

전극 간극 변화에 따른 ERF-외팔보의 진동응답 특성

Vibration Response Characteristics of the ERF-Cantilevered Beam Under Electrode Gap Change

윤신일¹, 최윤대², 한상보³

1. 경남대학교 대학원 기계설계학과 (TEL: 055-241-1833, E-mail : kugf72@daum.net)
2. 육군3사관학교 기계공학과 (TEL:054-330-4941, E-mail : cyd3986@hitel.net)
3. 경남대학교 기계자동화공학부 (TEL: 055-249-2623, E-mail : sbhan@kyungnam.ac.kr)

Abstract

This paper describe the vibration characteristics of cantilevered beam filled with ERF subjected to variousr electrode charge. The proposed ER fluids used in the present study consists of starch particles and silicon oil. The ER fluids undergo a phase-change when subjected to an external electric filed. This paper presents performance analyses of three types of the cantilevered beam with different electrode gaps and applied electric fields.

1. 서론

최근 산업기계, 항공우주 및 첨단기계산업분야에서 고속화, 정밀화, 경량화 추세에 따라 구조물에 작용하는 진동특성 및 제어에 관한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 최근에는 지능구조물에 대한 관심이 매우 증가하고 있는데, 이 지능구조물이란 감지기 및 작동기를 구조물의 표면에 부착하거나 구조물의 한 부분으로 삼입하고 제어시스템과 연결한 구조물을 말한다. 이 구조물은 외란에 대해서도 적절하게 대처할 수 있으며 보다 전실한 제어를 수행할 수 있다⁽⁵⁾.

이러한 지능구조물의 제작을 위해서는 감지기 및 작동기의 개발이 필수적이라 할 수 있는데, 본 연구에서는 작동기의 기능을 수행하는 ERF유체를 이용한 구조물의 진동특성 실험을 수행하였다.

ER유체는 1940년대 말 W. M. Winslow가 전기적 임펠스를 기계적 힘으로 변환하는 방법과 수단으로 미투

러를 획득한 이후 다방면에 응용되고 있다⁽¹⁾. ER유체는 외부에서 전기장을 인가하면 액체의 레올러지(rheology) 특성이 변하는 현상을 나타내는 기능성 유체이며, 이러한 현상을 전기점성효과 또는 ER효과라 한다. ER유체는 액상이나 고상으로 변화하는 가역성을 가지며 전기장의 강도에 따라 항복응력을 연속적으로 변화시킬 수 있다. 이러한 ER유체의 특성을 응용한 장치는 단순한 설계, 무소음, 무진동, 빠른 응답특성, 작은 전력 소모량 등의 장점을 가지고 있어 구조물, 댐퍼, 클러치, 브레이크, 밸브등에 이용될 것으로 기대된다. ER유체는 입자분산계와 균일계로 대별할 수 있다. 입자분산계 ER유체는 전기절연성 기름중에 유전성을 가진 고체 미립자를 분산시킨 현탁액이고, 전기장을 인가하면 액체의 겔보기 점성이 현저하게 증가하여 Newton유체에서 Bingham유체 특성으로 변화한다. 균일계 ER유체는 액정(液晶)으로 대표되는 ER유체이고, 분산계 ER유체에 비하여 고가이다. 본 연구에서는 ER유체를 이용한 진동제어⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾는 전기장 인가에 의한 순간적이고 가역적인 상변화를 특징으로 하여 ER유체를 함유한 구조물 자체의 진동특성을 전기장 인가에 의해 공진점을 회피함으로써 수행하게 된다.

본 연구는 향후 ER유체와 PZT를 동시에 고려한 복합제어기법의 실현을 위한 선행연구로 ER유체를 삼입한 외팔보를 대상으로 전극간격의 변화와 인가 전기장의 강도 변화에 따른 진동학적 특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. ERF유체의 특성

ER유체는 외부에서 인가한 전기장에 대하여 10^{-3} 초 정도의 빠른 응답성과 가역성을 갖고 있어 동력전달장

치, 고속응답제어밸브, 로봇제어장치 및 스마트 재료등 광범위한 분야에 응용될 수 있다.

본 연구에서 사용된 ER유체는 입자 분산계 유체로서, 용매는 전기절연성이 우수한 실리콘 오일(KF96-50, Korea Shinetsu Silicone Co.)이 분산된 미세입자는 특수처리된 전분 입자(Sigma Chemical Co.)를 사용하였다. 사용 이유는 액정의 기본 점도보다는 분산계 ER유체의 기본점도는 다양하게 선택할 수 있고, ER효과의 변화범위가 넓기 때문이다.

Fig. 1은 입자분산계 ER유체에 전기장을 인가하지 않은 경우와 전기장을 인가한 경우에 대한 ER입자의 거동을 나타낸 것이다. 전기장이 인가되지 않은 상태에서 전기 절연성 오일 중에 분산된 미세입자는 (+)전극과 (-)전극 사이에 균일하게 분포되어 전기적인 극성을 띄지 않으며 뉴턴유체의 특성을 나타낸다⁽⁶⁾.

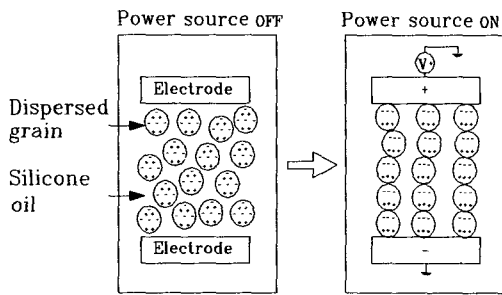


Fig. 1 Generation of clastic orientation

전기장이 인가되면, (+)전극과 (-)전극 사이에서 유전분극한 입자끼리 클러스터를 형성하게 된다. 이러한 클러스터가 전기 절연성 오일의 유동을 저해함으로써 ER유체의 걸보기 점도가 증가하는 것으로 생각된다.

분산계 ER유체에 전기장을 인가하면, Fig. 1과 같이 거동하는 것을 알 수가 있으며 전기장의 강도가 증가할수록 단일 클러스터에서 복합 클러스터를 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 복합 클러스터 형성과정을 살펴보면, 단일 클러스터가 형성된 후, 단일 클러스터 내의 입자가 상호 작용하여 복합 클러스터를 형성한다. 전기장의 강도가 증가함에 따라 복합 클러스터가 많이 형성되는 것을 알 수 있었다.

뉴턴유체는 유체가 흐를 때 전단응력과 전단속도비에 비례하며, 그 비례상수는 유체로서 다음 식(1)과 같다.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서, τ 는 전단응력, μ 는 절연유의 점도를 나타내며 $\dot{\gamma} (= du/dy)$ 는 전단속도비이다. ER유체는 외부에서 가해진 전기장에 의해 유체의 점도가 변하는 것으로 표현하고 있지만, 입자분산계 ER유체에서는 실제

적으로 유체의 걸보기 점도가 변하는 것이다. 유체의 전단응력에 대한 항복전단응력이 변화하는 것, 즉 빙햄 유체의 특성을 나타내면 다음 식으로 표현된다.

$$\tau = \tau_y(E) + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

식(2)에서 $\tau_y(E)$ 는 유체의 항복전단응력을 나타내며, 전기장의 강도 (E)와 더불어 증가한다. 따라서 식 (2)를 전기장의 함수로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \alpha E^\beta + \mu \dot{\gamma} \quad (3)$$

여기서, 계수 α, β 는 ER유체의 절연유 종류, 입자 종류, 무게분율과 절연유의 점도등 ER유체의 고유상수이다. 식 (3)의 관계로부터 전기장에 대한 전체 전단응력의 증가 및 항복전단응력의 크기 등을 예측할 수 있다.

본 연구에서 조성된 ER유체의 용매는 실리콘오일(점성 50cs)을 사용하였으며, 전도성의 입자는 특수화학 처리된 전분입자를 사용하여 용매에 대한 무게분율을 40wt%가 되도록 ER유체를 조성하였다. ER유체의 특성을 고찰하기 위해서 사용된 점도측정장치(독일 Haake社, VT-500)는 동일한 중심축상에 있는 고정된 외부원통(cup 이라 함)과 회전하는 내부원통(bob 이라 함) 사이의 간극에 ER유체를 주입하고, 전단속도비를 변화시켜, 내부원통을 회전시키는데 필요한 토크를 측정하여 점도를 측정하는 점도계이다.

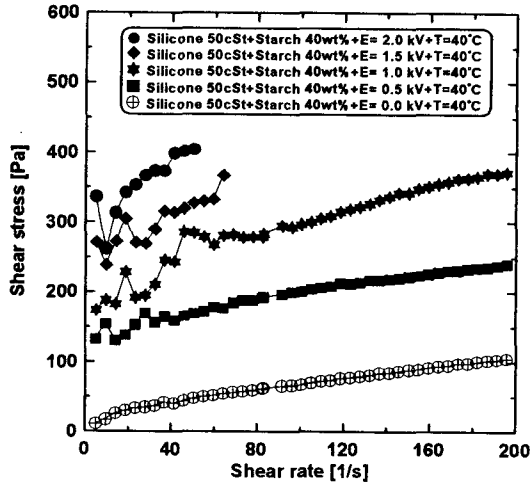
또한, bob과 cup을 전극으로 사용하여 전기장의 강도에 따른 ER효과의 영향도 검토할 수 있도록 제작되어 있다. 점도계와 PC가 연결되어, 전단속도비(bob의 회전속도) 변화에 따른 점성과 전단응력이 자동으로 측정되어, 출력되도록 구성되어 있다. 실험조건으로, bob과 cup 사이에 형성된 전극을 통하여 전기장을 0~2 kV/mm까지 0.5 kV/mm 씩 단계적으로 변화시켰으며, 전단속도비를 0~200 [s⁻¹]까지 2분 동안에 증가하도록 조건을 설정하였다.

Fig. 2(a)는 온도 40℃, 전분입자의 무게분율 40wt%인 ER유체에 대해서, 전기장 E = 0 ~2 kV/mm까지 0.5 kV/mm씩 단계적으로 변화시켜 실험한 결과이다.

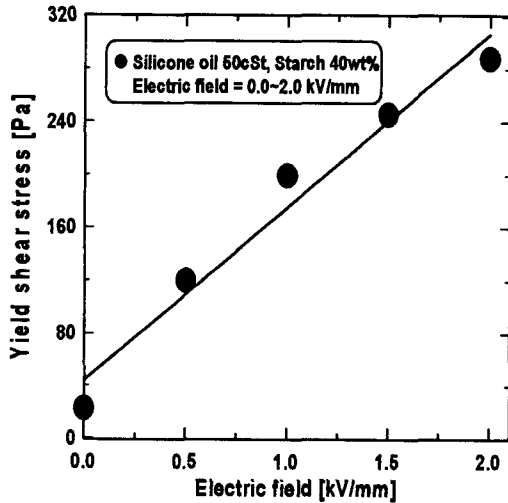
전기장을 인가하지 않은 상태에서 ER유체는 뉴턴 유체와 같이 거동함을 알 수 있고, 전기장이 인가되면 초기 항복전단응력이 발생하여 빙햄특성을 나타낸다.

인가된 전기장이 높아짐에 따라 항복전단응력도 증가하는 경향을 나타낸다. 전단속도비가 낮은 영역에서 전단응력이 불규칙하게 변하는 것은 점도계에서 bob(+전극)과 cup(-전극)에 전기장이 인가되면, 전극의 간극 내에 채워진 ER유체가 정지된 상태에서 클러스터를 형성하게 되고, 초기상태에서 bob이 회전하려는 순간에는 bob과 cup사이에 형성된 클러스터가 순간적으로 파괴됨으로서 큰 토크가 필요하게 된다.

또한, bob 축 지지부에 작용하는 미소한 마찰손실토크의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 마찰손실 토크는 bob의 이동시에는 크고, 전단속도비의 증가와 함께 감소하는 경향을 나타내며, 전단속도비가 어느정도 커지게 되면 ER효과와 점성마찰 특성이 지배적으로 작용하게 된다.



(a) Shear stress versus shear rate



(b) Yield shear stress versus electric field

Fig. 2 Bingham properties of ER fluids

Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 전기장 증가에 따라 항복전단응력의 값이 증가하는 것을 알 수 있으며, 전기장의 강도가 2kV/mm인 경우를 식(3)에서 전기장의

함수식으로 나타내면 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$\tau = 287 E^{2.43} \text{ Pa} \quad (4)$$

식(4)에서 고찰한 바와 같이 ER유체의 특성변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의 강도가 매우 중요하다는 사실을 알 수가 있다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 전극간극의 변화와 인가 전기장의 강도 변화에 따른 진동특성 파악을 위해 3종류의 ERF-외팔보를 설계 제작하였다. 제작한 구조물의 외형은 Fig. 3과 같으며 사양은 Table 1과 같다.

Fig. 4는 동특성 고찰을 위해 실험장치를 도식적으로 나타낸 것이다. 시편의 전극이 있는 부분을 고정단으로 하여 셰이커 위에 고정하였으며, 셰이커에 신호 입력을 위하여 신호발생기에서 생성된 신호를 증폭기를 통하여 증폭하여 입력하였다. 주파수 응답특성을 알아보기 위하여 입력신호를 Sinc-sweep 신호를 발생하여 인가하였다.

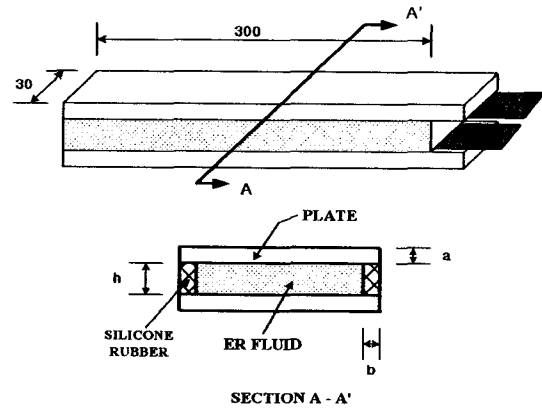


Fig. 3 Schematic Diagram of the ERF beam

Table 1 Specifications of ERF beam (mm)

TYPE	LENGTH	WIDTH	GAP(h)	a	b
A	300	30	1	1	2
B	300	30	1.5	1	2
C	300	30	2	1	2

또한 동특성 변화로 인한 공진점 회피에 의해 발생하는 시간응답신호를 측정하기 위하여 보의 끝단에 가속

도계1을 설치하였으며, 세이커 위에 입력신호에 대한 신호 측정을 위해 가속도계2를 설치하였다. ER유체의 전기장 강도에 대한 진폭특성을 고찰하기 위하여 자유진동과 강제진동에 대한 응답특성을 시간영역에서 추출하였다.

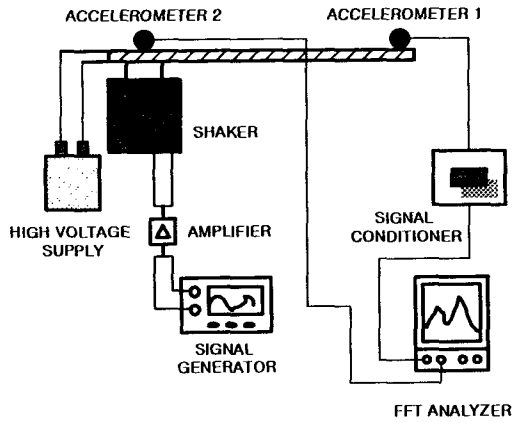


Fig. 4 Experimental set-up

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 제조한 무게분을 40wt%인 ER유체를 삽입한 시편에 전기장을 인가하여 시편의 끝단의 출력신호와 입력 신호 (sine-sweep : 0 ~ 20 Hz)에 대한 주파수응답을 Fig. 5에 나타내었다.

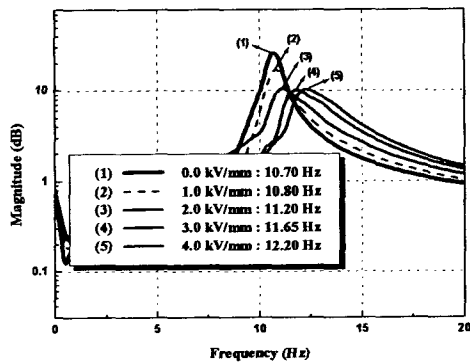


Fig. 5 Frequency responses of the ERF-beam.

전기장 강도의 변화에 의해 동특성이 변화함을 알 수 있었다. 1차 고유진동수가 전기장을 인가하지 않았을 때는 10.7 Hz이었으나 E=1.0 kV/mm 일 때는 10.80 Hz,

E=2.0 kV/mm 일 때는 11.20 Hz, E=3.0 kV/mm 일 때는 11.65 Hz, E=4.0 kV/mm 일 때는 12.20 Hz이 됨을 알 수 있었다. 또한 자유진동에 관한 진동응답을 전극 간극의 변화에 따라 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8과 같이 나타내었다. 이때의 전기장 강도 E = 4.0 kV/mm로 고정하였다

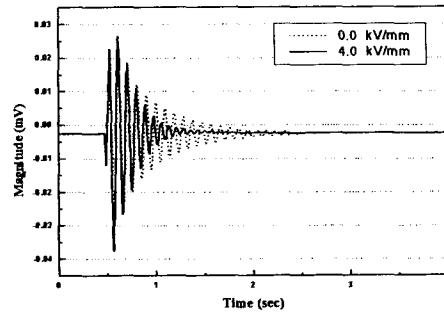


Fig. 6 Transient Response signal of the beam (Electrode gap : 1 mm , E = 4.0 kV/mm)

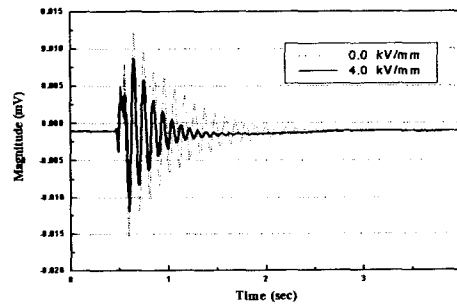


Fig. 7 Transient Response signal of the beam (Electrode gap : 1.5 mm , E = 4.0 kV/mm)

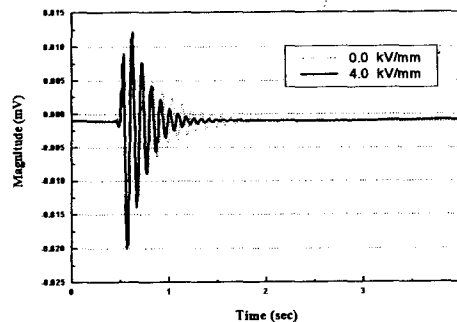


Fig. 8 Transient Response signal of the beam (Electrode gap : 2 mm , E = 4.0 kV/mm)

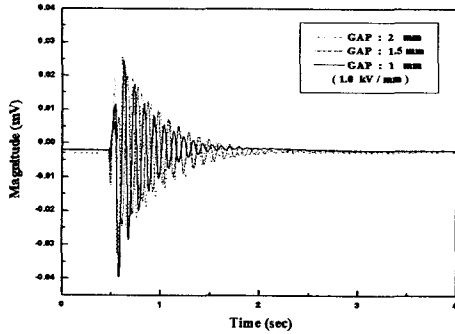


Fig. 9 Transient Response signal of the beam under electrode gap change (Applied electric filed : 1 kV/mm)

이상에서 알 수 있듯이 인가 전기장 강도가 일정하다면 전극 간극이 작을수록 ER효과가 최대화되어 짧은 시간에 정상상태로 진입함을 알 수 있었다.

또한 정상상태진동응답의 경우에 대해서도 진폭 응답을 전극간극의 변화와 인가 전기장의 강도에 따라 알아보았다.

Fig. 10의 경우 전극 간극 1mm의 경우에 대한 진폭 응답을 전기장의 강도에 따라 알아보았는데, 그 결과 일정 전기장까지는 진폭의 크기가 많이 줄어들음을 알 수 있었다. 그러나 일정 강도 이상의 전기장에서는 같은 응답을 나타내었고(본 연구에서는 $E=3.0$ kV/mm), 과도한 전기장의 인가 시에는 시스템이 불안정한 상태가 됨을 알 수 있었다($E=5.0$ kV/mm 이상).

Fig. 11과 12는 전극 간극 1.5 mm와 2 mm의 경우에는 1 mm의 경우와는 달리 전기장 강도 $E=5.0$ kV/mm 에서도 ER효과가 나타나 진폭변화에 대한 응답을 얻을 수가 있었다. 하지만 이 경우에도 과도한 전기장의 인가 시에는 불안정해짐을 알 수 있었는데($E=7.0$ kV/mm 이상), 이것은 ER유체의 제조 시에 사용한 고체 미립자(본 연구의 경우에는 전분을 사용)의 특성에 의한 것으로, 현재 다른 고체 미립자를 이용한 연구와 무게분을 변화에 따른 진동응답특성에 관한 연구도 병행하여 진행중이다.

정상상태진동에 대한 고찰을 위하여 1차공진으로 가진 하여 전극간극에 따른 응답을 파악하였다. 인가 전기장의 크기가 일정한 경우 자유진동의 실험과 같이 전극 간극이 작을수록 진폭이 많이 줄어들음을 Fig. 13에서 보여주고 있다.

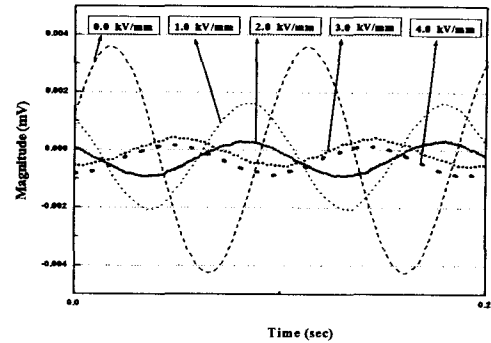


Fig. 10 Steady state response signal of the beam under applied electric filed change (Electrode gap : 1 mm)

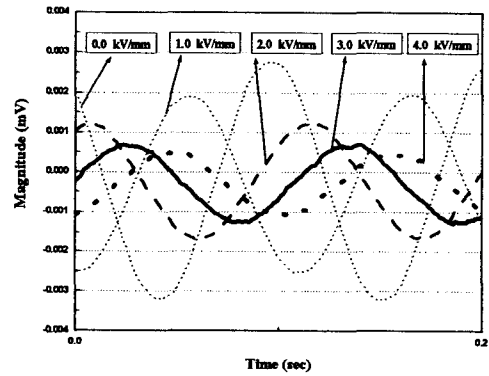


Fig. 11 Steady state response signal of the beam under applied electric filed change (Electrode gap : 1.5 mm)

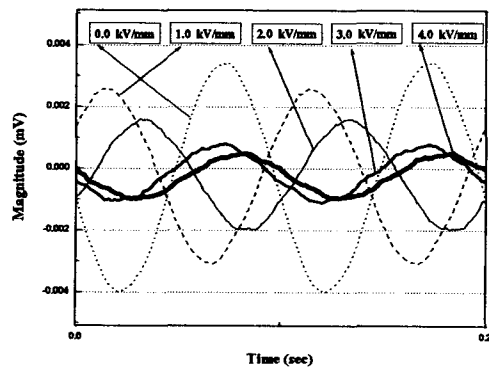


Fig. 12 Steady state response signal of the beam under applied electric filed change (Electrode gap : 2 mm)

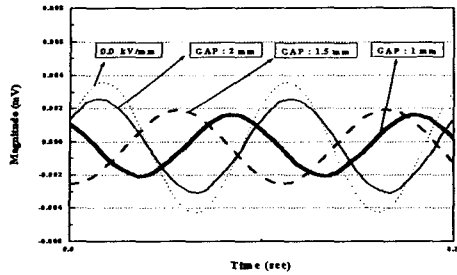


Fig. 13 Steady state Response signal of the beam under electrode gap change (Applied electric filed : 1 kV/mm)

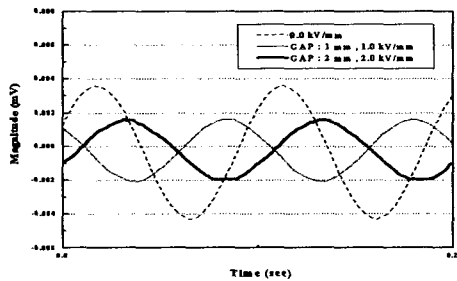


Fig. 14 Steady state response signal of the ERF-beam

Fig. 14는 전극간극을 각각 1mm, 2mm로 하고, 전기장 강도 $E = 1.0 \text{ kV/mm}$, $E = 2.0 \text{ kV/mm}$ 로 하여 응답을 살펴본 그림이다. 본 연구의 결과에서는 $E = 5.0 \text{ kV/mm}$ 의 인가 전기장 내에서는 전극 간극과 인가 전기장 사이에는 일정한 관계가 유지됨을 알 수 있었지만, 과도한 전기장이 인가되는 경우에는 불안정한 응답을 보임을 파악하였다. 이는 자유진동의 실험에서와 마찬가지로 고체 미립자의 특성에 의한 것으로 파악된다.

5. 결론

본 연구에서는 ERF-외팔보의 전극간극의 변화와 인가 전기장의 강도 변화에 따른 진동특성을 파악해보았다. 그 결과 전기장의 강도가 같다면 전극간극이 작을수록 ER유체의 순간적이고 가역적인 상변화의 특징으로 인하여 ER유체를 함유한 구조물 자체의 진동특성이 변화하여 공진점을 회피함을 알 수 있었다. 이것은 ER효과가 ER유체에 인가하는 전기장의 강도에 비례함을 보여 주는 것이다. 하지만 일정 전기장 이상에서는 고체

미립자의 특성으로 인하여 시스템이 불안정해짐을 알 수 있었다. 본 연구에서 적용한 ER유체는 실리콘 오일과 전분을 이용하였으며, 무계분율을 40wt%하여 조성하였다. 전기장 강도를 서서히 높이면서 끝단의 진폭변화를 살펴본 결과 일정 전기장 이하에서는 인가 전기장이 클수록 진폭이 크게 줄어들음을 알 수 있었다. 하지만 입력 전기장의 강도에 있어서는 일정 전기장 이상에서는 매우 활발한 극전화 작용으로 인해 ER유체의 고상화 현상으로 더 이상의 진폭변화가 일어나지 않음을 알 수 있었다.

향후 본 연구의 결과를 토대로 고체 미립자의 종류와 무계분율 변화에 따른 동특성을 파악하여 보다 효과적 인 ER유체를 선정하여 진동제어에 적용하고자 한다.

선정된 ER유체를 이용하여 ER유체의 동특성 변화로 인해 새롭게 발생하는 공진 주파수를 PZT를 이용한 PPF제어기법을 적용하여 추가의 진동제어를 수행함으로써 보나 나은 진동제어 효과를 발휘하는 복합제어기법에 실현해 보고자 한다.

6. 참고문헌

- (1) W. M. Winslow, " Induced Fibration of Suspension", J. of Applied Physis, 20, 1137, 1949
- (2) S.-B. CHOI, " ELECTRIC FIELD-DEPENDENT VIBRATION CHARACTERISTICS OF A PLATE FEATURING AN ELECTORRHEOLOGICAL FLUID," Journal of Sound and Vibration, Vol. 234, No. 4, Jul 2000, pp. 705-712.
- (3) S.-B. Choi, Y.-K. Park. "Active Vibration Control of a Cantilevered Beam Containing an Electro-Rheological Fluid," Journal of Sound and Vibration, Vol. 172, No. 3, May 1994, pp. 428-432.
- (4) Yong-Kun Park, Seung-Bok Choi " Vibration Control of a Cantilevered Beam via hybridization of Electro-Rheological Fluids and Piezoelectric Films" Journal of Sound and Vibration, Vol. 225, No. 2, Aug 1999, pp. 391-398.
- (5) 광문규, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동학회지, 제5권 제3호, pp. 292-302 1997.
- (6) 김도태, 장성철, 최윤대, "분산계 ER유체의 점도-온도 특성", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, 1999, pp 393-398.
- (7) 장성철, 염만오, 김도태, 김태형, 배태열, "평행평판의 진극형상에 따른 ER유체의 유동특성", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 2001, pp. 207-212