온도 변화에 따른 압전 분기 감쇠기의 감쇠 성능 민감도 분석

Sensitivity Analysis of Shunted Piezoelectrics in Vibration Damping Performance under Temperature Variation

박재원*·오현웅**·한재흥†
Jae-Won Park, Hyun-Ung Oh and Author name

1. 서 론

압전 분기 감쇠기는 압전재료의 전기-기계 결합 특성을 이용하여 구조물의 진동을 제어하는 장치이다. Hagood 등[1], Wu[2], Park 등[3]에 의해 그 감쇠 특성의 수학적 기반이 자리잡았으며, 이후 회로의 종류와 제어 방법에 있어서 다양하게 발전되어 왔다. 하지만 감쇠 성능의 민감도에 있어서는 그 연구가 미비하기 때문에[4],[5], 본 논문에서는 압전 분기 감쇠기의 민감도에 대해 다루고자 한다. 재료의 물성치와 전기 소자 값의 변화에 따른 압전 분기 감쇠기의 감쇠 성능 민감도를 분석하고, 이를 바탕으로 주위의 온도가 변화함에 따라 저하되는 감쇠 성능을 계산하여 비교하였다.

2. 수학적 모델링

2.1 분석 대상

압전 분기 감쇠기를 연결할 진동 구조물은 바이모프 압전 외팔보이다(Figure 1). 오일러-베르누이 보 모델을 가정하였으며, 구조물의 제원은 Table 1에 기록하였다. 외팔보의 1차 단락회로 고유진동수 ω_n^E, 개방회로 고유진동수 ω_n^D를 식 (1)에 대입하여 일반화된 전기-기계 결합 상수 K_{31}를 계산하였다.

수동 압전 분기 감쇠기는 분기 회로의 종류에 따라 저항형 압전 분기 감쇠기(resistive shunted piezoelectric, RES), 직렬 공진형 압전 분기 감쇠기(series resonant shunted piezoelectric, S-RSP), 병렬 공진형 압전 분기 감쇠기(parallel resonant shunted piezoelectric, P-RSP)로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 세 종류의 압전 분기 감쇠기에 대해 민감도를 분석하였다.

† 교신저자; 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
E-mail : jaehunghan@kaist.edu
Tel : (042) 350-3723, Fax : (042) 350-3710
* 한국과학기술원 항공우주공학과
** 국방과학연구소 기술연구본부 영상정보시스템개발부

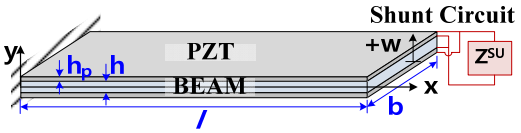


Figure 1 Bimorph piezoelectric cantilevered beam

$$K_{31}^{\ 2} = \frac{\left(\omega_n^D\right)^2 - \left(\omega_n^E\right)^2}{\left(\omega_n^E\right)^2} \tag{1}$$

Table 1 Specification of the cantilevered beam

	Beam		PZT		Unit
Length	l	100	l	100	mm
Width	b	10	b	10	mm
Thickness	h	1	h_p	0.25	mm
Material		Al.		PIC151	
Density	ρ	2700	ρ_p	7800	kg/m^3
Elastic Modulus	Y_b	70	$Y^E_{p,11}$	66.7	GPa
Permittivity			ε_3^T	2400 ε^0	F/m
Piezoelectric Coupling Coefficient			d_{31}	-210 $\times 10^{-12}$	C/N

2.2 감쇠 성능 지표 함수

분기 회로의 전기적 특성을 구조물의 기계적 특성으로 결합시키면, 전체 구조물의 유효 강성 Y와 유효 손실률 η의 식을 얻을 수 있다(식 (2), (3)). 아래 첨자 b는 알루미늄 보, p는 압전재료를 의미한다. RES는 진동 감쇠비가 손실률에 전적으로 비례하기 때문에 η를 감쇠 성능의 지표로 사용할 수 있다. RSP는 그 감쇠 성능이 기계적 고유진동수와 전기적 고유진동수 사이의 동조에도 영향을 받기 때문에, 1차 고유진동수 부근에서의 전달함수 최대값(식 (4))을 감쇠 성능의 지표로 선정하였다. $\bar{Z}_i$는 일반화된 압전 분기 감쇠기의 임피던스이다.

$$Y(\omega) = \frac{Y_b I_b + 2Y_{p,ij}(\omega) I_p \left[1 + j\eta_p(\omega)\right]}{I_b + 2I_p} \tag{2}$$

$$\eta(\omega) = \frac{2Y_{p,ij}(\omega) I_p}{YI(\omega)} \cdot \eta_p(\omega) \qquad where \quad YI = Y_b I_b + 2Y_{p,11}(\omega) I_p \tag{3}$$

$$\left|\frac{w(\omega)}{w^{ST}}\right|_{MAX} = \left|\frac{1+\bar{Z}(\omega)}{\left[1+\bar{Z}(\omega)\right]\left(\gamma^2+1\right)+K_{ij}^{\ 2}\bar{Z}(\omega)}\right|_{MAX} \tag{4}$$

$$where \quad \gamma = \omega / \omega_n^E$$

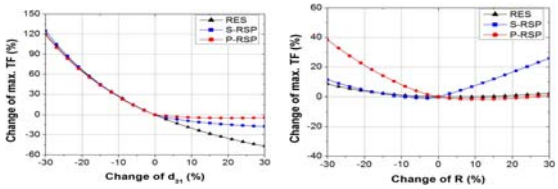
3. 매개변수에 따른 민감도 분석

3.1 매개변수 선정

RES의 손실률은 Y_b, $Y^E_{p,ij}$, 압전재료의 결합 상수 d_{31}와 유전률 ε_3^T, 회로의 저항 R, 5개 매개변수의 함수이다. RSP는 인덕터 L이 추가되어 6개의 매개변수를 가진다.

3.2 감쇠 성능의 민감도 분석 결과

RES는 외팔보의 1차 고유진동수에 맞추어 최적의 R을 선택한 후 매개변수의 변화에 따른 손실률의 변화를 각각 닫힌 수식으로 유도하였다. RSP는 고유진동수에 맞추어 최적의 R과 L을 선택한 후 매개변수의 변화율에 따라 변화하는 전달함수 최대값을 수치적으로 계산하였다. 분석 결과, RES에서 손실률을 이용하여 계산한 민감도와 전달함수를 이용하여 계산한 결과가 유사하였으므로, 최종적으로는 전달함수를 이용하여 세 종류의 민감도를 비교하였다. Figure 2는 d_{31}과 R의 변화율에 따른 전달함수 최대값의 변화를 나타낸 그래프이다. Table 2에서는 각 매개변수에 대한 세 가지 압전 분기 감쇠기의 민감도 값을 비교하고 있다.



(a) d_{31} (b) R

Figure 2 Change of max. magnitude of transfer function w.r.t. parameters

Table 2 Comparison of sensitivities w.r.t. parameter

	RES	S-RSP	P-RSP
Y_b	0.00125	-0.792	-0.539
$Y^E_{p,ij}$	-0.0977	-1.25	-0.821
d_{31}	-0.191	-0.661	-0.997
ε_3^T	-0.0336	-2.42	-2.17
R	-0.0324	-0.321	-0.218
L		-1.87	-1.81
Average	**-0.0563**	**-1.19**	**-1.07**

4. 온도에 따른 민감도 분석

감쇠 성능을 D, 매개변수를 x, 온도를 T라 할 때, 각 매개변수의 온도 상수를 알면 식 (5)를 이용하여 온도 변화에 대한 감쇠 성능의 민감도를 계산할 수 있다. 온도가 상승할 때의 민감도는 Table 3과 같다.

$$\left.\frac{\partial D/D}{\partial T}\right|_{T_0} = \sum\left(\left.\frac{\partial D/D}{\partial x/x}\right|_{x_0} \times \left.\frac{\partial x/x}{\partial T}\right|_{T_0}\right) \quad (5)$$

Table 3 Comparison of sensitivities w.r.t. temperature

	$\left.\frac{\partial D/D}{\partial x/x}\right\|_{x_0} \times \left.\frac{\partial x/x}{\partial T}\right\|_{T_0}$ (%/°C)		
	RES	**S-RSP**	**P-RSP**
Y_b	0.0179	-0.0147	-0.0259
$Y^E_{p,ij}$	0.125	-0.0212	0.0373
d_{31}	0.0403	0.0207	0.00909
ε_3^T	-0.142	-0.443	-0.303
R	0.0000239	-0.000700	0.000209
L	-	-0.00806	-0.00667
Summation	**0.0413**	**-0.466**	**-0.289**

5. 결 론

본 논문에서는 매개변수에 대한 압전 분기 감쇠기의 감쇠 성능 민감도 데이터베이스를 확보하였고, 이를 바탕으로 온도 변화에 대한 민감도를 계산하였다. 그 결과, 온도 변화에 가장 민감한 요인은 압전재료의 유전률 ε_3^T이며 P-RSP가 S-RSP보다 온도에 더 강건감함을 확인하였다. 본 논문의 분석 결과는 압전 분기 감쇠기의 적용 환경을 고려하여 수동 방식의 도입 여부와 분기 회로 종류의 적합성 등의 판별에 기여할 수 있다.

후 기

"본 논문은 국방광역감시 특화연구센터 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다."

참고문헌

(1) Hagood, N. W. and von Flotow, A., "Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical network, *Journal of Sound and Vibration*," Vol.14, No.2, pp.243-268, 1991.

(2) Wu, S.-Y., "Piezoelectric shunts with a parallel R-L circuit for structural damping and vibration control," *Proceedings of SPIE*, Vol.2720, pp.259-269, 1996.

(3) Park, C. H. and Inman, D. J., "A uniform model for series R-L and parallel R-L shunt Circuits and power consumption," *Proceedings of SPIE*, Vol.3668, pp.797-804, 1999.

(4) Niederberger, D., "Smart Damping Materials using Shunt Control," dissertation, department of electrical engineering, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2005.

(5) de Marneffe, B., "Active and Passive Vibration Isolation and Damping via Shunted Transducers," dissertation, department of mechanical engineering and robotics, Université Libre de Bruxelles, 2007.