

**압전 재료를 이용한  
지능구조물의 최근 연구 동향**

김 흥 수\*  
(인하대학교 기계공학과)

### 1. 머리말

수 십년 동안 엔지니어들과 과학자들은 진보적인 로봇이나 기계 구조물 설계를 위해 자연으로부터 영감을 얻어왔다. 오늘날 자연은 완전히 새로운 단계의 구조 시스템 즉, 지능 구조물에 대한 좋은 본보기가 되고 있다. 변화하는 환경을 수용하기 위해 물질의 구조, 조직, 형상 그리고 특성 등을 적응시켜가는 자연의 능력과 생물학적인 유사성은 특수한 기능을 갖춘 구조물을 설계하는데 이용되어질 수 있다. 이러한 구조물은 스스로 형태를 변화시킬 수 있고 자신의 작동 상태를 감시하고 진동을 제어하며, 외부환경 변화에 능동적으로 적응할 수 있는 특성을 가지고 있다. 이러한 구조물을 지능구조물 (smart 혹은 intelligent structure)이라 한다.

지능구조물은 그림 1에서 보는 바와 같이 감지기, 제어기, 작동기로 이루어져 있다. 감지기는 생명체의 감각 신경계와 같이 구조물의 표면에 접합 혹은 내부에 삽입되어 구조물 내부 및 외부의 자극과 현상을 감지한다. 제어기는 생명체의 두뇌계가 신경계를 통해 얻은 정보를 토대로 판단하고 지시하는 것처럼, 감지기에서 들어오는 신호를 바탕으로 마이크로프로세서와 제어 알

고리즘이 연계된 시스템으로 환경조건 변화를 판단한 후 알맞은 조치를 취할 수 있도록 신호를 발생한다. 그리고 생명체의 근육계가 몸을 지탱하고 두뇌계에서 주어진 명령에 따라 구체적인 동작을 수행하듯이, 작동기는 마이크로프로세서에서 보내진 신호에 따라 적절히 작동하게 된다. 따라서 지능구조물은 내외부 환경변화에 대하여 자체 처리 능력을 보유하고 있기 때문에 시스템 성능의 극대화 및 유지비용의 최소화를 가져오게 된다. 지능구조물을 구성할 수 있는 지능 재료에는 여러 가지가 있지만, 실용화 측면에서 가장 활발히 연구되고 있는 것은 다음과 같다. 기계적 변형에 의해 전기적 신호가 발생하고, 전압인가에 의해 기계적 변형이 발생하는 압전 재료 (piezoelectric material), 전기장과 자기장에 따라 유변학적 성질이 제어될 수 있는 ER(electrorheological) 및 MR(magneto-rheological) 유체, 온도

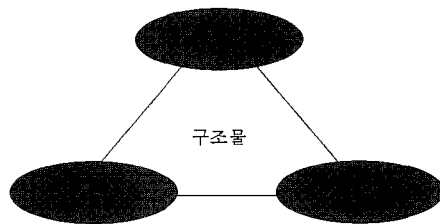


그림 1 지능 구조물의 개념도

\* E-mail : heungsookim@inha.ac.kr, Tel :032)860-8256

소음·진동

(혹은 열) 조절에 의해 기억된 형상이 제어될 수 있는 형상기억합금(shape memory alloy), 압전특성을 가지는 종이작동기(electro active paper), 그리고 지능구조물의 센서로 매우 효과적인 광섬유(optical fiber) 등이다.

국내에서도 1990년대 초반에 지능구조물에 대한 소개<sup>1)</sup>가 있는 후 많은 연구가 이루어져 왔고 여러 건의 해설 기사도 소개 되었다<sup>2,3)</sup>. 지능구조물의 초기 개발 단계에서는 거대유연 우주구조물의 진동이나 형상을 제어하기 위한 연구가 주를 이루었지만 지금은 우주 분야 뿐만이 아니라 고정익이나 회전익 항공기, 자동차, 토목 건축물, 기계공구, 의료용 시스템 그리고 생체모방 작동기에 이르기까지 공학의 거의 전 분야에 걸쳐 연구가 이루어지고 있다. 항공우주 분야에서의 한 예로는 고정익 항공기의 날개나 헬리콥터의 로터 블레이드에 부착된 작동기를 이용하여 에어포일의 형상을 바꿈으로써 양력이나 항력의 변화를 유도하고 공탄성적인 안정성을 높이는 데 대한 연구가 많이 수행되었고 또 최근 미 국방부가 주관하고 있는 Morphing Wing 프로젝트가 계속 수행되고 있는 중이다. 하지만 지능구조물의 응용에 있어서 가장 큰 장애는 작동기의 작동범위, 지능재료의 특징에 대한 신뢰성 있는 데이터의 부족, 강건 제어 이론의 부족 그리고 신뢰성 있는 수학 모델과 해석의 어려움 등이 있다. 1990년 이후로 국내에서도 지능구조물에 사용되는 지능재료와 그 응용에 대한 연구가 많이 진행되어 왔고 여러 번 소개되었지만 작동원리에 대한 소개는 없었기에 이 글에서는 지능구조물의 작동기와 감지기로 가장 많이 사용되어지고 있는 압전재료의 작동 원리와 최근 연구동향에 대한 소개를 목적으로 한다.

## 2. 압전재료 작동기

지능구조물에 사용되는 지능재료는 앞에서 언

급한 바와 같이 여러 가지가 있지만 가장 많이 사용되어지고 있는 지능재료는 압전재료이다. 잘 알려진 대로 압전재료는 압력이 가해지면 압전재료에 전하(electrical charge)가 발생하게 되고 그 반대로 전기장이 가해지면 변형이 생기는 특성이 있다. 이러한 현상은 1880년대에 큐리 형제(Pierre and Jacques Curie)가 크리스탈 변형시 전하가 발생한다 것에서 처음 발견을 했다. 그래서 그들은 이 현상을 pressure electricity를 뜻하는 그리스어인 piezoelectricity 즉 압전효과라고 불렀다. 하지만 한참동안 실용화되지 못하다가 제2차 세계대전 중에 잠수함의 위치를 추적하기 위한 음파탐지기로 쓰이면서 실용적인 연구가 시작되었다. 처음에는 수정결정(quartz crystal)에서 시작하였으나 Rochelle salt나 tourmaline를 비롯한 백여가지의 강유전성 물질(ferroelectric material)이 발견되었고 1947년에 베륨 티탄산염(Barium Titanate)이 발견되면서 세라믹 계통의 압전재료가 만들어지고 이를 계기로 소나, 적외선 센서, 가속도 측정기, 마이크로폰 등 그 응용범위가 급속히 확장되었다. 이 물질은 곧 이어 압전효과가 매우 크며 압전세라믹이라고 불리는 PZT(lead zirconate titanate)의 개발로 이어지게 되었다. 압전세라믹은 전기-기계적 결합성이 매우 좋고 전기적인 안정성과 사용온도가 높은 장점이 있기 때문에 취성이 있는 단점에도 불구하고 많이 사용되어 오고 있다.

압전 세라믹은 자연상태에서는 다결정 구조물로 되어있으며 압전효과를 가지지 않고 있다. 하지만 이 압전 세라믹에 높은 전기장을 가해주어 극전화(polarization)를 시켜주면 압전효과를 가지게 된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 이 극전화를 통해서 압전 세라믹 내의 분자 쌍극자(dipole)의 방향이 형성된다. 압전 세라믹의 전극에 전압을 공급하면 전장의 극화(polarity)에 의해 인장 혹은 수축 현상이 나타나며 또한 이와는 반대로 압전 세라믹에 인장력 혹은 수축력이 가해지면 세라

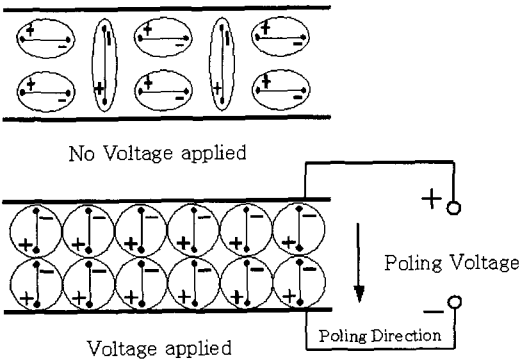


그림 2 압전 세라믹의 극전화 현상

믹은 전압을 발생하게 된다. 따라서 우리는 압전 세라믹을 작동기 혹은 감지기로서 사용할 수 있는 것이다.

가장 대표적으로 사용되는 압전 세라믹인 PZT는 납(lead), 지르코늄(zirconium), 산화티탄(titanium oxide)의 혼합물 가루를 800-1000 °C의 높은 열을 가하여 PZT 가루를 만든 다음 냉각시키면서 원하는 형상을 만든 후 높은 전기장을 가해 주어 압전효과를 가지는 세라믹으로 만들게 된다. 압전세라믹은 주로 얇은 판의 형태로 만들어지며 낮은 전기장과 낮은 응력 상태에서는 선형적인 거동을 보이고 높은 전기장과 높은 응력 상태에서는 비선형적인 거동을 보인다.

또 다른 압전재료로서 1924년에 개발된 폴리머 계통이 있었는데 한동안 관심을 끌지 못하다가 1969년 일본의 가와이에 의해 PVDF(polyvinylidene fluoride)가 개발되면서 새로운 전기가 마련되었다. 이는 기존의 세라믹 계통의 압전소재에 비해 광범위한 사용주파수 영역 (0.005 Hz~109 Hz), 광범위한 동적 사용범위 ( $10^5$  Pa~ $10^8$  Pa), 높은 강도 및 충격저항 ( $10^9$  Pa~ $10^{10}$  Pa), 얇은 두께로 인한 유연성(6  $\mu$ m~110  $\mu$ m), 습도 및 화학물에 대한 높은 안정도, 높은 절연 강도(75 V/ $\mu$ m), 높은 출력전압(세라믹에 비해 20배 이상), 낮은 음향 임피던스들과 같은 장점을 갖고 있다. 이러한 많은 장점을 갖고 있는 압전 폴리머의 단점으로는 사

용 온도 범위가 약 -40°C에서 100°C로써 보통 300°C까지 사용할 수 있는 압전 세라믹보다 낮은 편이며 또한 전자기(electro-magnetic)에 매우 민감한 것이다.

이러한 압전세라믹 그리고 압전폴리머의 개발은 1970년대까지 폭넓은 압전재료의 연구 및 응용을 불러 일으켰다. 예를 들면, 전화기의 송수신기, 로봇센서와 같은 전기 기계적 감지기나 가진기, 의료 영상, 비파괴 검사 등에 쓰이는 초음파 변환기, Surface Acoustic Wave(SAW) 장치, Sonar 등 응용분야는 매우 넓어졌다.

1980년대에 들어와서는 지능구조물에까지 압전 재료가 이용되게 되었고 지능구조물의 기술을 발전시키는데 이바지하게 되었다. 압전재료가 이렇게 지능구조물에 많이 쓰이는 것은 압전재료가 작동기와 감지기로 동시에 쓰일 수 있고 그 응답속도가 매우 빠르기 때문이다.

### 3. 압전 지능구조물의 모델링

압전 작동기를 이용한 지능 구조물의 성능을 향상시키기 위해서는 정확한 수학적 모델링이 중요하다. 압전재료를 이용한 작동기는 기본적으로 작동변형률(induced strain)에 의해 구동되며, 1980년대 말 Crawley와 de Luis<sup>6)</sup>에 의해 지능형 보 구조물에 대한 모델링 방법이 제시되면서 많은 수학적 모델들이 개발되어 왔다. 최초 일차원적인 지능형 보 구조물에서 시작해서 평판, 셸 구조물에 이르기까지 여러 가지 수학적 모델들이 개발되어 왔으며 평판이나 셸 구조물의 작동원리도 일차원적인 보 구조물의 작동원리와 같기 때문에 이 글에서는 일차원적인 보 구조물의 수학적 모델링에 대해서만 다루도록 하겠다.

압전형 지능구조물에서 구조물의 표면이나 내부에 삽입되어 있는 압전 작동기(piezoelectric actuator)와 일차원 보는 가장 기본적인 구조물을 나타낸다. 하지만 헬리콥터의 블레이드나 항공



기의 날개, 터보 기계의 블레이드, 미사일, 우주 구조물이나 토목 구조물들이 대부분 일차원 보로 모델링 할 수 있다. 이러한 압전 작동기가 부착된 보의 정적, 동적 반응을 해석하기 위한 여러 가지 이론들이 개발되어 왔는데 이를 모델링 할 때는 자유 변형률(free strain)과 블록힘(block force)이라는 두 가지의 기본 개념을 사용한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 3축 방향으로 극화 되어 있는 압전 재료의 윗 면과 아래 면의 전극에 전압  $V$ 를 걸어주면 나타날 수 있는 최대 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon_{\max} = \Lambda = d_{31} \frac{V}{t_c} \quad (1)$$

여기서  $\Lambda$ 는 자유변형률이고,  $d_{31}$ 은 압전상수 ( $m/V$ ),  $t_c$ 는 압전 작동기의 두께이다. 그리고 같은 조건의 압전 재료가 변형이 생기지 않는 경우에는 이 변형량이 모두 힘으로 전환된다고 생각할 수 있고 여기서 나타나는 블록힘은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{bt} = d_{31} E_c b_c V \quad (2)$$

$E_c$ 는 압전 작동기의 탄성계수이다. 이 압전 작동기가 구조물에 부착되어 작동기의 변형에 대한 반력으로 작용하는 힘  $F$ 를 고려하게 되면 압전 작동기의 실제적인 변형량은 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$\epsilon = \Lambda - \frac{F}{F_{bt}} \quad (3)$$

여기서 도입된 자유 변형률과 블록힘을 이용해 실제 압전 작동기에 작용하는 힘과 변형률을 구해보면 그림 4와 같이 나타나게 된다. 이런 원리를 이용하여 압전 작동기를 보에 부착시키면 인장력이나 압축력, 또는 굽힘 모멘트를 얻을 수 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 같은 형태의 압

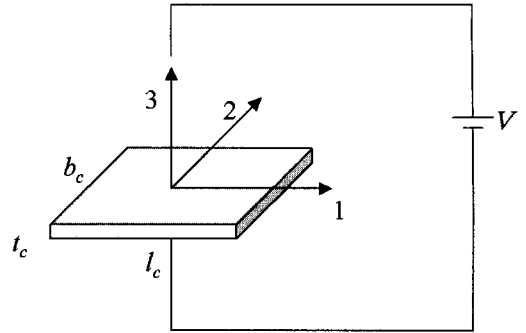


그림 3 3축으로 극화된 압전작동기

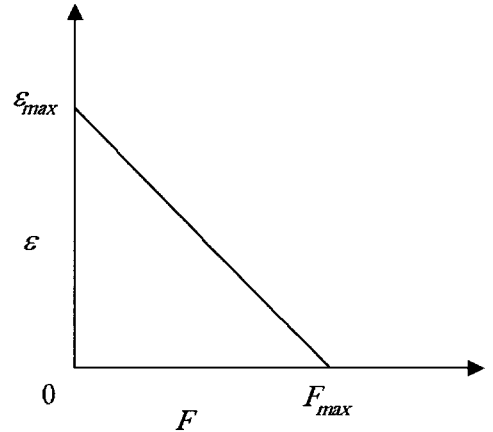
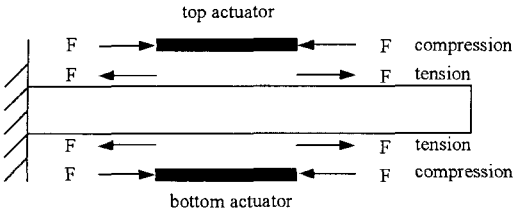


그림 4 압전 작동기의 힘-변형률 관계

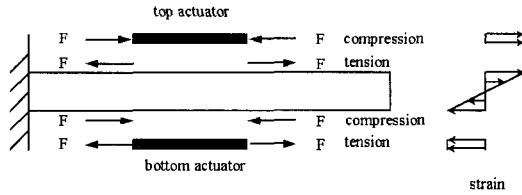
전 작동기를 보의 윗면과 아래면에 부착하고 크기와 방향이 같은 전기장을 각각의 압전 작동기에 가해주면 순수한 인장력을 얻을 수가 있고 같은 크기지만 반대 방향의 전기장을 걸어주면 순수한 굽힘모멘트를 얻을 수가 있게 된다. 이러한 일차원 지능 보 구조물을 모델링하기 위해 여러 가지 방법들이 연구되었으며 그 중 가장 많이 쓰이는 것들이 블록힘 모델(block force model), 균일 변형률 모델(uniform strain model), Bernoulli-Euler 보 모델(Bernoulli-Euler beam model)이다.

### 3.1 블록힘 모델(Block Force Model)

블록힘 모델은 앞에서 언급한 방법 중 가장 간단한 방법이다. 앞에서 언급한 바와 같이 압전 작



(a) 순수 인장력이 작용하는 경우



(b) 순수 굽힘 모멘트가 작용하는 경우

그림 5 압전 작동기의 작동 원리

동기에 전기장을 가해 주면 압전 작동기는 보에 국부적인 작동변형을 일으키게 되고 그와 동시에 보에서 작용하는 반력을 받게 된다. 이 모델에서는 압전 작동기에서의 변형률은 균일하고 보에서의 변형률은 선형으로 분포하는 것으로 가정을 하였다. 그림 5(a)에서 보여진 바와 같이 같은 압전 작동기가 윗면과 아래면에 붙어 있고 크기와 방향이 같은 전기장을 가해 주면 순수한 인장력이 발생하게 되는데 이때 발생하는 인장력은 다음과 같다.

$$F = F_{bt} \frac{EA_b}{EA_b + EA_c} \quad (4)$$

여기서  $EA_b$ 와  $EA_c$ 는 보와 압전 작동기의 인장 강성이다. 만약 압전 작동기의 강성이 보의 강성보다 훨씬 큰 경우( $EA_c \gg EA_b$ )에는 작동력은 영에 가까워지고 작동 변위는 자유 변형률에 가까워지게 된다. 그리고 반대로 보의 강성이 압전 작동기의 강성보다 훨씬 크게 되는 경우( $EA_c \ll EA_b$ )에는 작동변형은 영에 가까워지고 작동력은 블록힘에 가까워지게 된다.

윗면과 아래면의 압전 작동기에 같은 크기이지만 방향이 반대인 전기장을 가해주면 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 순수한 굽힘 모멘트가 발생하게 되는데 이 때 발생하는 순수 굽힘 모멘트는 다음과 같이 구해진다.

$$M = M_{bt} \frac{EI_b}{EI_b + EI_c} \quad (5)$$

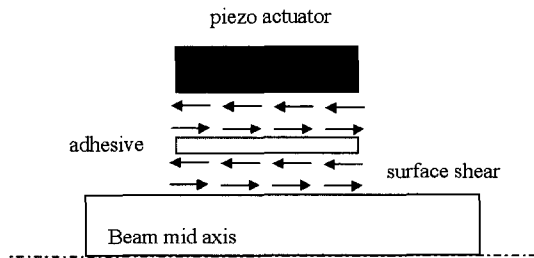


그림 6 접착층을 통한 전단 응력의 전달

여기서  $M_{bt}$ 은 블록 모멘트이고  $F_{bt}t_b$ 의 값을 가지게 된다.  $EI_b$ 와  $EI_c$ 는 보와 압전 작동기의 굽힘 강성인데 다음과 같이 나타내어진다. 여기서도 인장력의 경우와 마찬가지로 압전 작동기의 굽힘강성이 보의 굽힘 강성보다 훨씬 큰 경우( $EI_c \gg EI_b$ )에는 작동 굽힘 모멘트가 영이 되고, 그 반대인 경우에는 작동 변형률이 영이 된다. 이 방법은 아주 직관적이고 간단하여 지능 구조물의 초기 설계 단계에서 많이 사용되어진다.

### 3.2 균일변형률 모델(Uniform Strain Model)

균일변형률 모델은 블록힘 모델과 기본적인 원리는 같지만 압전 작동기와 보 구조물 사이의 접착부분을 고려한 모델이다. 그림 6에 기본적인 구조를 나타내었는데 압전 작동기와 보 사이에는 일정한 두께를 가지는 접착층이 있고 이 접착층은 순수 전단 응력만 전달하는 것으로 가정한다. 그리고 작동기는 블록힘 모델과 같이 두께 방

향으로 균일한 변형률을 가지며, 순수 굽힘이 작용하는 경우에는 보의 변형도 선형으로 일어나는 것으로 가정한다. 그러면 보의 표면과 작동기에서 나타나는 작동 변위는 다음과 같이 구해지게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_b^s}{\Lambda} &= \frac{\alpha}{\alpha + \Psi} \left[ 1 - \frac{\cosh(\Gamma \bar{x})}{\cosh \Gamma} \right] \\ \frac{\varepsilon_c}{\Lambda} &= \frac{\alpha}{\alpha + \Psi} \left[ 1 - \frac{\alpha \cosh(\Gamma \bar{x})}{\Psi \cosh \Gamma} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 순수 인장력의 경우에는  $\alpha = 2$  이고, 순수 굽힘 모멘트가 발생하는 경우에는  $\alpha = 6$  이다. 그리고 다른 상수들은 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{x}{l_c/2} \\ \Gamma^2 &= \frac{G_s}{t_s E_c} \left( \frac{1}{t_c} + \frac{E_c \alpha}{E_b t_b} \right) \frac{l_c^2}{4} \\ \Psi &= \frac{(EA)_b}{(EA)_c} = \frac{E_b t_b}{E_c t_c} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $t_s$ 와  $G_s$ 는 접착층의 두께와 전단 탄성 계수를 나타낸다.  $\Gamma$ 는 접착층의 전단 효과를 나타내는데 이 값은 접착층의 두께가 얇아지거나 강성이 커지면 커지게 된다. 접착층이 아주 얇은 경우( $\Gamma > 30$ )에는 완전 접착 조건과 비슷하게 되고 작동 변형률이 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{\varepsilon_b^s}{\Lambda} = \frac{\varepsilon_c}{\Lambda} = \frac{\alpha}{\alpha + \Psi} \quad (8)$$

이것은 압전 작동기의 변형률이 보의 변형률과 같아짐을 나타내고 작동 변형률이 자유 변형률과 시스템의 강성비의 곱에 비례함을 나타낸다.

### 3.3 Bernoulli-Euler 보 모델 (Bernoulli-Euler Beam Model)

Bernoulli-Euler 보 모델은 보와 접착층, 그리고 압전 작동기를 연속체로 보고 두께 방향으로 연

속적으로 변하는 변형률을 도입하였고 기본적으로 Bernoulli의 가정을 만족시킨다. 다시 말하면, 보의 축에 수직인 단면은 굽힘 변형 후에도 수직으로 남는다는 것이다. 이럴 경우 두께 방향으로의 변형률은 선형적으로 분포하게 되고 보의 전단 변형 효과는 무시하게 된다. 두께 방향의 변형률은 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_0 - z\kappa \quad (9)$$

여기서  $\varepsilon_0$ 는 보의 중심축의 변형률이고,  $\kappa$ 는 보의 곡률을 나타낸다. 작동기에 나타나는 실제적인 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{net} = \varepsilon(z) - \Lambda(z) \quad (10)$$

힘과 모멘트는 다음과 같이 쓸 수가 있다.

$$\begin{Bmatrix} F + F_\Lambda \\ M + M_\Lambda \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA_{tot} & ES_{tot} \\ ES_{tot} & EI_{tot} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (11)$$

여기서,  $ES_{tot}$ 은 기하학적인 형상 때문에 나타나는 인장-굽힘 연성 항인데 만약 작동기가 대칭적으로 보에 부착되어 있다면 이 값은 영이 된다. 만약 작동기가 보의 한 쪽 면에만 부착되어 있다면 이 항은 영이 되지 않는다.

앞의 경우처럼 작동기가 대칭적으로 부착되어 있는 순수 굽힘의 경우에 나타나는 작동 모멘트와 작동 변형률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_\Lambda &= E_c b \Lambda t_c (t_b + t_c) \\ \varepsilon &= z \frac{M_\Lambda}{EI_{tot}} = \frac{6 \left( 1 + \frac{1}{T} \right) \frac{2}{t_s} \Lambda}{(\Psi + 6) + \frac{12}{T} + \frac{8}{T^2}} z \end{aligned} \quad (12)$$

보와 작동기의 두께비 ( $T = t_b / t_c$ )를 비교하면, 압전 작동기에서 변형률의 변화가 해석에 어떤 영향을 미치는지를 잘 알 수 있다. 균일 변형률 모델과 Bernoulli-Euler 보 모델에서 구한 두께비와 곡률과의 관계를 그림 7에 나타내었다. 두

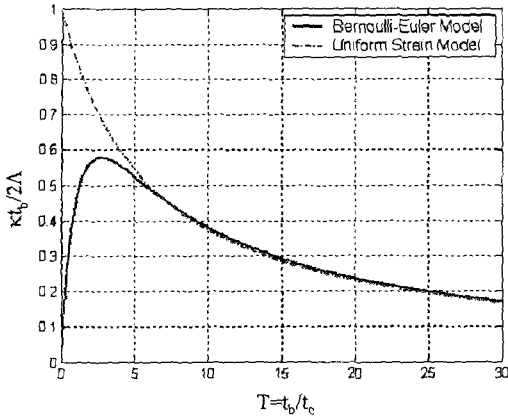


그림 7 두께비에 따른 작동 변형 곡률의 변화



그림 8 Bimorph형 작동기

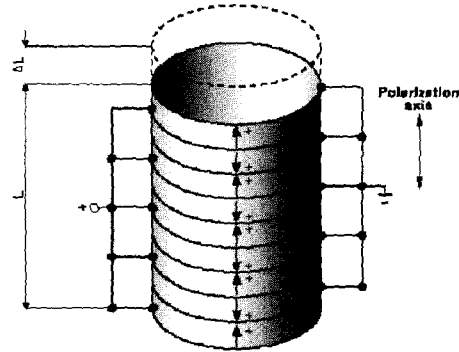


그림 9 적층형 세라믹 작동기

께비가 5일 경우에 균일 변형률 모델이 Bernoulli-Euler 보 모델보다 2.7% 정도 더 큰 값을 보여 준다. 그리고 그 보다 더 작은 두께비에서는 균일 변형률 모델이 곡률을 지나치게 많이 예측함을 알 수 있다. 두께비가 큰 경우에는 두 경우 모두 같은 변형곡률을 예측함을 알 수 있다.

앞에서 소개한 방법들 이외에도 주구조물인 보의 전단변형을 고려한 티모셴코 보 이론에 기초한 모델<sup>7)</sup>, 그리고 여러 다른 재료로 적층된 복합재 보와 압전 작동기가 부착된 경우 많이 사용되어지는 다항식 확장형 고차이론(higher order theory)에 기초한 모델<sup>8)</sup>, 각각의 층간에 변위장을 도입한 층간이론에 기초한 모델<sup>9)</sup> 등 많은 방법들이 연구되었고, 이러한 기본적인 지능형 보 구조물에 사용되었던 모델들은 평판이나 셸구조물에 확장되고 여기에 더해 가상일의 원리, Hamilton's principle, 변분법의 원리 그리고 유한요소법 등을 통해 운동방정식과 경계조건을 구하고 정적, 동적 해석이 수행되었다<sup>10-13)</sup>.

#### 4. 압전 작동기와 압전 지능구조물의 최근 연구 동향

앞에서 살펴 본 단일 압전 세라믹은 큰 작동능

력을 내지만 작동 변형률이 1000 μ 정도 의 작은 값을 가진다. 그러므로 큰 작동 변위가 필요한 부분에는 적용하기 힘든 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 최근에 여러 가지 개념의 압전 작동기가 연구 개발되고 있다. 그림 8은 바이모프 압전 작동기를 나타낸다. 바이모프 압전 작동기는 두 개의 압전 세라믹의 분극 방향을 반대로 배열한 것으로 압전 세라믹의 인장-압축으로 터 굽힘 모멘트를 발생시킨다. 이 압전 작동기는 상당히 큰 작동 변위를 발생시키지만 상대적으로 작동력이 작고 반응속도(1 msec)도 느린 단점이 있다.

그림 9는 적층형 세라믹 작동기를 나타낸다. 적층형 세라믹 작동기는 보통 100개 정도의 얇은 세라믹 판을 쌓아서 만드는데 100V 정도의 낮은 작동 전압과 빠른 반응 속도(10 μsec) 큰 작동력(100 kgf), 그리고 높은 전기-기계 연성효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 작동 변위가 10 μm 로 큰 작동 변위가 요구되는 경우에는 사용하기 힘든 단점이 있다.

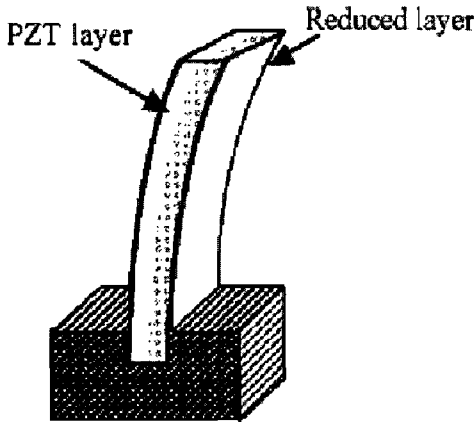


그림 10 RAINBOW 작동기의 기본 구조

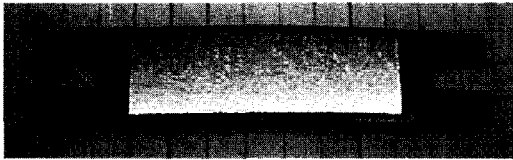


그림 11 THUNDER 작동기

그림 10에 나타낸 RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafer) 작동기는 화학적인 반응을 통하여 PZT의 한쪽 면을 비압전화시킨 것이다<sup>(14,15)</sup>. PZT를 그라파이트와 함께 넣고 975℃의 고온으로 가열하면 PZT와 그라파이트의 경계면에서 산소가 날라가 금속성의 비압전재료층과 압전재료 층이 일체의 구조를 갖게 된다. 이를 냉각시키면 두 층 사이의 열팽창 계수의 차이로 인하여 곡률을 가지게 되는데 이 곡면 형상에 의해 큰 작동 변위가 나타나게 된다.

NASA Langely에서 개발된 THUNDER(Thin layer UNimorph DrivER) 작동기는 낮은 입력 전압에 비해 큰 작동 변위를 발생시킬 수 있는 압전 세라믹 작동기로서, 그림 11과 같이 금속재료와 압전 박판으로 적층되어 있다<sup>(16)</sup>. 스테인레스 스틸 위에 고온 경화용 접착제를 바른 후 압전 세라믹을 놓고 그 위에 알루미늄 포일을 덮어 325℃에

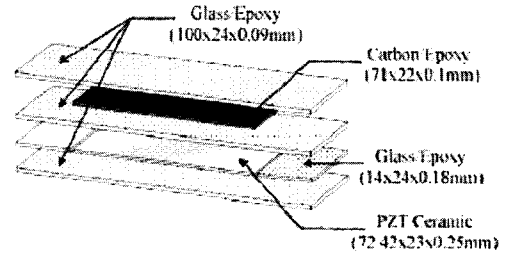


그림 12 LIPCA의 기본 구조

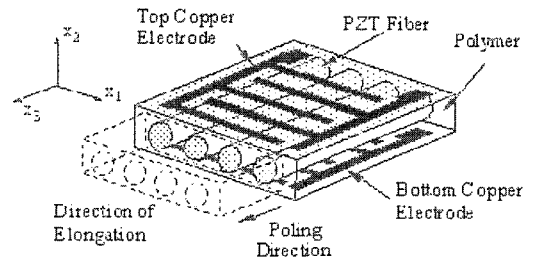


그림 13 AFC의 기본 구조

서 경화시킨 후 상온으로 냉각하여 제작된다. 각 구성요소 간의 열팽창 계수의 차이로 말미암아 곡률을 가지게 되고 이러한 기하학적인 형상 때문에 큰 변위를 유발하게 된다.

건국대학교 능동 구조/재료 연구실에서는 그림 12와 같이 THUNDER의 금속층을 섬유강화 복합재료로 대체한 경량의 곡면형 작동기 LIPCA (Lightweight Piezo-composite Curved Actuator)를 개발하였다<sup>(17)</sup>. LIPCA의 경우 섬유강화 프리프레그가 접착제 역할을 하여 접착층을 사용하지 않기 때문에 제작 공정이 무척 단순하다. 무게 측면에서 THUNDER작동기보다 40%이상 경량이며 복합재료의 테일러링(tailoring)을 적절히 이용하여 원하는 형상과 구조적 성능을 가질 수 있게 할 수 있어 THUNDER작동기보다 효율적인 다기능 구조물에 응용될 수 있는 장점이 있다.

그림 13은 능동 섬유 복합재(active fiber composite)의 기본 구조를 나타낸다<sup>(18)</sup>. AFC는 기



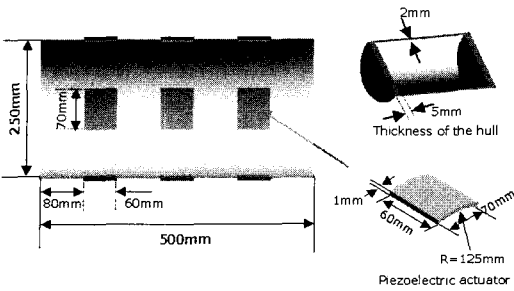


그림 14 지능형 hull 구조물

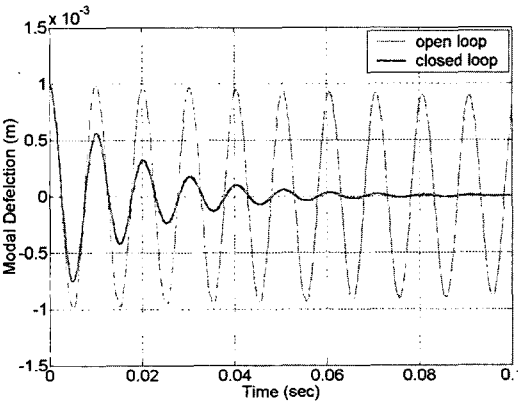


그림 15 LQG를 이용한 과도진동제어 응답

그림 14는 잠수함의 구조 소음을 줄이기 위해 압전 작동기를 부착한 지능형 hull 구조물을 나타낸다. 유한요소를 이용하여 압전 지능구조물의 운동방정식을 구하고, 모달 해석을 수행해서 다 입력, 다출력 제어모델을 구성한 후, LQG 제어를 설계해서 능동진동제어를 수행했다. 그림 15에서 보듯이 압전 작동기를 이용해서 능동진동제어를 수행할 경우에는 hull 구조물의 진동이 급격히 줄어들게 되고 이를 통해 구조소음을 줄일 수 있게 된다.

## 5. 맺음말

지금까지 압전 지능구조물의 작동 원리와 새롭게 개발되고 있는 압전 재료들과 그 응용에 대해 간략하게 살펴보았다. 최근 지능 재료 중 작동 및 감지 기능을 가지고 있는 압전 재료에 대한 연구가 국내외적으로 가장 활발히 추진되고 있다. 이는 압전 재료가 다른 지능 재료에 비해 소형화가 용이하며, 전력 소비가 적고 또한 빠른 반응성 및 제어성을 가지고 있기 때문이다. 미국이나 일본에서는 새로 개발된 압전 재료들을 이용한 여러 응용 장치 개발에 연구를 집중하고 있다. 허블 망원경의 자세 및 진동제어장치, 항공기나 잠수함의 스마트 스킨(smart skin), 헬리콥터 로터 블레이드 등 우주 구조물이나 군사용 장치들에서부터 카메라, 프린터 같은 사무용품, 의료진단기기등 실생활에서 쉽게 접할 수 있는 것들과 초정밀 나노 스테이지와 같은 나노 시스템에 이르기까지 그 응용 분야는 무궁무진하다 할 수 있다. 최근 한 조사에 의하면 압전 지능구조물의 세계 시장 규모가 2005년에는 460억 불 이상이라고 한다. 따라서, 압전 지능구조물의 기술은 미래의 기술이며 이 나라의 기술적 경쟁력을 키우는데 반드시 있어야 할 기술이라고 판단된다. ▲

존의 재료들보다 강도가 우수하고, 곡률 형상의 구조물에 부착이 용이하며, 작동력이 크고 이방성 구동(anisotropic actuation)이 가능하다. AFC는 섬유와 폴리머를 경화시켜 만들 수 있고, 압전 세라믹을 섬유 재료로 사용한다. 폴리머 매트릭스와 압전섬유로 이루어진 낱장의 AFC 표면에 전극을 그림 13과 같이 손가락 깎지 낀 모양으로 섬유와 수직하게 배열하면 섬유의 축방향으로 전기장이 발생하여 기존의 압전 작동기보다 더 큰 작동력을 얻게 된다. 이러한 AFC를 적층하게 되면 적층각에 따라 비틀림 모멘트를 발생 시킬 수 있으며, 이는 헬리콥터 로터 블레이드의 각도를 제어할 수 있을 뿐 아니라, 여러 기계 구조물에 부착 또는 삽입하여 구조물을 제어하는데 응용되어질 수 있다.

## 참고문헌

- (1) 최승복, 1991, "스마트 재료 및 구조물 - 신생하는 첨단기술", 대한기계학회지, 제 31권, 제 1호, pp. 80~89.
- (2) 최승복, 1992, "지능 복합재료의 구성과 특성", 한국항공우주학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 117~129.
- (3) 최승복, 정재천, 박노준, 1995, "형상기억합금을 이용한 지능구조물 시스템", 한국소음진동공학학회지, 제5권, 제3호, pp. 284~291.
- (4) 광문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 진동제어", 한국소음진동공학학회지, 제 5권, 제 3호, pp. 292~302.
- (5) 김재환, 1996, "압전 지능구조물의 원리와 소음제어에의 응용", 한국소음진동공학학회지, 제 6권, 제 3호, pp. 267~273.
- (6) Crawley, E. and de Luis, J., 1987, "Use of Piezoceramic Actuators as Elements of Intelligent Structures", AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (7) Shen, M.H., 1995, "A New Modeling Technique for the Piezoelectric Actuated Beam", Computers and Structures, Vol. 57, No. 3, pp. 361~366.
- (8) Chattopadhyay, A. and Seeley, C.E., 1997, "A Higher Order Theory for Modeling Composite Laminates with Induced Strain Actuator", Composite Part B Engineering, Vol. 28B, No. 8, pp.243~252.
- (9) Robbins, D.H. and Reddy, J.N., 1991, "Analysis of Piezoelectrically Actuated Beams Using a Layer-Wise Displacement Theory", Computers and Structures, Vol. 41, No. 2, pp. 265~279.
- (10) Rahmoune, M., Benjeddou, A., Ohayon, R. and Osmont, D., 1998, "New Thin Piezoelectric Plate Model", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 9, No. 12, pp. 1017~1029.
- (11) Carrera, E., 1997, "An Improved Reissner-Mindlin Type Model for the Electromechanical Analysis of Multilayered Plates Including Piezo-Layers", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 8, No. 3, pp. 232~248.
- (12) Kim, H.S., Zhou, X., and Chattopadhyay, A., 2002, "Interlaminar Stress Analysis of Shell Structures with Piezoelectric Patch Including Thermal Loading", AIAA Journal, Vol. 40, No. 12, pp. 2517~2525.
- (13) Vel, S.S., and Batra, R.C., 2000, "Three Dimensional Analytical Solution for Hybrid Multilayered Piezoelectric Plates", Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, Vol. 67, No. 3, pp. 558~567.
- (14) Li, G., Furman, E. and Haertling, G.H., 1997, "Stress-enhanced displacements in PLZT Rainbow actuators", Journal of The American Ceramic Society, Vol. 80, No. 6, pp. 1382~1388.
- (15) Wang, Q.M. and Cross, L.E., 1998, "Determination of Young's Modulus of the Reduced Layer of a Piezoelectric RAINBOW Actuator", Journal of Applied Physics, Vol. 83, No. 10, pp. 5358~5363.
- (16) Ounaies, Z., Mossi, K., Smith, R., and Bernd, J., 2001, "Low-field High-field Characterization of THUNDER Actuators", NASA/CR-2001-210859.
- (17) Yoon, K.J., Park, K.H., Park, H.C. and Perreux, D., 2003, "Thermal deformation analysis of curved actuator LIPCA with a piezoelectric ceramic layer and fiber composite layers", Composite Science and Technology, Vol. 63, pp. 501~506.
- (18) Wickramasinghe, V.K. and Hagood, N.W. , 2004, "Durability characterization of Active Fiber Composite actuators for helicopter rotor blade applications", Journal of Aircraft, Vol. 41, No. 4, pp. 931~937.