
The Ninth International conference on ER Fluids and MR Suspensions	Robust Control of a Semi-Active Vehicle Suspension System Featuring ER Fluid Damper (invited)	03. 8.11 ~ 15		World Scientific	중국
계: 13건수					

6. 해당 기술 관련 수상 실적

○수상 실적

연도	수상명	수상내용
2001. 7	Winslow Award in ER Research (김지우 박사과정)	ER 유체에 관련된 다수의 우수 논문 발표. (The 8th International Conference on ER and MR Fluids)
2002. 4	제12회 과학기술 우수 논문상 (최승복 교수)	ER/MR 유체 이용 차량 현가 장치의 진동 제어에 관한 논문 발표 (한국과학기술단체총연합회)
2002. 11	한국소음진동공학회 무료강좌 감사장 (최승복 교수)	ER 유체를 비롯한 각종 스마트 재료 이용 진동 제어에 관한 무료 강습회 감사 (한국소음진동공학회)
2002. 12	제4회 인하대학교 연구대상 (최승복 교수)	스마트 재료 관련 탁월한 연구 업적으로 1년에 1명에게 수여하는 연구대상 수상 (인하대학교)
2003. 2	인하대학교 총장상 (한상수 박사과정)	ER 유체 관련 우수한 SCI 논문 실적이 인정됨. (인하대학교)
2003. 2	인하대학교 대학원장상 (박동필 석사과정)	ER 유체 관련 우수한 SCI 논문 실적이 인정됨. (인하대학교)
2003. 4	제13회 과학기술 우수 논문상 (최형진 교수)	고분자 나노복합체 및 ER 유체 관련된 우수 논문 발표. (한국과학기술단체총연합회)
2003. 5	2002년 추계학술회 우수 논문 발표상 (조민성 박사과정)	폴리아닐린/폴리메틸메타아크릴레이트 계 단분산성 입자를 이용한 ER 유체에 관한 논문발표. (한국공업화학회)

제3절 연구성과

- 아라빅검계 ER 유체 특허등록 및 연구샘플용으로 ER 유체 판매(한국중공업 등)
- ER 서보 밸브 및 제작기술을 (주)인텔리전트 하이드로릭에 이전
- ILS System(주)와 ER 응용장치용으로 사용할 수 있는 상업용 고전압증폭기 개발 중
- 연세대 기계공학과, 명지대 기계공학과, 계명대 자동차공학과에 ER 유체 시험방법 및 ER 응용장치시험방법 자문 등

제4절 기술이전 및 연구결과 활용계획

1. 당해연도 활용계획

본 연구의 1단계에서 핵심기술로써 개발되고 있는 ER 유체 입자 조성 관련 기술을 바탕으로 당해연도에 정부, 기업 및 대학의 관련 연구단체(한국기계연구원, 한국중공업, 연세대학교 등)에 ER 유체 입자 및 관련 기술을 지속적으로 제공함으로써 ER 유체 기술이 여러 산업분야에 효과적으로 활용될 있도록 지원할 계획이다.

2. 활용방법

- 한국 중공업 : ER 유체를 이용한 베어링
- 한국기계연구원 : Si Wafer 평탄화 가공
- 연세대학교 : 초정밀 연마기술 개발
- 명지대학교 : ER 유체를 이용한 응용장치

등을 위한 연구용으로 ER 유체를 유/무상으로 제공하고 관련기술을 지속적으로 지원한다. 또한 기타 관련 연구기관 및 대학에도 연구용 샘플을 제공하도록 한다.

3. 차년도 이후 활용계획

본 연구에서 제안한 핵심기술은 차량을 비롯한 여러 산업분야에 효과적으로 활용될 수 있다. 따라서 차년도 이후에는 이에 대한 기술이전과 기술지도를 위하여 인하대학교 내에 국내외에서 이용 가능한 ER 기술정보 사이트를 개설/운영할 예정이며, 향후 목표 대상 자동차 부품이 성공적으로 개발된다면 워크숍을 통하여 국내 관련 자동차 부품회사에 기술이전을 추진하고, 이를 바탕으로 속 업소버와 엔진 마운트 등의 ER 부품들은 현대모비스를 통해 실용화를 추진해 나가고, ER ABS는 Delphi와 만도기계 등 국내외 업체와 공동으로 상용화 할 계획이다. 더불어 ILS System(주)와 ER응용장치용으로 사용할 수 있는 상업용 고전압증폭기를 실용화 할 것이다.

제5절 기대효과

본 연구에서 제안하고 있는 차량관련 ER유체 기술은 낮은 원가로부터 고부가가치의 창출을 기대할 수 있는 원천 기술기반형 성격을 갖고 있다. 따라서 본 기술은 어느 특정한 시스템을 위한 기술이라기보다는 여러 산업분야의 각종 제어 시스템에 매우 효과적으로 적용될 수 있다. 또한, ER유체 관련 기술은 기계, 전기, 전자, 물리, 화학 및 재료과학 등의 통합기술 성격을 갖고 있기 때문에 매우 다양한 적용분야를 갖고 있다. ER유체관련 기술개발을 통해 창출되는 시장규모는 향후 급격히 증가되어 5년 후의 국내외 시장규모는 매우 클 것으로 예상된다. 특히, 현재 판매되고 있는 독일 Bayer사의 ER유체가 1ℓ 당 80만원, 영국 ER Fluids Development(ERFD)사 ER유체가 1ℓ 당 150만원인 것을 감안할 때, 본 연구의 미추진시 발생하는 외국기술료 지불액은 매우 클 것으로 예상된다. 또한, 신차의 부품개발비는 일반적인 가격이 있는 것이 아니라 조건에 따라 협상해야 되기 때문에 매우 높은 단가를 요구하므로 기술미보유시 신차개발에 따른 부품 개발비로 수익에서 수십억원을 매년 외국에 지불해야 하며(예: Delphi에서 승용차용 ER 속업소버의 개발비로 1억2천만원이 소요될것으로 예상), 연간 100만대 이상의 국내 자동차 판매량을 고려할 때 실용화 성공에 따른 매출액 및 수입 대체 효과는 엄청날 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안하고 있는 핵심기술 중 차량관련 **국내 ER 유체 개발기술**은 선진국에 비하여 적지 않은 격차를 보이고 있으나, 본 연구의 1단계에서 개발된 공중합체 ER 입자 기술을 바탕으로 2단계에서는 표면 코팅 기술과 계면활성제 이용 기술을 중점적으로 추진한다면 향후 3년 이내에 현재 기술주도권을 갖고 있는 독일 및 일본과 대등한 관계가 될 것으로 판단한다. 그리고 **ER 응용장치 설계 및 제작기술**에서는 정확한 유동특성 해석과 연계된 최적설계 모델을 개발함으로써 선진국과의 기술격차를 현격하게 줄일 수 있고, **ER 응용장치의 제어기술**에서는 실용화를 위한 ECU와의 인터페이스 기술을 확립하고 각종 강건제어기의 마이크로칩 개발을 통하여 향후 3년 이내에 국제적 기술우위를 선점할 것으로 확신한다.

또한 본 연구에서 제안하고 있는 차량관련 ER유체 기술은 기계, 전기, 전자, 물리, 화학, 고분자 등의 통합기술 성격을 갖고 있기 때문에 그 적용범위가 매우 다양하며 광범위하다. 새로운 차원의 차량부품 개발을 통한 경쟁력 있는 시장의 창출과 이에 따른 수출 및 고용증대 효과는 물론 여러 산업분야에 효과적인 적용으로 막대한 경제·산업적 효과를 피할 수 있을 것으로 확신한다. 나아가서 스마트 자동차의 출현과 지진이나 외란에 견고히 견딜 수 있는 스마트 교량 등의 등장으로 사회적·문화적 측면에서도 적지 않은 기대효과를 가져올 수 있을 것으로 확신한다.

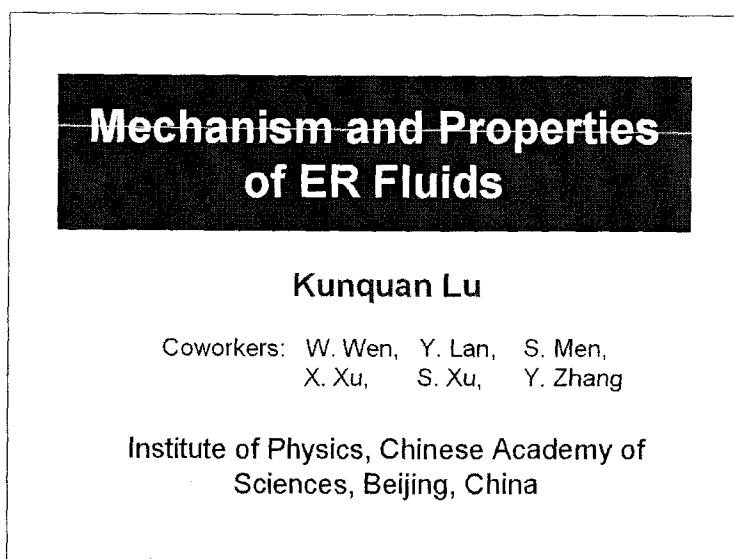
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제1절 국외 전문가 초청 지능형 ER 유체 워크숍

ER 유체에 관한 국외 전문가를 초청하여 ER 유체의 물리적 메커니즘과 특성 그리고 ER유체 응용장치의 모델링 및 제어를 주제로 워크숍을 개최하였으며, 이는 고성능 ER 유체의 개발 및 ER 응용장치의 실차 적용과 관련한 핵심적인 기술이다.

1. Mechanism and Properties of ER Fluids (Dr.Kunquan Lu)

전기장 하에서의 입자간의 상호작용력 모델, 전기장 인가에 따른 ER 입자의 체인형성 패턴, 전기유전을 및 전도성에 따른 ER 유체 항복응력의 변화 등에 대한 연구를 통해 최상의 항복응력을 갖는 ER 유체를 이론적으로 예측하였다. 다음은 이에 관한 발표자료 중 주요내용이다.



Interaction force of two spheres

Point dipole :

$$f = 24\pi\epsilon_0\epsilon_f R^6\beta^2 E_0^2 / d^4$$

Davis: modified dipole :

$$f = 24\pi\epsilon_0\epsilon_f R^6\beta^2 E_0^2 / [d^4(1 - 4.8082\beta R^3/d^3)^2]$$

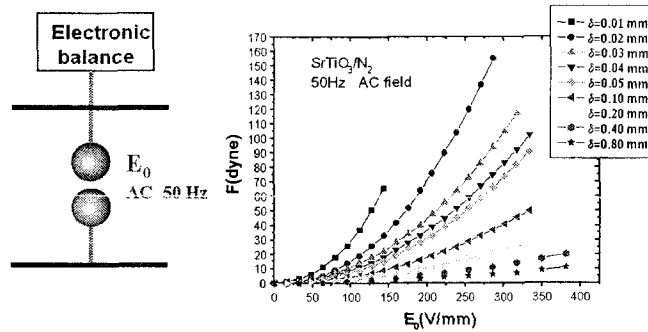
H.Conrad:

$$f = 37.44\pi R^2\epsilon_0\epsilon_f\beta^2 E_0^2 \{ [14.84 - 6.16(d/R)]\beta^2 \} / (d/R)^4$$

R.Tao: (FEA)

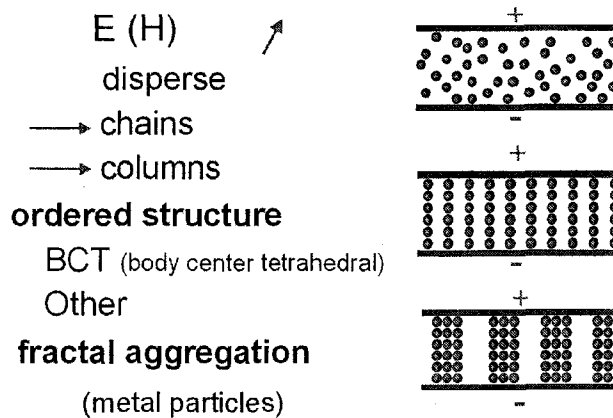
$$f = \epsilon_0\epsilon_f E_0^2 R^6\beta^2 (6d - 4R) / [d^4(d - 2R\beta^{(1-\beta)/2})]$$

Two SrTiO₃ single crystal spheres (d=6.3mm)
in nitrogen



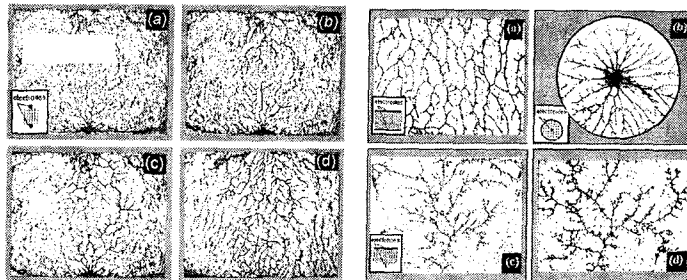
Measured force of two spheres

3. Structures and patterns



Electric-field-induced diffusion-limited aggregation

W. Wen, K. Lu, Phys. Rev. E, 55(1997)R2100



E = 150 V/mm (a)
 250 V/mm (b)
 350 V/mm (c)
 500 V/mm (d)

Pattern formed at different
 kinds of space field

5. High yield stress ER fluids

Theoretical prediction

H. Conrad:

39 kPa (5kV/mm)

$\epsilon_f = 12.5$, $\epsilon_p = 187.5$ $R/d = 2.05$

P. Shen:

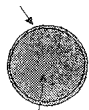
8 kPa (1kV/mm)

$\epsilon_f = 12.5$, $R = 20 \mu\text{m}$ $\delta = 1 \text{ \AA}$

TiO₂ coated graphite/silicone ER fluid

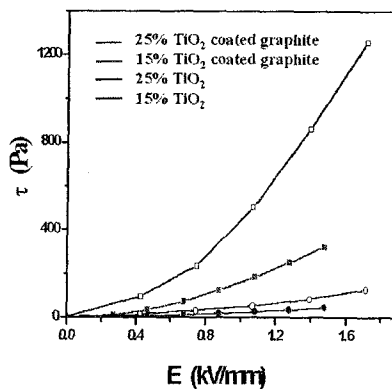
S. Xu, S. Men, B. Wang, K. Lu, Acta Physica Sinica, 49(2000) 2176

TiO₂ layer (1-2nm)



graphite (~30μm)

Sol-gel technique



6. Summary

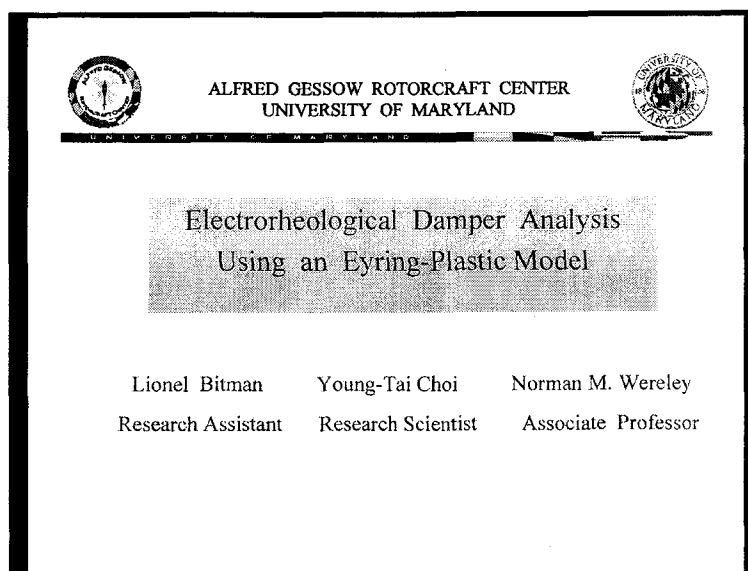
1. A review on the studies of ER fluids mainly in our group is presented.
2. The interaction of two different type spheres in electric field was measured and calculated.
3. The patterns formed in ER fluids and the structure induced non-linear dielectric properties were studied.
4. ϵ_p and σ_p dependence of shear stress was quantitatively obtained by using a ferroelectric particle/silicone.
5. High yield stress ER fluids were presented.
6. The deviation of the available calculation from measured results indicates that more reliable theoretical work should be performed.

2. Modeling and Control of ER and MR Devices (Dr. Norman M. Wereley)

ER유체의 응용장치의 무차원 모델링 및 히스테리시스에 대한 정확한 모델은 시스템의 거동을 정확히 예측하는데 중요하다. 또한 ER 속업소버와 같은 응용장치의 제어기술은 차량 시스템의 안정성을 확보하는데 꼭 필요한 기술이다. 아래는 이와 관련된 발표자료이다.

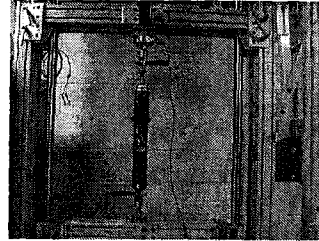
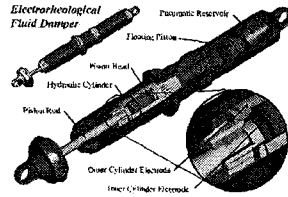
가. Electrorheological Damper Analysis Using an Eyring-Plastic Model

기존의 빙햄모델을 바탕으로는 예측할 수 없던 응용장치 히스테리시스를 정확히 모델링 함으로써 ER댐퍼의 정현파 가진에 대한 응답특성을 정확하게 예측할 수 있다.





ER Damper



Non-Dimensional Equations

University of Maryland, College Park

- Goal : To relate non-dimensional groups to energy dissipation and damping

Damping Coefficients

$$C = \frac{\text{Force}_{\text{ZeroField}}}{\text{Velocity}_{\text{Piston}}} = \frac{12\mu A_p^2 L}{A_g d^2} \quad C_{\text{Equivalent}} = \frac{\text{Force}_{\text{FieldApplied}}}{\text{Velocity}_{\text{Piston}}}$$

Damping Coefficient

$$\frac{C_{\text{Eq}}}{C} = \frac{C_{\text{Equivalent}}}{C}$$

Non-dimensional Plug Thickness

$$\frac{1}{2}\delta^3 - \left[\frac{3}{2} + \theta \left(\frac{1}{Bi} \right) \right] \delta + 1 = 0$$

Notation

μ = Viscosity
 δ = Plug Thickness
 τ_y = Yield Stress
 d = Gap Thickness
 A_p = Piston Head Area
 A_g = Gap Area

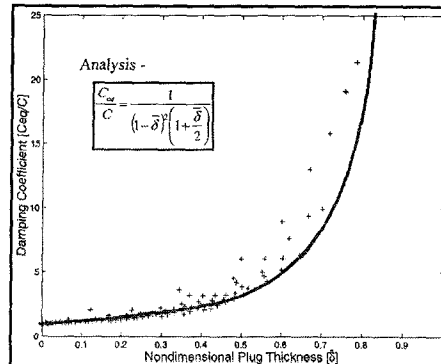


Results of Model Validation

(C_{eq}/C vs. Non-dimensional Plug Thickness)

University of Maryland, College Park

- 108 individual test
- 2 in stroke
- Voltage range
 - 0.0 to 2.9 kV/mm
 - 0.36 kV/mm increment
- Frequency range
 - 0.08 Hz to 0.96 Hz
 - 0.08 Hz increment
- Analysis based on identified fluid properties

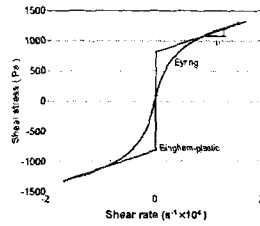




Eyring perspective

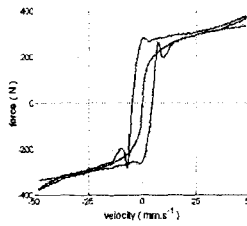


Constitutive level



$$\tau = \frac{1}{K} \operatorname{asinh} \left(\frac{1}{\xi} \frac{du}{dy} \right)$$

Damper level



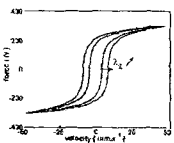
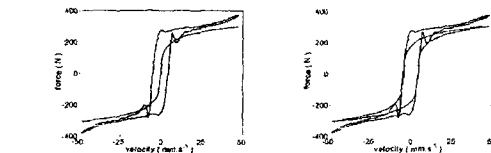
$$F = F_{\alpha} \operatorname{asinh}(\lambda_1 \dot{X})$$



Pre-yield modeling



$$F = F_{\alpha} \operatorname{asinh}(\lambda_1 \dot{X}) \longrightarrow F = F_{\alpha} \operatorname{asinh}(\lambda_1 \dot{X} - \lambda_2 X)$$



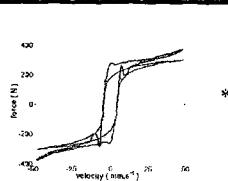
Pre-yield loop width increases

Pre-yield slope increases but loop width decreases (stretching effect)

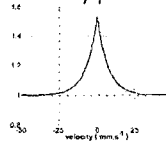
Pre-yield loop width strongly depends on the ratio $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$



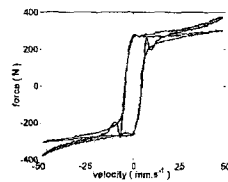
Yield force modeling



$$1 + \beta_1 e^{-\beta_2 |X|}$$



Amplifies the response, at low speeds and leaves the response as it is, at higher speeds



$$F = F_{\alpha} \left\{ \operatorname{asinh}(\lambda_1 \dot{X} - \lambda_2 X) \right\} \left(1 + \beta_1 e^{-\beta_2 |X|} \right)$$

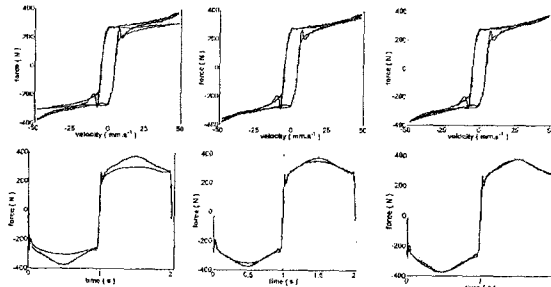
The pre-yield behavior of the damper is now completely modeled



Post-yield modeling



$$F = F_0 \left(\sinh(\lambda \dot{x} - \lambda_2 \dot{x}) \right) \left(1 + \beta e^{-\beta |\dot{x}|^n} \right) + c_1 \dot{x} + c_2 (\dot{x})^3$$



Plastic behavior at medium speeds

Plastic + Cubic-plastic behavior at high speeds



Conclusions



- The Eyring-plastic model has been introduced. It is a mechanisms-based model.
- It has been validated over electric fields ranging from 1 to 7 kV/mm and piston velocities from 25 to 100 mm/s.
- It is now possible to predict with great accuracy the response of an ER damper subject to sinusoidal excitation in the range tested

나. Semi-Active Vibration Isolation Using Magnetorehological Isolators

스카이훅 제어기를 이용하여 진동의 반능동 제어를 실시하였다. 히스테리시스 모델을 적용한 경우 시간영역에서의 시스템 거동을 정확하게 표현하고 있다.

University of Maryland
Smart Structures Laboratory

**Semi-Active Vibration
Isolation Using
Magnetorheological Isolators**

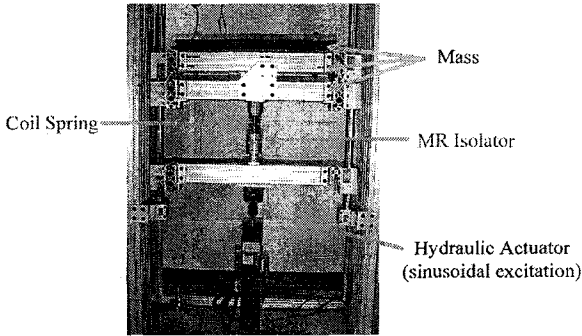
*Young-Tai Choi Norman M. Wereley **

Dept. of Aerospace Engineering
University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

Young Sik Jeon

Dept. of Tool and Design
Yuhan College, Kyungki-Do, 402-202, Korea

Vibration Isolation System (I)
experimental setup



Coil Spring Mass
MR Isolator
Hydraulic Actuator
(sinusoidal excitation)

Vibration Isolation System (II)

theoretical method

- Governing equation

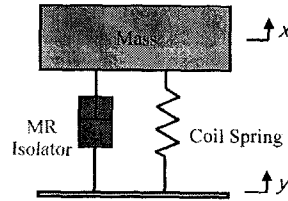
$$M_s \ddot{x} = -f_{yd} - \alpha(\dot{x} - \dot{y}) - (k + k_c)(x - y)$$

where

M_s : mass

k_c : stiffness of coil spring

f_{yd} : controlled damping force of MR isolator



Vibration Isolation System (III)

theoretical method

- Controlled damping force

$$f_{yd} = (f_y + f_f) \operatorname{sgn}(\dot{x} - \dot{y}) \quad \leftarrow \text{Bingham model}$$

$$f_{yd} = (f_y + f_f) \tanh((\dot{x} - \dot{y} + \lambda_1(x - y))\lambda_2) \quad \leftarrow \text{Hysteresis model}$$

- Controlled yield force

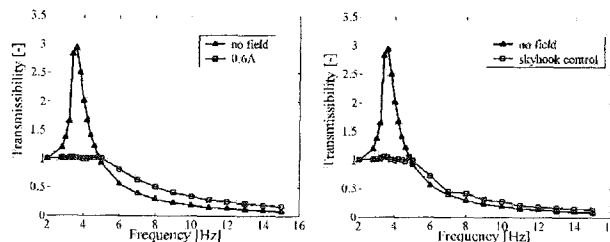
$$f_y = \alpha i_c^\beta$$

- Simple skyhook control

$$i_c = \begin{cases} i = 0.54 A & \text{if } \dot{x} \cdot (\dot{x} - \dot{y}) > 0 \\ i = 0.0 A & \text{if } \dot{x} \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \leq 0 \end{cases}$$

Vibration Isolation System (IV)

experimental results

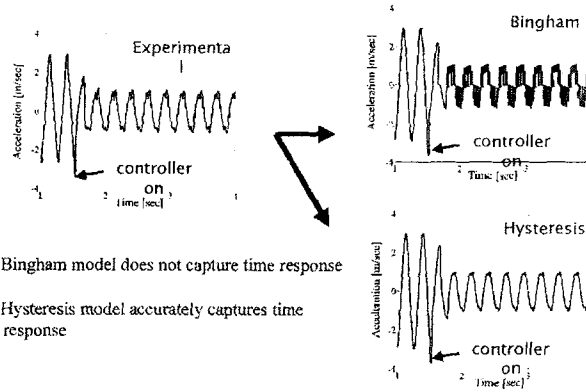


Measured r.m.s. acceleration transmissibility

- Constant current input can control effectively the vibration at only resonance region
- Skyhook control improves the vibration isolation performance at overall frequency range

Vibration Isolation System (VII)

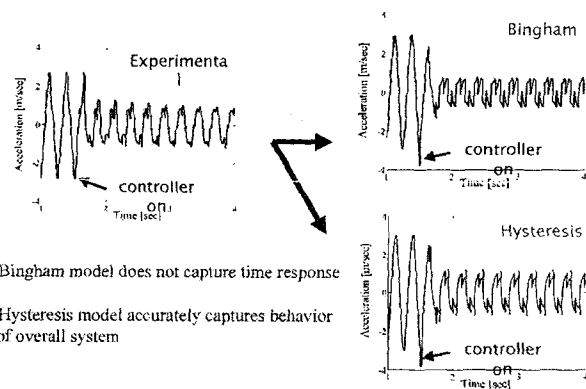
constant current input at 3.8Hz



- Bingham model does not capture time response
- Hysteresis model accurately captures time response

Vibration Isolation System (VIII)

skyhook control current input at 3.8Hz



- Bingham model does not capture time response
- Hysteresis model accurately captures behavior of overall system

제2절 차량용 ER/MR 응용장치 특집 논문(International Journal of Vehicle Design)

ER 및 MR 유체를 이용한 응용장치의 실차 적용 가능성 및 이에 대한 평가를 포함하고 있다. 세부적으로는 ER/MR 속 업소버의 모델링, ER/MR 댐퍼를 갖는 차량의 강건제어, ER/MR 엔진 마운트의 반능동 제어, ER 밸브의 압력 제어, 오프로드 모터사이클의 속 업소버 제어 또한 진동 및 소음 감쇄를 위한 지능 구조물 등에 대한 내용으로, 일부 응용장치는 실제 실험으로 구현되어 그 효과성을 입증하고 있다. 다음은 이 책에 수록된 연구 논문의 제목과 저자이다.

	논문 제목	저자
1	Vibration control of a passenger vehicle featuring magnetorheological engine mounts	S. B. Choi, H. J. Song, H. H. Lee, S. C. Lim, J. H. Kim, H. J. Choi
2	Comparison of damping force models for an electrorheological fluid damper	S. R. Hong, S. B. Choi, Y. T. Choi, N. M. Wereley
3	Behaviour of MR fluids in squeeze mode	S. L. Vieira, C. Ciocanel, P. Kulkarni, A. Agrawal, N. Naganathan
4	Semi-active control of automotive suspension systems with magneto-rheological dampers	Alan Hiu-Fung Lam, Wei-Hsin Lia
5	Semi-active vehicle suspension using smart fluid dampers: a modelling and control study	N. D. Sims, R. Stanway
6	Development of damper for new electronically controlled power steering system by magnetorheological fluid: MRSTEER	Y. Park, B. Jung
7	Controller design for vibration of a smart CFRP composite beam based on the fuzzy model	Takeshi Takawa, Takehito Fukuda
8	Semi-active, fail-safe magneto-rheological fluid dampers for mountain bicycles	Darrell G. Breese, Faramarz Gordaninejad
9	A magneto-rheological fluid shock absorber for an off-road motorcycle	Everet O. Ericksen, Faramarz Gordaninejad
10	The influence of mechanical input amplitude on the dynamic response of an electrorheological fluid in squeeze flow	A.K. El Wahed, R. Stanway, J. L. Sproston
11	Modelling and testing of the force-generating characteristics of magnetorheological dampers	Muturi G. Muriuki, William W. Clark
12	Double adjustable shock absorbers utilizing electrorheological and magnetorheological fluids	J. E. Lindler, Y. T. Choi, N. M. Wereley

	논문 제목	저자
13	Critical factors for MR fluids in vehicle systems	J. David Carlson
14	Voltage control characteristics of electrorheological fluid valves	G. Georgiades, S. O. Oyadiji
15	The usage of acceleration signal to control magneto-rheological fluid damper	Andrzej Milecki, Dariusz Sedziak
16	Characterisation and comparison of the dynamic properties of conventional and electro-rheological fluid shock absorbers	S. O. Oyadiji, P. Sarafianos
17	Robust sliding mode control of an electrorheological suspension system with parameter perturbations	S. S. Han, S. B. Choi, J. S. Park, J. H. Kim, H. J. Choi
18	ER inserts for shock wave reduction in structures	J. H. Kim, J. Y. Kim, S. B. Choi

제3절 국제 학술회의 자료

1단계 연구기간동안 국제 학술회의에 참가하여 ER/MR유체의 조성 및 응용장치에 관한 최신 연구 방향 및 ER 응용장치의 실차 적용 가능성을 파악하였다. 다음은 2002년 2003년 SPIE 논문집의 논문제목과 저자이다.

1. Smart Structures and Materials 2002 (SPIE Vol. 4701)

	논문 제목	저 자
1	Vibration control of a passenger car using MR engine mounts	S. B. Choi, H. H. Lee, H. J. Song, J. S. Park
2	Performance of a MR hydraulic power actuation system	J. H. Yoo, N. M. Wereley
3	Feasibility study of PZT thin-film sensors and actuators for smart microstructures and MEMS devices	Yi-Chu Hsu, I. Y. Shen, G. Z. Cao
4	Experimental characterization of NiMnGa ferromagnetic shape memory alloy bars under variable loading conditions	Ronald N. Couch, Inderjit Chopra, Manfred R. Wuttig
5	Development of active and sensitive material systems based on composites	Hiroshi Asanuma
6	Self-healing of creep damage in heat resisting steels	Norio Shinya, Junro Kyono
7	Self-repairing, self-forming, and self-sensing systems for ceramic/polymer composites	Carolyn M. Dry
8	Use of imbedded fiber optic thermal sensors to monitor the health of composite structures	Anna Stewart, Gregory P. Carman, W. L. Richards
9	Nondestructive technique based on vibration measurements and piezoelectric patches for monitoring corrosion phenomena	Ernesto Monaco, Mauro Fontana, Luca De Rosa, Francesco Bellucci, Leonardo Lecce
10	Design of a piezoelectric-based structural health monitoring system for damage detection in composite materials	Seth S. Kessler, S. Mark Spearing
11	Built-in damage detection system for sandwich structures under cryogenic temperatures	Eric J. Blaise, Fu-Kuo Chang
12	Progress in demonstrator program of Japanese Smart Material and Structure System Project	Naoyuki Tajima, Tateo Sakurai, Nobuo Takeda, Teruo Kishi
13	Evaluation of mechanical modal characteristics using optical techniques	John D. Lekki, Grigory Adamovsky, Patrick W. Flanagan, Kenneth Weiland

	논문 제목	저자
14	Health monitoring of one-dimensional structures using empirical mode decomposition and the Hilbert-Huang transform	Darryll J. Pines, Liming W. Salvino
15	Detection of damage in aluminum plates by wavelet analysis	Bo Xie, Gangbing Song
16	Structural integrity monitoring of composite patch repairs using wavelet analysis and neural networks	Venkata K. Amaravadi, Kyle Mitchell, Vittal S. Rao, Mark M. Derriso
17	Advances in utilization of structurally integrated sensor networks for health monitoring in commercial applications	Mark Lin, Amrita Kumar, Xinlin Qing, Shawn J. Beard
18	State-of-the-art and open problems in stabilizing platforms for pointing and tracking	John E. McInroy, Farhad Jafari
19	Over-constrained rigid multibody systems: differential kinematics and fault tolerance	Yong Yi, John E. McInroy, Yixin Chen
20	Feedback control of an active material adaptive-tuned vibration absorber using relative phase	Keith A. Williams, George T. Chiu, Robert J. Bernhard
21	MEMS actuators for boundary layer control of micro-rotor blades	Nikhil A. Koratkar, Theodorian Borca-Tasciuc
22	Application of shape memory alloy (SMA) spars for aircraft maneuver enhancement	Changho Nam, Aditi Chattopadhyay, Youdan Kim
23	Development of a SMA-based actuator for compact kinetic energy missile	Daniel D. Shin, Donggun Lee, Kotekar P. Mohanchandra, Gregory P. Carman
24	Design of an improved shape memory alloy actuator for rotor blade tracking	Kiran Singh, Inderjit Chopra
25	Fabrication and testing of a shape memory alloy actuated reconfigurable wing	Justin K. Strelec, Dimitris C. Lagoudas
26	Aeroelastic vibration feedback control of smart aircraft wings in subsonic flight speeds	Zhanming Qin, Liviu I. Librescu
27	Modeling of layerwise piezolaminated structures	Cristovao M. Soares, Carlos A. Mota Soares, Jose E. Semedo-Garcao, J. N. Reddy
28	Implementation of structures with self-sensing piezoelectric actuators incorporating adaptive mechanisms	Wai W. Law, Wei-Hsin Liao, Jie Huang
29	Dynamic and static assessment of piezoelectric embedded composites	Francois Cote, Patrice Masson, Nezih Mrad

	논문 제목	저 자
30	Smart composite material system with sensor, actuator, and processor functions: a model of holding and releasing a ball	Ryutaro Oishi, Hitoshi Yoshida, Hideki Nagai, Ya Xu, Byung-Koog Jang
31	Thermal deformation compensation of a composite beam using piezoelectric actuators	Xiaoqin Zhou, Gangbing Song, W. Binienda
32	Development of a new standing wave type ultrasonic linear motor	Yongrae R. Roh, Jaewha Kwon, Soosun Lee
33	Novel horn designs for ultrasonic/sonic cleaning, welding, soldering, cutting, and drilling	Stewart Sherrit, Steven A. Askins, Mike Gradziol, Benjamin P. Dolgin, Xiaoqi Bao, Zensheu Chang, Yoseph Bar-Cohen
34	Modeling of particle flow due to ultrasonic drilling	Zensheu Chang, Benjamin P. Dolgin, Xiaoqi Bao, Stewart Sherrit, Yoseph Bar-Cohen
35	Analysis and simulation of the ultrasonic/sonic driller/corer (USDC)	Xiaoqi Bao, Zensheu Chang, Stewart Sherrit, Benjamin P. Dolgin, Yoseph Bar-Cohen, Dharmendra S. Pal, Shu Du, Thomas Peterson
36	Adaptive estimation of angular velocity and acceleration of a single-axis MEMS coriolis sensor	Jay Karmarkar, Sahjendra N. Singh
37	Computationally efficient piezostructure modeling for system optimization	Robert E. Richard, Robert L. Clark
38	Experimental study of model-based feedforward control of longitudinal wave transmission through hollow cylinders	Ion Pelinescu, Balakumar Balachandran
39	Active noise control with a hybrid control algorithm using an active/passive smart foam actuator	Yeung-Shik Kim, Gimam Kim, Chul-Ha Roh
40	Comparison of amplified piezoelectric actuators based on topological optimization	Philip W. Loveday
41	Simple thermal actuator using R-phase transformation of Nitinol	Jayagopal Uchil, Kumara K. Ganesh, K.K. Mahesh
42	Comprehensive piezoceramic actuator review	Chris J. Taylor, Gregory N. Washington
43	New dual-stack piezoelectric actuation device with improved performance	David E. Heverly II, Kon-Well Wang, Edward C. Smith

	논문 제목	저자
44	Fabrication and modeling of porous FGM piezoelectric actuators	Abdulhakim Almajid, Minoru Taya, Kenta Takagi, Jing-Fing Li, Ryuzo Watanabe
45	Position control of a cylinder system using piezoactuator-driven pumps	S. B. Choi, J. K. Yoo, M. S. Cho
46	Smart missile fins with active spoiler using a piezoelectric actuator	S. J. Kim, C. Y. Yun, S. H. Moon, S. Hwang, S. N. Jung
47	Design of single-crystal vibration absorbers	Razvan Rusovici, Jeffrey J. Dosch, George A. Lesieutre
48	Design and development of a biomimetic device for micro air vehicles	Felipe Bohorquez, Darryll J. Pines
49	Active vibration control of cylindrical shell using smart materials	M. B. Xu, Gangbing Song
50	Piezoelectric hydraulic pump with innovative active valves	Donggun Lee, Siu W. Or, Conal H. O'Neill, Gregory P. Carman
51	Performance of a piezohydraulic actuation system with active valves	Honghui Tan, William Hurst, Donald J. Leo
52	Design and testing of a high-pumping-frequency piezoelectric-hydraulic hybrid actuator	Jayant Sirohi, Inderjit Chopra
53	Piezoelectric actuator and sensor models for a shell under pressure	Akhilesh K. Jha, Daniel J. Inman
54	Simultaneous optimization of the electromagnetic and mechanical properties of honeycomb materials	Frank C. Smith, Fabrizio L. Scarpa, G. Burriesci
55	Structural acoustic response of a shape memory alloy hybrid composite panel (lessons learned)	Travis L. Turner
56	Active stiffeners for shape and vibration control of circular plate structure	Michael K. Philen, Kon-Well Wang
57	Optimal sizes and placements of piezoelectric actuators and sensors on an inflated torus	Akhilesh K. Jha, Daniel J. Inman
58	Double bridge technique for temperature compensation of piezoresistive pressure sensor	Po-Tsung Hsieh, Y. M. Chang, J. M. Xu, Chii-Maw Uang

2. Smart Structures and Materials 2003 (SPIE Vol. 5056)

	논문 제목	저자
1	Development of smart vortex generators	Fabio Geraci, Jonathan E. Cooper, Michael Amprikidis
2	MEMS-based active skin for turbulent drag reduction	Raghavendran Mani, Dimitris C. Lagoudas, Othon K. Rediniotis
3	Effective cross-section distribution of anisotropic piezocomposite actuators for wing twist	Carlos E. Cesnik, Ryan S. Park, Rafael Palacios
4	Health monitoring of adhesively bonded composite patch repair of aircraft structures using wavelet transforms of Lamb wave signals	Rabindranath Gubbala, Vittal S. Rao
5	Constructing of cure monitoring system with piezoelectric ceramics for composite laminate	Nobuo Oshima, Kouichi Inoue, Shinya Motogi, Takehito Fukuda
6	Sensitivity of Hilbert magnitude and phase to structural damage	Darryll J. Pines, Liming W. Salvino
7	Multifunctional piezoelectric stiffness/energy for monitoring the health of structures	Kelah Wakha, Majeed A. Majeed, Abhijit Dasgupta, Darryll J. Pines
8	Fiber optic strain monitoring of textile GFRP during RTM molding and fatigue tests by using embedded FBG sensors	Tatsuro Kosaka, Katsuhiko Osaka, Satoru Nakakita, Takehito Fukuda
9	Practical issues in self-repairing bolted joints	Daniel M. Peairs, Gyuhae Park, Daniel J. Inman
10	Thermography technique for graphite/epoxy composite structures utilizing embedded thermal fiber optic sensors	Anna Stewart, Gregory P. Carman, W. Lance Richards
11	Development of embedded sensor models in composite laminates for structural health monitoring	Heung S. Kim, Anindya Ghoshal, Aditi Chattopadhyay, William H. Prosser
12	Lamb wave generation with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring	Victor Giurgiutiu
13	Optimization of Lamb wave actuating and sensing materials for health monitoring of composite structures	Seth S. Kessler, Christopher T. Dunn
14	Structural shape sensing for morphing aircraft	Gregory W. Reich, Brian P. Sanders
15	Design and demonstration of a biomimetic wing section using lightweight piezoceramic composite actuator (LIPCA)	S. M. Lim, S. K. Lee, H. C. Park, K. J. Yoon, N. S. Goo

	논문 제목	저자
16	Active coupling enhancement of piezoelectric networks for vibration delocalization of nearly periodic structures	Jianhua Zhang, Kon W. Wang, Hongbiao Yu
17	A comparative study on the effectiveness of piezoelectric patches for active composite panels with surface-mounted and embedded sensors and actuators	Richard Russ, Mehrdad N. Ghasemi-Nejhad
18	Design of a smart panel with multiple decentralized units for the control of sound radiation/transmission	Paolo Gardonio, Emanuele Bianchi, Stephen J. Elliott
19	Feedback-controlled oscillatory motor using ionic polymer materials	Kenneth M. Newbury, Donald J. Leo
20	Ride quality improvement ability of semi-active, active, and passive suspension systems for railway vehicles	Dai-Hua Wang, Wei-Hsin Liao
21	Adaptive resonant shunted piezoelectric devices for vibration suppression	Dominik Niederberger, Manfred Morari, Stanislaw J. Pietrzko
22	Compact biomimetic structure systems with LIPCA and battery-supported power control unit	K. H. Park, K. Y. Kim, J. D. Lee, T. S. Kang, H. C. Park, K. J. Yoon
23	Active stabilization of thin-wall structures under compressive loading	Jared Welham, Emilio P. Calius, J. Geoffrey Chase
24	Vibration isolation of beam structure using hybrid mount associated with rubber and piezoactuator	S. B. Choi, S. H. Kim, S. R. Hong
25	Optimal design of curved actuator through high-performance computing	S. W. Chung, S. J. Kim
26	Development and demonstration of INSTAR: inertially stabilized rifle	Diann E. Brei, James Vendlinski, Douglas K. Lindner, Huiyu Zhu, Chris LaVigna
27	Finite element modeling and optimization of tube-shaped ultrasonic motors	Philippe Bouchilloux, Serra Cagatay, Kenji Uchino, Burhanettin Koc
28	Migration of biodynamic response to vibratory and blast-induced shock loads using magnetorheological seat suspensions	Y. T. Choi, N. M. Wereley
29	A broadband vibration control using passive circuits	Gregory N. Washington, Matt Detrick, S. K. Kwak
30	Application of fiber Bragg grating sensors to real-time strain measurement of cryogenic tanks	Nobuo Takeda, Tadahito Mizutani, Kentaro Hayashi, Yoji Okabe

	논문 제목	저자
31	Detection of missing fastener based on vibration mode analysis using fiber Bragg grating (FBG) sensors	Akiyoshi Shimada, Kei Urabe, Yoshihiro Kikushima, Jun Takahashi, Kazuro Kageyama,
32	Energy-based efficiency of mechanized solid state actuators	Jinyong Joo, Brian P. Sanders, Gregory N. Washington, Jason Adams
33	Piezoelectric ceramic fibers for active fiber composites: a comparative study	Xavier Kornmann, Christian Huber, Hans-Rudolf Elsener
34	Actuation development and evaluation for INSTAR: inertially stabilized rifle	Diann E. Brei, James Vendlinski, Mary I. Frecker, Smita Bharti
35	Directional decoupling of piezoelectric sheet actuators for shape and vibration control of plate structures	Michael K. Philen, Kon W. Wang
36	Fatigue characteristics of lightweight piezocomposite actuators	K. Y. Kim, K. H. Park, N. S. Goo, H. C. Park, K. J. Yoon
37	Manufacturing and testing of active composite panels with embedded piezoelectric sensors and actuators: wires out by molded-in holes	Mehrdad N. Ghasemi-Nejhad, Saeid Pourjalali
38	Smart composites based on piezoceramic tubes	Peter Wierach, Stefan Muehle, Bjoern Nagel
39	Practical optimization of amplification mechanisms for piezoelectric actuators	Philip W. Loveday
40	Shaking table tests on semi-active base-isolation system by magnetorheological fluid damper	Takeshi Hiwatashi, Yoichi Shiozaki, Hideo Fujitani, Chikahiro Minowa, Satsuya Soda
41	Theoretical comparison of different controlled damping devices for cable vibration mitigation	Felix Weber, Glauco Feltrin
42	Position control system using ER clutch and piezoactuator	S. B. Choi, S. S. Han
43	Electrorheological clutches for a robotics application: dynamic, operational, and control considerations	Andrew R. Johnson, Roger Stanway, Kim P. Tan, Neil D. Sims
44	A magnetorheological hydraulic actuator driven by a piezopump	J. H. Yoo, Jayant Sirohi, Norman M. Wereley, Inderjit Chopra
45	An ultrasonic sampler and sensor platform for in situ astrobiological exploration	Yoseph Bar-Cohen, Xiaoqi Bao, Zensheu Chang, Stewart Sherrit
46	Vibration and shape control of hinged light structures using electromagnetic forces	Yuji Matsuzaki, Shigenobu Miyachi, Toshiyuki Sasaki

	논문 제목	저자
47	Vibration control of a gossamer toroidal structure using smart material actuators and sensors	Akhilesh K. Jha, Daniel J. Inman
48	A layered vibration control strategy for space telescopes	Allen J. Bronowicki
49	Onboard assembling of a large space structure by a torque-controlled space robot	Shinichiro Nishida, Tsuneo Yoshikawa
50	Study of a quarter model HMMWV suspension system using a magnetorheological fluid damper	Eyup S. Karakas, Faramarz Gordaninejad, Cahit A. Evrensel, M. S. Yeo, Yanming Liu
51	Time response of a controllable multiplate magnetorheological fluid limited slip differential clutch	Nigar Cobanoglu, Faramarz Gordaninejad, Cahit A. Evrensel, Yanming Liu, Barkan M. Kavlicoglu, George Korol
52	Magnetorheological fluid damper dynamics: models and measurements	Clay W. Maranville, John M. Ginder
53	Applications of cold hibernated elastic memory (CHEM) structures	Witold M. Sokolowski, Shunichi Hayashi
54	Design of space systems using shape memory alloys	Olivier J. Godard, Magdalini Z. Lagoudas, Dimitris C. Lagoudas
55	Design of a novel composite cylinder reinforced with a thin SMA layer	S. H. Lee, Cheol Kim, M. H. Cho
56	In situ rock probing using the ultrasonic/sonic driller/corer (USDC)	Zensheu Chang, Stewart Sherrit, Xiaoqi Bao, Yoseph Bar-Cohen
57	Piezoelectromechanical structures: a survey of basic concepts and methodologies	Francesco dell'Isola, Edmund G. Henneke, Maurizio Porfiri
58	A new cluster control applied to composite board with stiffeners	Yoshihiro Kikushima, Akiyoshi Shimada, Kaori Yuse, Takehiko Segawa, Nobuo Tanaka
59	Properties of orthogonal Stewart platform	John E. McInroy
60	Development of a semi-active friction device to reduce vibration by energy dissipation	Paulin Buaka, Patrice Masson, Philippe Micheau
61	Unstable-unit tensegrity plate: modeling and design	Ron Zaslavsky, Mauricio C. de Oliveira, Robert E. Skelton
62	Robust reduced order model-based control of a smart vibrating cantilever beam	Robin G. Scott, Martin C. Levesley, Michael D. Brown

제 7 장 참고문헌

제3장 제1절 ER 유체 조성기술

1. W. M. Winslow, 1947, Method and Means for Translating Electrical Impulses Into Mechanical Force, *US Patent specification* 2417850.
2. W. M. Winslow, 1949, Induced Fibration of Suspensions, *Journal of Applied Physics*, Vol.20, pp.1137~1140.
3. H. Block, J. P. Kelly, A. Qin, T. Watson, 1990, Materials and Mechanisms in Electrorheology, *Langmuir*, Vol.6, pp.6~14.
4. D. L. Klass, T. W. Martinek, 1967, Electroviscous Fluids I Rheological Properties, *Journal of Applied Physics*, Vol.38, pp.67~74.
5. J. E. Stangroom, 1983, Electrorheological fluids, *Physics in Technology*, Vol.14, pp.290~296.
6. Y. D. Kim, D. J. Klingenberg, 1996, Two Roles of Nonionic Surfactants on the Electrorheological Response, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.183, pp.568~578.
7. H. See, H. Tamura, M. Doi, 1993, The role of water capillary forces in electro-rheological fluids, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.26, pp.746~752.
8. R. A. Anderson, 1994, Electrostatic forces in an ideal spherical-particle electrorheological fluid, *Langmuir*, Vol.10, pp.2917~2928.
9. L. C. Davis, 1992, Finite-element analysis of particle-particle forces in electrorheological fluids, *Applied Physics Letters*, Vol.60, pp.319~320.
10. P. Atten, J-N Foulc, N. Felici, 1994, A Conduction Model of the Electrorheological Effect, *International Journal of Modern Physics B*, Vol.8, pp.2731~2746.
11. J-N Foulc, P. Atten, N. Felici, 1994, Macroscopic model of interaction between particles in an electrorheological fluid, *Journal of Electrostatics*, Vol.33, pp.103~112.
12. X. Tang, C. Wu, H. Conrad, 1995, On the conductivity model for electrorheological effect, *Journal of Rheology*, Vol.39, pp.1059~1073.
13. C. Wu, H. Conrad, 1996, A modified conduction model for the electrorheological effect, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.29, pp.3147~3150.
14. B. Khusid, A. Acrivos, 1995, Effects of conductivity in electricfield-induced aggregation in electrorheological fluids, *Physical Review E*, Vol.52, pp.1669~1693.
15. M. Parthasarathy, D. J. Klingenberg, 1996, Electrorheology: Mechanisms and models, *Materials Science and Engineering*, Vol.R17, pp.7~13.
16. R. Tao, Q. Jiang, 1994, Simulation of structure formation in an electrorheological

- fluid, *Physical Review Letters*, Vol.73, pp.205~208.
17. Y. Otsubo, K. Watanabe, 1990, Electrorheological Behavior of Barium Titanate Suspensions, *Journal of the Society of Rheology, Japan*, Vol.18, pp.111~116.
 18. Y. Chen, A. F. Sprecher, H. Conrad, 1991, Electrostatic particle-particle interactions in electrorheological fluids, *Journal of Applied Physics*, Vol.70, pp.6796~6798.
 19. D. J. Klingenberg, S. van Frank, C. F. Zukoski, 1991, The small shear rate response of electrorheological suspensions II. Extension beyond the point-dipole limit, *Journal of Chemical Physics*, Vol.94, pp.6160~6178.
 20. C. F. Zukoski, 1993, Material Properties and the Electrorheological Response, *Annual Review of Materials Science*, Vol.23, pp.45~78.
 21. M. Parthasarathy, K. H. Ahn, B. Belongia, D. J. Klingenberg, 1994, The Role of Suspension Structure in the Dynamic Response of Electrorheological Suspensions, *International Journal of Modern Physics B*, Vol.8, pp.2789~2810.
 22. H. J. Choi, M. S. Cho and K. To, 1998, Electrorheological and dielectric characteristics of semiconductive polyaniline-silicone oil suspensions, *Physica A*, Vol.254(1-2), pp.272~279.
 23. C. Barthet, S. P. Armes, S. F. Lascelles, S. Y. Luk, HME Stanley, 1998, Synthesis and Characterization of Micrometer-Sized Polyaniline-Coated Polystyrene Latexes, *Langmuir*, Vol.14, pp.2032~2041.
 24. I. S. Sim, J. W. Kim, H. J. Choi, C. A. Kim, M. S. Jhon, 2001, Preparation and Electrorheological Characteristics of Poly(p-phenylene)-Based Suspensions, *Chemistry of Materials*, Vol.13, pp.1243~1247.
 25. H. See, A. Kawai, F. Ikazaki, 2002, Differences in the electrorheological response of a particle suspension under direct current and alternating current electric fields, *Colloid and Polymer Science*, Vol.280, pp.24~29.
 26. BKP Scaife, 1989, Principles of dielectrics. *Oxford*, pp.66~67.
 27. E. P. Giannelis, 1996, Polymer-layered silicate nanocomposites, *Advanced Materials*, Vol.8, pp.29~38.
 28. A. Usuki, M. Koto, A. Okada, T. Krawiec, 1997, Synthesis of Polypropylene-clay hybrid, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.63, pp.137~138.
 29. H. G. Jeon, H. T. Jung, S. D. Lee, S. Hudson, 1998, Morphology of polymer/silicate nanocomposites, *Polymer Bulletin*, Vol.41, pp.107~113.
 30. T. Lan, T. J. Pinnavaia, 1994, Clay-Reinforced Epoxy Nanocomposites, *Chemistry of Materials*, Vol.6, pp.2216~2219.
 31. Y, H, Hyun, S. T. Lim, H. J. Choi, M. S. Jhon, 2001, Rheology of Poly(ethylene oxide)/Organoclay Nanocomposites, *Macromolecules*, Vol.34, pp.8084~8094.
 32. B. H. Kim, J. H. Jung, S. H. Hong, J. W. Kim, H. J. Choi, J. Joo, 2001, Physical

- characterization of emulsion intercalated polyaniline/clay nanocomposite, *Current Applied Physics*, Vol.1, pp.112~115.
33. B. H. Kim, J. H. Jung, S. H. Hong, J. Joo, A. J. Epstein, K. Mizoguchi, J. W. Kim, H. J. Choi, 2002, Nanocomposite of Polyaniline and Na⁺-Montmorillonite Clay, *Macromolecules*, Vol.35, pp.1419~1423.
 34. B. H. Kim, J. H. Jung, J. W. Kim, H. J. Choi, J. Joo, 2001, Effect of dopant and clay on nanocomposites of polyaniline (PAN) intercalated into Na⁺-montmorillonite (Na⁺-MMT), *Synthetic Metals.*, Vol.121, pp.1311~1312.
 35. M. Aldissi, 1993, *Adv. Mater.* Vol.5, pp.60~63.
 36. J. Stejskal, P. Kratochvil, N. Gospodinova, L. Terlmezian, P. Mokreva, 1992, Polyaniline dispersions: preparation of spherical particles and their light-scattering characterization, *Polymer Communication*, Vol.33, pp.4857~4858.
 37. J. Stejskal, P. Kratochvil, 1996, Polyaniline Dispersions. 5. Poly(vinyl alcohol) and Poly(N-vinylpyrrolidone) as Steric Stabilizers, *Langmuir*, Vol.12, pp.3389~3392.
 38. P. Banerjee, S. N. Bhattacharyya, B. M. Mandal, 1995, Poly(vinyl methyl ether) Stabilized Colloidal Polyaniline Dispersions, *Langmuir*, Vol.11, pp.2414~2418.

제3장 제2절 1. ER 유체의 히스테리시스 규명

39. 한영민, 이호근, 최승복, 최형진, 2002, Preisach 모델을 이용한 ER 유체의 온도별 히스테리시스 특성 고찰, *한국소음진동공학회지*, 12권, 8호, pp.648-656.
40. Y. M. Han, S. C. Lim, H. G. Lee, S. B. Choi, 2003, H. J. Choi, Hysteresis Identification of Polymethylaniline-Based ER Fluid Using Preisach Model, *Materials & Design*, Vol.24, No.1, pp.53-61.
41. S. B. Choi and W. K. Kim, 2000, Vibration Control of a Semi-Active Suspension Featuring Electrorheological Fluid Damper, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.234, No.3, pp.537-546.
42. I. D. Mayergoyz, 1991, Mathematical Models of Hysteresis, *Springer-Verlag*, New York.
43. D. Hughes and J. T. Wen, 1994, Preisach Modeling of Piezoceramic and Shape Memory Alloy Hysteresis, *Proceedings of the IEEE control conference on Application*, Albany, New York, pp.1086-1091.
44. J. W. Kim, W. H. Jang, H. J. Choi and J. Joo, 2001, Synthesis and Electrorheological Characteristics of Polyaniline Derivatives with Different Substituents, *Synthetic Metals*, Vol.119, pp.173-174.
45. S. Mittal and C. H. Menq, 2000, Hysteresis Compensation in Electromagnetic Actuators Through Preisach Model Inversion, *IEEE/ASME Transactions on*

Mechatronics, Vol.5, No.4, pp.394-409.

46. D. Song and J. C. Li, 1999, Modeling of Piezo Actuators Nonlinear and Frequency Dependent Dynamics, *Mechatronics*, pp.391-410.

제3장 제2절 2. ER 응용장치의 히스테리시스 모델

47. S. B. Choi, Y. T. Choi, and D. W. Park, 2000, A Sliding Mode Control of a Full-Car Electrorheological Suspension System Via Hardware in-the-loop Simulation, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.112, pp.114~121.
48. S. B. Choi, Y. T. Choi, E. G. Chang, S. J. Han, and C. S. Kim, 1998, Control Characteristics of a Continuously Variable ER Damper, *Mechantronics*, Vol.8, pp.143~161.
49. N. K. Petek, D. J. Romstadt, and T. R. Weyenberg, 1995, Demonstration of an Automotive Semi-Active Suspension Using Electrorheological Dampers, *SAE Technical Paper Series* 950586.
50. G. M. Kamath and N. M. Wereley, 1997, Nonlinear Viscoelastic-Plastic Mechanism-Based Model of an Electrorheological Damper, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.20, No.6, pp.1125~1132.
51. N. M. Wereley, L. Pang, and G. M. Kamath, 1998, Idealized Hysteresis Modeling of Electrorheological and Magnetorheological Dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.9, pp.642~649.
52. B. F. Spencer, S. J. Dyke, M. K. Sain, and J. D. Carlson, 1997, Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol.123, No.3, pp.230-238.
53. S. B. Choi, A. K. Lee, and Y. P. Park, 2001, A Hysteresis Model for the Field-dependent Damping Force of a Magnetorheological Damper, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.245, No.2, pp.375~383.
54. H. Block, and J. P. Kelly, 1989, Review ARTICLE Electro-rheology , *J. of Phys. D : Appl. Physics*, Vol.21, pp.1661~1677.

제3장 제2절 3. ER 속 업소버 설계를 위한 무차원 모델

55. R. Stanway, J. L. Sproston, and A. K. El-Wahed, 1996, Application of Electro-rheological Fluids in Vibration Control : A Survey, *Smart Materials and Structures*, Vol.5, No.4, pp.464~482.
56. S. B. Choi, Y. T. Choi, E. G. Chang, S. J. Han, and C. S. Kim, 1998, Control

- Characteristics of a Continuously Variable ER Damper, *Mechatronics*, Vol.8, 143~161.
57. S. B. Choi, Y. T. Choi, and D. W. Park, 2000, A Sliding Mode Control of a Full-Car Electrorheological Suspension System Via Hardware in-the-loop Simulation, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.112, pp.114~121.
 58. Y. T. Choi, N. M. Wereley, and Y. S. Jeon, 2002, Semi-active Vibration Isolation Using Magnetorheological Isolators, *Smart Structures and Integrated Systems, Proceedings of SPIE*, Vol.4697, pp.474~486.
 59. R. W. Phillips, 1969, Engineering Application of Fluids with Variable Yield Stress, *PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, U.S.A.*
 60. N. Makris, S. A. Burton, and D. P. Taylor, 1996, Electrorheological Damper with Annular Ducts for Seismic Protection Applications, *Smart Materials and Structures*, Vol.5, pp.551~564.
 61. H. P. Gavin, R. D. Hanson, and F. E. Filisko, 1996, Electrorheological Dampers, Part I : Analysis and Design, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol.63, pp.669~675.
 62. H. P. Gavin, 1996, Design Method for High-force Electrorheological Dampers, *Smart Materials and Structures*, Vol.7, pp.664~673.
 63. D. J. Peel, R. Stanway, and W. A. Bullough, 1996, Dynamic Modelling of an ER Vibration Damper for Vehicle Suspension Applications, *Smart Materials and Structures*, Vol.5, pp.591~606.
 64. N. M. Wereley and L. Pang, 1998, Nondimensional Analysis of Semi-active Electrorheological and Magnetorheological Dampers Using Approximate Parallel Plate Models, *Smart Materials and Structures*, Vol.7, pp.732~743.
 65. R. A. Snyder and N. M. Wereley, 1999, Characterization of a Magnetorheological Fluid Damper Using a Quasi-Steady Model, *Smart Structures and Integrated Systems, Proceedings of SPIE*, Vol.3668, pp.474~486.
 66. W. Prager, 1961, Introduction to Mechanics of Continua, *Ginn and Company, New York*.
 67. W. C. Park, 1997, Bingham Characteristic of ER Fluids and Their Influence on Damping Forces of an ER Damper, *PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Inha University, Korea*.
 68. S. B. Choi, 1998, Development of Advanced ER Fluids and Control Schemes for Active Suspension Application, *Technical Report for Korea Agency for Defense Development*.

제3장 제2절 4. ER 시트 댐퍼

69. S. Rahkeja, Y. Afework and S. Sankar, 1994, An Analytical and Experimental Investigation of the Driver-Seat-Suspension System, *Vehicle System Dynamics*, 23, pp.501~524.
70. D. Karnopp, M. J. Corsby and R. A. Harwood, 1974, Vibration Control Using Semi-Active Force Generator, *Transaction of the ASME*, pp.619-626.

제3장 제2절 5. ER ABS

71. S. Drakunov, U. Ozguner, P. Dix and B. Ashrafi, 1995, ABS Control Using Optimum Search via Sliding Modes, *IEEE Trans. on Control Systems Tech.*, Vol.3, No.1, pp.79~85.
72. Y. K. Chin, W. C. Lin, D. M. Sidlosky and D. S. Rule, 1992, Sliding-Mode ABS Wheel-Slip Control, *Proceedings of the ACC*, Chicago IL, June 24-26, Vol.1, pp.1~6.
73. G. F. Mauer, 1995, A Fuzzy Logic Controller for an ABS Braking System, *IEEE Trans. on Fuzzy System*, Vol.3, No.4, pp.381~388.
74. J. R. Layne, K. M. Passino and S. Yurkovich, 1992, Fuzzy Learning Control for Anti-skid Braking System, *Proceedings of IEEE Conf. on Decision and Control*, AZ, Vol.4, pp.2523~2528.
75. M. Ohba, H. Kuraoka, N. Matsumoto, N. Ohka and T. Tabe, 1986, Automotive Antiskid System Based on Modern Control Theory, *Proceedings of International Conference on Applied Motion Control*, Vol.1, pp.253~257.
76. J. B. Song and B. C. Kim, 1998, Development of Engine Control Based TCS Slip Control Algorithm Using Engine Map, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol.22, No.2, pp.428~436.
77. J. M. Ginder and S. L. Ceccio, 1995, The Effects of Electrical Transients on the Shear Stresses in Electrorheological Fluids, *Journal of Rheology*, Vol.39, No.1, pp.211~234.
78. A. J. Simmonds, 1991, Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit, *IEE Proceeding-D*, Vol.138, No.4, pp.400~404.
79. S. B. Choi, C. C. Cheong, J. M. Jung, Y. T. Choi, 1997, Position Control of an ER Valve-Cylinder System via Neural Network Controller, *Mechatronics*, Vol.7, No.1, pp.37~52.
80. P. A. Shavrin, 1995, Control of Independent Rear Wheel Drive Vehicle,

Proceedings of IEEE Conf. on Decision and Control, Vol.4, pp.4380~4385.

81. A. T. van Zanten, R. Erhardt and G. Pfaff, 1995, VDC, The Vehicle Dynamics Control System of Bosch, *SAE paper*, No.950759.
82. S. B. Choi and J. S. Kim, 1997, A Fuzzy-Sliding Mode Controller for Robust Tracking of Robotic Manipulators, *Mechatronics*, Vol.7, No.2, pp.199~216.

제3장 제2절 6. ER엔진 마운트

83. M. Bernuchon, 1984, A New Generation of Engine Mounts, SAE, 840259, pp.230~236.
84. Y. Yu, Peelamedu, S. M., Naganathan, N. G., Dukkipati, R. V., 2001, Automotive Vehicle Engine Mounting Systems : A Survey, ASME, Vol.123, pp.186~194.
85. W. H. Winslow, 1949, Induced Vibration Suspensions, *Journal of Applied Physics*, Vol.20, pp.1137~1140.
86. R. Singh, G. Kim, and P. V. Ravinda, 1992, Linear Analysis of Automotive Hydro-Mechanical Mount with Emphasis on Decoupler Characteristics, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.158, No.2, pp.219~243.

제3장 제3절 강건제어기 설계 기술

87. S. B. Choi, Y. T. Choi and D. W. Park, 2000, A Sliding Mode Control of a Full-Car Electrorheological Suspension System Via Hardware-in-the-loop Simulation, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.122, No.1, pp.114~121.
88. S. B. Choi, 1998, Development of Advanced ER Fluids and Control Schemes for Active Suspension Application, *Technical Report for Korea Agency for Defense Development*, No.UD980039CD.2.
89. D. C. McFarlane, K. Glover, 1992, A Loop Shaping Design Procedure Using H_∞ Synthesis, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.37, No.6, pp.759~69
90. G. Leitmann, 1981, On the Efficiency of Nonlinear Control in Uncertain Linear Systems, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.102, pp.95~102.
91. S. Hui and S. H. Zak, 1992, Robust Control Synthesis for Uncertain/Nonlinear Dynamical Systems, *Automatica*, Vol.28, No.2, pp.289~298.5.
92. S. B. Choi, D. W. Park and S. Jayasuriya, 1994, A Time-Varying Sliding Surface for Fast and Robust Tracking Control of Second-Order Uncertain Systems, *Automatica*, Vol.30, No.5, pp.899~904.

93. G. Leitmann, 1994, Semiactive Control for Vibration Attenuation , *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.5, No.5, pp.841~846.
94. S. B. Choi, S. S. Han, 2003 H_∞ Control of Electrorheological Suspension System Subjected to Parameter Uncertainties , *Mechatronics*, Vol. 13, No. 7, pp. 639~657.
95. S. B. Choi, S. S. Han, 2002, Control Performance of an Electrorheological Suspension System Considering Actuator Time Constant, *International Journal of Vehicle Design*, Vol.29, No.3, pp.226~242.
96. S. S. Han, J. S. Park, S. B. Choi, J. H. Kim, H. J. Choi, 2003, Robust Sliding Mode Control of an Electrorheological Suspension System with Parameter Perturbations, *International Journal of Vehicle Design*, Vol.33, No.3, pp.279~295.
97. N. Kapoor, A. R. Teel, and P. Daoutidis, 1998, An Anti-windup Design for Linear Systems with Input Saturation, *Automatica*, Vol.34, No.5, pp.559~574.

제3장 제4절 차량용 ER 응용장치 설계프로그램 개발

98. 안창섭, 최영태, 최승복, 1998, HILS를 통한 ER 현가장치의 성능평가, 대한기계학회 논문집 A권, 제 22권 제 11호, pp. 2061-2071.
99. 최영태, 김기선, 최승복, 정재천, 전영식, 1994, 전기유동유체를 이용한 엔진마운트 모델구성과 성능해석, 한국자동차공학회지, 제 2권, 제 3호, pp.62-74.
100. S. B. Choi and H. J. Song, 2002, Vibration Control of a Passenger Vehicle Utilizing a Semi-Active ER Engine Mount, *Vehicle System Dynamics*, Vol.37, No.3, pp. 193-216.
101. S. B. Choi and M. S. Cho, 2000, Position Control of a 3-dof Closed-loop Cylinder System Using ER Valve Actuators, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.7, No.3, pp. 165-173.

특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	국가지정연구실 사업		
	세부사업명	-		
과제명	차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술			
연구기관	인 하 대 학 교	연구책임자	최 승 복	
총연구기간	2001년 07월 11일 ~ 2006년 07월 10일 (60개월)			
총 연구비 (단위 : 천원)	정부출연금	민간부담금	합계	
	1,343,100		1,343,100	
기술분야	대분류 : 200, 중분류 : 220, 소분류 : 225			
참여기업				
공동연구기관				
위탁연구기관				
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)	1. 기업화(√)	2. 기술이전(√)	3. 후속연구추진(√)	4. 타사업에 활용(√)
	5. 선행 및 기 초연구(√)	6. 기타목적활용 (교육연구)()	7. 활용중단(미활용)()	8. 기타()

특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거
연구결과 활용계획서를 제출합니다.

- 첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부.
2. 기술요약서 1부

2003 년 09 월 10 일

연구책임자 : 최 승 복

연구기관장 : 홍 승 용



(직인)

과학기술부장관 귀하

[첨부1]

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

본 과제의 최종 연구목표는 지능재료 중의 하나인 ER 유체를 사용하여 경제적 파급 효과가 크고 핵심기술의 기반성이 매우 강한 차량관련 ER 응용장치의 설계 및 제어기술을 제안하고 이를 이용하여 속업소바, 시트 댐퍼, 엔진 마운트, 대쉬 패널, ABS 등 차량용 ER 부품을 개발하는 데 있다.

1단계 연구의 세부목표는 항복응력 1.5kPa 이상, 반응시간 5msec. 미만, 작동온도범위 10℃~100℃인 ER 유체를 개발하고 ER 유체 및 ER 응용장치의 히스테리시스 모델링 기법 및 무차원화 설계 기법을 확보하며 ER 유체 및 주위 환경 변수를 고려한 강건제어 기법을 적용한다. 2단계 연구는 항복응력 1.8kPa 이상, 반응시간 5msec. 미만, 작동온도범위 -10℃~120℃인 ER 유체 및 ER 응용장치의 최적설계 모델과 모듈화 설계 기법을 개발하고 차량용 ECU와의 인터페이스화 그리고 실차 시험을 시행할 예정이다.

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록) 일자	발명자 (출원인)	출원국
선형모터 성능평가용 다이내모미터	10-2002-0012007	2002. 3. 6	최승복	한국
압착모드형 전기유동유체 마운트 장치	10-2002-0021815	2002. 4.20	국방과학 연구소	한국
폴리아닐린 코팅된 폴리메틸메타아크릴 레이트 입자형 전기유변유체 및 이의 제조방법	제2002-32795호	2002. 6.12	학교법인 인하학원	한국
인산화 전분을 전도성 입자로 구성한 전기유변유체 및 그의 제조방법	제2002-33104호	2002. 6.14	학교법인 인하학원	한국
압전밸브 모듈레이터 및 이를 포함하는 안티록 브레이크 시스템	제2003-1420호	2003. 1. 9	학교법인 인하학원	한국
ER 밸브 모듈레이터 및 이를 포함하는 안티록 브레이크 시스템	제2003-1421호	2003. 1. 9	학교법인 인하학원	한국
폴리아닐린 유도체를 전도성 입자로 구성한 전기유변유체	10-2003-0029655	2003. 5.10	학교법인 인하학원	한국

나. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고

다. 노하우 내역

- 비수계 폴리아닐린 ER 유체 조성 기술
- ER 유체 및 그 응용장치의 히스테리시스 모델 구축
- ER 응용장치의 설계 및 해석 프로그램 코드 개발 기술
- ER/MR 유체를 이용한 선형 다이내모미터 개발 기술

라. 발생품 및 시작품 내역

- Microprocessor Development System (1set)
- ER 패널 성능평가 장치 (1set)
- ER 유체 인장/압축 시험기 (1set)
- 고전압 앰프 (3set) 및 고전압 차단회로 (1set)
- ER 속업소버 (4set)
- ER 엔진마운트 (2set)
- ER 시트댐퍼 (2set)
- ER ABS (1set) 및 ABS용 ER 밸브 (2set)
- ER 대쉬패널 (2set)

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적

학술지 명칭	제목	게재 연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
Journal of Industrial and Engineering Chemistry	Damping Characteristics of Polyaniline Based Electrorheological Fluid	2001. 7	7, 4	Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry	한국	○
Journal of Intelligent Material Systems and Structures	Vibration Control of a CD-ROM Feeding System Using Electrorheological Mounts	2001. 9	12, 9	Sage Publication	영국	○
International Journal of Vehicle Design	Control Performance of an Electrorheological Suspension System Considering Actuator TimeConstant	2002. 3	29, 3	Inderscience Enterprise	스위스	○
Polymeric Materials; Science and Engineering	Synthesis and Electrorheology of Polyaniline : Effect of Poly(methyl vinyl ether-alt-maleic acid) Stabilizer	2002. 4	87	ACS	미국	○
Synthetic Metals	Synthesis and Characterization of Organoclay Nanocomposite with Poly(o-ethoxyaniline)	2002. 4	135-136	Elsevier Science	스위스	○
Macromolecular Chemistry and Physics	Synthesis and Electrorheology of Semiconducting Poly(naphthalene quinone) Radical Particles	2002. 5	203, 8	John Wiley & Sons Inc.	독일	○
Vehicle System Dynamics	Vibration Control of a Passenger Vehicle Utilizing a Semi-Active ER Engine Mount	2002. 5	37, 3	Swets & Zeitlinger	네덜란드	○
Journal of Intelligent Material Systems and Structures	Electrorheological Semi-Active Damper : Polyaniline Based ER System	2002. 7	13, 7	Elsevier Science	스위스	○
Journal of Intelligent Material Systems and Structures	Vibration Control Evaluation of a Commercial Vehicle Featuring MR Seat Dampers	2002. 9	13, 9	Sage Publication	영국	○
Journal of Intelligent Material Systems and Structures	An Experimental Investigation on Mechanical Fatigue Property of Chemical Starch-Based ER Fluids	2002.10	13, 10	Sage Publication	영국	○
International Journal of Mechanical Science	Vibration Control of a Frame Structure Using Electrorheological Fluid Mounts	2002.10	44, 10	Elsevier Science	스위스	○
Vehicle System Dynamics	H _∞ Control Performance of a Full-Vehicle Suspension Featuring Magnetorheological Dampers	2002.11	38, 5	Swets & Zeitlinger	네덜란드	○

학술지 명칭	제목	게재 연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
Proceedings of the Institution Mechanical Engineers : Part D - Journal of Automobile Engineering	Sliding Mode Control for Anti-lock Brake System of Passenger Vehicle Featuring Electrorheological Valves	2002.11	216, D11	IMechE	영국	○
Colloid and Polymer Science	Electrorheological Characterization of Polyaniline-Coated Poly(methyl methacrylate) Suspensions	2002.11	280	Springer -Verlag	독일	○
Smart Materials and Structures	Noise Reduction of Passive and Active Hybrid Panels	2002.12	11, 10	Institute of Physics Publishing	영국	○
Materials Chemistry and Physics	Electrorheological Response of Biocompatible Chitosan Particles in Corn Oil	2003. 1	77	Elsevier Science	스위스	○
Materials & Design	Hysteresis Identification of Polymethylaniline-Based ER Fluid Using Preisach Model	2003. 2	24, 1	Elsevier Science	스위스	○
Materials Research Innovations	Synthesis and Characterization of Polysaccharide Phosphates Based Electrorheological Fluids	2003. 6	7, 3	Springer -Verlag	독일	○
Journal of Material Science Letter	Liquid Crystal Added Electrorheological Fluid	2003. 6	22, 11	Kluwer Academic Publication	네델란드	○
International Journal of Vehicle Design	Vibration Control of a Passenger Vehicle Featuring Magnetorheological Engine Mount	2003. 7	33, 1	Inderscience Enterprise	스위스	○
International Journal of Vehicle Design	Comparison of Damping Force Models for an Electrorheological Fluid Damper	2003. 7	33, 1	Inderscience Enterprise	스위스	○
International Journal of Vehicle Design	Robust Sliding Mode Control of an Electrorheological Suspension System with Parameter Perturbations	2003. 7	33, 3	Inderscience Enterprise	스위스	○
International Journal of Vehicle Design	ER Inserts for Shock Wave Reduction in Structures	2003. 7	33, 3	Inderscience Enterprise	스위스	○
International Journal of Vehicle Design	MR Seat Suspension for Vibration Control of a Commercial Vehicle	2003. 7	31, 2	Inderscience Enterprise	스위스	○
Mechatronics	H_{∞} Control of Electrorheological Suspension System Subjected to Parameter Uncertainties	2003. 9	13, 7	Elsevier Science	스위스	○
한국정밀공학회지	압착모드 하에서 ER 유체의 빙행특성 및 댐핑력 제어	2002.11	19, 11	한국정밀공학회	한국	X
한국소음진동공학회지	Preisach 모델을 이용한 ER 유체의 온도별 히스테리시스 특성 고찰	2002. 8	12, 8	한국소음진동공학회	한국	X
계: 27건수						

○ 학술회의 발표 실적

학술회의 명칭	제목	계재연월일	호	발행기관	국명
The eighth International Conference on ER Fluids and MR Suspensions	An Experimental Investigation on Mechanical Fatigue Property of Chemical Starch-Based ER Fluids	01. 7. 9 ~ 13		World Scientific	프랑스
The eighth International Conference on ER Fluids and MR Suspensions	Vibration Control Evaluation of a Commercial Vehicle Featuring MR Seat Dampers	01. 7. 9 ~ 13		World Scientific	프랑스
The eighth International Conference on ER Fluids and MR Suspensions	Electrorheological Semi-Active Damper : Polyaniline Based ER System	01. 7. 9 ~ 13		World Scientific	프랑스
SPIE International Symposium	Vibration Control of a Passenger Car Using MR Engine Mounts	02. 3.17 ~ 21		SPIE	미국
한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회	ER 댐퍼의 이력현상을 고려한 댐핑력 특성 고찰	02. 5.29 ~ 31		한국소음진동공학회	한국
한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회	Preisach 모델을 이용한 ER 유체의 온도별 히스테리시스 특성 고찰	02. 5.29 ~ 31		한국소음진동공학회	한국
SPIE International Symposium	Electrically Activated Paper Actuators	02.10. 2		SPIE	호주
SPIE's 10th Annual International Symposium	Position Control System Using ER Clutch and Piezoactuator	03. 3. 5		SPIE	미국
SPIE's 10th Annual International Symposium	Paper Fiber Studies for Electro-Active Paper Actuators	03. 3. 5		SPIE	미국
SPIE's 10th Annual International Symposium	Design and Control Issues on a Hybrid Linear Motor Working on Selfmoving Cell Concept	03. 3. 6		SPIE	미국
2003 춘계 소음진동 학술대회	다구찌법을 이용한 ER 댐퍼의 강건설계	03. 5.22		한국소음진동공학회	한국
The Thirteenth(2003) International Offshore and Polar Engineering Conference	ER/MR Smart Structures for Shock Wave Reduction	03. 5.25 ~ 30		International Offshore and Polar Engineering Conference	미국
The Ninth International conference on ER Fluids and MR Suspensions	Robust Control of a Semi-Active Vehicle Suspension System Featuring ER Fluid Damper (invited)	03. 8.11 ~ 15		World Scientific	중국
계: 13건수					

3. 연구성과

- 아라빅검계 ER 유체 특허등록 및 연구샘플용으로 ER 유체 판매(한국중공업 등)
- ER서보 밸브 및 제작기술을 (주)인텔리전트 하이드로릭에 이전
- ILS System(주)와 ER 응용장치용으로 사용할 수 있는 상업용 고전압증폭기 개발 중
- 연세대 기계공학과, 명지대 기계공학과, 계명대 자동차공학과에 ER 시험방법 및 응용 장치시험방법 자문 등

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해연도 활용계획

본 연구의 1단계에서 핵심기술로써 개발되고 있는 ER 유체 입자 조성 관련 기술을 바탕으로 당해연도에 정부, 기업 및 대학의 관련 연구단체(한국기계연구원, 한국중공업, 연세대학교 등)에 ER 유체 입자 및 관련 기술을 지속적으로 제공함으로써 ER 유체 기술이 여러 산업분야에 효과적으로 활용될 있도록 지원할 계획이다.

나. 활용방법

- 한국 중공업 : ER 유체를 이용한 베어링
- 한국기계연구원 : Si Wafer 평탄화 가공
- 연세대학교 : 초정밀 연마기술 개발
- 명지대학교 : ER 유체를 이용한 응용장치

등을 위한 연구용으로 ER 유체를 유/무상으로 제공하고 관련기술을 지속적으로 지원한다. 또한 기타 관련 연구기관 및 대학에도 연구용 샘플을 제공하도록 한다.

다. 차년도 이후 활용계획

본 연구에서 제안한 핵심기술은 차량을 비롯한 여러 산업분야에 효과적으로 활용될 수 있다. 따라서 차년도 이후에는 이에 대한 기술이전과 기술지도를 위하여 인하대학교 내에 국내외에서 이용 가능한 ER 기술정보 사이트를 개설/운영할 예정이며, 향후 목표 대상 자동차 부품이 성공적으로 개발된다면 워크샵을 통하여 국내 관련 자동차 부품회사에 기술이전을 추진하고, 이를 바탕으로 속 업소바와 엔진 마운트 등의 ER 부품들은 현대모비스를 통해 실용화를 추진해 나가고, ER ABS는 Delphi와 만도기계 등 국내외 업체와 공동으로 상용화 할 계획이다. 더불어 ILS System(주)와 ER 응용장치용으로 사용할 수 있는 상업용 고전압증폭기를 실용화 할 것이다.

5. 기대효과

본 연구에서 제안하고 있는 차량관련 ER 유체 기술은 낮은 원가로부터 고부가가치의 창출을 기대할 수 있는 원천 기술기반형 성격을 갖고 있다. 따라서 본 기술은 어느 특정한 시스템을 위한 기술이라기보다는 여러 산업분야의 각종 제어 시스템에 매우 효과적으로 적용될 수 있다. 또한, ER 유체 관련 기술은 기계, 전기, 전자, 물리, 화학 및 재료과학 등의 통합기술 성격을 갖고 있기 때문에 매우 다양한 적용분야를 갖고 있다. ER 유체 관련 기술개발을 통해 창출되는 시장규모는 향후 급격히 증가되어 5년 후의 국내외 시장규모는 매우 클 것으로 예상된다. 특히, 현재 판매되고 있는 독일 Bayer사의 ER 유체가 1ℓ당 80만원, 영국 ER Fluids Development(ERFD)사 ER 유체가 1ℓ당 150만원인 것을 감안할 때, 본 연구의 미추진시 발생하는 외국기술료 지불액은 매우 클 것으로 예상된다. 또한, 신차의 부품개발비는 일반적인 가격이 있는 것이 아니라 조건에 따라 협상해야 되기 때문에 매우 높은 단가를 요구하므로 기술 미보유시 신차개발에 따른 부품 개발비로 수억에서 수십억원을 매년 외국에 지불해야 하며(예: Delphi에서 승용차용 ER 속 업소바의 개발비로 1억2천만원이 소요될 것으로 예상), 연간 100만대 이상의 국내 자동차 판매량을 고려할 때 실용화 성공에 따른 매출액 및 수입 대체 효과는 엄청날 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안하고 있는 핵심기술 중 차량관련 **국내 ER 유체 개발기술**은 선진국에 비하여 적지 않은 격차를 보이고 있으나, 본 연구의 1단계에서 개발된 공중합체 ER 입자 기술을 바탕으로 2단계에서는 표면 코팅 기술과 계면활성제 이용 기술을 중점적으로 추진한다면 향후 3년 이내에 현재 기술주도권을 갖고 있는 독일 및 일본과 대등한 관계가 될 것으로 판단한다. 그리고 **ER 응용장치 설계 및 제작기술**에서는 정확한 유동특성 해석과 연계된 최적설계 모델을 개발함으로써 선진국과의 기술격차를 현격하게 줄일 수 있고, **ER 응용장치의 제어기술**에서는 실용화를 위한 ECU와의 인터페이스 기술을 확립하고 각종 강건제어기의 마이크로칩 개발을 통하여 향후 3년 이내에 국제적 기술우위를 선점할 것으로 확신한다.

또한 본 연구에서 제안하고 있는 차량관련 ER 유체 기술은 기계, 전기, 전자, 물리, 화학, 고분자 등의 통합기술 성격을 갖고 있기 때문에 그 적용범위가 매우 다양하며 광범위하다. 새로운 차원의 차량부품 개발을 통한 경쟁력 있는 시장의 창출과 이에 따른 수출 및 고용증대 효과는 물론 여러 산업분야에 효과적인 적용으로 막대한 경제·산업적 효과를 꾀할 수 있을 것으로 확신한다. 나아가서 스마트 자동차의 출현과 지진이나 외란에 견고히 견딜 수 있는 스마트 교량 등의 등장으로 사회적·문화적 측면에서도 적지 않은 기대효과를 가져올 수 있을 것으로 확신한다.

6. 문제점 및 건의사항 : 해당 사항 없음.

[첨부2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

ER 유체 조성 기술

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0104-00-0013			
과제명	차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술			
사업명	국가지정연구실 사업			
세부사업명	-			
연구기관	인 하 대 학 교	기관유형		
참여기관(기업)				
총연구기간	2001년 07월 11일 ~ 2006년 07월 10일 (60개월)			
총연구비	정부(1,343,100)천원 민간()천원 합계(1,343,100)천원			
연구책임자 1	성명	최 승 복	주민번호	
	근무기관 부서	인하대학교 기계공학부	E-mail	seungbok@inha.ac.kr
	직위/직급	교수	전화번호	032-860-7319
연구책임자 2	성명		주민번호	
	근무기관 부서		E-mail	
	직위/직급		전화번호	
실무연락책임자	성명		소속/부서	
	직위/직급		E-mail	
	전화번호		FAX	
	주소	(-)		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

1. 차량용 ER 응용장치의 성공적 개발을 위해 실제 차량의 운전 중에 나타나는 다양한 작동조건 및 작동환경에 맞는 ER 유체의 조성기술을 개발하였다.
2. 항복응력 1.5kPa, 반응시간 5ms미만, 작동온도 10~100℃인 ER 유체를 개발하였다.
3. 전기전도성 고분자로 제조가 용이하고, 우수한 전기적 특성 및 저 밀도로 인한 분산 안정성, 고온 안정성 등을 갖는 폴리아닐린을 이용하여 ER 유체 입자를 개발하였다.
4. 입자의 모양을 구형으로 얻고, 이를 이용하여 정확한 ER 효과 메카니즘 규명과 동시에 보다 나은 ER 효과를 얻기 위하여 역상 유화중합으로 입자를 제조하였다.
5. 폴리아닐린 입자의 전기전도도를 제어하기 위하여 입자표면을 코팅처리 하였다.
6. 비 이온성 계면활성제를 도입하여 입자의 분산안정성 및 전기장 비인가시의 점도를 낮춘 ER유체를 제조하였다.

<기술적 특징>

- (1) 입자 중량비 및 분산오일의 점도, 유전율을 조절할 수 있으므로 응용장치별 최적의 ER유체를 제공한다.
- (2) 입자의 농도를 34wt%까지 높이면서도 흐름성을 확보하여 실제 응용에 대한 고려를 하였다.
- (3) 전기장을 6kV/mm까지 안정적으로 가할 수 있으며, 5kV/mm에서 1.5kPa이상의 항복응력을 얻었다. 또한 이러한 응력값을 10~100℃까지 온도가 변화되어도 1.8~2.2kPa 범위에서 일정하게 유지하였다.

[용도 · 이용분야]

- (1) ER 유체조성 및 분석기술은 고분자 신소재개발 및 가공기술분야에 해당되는 기술로 입자의 계면현상 분석기술, 입자소재 개발기술, 고분자입자의 합성 및 블렌드기술, 미립자 가공기술, 화학적 안정화 및 분석기술, 유변학 시험장치 설계 및 제작기술, 시험조건 및 장비의 표준화기술, 환경친화성 유체 개발기술에 핵심이 되는 기술이다.
- (2) ER 응용장치 설계, 해석 및 제작기술 그리고 ER 응용장치, 제어기술과 연계되어 각종 시스템의 진동제어 및 방진 및 동적 시스템의 안정화 등에 활용될 수 있다.
- (3) 본 연구에서 개발한 ER 유체는 비수계 ER 유체로서 기존의 수계 ER 유체(실리카겔 등)에 비하여 온도변화에 강건하면서 저침전성을 보이고 있기 때문에 차량뿐만 아니라 항공기의 랜딩기어, 교량 댐퍼, 정밀 테이블 댐퍼 등에 활용될 수 있으며, 나아가서 초정밀 가공에도 적용될 수 있다.

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	Carbonyl iron 입자를 이용한 MR 유체 개발
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input checked="" type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	Carbonyl iron을 입자로 이용하는 MR 유체를 개발하였고, 낮은 자기장 하에서의 MR 유체의 특성을 고찰

[기술을 도출한 과제현황]

과제관리번호	M1-0104-00-0013			
과제명	차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술			
사업명	국가지정연구실 사업			
세부사업명	-			
연구기관	인 하 대 학 교	기관유형		
참여기관(기업)				
총연구기간	2001년 07월 11일 ~ 2006년 07월 10일 (60개월)			
총연구비	합계 : (1,343,100)백만원 - 정부 : (1,343,100)백만원 민간 : ()백만원			
연구책임자	소속	인 하 대 학 교	성명	최 승 복
	전화번호	032-860-7319	E-mail	seungbok@inha.ac.kr
연구개발 주요내용				
<p>본 연구의 목표는 차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술을 완성하는 것이며, 이를 위하여 다음과 같은 세 가지 핵심 기술을 개발하는 것을 주요 내용으로 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ER 유체 조성 기술 : 비수계 입자의 하나인 폴리아닐린 입자를 이용하여 최적의 공정을 통한 우수한 성능의 ER 유체를 개발. (항복응력: 1.5kPa, 온도범위: 10℃~100℃인 ER 유체) 2. ER 응용장치 설계 및 해석기술 : 차량용 ER 응용장치의 작동 모드를 분석하여 최적의 작동 메커니즘 설계기술 개발. (ER 응용장치의 히스테리시스 현상 규명: Hydraulic 모델, ER 유체에 대한 히스테리시스 현상 규명: Preisach 모델, ER 응용장치의 설계 프로세스 개발: 무차원 설계 모델) 3. 제어성능 평가기술 : 차량 동역학 및 기존 차량용 ECU와 연계된 실차용 제어시스템 구축. (시스템 불확실성, 외란, 온도변화 등을 고려한 강건 제어를 설계, 입력포화를 고려한 제어로직을 개발) 				

[기술개요]

기술명	압전 밸브를 이용한 ABS 시스템 개발
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input checked="" type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	빠른 응답특성과 우수한 미소변위 분해능력을 갖는 압전 재료를 이용하여 압전 펌프 및 밸브를 제작하였으며, 압력제어와 연계된 차륜의 슬립을 제어기 설계를 통해 차량의 제동 성능과 제동시 안정성의 개선에 우수한 성능을 보일 수 있는 ABS를 개발하였다.

[기술을 도출한 과제현황]

과제관리번호	M1-0104-00-0013			
과제명	차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술			
사업명	국가지정연구실 사업			
세부사업명	-			
연구기관	인 하 대 학 교	기관유형		
참여기관(기업)				
총연구기간	2001년 07월 11일 ~ 2006년 07월 10일 (60개월)			
총연구비	합계 : (1,343,100)백만원 - 정부 : (1,343,100)백만원 민간 : ()백만원			
연구책임자	소속	인 하 대 학 교	성명	최 승 복
	전화번호	032-860-7319	E-mail	seungbok@inha.ac.kr
연구개발 주요내용				
<p>본 연구의 목표는 차량용 ER 응용장치의 설계 및 제어기술을 완성하는 것이며, 이를 위하여 다음과 같은 세 가지 핵심 기술을 개발하는 것을 주요 내용으로 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ER 유체 조성 기술 : 비수계 입자의 하나인 폴리아닐린 입자를 이용하여 최적의 공정을 통한 우수한 성능의 ER 유체를 개발. (항복응력: 1.5kPa, 온도범위: 10℃~100℃인 ER 유체) 2. ER 응용장치 설계 및 해석기술 : 차량용 ER 응용장치의 작동 모드를 분석하여 최적의 작동 메커니즘 설계기술 개발. (ER 응용장치의 히스테리시스 현상 규명: Hydraulic 모델, ER 유체에 대한 히스테리시스 현상 규명: Preisach 모델, ER 응용장치의 설계 프로세스 개발: 무차원 설계 모델) 3. 제어성능 평가기술 : 차량 동역학 및 기존 차량용 ECU와 연계된 실차용 제어시스템 구축. (시스템 불확실성, 외란, 온도변화 등을 고려한 강건 제어를 설계, 입력포화를 고려한 제어로직을 개발) 				

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.