

지능형 공정제어 시스템 적용을 위한 ER 작동기의 진동제어 특성에 관한 연구

장성철[#]

Study on the Vibration Control Characteristics of ER Actuator for Application in Intelligence Process Control Systems(PLC)

Sung-Cheol Jang[#]

ABSTRACT

This paper presents experiments on the evaluation of characteristics of ER fluids used for vibration control of application in intelligence type process control systems. Dynamic characteristics of the actuator(beam) embedded with the ER fluid can be controlled by changing the strength of the electric field applied on the ER fluids, thus provides a mean to avoid the resonance. In case electric field is supplied to the smart structure with ER fluids, vibration energy is dissipated more than the beam without electric field, because particles in ER fluid form a chain structure in the presence of electric field. The damping and stiffness of the beam with ER fluid are increased when the applied electric field increases. The characteristics of damping and stiffness of the ER fluid with various electric field strength were investigated by conducting a vibration test of the beam with ER fluid. If it applies characteristics of the ER fluids, it will be able to apply in the PLC control system for the vibration which occurs from process system.

Key Words : ER Fluids(ER유체), Process Control Systems(공정제어시스템), Smart Structure(지능구조물), Vibration Control(진동제어), Dynamic Characteristics(동역학적특성), Program Logic Controller(PLC)

1. 서 론

에너지 절약 및 환경문제로 인한 경량화 기술은 첨단 소재의 개발 및 제작 기술의 발전으로 기계 산업 및 공정시스템 분야에서 매우 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 경량화로 인하여 시스템의 진동 및

소음문제를 유발하게 되었고 그에 대한 연구의 필요성을 요구하게 되었다. 최근 진동저감 기술과 관련하여 외란에 능동적으로 대처할 수 있는 지능구조물에 관한 연구들이 활발하게 진행되고 있는데, 지능구조물이란 공정 시스템은 물론 일반 구조물 설계시 예측하지 못한 외란에 대하여 능동적으로 대처할 수 있도록 감지기, 작동기 및 제어시스템의 능력을 동시에 보유한 구조물을 말한다. 이러한 자동화 시스템을 구성하는 지능구조물에 대한 효율적인 활용을 위해서

[#] 교신저자 : 경일대학교 기계공학과 자동화전공(외래)
E-mail:sccjang@hanmail.net

는 제어 이론의 개발과 더불어 실제로 적용되어지는 감지기 및 작동기의 개발이 필수적이라 할 수 있다.

현재 다양한 지능성 재료(Smart Materials)들이 개발되어 산업분야에 적용되어지고 있으며, 지금까지 알려진 지능성 재료로는 감지기와 작동기로 쓰이는 압전재료(Piezoelectric Material), 작동기로 주로 쓰이는 전기점성유체(이하 ER유체)^[1], 형상기억합금(Shape Memory Alloy) 그리고 감지기로 주로 쓰이는 광섬유(Optical Fiber) 등^[2-4]이 있다.

공정제어 시스템 및 산업 시스템에 대한 효과적인 진동제어를 수행하기 위해서는 제어 대상의 특성에 맞는 지능성 재료를 선택하여야 하며, 각각의 지능성 재료들이 가지고 있는 특성에 대한 고찰이 반드시 선행되어야만 한다.

본 연구에서는 공정제어 시스템 적용을 위하여, 전기장의 강도에 따라 유변학적 특성이 변화하는 ER유체를 이용하여 외팔보 구조물에 적용하였으며, 진동 제어용 작동매체로 작용하는 ER유체^[5-8]가 가지는 제어 특성을 파악해 보고자 한다.

2. ER유체의 빙햄 특성

ER유체에 전기장을 인가하게 되면 빙햄유체(Bingham fluid)의 특성을 나타내며, 전기장을 인가하지 않았을 경우에는 일반적인 뉴턴유체(Newtonian fluid)의 특성을 나타내게 된다. 뉴턴유체는 유체가 흐를 때 전단응력이 전단속도비에 비례한다고 가정한다. 뉴턴유체로써, 그 비례상수는 점성계수로 정의되며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, τ 는 전단응력, μ 는 점성계수를 나타내며 $\dot{\gamma} (= du/dy)$ 는 전단속도비이다.

ER유체는 외부에서 가해진 전기장에 의해 유체의 점도가 변하는 것으로 표현하고 있지만, 입자 분산계 ER유체에서는 실제적으로 유체의 겔보기 점도가 변하는 것이다.

유체의 전단력에 대한 항복전단응력이 변화하는 것 즉 빙햄유체의 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 용매 종류, 입자 종류, 무게분율 그리고 용매의 점도 등으로 결정되는 ER유체의 고유상수이다.

식 (3)의 관계로부터 전기장에 대한 전체 전단응력의 증가 및 항복전단응력의 크기 등을 예측할 수 있다.

ER유체의 점도 실험을 위하여 본 연구에서 제조한 ER유체의 용매는 실리콘오일(한국신에츠社 제조, KF-96 계열, 50cSt)이며, 전도성의 입자는 특수화학처리된 starch(Sigma社 제조)를 사용하여 용매에 대한 무게분율을 40 wt%가 되도록 조성하였다.

Fig. 1은 회전식 점도계의 개략도를 나타낸 것이다. 이것은 동일한 중심 축 상에 있는 고정된 외부원통과 회전하는 내부원통 사이의 간극에 ER유체를 주입하고, 전단속도비를 변화시켜, 내부원통을 회전시키는 데 필요한 토크를 계측하여 점도를 측정하는 점도계이다.

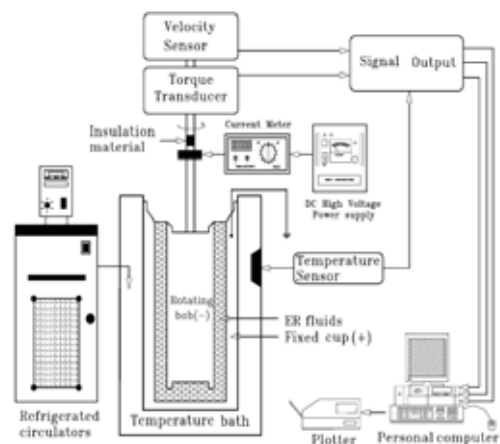


Fig. 1 Schematic illustration of the experimental set-up using VT-500

회전식 점도계인 VT-500은 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 0~1kV/mm까지 0.25kV/mm씩 단계적으로 변화시켰으며, 전단속도비를 0~200 [1/s]까지 2분 동안에 증가하도록 조건을 설정하였다.

Fig. 2는 온도 20℃, 전분입자의 무게분율 40 wt%인 ER유체에 대해서, 전기장을 E=0~1kV/mm까지 0.25kV/mm씩 단계적으로 변화시켜 실험한 결과이다. 그림을 통하여 전기장을 인가하지 않은 상태에서의 ER유체는 뉴턴유체와 같이 거동하며, 전기장이 인가되면 초기 항복전단응력이 발생하는 빙햄특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 인가된 전기장이 높아짐에 따라 항복전단응력도 증가하며, 전단속도비의 증가와 함께 전단응력도 서서히 증가하는 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 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 될 뿐만 아니라, bob 축 지지부에 작용하는 미소한 마찰손실토크의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 마찰손실 토크는 bob의 기동 시에는 크고, 전단속도비의 증가와 함께 감소하는 경향을 나타내며, 전단속도비가 어느 정도 커지게 되면 점성마찰 특성이 지배적으로 작용하게 된다^[9].

ER유체의 항복전단응력은 유체가 변형을 일으키기 시작하는 순간의 전단응력으로서, 매우 짧은 시간에 발생하여 불규칙적으로 거동하기 때문에 정확하게 계측하기 매우 어렵다. 본 연구에서는 항복전단응력 값을 구하기 위하여 Fig. 2의 점도측정 데이터를 이용하여 전단속도비의 값이 영(zero)이 될 때의 절편값으로 설정하였다.

Fig. 3은 인가 전기장에 따른 항복전단응력의 변화를 나타내고 있는데, 식 (3)의 형태로 표시하면 40wt%의 무게분율에 대하여 $\tau_y(E) = 292.86 E^{1.32}$ 로 나타낼 수 있다.

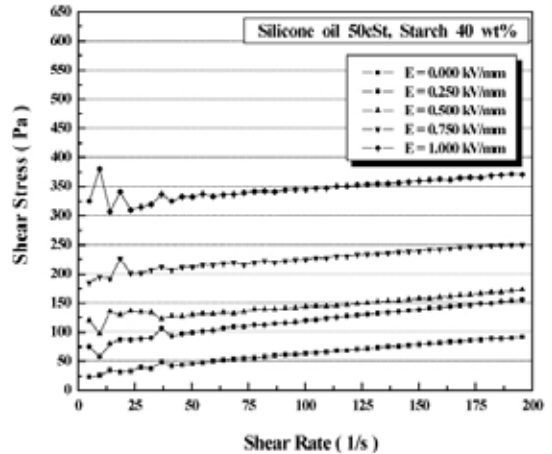


Fig. 2 Relationship between shear stress and shear rate of the ER fluid (T=20℃, wt=40wt%)

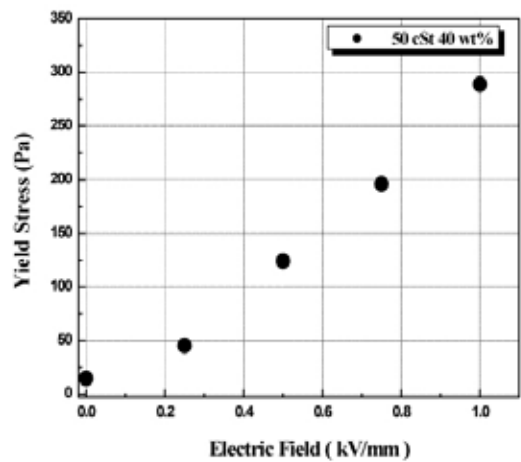


Fig. 3 Relationship between yield stress of the ER fluid and electric field (T=20℃, wt=40wt%)

3. ER유체의 제어 특성

본 연구에서 조성한 ER유체를 대상으로 점도측정 실험을 수행하였으며, 인가 전기장의 크기에 따라 항복응력이 증가하는 것을 파악하여 ER유체의 전단응력을 전기장 함수로 표현할 수 있다는 것을 보였다.

일반적으로 ER유체가 함유된 작동기의 경우 유체 영역과 고체영역이 함께 존재하는 경우로, 복합구조

물의 구성시 유체를 함유할 수 있는 공간을 반드시 고려해야 한다. ER유체의 삽입공간을 고려하여 제작된 작동기는 인가된 전기장의 강도에 따른 ER유체의 특성 변화를 이용하여 공정제어시스템의 진동제어에 활용될 수 있다. 즉 ER유체는 다른 지능 재료들처럼 힘 또는 모멘트를 발생시켜 작동기의 역할을 수행하는 것이 아니라, 구조물 속에 함유되어 ER유체의 동특성을 변화시킴으로서 진동 제어 목적에 활용될 수 있는 것이다.

ER유체가 함유된 작동기의 동적 거동을 정확하게 파악하기 위해서는 ER유체 자체의 메카니즘에 대한 정확한 분석과 ER유체와 결합된 작동기와의 상관관계를 정확히 파악해야 하는 어려운 점이 있다.

본 연구에서는 ER유체가 함유된 작동기의 운동방정식을 구성하는데 필요한 보의 물성치에 대하여 실험을 통해 측정된 구조물의 응답특성을 역으로 추정하여 결정하는 방법을 사용하였는데, 전기장 함수로 얻어지는 작동기들의 모달변수의 변화 즉 강성과 감쇠비의 변화 특성을 이용하여 다음 식과 같은 운동방정식의 파라미터들을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{n}_k(t) + 2\zeta_k\omega_k\dot{n}_k(t) + \omega_k^2n_k(t) \\ = -2\widehat{\zeta}_k(E)\widehat{\omega}_k(E)\dot{n}_k(t) \\ - \widehat{\omega}_k^2(E)n_k(t) + f(t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, ζ_k : k 번째 모드의 전기장 무인가시 감쇠비, ω_k : k 번째 모드의 전기장 무인가시 고유진동수, $\widehat{\zeta}_k(E)$: k 번째 모드 전기장 인가시 변화된 감쇠비, $\widehat{\omega}_k(E)$: k 번째 모드 전기장 인가시 변화된 고유진동수, $n_k(t)$: k 번째 모드 좌표, $k=1, 2, 3 \dots$ 이다.

4. 실험장치 및 실험 방법

지능형 공정제어시스템에서 발생하는 진동을 제어하기 위한 ER유체의 유용성 검증과 시스템을 구성하는 기본 구조물의 강성에 따른 제어 특성을 파악하기 위해 Table 1과 같이 기본 구조물의 제원을 달리하여 실험을 수행하였으며, Fig. 4와 같이 작동매체인 ER

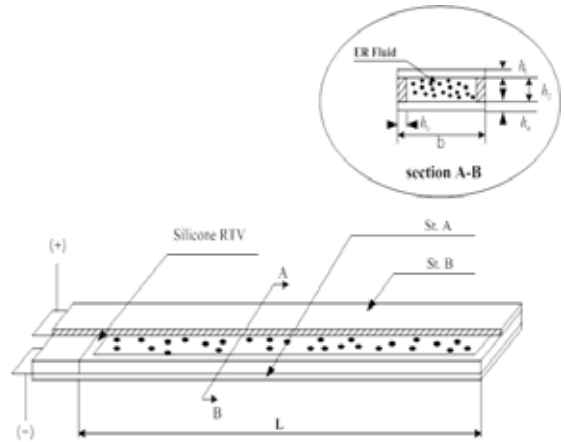


Fig. 4 Schematic diagram of the proposed actuator containing ER fluid

Table 1 Specifications of ER actuator (unit:mm)

	L	b	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	St. A	St. B
Type I	300	30	1	2	2	0.6	Al.	Epoxy
Type II	200	30	1	2	2	1	Epoxy	Epoxy
Type III	200	30	0.5	2	2	0.5	Epoxy	Epoxy

유체가 함유된 외팔보형태의 구조물을 제작하였다.

Type I은 Epoxy와 Aluminum과 같은 비교적 강성이 큰 재료를 기본 구조물로 사용하여 제작하였으며, Type II는 기본 구조물의 강성을 변화시켜 유연한 재질인 Epoxy를 사용하였으며, Type III은 Type II의 Epoxy의 두께를 반으로 줄여 보다 더 유연한 구조물이 될 수 있도록 제작하였다. 이때 삽입된 ER유체는 실리콘오일(한국신에츠사, KF-96계열, 50cSt)과 Starch (Sigma社) 입자를 무게분율 40 wt%로 조성하여 사용하였다.

실험장치는 Fig. 5와 같이 구성하였는데, ER유체가 삽입된 작동기를 외부 가진신호의 입력을 위해서, 셰이커(Shaker) 위에 지그를 이용하여 설치하였으며, ER유체에 작용하는 전기장을 인가하기 위해 고전압 발생장치(High Voltage DC Power Supply)를 작동기의 전극부분에 설치하였다. 입력력 신호에 대한 획득 장치로는 입력신호의 경우 지그 부분에 부착한 가속도계를 통해 이루어졌으며, 출력신호의 경우 작동기의

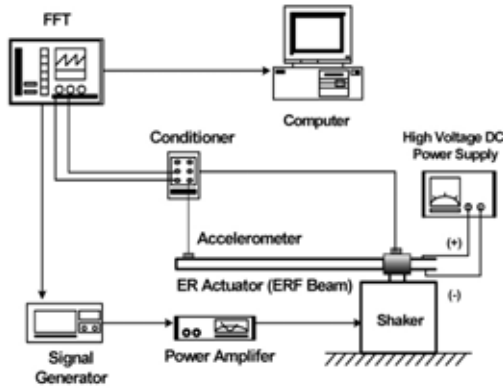


Fig. 5 Experimental set-up(ER Actuator)

끝단에 가속도계를 부착하여 신호분석기(CF-350)를 통해 데이터를 획득하고 분석할 수 있게 구성하였다.

실험방법은 외부 가진 신호로 다중 주파수 성분의 신호인 sine-sweep 신호(0 ~ 100 Hz)를 사용하여인가전기장의 크기 변화를 0.0 ~ 1.5 kV/mm까지 0.5 kV/mm씩 증가시키며 진동응답특성을 파악하였다.

본 실험에서는 ER유체의 특성변화 중 강성변화만을 고려하여 실험을 수행하였다.

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 Type I의 작동기에 대하여 인가 전기장을 0.0 ~ 1.5 kV/mm까지 0.5 kV/mm씩 증가시키며 실험적으로 구한 주파수 응답함수이다. 그림에서 알 수 있듯이 1차 감쇠고유진동수는 인가 전기장의 크기에 따라 12.0 ~ 13.0 Hz로 증가하였으며, 2차 감쇠 고유진동수는 43.5 ~ 47.0 Hz까지 증가하였다. Table 2는 감쇠 고유진동수의 변화를 정리한 것이다. 실험결과 인가 전기장의 크기변화에 대한 ER유체 특성 변화로 인한 고유진동수의 변화가 아주 미미함을 알 수 있다. 이것은 전기장 인가로 인하여 변화하는 ER유체의 특성(강성) 변화보다 에폭시(epoxy)와 알루미늄(aluminum)으로 제작된 작동기 자체가 가지고 있는 강성이 훨씬 더 크기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 7은 Type II의 경우에 대하여 인가 전기장 크기에 따른 주파수 응답함수를 실험적으로 구한 것이며, 그 변화를 Table 3에 나타내었다. 이 경우 Type I의 경우와 마찬가지로 전기장 인가에 대한 작동기의

동특성 변화가 아주 작음을 알 수 있다. 이 경우도 역시 Type I의 경우와 마찬가지로 전기장 인가에 따른 ER유체의 특성변화가 작동기를 구성하는 특성에 비하여 아주 미미하게 작용한다는 것을 파악할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 조정한 ER유체의 효과를 작동기의 특성변화에 적용하기 위해서는 구조물의 특성파악이 선행되어야 함을 알 수 있다.

Fig. 8은 Type III의 경우에 대하여 인가 전기장의 크기에 따른 작동기의 동특성 변화에 따른 주파수 응답을 보여주는 것이며, Table 4는 그 변화를 나타내고 있다. 작동기의 1차 감쇠 고유진동수의 경우 전기장이 인가되지 않았을 경우의 감쇠 고유진동수가 11.00 Hz에서 1.50kV/mm의 전기장을 인가한 경우 20.50Hz로 변화하였다.

Table 2 Natural frequencies of the proposed ER actuator Type I with various applied electric fields

Voltage (kV/mm)	Natural Frequency (Hz)	
	1st mode	2nd mode
0.0	12.0	43.5
0.5	12.0	44.0
1.0	12.5	45.5
1.5	13.0	47.0

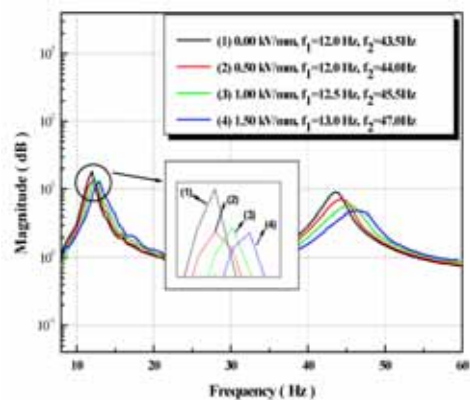


Fig. 6 Frequency response functions of the constructed structure with 1 mm thickness of epoxy panel and 0.6 mm thickness of aluminum panel (Type I) for the case of various applied electric fields

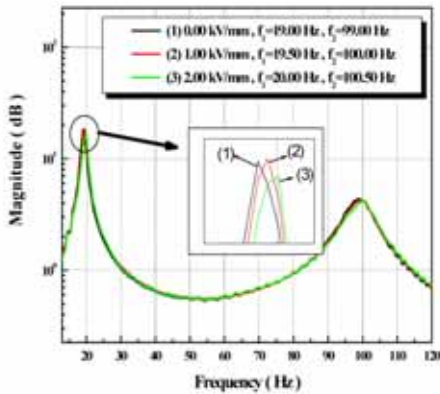


Fig. 7 Frequency response functions of the constructed structure with 1 mm thickness of epoxy panel (Type II) for the case of various applied electric fields

Table 3 Natural frequencies of the proposed ER actuator Type II for the case of various applied electric fields

Voltage (kV/mm)	Natural Frequency (Hz)	
	1st mode	2nd mode
0.0	19.0	99.0
1.0	19.5	100.0
2.0	20.0	100.5

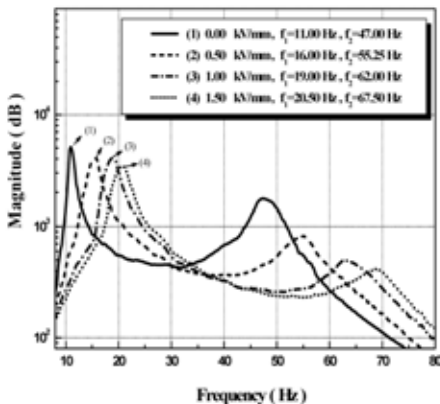


Fig. 8 Frequency response functions of the constructed structure with 0.5 mm thickness epoxy panel (Type III) for the case of various applied electric fields

Table 4 Natural frequencies of the proposed ER actuator Type III for the case of various applied electric fields

Voltage (kV/mm)	Natural Frequency (Hz)	
	1st mode	2nd mode
0.0	11.0	47.0
0.5	16.0	55.5
1.0	19.0	62.0
1.5	20.5	67.5

Type I, II, III에서 전기장을 동일하게 증가하지 않은 이유는 Type I의 경우 전기장 변화에 따른 작동기의 동특성 변화가 아주 미미하게 파악되었으며, Type II의 경우에도 증가된 전기장은 Type I과 동일하게 적용하여 실험을 수행하였지만 작동기의 동특성 변화가 아주 미미하게 파악되어 전기장의 크기를 다르게 하였다. 또한 전기장의 크기가 동일한 경우 Type에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보면 Type I, II의 경우는 Type III에 비하여 구조물의 강성이 크다고 할 수 있으며, 그 결과 ER유체의 특성변화가 전체 구조물의 특성변화에 미치는 영향이 아주 미미함을 파악할 수 있었다. 그러나 Type III와 같이 비교적 유연한 구조물에 대해서는 증가된 전기장의 크기에 따라 ER유체의 특성변화가 전체 구조물의 특성변화에 많은 영향을 주며, 지능형 공정제어 시스템 적용시 ER작동기의 우수한 진동제어 효과가 나타남을 알 수 있었다.

그러나 ER유체가 삽입된 작동기의 전체 강성변화에 비하여 ER효과에 의한 특성변화에 따른 강성의 변화가 아주 미미한 경우에는 진동제어가 원활하게 수행되지 못함을 알 수 있었다. 이것은 진동제어 측면에서 ER유체를 활용하고자 하는 경우, 제어대상 작동기의 특성에 대한 고려가 선행되어야만 공정제어시스템 적용시 효과적인 진동제어를 수행할 수 있을 것이라 생각한다.

6. 결 론

본 연구에서는 자체 조성한 ER유체의 빙햄특성 실

험과 지능형 공정제어 시스템의 작동기 역할을 위해 제안된 ER작동기의 진동제어 특성에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

ER유체의 병행특성 실험에서는 인가된 전기장이 증가할수록 항복전단응력이 증가함을 알 수 있었으며, ER 작동기의 진동제어 특성에 관해서는 유연한 구조물에 ER유체를 적용하였을 경우, 인가된 전기장의 크기에 따라 ER유체의 특성변화가 전체 구조물의 특성변화에 많은 영향을 주며, 지능형 공정제어 시스템에서 발생할 수 있는 진동에 대하여 우수한 진동제어 효과를 얻을 수 있었다.

공정제어 시스템에서 진동제어를 위한 ER 작동기의 활용은 ER유체의 특성변화를 이용하여 구조물 전체의 동특성을 변화시켜 공진점 회피를 통한 구조물의 안정성을 확보하는 것이다. 그러므로 전기장 강도에 따른 ER 작동기의 진동제어 효과를 바탕으로 지능형 공정제어 시스템의 작동기로 실제 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

tion of Damping and Stiffness of Smart Structures Incorporating ER Fluids,” *Applied Acoustics* 45, pp. 211-226, 1995.

7. 김재환, 강영규, 최승복, “전기장에 따른 복합재 ER Beam의 진동제어 특성,” *한국소음진동공학회지*, 제11권, 제3호, pp. 416-421, 2001.
8. 윤신일, 박근효, 한상보, “전기점성유체와 압전세라믹을 이용한 복합지능구조물의 진동제어,” *한국소음진동공학회논문집*, 제13권, 제8호, 2003.
9. 장성철, 박창수, 이종두, “ER유체를 작동유체로 하는 클러치의 제작 및 성능 실험,” *한국기계가공학회지*, 제3권, 제1호, pp. 84-89. 2004.

참고문헌

1. Winslow, W. M., “Induced Fibration of Suspension,” *J. of Applied Physics*, 20, 1137, 1949.
2. Coulter, J. P. and Duclos T. G., “Applications of Electro-Rheological Material in Vibration Control,” *Proceedings of the Second International Conference on ER Fluids*, pp. 300-325, 1989.
3. Choi, Y., Sprecher, A. F., and Conard, H., “Vibration Characteristics of a Composite Beam Containing an Electrorheological Fluid,” *Journal of Intelligent Material System and Structure*, Vol. 1, pp. 91-104, 1990.
4. Choi, Y. D., “Mechanical properties of a composite beam containing an electrorheological fluid,” Ph. D dissertation, North Carolina State University, Raleigh, 1991.
5. Choi, S. B., and Park, Y. K., “Active Vibration Control of a Cantilevered Beam Containing an Electro-Rheological Fluid,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 172, No. 3, pp. 428-432, 1994.
6. Mahjoob M. J., Martin H. R., Ismail F., “Identifica-