

통합적 시스템 식별을 이용한 복합재 평판의 최적 진동제어에 대한 실험적 연구

Experimental Study of Optimal Control of Vibration of Composite Plate Using Integrated System Identification

류근호*, 한재홍, 이 인(한국과학기술원)

1. 서론

일반적인 형태이고, 임의의 위치에 감지기/작동기를 부착시킨 스마트 구조물의 진동 제어를 수행하기 위해서는 시스템 식별 이론을 통하여 실험적인 방법으로 플랜트의 특성과 관측기의 이득을 구하고, 그것들을 이용하여 설계한 제어기를 통하여 구조물의 진동을 제어하는 일관된 방법이 요구된다. 본 연구에서는 제어에 사용되는 A, B, C 행렬과 관측기 이득 K_f 을 실험적인 방법을 통하여 통합적으로 구하였다. 또한 앞의 통합적인 시스템 식별을 통하여 얻은 시스템 파라미터들과 리카티 방정식을 풀어 얻는 제어 이득 K_c 를 이용하여 제어기를 설계하였다. DSP 보드를 이용하여 평판과 날개 형상의 시편에 대해 제어 실험을 성공적으로 수행하였고 그 특성을 살펴 보았다.

구조물의 진동제어에 관련된 기존의 연구를 살펴보면, 김재형[1]은 캡센서와 압전 세라믹을 이용하여 복합재 평판의 비틀림 모드의 진동을 제어하였고, 류근호, 한재홍 등[2], [3]은 압전 감지기/작동기가 부착된 복합재 평판의 통합 시스템 식별에 대한 검증을 수행하였고, LQG 방법을 통하여 제어하였다.

Juang 등[4]은 ERA 방법을 통한 시스템 식

별법을 제안하고 트러스 구조물과 실제 우주 탐사선의 모달 값들을 효과적으로 찾아내었다. Chen 등[5]은 통합적인 시스템 식별을 통하여 각 모드의 모달 파라미터들과 진동 신호를 측정 및 예측하였다. 또한 Juang 등[6]은 트러스 구조물에 대해서 주파수 가중 최적 제어를 하였다.

2. 통합 시스템 식별과 제어기 설계

일반적인 ARMAX 모형(Auto Regressive and Moving Average eXogenous)로 표현한 시스템 입출력 관계식은 다음과 같다.

$$\left[y_i + \sum_{i=1}^{Ma} a_i y_{i+1} \right] = \sum_{i=1}^{Mb} b_i u_{i+1} + \left[\varepsilon_i + \sum_{i=1}^{Mc} c_i \varepsilon_{i+1} \right] \quad (1)$$

위의 a_i, b_i, c_i 등의 파라미터들은 아래 식 (2)와 같이 추정치(\hat{y})와 실제 측정값(y)의 오차의 제곱이 최소화되도록 최소자승법(LMS)을 이용하여 구했다.

$$J = \sum_{k=1}^{Ma} (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (2)$$

위에서 구한 a_i, b_i, c_i 등의 파라미터들을 이용하여 가제어성 표준형 상태공간(controllable canonical form)형태로 A, B, C 행렬을 구성하고, 관측기 이득 행렬 K_f 도 얻었다. 이때의 A, B, C,

K_f 행렬들은 다시 A 행렬이 반대칭 블록 대각화 (antisymmetric block diagonalized) 행렬이 되도록 아래 식 (3)과 같이 유사 변환 (similarity transform) 에 의해서 변환되었다.

$$\begin{aligned} A^* &= T^{-1}AT, \quad B^* = T^{-1}B, \quad C^* = CT \\ (AK_f)^* &= T^{-1}(AK_f) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 변환 행렬 T를 이용하여 A 행렬을 반대칭화 시킨 이유는 A 행렬의 유일성을 보장하기 위함이고, 블록 대각화시킨 이유는 상대변수를 모드별로 분리시켜 각 모드의 동역학이 비의존적이 되도록 하기 위해서이다. 이렇게 얻은 $[A, B, C, K_f]$ 행렬은 제어하고자 하는 모드이외는 모드 제거를 수행함으로써 관측기의 축차를 통하여 제어 실험시 계산량을 줄일 수 있었다. 이상으로 참고문헌 [4], [5]와 같은 방식으로 $[A, B, C, K_f]$ 을 실험적인 방법을 통하여 시간영역에서 동시에 얻는 통합적인 시스템 식별이 가능하였다.

제어기는 식 (4)와 같은 목적 함수 V를 최소화하기 위해 대수 리카티 방정식을 풀어 제어기 이득값 K_c 를 얻었다.

$$V = E \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x^T Q x + u^T R u) dt \right\} \quad (4)$$

Q, R은 가중 행렬로써 아래와 같이 정하였다.

$$\begin{aligned} Q &= \text{diag} \\ & \quad [c_1 \zeta_1 w_1, 2c_1 \zeta_1 w_1, c_2 \zeta_2 w_2, 2c_2 \zeta_2 w_2, c_3 \zeta_3 w_3, 2c_3 \zeta_3 w_3] \\ R &= 1.0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $c_1 \sim c_3$ 는 각 모드의 제어성능을 조절하는 상수로써 0.8 ~ 1.2 사이에서 적당한 값을 취하였다.

위의 방식으로 구한 제어이득 K_c 값에 관측기에서 추정된 상태변수(\hat{x})에 곱하여 제어 입력 u를 구했다.

$$u = -K_c \hat{x} \quad (6)$$

3. 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 1처럼 직사각형 평판(PLATE3_2)과 날개모양의 평판 시편(W1, 2)의 시편을 제작하였는데, 시편의 규격은 Table 1과 같고, 감지기/작동기 및 각종 실험 장치들은 참고문헌 [3]의 사양과 같다.

시편은 프리프렉을 여러 각도로 적층한 다음 오토클레이브내에서 고온과 고압을 가하여 형성하고, 다이아몬드 컷터로 가공한 후 에폭수 접착제를 이용하여 압전 세라믹과 압전 필름을 복합 평판 표면의 각기 다른 위치에 부착하였다.

실험적인 시스템의 식별은 먼저 랜덤 신호(banded white noise)를 압전 세라믹으로 낸 후에 압전 필름에서 얻은 평판 진동 신호를 msec 단위로 8초 동안 받아 저장시킨다. 식별 차수를 4차로 정하여($M_a, M_b, M_c = 8$) 출력 데이터를 처리하여 관측기를 설계한 후 참고 문헌 [4], [5]와 같이 A 행렬의 특이값(singular value)이 작은 모드를 축차하여 3차 시스템으로 관측기를 설계하고, 제어 입력(u)도 (5)~(6)의 과정을 통하여 설계하였다.

복합재 평판의 전체 실험 장치의 구성은 Fig. 2와 같다. 랜덤 교란 신호로 압전 세라믹 가진하여 시스템에 진동을 발생시키면 감지된 압전 필름에서 전하량이 발생하여 전하량 증폭기를 통하여 증폭되어 전압의 형태로 변환된다. 이 신호는 Fig. 3의 프로그램에 의해 컴퓨터와 연결된 DSP 보드(dSPACE DS1102)를 통하여 디지털 신호로 변환되고 제어 입력으로 계산어진다. 계산된 제어 입력은 다시 DSP 보드 Butterworth 저주파 통과 필터를 통하여 모델하지 않은 고차모드로의 잉여가 방지된다. 이어 전압은 고전압 증폭기로 40배 증폭된 후에

동기인 압전 세라믹을 통하여 진동을 억제하게 된다.

주파수 전달 함수는 교란에 의한 플랜트 출력값을 FFT 분석기를 이용하여 비제어시와 제어시에 각각 구하였다.

4. 실험 결과 및 결론

본 연구에서는 다양한 제어 이득에 따른 제어성능과 제어 잉여 현상(control spillover)을 방지하기 위하여 Fig. 4와 같이 필터의 차수를 바꾸어 가면서 실험을 하였다.[7] Fig. 4에서 보듯이 2차 이상의 저주파 통과 필터를 사용하지 않으면 6번째 모드에서 잉여 현상이 발생하였다. 그러나 너무 높은 차수의 필터를 사용하면 세번째 모드의 제어성능이 떨어지므로, 본 연구에 사용된 시편들에 대해서는 2차 Butterworth 필터를 선택함이 타당함을 알 수 있었다.

제어성능 향상과 잉여 현상 방지를 동시에 이룩하기 위해 필터 차수와 차폐 주파수에 대한 고찰이 필요함을 알 수 있었다.

대표적인 최적 제어 결과는 Fig. 5~7와 같다. 처음 의도한대로 세 시편 모두 처음 세모드의 피크값이 10~20 dB 정도로 크게 감소함을 알 수 있었다.

이상의 방식으로 시스템 식별과 관측기를 동시에 설계하는 통합 시스템 식별과 제어입력부에 저주파 필터를 추가한 LQG 방법에 의하여 다양한 복합재 평판들의 진동 제어가 성공적으로 이루어질 수 있었다.

[후기]

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 지원으로 수행된 연구(과제 번호: 96-0200-05-01-3)의 일부이며

관계자 여러분께 감사 드립니다.

[참고문헌]

1. 김재형, "시스템 식별과 최적제어를 이용한 복합적층판의 진동제어," 포항공과대학 석사학위 논문, 1995.
2. 류근호, 한재홍, 이인, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합재 평판의 최적 진동 제어 실험," 한국 소음진동학회지, 제 7권 제 1호, 1997, pp. 161-168.
3. 류근호, 한재홍, 이인, "복합재 평판 진동의 최적 상태 되먹임 제어를 위한 통합적인 시스템 식별과 상태변수 추정," 한국항공우주공학회 춘계학술대회, 충남대학교, 1997, pp. 77-80.
4. Juang, J.N. and Pappa, R.S., "An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction," *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No.5, 1984, pp. 620-627.
5. Chen, C.W. and Huang, J.K., "Integrated System Identification and State Estimation for Control of Flexible Space Structures," *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 15, No. 1, 1992, pp. 88-95.
6. Juang, J.N. et al., "Frequency-Weighted System Identification and Linear Quadratic Controller Design," *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.16, No. 2, 1993, pp. 330-336.
7. Meirovitch, *Dynamics and Control of Structures*, Willey Pub., 1990, pp. 323-333

Table 1. Specification of specimen.

Dim:[mm]	(Lh,Wh1,Wh2,Th)	(DxA,DyA)	(DxS,DyS)
PLATE 3_2	(220,180,180,0.6) [60/-60/0] _s	(22,18)	(22,144)
WING1	(270,120,75.5,1.0) [60 ₂ /90 ₃] _s	(21,19)	(21,81)
WING2	(270,119,74.5,1.0) [0 ₂ /90 ₃] _s	(20,19)	(21,78)

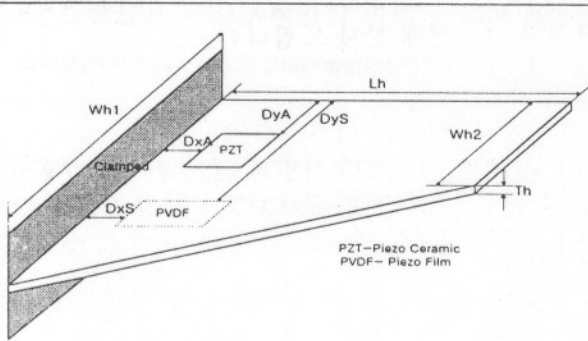


Fig. 1 Configuration of specimen.

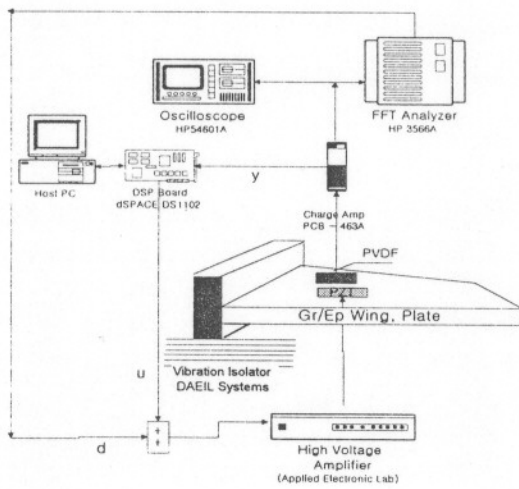


Fig. 2 Configuration of overall system.

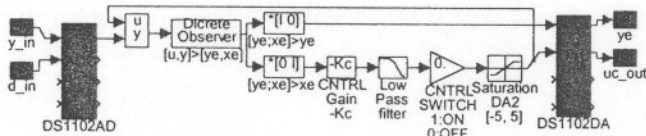


Fig. 3 Control program for DSP board.

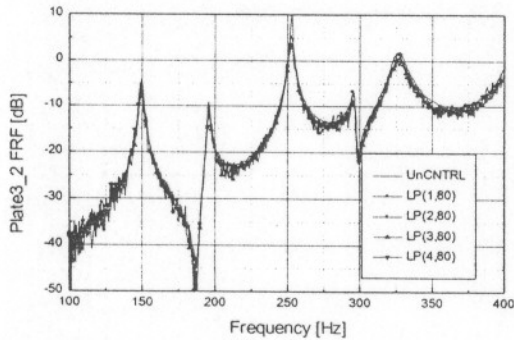


Fig. 4 Effect of low pass filter order.

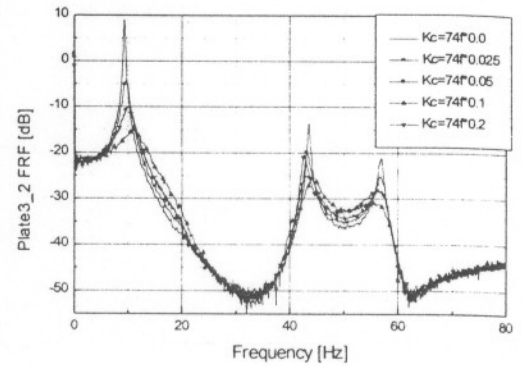


Fig. 5 Control result of PLATE3_2.

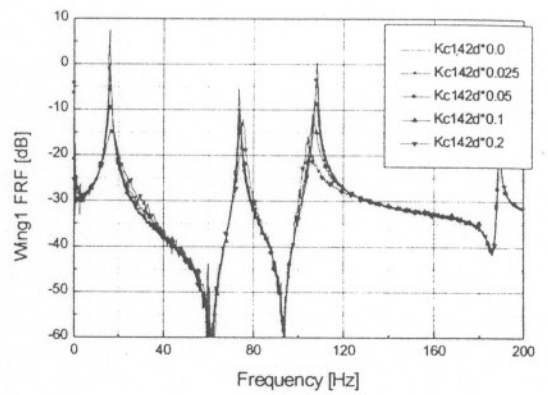


Fig. 6 Control result of WING1.

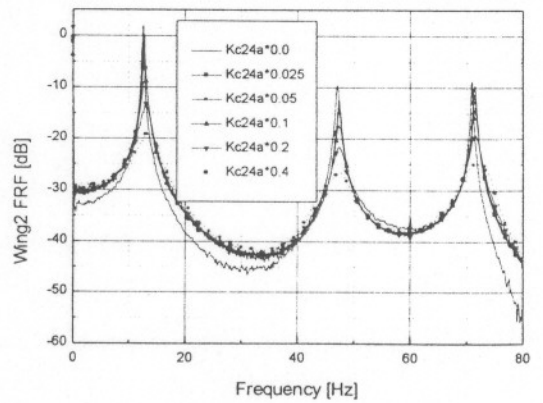


Fig. 7 Control result of WING2.

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

제3발표장	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