

論文

압전센서를 이용한 스마트 복합재료 패널에 대한 연구 :

II. 저주기 피로하중에 의한 압전센서의 응답성

김 인 결*

A Study on the Smart Composite Panels Based
on Piezoelectric Sensors :

II. Piezoelectric Sensor Responses under Low Cyclic Fatigue Loading

In-Gul Kim*

ABSTRACT

The responses of piezoelectric sensors attached to the composite laminated panels under the low cyclic tensile loading differed not only between piezopolymer and piezoceramic sensors but also between piezoceramic sensors depending on the attachment techniques. The measured sensor responses were compared to those predicted by the shear lag model with piezoelectric constitutive equations and equivalent circuit theory. The effective strains of the sensors were different from the actual applied strains of host structures depending on the thickness of the bonding layer. It was observed that the large strain of host structure was not linearly transferred to the piezoceramic sensor through the bonding layer. The amplitude and phase of sensor response were different from those of actual applied strain when the frequency of cyclic loading was lower than the cut-off frequency of the sensor. The piezopolymer sensor responses under the cyclic loading agreed fairly well not only with shape but also with magnitude of the predicted sensor output. The predicted responses of piezoceramic sensor based on the elastic-plastic shear lag model agreed well with both shape and magnitude of the measured responses for adhesive-bonded and epoxy-bonded piezoceramic sensor. The responses of piezoceramic sensors were decreased as the number of fatigue cycle was increased while that of piezopolymer sensor was almost constant.

초 록

압전센서가 부착된 스마트 복합재료 적층판이 저주기 피로하중을 받을 때 고분자 압전센서와 세라믹 압전센서의 응답성이 다를 뿐 아니라 부착방법이 다른 세라믹 압전센서 간의 응답성 또한 다르게 관찰되었다. 압전센서의 구성방정식과 등가회로 이론, 그리고 전단지연 모델을 이용하여 인장 피로하중을 받는 시편에 부착된 압전센서의 거동을 이론적으로 예측하고 피로 시험 결과와

* 충남대학교 공과대학 항공우주공학과

비교 분석하였다. 부착방법에 따른 접착층의 두께에 따라 센서에 작용하는 유효 변형율은 주구조물인 시편에 작용하는 변형율과는 다르게 나타났다. 세라믹 압전센서의 경우, 주구조물의 변형율의 크기에 따라 변형율이 접착층을 통하여 선형적으로 전달되지 않음을 관찰하였다. 센서의 임계 주파수 보다 낮은 주파수의 반복 하중으로 인한 센서 신호 파형의 진폭 및 위상이 달라졌다. 고분자 압전센서의 응답성은 예측한 신호 파형뿐만 아니라 크기도 잘 일치하였다. 저주기 반복 하중에 의한 세라믹 압전센서의 응답성은 탄소성 전단지연 모델에 의한 예측 값과 잘 일치하였다. 세라믹 압전센서는 고분자 압전센서와는 달리 피로 하중의 횟수가 증가됨에 따라 센서의 응답성이 저하되었다.

기 호 설 명

A_p : electrode area of piezoelectric sensor	α : host structure equilibrium parameter
C_p : capacitance of piezoelectric materials	ε : normal strain
C_x : piezoelectric sensor constant	$\bar{\varepsilon}$: average strain over the electrode
D_i : electric displacement	ε_{33} : permittivity in the thickness direction
D_{pi} : piezoelectric constant	Γ : nondimensional shear transfer parameter
\bar{E} : modulus ratio of host structure to piezoelectric materials	γ : shear strain
E_i : electric field	ψ : effective stiffness ratio
\bar{G} : modulus ratio of bonding layer to piezoelectric materials	ν : Poisson's ratio
L : length of piezoelectric sensor	θ : thickness ratio(normalized by t_p)
R : resistance	τ : shear stress in the bonding layer
S_{ij} : elastic compliance matrix	Subscript
\bar{t}_b : nondimensional bonding layer thickness	b : bonding layer
V : actual sensor output voltage	H : host structure
\bar{V} : open-circuit voltage	p : piezoelectric materials
x : piezoelectric centered coordinates	pc : piezoceramic sensor
\bar{x} : nondimensional piezoelectric centered coordinates($2x/L$)	pp : piezopolymer sensor
	Superscript
	s : surface of host structure

1. 서 론

최근 여러 분야의 첨단기술-구조, 재료, 전자, 장치기술 및 제어기술-등의 발달로 외부의 자극들을 감지하여 스스로 제어할 수 있는 스마트 또는 지능 구조물의 출현을 가능하게 하였다[1, 2]. 많은 스마트 재료 중 압전재료는 전기장에 의한 기계적

변형과 변형에 의한 전하의 생성 특성으로 센서와 액츄에이터로 이용될 수 있는 장점을 갖고 있다. 압전재료를 이용한 센서와 액츄에이터를 구조물에 부착 또는 삽입하여 유연한 우주 구조물의 자세 제어나 진동 제어 그리고 항공기 구조물 등의 능동 제어와 같은 응용 분야에 많은 연구가 국내외적으로 진행되고 있다[3~5].

압전재료를 기존 구조 시스템의 기계적, 동적 특성을 거의 수정없이 적용하기 위하여는 분포형 센서와 액츄에이터의 네트워크 형태로 구성하여 가볍고, 작고 간단한 형태로 하여야 한다. 이러한 분포형 액츄에이터에 대한 정확한 제어를 위하여 압전재료와 주구조물에 대한 관계를 Crawley[5]는 고전적 탄성 전단지연 이론과 Euler 보 이론을 이용하여 표면에 부착된 경우와 삽입된 경우에 대하여 연구하였다. 압전재료가 센서 또는 액츄에이터로 사용될 경우 주구조물이 외부 하중에 의한 변형으로 인하여 주구조물에 부착된 압전재료는 접착층을 통하여 주구조물의 변형율을 경험하게 된다. 그러므로 이러한 하중을 받는 구조물에 부착된 센서나 액츄에이터의 성능은 압전재료 자체의 내구성 뿐만 아니라 접착층의 물성 및 내구성에도 영향을 받는다.

I 부에서 보여진 것처럼 복합재료 적층판에 부착된 센서의 응답성은 저주기 반복하중에 대하여 고분자 압전센서와 세라믹 압전센서의 신호 파형이 서로 다를 뿐 아니라 세라믹 압전센서인 경우 접착방법에 따라 센서의 신호 파형이 다르게 관찰되었다[6]. 센서의 유효 변형율은 압전센서와 주구조물의 기계적 Coupling 때문에 실제 구조물에 가해진 변형율과 다르게 나타날 수 있다. 주구조물에 가해진 반복하중의 주파수가 센서의 임계 주파수보다 작을 경우는 센서 신호의 진폭과 위상은 주구조물의 변형율과 다르게 나타난다. 그러므로 실제 센서의 응답성을 예측하기 위하여 주구조물에 가해진 하중에 의한 변형율과 부착된 센서의 유효변형율 관계 뿐만 아니라 센서의 임계 주파수보다 낮은 주파수의 반복 하중이 가해질 때 센서의 응답성에 대하여 고찰할 필요성이 있다.

본 논문에서는 고전적 전단지연 모델(Shear Lag Model)[5]에 접착층의 소성변형까지 고려하여 압전센서의 구성방정식과 등가회로 이론을 사용한 이론해석으로 저주기 반복 하중에 따른 압전센서의 응답성을 예측하고 인장 피로시험을 통하여 시험편에 부착된 압전센서의 응답성과 비교 분석하여 접착층의 영향과 피로 반복 횟수에 따른 압전센서의 응답성 변화에 대하여 고찰하였다.

2. 이론 해석 및 실험

2-1. 전단지연 모델(Shear Lag Model)

주구조물과 압전센서 사이에 Fig.1과 같이 유한한 두께를 갖는 접착층이 존재한다고 가정하면 고전적 전단지연 해를 구할 수 있다. 접착층에서의 전단지연이 0으로 접근하면 이러한 해는 간단한 완전 접착된 압전센서 모델로 된다.

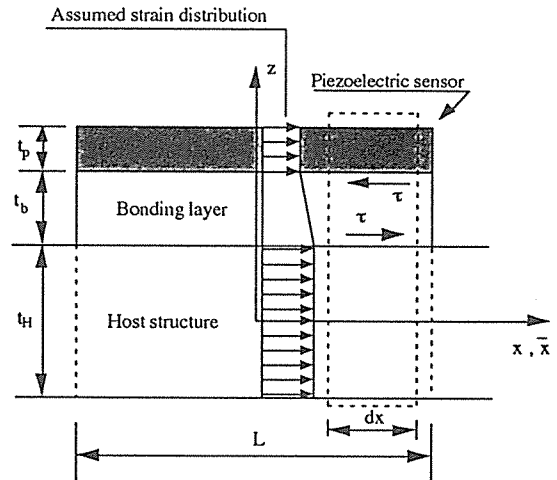


Fig. 1. Geometry of surface-bonded piezoelectric sensor to a host structure through a finite bonding layer thickness and assumed strain distributions

표면에 부착한 압전 센서의 거동에 대하여 고전적 1차원 전단지연 모델[5]을 이용하였다. 주구조물과 압전센서는 두께 방향으로 인장 변형율이 일정하고 접착층에서는 1차원 전단 변형만이 존재한다고 가정한다.

미소 구간 dx 에 대한 평형방정식은

$$\frac{d\sigma_p}{dx} - \frac{\tau}{t_p} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d\sigma_H}{dx} - \frac{\alpha\tau}{t_H} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

로 표현할 수 있으며 접착층에서의 변형율-변위 관계는

$$\gamma = \frac{u_p - u_H^s}{t_b} \quad \dots\dots\dots (3)$$

이다. 여기서 아래첨자 p는 압전센서, H는 주구조물, b는 접착층을 표시하고, 위첨자 s는 주구조물의 표면을 표시한다. 탄성 전단지연 해석을 이용하여 압전센서와 주구조물에서의 변형율은 식 (1), (2), (3)으로 부터 2개의 독립된 4차 미분 방정식의 해가 된다.

$$\frac{d^4 \varepsilon_H}{d\bar{x}^4} - \Gamma^2 \frac{d^2 \varepsilon_H}{d\bar{x}^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{d^4 \varepsilon_p}{d\bar{x}^4} - \Gamma^2 \frac{d^2 \varepsilon_p}{d\bar{x}^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

\bar{x} 는 압전센서의 길이의 반 ($L/2$)으로 무차원한 중심 좌표계이다. 전단지연 매개변수 Γ 와 주구조물과 압전센서의 강성도-두께비 ψ 는

$$\Gamma^2 = \frac{\bar{G}}{I_b^2} \left(\frac{\psi + \alpha}{\psi} \right) = \left(\frac{L}{2} \right)^2 C_b^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\psi = \frac{E_H t_H}{E_p t_p} = \bar{E} \theta_H \quad \dots\dots\dots (7)$$

이다. \bar{G} 는 접착층의 전단강성도와 압전센서의 강성도비 G_b/E_p 이고 I_b 는 $L/2$ 로 무차원한 접착층의 두께이다. 식 (4)와 (5)로 부터 압전센서와 주구조물의 변형율은

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ \varepsilon_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} B_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} B_2 \bar{x} + \begin{bmatrix} \psi \\ 1 \end{bmatrix} B_3 \sinh \Gamma \bar{x} + \begin{bmatrix} -\psi \\ 1 \end{bmatrix} B_4 \cosh \Gamma \bar{x} \quad \dots\dots\dots (8)$$

이다. 미지상수 B_1, B_2, B_3, B_4 를 결정하기 위해서는 4개의 경계조건이 필요하다. 경계조건은 압전센서는 주구조물의 표면에 부착되어 있고 양 끝단은 자유경계면이므로, ε_p 는 압전변형율과 같으나 압전센서에 가해진 전압이 0이므로 $\varepsilon_p = 0$ 이다. 압전센서의 끝단 바로 아래의 주구조물의 변형은 압전효과에 의하여 생기는 것을 제외한 주구조물의 하중이나 변형에 의한 변형과 같다고 가정하여 경계조건을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x} = +1 \text{ 일때 } \varepsilon_p = 0, \varepsilon_H^+ &= \varepsilon_H^+ \\ \bar{x} = -1 \text{ 일때 } \varepsilon_p = 0, \varepsilon_H^- &= \varepsilon_H^- \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ε_H^+ 와 ε_H^- 는 압전센서는 양 끝단 위치에서의 주어진 주구조물의 변형율이므로 4개의 경계조건을

(8)식에 대입하면 미지상수는

$$B_1 = \frac{\psi}{\psi + \alpha} \left(\frac{\varepsilon_H^+ + \varepsilon_H^-}{2} \right), B_2 = \frac{\psi}{\psi + \alpha} \left(\frac{\varepsilon_H^+ - \varepsilon_H^-}{2} \right),$$

$$B_3 = \frac{\alpha}{(\psi + \alpha) \sinh \Gamma} \left(\frac{\varepsilon_H^+ - \varepsilon_H^-}{2} \right),$$

$$B_4 = \frac{\alpha}{(\psi + \alpha) \cosh \Gamma} \left(\frac{\varepsilon_H^+ + \varepsilon_H^-}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

이다. 여기서 α 는 순수 인장 변형인 경우 1이다. 압전센서의 변형율 ε_p 는 주구조물의 변형율 ε_H 로 다음과 같이 표현되고

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_H} = \frac{\psi}{\psi + 1} \left(1 - \frac{\cosh \Gamma \bar{x}}{\cosh \Gamma} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

접착층에서의 전단응력 τ 는

$$\frac{\tau}{E_H \varepsilon_H} = \frac{\bar{G}}{I_b \bar{E} \Gamma} \frac{\sinh \Gamma \bar{x}}{\cosh \Gamma} \quad \dots\dots\dots (12)$$

이다. 식 (11)에서 압전센서의 변형율 ε_p 는 ε_H , Γ 그리고 ψ 에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 주구조물이 시편 SUF-2($E_H = 85.5$ GPa)에 직사각형 압전센서가 부착되었을 경우 전단지연 모델에서 필요한 매개변수들을 Table 1에 요약해 놓았다.

Table 1. Shear lag model parameters for the rectangular piezoelectric sensors

Parameter	Piezopolymer Sensor	Piezoceramic Sensor	
E_p (GPa)	2.54	71.0	
t_p (m)	0.028×10^{-3}	0.38×10^{-3}	
ψ	2,440	6.43	
$L/2$ (m)	$30/2 \times 10^{-3}$	$5.08/2 \times 10^{-3}$	
E_b (GPa)	3.0	3.0	
t_b (m)	0.010×10^{-3}	0.010×10^{-3}	0.058×10^{-3}
$\bar{G} \theta_b$	158.6×10^{-3}	0.418×10^{-3}	2.424×10^{-3}
C_b	39,824	2,199	912
Γ	597	5.58	2.32

탄성 전단지연 해석에 의한 압전센서와 주구조물의 변형율비와 접착층의 두께가 서로 다른 전단응력비가 Fig.2에 나와 있다. 무차원 전단지연 변수 Γ 는 유효한 전단 전달을 표시해 주고 접착층의 두께와 강성도에 의하여 결정된다. 변수 Γ 가 매우 크거나 무한대인 경우는 완전 접착 조건이고, 압

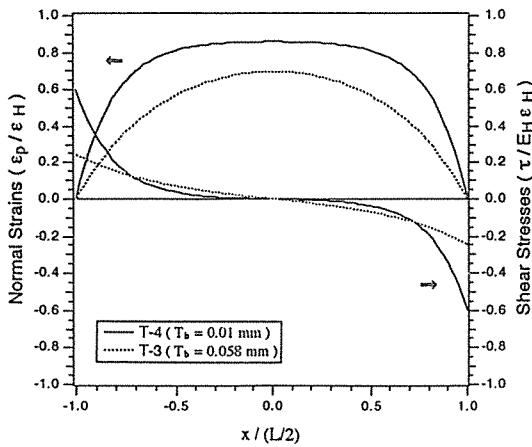


Fig. 2. Normal strains in piezoelectric sensor and shear stresses in the bonding layer for different layer thickness based on elastic shear lag model

전센서에서의 변형율은 주구조물에서의 변형율과 같아진다. 고분자 압전센서인 경우 전단지연 변수 Γ 가 매우 크기 때문에 전단지연의 영향이 거의 없으며 이것은 전단력이 압전센서의 작은 영역에서 효과적으로 전달된다. 이것은 접착된 고분자 압전센서의 변형율은 전기저항형 스트레인 게이지처럼 주구조물의 변형율과 같다고 가정할 수 있다. 그러나 세라믹 압전센서는 Γ 나 ψ 가 고분자 센서보다 상대적으로 작기 때문에 주구조물의 변형율이 효과적으로 압전센서에 전달될 수 없다.

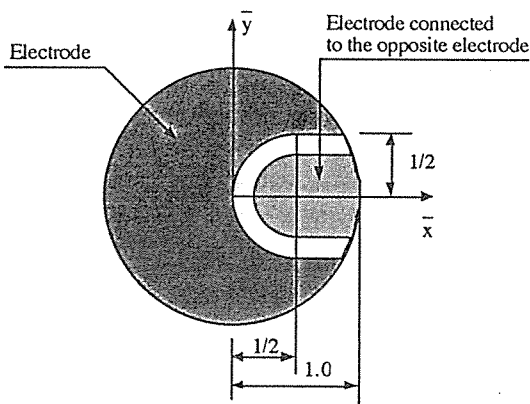


Fig. 3. Geometry and dimension of disk type piezoceramic sensor with partially electroded area

본 논문에서 사용한 세라믹 압전센서의 형상이 Fig. 3과 같이 원판형이고 전극판이 부분적으로 되어 있기 때문에 세라믹 압전센서에서의 평균변형율을 구하기 위하여 다음과 같이 유도하였다.

센서의 전극판에서의 평균 변형율 $\bar{\epsilon}_x$ 와 $\bar{\epsilon}_y$ 는

$$\bar{\epsilon}_x = \frac{1}{A_{pc}} \left[\int_{-1}^1 \int_{-(1-\bar{y}^2)^{1/2}}^{(1-\bar{y}^2)^{1/2}} \epsilon_p d\bar{x} d\bar{y} - \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-\frac{1}{2} - ((\frac{1}{2})^2 - \bar{y}^2)^{1/2}}^{\frac{1}{2} - ((\frac{1}{2})^2 - \bar{y}^2)^{1/2}} \epsilon_p d\bar{x} d\bar{y} \right] \dots (13.a)$$

와

$$\bar{\epsilon}_y = \frac{1}{A_{pc}} \left[\int_{-1}^1 \int_{-(1-\bar{x}^2)^{1/2}}^{(1-\bar{x}^2)^{1/2}} \epsilon_p d\bar{y} d\bar{x} - \int_0^1 \int_{-\bar{y}}^{\bar{y}} \epsilon_p d\bar{y} d\bar{x} \right] \dots (13.b)$$

이다. 여기서 세라믹 압전센서 무차원 유효면적은

$$\bar{A}_{pc} = \frac{A_{pc}}{(L/2)^2} = \pi - \left[\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) - \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi}{8} \right) \right] = 2.292$$

이다. (13.a, b)식에 (11)식을 대입하여 정리한 주구조물의 변형율에 대한 압전센서에서의 평균 변형율비 $\bar{\epsilon}_x / \epsilon_H$, $\bar{\epsilon}_y / \epsilon_H$ 가 Table 2에 나와 있다.

Table 2. Averaged strains over the piezoelectric sensor with different host structure and bonding layer thickness

	PP Sensor	PC Sensor			
E_{II} (GPa)	85.5 ^a	85.5 ^a		75.8 ^b	
t_b ($\times 10^{-3}$ m)	0.010	0.010	0.058	0.010	0.058
C_b (L/2)	597	5.58	2.32	5.66	2.35
$\bar{\epsilon}_x / \epsilon_{II}$	1.00	0.666	0.421	0.649	0.414
$\bar{\epsilon}_y / \epsilon_{II}$	1.00	0.641	0.400	0.629	0.395

a. [SUF-2, 3]: [0/90]_{4S} made of unidirectional Gr/Ep Prepreg

b. [SFF-2]: [0/90]_{4S} made of fabric Gr/Ep Prepreg

2-2. 탄소성 전단지연 모델

(Elastic-plastic Shear Lag Model)

접착층에서의 전단응력 τ 는 압전센서의 양 끝

단에서 집중되므로 주구조물의 변형율이 증가함에 따라 접착층에서의 응력 증가로 소성영역이 되거나 주구조물과 압전센서 사이의 분리가 생길 수 있다. 이것은 접착층에서의 전단응력이 전단 소성강도보다 커질 경우 발생한다. 증가된 변형율로 인하여 소성영역이 생기면 그 부분에서는 일정한 전단응력만을 전달한다고 가정하면 전단응력 τ 는

$$\tau = \tau_y = \text{constant} \quad (|\tau| \geq \tau_y) \quad \dots\dots\dots (14.a)$$

$$\tau = \frac{E_H \bar{G}}{l_b \bar{E} \Gamma} \left[\frac{\sinh \Gamma \bar{x}}{\cosh \Gamma} \right] \varepsilon_H \quad (|\tau| < \tau_y) \quad \dots\dots\dots (14.b)$$

이다.

압전센서에서의 수직응력은

$$\sigma_p = E_p \varepsilon_p = \left(\frac{L}{2} \right) \int_{-1}^{\bar{x}} \frac{\tau}{l_p} d\bar{x} \quad \dots\dots\dots (15)$$

이므로 (14)식을 (15)식에 대입한 후 적분하면 압전센서의 변형율은 소성 영역에서는

$$\varepsilon_p = \left(\frac{L}{2} \right) \frac{1}{E_p} \left[\frac{\tau_y}{l_p} (1 \pm \bar{x}) \right] \quad (\bar{x}_0 \leq |\bar{x}| \leq 1) \quad \dots\dots\dots (16.a)$$

이고, 탄성 영역에서는

$$\varepsilon_p = \left(\frac{L}{2} \right) \frac{1}{E_p} \left[\frac{1}{l_p} \frac{E_H \bar{G}}{\Gamma^2} \cdot \frac{\cosh \Gamma \bar{x}_0 - \cosh \Gamma \bar{x}}{\cosh \Gamma} \right] \varepsilon_H + \frac{\tau_y}{l_p} (1 - \bar{x}_0) \quad (-\bar{x}_0 \leq \bar{x} \leq +\bar{x}_0) \quad \dots\dots\dots (16.b)$$

이다. 탄성 영역과 소성 영역 사이의 경계 좌표 \bar{x}_0 은 (12)식에 대입하여 구하면

$$\bar{x}_0 = \frac{1}{\Gamma} \sinh^{-1} \left(\frac{\tau_y}{E_H \varepsilon_H} \frac{l_b \bar{E} \Gamma}{\bar{G}} \cosh \Gamma \right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

이다.

접착층에서의 전단응력과 압전센서의 수직변형율은 Fig.2에서 Fig.4와 같이 바뀐다. 소성영역에서는 즉, 압전센서의 양 끝단에서 \bar{x}_0 까지는 일정한 전단응력만을 전달하고 수직 변형율은 끝단으로부터 일정한 기울기를 가진 형태가 된다.

2-3. 압전재료의 구성방정식

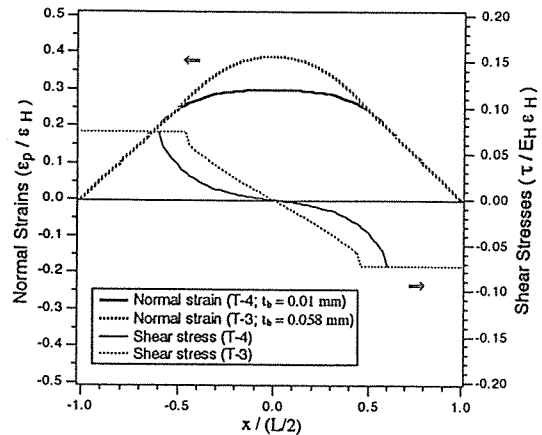


Fig. 4. Normal strains in piezoelectric sensor and shear stresses in the bonding layer for different layer thickness based on elastic-plastic shear lag model ($\varepsilon_H = 0.58\%$ strain, $\tau_y = 30$ MPa assumed)

압전재료의 변형율, 응력, 전기장, 전기장 변위는 여러 형태의 한 쌍의 전기-기계 방정식으로 표현될 수 있으며 탄성학적, 전기적 경계조건에 따라 여러 형태의 유사한 방정식 중에서 적절한 한 쌍을 선택한다. 본 논문에서는 Kino[7]가 사용한 형태의 선형 압전재료에 대한 구성 방정식을 사용하였다.

$$\varepsilon_p = S_{pq}^E \sigma_q + d_{pi} E_i, \quad p, q = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad \dots\dots\dots (18.a)$$

$$D_i = d_{iq} \sigma_q + \varepsilon_{ik}^E E_k, \quad i, k = 1, 2, 3 \dots\dots\dots (18.b)$$

여기서 S_{pq}^E 는 일정한 전기장에서의 Elastic Compliance Matrix이고 ε_{ik}^E 는 일정 응력 조건에서의 Dielectric Permittivity Matrix이고, σ_p 는 응력, ε_p 는 변형율, 그리고 E_i 는 i 방향의 전기장과 D_i 는 전기적 변위이다. 사용된 고분자 압전센서나 세라믹 압전센서는 두께 방향으로의 전기장 E_3 에 의하여 변형율 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 만 생기고 평면 응력 조건($\sigma_3 = 0$)으로 가정하고 전기장이 없을 경우 (18.a) 식을 (18.b)식에 대입하면 전기장 변위 D_3 는 평면 변형율 ε_1 과 ε_2 로 (19) 식처럼

$$D_3 = e_{31} \varepsilon_1 + e_{32} \varepsilon_2 \quad \dots\dots\dots (19)$$

표현할 수 있으며 상수 e_{31}, e_{32} 는

$$\begin{Bmatrix} e_{31} \\ e_{32} \end{Bmatrix} = \frac{E_p}{1 - \nu_p^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_p \\ \nu_p & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (20)$$

이고, d_{31} 과 d_{32} 가 각 변이 고정된 상태에서 측정된 값일 경우에는 e_{31} , e_{32} 는

$$\begin{Bmatrix} e_{31} \\ e_{32} \end{Bmatrix} = \frac{E_p}{1 - \nu_p^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (21)$$

로 표현된다.

본 논문에서는 고분자 압전센서와 세라믹 압전센서를 등방성 탄성체로 가정하고 탄성계수 E_p 와 포아송비 ν_p 는 제조업체의 제원을 사용하였다 [8, 9].

평면 변형을 ϵ_1 , ϵ_2 를 ϵ_x , ϵ_y 로 바꾸면, 센서 전극판의 유효면적이 A_p , 두께가 t_p 인 압전센서에 생기는 개회로 전압 $\bar{V}(t)$ 는

$$\begin{aligned} \bar{V}(t) &= \frac{Q(t)}{C_p} = \frac{t_p}{A_p \epsilon_{33}} \int_{A_p} (e_{31} \epsilon_x + e_{32} \epsilon_y) dx dy \\ &= \frac{1}{A_p} \int_{A_p} (C_x \epsilon_x + C_y \epsilon_y) dx dy \quad \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

이고 C_p 와 센서상수 C_x , C_y 는

$$C_p = \frac{\epsilon_{33} A_p}{t_p}, \quad C_x = \frac{t_p e_{31}}{\epsilon_{33}}, \quad C_y = \frac{t_p e_{32}}{\epsilon_{33}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

이다. 여기서 ϵ_{33} 는 두께 방향으로의 재료의 Permittivity이다. Table 3에는 사용된 압전센서의 대

Table 3. Typical constants of piezoelectric sensors

Constants	Symbol	PP Sensor		PC Sensor
Thickness	t_p ($\times 10^{-3}$ m)	0.028 ^a	0.052 ^b	0.380 ^c
Permittivity	ϵ_{33} ($\times 10^{12}$ F/m)	106	106	15.017
Effective area	A_p ($\times 10^{-6}$ m ²)	360	360	14.78
Capacitance	C_p ($\times 10^{-12}$ F)	1,363	734	584
Piezoelectric strain constants	e_{31} (C/m ²)	65.6	65.6	15.2
	e_{32} (C/m ²)	8.55	8.55	15.2
Sensor constants	C_x (V or C/F)	17,328	32,181	384,884
	C_y	2,259	4,194	384,884
Time constant*	RC (ms)	1.38	0.754	0.604
Cut-off frequency	(Hz)	115	206	272

* Note : Based on the 1M Ω and 20 pF electronic interface

a. DT1-028K(Atochem Sensors, Inc.)

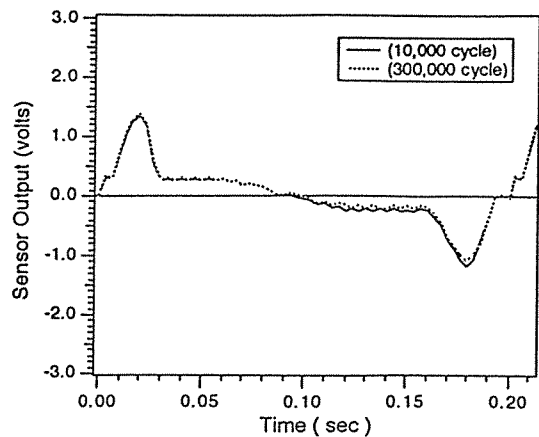
b. DT1-052K(Atochem Sensors, Inc.)

c. PK1-500(Piezo Kinetics, Inc.)

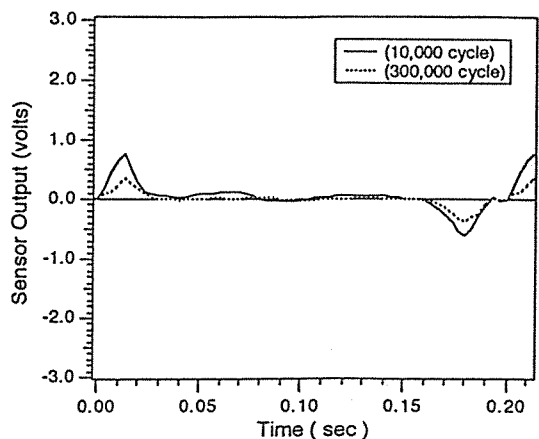
표적인 특성값들이 나와 있다.

2-4. 저주기 반복하중을 받는 압전센서의 응답성

고분자 압전센서와 세라믹 압전센서를 피로시험에 부착하였다. 고분자 압전센서는 5분 경화 에폭시 접착제(T-PP 방법)로 그리고 세라믹 압전센서는 접착필름(T-3방법)과 5분 경화 에폭시 접착제(T-4 방법)로 복합재료 시편에 부착하였다. 피로시험을 피로 시험기에 장착하고 5 Hz 의 정현파의 인장 반복하중을 하중제어 모드로 가하였다. 압전센서를 오

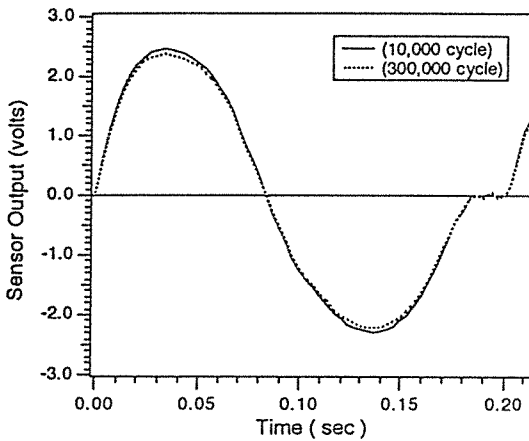


(a) Adhesive-bonded PC sensor, T-3



(b) Epoxy-bonded PC sensor, T-4

Fig. 5. Typical sensor waveform due to fatigue loading



(c) Epoxy-bonded PR sensor, T-PP

Fig. 5. Continued

실로스코프에 연결하여 반복 하중에 의한 압전센서의 응답성은 Fig.5와 같이 관찰되었다.

압전센서의 개회로 전압 $\bar{V}(t)$ 와 실제 폐회로 출력전압 $V(t)$ 의 관계는

$$V(t) = \bar{V}(t) - \frac{1}{RC} \int_0^t e^{-\frac{t-\tau}{RC}} \bar{V}(\tau) d\tau \quad \dots\dots (24)$$

로 나타내어진다[8]. 정현파 반복하중은

$$P(t) = \frac{P_{\max}}{2} (1 - \cos \omega t) \quad \dots\dots (25)$$

로 표현되고 주구조물의 x 방향으로의 변형을 $\varepsilon_{H, x}$ 는

$$\begin{aligned} \varepsilon_{H, x}(t) &= \frac{P(t)}{AE_H} = \frac{\sigma_{\max}}{2E_H} (1 - \cos \omega t) \\ &= \varepsilon_H(t) \quad \dots\dots (26. a) \end{aligned}$$

이고, y 방향으로의 변형을 $\varepsilon_{H, y}$ 는

$$\begin{aligned} \varepsilon_{H, y}(t) &= -\nu_{H, xy} \varepsilon_{H, x}(t) \\ &= -\nu_{H, xy} \frac{\sigma_{\max}}{2E_H} (1 - \cos \omega t) - \nu_{H, xy} \varepsilon_H(t) \quad \dots\dots (26. b) \end{aligned}$$

이다. (26.a, b)식을 (11) 식 (탄성 전단지연 모델)과 (16)식 (탄소성 전단지연 모델)을 이용하여 ε_p 를 구하고 이것을 (13)식에 대입하여 압전센서의 유효 변형을 $\bar{\varepsilon}_x$ 와 $\bar{\varepsilon}_y$ 를 구한다. 주구조물에서의 변형율에 의하여 생성된 전하 $Q(t)$ 는 변형율-

전하량 관계로 부터 구하고 개회로 전압 $\bar{V}(t)$ 는 (22)식으로 부터 구하여 (24) 식에 대입하면 반복 하중에 의한 압전센서의 폐회로 전압은

$$V(t) = A_n [(1 - \cos \omega t) - \frac{1}{RC} \int_0^t e^{-\frac{t-\tau}{RC}} (1 - \cos \omega \tau) d\tau] \quad \dots\dots (27)$$

이고, 여기서 A_n 은

$$A_n = \frac{\sigma_{\max}}{2E_H} [C_x \frac{\bar{\varepsilon}_x}{\varepsilon_{H, x}} - C_y \nu_{H, xy} \frac{\bar{\varepsilon}_y}{\varepsilon_{H, y}}]$$

이다. 정상 상태 즉, t 가 무한대 일 경우 $V(t)$ 는

$$V(t) = A_n \frac{RC\omega}{(1+(RC\omega)^2)^{1/2}} \sin(\omega t - \phi) \quad \dots\dots (28)$$

이고, $\tan \phi = RC\omega$ 이다. $RC\omega$ 가 1보다 작을 경우는 개회로 전압의 시간에 대한 미분 값으로 실제 출력 전압을 표현할 수 있다.

$$V(t) \simeq RC \frac{d\bar{V}(t)}{dt} \quad \dots\dots (29)$$

즉 출력전압은 센서의 평균 변형율의 시간에 대한 변화율로 표시된다.

3. 결과 및 고찰

센서의 응답성은 $RC\omega$ 가 1보다 작을 경우, 저 주기 반복 하중에 의한 변형율의 시간에 대한 미분값과 잘 일치한다. 실제로 저주파 또는 정적인 변형율을 측정하고자 할 때는 개회로 전압 응답성과 폐회로 전압 응답성을 같게 하기 위하여는 RC 값을 증대 시켜야 한다. 저항 R 을 증가 시키거나 캐퍼시터 C 를 증가시키면 가능하지만 R 을 증가시킬 경우 잡음이 증가하는 단점이 있고 C 를 증가시킬 경우 측정 전압이 낮아져서 전하 증폭기가 별도로 필요하다. 본 연구에서는 별도의 부가 장비 없이 압전센서를 계측 장비에 직접 연결하여 압전센서의 응답성을 계측하였다. 반복 하중이 5Hz 이고 압전센서를 오실로스코프($R=1\text{ M}\Omega$, $C_i=20\text{ pF}$)에 연결한 경우 고분자 압전센서의 측정 신호 파형,

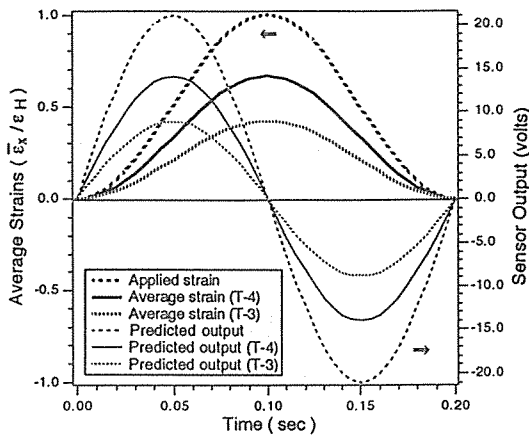


Fig. 6. Average strains and predicted sensor output vs. time for different bonding layer thickness ($\epsilon_H = 0.58\%$ strain, elastic shear lag model)

Fig. 5(c)는 예측된 센서의 신호파형, Fig. 6과 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 6에서 predicted output은 완전 접착인 경우의 응답 예측값이다.

그러나 고분자 압전센서의 측정 신호의 최대 진폭은 제조회사의 제원에 따라 $E_{pp} = 2 \text{ GPa}$ 로 하면 측정치보다 낮게 예측되었고 4 GPa 로 가정하면 측정치보다 높게 예측되었다. Table 4에는 세 개의 서로 다른 시편에 부착된 고분자 압전센서의 E_{pp} 를 다른 값으로 했을때의 예측값과 측정치를 비교 정리하였다. $E_{pp} = 2.54 \text{ GPa}$ 로 하여 등가회로 이론과 탄소성 전단지연 모델을 이용하여 예측한 값이 세개의

Table 4. Piezopolymer sensor responses under low-cyclic loading

	SUF-2 ^a [0/90] _{4S}	SUF-3 ^a [0/90] _{4S}	SFF-2 ^b [0/90] _{2S}
$E_{H, x}$ (GPa)	85.5	85.5	75.8
$\nu_{H, xy}$	0.037	0.037	0.050
$\sigma_{H, max}$ (MPa)	250	500	343
$\epsilon_{H, max}$ (%)	0.29	0.58	0.45
Predicted voltage based on $E_{pp} = 2.0 \text{ GPa}$	0.89	1.78	1.37
Predicted voltage based on $E_{pp} = 4.0 \text{ GPa}$	1.78	3.56	2.74
Predicted voltage based on $E_{pp} = 2.54 \text{ GPa}$	1.09	2.19	1.69
Measured voltage	1.05	2.25	1.70

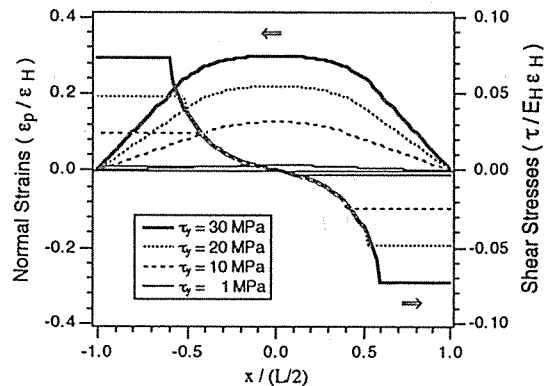
a. T650/35/ERL-1902, Amoco, unidirectional prepreg

b. T650/35-5HS/ERL-1902, Amoco, fabric prepreg

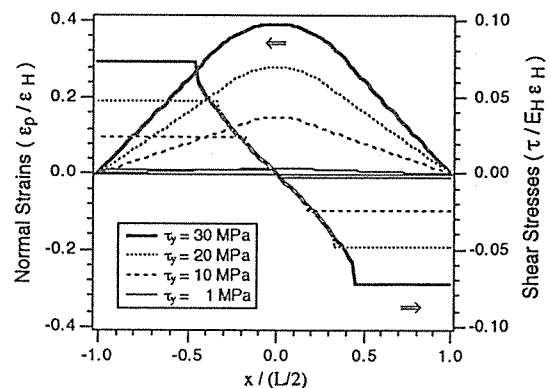
피로시편에 부착된 고분자 압전센서의 측정치와 가장 잘 일치함을 알 수 있었다. 그러나 제조회사에서 제공한 값과 차이가 나는 명확한 이유는 아직까지 밝혀지 못하였다.

세라믹 압전센서의 경우 탄성 전단지연 모델에 의하여 예측된 값은 측정치 보다 컸으며 신호파형도 Fig. 5(a), (b)와 Fig. 6에서와 같이 상당히 다르게 예측되었다. 이것은 주구조물의 변형율이 세라믹 압전센서에 유효하게 전달되지 않았음을 의미한다.

고분자 압전센서를 부착했을 경우는 최대 전단응력이 주구조물에 가한 응력에 비하여 아주 작은 값을 나타내지만 세라믹 압전센서인 경우 탄성 전단지연 모델에 의한 접착층에서의 전단응력은 접착



(a) T-4; Epoxy-bonded sensor ($t_b = 0.01 \text{ mm}$)



(b) T-3; Adhesive-bonded sensor ($t_b = 0.058 \text{ mm}$)

Fig. 7. Normal strains in piezoelectric sensor and shear stresses in the bonding layer for different shear yield stresses (elastic-plastic shear lag model; $\epsilon_H = 0.58\%$ strain)

층의 두께가 0.010 mm 인 경우는 주구조물의 응력의 약 60%에 해당하는 값과 접착층의 두께가 0.058 mm 인 경우는 25%에 해당하는 값이 발생한다. 접착층의 전단 소성강도를 30 MPa로 가정하고 주구조물에 500 MPa의 인장응력을 가할 경우 세라믹 압전센서의 양 끝단 아래의 접착층에서는 주구조물에 가한 응력의 10% 이하에서 이미 전단 소성강도를 초과하는 전단응력을 받게 된다. Fig. 7은 접착층의 두께와 전단 소성 강도를 서로 다른 값으로 가정하였을 때의 압전센서에서의 수직변형율비와 주구조물의 수직응력과 접착층의 전단응력비를 나타낸다($\epsilon_H = 0.58\%$, $E_H = 85.5$ GPa). 센서 위에서의 변형율 분포와 접착층에서의 전단응력은 전단 소성강도와 접착층 두께에 따라 달라짐을 알 수 있다. 이것은 세라믹 압전센서의 경우 평균 변형율은 주구조물의 변형율에 탄성 전단지연 모델에서와 같이 선형적으로 비례하지 않으며 반복 하중에 의한 센서의 폐회로 전압은 주구조물의 정현파 변형율과 달라진다. 탄소성 전단 지연 모델에 의하면 센서의 응답 파형은 주구조물의 변형율이 어느 값 이상일 경우에는 거의 일정함을 알 수 있다. 이것은 센서의 측정된 전압이 변형율의 시간에 대한 미분 값이므로 세라믹 압전센서의 측정 전압과 고분자 압전센서의 측정 전압 파형이 달라짐을 알 수 있다.

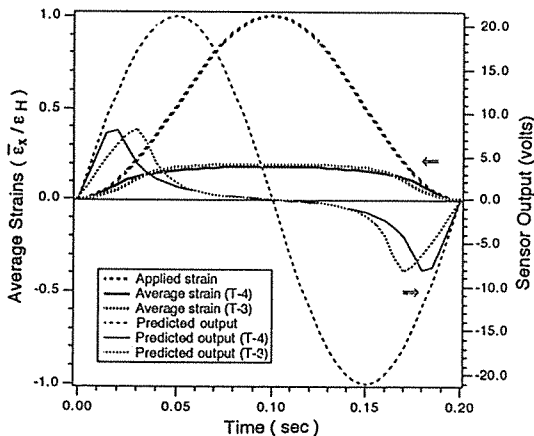


Fig. 8. Average strains and predicted sensor output vs. time for different bonding layer thickness ($\epsilon_H = 0.58\%$ strain, elastic-plastic shear lag model, $\tau_y = 30$ MPa assumed)

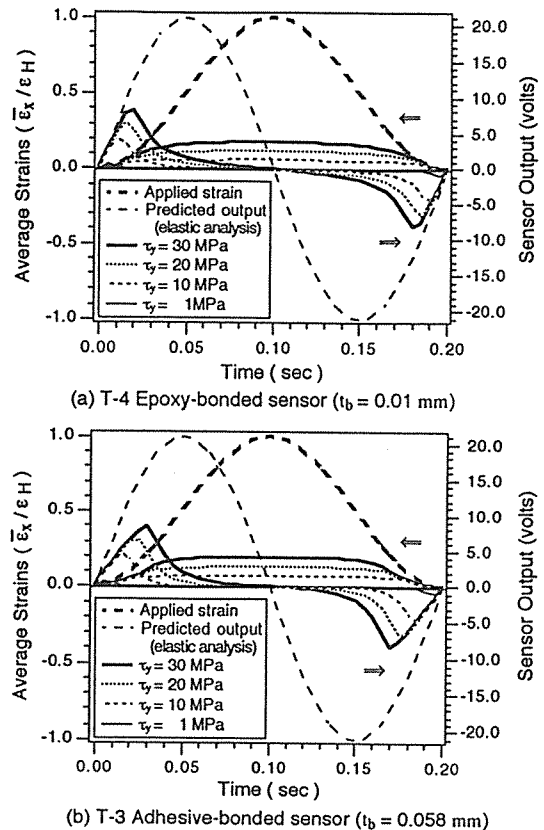


Fig. 9. Average strains and predicted sensor output vs. time for different shear yield stresses (elastic-plastic shear lag model, $\epsilon_H = 0.58\%$ strain)

탄소성 전단지연 모델에 의한 평균변형율과 예측된 센서의 신호 파형이 Fig. 8에 나와 있다. 예측 신호 파형은 실제 파형(Fig. 5(b))과 매우 유사함을 알 수 있었다. 서로 다른 전단 소성강도와 가한 하중에 따른 평균 변형율비와 예측된 전압은 Fig. 9에 나와 있다. 탄소성 전단지연 모델에 의한 센서의 신호 파형은 실제 파형과 매우 유사함을 알 수 있었고 두께가 다른 접착층으로 된 센서의 최대 전압은 탄성 전단지연 모델의 결과와 다름을 알 수 있었다.

세 개의 피로 시편에 2가지 다른 방법(에폭시 접착방법 : T-4, 접착필름 접착 방법 : T-3)으로 부착된 세라믹 압전센서의 접착층 전단 소성 강도에 따른 예측 최대 전압과 측정전압이 Table 5에 나타나

Table 5. Sensor responses under low-cyclic loading with different sensor attachment techniques based on the elastic-plastic shear lag model

Specimen	SUF-2		SUF-3		SFF-2	
E_{II} (GPa)	85.5		85.5		75.8	
$\varepsilon_{II, max}$ (%)	0.29		0.58		0.45	
Sensor Attachment Method	T-3	T-4	T-3	T-4	T-3	T-4
Bonding Layer Thickness t_b ($\times 10^{-3}$ m)	0.058	0.010	0.058	0.010	0.058	0.010
	Predicted Voltage(Volt)					
Shear Failure Strength						
– 30 MPa (assumed)	5.26	5.91	8.20	8.01	6.34	6.52
– 20 MPa (assumed)	4.67	4.80	6.54	6.51	5.22	5.20
– 10 MPa (assumed)	3.27	3.26	4.58	4.24	3.74	3.44
– 1 MPa (assumed)	0.71	0.66	0.84	0.76	0.77	0.70
	Measured Voltage(Volt)					
at 10,000 cycle	–	–	1.29	0.69	0.87	0.20
at 300,000 cycle	1.10	0.09	1.24	0.36	0.76	0.09

있다. 탄소성 전단지연 모델에 의한 예측된 최대 전압은 가한 최대 하중에 비례하지 않으며 측정치에서도 유사한 경향을 보인다. 그러나 일반적인 고분자 접착제의 전단 소성강도를 30MPa로 가정하면 세라믹 압전센서의 최대 전압은 실제 측정된 값보다 크게 예측되었다. 반복횟수가 증가됨에 따라 접착층이 성능저하가 일어나서 접착층의 전단 소성강도가 저하하여 소성영역이 증대하거나 접착층의 층간 분리로 압전센서의 유효 접착 길이가 감소한다면 측정전압이 예측치 보다 작아짐을 설명할 수 있다. 이러한 결과로 부터 센서의 응답성이 접착층 두께 뿐만 아니라 전단 소성강도에 의존한다는 것을 알 수 있다.

저주기 반복 하중에 의한 세라믹 압전센서의 응답성은 고분자 압전센서의 응답성과 다르며 탄성 전단지연 모델에 의하여 예측된 값과도 다르다. 주구조물의 변형율이 클 경우 접착층의 전단파괴 또는 소성이 일어날 수 있으며 접착층의 전단 소성 변형은 접착층의 두께와 전단 소성강도 뿐만 아니라 압전센서의 길이와 두께 그리고 탄성계수에 영향을 받음을 알 수 있다. 탄소성 전단지연 모델에 의한 예측된 센서의 응답성은 접착필름으로 접착된 경우와 에폭시 접착된 경우의 측정 값과 잘 일치한다. 반복 횟수에 의한 센서의 응답성 저하는 피로 하중에 의한 접착층의 소성 영역의 증대나 부분적인 접착

층의 층간 분리, 전단 소성강도의 저하 또는 피로 하중에 의한 센서 자체의 물성 저하에 의한 것으로 설명할 수 있다. 세라믹 압전센서를 센서나 액츄에이터로 사용할 경우 특히 주구조물의 변형율이 크게 생길 수 있는 부분에 부착할 경우 세심한 주의가 필요하다. 그러므로 접착층의 전단 소성/파괴를 최소화하기 위하여 압전센서의 두께와 길이 그리고 접착층의 두께를 최적화하여야 한다.

4. 결 론

저주기 반복하중에 의한 복합재료 적층판에 부착된 센서의 응답성을 탄소성 전단지연 모델과 등가회로 이론으로 예측한 값과 피로시험을 통한 실험 값을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저주기 반복하중에 의한 고분자 압전센서의 응답성은 접착층의 영향을 무시할 수 있고 이론값과 신호의 형태와 크기가 잘 일치하였다.

(2) $RC\omega$ 가 1보다 작을 경우, 저주기 반복하중에 의한 센서의 응답성은 센서의 전극판에서의 평균 변형율의 시간에 대한 미분값에 비례한다.

(3) 저주기 반복하중에 의한 세라믹 압전센서의 응답성은 1차원 탄소성 전단지연 모델에 의한 예측값과 잘 일치하였다.

(4) 세라믹 압전재료와 같이 강성도가 주구조물

이나 접착층에 비하여 크고 센서나 액츄에이터로 사용하여 주구조물의 큰 변형율을 감지하거나 주구조물에 큰 변형율을 필요로 할 때, 기존의 고분자 계통의 접착제로 사용할 경우 완전접착 조건과는 달리 접착층을 통하여 변형율이 선형적으로 전달되지 않을 수 있다.

(5) 주구조물의 큰 변형율하에서 접착층의 전단 파괴 또는 소성은 접착층의 두께, 전단 소성강도 뿐만 아니라 압전센서의 길이와 두께 그리고 강성도에 의하여 좌우된다.

(6) 반복횟수에 따른 세라믹 압전센서의 응답성 저하는 접착층의 전단 소성강도의 저하 또는 접착층의 소성영역의 증가로 주구조물의 변형율이 선형적으로 압전센서에 전달되지 못한 것으로 해석할 수 있으며 피로하중에 의한 센서자체의 물성 저하의 영향도 배제할 수 없으며 이에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

(7) 고분자 압전센서는 광범위한 주파수 대역의 피로하중을 받는 주구조물의 피로 상태를 별도의 부가적인 장비없이 피로 횟수 뿐만 아니라 크기도 연속적으로 측정이 가능하여 주구조물의 피로 상태를 감지할 수 있는 스마트 센서로 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Rogers, C.A., Baker, D.K., and Jaeger, C.A., "Introduction to Smart Materials and Structures," ARO Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues Workshop Proceedings, Blacksburg, VA, Sep. 1988, pp.17-28.
2. Mazur, C.J., Serdeckyj, G.P., and Stevens, D.M., "Air Force Smart Structures/Skin Program Overview," *SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins*, Vol.986, 1988, pp.19-29.
3. Hagood, N.W., Crawley, E.F., de Luis, J., and Anderson, E.H., "Development of Integrated Components for Control of Intelligent Structures," ARO Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues Workshop Proceedings, Blacksburg, VA, Sep. 1988, pp.80-104.
4. Dosch, J.J. and Inman, D.J., "A Self-sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control," *J. of Intelligent Material System and Structures*, Vol.3, No.1, Jan. 1992, pp.166-185.
5. Crawley, E.F. and de Luis, Javier, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Vol.25, No.10, 1987, pp.1373-1385.
6. 김인결, "압전센서를 이용한 스마트 복합재료 패널의 성형 및 구조적 건전성," 한국복합재료 춘계 학술대회 논문집, 4월 1996, pp.86-92.
7. Kino, G.S., *Acoustic Waves : Devices, Imaging, and Analog Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., 1987.
8. Atochem Sensors Inc., Technical Manual, 1991.
9. Piezo Kinetics Inc., Application Note and Properties and Characteristics.