

# 외부 회로에 연결된 압전 세라믹을 이용한 복합재 평판의 수동 감쇠 개선

Passive Damping Enhancement of Composite Plate Using Piezo Ceramic Connected to External Electrical Networks

김도형\*, 양승만, 한재홍, 이 인(한국과학기술원)

## 1. 서론

복합재료는 높은 비강도 및 비강성 특성으로 인해 항공우주 분야를 비롯하여 여러 산업 분야에 점차로 사용이 확대되어 가고 있다. 그러나 경량화에 수반되는 진동 문제로 인해 수동 및 능동적 방법을 통한 진동 제어 문제가 근래에 연구 관심이 되고 있다. 최근 기계적 에너지와 전기적 에너지를 상호 변환시킬 수 있는 압전 재료 (piezoelectric material) 를 이용한 능동 진동 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나[1], 이러한 능동 제어를 위해서는 감지기, 제어기, 동력 장치 등 복잡한 주변 기기들이 필요함으로 실제 응용에 어려움이 있다.

그러므로, 압전 재료를 이용한 수동 감쇠 기법에 관해서도 활발히 연구가 이루어지고 있다. Forward 와 Swigert[2]는 구조물에 부착 또는 삽입된 압전 재료에 간단한 외부 회로 (shunt 회로) 를 연결하여 구조물의 감쇠를 크게 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다. Hagood 와 von Flotow[3]는 보 구조물을 대상으로 압전 재료를 이용한 수동 감쇠 기법에 대한 이론 및 실험 결과를 발표하였다. 양승만 등[4]은 복합재 보 구조물을 대상으로 압전 재료를 이용한 수동 감쇠 결과를 발표하였다. Hollkamp[5]는 보 시편에 다중 LRC (Inductor - Resistor - Capacitor) 회로를 연결하여 하나의 압전 재료로 다중 모드의 진동 제어가 가능함을 보였다. Aldrich 등[6]은 수동 감쇠 개념을 실제 우주 구조물에 적용하려는 연구를 수행

하였다.

본 연구에서는 참고 문헌[4]의 결과를 확장하여, 복합재 평판 구조에 대한 감쇠 개선에 관한 연구를 수행하였다. 독립적으로 구성된 두 개의 셉트 회로에 연결된 압전 재료를 사용하여 복합재 평판 구조물의 첫 번째 굽힘 모드와 첫 번째 비틀림 모드에 대한 동시 진동 제어 실험을 수행하였다. 본 논문의 2 절에는 이론적 배경, 3 절에는 실험 방법 및 결과, 4 절에는 결론을 각각 정리하였다.

## 2. 압전재료의 전기/기계적 특성

개회로 상태의 압전재료의 기계적/전기적 연계 특성을 기술하는 구성 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^T & \mathbf{d} \\ \mathbf{d}' & \mathbf{s}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{T}$ 는 각각 전기적 변위 (단위 면적 당 전하량), 전기장(단위 길이 당 전위차), 변형률, 응력이며,  $\mathbf{d}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}$ ,  $\mathbf{s}$ 는 각각 압전 상수, 전기적 유전 상수, 기계적 컴플라이언스이다. 위첨자는 해당 물리량이 고정된 상태에서 측정된 것을 뜻하며, (')는 전치 행렬 연산자이다. 식 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}^D(s) & s\mathbf{Ad} \\ \mathbf{d}'\mathbf{L}^{-1} & \mathbf{s}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{V}$ 는 각각 전류, 전압이며,

$Y^D(s)$ 는 기계적 구속이 없고 전기적 개회로 상태의 압전재료의 전기적 어드미턴스,  $A$ 는 압전재료 단면적의 대각 행렬,  $L$ 은 압전재료의 길이를 나타내는 대각 행렬,  $s$ 는 라플라스 변수이다. Fig. 1과 같이 외부 셉트 회로와 연결된 압전재료의 경우 외부 회로의 어드미턴스 값이 추가된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{EL}(s) & s\mathbf{A}\mathbf{d} \\ \mathbf{d}'\mathbf{L}^{-1} & \mathbf{s}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{Y}^{EL}(s) = \mathbf{Y}^D + \mathbf{Y}^{SU}$ . 식 (3)을 정리하면 변형률  $\mathbf{S}$ 를 응력 및 전류의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= [\mathbf{s}^E - \mathbf{d}'\mathbf{L}^{-1}\mathbf{Z}^{EL}s\mathbf{A}\mathbf{d}]\mathbf{T} \\ &\quad + [\mathbf{d}'\mathbf{L}^{-1}\mathbf{Z}^{EL}]\mathbf{I} \\ &= \mathbf{s}^{SU}\mathbf{T} + [\mathbf{d}'\mathbf{L}^{-1}\mathbf{Z}^{EL}]\mathbf{I} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)는 셉트 회로에 연결된 압전재료의 지배 방정식이다. 즉 원래 개회로 상태의 기계적 컴플라이언스  $\mathbf{s}^E$ 가 셉트 회로의 영향으로 인해  $\mathbf{s}^{SU}$ 로 변화하였다. 수동 감쇠의 기본 배경은 우리가 쉽게 조절 가능한 셉트 회로의 전기적 임피던스  $\mathbf{Z}^{EL}(s)$ 를 조절하여 압전재료의 기계적 특성  $\mathbf{s}^{SU}(s)$ 를 주파수 영역에서 원하는 방식으로 변환시키는 것이다. 식 (4)와 압전 상수들간의 상호 관계를 이용하면 무차원화된 기계적 임피던스를 얻는다.

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{ij}^{ME}(s) &= Z_{ij}^{SU}(s) / Z_{ij}^D(s) \\ &= \frac{(1 - k_{ij}^2)}{[1 - k_{ij}^2 \bar{Z}_i^{EL}(s)]} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\bar{Z}^{EL} = Z^{EL} / Z^D$ ,  $k_{ij}$ 는 압전재료의 연계 상수 (coupling factor)로 기계적 에너지와 전기적 에너지의 변환 효율을 나타낸다. 본 연구에서는 셉트 회로로 두 가지 형태를 고려하였다. 우선 셉트 회로가 저항 하나로 이루어진 경우를 RES (Resistive Shunting)로, 셉트

회로가 저항과 인덕터가 직렬로 연결된 경우를 RSP (Resonant circuit Shunting)로 표기하기로 한다. RES의 경우에는 그 경향이 점탄성 물질의 거동과 유사하며, RSP의 경우에는 Proof Mass Damper의 거동과 유사하다. RES의 경우 기계적 임피던스는 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$\bar{Z}_{ij}^{RES}(\omega) = 1 - k_{ij}^2 / (1 + i\rho_i) \quad (6)$$

여기서  $\rho_i = R_i C_{pi}^S \omega = \omega / \omega_d$ ,  $R$ 은 셉트 회로 저항,  $C_{pi}^S$ 는 고정 조건에서 압전재료의 커패시턴스이며,  $\rho_i$ 는 무차원화된 저항/진동수 값이다. RSP의 경우 기계적 임피던스는 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$\bar{Z}_{ij}^{RSP}(s) = 1 - k_{ij}^2 \left( \frac{\delta^2}{\gamma^2 + \delta^2 r \gamma + \delta^2} \right) \quad (7)$$

여기서  $\gamma = \omega / \omega_n^E$ 는 무차원 진동수,  $r = RC_p^S \omega_n^E$ 는 전기적 감쇠비이며,  $\delta = 1 / \omega_n^E \sqrt{LC_p^S}$ 는 무차원 조절 계수이다.

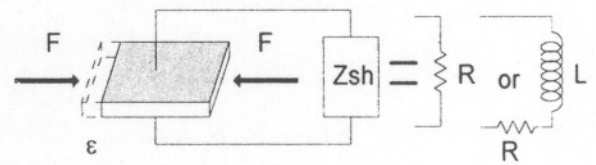


Fig. 1 Piezoelectric material with shunting network.

### 3. 실험 방법 및 결과

Gr/Epoxy 복합재료를  $[0^\circ / \pm 45^\circ / 90^\circ]_s$ 로 적층 성형한 후 절단하여 평판 시편을 얻었다. Fig. 2와 같이 보의 고정단 부근에 좌우 대칭으로 Fuji C-82 압전 세라믹을 부착한 후 전압이 가해질 때 굽힘 모멘트가 발생하도록 전극을 상호 연결하였다. Fig. 3과 같이 가진원으로 가격 망치, 측정 센서로 레이저 변위계를 이용한 모달 테스트 장치를 구성하였다. 모달

테스팅을 통해 압전재료가 각각 개회로 조건 일 때와 폐회로 조건일 때의 고유진동수를 구하였다. 2절에서는 구조물에 부착되어 있지 않은 압전 재료에 대해 설명하였으므로 연계 상수  $k_{ij}$ 가 물질 자체의 특성이나, Fig. 2의 시편과 같이 구조물에 부착된 경우의 연계 상수는 시스템의 특성이 되며 각 모드에 따라 다르다. 구성한 시스템의 각 모드에 대한 연계 상수는 개회로 상태 고유진동수  $\omega_n^D$  및 폐회로 상태 고유진동수  $\omega_n^E$ 를 측정하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{31}^2 = \frac{(\omega_{n1}^D)^2 - (\omega_{n1}^E)^2}{(\omega_{n1}^E)^2} \quad (7a)$$

$$K_{32}^2 = \frac{(\omega_{n2}^D)^2 - (\omega_{n2}^E)^2}{(\omega_{n2}^E)^2} \quad (7b)$$

먼저 RES 회로를 구성한 후 저항 값을 바꾸어 가면서 모달 테스팅을 수행하여 각 경우의 감쇠비를 구하였다. Fig. 4에 RES로 인해 추가된 감쇠비를 도시하였고 Table 1에 polynomial fitting으로 얻은 감쇠비를 정리하였다. 실선은 이론치이며, 각 점은 실험으로 구한 감쇠비인데 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 경우 처음 두 모드에 대한 자체 감쇠비가 0.26%, 0.21% 이므로 저항값을 잘 조절하면 자체 감쇠의 약 80%, 55%에 해당하는 추가 감쇠를 얻을 수 있었다.

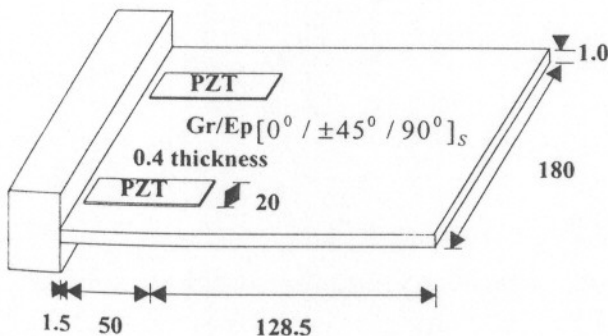


Fig. 2 Configuration and dimensions of the test specimen.

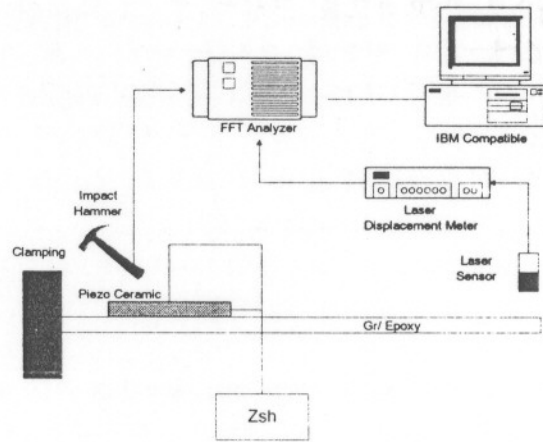


Fig. 3 Overall experimental setup.

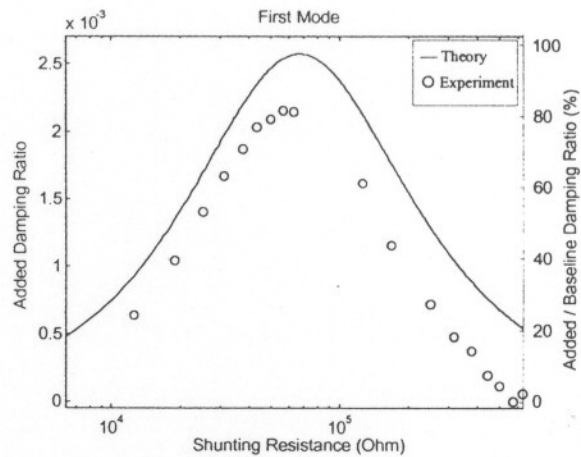


Fig. 4a Added damping ratio when RES is applied. ( 1st mode )

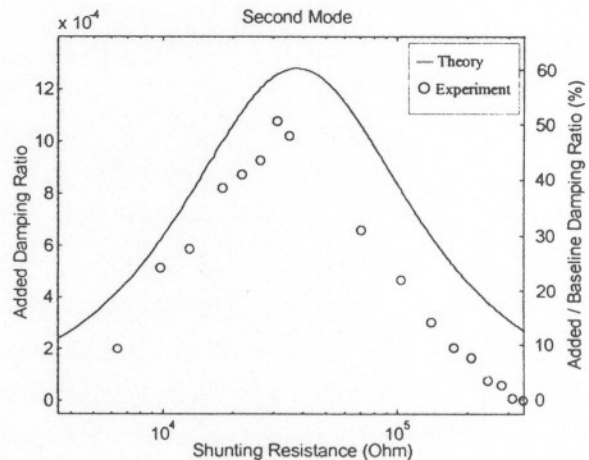


Fig. 4b Added damping ratio when RES is applied. ( 2nd mode )

다음으로 RSP 회로를 구성한 후 고정된 인덕터 값에 대해 저항의 크기를 바꾸어 가면서 구한 시스템의 주파수 응답 함수를 Fig. 5와 Fig. 6에 정리하였다. Fig. 5는 단일 모드에 대한 결과이고 Fig. 6은 두개 모드를 동시에 제어한 실험 결과이다. Fig.6에서 (1)은 두개 모드에 대해 최적의 효과를 나타내도록 저항과 인덕터의 값을 조절한 결과이고, (2)는 단일 모드 제어에서 최적의 값을 갖는 저항과 인덕터를 사용한 경우이고, (3)은 개회로 상태의 결과이다. polynomial fitting으로 얻은 감쇠비를 Table 2에 정리하였다. 단일 모드 제어에서 저항과 인덕터의 값이 최적으로 조절된 경우 각각 자체 감쇠의 약 23 배(1st), 17 배(2nd)에 해당하는 추가 감쇠를 얻을 수 있었다. 다중 모드에 대해서도 10 배 이상의 추가 감쇠를 얻을 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 셉트 회로에 연결된 압전 세라믹을 복합재 평판에 부착하여 수동 감쇠를 증가시키는 연구를 수행하였다. RES 및 RSP 회로를 구성한 후 실험을 통해 회로를 조절한 결과 각각 자체 감쇠의 약 55%와 1000% 이상에 해당하는 추가 감쇠를 얻을 수 있었다. 뿐만 아니라 개별적으로 특정 모드에서 작동하는 두개의 셉트 회로에 연결된 압전 세라믹을 이용한 실험에서 다중 모드에 대해서도 RSP의 경우 개별적인 감쇠 개선에서의 효과를 동시에 얻을 수 있었다. 그러므로 RSP 회로의 경우 억제하고자 하는 모드에 대해 각각의 압전 세라믹과 외부 회로를 설계하면 여러 모드에 대해 아주 효과적으로 감쇠를 개선할 수 있다. 본 방법은 압전재료를 이용한 능동 진동 제어에 비해 추가되는 외부 기기들이 없으므로 우주 구조물을 비롯한 실제 구조물에 효율적으로 사용되리라 기대된다.

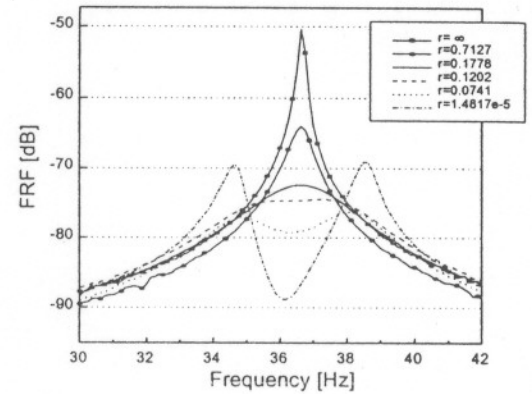


Fig. 5a FRF with various resistance (1st mode RSP).

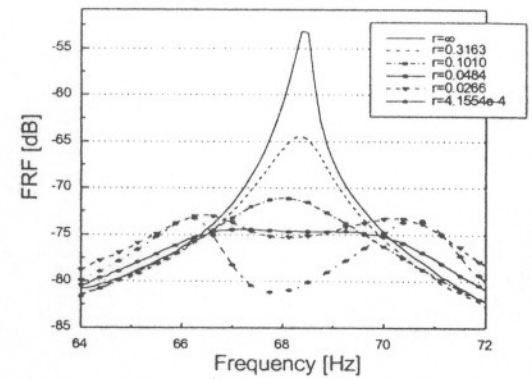


Fig. 5b FRF with various resistance (2nd mode RSP).

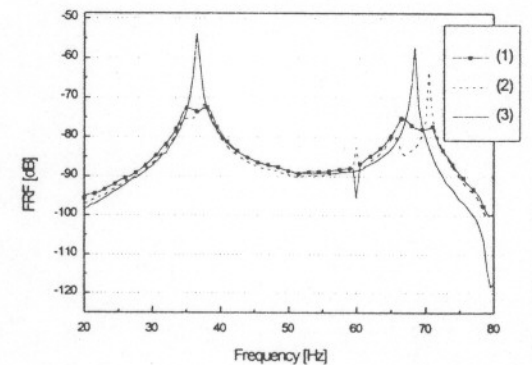


Fig. 6 Simultaneous vibration suppression using RSP (1st and 2nd mode).

Table 1 Frequency & Damping ratio with RES.

1st mode			2nd mode		
R [kΩ]	Freq. [Hz]	ζ (×10 <sup>-3</sup> )	R [kΩ]	Freq. [Hz]	ζ (×10 <sup>-3</sup> )
6.32	36.441	2.53376	3.29	67.260	2.19848
12.58	36.443	3.26265	6.39	67.313	2.31734
18.93	36.450	3.66632	9.77	67.314	2.63222
25.31	36.463	4.03114	13.07	67.330	2.70358
31.32	36.472	4.29740	18.11	67.353	2.93908
37.8	36.486	4.49407	21.92	67.340	2.98824
43.8	36.497	4.66143	26.45	67.350	3.04377
50.3	36.511	4.71538	31.33	67.371	3.19504
57.0	36.521	4.77961	35.23	67.335	3.13839
63.0	36.531	4.77391	70.4	67.386	2.77555
126.3	36.588	4.23664	104.9	67.403	2.58618
169.2	36.605	3.78223	140.8	67.396	2.42023
250.0	36.612	3.34630	177.2	67.386	2.32356
315.1	36.617	3.10002	209.4	67.384	2.28219
379.0	36.615	2.99453	245.2	67.375	2.19578
441.0	36.618	2.82180	281.0	67.363	2.17815
500.0	36.620	2.73521	314.9	67.342	2.12721
570.0	36.620	2.62871	350.4	67.328	2.11875

후 기

본 연구는 한국과학재단 지원으로 수행된 연구(과제 번호: 96-0200-05-01-3)의 일부이며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 류근호, 한재홍, 이인, "압전 감지기/작동기 물 이용한 복합재 평판의 최적 진동 제어 실험" 한국소음진동공학회지, 제 7권, 제 1호, pp. 161-168, 1997.
2. R.L. Forward and C.J. Swigert, "Electronic Damping of Orthogonal Bending Modes in a Cylindrical Mast - Theory," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 18, pp. 5-10, 1981.

Table 2 Frequency & Damping ratio with RSP.

Mode	L [H]	R[kΩ]	Freq.[Hz]	ζ(×10 <sup>-2</sup> )
1st	267.724	0.001	34.573	0.986518
			38.423	0.907893
		5.0	34.855	2.983
			38.172	2.902
		8.11	36.668	5.040
		12.0	36.650	3.640
∞	36.617	0.950497		
	36.652	0.211067		
2nd	80.6687	0.0157	66.183	1.191
			70.496	1.199
		1.005	66.470	1.959
			70.308	1.772
		1.829	68.241	3.559
		3.817	68.052	1.959
		11.95	68.327	0.784693
		∞	68.409	0.201337
Simul-taneous	open	1st	36.633	0.236034
		2nd	68.473	0.213570
	L <sub>1</sub> =267.724 R <sub>1</sub> =8.11	1st	35.035	3.975
			37.737	2.056
	L <sub>2</sub> =80.668 R <sub>2</sub> =1.829	2nd	65.593	1.618
			70.322	0.171166
	L <sub>1</sub> =256.10 R <sub>1</sub> =8.46	1st	35.359	3.484
			37.877	2.344
	L <sub>2</sub> =75.585 R <sub>2</sub> =3.356	2nd	66.895	2.037
			70.797	1.452

3. N.W. Hagood and A. von Flotow, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks," Journal of Sound and Vibration, Vol. 146, No. 2, pp. 243-268, 1991.

4. 양승만, 김도형, 한재홍, 이인, "외부 회로가 연결된 압전 세라믹을 이용한 복합재 보의 감쇠 개선," 한국복합재료학회 춘계학술발표회, pp. 123-127, 1997.

5. J.J. Hollkamp, "Multimodal Passive Vibration Supression with Piezoelectrics," SDM Paper 93-1683-CP, 1993.

6. J.B. Aldrich, N.W. Hagood, A. von Flotow, and D.W. Vos, "Design of Passive Piezoelectric Damping for Space Structures," SPIE vol. 1917, pp. 692-705, 1993.

창립 30주년 기념

1997年度

# 秋季 學術發表會 論文集

Proceedings of the KSAS Fall Annual Meeting '97

日時：1997年 11月 15日(土)

場所：서울大學 校新工學館



主催：韓國航空宇宙學會

後援：韓國科學技術團體總聯合會

協贊：三星航空·大宇重工業·大韓航空

- 통합적 시스템 식별을 이용한 복합재 평판의 최적 진동제어에 대한 실험적 연구 ..... 류근호\*, 한재홍, 이 인(한국과학기술원)···137
- 외부 회로에 연결된 압전 세라믹을 이용한 복합재 평판의 수동 감쇠 개선 ..... 김도형\*, 양승만, 한재홍, 이 인(한국과학기술원)···141

좌장 : 유흥희(한양대학교)

- 벌칙구속기법에 의한 부구조물 조합의 연성 유한요소 해석 ..... 김원배\*, 조맹효(인하대학교)···146
- 셀해석을 위한 효과적인 12절점 혼합 삼각형 요소의 개발 ..... 김종훈\*, 김용협(서울대학교)···153
- 강제운동을 하는 집중질량을 가진 탄성평판의 동적 해석 ..... 유재곤\*, 유흥희(한양대학교)···158

<b>제3발표장</b>	좌장 : 배충식(충남대학교)
--------------	-----------------

- LRE(질산/케로신) 연소시 발생하는 소음특성에 관한 실험적 연구 ..... 조병선\*, 김 유, 지평삼, 박희호(충남대학교)···167
- 체적팽창이 예혼합 화염 전파에 미치는 효과 ..... 정의현\*, 권세진(한국과학기술원)···173
- Unlike 충돌형 Triplet 인젝터의 혼합성능에 관한 연구 ..... 이경희\*, 차영란, 강경택, 김 유(충남대학교)···178
- 인공위성 자세 및 궤도 제어용 1 파운드급 단일 추진제 추력기 개발 ..... 이성택, 장기원, 이상희, 최영중, 류정호\*(한 화)···186

좌장 : 이대성(한국항공우주연구소)

- 수소-공기 확산 화염에서의 질소산화물 저감에 대한 실험적 연구 ..... 김승한\*, 윤영빈, 정인석(서울대학교)···190
- HSNS(High Shear Nozzle/Swirl)스왈러 실험연구 ..... 최성만\*(삼성항공엔진연구소), 민성기(국방과학연구소)···195
- 관형 연소기에서의 능동적 소음 제어에 대한 모의 실험연구 ..... 이용석\*, 조상연, 이수갑(서울대학교)···201
- 열진공챔버의 열환경제어를 위한 수치적 모사에 관한 연구 ..... 김지영\*, 이동호, 이수갑(서울대학교), 최석원, 최준민(한국항공우주연구소)···205