論文

끝단 질량을 가진 복합재료 박판 보의 퍼지기법과 압전 감지기/작동기를 이용한 진동제어

이윤규*, 강호식*, 송오섭*+

Vibration Control of Composite Thin-Walled Beams with a Tip Mass Via Fuzzy Algorithm and Piezoelectric Sensor and Actuator

Yoonkyu Lee*, Hoshik Kang*, Ohseop Song**+

ABSTRACT

This paper deals with adaptive fuzzy logic controller design to achieve proper dynamic response of a composite thin-walled beam with a tip mass. In order to check the effectiveness of this controller, three different types of control logic are selected and applied. The adaptive control capabilities provided by a system of piezoactuators bonded or embedded into the structure are also implemented in the system. Results show that the fuzzy logic controller is more effective than the proportional or velocity feedback controller for the vibration control of composite thin-walled beam with a tip mass.

초 록

본 연구에서는 끝단에 질량이 부착된 복합재료 박판 보의 동특성을 제어하기 위하여 퍼지 알고리즘을 이용한 적응제어 기법에 대하여 고찰하였다. 적응제어기법을 구현하기 위해 감지기와 작동기의 역할을 할 수 있는 압전재료를 구조물의 중립면상에 삽입하였다. 끝단 질량이 변하는 경우, 비례제어 및 속도제어와 비교해 볼 때, 퍼지 알고리즘을 이용한 제어 기법이 복합재료 박판 보의 동적응답제어에 우수한 성능을 보였다.

Key Words: 끝단 질량(tip mass), 복합재료 박판 보(composite thin-walled beam), 퍼지 이론(fuzzy logic), 압전 감지기/작동기(piezoelectric sensor and actuator)

1. 서 론

항공기나 우주분야에서는 구조물의 질량이 그 성능에 미치는 영향과 부가 질량에 따른 불안정 특성 때문에, 경량구조의 개발과 부가 질량에 따른 시스템의 안정화 방법에 대한 요구가 있어왔다. 이러한 요구를 기반으로 기존의 재료보다 가볍고 기계적 성질이 우수한 섬유강화 복합재료의 사용이 증가하고 있으며 또한, 구조적 효율성이 높은 박판 보(thin-walled beam)의 사용 예를 많이 찾아 볼 수 있다.

이방성 복합재료 구조물의 구조 연성 효과를 이용하여 구조물의 동특성을 적절히 조정하려는 구조적 테일러링(structural tailoring)과 더 나아가 지능형 복합재료(intelligent composite material, ICM)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 연구에서는, 기존의 진동제어 방법과는 달리 지능형 재료를 작동기(actuator) 및 센서(sensor)로 많이 사용하고 있으며 복합재료의 경우에는 분포형 감지기와 작동기에 관한 연구가 이루어지고 있다.

특히, 항공기의 날개, 공격형 헬기 등에도 보조 연료

* 충남대학교 기계공학과 대학원
*+ 충남대학교 공과대학 기계공학과, 교신저자(E-mail:songos@cnu.ac.kr)

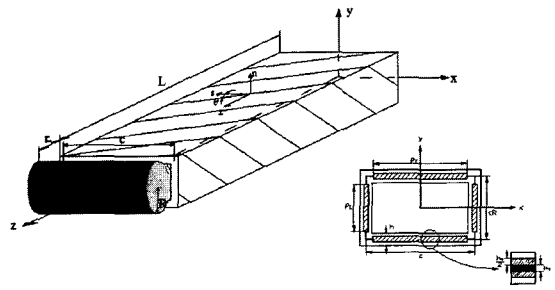

Fig. 1 Configuration of a beam with tip mass. and cross section area of thin-walled beam.

통이나 무기가 장착되며, 이러한 부가 질량이 있는 시스템의 진동제어에 관한 기존의 연구는 설계변수의 조정에 중점을 두었다.

본 연구에서는 종방향 및 횡방향 굽힘운동이 연성되는 CUS(circumferentially uniform stiffness) 형태의 적층 복합재료 박판 보에 감지기와 작동기의 역할을 할 수 있는 압전필름이 삽입되고, 보의 끝단에 원통형 부가 질량이 부착된 구조 모델을 정립하였고, 끝단 질량의 변화에 따른 박판 보 구조물의 자유진동특성 변화경향과 외부하중에 의한 동적응답 특성의 변화에 대하여 고찰하였다. 특히, 시스템의 운용 중에 끝단 질량이 변화하는 경우에, 최초 설계시의 이득값에 의존하는 통상적인 제어기 대신에 fuzzy 알고리즘을 이용하여 자동으로 이득값을 조정함으로써 개선된 제어성능을 구현하고자한다.

2. 운동학 및 구성방정식

2.1 기본가정

복합재료 박판 보 구조 모델의 기본가정은 다음과 같다.

1) 변형 전의 단면형상은 변형 후에도 보존된다.
2) 횡전단 효과와 회전관성효과를 고려한다.
3) 1,2차 와핑 변위는 보의 축 방향에 대한 함수인 비틀림률 $\Phi'(z)$에 비례한다.
4) 보의 벽두께 방향의 2차 와핑 효과를 고려한다.

끝단 질량의 기본 가정은 다음과 같다.

1) 끝단 질량의 형태는 반지름이 R인 원통형이다.
2) 보와 끝단 질량을 연결해주는 연결부는 강체이고 그 질량은 무시한다.
3) 끝단 질량의 질량 중심과 보의 길이방향의 중심선은 일치한다. 즉, 편심되어 있지 않다.

기하학적 특성은 다음과 같다.

$$h = 0.4\,in \quad h_p^a = 0.1\,in \quad h_p^s = 0.05\,in$$

$$c = 10\,in \quad L = 80\,in$$

압전재료에 대한 기본 가정은 다음과 같다.

1) 보의 축 방향을 따라 균일하게 삽입되어 있다.
2) s-z 평면 내에서는 등방성이고, 두께 방향(n) 방향으로 횡 방향 이방성 물질(transversely isotropic)로 가정한다.
3) 압전재료의 분극 방향은 두께 방향과 일치한다.

2.2 변위장

변위변수의 함수로 표시된 변위벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(s,z;t) &= u_o(z;t) - y(s)\,\phi(z;t) \\ v(s,z;t) &= v_o(z;t) + x(s)\,\phi(z;t) \\ w(s,z;t) &= w_o(z;t) + \theta_x(z;t)\left[y(s) - n\frac{dx}{ds}\right] \\ &\quad + \theta_y(z;t)\left[x(s) + n\frac{dy}{ds}\right] \\ &\quad - \phi'(z;t)\left[F_w(s) + n\,a(s)\right] \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $F_w(s)$와 $a(s)$는 각각 1, 2차 와핑함수를 나타낸다.

2.3 복합재료의 구성방정식

복합재료(generally orthotropic)의 3차원 구성방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{ss} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{nn} \\ \sigma_{nz} \\ \sigma_{sn} \\ \sigma_{sz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}^k_{11} & \overline{Q}^k_{12} & \overline{Q}^k_{13} & 0 & 0 & \overline{Q}^k_{16} \\ \overline{Q}^k_{12} & \overline{Q}^k_{22} & \overline{Q}^k_{23} & 0 & 0 & \overline{Q}^k_{26} \\ \overline{Q}^k_{13} & \overline{Q}^k_{23} & \overline{Q}^k_{33} & 0 & 0 & \overline{Q}^k_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \overline{Q}^k_{44} & \overline{Q}^k_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{Q}^k_{45} & \overline{Q}^k_{55} & 0 \\ \overline{Q}^k_{16} & \overline{Q}^k_{26} & \overline{Q}^k_{36} & 0 & 0 & \overline{Q}^k_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{ss} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{nn} \\ \gamma_{zn} \\ \gamma_{sn} \\ \varepsilon_{sz} \end{bmatrix} \tag{2}$$

이때 위첨자 k는 k 번째 단층(lamina)을 의미하고 복합재료의 특성은 다음과 같다.

$$E_1 = 30\times10^6\,\text{psi} \quad E_2 = 0.75\times10^6\,\text{psi} \quad G_{13} = G_{23} = 0.37\times10^6\,\text{psi}$$

$$G_{12} = 0.45\times10^6\,\text{psi}\ \mu_{12} = \mu_{23} = \mu_{13} = 0.25 \quad \rho_c = 14.3\times10^{-5}\,lb\cdot\sec^2/in^4$$

2.4 압전재료의 구성방정식

압전재료의 역전효과를 이용해 제어 작동기로 사용할 경우의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\sigma_m = [C_{mi}]\,S_i - [e_{nk}]^T E_k \tag{3}$$

식(3)을 풀어쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix}\sigma_{ss}\\ \sigma_{zz}\\ \sigma_{nn}\\ \sigma_{nz}\\ \sigma_{sn}\\ \sigma_{sz}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C^p_{11} & C^p_{12} & C^p_{13} & 0 & 0 & 0\\ C^p_{12} & C^p_{11} & C^p_{13} & 0 & 0 & 0\\ C^p_{13} & C^p_{13} & C^p_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C^p_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C^p_{44} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C^p_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{ss}\\ \varepsilon_{zz}\\ \varepsilon_{nn}\\ \gamma_{zn}\\ \gamma_{sn}\\ \varepsilon_{sz}\end{bmatrix}-\begin{pmatrix}e^p_{31}\varepsilon^p_3 R_{(p)}(s,z,n)\\ e^p_{31}\varepsilon^p_3 R_{(p)}(s,z,n)\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\end{pmatrix} \tag{4}$$

이때 위첨자 p는 p번째 적층판을 의미하고 두 번째 항의 $R_{(p)}(s,z,n)$ 는 s,z,n 방향의 공간함수를 의미한다. 압전재료(PZT-4)의 특성은 다음과 같다.

$C^p_{11}=0.2016\times10^7$ psi $C^p_{12}=1.1128\times10^7$ psi $C^p_{13}=1.0776\times10^7$ psi

$C^p_{33}=1.6679\times10^7$ psi $C^p_{44}=3.7128\times10^7$ psi $e^p_{13}=-0.0297\ lb\cdot V/in$

$\rho_p=7.0135\times10^{-4}\ lb\cdot\sec^2/in^4$

2.5 전체 구성방정식

단위길이당 합력과 합모멘트는 임의의 순서로 적층된 복합재료와 압전재료의 구성방정식을 두께(n)방향으로 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix}N_{zz}\\ N_{sz}\\ L_{zz}\\ L_{sz}\\ N_{nz}\\ N_{sn}\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & 0\\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & 0\\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & 0\\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{44}\\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{45}\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\varepsilon^o_{zz}\\ \gamma^o_{sz}\\ W_M\\ \varepsilon^n_{zz}\\ \gamma_{nz}\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}N^a_{zz}\\ 0\\ L^a_{zz}\\ 0\\ 0\\ 0\end{pmatrix} \tag{5}$$

윗 식의 오른쪽 두 번째 항은 압전재료에 의하여 발생하는 합력과 합모멘트를 나타낸다.

3. 지배방정식 유도

3.1 해밀턴 원리(Hamilton's Principle)

구조물의 운동방정식과 경계조건을 구하기 위하여 다음과 같은 해밀턴 원리를 이용한다.

$$\delta J=\int_{t_0}^{t_1}(-\delta U+\delta K+\delta W_e)\,dt=0 \tag{6}$$

윗식에서 U 는 변형에너지, K 는 운동에너지 그리고 W_e는 외부힘에 의한 일을 나타낸다.

3.2 지배방정식 및 경계 조건

정적 평형방정식과 동적 운동 방정식을 유도하기 위해 각각의 변위 변수들을 다음과 같이 정적인 성분과 동적인 성분으로 분리한다.

$$\begin{aligned}u_0(z;t)&=\tilde{u}_0(z)+\hat{u}_0(z;t)\\ v_0(z;t)&=\tilde{v}_0(z)+\hat{v}_0(z;t)\\ \Theta_x(z;t)&=\tilde{\Theta}_x(z)+\hat{\Theta}_x(z;t)\\ \Theta_y(z;t)&=\tilde{\Theta}_y(z)+\hat{\Theta}_y(z;t)\end{aligned} \tag{7}$$

위의 식에서 ('~') 는 시간과 무관한 정적 응답을 의미하고, ('^') 은 시간의 함수인 동적 응답을 나타낸다.

(1) 정적 평형 방정식

정적 평형방정식과 경계 조건식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&a_{43}\tilde{\Theta}_x''+a_{44}(\tilde{u}_0''+\tilde{\Theta}_y')=0\\ &a_{52}\tilde{\Theta}_y''+a_{55}(\tilde{v}_0''+\tilde{\Theta}_x')-b_1 g=0\\ &a_{22}\tilde{\Theta}_y''+a_{25}(\tilde{v}_0''+\tilde{\Theta}_x')\\ &\quad-a_{43}\tilde{\Theta}_x'-a_{44}(\tilde{u}_0'+\tilde{\Theta}_y)=0\\ &a_{33}\tilde{\Theta}_x''+a_{34}(\tilde{u}_0''+\tilde{\Theta}_y')\\ &\quad-a_{52}\tilde{\Theta}_y'-a_{55}(\tilde{v}_0'+\tilde{\Theta}_x)=0\end{aligned} \tag{8}$$

$z=0$ 에서, $\tilde{u}_0=\tilde{v}_0=\tilde{\Theta}_x=\tilde{\Theta}_y=0$

$z=L$ 에서

$$\begin{aligned}&a_{43}\tilde{\Theta}_x'+a_{44}(\tilde{u}_o'+\tilde{\Theta}_y)=0\\ &a_{52}\tilde{\Theta}_y'+a_{55}(\tilde{v}_o'+\tilde{\Theta}_x)+Mg=0\\ &a_{33}\tilde{\Theta}_x'+a_{34}(\tilde{u}_o'+\tilde{\Theta}_y)-Mgr_M=0\\ &a_{22}\tilde{\Theta}_y'+a_{52}(\tilde{v}_o'+\tilde{\Theta}_x)=0\end{aligned} \tag{9}$$

$M=$ *Tip Mass* ,

$g=$ 중력가속도 , $r_M=$ *Offset Distance of Tip Mass*

(2) 동적 운동방정식

운동방정식과 경계 조건식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&a_{43}\hat{\theta}_x''+a_{44}(\hat{u}_o''+\hat{\theta}_y')+p_x=b_1\ddot{\hat{u}}_o\\ &a_{52}\hat{\theta}_y''+a_{55}(\hat{v}_o''+\hat{\theta}_x')+p_y=b_1\ddot{\hat{v}}_o\\ &a_{33}\hat{\theta}_x''+a_{34}(\hat{u}_o''+\hat{\theta}_y')\\ &\quad-a_{52}\hat{\Theta}_y'-a_{55}(\hat{v}_o'+\hat{\Theta}_x)+m_y\\ &=(b_4+b_{14})\ddot{\hat{\theta}}_x\end{aligned} \tag{10}$$

$$a_{22}\widehat{\theta_y}'' + a_{25}(\widehat{v_o}'' + \widehat{\theta_x}') - a_{43}\Theta_{x}' - a_{44}(\widehat{u}_o' + \Theta_y) + m_y = (b_5 + b_{15})\ddot{\widehat{\theta}}_y$$

$z = 0$ 에서 $\widehat{u_o} = \widehat{v_o} = \widehat{\theta_y} = \widehat{\theta_x} = 0$

$z = L$ 에서 (11)

$$a_{43}\widehat{\theta_x}' + a_{44}(\widehat{u_o}' + \widehat{\theta_y}) - M\ddot{\widehat{u}}_0 + 2Mr_M\ddot{\widehat{\theta}}_y = \widehat{Q_x}$$

$$a_{52}\widehat{\theta_y}' + a_{55}(\widehat{v_o}' + \widehat{\theta_x}) - M\ddot{\widehat{v}}_0 + 2Mr_M\ddot{\widehat{\theta}}_x = \widehat{Q_y}$$

$$a_{22}\widehat{\theta_y}' + a_{25}(\widehat{v_o}' + \widehat{\theta_x}) - J_{yy} + 2Mr_M\ddot{\widehat{u}}_0 = \widehat{M_y} - M_y^a$$

$$a_{33}\widehat{\theta_x}' + a_{34}(\widehat{u_o}' + \widehat{\theta_y}) - J_{yy} + 2Mr_M\ddot{\widehat{u}}_0 = \widehat{M_x} - M_x^a$$

이때, 경계조건식 (11)에서, 가해진 전기장(ε_3^p)에 의해 발생되는 제어모멘트는 다음과 같다.

$$M_y^a(z;t) = \int_C [xN_{zz}^a - L_{zz}^a\frac{dy}{ds}]ds = C_{M_y^a}\epsilon_3^p$$

$$M_x^a(z;t) = \int_C [yN_{zz}^a - L_{zz}^a\frac{dx}{ds}]ds = C_{M_x^a}\epsilon_3^p \quad (12)$$

여기에서 $C_{M_y^a}$와 $C_{M_x^a}$는 압전작동기의 삽입위치와 크기에 따른 영향을 나타내는 상수이며, ϵ_3^p는 작동기에 가해지는 전기장의 크기를 나타낸다.

4. 압전재료를 이용한 능동제어

끝단 질량이 변화하는 경우에 대해서, 비례제어와 속도궤환제어, 그리고 퍼지 제어기를 이용한 동적응답의 제어성능에 대하여 상호 비교한다.

4.1 압전감지기 출력식

구조물의 변형에 의해 압전감지기에 발생하는 전하량 $q_p(t)$, 전압 $V_p(t)$,전류 $I_p(t)$ 들은 다음과 같다.

$$q_p(t) = \int\int e_{31}[\Theta_y' x + \Theta_x' y]\,ds\,dz \quad (13)$$

$$V_p(t) = \frac{q_p(t)}{C_p} = \frac{h_p^s q_p(t)}{\xi_{33}^p A_p} \quad (14a)$$

$$= \frac{h_p^s}{\xi_{33}^p A_p}\iint [e_{31}\{\theta_y' x(s) + \theta_x' y(s)\}]\,ds\,dz$$

여기에서 h_p^s, ξ_{33}^p, A_p 는 각각 압전필름의 두께, 압전필름의 유전율(permittivity), 그리고 압전필름의 면적(patch area)을 나타낸다. 식 (14a)를 부분 적분하여 다음 식을 얻는다.

$$V_p(t) = C_{V_y}\theta_y + C_{V_x}\theta_x \quad (14b)$$

$$I_p(t) = \frac{dq_p(t)}{dt} \quad (15a)$$

$$= \iint [e_{31}\{\dot{\theta}_y' x(s) + \dot{\theta}_x' y(s)\}]\,ds\,dz$$

식 (15a)를 부분 적분하여 다음 식을 얻는다.

$$I_p(t) = C_{I_y}\dot{\theta}_y + C_{I_x}\dot{\theta}_x \quad (15b)$$

4.2 확장된 Galerkin방법

변위변수를 공간과 시간에 대한 급수형태로 가정한다.

$$u_o(z,t) = \sum_{i=1}^{N} U_i(z)\,q_{1i}(t)$$

$$v_o(z,t) = \sum_{i=1}^{N} V_i(z)\,q_{2i}(t)$$

$$\theta_y(z,t) = \sum_{i=1}^{N} Y_i(z)\,q_{3i}(t) \quad (16)$$

$$\theta_x(z,t) = \sum_{i=1}^{N} X_i(z)\,q_{4i}(t)$$

식 (16)을 운동방정식인 식 (10)과 경계조건식 식 (11)에 대입하고 보의 길이 방향에 대하여 적분하여 다음 식을 얻는다.

$$[M]\ddot{\underline{q}}(t) + [K]\underline{q}(t) = \underline{Q}(t) + \underline{F}(t) \quad (17)$$

여기에서 $[M]$,$[K]$는 질량행렬과 강성행렬을 나타내며, $\underline{Q}(t)$, $\underline{F}(t)$는 외력벡터와 압전작동기에 의한 제어모멘트 벡터이다. 그리고 시간의 함수로 표현된 일반화된 좌표벡터 $q(t)$는 다음과 같다.

$$\underline{q}(t) = [\underline{q_1}(t)\ \underline{q_2}(t)\ \underline{q_3}(t)\ \underline{q_4}(t)]^T \quad (18)$$

$$\underline{q_i}(t) = [q_{i1}\ q_{i2}\ \cdots\ q_{iN}]$$

4.3 비례제어 및 속도 제어

압전감지기로부터 측정한 전압(식14(a))에 이득을 곱하여 이를 작동기에 전기장으로 가하는 비례제어방법에 있어서 제어모멘트식은 다음과 같다.

$$E(t) \equiv -K_P \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{M_y''} C_{V_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{M_x''} C_{V_x} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \\ q_4(t) \end{pmatrix}$$
$$\equiv [F] q(t) \quad (19)$$

이 때 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$[M]\ddot{q}(t) + [K^*]q(t) = Q(t) \quad (20)$$
여기서, $[K^*] = [K] + [F]$

압전감지기로부터 측정한 전류를 나타내는 식 (15b)에 이득을 곱하여 이를 간단한 전기회로를 이용하여 이에 비례하는 전기장을 작동기에 가하는 속도제어 방법에 있어서 제어모멘트식은 다음과 같다.

$$E(t) \equiv -K_V \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{M_y''} C_{V_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{M_x''} C_{V_x} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1(t) \\ \dot{q}_2(t) \\ \dot{q}_3(t) \\ \dot{q}_4(t) \end{pmatrix}$$
$$\equiv [F] \dot{q}(t) \quad (21)$$

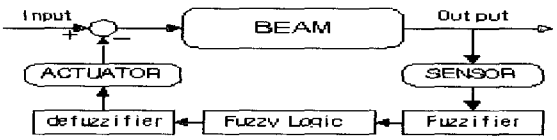

Fig. 2 Fuzzy control system.

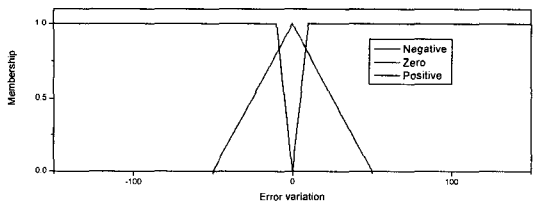

Fig. 3 Fuzzy membership of error.

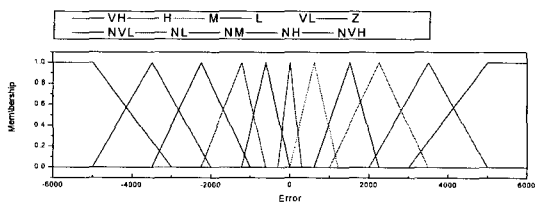

Fig. 4 Fuzzy membership of error variation.

이 때, 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$[M]\ddot{q}(t) + [C^*]\dot{q}(t) + [K]q(t) = Q(t)$$

여기서, $[C^*] = [F]$ (22)

4.4 퍼지 제어기의 설계

시스템의 초기 설계값인 이득값을 대신하여 Fig. 2와 같이 퍼지제어기를 적용함으로써 보다 개선된 제어결과를 얻는다.

(1) Fuzzifier

명확한 수치 데이터를 퍼지 집합으로 변환시키는 연산으로서 센서로부터 추출된 물리량 즉, 보의 끝단변위의 오차를 퍼지 연산자를 적용 하여 퍼지 멤버쉽 함수를 구성한다.

입력변수들의 퍼지 멤버쉽의 형태와 오차 함수는 각각 다음의 Fig. 3과 Fig. 4로 표현된다.

(2) Fuzzy Logic

퍼지 로직은 Table 1과 Fig. 5로 주어진 15개의 퍼지 규칙을 갖는다.

Table 1 Fuzzy logic

K		Error										
		VH	H	M	L	VL	Z	NVL	NL	NM	NH	NVH
Error Variation	N	VH	H	RH	M	L	L	RL	RH	H	VH	VH
	Z	VH	H	RH	M	RL	VL	RL	M	RH	H	VH
	P	VH	VH	H	RH	RL	L	L	M	RH	H	VH

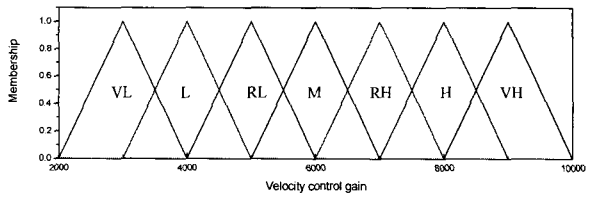

Fig. 5 Fuzzy membership of control gain.

(3) Defuzzifier

Mamdami fuzzy system에 의해 제어 이득값에 대한 퍼지 집합의 중심을 취함으로 비퍼지화 된 이득값을 얻는다. 최적의 이득 값을 얻어내기 위한 퍼지 제어기의 알고리즘은 Fig. 6의 순서도와 같다.

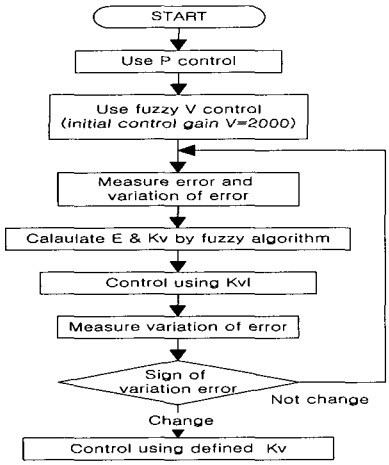

Fig. 6 Flow diagram of fuzzy auto tuning algorithm.

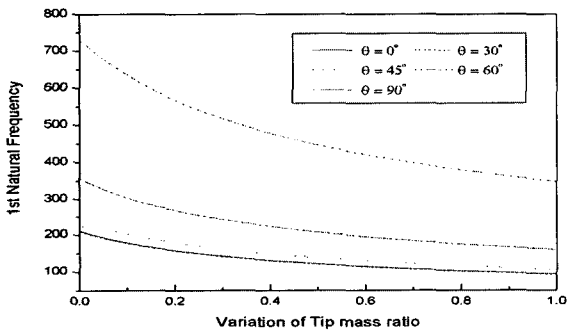

Fig. 7 Variation of 1st natural frequency(Hz) with tip mass ratio (R=1).

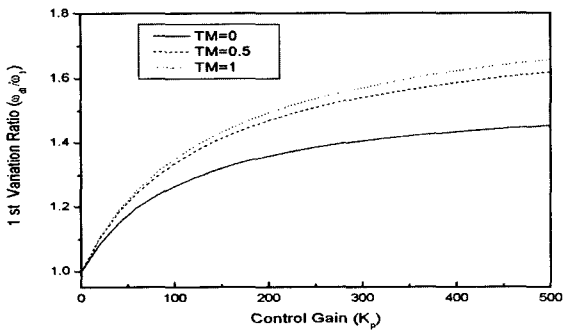

Fig. 8 Variation of 1st natural frequency ratios with proportional feedback control gain for different tip mass ratios (R=1, $\theta = 0^{\circ}$, TM=tip mass ratio).

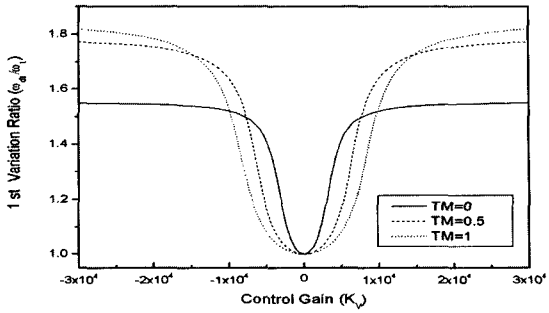

Fig. 9 Variation of 1st natural frequency ratios with velocity feedback control gain for different tip mass ratios (R=1, $\theta = 0^{\circ}$, TM=tip mass ratio).

5. 결과 및 고찰

먼저, 비례제어와 속도제어의 두 가지 다른 방법으로 제어한 경우에 대하여, 끝단 질량[1]의 변화에 따른 자유진동특성(고유진동수, 감쇠비 변화)과 강제진동응답의 변화 경향과 그 차이점에 대하여 고찰한 후 퍼지 제어기를 적용함으로써 임의의 하중에 의한 가진이 있는 경우에 대해 보다 개선된 응답을 얻었다.

Fig. 7에서는 다양한 섬유각에 대하여 끝단 질량이 증가함에 따라 고유진동수가 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 또한, tip mass ratio 0-0.1 사이에서 진동수 변화가 급격한 것으로 보아 끝단 질량의 유·무와 그 크기에 따라 고유진동수의 변화가 큼을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 비례제어 이득 K_P의 증가에 따라 첫 번째 고유진동수의 증가비가 급격히 증가하다 점차 둔화되는 것을 볼 수 있고, 끝단 질량이 클수록 비록 고유 진동수는 낮지만 그 증가비가 크며 또한 급격히 증가함을 보여준다.

Fig. 9는 증가비의 변화와 속도제어이득 K_V의 부호는 무관함을 보여 주고 끝단 질량이 클수록 증가비가 크지만 증가비의 변화율은 비례제어의 경우와는 다르게 끝단 질량이 작을수록 낮은 K_V에서 가장 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9를 비교해 보면 비례제어의 경우 끝단질량의 변화에 대해 증가비의 변화율이 가장 클 경우의 K_P 값이 대략 비슷한 반면, 속도 제어의 경우에는 끝단 질량이 클수록 증가비의 변화율의 최대값이 K_V 값이 높은 쪽에 있는 것을 알 수 있다.

또한, 다음의 Fig. 10에서 보는 바와 같이 속도제어의 경우 끝단 질량의 변화에 따른 감쇠비의 최대값은 끝단 질량이 클수록 큰 K_V값에 존재함을 알 수 있다.

1) 본 논문에서의 끝단 질량은 tip mass ratio=(보의 질량)/(tip mass의 질량)으로 정의하여 수치해석 하였다.

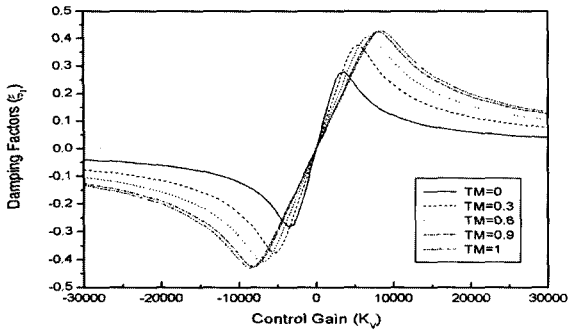

Fig. 10 1st damping factor vs. velocity feedback control gain for different tip mass ratios (R=1, $\theta = 0^\circ$, TM=tip mass ratio).

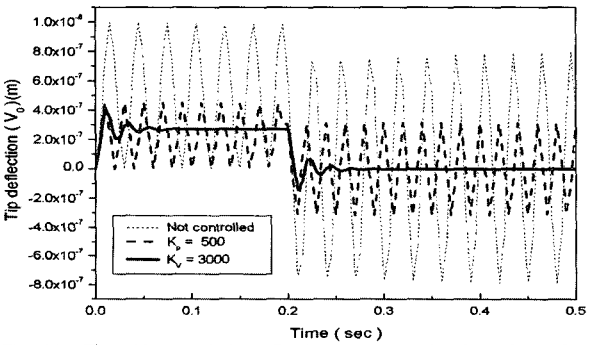

Fig. 11 Time history of tip deflection to rectangular force input for different control schemes(R=1, $\theta = 0^o$, tip mass ratio=0).

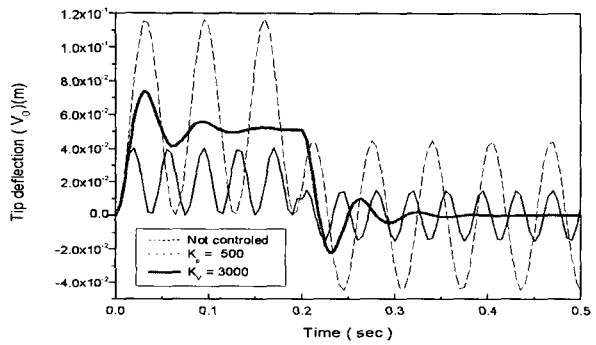

Fig. 12 Time history of tip deflection to rectangular force input for different control schemes.(R=1, $\theta = 0^o$, tip mass ratio=0.9)

즉, 속도제어의 경우는 끝단 질량의 변화에 대해서 최적의 이득값이 각 각 달리 존재함을 알 수 있다. 이는 비례제어의 경우에는 강성의 변화에 의해 제어가 이루어지지만, 속도제어의 경우는 감쇠항이 추가되어 제어가 이루어지기 때문에 끝단 질량의 변화에 따른 감쇠항의 변화가 제어 성능에 영향을 준다.

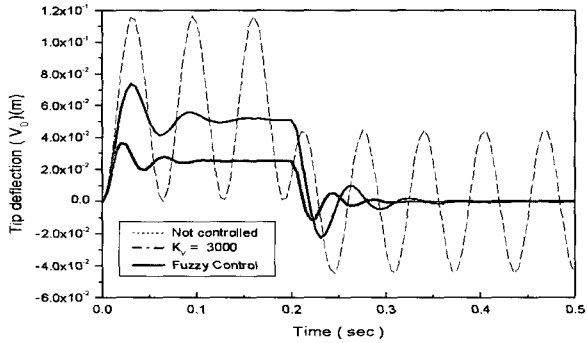

Fig. 13 Time history of tip deflection to rectangular force input for different control schemes.(R=1, $\theta = 0^o$, Tip Mass Ratio=0.9)

Fig. 11부터 Fig. 13까지는 0.2초 동안의 사각펄스 하중이 가해질 경우의 끝단 질량의 변화에 대한 시스템의 동적응답을 보여주고 있다.

Fig. 11에서 끝단 질량이 없는 경우 최적의 이득값에 의해 설계된 시스템의 응답을 보여주고 있는데, 비례제어의 경우는 단순히 강성의 증가로 진폭의 감소를 보여주고 있고 속도제어의 경우 감쇠항에 의해 진폭이 영에 접근함을 알 수 있다.

Fig. 12는 초기 설계 이득을 K_P=500 K_V=3000로 한 시스템의 끝단 질량을 변화(tip mass ratio=0.9)시킨 경우에 대한 시간응답 그래프이다. 우선 끝단 질량에 의해 응답의 진폭이 커지고 진동수가 작아지는 것을 볼 수 있고, 끝단 질량이 없었던 Fig. 11 과 비교해 보면, 비례 제어의 성능은 크게 변화를 보이지 않는 반면, 속도제어의 성능이 현저히 떨어짐을 볼 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13을 비교해 보면 시스템의 제어이득을 퍼지 제어기를 통해 적용한 시스템이 작은 오버슈트와 짧은 지연시간을 갖는 개선된 제어 응답을 보여 주고 있다.

즉, Fig. 6과 같은 흐름을 통해 외부 하중이 들어왔을 경우 퍼지 제어기가 시스템 최적의 이득값[2]을 찾아 시스템에 적용함으로써 개선된 제어 성능을 보일 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 변화하는 끝단 질량을 가진 압전감지기와 작동기가 삽입된 CUS 복합재료 얇은 벽보 구조물을 모델링하였다. 해밀턴 원리에 의해 지배방정식을 유도하였고, 압전 효과와 퍼지 이론을 이용해 구조물의 동특성을 제어한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

2) 그림 13의 경우 최적의 이득값 : K_v = 8000 , K_a = 500

1. 끝단 질량의 유무에 따라 전체 시스템의 고유진동수의 비교적 큰 변화가 있으며, 끝단 질량의 증가에 따라 고유진동수는 감소하다가 점차적으로 감소율이 둔화되는 경향을 보였다.
2. 비례 제어의 경우 K_P의 증가에 따라 고유진동수는 모두 증가하였고, 끝단 질량의 변화와 K_P의 변화에 대한 증가비(variation ratio)의 변화와의 상관관계를 알 수 있었다.
3. 속도 제어의 경우 K_V의 증가에 대해 고유 진동수는 일정량 만큼 증가하다 변화를 보이지 않았으며, 끝단 질량의 변화와 K_V의 변화에 대한 증가비의 변화와의 상관관계를 알 수 있었다. 또한, 끝단 질량의 변화와 K_V의 변화에 대한 감쇠비의 변화와의 상관관계를 고찰함으로써 끝단 질량의 변화에 대한 적절한 K_V의 값을 확인 할 수 있었다.
4. 0.2초 동안의 사각파에 의한 응답을 각기 다른 끝단 질량비를 갖는 시스템에 위의 두 가지 제어 방법을 통해 제어함으로써 각 제어기의 특성과 효과를 고찰 하였다.
5. 최초 설계 시 적용되는 이득을 Fuzzy 제어기로 대체함으로써 끝단 질량의 변화에 대한 시스템의 자유진동과 강제진동응답을 적절히 제어할 수 있었다.

참고문헌

1) O. Song, L. Librescu, and C.A. Rogers, "Adaptive Vibrational Behavior of Cantilevered Structures Modeled as Composite Thin-walled Beams," *International Journal of Engineering Science,* Vol. 31, No. 5, 1993, pp. 775-792.
2) L. Librescu, and S.S. Na, "Vibration and Dynamic Response Control of Cantilevers Carrying Externally Mounted Stores," *Journal of Acoustical Society of America,* Vol. 102, No. 6, 1997, pp. 3516-3522.
3) O. Song and L. Librescu, "Bending Vibration of Adaptive Cantilevers with External Stores," *International Journal of Engineering Science,* Vol.38, No. 5, 1993, pp. 483-498.
4) O. Song, L. Librescu, and C.A. Rogers, "Application of Adaptive Technology to Static Aeroelastic Control of Wing Structures," *AIAA Journal,* Vol. 30, No. 12, 1992, pp. 2882-2885.
5) P. Soorakasa and Guanrong Chen, "Mathematical Modeling and Fuzzy Control of Flexible-Link Robot Arm," *Mathl. Comput. Modeling,* Vol. 27 No. 6, 1998, pp. 73-98.
6) X.Q. Peng, K.Y. Lam, and G.R. Liu, "Active Vibration Control of Composite Beams with Piezoelectrics : A Finite Element Model with Third Order Theory," *Journal of Sound and Vibration,* Vol. 209, No. 4, 1998, pp. 635-650.
7) D. Han and Y. Cho, "Design of Auto-tuning Fuzzy PID Controller," 공기조화 냉동공학회지, 제2000-02호, pp 230-234.
8) K. M. Passino. and S.Yukovich, *Fuzzy Control* Addison Wesley, 1997, pp. 22-24.