스마트 ER유체의 응용기술

최 승 복

(인하대학교 기계공학과)

'75 - '79 인하대학교 기계공학과 (학사)
'78 - '84 대한항공 항공기술연구소 연구원
'84 - '86 미국 미시간 주립대학교 (석사)
'86 - '90 미국 미시간 주립대학교 (박사)
'90 - '91 한국기계연구원 선임연구원
'91 - 현재 인하대학교 기계공학과 교수

홍 성 룡

(인하대학교 기계공학과)

'91 - '96 인하대학교 기계공학과 (학사)
'97 - '99 인하대학교 기계공학과 (석사)
'99 - 현재 인하대학교 기계공학과 (박사과정)

송 현 정

(인하대학교 기계공학과)

'94 - '98 조선대학교 기계공학과 (학사)
'98 - '00 인하대학교 기계공학과 (석사)
'00 - 현재 인하대학교 기계공학과 (박사과정)

1. 서 론

ER유체는 가해지는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 말로서, 기본적으로 비전도성 용매에 강한 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드 용액이다. 1949년 Winslow[1]가 실리카 입자를 분산시킨 유체에 전기장을 부하하면 전기장의 강도에 따라 유체의 점성이 변함을 처음으로 발표하였다. ER유체는 전기장 무부하 시에는 비전도성 용매에 분산된 입자가 자유로이 운동하는 뉴토니안유체(Newtonian fluid)와 같은 거동을 나타내지만, 전기장 부하 시에는 항복응력을 갖는 빙햄거동(Bingham behavior)을 나타내게 된다. 비전도성 용매에 분산된 입자는 용매와 다른 투과율을 갖고 있어 외부에서 부가되는 전기장에 의해 입자에 분극이 발생되어 국부적으로 다른 전기장을 형성하게 된다. 분극이 발생된 입자는 서로 연결되어 전극을 향하여 고리모양의 체인 구조를 형성하게 된다. 전기장 부하 시 전기장 방향으로 형성되는 체인 구조는 입자들의 결합력에 의하여 외부에서 가해지는 전단력에 대해 저항을 갖게 되어, 유체의 유동을 제한할 수 있다. 전기장에 따른 ER효과를 일으키는 기본메커니즘에 대한 이론에는 Klass와 Martineck[2]에 의한 이중층(double layer)이론과 Stangroom[3]등에 의한 수분가교(water bridge)이론, 그리고 Block[4]등에 의한 입자의 분극화(polarization)이론 등이 있다. 최근 입자의 분

극화 현상에 의한 연구가 많이 행하여 지고 있으나 한가지의 현상만으로는 ER유체의 거동을 설명하기는 어렵다. ER유체 자체에 대한 모델링의 복잡성은 무엇보다도 고체입자의 전기적 성질과 유체 흐름간의 상호작용에 대한 이해 부족에서 기인된다.

일반적으로 ER유체의 상변화를 위해 요구되는 전기장부하의 크기는 ER유체마다 다르지만 약 0.2kV/mm-1.0kV/mm이나 전류밀도는 10μA/㎠ 이하이므로 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮고, 전기장부하에 대한 유체의 반응속도는 1msec이하이다. 이러한 ER유체는 세가지 유형으로 여러 장치에 응용될 수 있다.[5] 첫 번째 형태는 평행한 두 개의 평판 중 한 쪽의 전극은 고정되어 있고, 다른 한쪽은 회전이나 이동하는 형태로서 전단모드(shear mode) 혹은 회전전단모드(rotational shear mode)라 하며, 유체의 이동과 전극의 움직임이 평행하게 일어나는 클러치/브레이크 시스템, 보(beam)나 평판(plate)에 ER유체를 함유시킨 분포형구조물 등에 적용된다.[6,7] 두 번째 형태는 두 전극은 고정되어 있고, 고정된 전극 사이로 유체가 이동하는 형태로 유동모드(flow mode)라 하며, 이 형태는 밸브, 엔진마운트, 자동차 현가장치에 사용되는 쇽업소바 등과 같이 일반적으로 유체가 흐르는 관내에서 유체의 압력 변화와 유량 변화가 동시에 일어나는 형태이다.[8,9] 세 번째 형태는 유체의 유동과 전극의 움직임이 수직한 방향으로 일어나는 압착모드(squeeze mode)이다. 이 형태는 전극과 유체 사이의 유동이 매우 작을 때 아주 효과적이다.[10]

이와 같이 ER유체는 여러 기계시스템의 다양한 목적을 위하여 효과적으로 응용될 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 고에서는 ER유체를 응용한 구조물진동제어기술, 차량응용기술, 가공응용기술에 대한 연구현황과 향후 연구방향을 살펴보고자 한다.

2. 구조물 진동제어

2.1 분포형 작동기

여러 산업분야에서 고속화, 정밀화, 경량화에 따른 유연구조물에 대한 사용이 증대하면서, 유연구조물에 대한 진동 차단, 억제 및 제어에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 기존 유연 구조물 진동제어의 대표적 예로서 구조물 사이에 고무와 같은 점탄성 물질을 삽입 또는 접합하는 샌드위치 형태의 구조물과 박판 적층을 특징으로 하는 복합재료를 사용하는 방법이 있다.[11,12] 이 방법은 점탄성 물질의 히스테리시스에 의한 구조물 에너지 분산과 박판의 적층 각도에 따른 감쇠와 강성 변화를 통해 진동제어 효과를 얻을 수 있어 많이 사용되어 왔다. 그러나, 이러한 구조물들은 제작 초기에 미리 외란을 예측하여 공진현상을 피하고 감쇠 효과를 증진 시키는 재료 특성을 갖도록 만들어지기 때문에 제작 후에는 구조물의 동적 특성이 고정되기 때문에 주파수 및 크기가 변화되는 외란에 대해 효과적으로 대처할 수 없는 일종의 수동적 구조물이다. ER유체가 보나 평판과 같은 구조물 내부에 함유되었을 때에는 구조물의 점탄성 특성인 감쇠와 강성을 전기장에 의해 연속적으로 변화 시킬 수 있다. 이러한 특징으로 인해 유연 구조물의 진동제어 분야에 매력적인 분포형 작동기로서 많은 연구가 수행되어 왔다[7,13-17]. ER유체를 이용한 분포형 작동기 시스템은 변분법 이론 방법(variational method)[14], 현상학적 방법(phenomenological identification)[7], 샌드위치 구조물 이론(sandwich structure theory)과 ER유체 자체의 복소 전단 모듈러스(complex shear modulus)를 연계한 동적 모델링 방법[15-17] 등을 통하여 수학적으로 표현될 수 있다.

그림 1은 ER유체를 알루미늄 구조물에 분포시킨 ER빔의 구조도를 나타낸다. 그림 2는 ER빔의 전기장 증가에 따른 주파수 응답 특성을

측정하여 나타낸 것이다. ER빔에 부하하는 전기장 세기를 높임에 따라 공진모드 주파수가 이동하면서 진동레벨이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 전기장에 의하여 ER유체의 점탄성 특성이 변화되었기 때문이며, 전기장 제어를 통하여 구조물의 공진을 능동적으로 조정할 수 있음을 의미한다. 따라서, 각 주파수영역에 대하여 가장 낮은 진폭을 갖도록 전기장을 선택하여 부하하면, 전 주파수 영역에서의 외부가진에 대하여 효과적인 능동진동제어가 이루어지게 된다. 항공기 날개 혹은 절연 테이블 등 평판 형태의 이차원 구조물에 대한 연구에는 그림 3과 같이 두 평판 사이에 ER유체가 삽입된 ER평판을 구성할 수 있다. 복합재료 평판에 부착된 네 개의 알루미늄 박판은 ER유체에 독립적으로 전기장을 부하할 수 있는 전극 역할을 하여, A1, A2, A3, A4의 네 구역으로 구분하였다. 그림 4는 전기장 부하 영역에 따른 각 모드의 형상 변화를 나타내다. (1,1)모드의 경우 A1에 전기장을 부하한 결과를 전영역에 부하한 결과와 비교하면 후자의 경우가 모드 형상의 크기가 전체적으로 크게 줄어든 것을 볼 수 있다. (2,2)모드의 경우에도 전 영역에 전기장을 부하하였을 때 모드 형상의 크기가 작게 되는 것을 확인할 수 있으며, 특정한 부위의 모드 형상 만을 변화 시키고자 하는 경우 A1 영역에만 전기장을 부하하면 이 영역의 모드 한쪽이 줄어들게 된다. 물론 다른 영역에서도 모드 형상의 변화가 요구된다면 이를 위한 알맞은 전기장을 특정한 영역에 전기장을 부하하면 된다. 이러한 모드 형상 제어는 ER평판이 갖고 있는 특징 중에 하나이며, 이를 실제 시스템에 응용하기 위해서는 모드 형상 제어를 위한 능동 제어 시스템의 구축이 필요하다.

2.2 이산형 작동기

분포형 작동기 시스템은 ER유체 자체가 기존의 액튜에이터처럼 힘이나 모멘트를 발생시키지 못하기 때문에 실질적인 능동진동제어에 어려움이 따를 수 있다. 이를 극복하기 위하여 ER유체를 이용한 댐퍼나 마운트를 구성하고, 유연구조물의 시스템과 연계된 이산형 작동기 시스템을 구축하면 실질적인 능동진동제어가 가능하

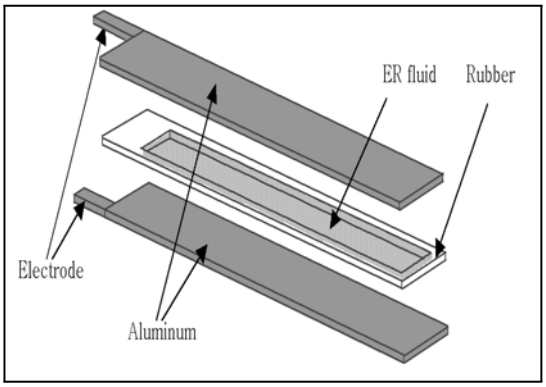


그림 1. ER빔의 구조도

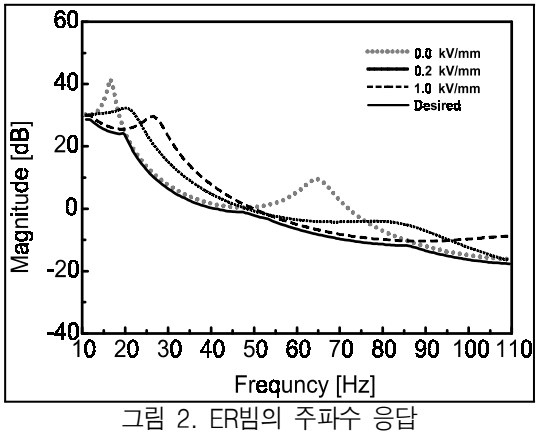


그림 2. ER빔의 주파수 응답

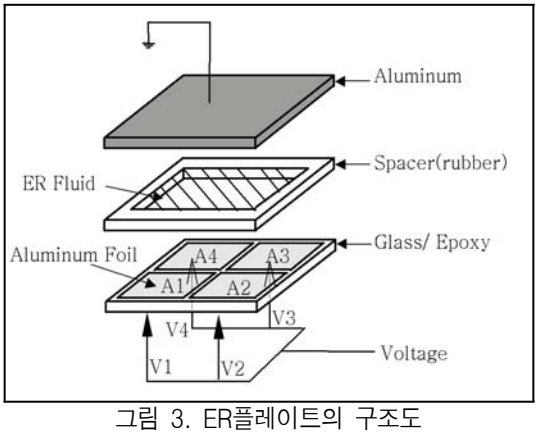
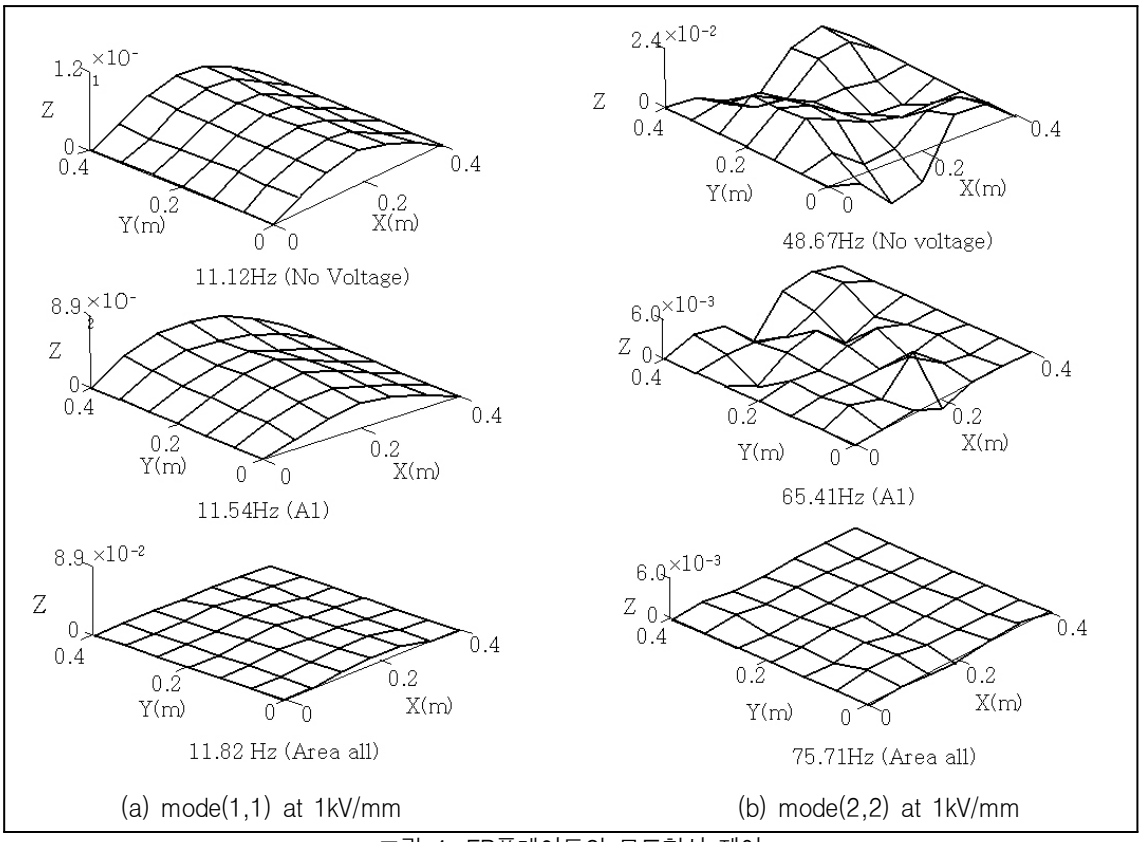


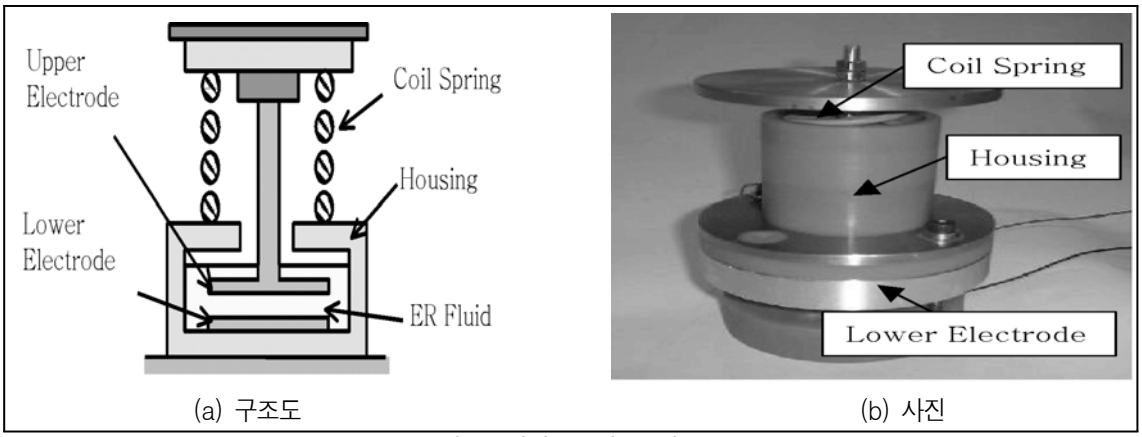
그림 3. ER플레이트의 구조도

다.[18,19] 댐퍼, 마운트의 경우에서 ER유체 거동은 전단변형률이 큰 경우이며 전기장에 따라 항복응력이 지수함수적으로 증가하는 빙햄거동을 나타낸다.[20] 그림 5는 압착모드형 ER마운트의 구조와 사진을 나타내며, 상부전극, 하부전극, 정하중 지지를 위한 스프링, 전극간극 사이에 충진 되어 있는 ER유체로 구성되어 있다. 전극간의 상대운동에 의하여 ER유체는 전극 사이를 압착유동하게 되며, ER마운트는 전기장 무부하 시에는 ER유체의 기본점성에 의한 유동저항으로부



(a) mode(1,1) at 1kV/mm (b) mode(2,2) at 1kV/mm

그림 4. ER플레이트의 모드형상 제어



(a) 구조도 (b) 사진

그림 5. 압착모드형 ER마운트

터 발생되는 댐핑력 만을 얻지만, 전기장 부하 시에는 ER유체의 항복응력 증가에 의한 가변댐핑력을 발생시킨다. 이러한 ER마운트는 빔구조물, 프레임구조물 등에 이산형 작동기로서 적용될 수 있다. 자유단형 빔구조물의 진동을 제어하는 경우, 빔구조물의 제어모드를 선정하고, 각 모드에서의 모드형상을 고려하여 빔구조물에 다수의 ER마운트와 수동형 스프링마운트를 설치한 후, 진동제어알고리즘으로부터 얻은 요구댐핑력에 상응하는 전기장을 ER마운트에 부하함으로써 효과적인 진동제어를 수행할 수 있다.

수동형 스프링마운트 2개와 ER마운트 2개를 자유단형 빔의 하단에 설치하여, 빔에 가해지는 외란에 의한 빔의 진동을 제어한 결과를 그림 6에 도시하였으며, 빔의 변위, 가속도, 그리고, 적용된 마운트의 힘전달률의 합을 나타내었다. 적용된 진동제어 알고리즘은 빔의 모달좌표와 제어입력을 최소화시키기 위한 상태귀환 최적제어기(state feedback optimal control)이다. 한편, ER마운트는 프레임 구조물에도 적용되며, 우수한 진동감소 효과를 얻을 수 있다.[19] 이러한 ER마운트는 대형 우주구조물, 항공구조물, 함정구조물 등 지지점을 가지고 큰 힘을 지탱해야

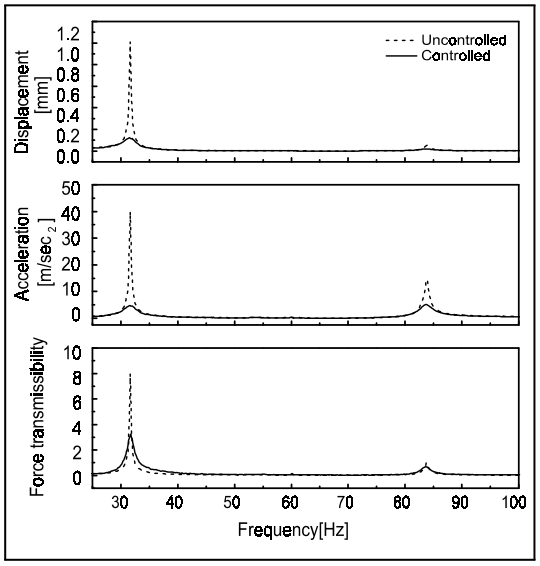


그림 6. 빔구조물의 응답특성

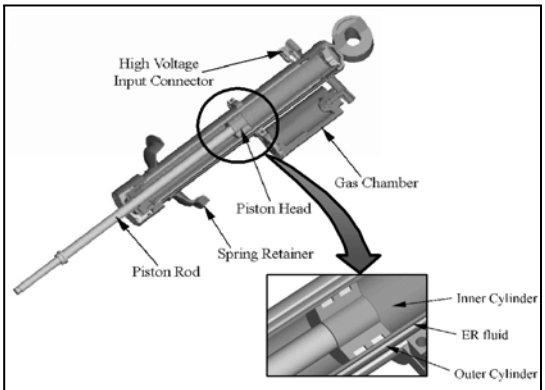
하는 각종 구조물의 진동제어에 효과적으로 적용될 수 있다.

3. 차량 응용 기술

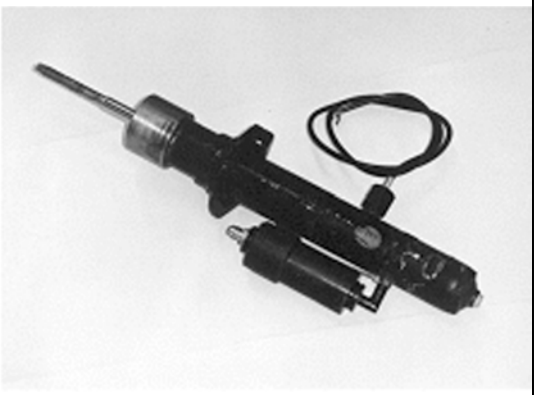
3.1 쇽업소버

지금까지는 수동형 오일 쇽업소버를 이용하여 차량의 현가장치를 구성하였으나 요구 댐핑력을 연속적으로 제어할 수 없기 때문에 진동 절연성능이 제한되는 단점이 있다. 수동형 현가장치의 성능제한을 보완하기 위해 제안된 능동형 현가장치는 외부동력원을 사용하여 필요한 제어력을 쇽업소버에 입력시키므로 높은 전력, 제어를 위한 다수의 센서, 복잡한 구조의 유압서보시스템 등이 요구된다. 반능동형 현가장치는 자체에 에너지원은 없으나 댐퍼의 감쇠력을 조절할 수 있으므로 외부에서 입력되는 진동에너지를 효과적으로 분산시킬 수 있다. ER댐퍼를 이용한 반능동형 현가장치에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 미국에서는 상용 댐퍼를 이용하여 ER댐퍼를 만들었으며 Ford사의 승용차에 장착하여 실험을 수행하였고 피스톤 속도에 따른 승용차의 요구 댐핑력을 전기장 부하를 통해 얻었고 시스템의 응답특성이 5msec이하로 측정되어 빠른 응답특성을 보이고 있어 ER댐퍼의 실용 가능성을 보여주고 있다.[8] 실제 시스템에 적용하기 위한 연구의 일환으로 차량에서 사용되는 전원(12V)으로부터 고전압(10kV)을 얻는데 성공하였으며 실험이 수행되는 동안 매우 빠른 응답특성을 가지는 것을 확인하였다. 한편, 다중 실린더를 갖는 ER댐퍼를 제안하여 전극의 개수, 면적에 따른 댐퍼의 특성에 관한 연구가 진행 중이다.[21,22]

그림 7은 중형차용 ER댐퍼의 개략도와 사진을 나타내고 있다. ER댐퍼로 외부 가진이 들어오게 되면 피스톤로드에 부착되어있는 피스톤이 상하 운동을 하게 되며 이때 내부에 충진 되어 있는 ER유체는 실린더 형태의 전극 사이에 형성



(a) 개략도



(b) 사진

그림 7. 중형 차량용 ER댐퍼

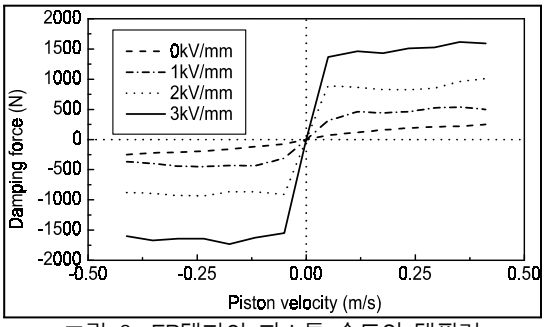


그림 8. ER댐퍼의 피스톤 속도와 댐핑력

된 유로를 흐르면서 유동저항이 발생되게 된다. 여기에서 가스챔버는 급격한 압력강하 시 발생될 수 있는 가스 버블 발생을 방지하고, 피스톤 로드에 의한 체적변화를 보상해 주는 어큐뮬레이터의 역할을 한다. ER유체에 전기장을 가할 때 각각 안쪽 실린더는 (+)전극, 바깥쪽 실린더는 (-)전극으로 사용된다. 전극에 전기장을 부하

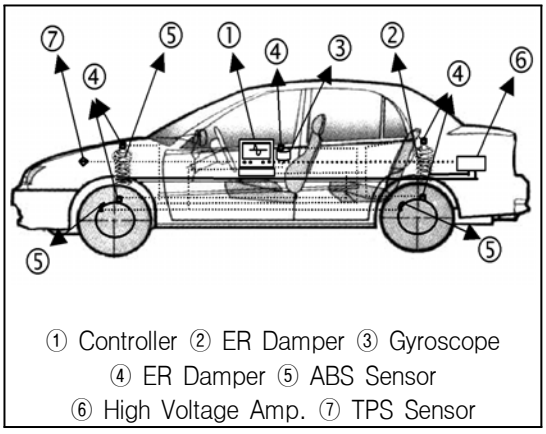


그림 9. ER현가장치를 갖는 차량의 실험장치 구성도

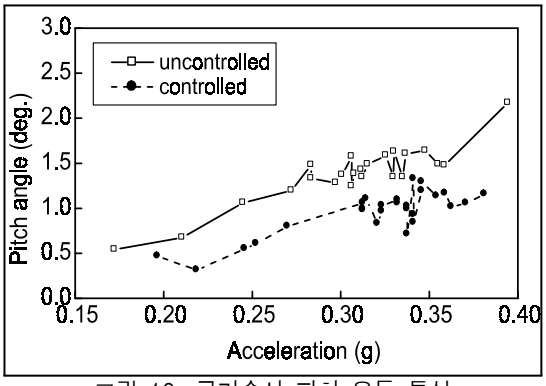
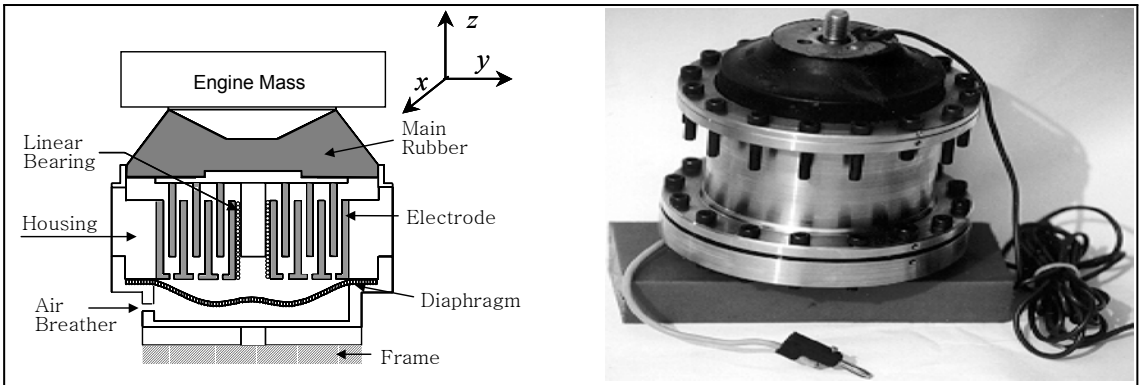


그림 10. 급가속시 피치 운동 특성

하게 되면 ER유체는 유동저항만을 가지는 뉴토니안 유체에서 전기장에 따라 항복응력을 가지게 되는 빙햄거동을 보이게 된다. 전기장 세기에 따라 전극사이의 ER유체는 항복전단응력이 발생되어 유로내의 유동저항을 증가시키게 되며 이때의 유동저항으로 인해 댐핑력을 발생 시킨다. 그림7(b)는 제작된 ER댐퍼의 사진이다. 그림 8은 ER댐퍼의 피스톤 속도에 따른 댐핑력을 보여주고 있다. 전기장을 부하하였을 때 댐핑력이 증가하는 것을 알 수 있고 적절한 전기장 부하를 통해 요구 댐핑력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 9는 실차실험을 위해 차량에 장착된 ER현가장치와 각종 센서 및 장비의 구성을 나타낸다.[23] 시험 중 센서로부터 측정된 신호는 조수석에 장착된 포터블 컴퓨터 내부의 DSP보드를 통해 입력되며, 제어 알고리즘이 장착된 컴퓨터



(a) 개략도 (b) 사진

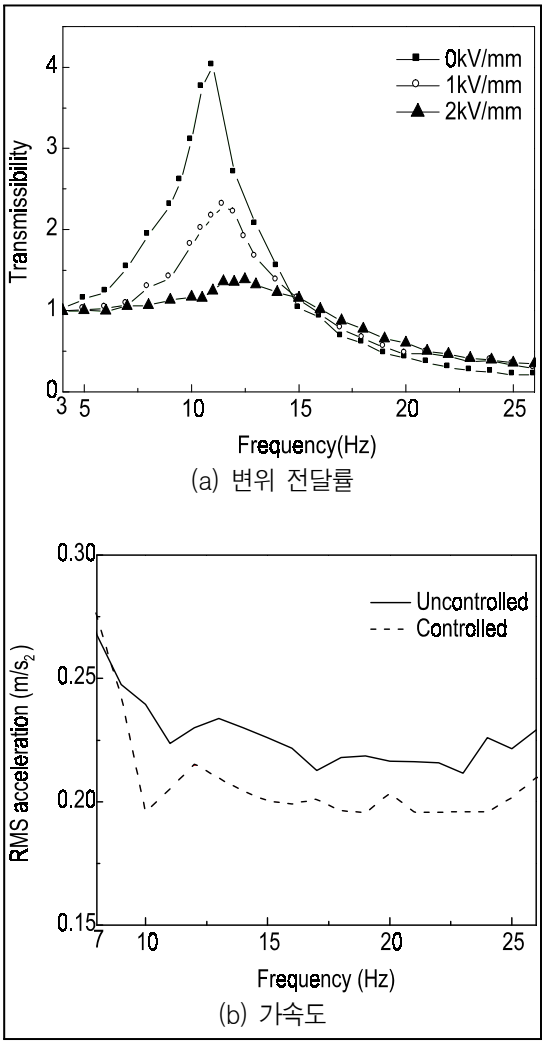
그림 11. 차량용 ER엔진마운트

에 의해 댐핑력을 계산하고 제어 신호는 트렁크에 장착된 고전압 증폭장치를 거쳐 ER댐퍼로 제어 전기장을 부하한다. 이로서 실제 차량 주행 시 제어가 이루어 지게 된다. 그림 10은 차량의 가속 정도에 따른 피치 각변위의 피크 값으로 제어를 수행한 경우 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있고 이로부터 반능동형 ER현가장치를 장착한 차량에 제어를 수행함으로써 승차감과 조향 안정성을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.[23] 현재는 다양한 형태로 실차 실험이 수행된 상태이며 각종 극한 실험에 대한 부분에 관한 연구가 필요하고 온도 및 침전에 관한 부분이 문제점으로 지적되고 있으며 이를 해결하려는 연구가 수행되고 있는 추세이다.

3.2 엔진마운트

엔진마운트는 차량의 엔진으로부터 차체로 전달되는 진동을 절연 시키고 및 엔진의 자세유지를 위한 역할을 한다. 엔진으로 발생되는 진동 및 소음을 저감시키기 위해 여러 형태의 엔진마운트가 제안되고 있으며 전기장 부하에 따라 연속적으로 댐핑력을 발생시킬 수 있는 ER유체를 이용한 연구가 진행되고 있다. ER유체를 이용한 엔진마운트는 유동모드, 전단모드, 압착모드로 분류 할 수 있다. 진동 및 소음 저감을 위해 ER 밸브형태의 다중 유로를 갖는 것과 평판형태의 전극을 갖는 유동모드형, 스프링과 평판형태의 전극을 갖는 압착모드형 그리고 실린더 형태의 전극을 갖는 전단모드형 ER엔진마운트에 관한 연구가 다양한 형태로 수행되고 있다.[9,24-26] 일반적으로 유동모드는 큰 진폭의 낮은 주파수 영역에서는 좋은 진동절연 성능을 보이지만 낮은 가진의 높은 주파수 대역에는 오히려 좋지 않은 성능을 보이고 락업모드(lock-up mode)가 되면 ER유체가 고형화 되어 유동이 일어나지 않게 되는 현상이 발생한다. 또한 압착모드는 큰 진폭의 가진 시 전극 간극의 변화로 인해 제어가 어려운 단점이 있다. 그리고 전단모드는 다른 두 모드에 비해 댐핑력이 작게 발생이 된다.

전단모드와 유동모드가 동시에 발생하는 복합모드형 ER엔진마운트는 하나의 모드를 가질 때 발생되는 문제점을 해결할 수 있는 형태이며, 그림 11에 복합모드형 ER엔진마운트의 개략도를 나타내었다.[27] 엔진으로부터 발생되는 가진력에 의해 전극을 기준으로 상부챔버와 하부챔버 사이에 유동이 발생하게 된다. 전기장 무부하 시 전극 사이로 유동하는 유체의 유동저항에 의한 댐핑력만 발생하게 되고 전기장 부하 시에는 전극 사이에서 ER효과로 인한 댐핑력을 발생 시키게 된다. 여기서 다이어프램은 하부챔버로 유동이 발생될 때 ER유체를 수용하고 상부챔버로 유



(a) 변위 전달률

(b) 가속도

그림 12. ER엔진마운트의 특성

동시 복원력을 갖게 하는 역할을 한다. 그림 12(a)는 ER엔진마운트로 1자유도 시스템을 구현하고 이에 대한 진동절연 특성을 나타낸것이다. 전기장 부하에 따라 변위 전달률이 감소하는 것을 알 수 있고 가진 변위는 0.25mm이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 전기장과 연계된 알맞은 제어로직을 구성함으로써 효과적인 진동제어를 할 수 있다. 그림12(b)는 ER엔진마운트가 장착되었을 때 승차자 위치에서 승차감 평가 척도인 주파수영역의 RMS가속도를 보여주고 있다. 제어를 수행하였을 경우 전 주파수 영역에서 좋은 진동절연 특성을 보이는 것을 알 수 있고 이때 사용된 제어기는 반능동형 시스템에 널리 적용되는 스카이훅(skyhook)제어기를 이용하였다. ER엔진마운트를 이용하여 차량시스템에 적용시 적절한 형태의 작동모드와 전기장 부하를 통해 원하는 제어 성능을 나타낼 수 있고 이는 실제 차량에 장착되었을 경우 우수한 진동절연 성능을 기대할 수 있다.

3.3 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 적용되는 구동기와 제어 방법에 따라 달라지며 이에 대한 많은 연구가 수행되어 오고 있다.[28-32] 이들 대부분의 연구에서 제안된 ABS는 유압작동기로서 솔레노이드 혹은 비례밸브를 사용하고 있으며, 요구값의 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) 현상등이 발생하여 브레이크 페달 감각이 나빠지는 경향이 있다. 솔레노이드 밸브는 복잡하고 정밀한 부품들로 구성되어 있는 반면에, ER 유체를 이용하면 압력과 유량을 조절하기 위한 전극 만을 필요로 하고 밸브 내부의 기계적 이동장치는 필요 없게 된다. 다시 말하여 작동기 및 밸브가 하나의 단일 구조로 형성되어 있어 설계의 단순화와 이에 따른 경제적 이득을 꾀할 수 있다. 한편, 제어성 측면에서는 ER 유체 자체의 힘인 항복응력을 제어함으로써 대상 시스템의 속도와 위치 제어가 동시에 가능하게 된다.[33]

그림 13은 실린더형태의 ER밸브로 구동되는 ABS시스템의 구성도를 나타내고 있다. 기존의

솔레노이드 밸브 대신에 감압과 가압을 위한 2개의 ER밸브가 사용되고 있는 것을 알 수 있다. 마스터 실린더로부터 압력이 발생되게 되면 기존의 방식은 솔레노이드 밸브를 on/off제어를 통해 브레이크 압력을 발생시키며 이때 떨림 현상이 발생된다. ER ABS시스템은 ER밸브2에 전기장을 인가하고 ER밸브1에 전기장 무부하시 마스터 실린더의 압력이 브레이크 실린더에 전달되어 제동력이 생성되게 된다. 이때 ER밸브에 인가되는 전기장의 세기에 따라 마스터 실린더에서 브레이크 실린더로 전달되는 압력을 연속적으로 제어할 수 있게 된다. 이러한 연속적인 브레이크 압력제어를 통해 솔레노이드 밸브의 불연속적 압력변화에 의한 제동거리 증가와 페달감각의 저하를 방지할 수 있다. 여기서 마찰력은 관측기를 이용하여 슬립율을 계산하여 슬리율 제어기, 요 레잇 제어기에 적용한다. 그림14는 초기속도를 85km/h로 하였을 때의 비대칭 노면에 대한 급제동시 제어결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 0.5초 간격으로 차량의 위치 및 모습을 배열한 것이다. 기존 ABS의 경우 좌우 지면의 마찰력 차이로 안정성을 잃어버리게 되지만 ER밸브를 장착한 차량은 슬립률 제어 수행능력 향상으로 요 레잇을 더욱 안정적으로 제어함으로써 우수한 제동 효과 및 안정성을 향상시키는 것을 알 수 있다.

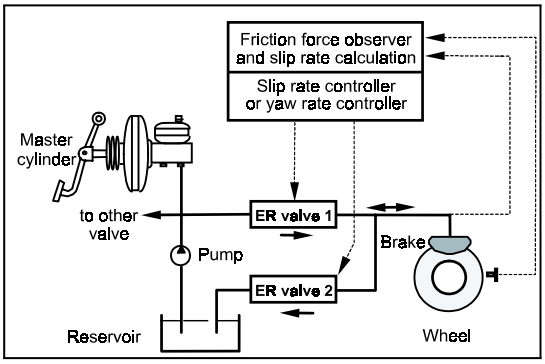
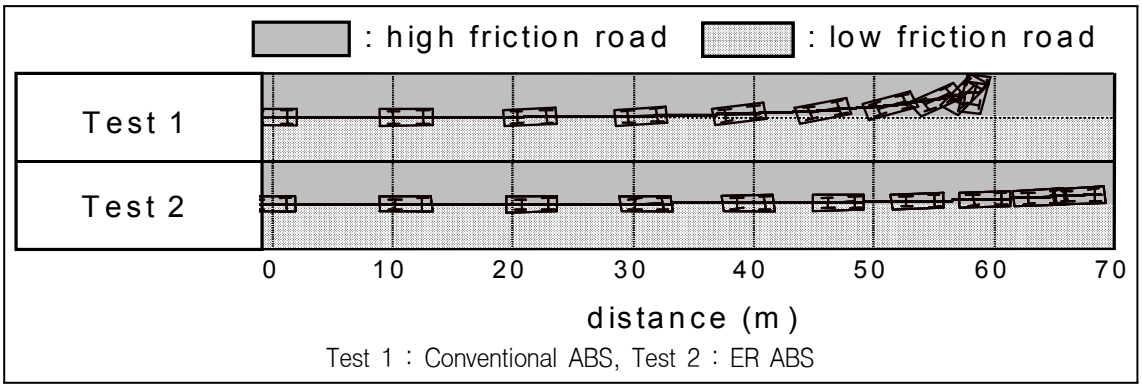


그림 13. ER ABS의 개략도

4. 가공 응용기술

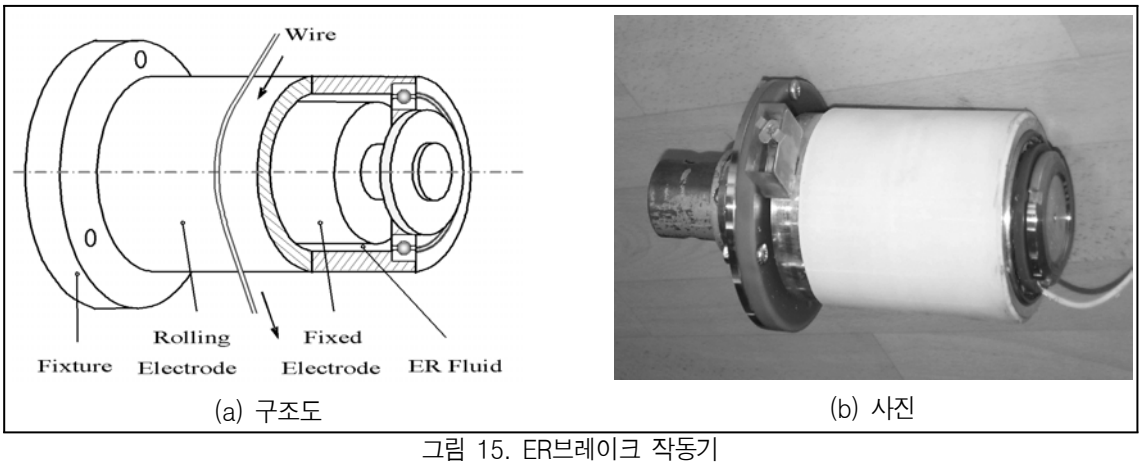
4.1 방전가공기술

와이어컷방전가공은 장력을 건 금속제 와이어를 가공전극으로 사용하는 가공법으로서, 공작물의 미세한 형상의 가공이 가능하여 널리 이용되고 있다. 방전가공의 효율을 높이기 위해서는 가공 중에 와이어 장력이 적절히 제어되어야 한다. 하지만, 가공중에 발생되는 와이어진동은 공작물의 표면거칠기와 파상도를 증대시키며, 결국 추가적인 연마작업을 필요로 하게 된다. 따라서, 와이어장력제어를 통하여 와이어의 진동을 저감시키거나 제거하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다.[34,35] 보편적인 와이어장력제어 방법은 전자기식 브레이크를 이용하는 것인데, 제어방법은 간단하지만, 반발력과 같은 외란에 취약하며,



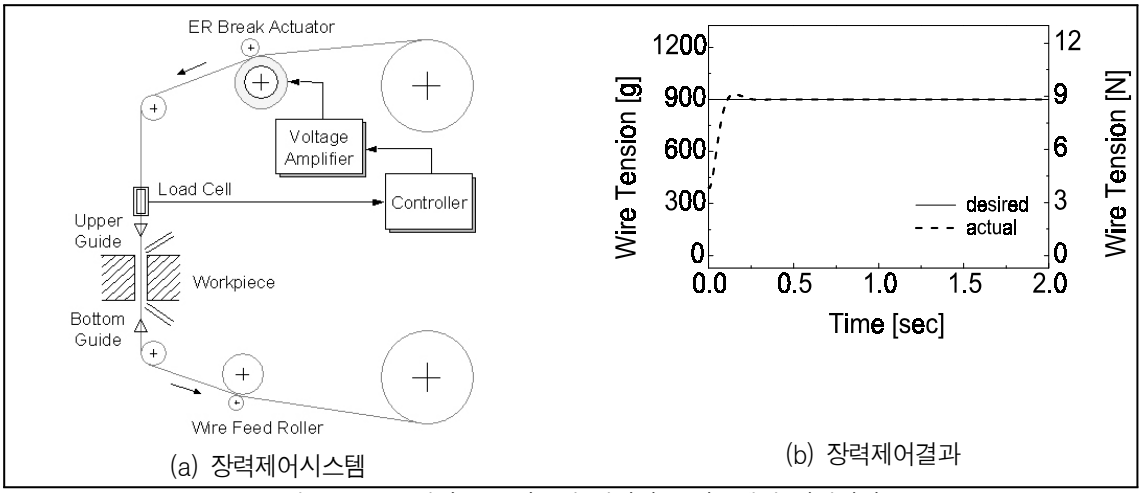
Test 1 : Conventional ABS, Test 2 : ER ABS
그림 14. 비대칭노면 시험중의 차량 운동 비교

전자기식 브레이크의 응답속도가 느린 단점을 지니고 있다. 따라서, 와이어 장력을 정교히 제어할 수 있는 새로운 작동기로서, 빠른 응답속도, 실시간제어, 간단한 설계를 특징으로 하는 ER브레이크작동기를 고려할 수 있다. 그림 15는 ER브레이크작동기의 구조와 사진을 나타낸 것이다. ER브레이크의 내측실린더는 고정되어 있으며, 외측실린더는 회전하여 ER유체의 전단이 발생하며, 전기장 부하에 의한 항복응력의 변화를 이용하여 브레이킹 토크를 조절할 수 있으며, 이로부터 와이어의 장력을 제어할 수 있다. 그림 16(a)는 브레이크작동기를 이용한 와이어 장력제어 시스템을 나타낸다. 로드셀로부터 측정되는 와이어 장력은 요구장력과 비교되며, 마이크로프로세서의 장력제어 알고리즘은 두 장력의 차이를 감소시키기 위한 전기장을 계산하여, 전력증폭기를 통하여 ER브레이크 작동기에 적절한 전기장을 부하 한다. 그림16 (b)는 외란에 강건한 슬라이딩모드 제어기를 이용하여 와이어의 요구장력을 추적제어한 결과이다. 실제장력이 요구장력을 신속하게 추적하며, 실제장력과 요구장력간의 오차도 상당이 작은 것을 확인할 수 있다. 따라서, ER브레이크 작동기의 우수한 와이어 장력제어 성능은 와이어 방전가공 시의 표면거칠기를 효과적으로 감소시키고 직진도를 향상시킬 수 있다.[36]



(a) 구조도 (b) 사진

그림 15. ER브레이크 작동기



(a) 장력제어시스템 (b) 장력제어결과

그림 16. ER브레이크를 이용한 방전가공 시스템의 장력제어

4.2 Polishing/Finishing 기술

산업기술 발달로 인해 반도체장비 및 의료기기 등에 사용되는 재료의 고정밀도가 요구 되고 있고 이를 위한 표면 연마 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 절삭 및 연마 방법은 고정된 연마 입자를 이용하여 일정 정밀도를 얻는 방식이 이용되고 있다. 이러한 방법은 연마입자의 마모 및 불균일로 인해 공작물의 표면에 과도한 가공흔적 발생과 이로 인해 경면가공이 어려운 점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 분포된 연마 입자를 사용하여 가공을 수행하는 방법이 있는데 ER유체와 연마 입자를 이용하여 폴리싱, 피니싱을 하는 방법에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. ER유체에 연마입자를 혼입 시킨 후 전기장 부하에 따른 항복응력 발생 시 연마력이 다르게 나타나는데 이러한 원리를 이용한 것이다. 일반적인 폴리싱방법에서 공작물은 공작물 홀더에 고정되게 되며 고정부의 양쪽에는 ER유체가 채워지며 전극이 설치되어 있다. 그리고 공작물은 작동기에 부착되어 고정된 전극과 평행한 방향으로 운동을 하게 된다. ER유체는 공작물의 종류와 모양에 따라 적절한 연마제를 혼합하여 만들어 지며 이때 전기장 부하에 따라 전극과 전극사이에 채워져 있는 ER유체의 항복응력이 발생하게 되며 항복응력의 세기와 연마제의 종류에 따라 요구 연마력을 발생 시키게 된다. 이러한 평판 형태의 가공기술 뿐 아니라 원형의 공작물에도 적용될 수 있고 전극의 형상에 따라 다양한 형태의 가공물의 연마 작업에 응용될 수 있고 이에 대한 활발한 연구가 진행중이다.[37-39]

그림 17은 ER유체를 이용하여 마이크로 3차원 구면 렌즈, 금형, 경면 등의 작업 시 폴리싱을 수행하기 위한 개략도를 나타내고 있다. ER유체는 툴과 공작물 사이에 채워지게 되고 전극은 툴 팁에 위치하게 된다. 전기장이 가해졌을 경우 툴과 공작물 사이에 그림과 같이 체인을 형성하게 된다. 이때 툴 팁이 구면형상의 프로파일을 움직이게 되면 구면형태의 폴리싱이 이루어 지게 된다. 폴리싱을 하기 전에 연마는 다이아몬드 휠을 통해 구면 연마를 하게 된다. 일반적으로 연마제는 ER유체와 함께 분극형성으로 체인을 이루기 위해 전도성의 입자를 사용하고 공작물은 전도성 혹은 비전도성의 재료를 사용한다. ER유체에 직경 2~4μm의 다이아몬드 연마입자를 혼합하고 유리(glass)재질의 직경 10mm가 공작물로 사용되었을 경우 표면 조도는 203nm, 폴리싱을 수행한 후 약 29.9nm 정도의 표면 조도를 얻을 수 있다. 그림 18은 전기장의 세기에 따른 체적 변화를 보여주고 있다. 전기장의 세기가 클수록 많은 양의 폴리싱이 이루어짐을 알 수 있다. 이로부터 초정밀가공에 있어서 ER유체를 이용하여 매우 효과적인 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

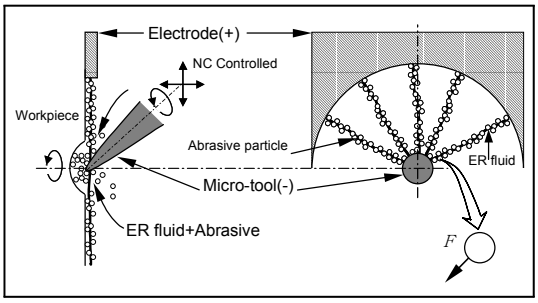


그림 17. ER유체를 이용한 폴리싱의 개략도

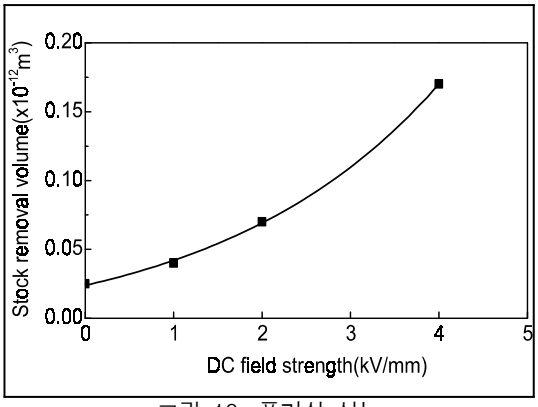


그림 18. 폴리싱 성능

5. 결 론

본 글에서는 스마트 ER유체를 이용한 구조물 진동제어기술, 차량응용기술, 가공응용기술에 대한 연구현황과 향후 방향에 대하여 살펴보았다. 설명한 바와 같이 ER유체 응용기술은 기계산업 분야와 관련된 무한한 잠재력과 다양한 응용성을 가지고 있으며, 상당히 매력적인 연구분야이다. 그러나 여러 응용기술의 실용화를 위해서는 시스템의 구성 요소 분야별 해결해야 할 연구과제 들이 있다. 특히, 액튜에이팅을 수행하는 ER유체 자체의 내구성 문제로서 고온에서 ER효과 하락과 장시간 사용 시 ER유체에 의한 마멸, 고체입자의 침전에 의한 초기 상태 불안정 등이 있다. 또한, ER유체 응용기술의 성공적인 실현을 위하여 ER응용장치 설계기술, 센서기술, 능동제어기 구현기술, 시스템 인터페이스 기술 등의 발전이 요구된다. 따라서, ER유체 응용기술은 어느 한 분야에서만 아니라 기계, 전기전자, 토목, 물리, 고분자, 화학 등 통합형식으로 추진 발전되어야 한다. 미국, 일본을 비롯한 여러 선진국에서 ER유체 응용기술 개발에 대한 연구를 꾸준히 수행하는 것은 향후 우수한 ER유체 개발에 따른 자동차, 항공, 제조, 선박 등 각종 산업 분야에서의 독창적인 국가기술 경쟁력 확보에 매우 중요한 기술이 되기 때문이다.

참 고 문 헌

[1] Winslow, W. M., "Induced Fibration Suspensions," Journal of Physics Technology, 1949, Vol. 20, No.12, pp.1137-1140.

[2] Klass, D. L. and Martineck, T. W., "Electroviscous Fluid I. II. Rheological Fluids," J. of Appl. Physics, 1967, Vol.38, No.1, pp.67-80

[3] Stangroom, J. E., "Electrorheological Fluids, Phys. Technol.," 1983, Vol.14, pp.290-296

[4] Block, H. and Kelly, J. P., "Electro-rheology," Appl. Phys., 1998, Vol.21, pp.1661-1677

[5] Stanway, R., Sproston, J. L. and Ei-Wahed, A. K., "Application of Electro-rheological Fluids in Vibration Control : A Survey," Smart Materials and Structures, 1996, Vol.5, pp.464-482

[6] Choi, S. B., Han, S. S., Kim, H. K. and Cheong, C. C., "H∞ Control of a Flexible Gantry Robot Arm Using Smart Actuators," Mechatronics, 1999, Vol.9, No.3, pp.271-286

[7] Choi, S. B., Park, Y. K. and Kim, J. D., "Vibration of Characteristics of a Hollow Cantilevered Beams Containing an Electro-Rheological Fluid," International Journal of Mechanical Sciences, 1993, Vol.35. No.9, pp.757-768

[8] Petek, N. K., Romstadt, D. J., Lizell, M. B. and Weyenberg, T. R., "Demonstration of an Automotive Semi-active Suspension Using Electrorheological Fluid," SAE Technical Paper Series 950586, 1995

[9] Duclos, T. G., "An Externally Tunable Hydraulic Mount Which Uses Electro-Rheological Fluid," SAE Technical Paper Series 870963, 1987

[10] Stanway, R., Sproston, J. L., Rigby, S. G. and Williams, E. W., "Modeling and control of electro-rheological fluids in the squeeze-flow mode," Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Materials, 1994, pp.1176-1184

[11] Meas, R. A, "The Damping Properties of Elastically Supported Sandwich Plates," Journal of Sound and Vibration, 1972, Vol.24, pp.275-295

[12] Vision, J. R. and Chou, T. W., "Composite

Material and Their Use in Structures," John Wiley & Sons, New York Hall, 1975.

[13] Choi, S. B., Park, Y. K. and Cheong, C. C., "Active Vibration Control of Intelligent Composite Laminate Structures Incorporating an Electro-Rheological Fluid," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1996, Vol.7, No.4, pp.411-419

[14] Gandhi, M. V., Thompson, B. S. and Choi, S. B., "A New Generation of Innovative Ultra-Advanced Intelligent Composite Materials Featuring Electro-Rheological Fluids: An Experimental Investigation," J. of Composite Materials, 1989, Vol.23, No.12, pp.1232-1255

[15] Korobko, E. V. and Shulman, Z. P., "Viscoelastic Behavior of Electrorheological Fluids," Proc. of the 2nd International Conference on ER fluids, 1989, pp.3-26

[16] Park, Y. K., Choi, S. B. and Cheong C. C., "Dynamic Modeling and Vibration Control of Smart Structures Incorporating Electro-Rheological Fluids," Fifth International Conference on Adaptive Structures, 1994, pp.228-237

[17] Park, Y. K. and Choi, S. B., "Dynamic Modeling and Shape Control of a Flexible Plate Containing Electro-Rheological Fluids," SPIE's 4th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, 1997, Vol.3041

[18] Choi, S. B., "Vibration Control of a Flexible Structures Using ER Dampers," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1999, Vol.12, No.9, pp.134-138

[19] Hong, S. R., Choi, S. B., Jung, W. J., Jeong, W.B., "Vibration Isolation of Structural Systems Using Squeeze Mode ER Mount," 8th International Conference on ER Fluid and Magnetorheological(MR) Suspensions, 2001, pp.43-49

[20] Seed, M., Hobson, G. S. and Tozer, R. C., "Macroscopic Behavior of ER Fluid," Proc. of the 2nd International Conference on ER fluids, 1989, pp.214-230

[21] Sturk, M., Wu, X. M. and Jung, J. Y., "Development and Evaluation of a High Voltage Supply Unit for Electrorheological Fluid Dampers," Vehicle System Dynamics, 1995, Vol.24, pp.101-121

[22] Gordaninejad, F., Ray, A. and Wang, H., "Control of Forced Vibration Using Multi-Electrode Electro-Rheological Fluid Dampers," ASME Journal of Vibration and Acoustics," 1997, Vol.119, pp.527-531

[23] 이헌균, 최승복, 장유진, 한승직, 이성범, "실차 시험을 통한 ER 현가장치의 성능평가," 대학기계학회 논문집A, 2000, Vol.24, No.2, pp.347-354

[24] Morishita, S. and Mitsui, J., "An Electronically Controlled Engine Mount Using Electro-Rheological Fluid," SAE Technical Paper Series 922290, 1992

[25] Williams, E. W., Rigby, S. G., Sproston, J. L. and Stanway, R., "Electrorheological Fluids Applied to An Automotive Engine Mount," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1993, Vol.47, pp.221

[26] Choi, S. B. and Choi, Y. T., "Sliding Mode Control of a Shear-Mode Type ER Engine Mount," KSME International Journal, 1999,Vol.13, pp.26-33

[27] Choi, S. B. and Song, H. J., "Vibration Control of a Passenger Vehicle Utilizing

a Semi-Active ER Engine Mount," Vehicle System Dynamics, 2002, Vol.37, No.3, pp.193-216.

[28] Drakunov, S., Ozguner, U., Dix, P. and Ashrafi, B., "ABS Control Using Optimum Search via Sliding Modes," IEEE Trans. on Control Systems Tech., 1995, Vol.3, No.1, pp.79-85

[29] Chin, Y. K., Lin, W. C., Sidlosky, D. M. and Rule, D. S., "Sliding-Mode ABS Wheel-Slip Control," Proceedings of the ACC, 1992, Vol.1, pp.1-6

[30] Mauer, G. F., "A Fuzzy Logic Controller for an ABS Braking System," IEEE Trans. on Fuzzy System, 1995, Vol.3, No.4, pp.381-388

[31] Ohba, M., Kuraoka, H., Matsumoto, N., Ohka, N. and Tabe, T., "Automotive Antiskid System Based on Modern Control Theory," Proceedings of International Conference on Applied Motion Control, 1986, Vol.1, pp.253-257.

[32] Song, J. B. and Kim, B. C., "Development of Engine Control Based TCS Slip Control Algorithm Using Engine Map," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A), 1998, Vol.22, No.2, pp.428-436.

[33] 최 승복, 방 주현, 한 문식, "ER 밸브를 이용한 자동차 ABS의 제어특성", 대한 기계학회 논문집(A), 1998, 제 22권 제 10호, pp.1874-1883.

[34] Liao, Y. S., Chu, Y. Y., Yna, M. T., "Study of Wire Braking Process and Monitoring of WEDM," International J. of Mcahine Tools & Manufacture, 1997, Vo.37, No.4, pp.555-567.

[35] Gökler, M. L. and Ozanözgü, A. M., "Experimental Investigation of Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness in the WEDM Process," International J. of Machine Tools & Manufacture, 2000, Vo.40, pp.555-567.

[36] Kim, K. S., Choi, S. B. and Cho, M. S., "Vibration Control of a Wire Cut Discharge Machine Using ER Brake Actuator," 8th International Conference on ER Fluid and Magnetorheological(MR) Suspensions, 2001, pp.316-322.

[37] Akagami, Y., Nisimura, S., Ogasawara, Y., "Polishing of microholes using ER fluid under alternative electric field," Proceedings of the 6th international conference on Electro-Rheological Fluids, Magnito-Rheological Suspensions and Their Applications, 1997, pp.803-808.

[38] Akagami, Y., Asari, K., Jeyadevan, B., Fujita, T. and Umehara, N., "ER Fluid Finishing Using Rotating Electrode," Proceedings of the 7th international conference on Electro-Rheological Fluids, Magnito-Rheological Suspensions and Their Applications, 1999, pp.821-826.

[39] Kuriyagawa, T., Saeki, M., and Syoji, K., "Electrorheological fluid assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts," Journal of the International Societies for Precision engineering and Nanotechnology, 2002, Vol. 26, pp.370-380.