한국소음진동공학회 2003년도 추계학술대회논문집, pp. 446~451.

압전 작동기를 이용한 유체 유기 진동의 능동 제어

Active Control of Flow-Induced Vibration Using Piezoelectric Actuators

한재흥*

Jae-Hung Han

Key Words : Active control(능동 제어), Piezoelectric actuator(압전 작동기), Flow-induced vibration(유체 유기 진동), Smart structure(지능 구조)

ABSTRACT

This paper presents some examples of active control of flow-induced vibration using piezoelectric actuators. The flutter phenomenon, which is the dynamic instability of structure due to mutual interaction among inertia, stiffness, and aerodynamic forces, may cause catastrophic structural failure, and therefore the active flutter suppression is one of the main objectives of the aeroelastic control. Active flutter control has been numerically and experimentally studied for swept-back lifting surfaces using piezoelectric actuation. A finite element method, a panel aerodynamic method, and the minimum state space realization are involved in the development of the governing equation, which is efficiently used for the analysis of the system and design of control laws with modern control framework. The active control suppressed flow-induced vibrations and extended the flutter speed around by 10%. Another representative flow-induced vibration phenomenon is the oscillation of blunt bodies due to the vortex shedding. In general, it is quite difficult to set up the numerical model because of the strong non-linearity of the vortex shedding structure. Therefore, we applied adaptive positive position feedback controller, which requires no pre-determined model of the plant, and successfully suppressed the flow-induced vibration.

1. 서 론

지구 상의 자연적 혹은 인공의 구조물들은 그 주위의 흐름과 상호 작용하여 진동 현상을 보이는데, 올 여름 태풍 매미에 의한 극심한 피해에서 볼 수 있듯이 경우에 따라 구조물의 성능 저하 및 파손을 유발하기도 한다. 그러므로, 유체/구조 연계 시스템의 진동 안정화 및 제어 기술은 다분야 복합 기술 분야로 다양한 공학적 불안정 진동 현상을 정밀한 컴퓨터 수치 해석 및 가시화를 통해 분석하고, 보다 안정적인 구조물을 확보하는 데 목적이 있다.[1] 대부분의 경우 구조물의 동특성을 파악하고, 구조 변경을 통해 수동적으로 안정성을 증대 시키는 방법들이 사용되고 있으나, 재료, 제어 등 관련 기술이 발달함에 따라 능동 제어 기법을 유체 유발 진동 억제에 사용하려는 시도가 최근 각광을 받고 있다.[1,2]

특히 지능 재료(smart materials)를 이용한 구조물의 진동 제어에 관한 연구는 꾸준히 증가하고 있으며, 지능 구조물의 여러 기능들을 실현하기 위해서 기능성 재료와 지능 구조물들의 특성에 대한 많은 연구가 이루어 지고 있다.[3,4] 여러 가지 기능성 재료들 중에서 압전 재료는 간단한 구동 메커니즘, 빠른 응답, 구조물과의 집합성 등 여러 가지 우수한 성질때문에 유망한 작동기로서 관심을 끌고 있다. 센서로는 가속도계나 스트레인 게이지 등 기존 센서 류 외에도 구조물 내부에 삽입 또는 표면에 부착하기 쉽고, 작동 온도 범위가 높으며 직경이 작고 유연하여 원하는 크기의 센서를

* 한국과학기술원 항공우주공학전공
E-mail: jaehunghan@kaist.ac.kr
Tel: (042) 869-3723, Fax: (042) 869-3710

제작하기 용이한 광섬유 센서도 많이 연구되고 있는 추세이다.[5,6] 본 논문에서는 유체 유기 진동의 대표적인 2 가지 유형인 플러터와 와류 유발 진동에 대해 압전 작동기를 이용한 능동 진동 제어를 적용한 사례를 소개하고자 한다. 각 현상에 대한 간단한 소개와 모델링, 실험 장치의 구성 및 실험 결과를 제시하였다.

2. 조종면의 플러터 제어

2.1 플러터 제어 연구 현황

플러터 현상은 구조물의 관성력 및 탄성력, 그리고 구조에 작용하는 공기력의 상호 작용에 의해 어느 일정 속도(플러터 임계 속도) 이상의 유동 흐름에서 나타나는 구조물의 동적 불안정성을 일컫는다. 항공기나 미사일 등 비행체 뿐 아니라 교량 등 토목 구조물, 광 디스크 등 전자 부품과 같이 다양한 분야에서 플러터가 발생된다. 항공 분야의 대표적인 플러터 능동 제어에 대한 연구는 NASA Langley 연구 센터의 AFW (Active Flexible Wing), BACT (Benchmark Active Control Technology), PARTI (Piezoelectric Aeroelastic Response Tailoring Investigation) 프로그램 등을 들 수 있다.[7-9] 본 논문에서는 저자가 일본 동북대 유체과학연구소에서 수행한 후퇴각이 있는 평판 조종면의 플러터 제어 풍동 시험에 관해 소개하고자 한다.

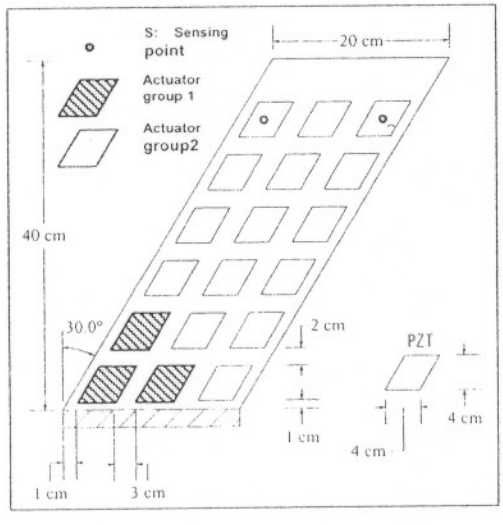


Fig. 1 Configuration of the test model (a swept-back cantilevered plate with surface-bonded PZT's).

2.2 실험 모델

실험 모델은 Fig.1 에 보인 바와 같이 후퇴각이 있는 외팔 평판이며 재질은 알루미늄 (E = 68.6 Gpa, G = 25.5 Gpa, ρ = 2700 Kg/m^3) 이다. 평판 양면에 18 개의 압전 작동기(Fuji Ceramics® C-91; E = 59 Gpa, G = 21.5Gpa, ρ = 7750 Kg/m^3, d = -330×10^{-12} m/V, thickness: 0.2 mm)를 대칭적으로 부착하였다. 풍동 실험은 Fig. 2 와 같이 동북대의 저난류 아음속 풍동에서 시험 영역을 open section 으로 하여 수행하였고, 두 대의 레이저 변위 센서와 DSP 제어기를 이용하였다.

플러터 억제를 위한 제어기 설계를 위해서는 정확한 수학 모델이 필요한 데, 구조의 동특성 및 압전 재료의 작동 특성은 유한 요소 해석을 통해 구하였으며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$[\underline{M}]\{\ddot{\eta}\}+[\underline{D}]\{\dot{\eta}\}+[\underline{K}]\{\eta\}=\sum_{L=1}^{M}\{\underline{F_L}\}V_L(t) \tag{1}$$

식 (1)의 우변항은 압전 작동기에 작용하는 전압 (V_L)에 의한 일반력을 뜻한다. 공력 특성은 DLM (Doublet Lattice Method)를 이용하여, 일반화된 공기력과 모드 좌표 간의 관계를 식 (2)와 같은 형태로 구하였다.

$$\{\underline{F}\}=q[\underline{Q}(k,M)]\{\eta\} \tag{2}$$

여기서, q, k, M은 각각 동압(dynamic pressure), 환산 진동수, 마하 수를 나타내고, $[\underline{Q}(k,M)]$는 비행 조건과 환산 진동수의 복소 함수인 일반화된 공력 행렬(aerodynamic influence coefficient)이다. 주어진 마하수와 밀도에서 $[\underline{Q}(k,M)]$ 는 여러 환산 진동수에서 계산되는 데, 이를 연속적인 주파수 영역에서 표현하기 위해, Karpel[10] 의 최소 상태법을 이용 식 (3)과 같이 근사화한다.

$$[\tilde{Q}(p)]=[A_0]+[A_1]p+[A_2]p^2+[D](p[I]-[R])^{-1}[E]p \tag{3}$$

여기서 p 는 무차원화된 라플라스 변수이고, 나머지 행렬들을 최적화 과정을 통해 결정된다. (1)~(3) 식을 종합하면, 실험 모델의 지배 방정식을 얻을 수 있는 데, 이를 상태 변수 방정식 형태로 표시하면 식 (4)와 같다.

$$\{\dot{x}\}=[A]\{x\}+[B]\{u\} \tag{4}$$

여기서 상태 변수 {x}는 모드 변위 및 속도 그리고 공기력 상태를 포함하며, 시스템 행렬 [A]는

모든 공력 효과, 즉 겉보기 질량(apparent mass), 공력 강성 및 감쇠 항을 포함하며, 외부 유동 속도의 함수이다. 제어력 {u}는 압전 작동기들에 작용하는 전압을 뜻한다. 관심 영역 (플러터 발생 영역)을 묘사하기 위한 일련의 수치 모델을 검토하여 최종적으로 5 개의 구조 변위와 3 개의 공력 극점을 사용하였다.

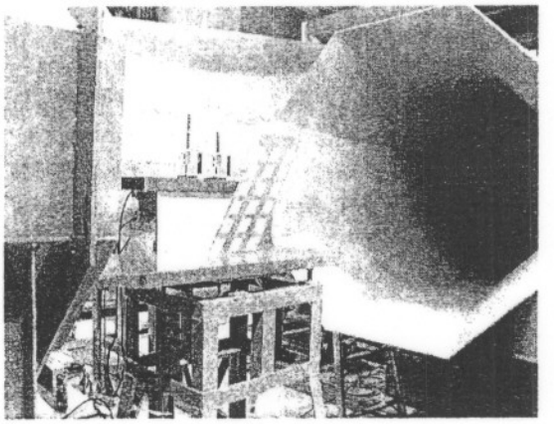


Fig. 2 Wind tunnel test set up.

2.3 압전 작동기 배치 및 제어기 설계

플러터 억제 문제를 제어기 설계 관점에서 살펴보면, 외란 억제(disturbance rejection) 문제로 간주할 수 있는 데, 외란(여기서는 공기의 교란)에 의해 가진되는 모드와 제어에 사용하려는 작동기가 영향을 주는 모드가 서로 유사하여야 효율적인 제어 시스템이 구성된다. 시험 시편에 부착한 18 개의 작동기를 독립적으로 사용하지 않고, 2 개의 그룹으로 활용하여 제어 입력의 개수를 2 개로 줄이는 과정에서 유전자 알고리즘을 이용한 최적화[11]를 통해 Fig. 1 과 같은 작동기의 패턴을 얻었다.

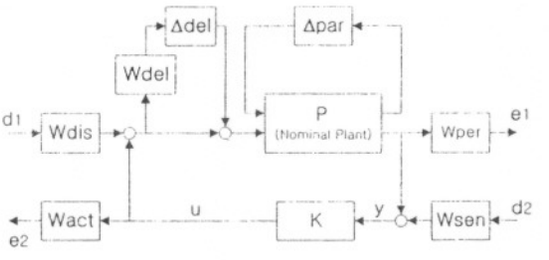


Fig. 3 Block-diagram for the robust controller design.

여러 가지 제어 기법을 이용하여 제어기를 설계하여 시험하였으며, 시스템의 수학 모델은 속도 16.5 m/sec 일 때를 선택하였는데, 이는 비제어시의 플러터 임계 속도 17.1 m/sec 에 매우 근접한 값이다. H_2 제어기는 전형적인 LQG (Linear Quadratic Gaussian) 제어기 설계 기법을 따랐고, 강인 제어 기법 중 $H\infty$ 및 μ 종합화 (synthesis) 설계 기법을 도입하였는데, 이를 위해 Fig. 3 과 같은 블록도를 구성하고, 각종 가중 함수 (weighting function)를 적절히 선정하였다. 플러터 모드의 경우 주파수는 크게 변화하지 않으면서 감쇠비가 급격히 변화하는 양성을 보이는데, 이를 Parametric 한 시스템의 불확실성으로 모델링하여 μ 제어기 설계 시에 반영하였다. 여기서는 자세한 제어기 설계 과정은 생략하기로 한다.

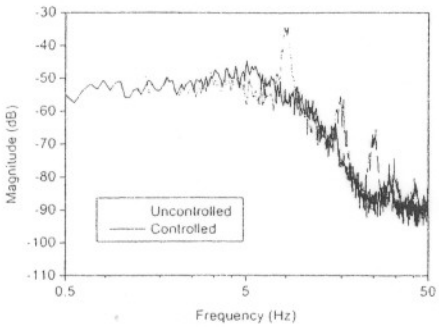
2.4 결과

Fig. 4.5 는 대표적인 플러터 제어 결과를 보여주는 데, 센서 1 의 출력을 파워 스펙트럼으로 나타낸 것이다. 비제어 시스템의 플러터 속도보다 약간 낮은 17.0 m/sec 속도에서는 H_2 와 μ 제어기 공히 플러터 모드를 잘 억제하고 있음을 알 수 있다. 또한 플러터 모드의 2, 3 배 하모닉 성분도 관찰되는 데, 플러터 모드를 제어하면 함께 제어됨을 알 수 있다. 그러나, Fig. 5 에서 보듯 제어기 설계 속도보다 상당히 낮은 10.0 m/sec 속도에서는 H_2 제어기의 경우 또 다른 불안정한 모드를 유발함을 알 수 있는 데, 유속에 따른 시스템 특성 변화에 기인한다. 반면, μ 제어기는 이 속도에서도 효율적으로 진동을 억제함을 볼 수 있다. Table 1 에서는 제어에 의한 플러터 임계 속도의 증가 추이를 요약하였다.

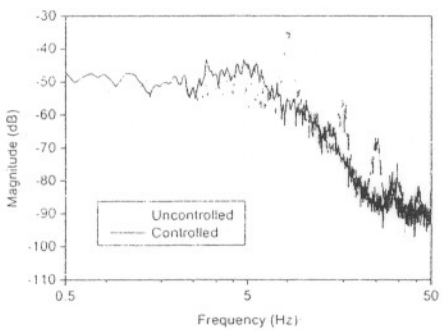
Table 1 Block-diagram for the robust controller design.

Open /Closed	Method	Flutter Speed (m/sec)	% Improve -ment*
Open Loop	Analysis (V-g)	15.1	
	Analysis (Laplace)	16.6	
	Experiment	17.1	
Closed Loop (Experiment)	SISO LQG	18.2	6.4%
	SISO μ-design	18.2	6.4%
	MIMO LQG	18.8	9.9%
	MIMO μ-design	19.0	11.1%

* With respect to the experimental open loop flutter speed.

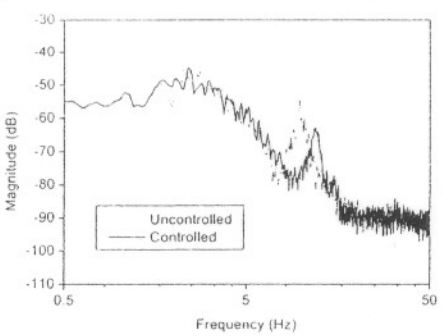


(a) H_2 control

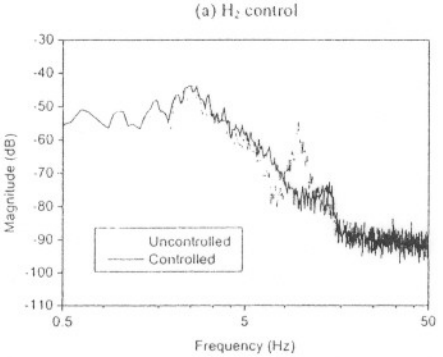


(b) μ control

Fig. 4 Control results at the flow velocity 17.0m/sec.



(a) H_2 control



(b) μ control

Fig. 5 Control results at the flow velocity 10.0m/sec.

3. 와류 유발 진동 제어

3.1 실험 모델

아음속(subsonic flow)에서 구조물은 와류(vortices)를 유발하고, 이러한 vortex street wake 는 구조물의 형상에 관계없이 유사한 형태로 나타난다. Fig. 1 은 레이놀즈수(Re)에 따른 실린더 주위를 지나는 유동의 모습을 나타낸 것이다.[1]

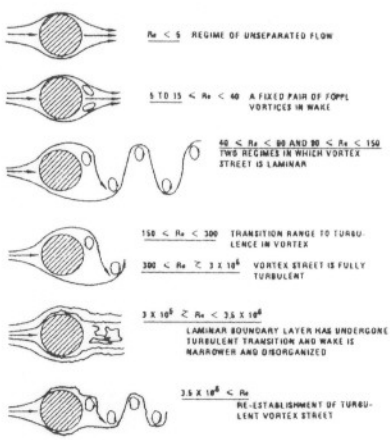


Fig. 6 Regimes of fluid flow across smooth circular cylinder (Lienhard, 1966).

본 연구에서 사용한 실험 모델은 Fig. 7 과 같이 그래파이트/에폭시 복합재 외팔보에 Fuji ceramics 사의 C-82 압전 작동기를 표면에 부착하고, 와류 흘림을 일으키기 위한 실린더를 시편 끝단에 고정하여 구성하였다. 물성치와 재원은 다음과 같다.

E_1 =119 Gpa,
E_2 =8.67 Gpa,
G_{12} =5.18 Gpa,
ν_{12} = 0.31,
thickness = 0.125 mm,
lay-up : $[0_7/90_2]_s$,
ρ=1550 kg/m^3,
실린더 질량 = 26.6819 g

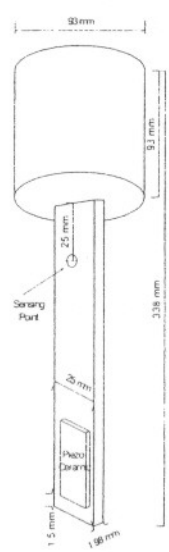


Fig. 7 Composite beam with cylinder.

3.2 제어기 설계 및 결과

제어기는 수학 모델을 사용하지 않는 적응형 제어기 중 하나인 Adaptive PPF 제어기법을 이용하여 구성하였다.[12] 풍동 실험은 한국과학기술원 항공우주공학과 풍동에서 수행되었다. 전체 실험 구성도는 Fig. 8 에 나타난 것과 같다. 풍속을 8.5 m/s ~ 11.0 m/s 범위 내에서 변화시키며 제어 실험을 수행하였다.

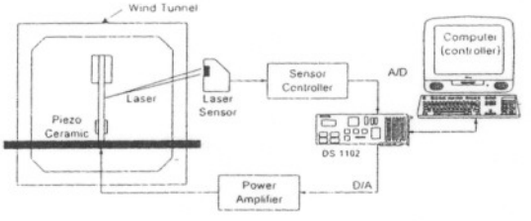


Fig. 8 Wind tunnel setup for vortex-induced vibration control.

풍속을 8.5 m/s ~ 11.0 m/s 범위에서 0.5 m/s 씩 변화시키며 실험한 결과 9.5 m/s 인 경우에는 와류 흘림에 의한 진동이 나타나지만, 그 외의 속도영역에서는 규칙적인 조화 진동이 발생하지 않는 것을 확인하였다. Fig. 9 는 풍속이 9.5 m/s 인 경우 제어기 사용 유무에 따른 파워 스펙트럼을 나타낸다. PPF 제어기를 사용함으로써 25 dB 이상의 진동 저감 효과를 얻을 수 있었다. Adaptive PPF 의 경우 풍속 9.5 m/s 에서 시간 영역에서의 제어 성능을 Fig. 10 에 나타내었다. 실시간 주파수 추정을 통해 구현되는 제어기로 진동이 저감됨을 살펴볼 수 있다.

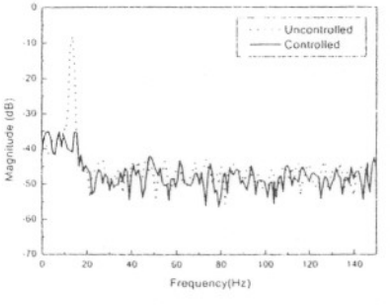


Fig. 9 Control result in wind tunnel test (power spectrum).

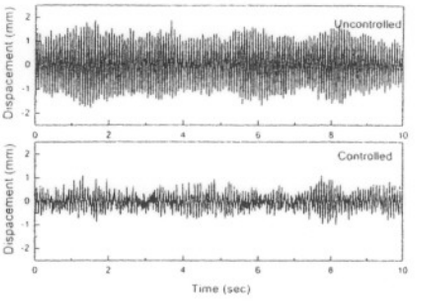


Fig. 10 Adaptive PPF control result in wind tunnel test (time history).

4. 결 론

본 논문에서는 유체 유발 진동의 대표적인 현상인 플러터와 와류 유기 진동현상을 압전 작동기를 이용하여 제어한 결과를 보고하였다. 플러터의 제어 실험의 경우, 후퇴각의 있는 외팔 평판을 대상으로 삼았는데, 구조 해석을 위해 유한 요소법, 공기력 해석을 위해 패널법, 공기력 변환을 위해 최소 상태법을 도입하여 상태 변수 방정식을 구성하고, 이를 이용하여 여러 가지 제어기를 설계하고 결과를 비교하였다. 능동 제어 기법을 도입한 결과 플러터 모드를 억제하고 플러터 임계 속도를 향상시킬 수 있었으며, 특히 μ-종합화 설계 기법에 의한 제어기는 시스템의 변화를 체계적인 불확실성으로 고려하여 보다 넓은 유속의 범위에서 안정적으로 시스템을 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 와류 유기 진동은 외팔보에 실린더를 부착한 모델을 대상으로 풍동 시험을 수행하였는데, 적응 제어기의 일종인 Adaptive PPF 제어기를 이용하여, 시스템의 동특성을 잘 모르거나, 와류 유발 진동과 같이 시스템의 주파수가 변화하는 경우에도 제어 성능을 유지할 수 있다.

참고문헌

(1) Blevins, R. D., Flow-Induced Vibration, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, 1990.

(2) Dowell, E. H., et al., Modern Course in Aeroelasticity, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995.

(3) Han, J.-H., Rew, K. H., and Lee, I., 1997, "An Experimental Study for Active Vibration Control of Composite Structures with a Piezo-ceramic Actuator and a Piezo-film Sensor," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, pp. 549-558

(4) Kim, D.-H., et al., 2003, "Optimal Vibration Control of a Plate Using Optical Fiber Sensor and PZT actuator," *Smart*

Materials and Structures, Vol. 12, pp. 549-558

(5) Hong, C. S., Park, J. W., Ryu, C. Y., and Kang H. K., 1999, "Signal Characteristics of EFPI In the Delaminated Composite," *Proc. of 13th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Kyongju, Korea, pp. 192-195

(6) Park, J. W., Ryu, C. Y., Kang, H. K., and Hong, C. S., 2000, "Detection of buckling and crack growth in the delaminated composites using fiber optic sensor," *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, pp. 1602-1623

(7) Mukhopadhyay, V., 1995, "Flutter Suppression Control Law Design and Testing for the Active Flexible Wing," *Journal of Aircraft*, Vol. 32, pp. 45-51

(8) Waszak, M. R., 2001, "Robust Multivariable Flutter Suppression for Benchmark Active Control Technology Wind-Tunnel Model, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 24, pp. 147-153

(9) Heeg, J., Analytical and Experimental Investigation on Flutter Suppression by Piezoelectric Actuation, NASA TP 3241, 1993.

(10) Karpel, M., and Hoadley, S. T., Physically Weighted Approximation of Unsteady Aerodynamic Forces Using Minimum-State Method, NASA TP 3025, 1991.

(11) Han, J.-H., and Lee, I., 1999, "Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators for Vibration Control of a Composite Plate Using Genetic Algorithms," *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, pp. 257-267.

(12) Rew, K.-H., Han, J.-H., and Lee, I., 2002, "Multi-Modal Vibration Control Using Adaptive Positive Position Feedback," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, pp. 13-20.

ISSN 1598-2548

2003년도 추계학술대회논문집

Proceedings of the KSNVE Autumn Annual Conference 2003

차 례

인사말씀……회 장 박 영 필… 7
학술대회를 조직하면서……부회장 오 재 응… 8
학술대회 조직위원회…… 9
학술대회 총일정표…… 10
학술대회장 배치도…… 11
전시업체 출품현황…… 12
전시업체 부스 배치도…… 13
Tutorial 세션(무료강좌) 안내…… 14
좌장별 시간표(위치, 세션)…… 15
발표자별 시간표(위치, 발표장)…… 16

● 특별강연

■ 토목구조물 건전성 모니터링 기술의 현황……윤정방(KAIST)… 21
■ 한국인의 앉은 자세에 대한 수직진동의 응답 특성……정완섭(한국표준과학연구원)… 33

● 11월 13일(목) 13:30~15:10

구조물의 에너지를 이용한 확률에 기초한 능동제어……민경원,정 란,황재승,이상현…0047
대형 구조물 바닥판의 동적 거동 및 제어……황재승, 김장윤…0056
응답예측모델을 이용한 속도-의존형 감쇠장치의 최대제어력 산정……이상현,박지훈,민경원…0060
TLCD를 이용한 지진하중을 받는 3차원 비정형 건축구조물의 응답제어……김홍진, 김형섭…0066
유한요소모델에 기초한 3층 건물모델의 시스템 식별……강경수,이상현,주석준,민경원…0072
내부 공력소음해석기법의 개발과 자동차용 엔진 흡기 시스템의 기류음 예측을 위한 적용… 정철웅,김성태,이수갑,김재헌…0078
신형경수로1400 증기발생기 전열관의 유체유발진동 해석…… 이광한, 정대율, 변성철…0084
노즐 중심에 설치한 마이크로 제트에 의한 충격파 관련 초음속제트 소음저감……김진화,유정열…0092
핀-튜브군에서 Baffle길이에 따른 음향공진……방경보,류제욱…0098
최적화 기법을 이용한 로터축 유한요소 모델 개선……김용한, F.Z.Feng, 양보석…0104
유전자 알고리즘을 이용한 유연복합재 구동축의 최적 설계……홍을표,신응수…0109

반동 전단구조 인텐시티 측정에 의한 제진재 적용과 그에 따른 에어컨 실외기 구조 방사 소음 저감…김규식,강연준,진심원,정인화,이정우…0333
중수로형 핵연료 저장대의 내진해석 방법……신태명…0338
CANDU 핵연료 채널에 대한 동특성 및 결함증상 해석……박진호,이정한,김봉수,박기용…0345
대형 화력 발전용 발전기 권선단부의 전자기력에 의한 진동 해석……김철홍,주영호…0350
회전부품의 탈락으로 발생한 복합화력 증기터빈의 이상 진동…구재량,조형래,황재현,김두영,윤완노,김연환…0356
금속파편 감시 시스템에 대한 시간-주파수 해석 적용……박진호,이정한,김봉수,박기용…0361
품질을 고려한 브레이크 저더의 동역학 해석 및 시험 검증……김효식,임홍재…0365
ISO 노면의 Pass-by-Noise Level 편차에 관한 연구……김기전,배철용,노국희…0371
승용차 과도음에 대한 럼블링 음질 인덱스 개발……김병수,이상권,박동철,정승균…0377
Phase Vector Sum을 이용한 디젤엔진 구조진동의 평가……이수목,김관영…0383
차량용 에어컨 컴프레서 브라켓의 형상최적설계……제형호,김찬묵,강영규,이두호…0389
Power Steering Oil Pump의 맥동소음 저감에 관한 실험……안세진, 김명환,정의봉,박진형,유승근…0395
광 디스크 드라이브 Seek 소음의 음질 평가……이상윤,최명렬,성평용…0401
초소형 광자기 드라이브용 서스펜션의 동특성 해석…홍어진,오우석,박노철,양현석,박영필…0406
광디스크 드라이브의 충격해석……홍석준,장영배,박노철,박영필…0412
자동볼평형장치의 밸런싱 성능에 대한 중력과 속도파형의 영향……정진태,정두한…0418
PZT를 이용한 초소형 광픽업 엑츄에이터의 슬라이딩 모드 제어……이우철,박태욱,박노철,양현석,정동하…0424

● 11월 14일(금) 09:00~10:20

자기변형 구동기를 이용한 보의 진동제어……임채욱,박영진,문석준,정태영…0433
경사기능재료 사각 평판의 정적 및 진동해석……민준식,송오섭,정남희,강호식,이윤규,강호식…0439
압전 작동기를 이용한 유체 유기 진동의 능동 제어……한재홍…0446
지능구조물의 다목적 상태 궤환 제어……홍성일,박현철,박철휴…0452
100 W급 초소형 파워 시스템의 회전체 동역학적 설계 및 안정성 예측……곽현덕,이용복,류근,김창호…0459
평균속도 개념을 적용한 상태공간에서의 과도동적응답 해석…이안성,김병옥,김영철,김영춘…0465
고압 터보펌프용 플로팅 링 실의 거동과 동특성의 성관관계……신성광,이용복,곽현덕,김창호,장건희…0471
왕복동 압축기의 동특성 분석 및 진동 개선……고병승,황원걸,안기원,박성우,서문희…0478
탄성기초위에 놓인 파이프의 고유치 분기와 플러터 모드……류봉조,류시웅,김희중…0486
기하학적 비선형을 고려한 정현형 아치 구조물의 동적 좌굴 특성……김승덕,윤태명…0492
기하학적 비선형성을 갖는 평판의 동특성 해석……임재훈,최연선…0498
원판의 비대칭진동의 대역분기해석……여명환,이원경…0504
인터넷 통신이용 실시간 환경소음 측정 및 특성분석……유동준,이상권…0515
청감실험을 통환 교통소음의 소음평가척도 구성……서형균,류종관,전진용…0521
초고층 빌딩의 헬스장 구조소음 및 진동 대책……박해동,백재호,이홍기,전종균…0527
도로교통 소음원에 의한 저주파 소음실태……정성수,서상준,조문재,김용태…0533
Multi-class SVM을 이용한 회전기계의 결함 진단……황원우,양보석…0537
자왜 트랜스듀서를 이용한 유도 비틀림파의 발생 및 배관의 이상진단…박찬일,한순우,조승현,김윤영…0544
데이터 융합과 Dempster-Shafer 이론을 이용한 유도전동기의 결함진단…김광진,양보석, 한천…0549
온도 변화에 의한 HDD 유체 동압 베어링의 특성 해석…김학운,김관수,장건희,이행수,김철순…0556