

시스템 식별법을 이용한 평판 진동 제어에 관한 연구

A Study on Plate Vibration Control using System Identification

이 재 호*, 정 준 흥**, 박 기 현***
 Jaeho Lee*, Joonhon Jung**, Kiheon Park***

Abstract - This paper is concerned with the active vibration control of flexible plate system using H_2 controller. The main objective of this paper is to propose the system identification for estimation dynamic equation of plate vibration system and control algorithm such as H_2 controller design. In this paper dynamic equation is determined by considering only the first, second, and third vibration modes, and experiments confirm that this model works well. The H_2 control algorithm is proposed and implemented on the experimental setup to show their efficacy. Effectiveness and performance of the designed controller was verified by both simulation and experiment result

Key Words : 평판 진동 제어, 시스템 식별법, 동적 방정식, H_2 제어기

1. 서 론

최근 산업기술이 발달함에 따라 고속, 고정밀, 고품질, 고성능의 다양한 제품이 생산되고 있으며, 현재 가장 관심을 두고 있는 에너지 효율에 대한 측면에서 에너지 효율을 개선하기 위해 대부분의 시스템이 경량화 되어 가고 있는 추세이다. 이와 같은 시스템의 경량화로 인해 시스템 자체 구동이나 외부에서 가해지는 힘에 의해 진동이 발생되며, 이러한 진동은 시스템의 신뢰성이나 안정성을 크게 저하시키는 요인으로 작용하게 된다. 따라서 시스템에서 발생하는 진동과 변형에 대한 능동적인 제어가 요구된다.

본 논문에서는 능동 진동 제어를 수행하기 위한 대상체로 유연 구조물로 된 알루미늄 평판을 사용하였으며, 진동이나 구조물의 변형을 감지하기 위한 감지기, 구조물의 진동을 억제하기 위해 사용되는 작동기를 압전소자(PZT)로 사용하였다. 평판 진동 시스템의 진동을 효과적으로 제어하기 위해 제안된 제어기는 최적 제어 기법인 H_2 제어기이다. 제어기를 시스템에 적용하기 위해서는 평판 진동 시스템의 정확한 수학적 모델이 요구된다. 수학적인 모델링은 시스템 식별법으로 평판 진동 시스템의 동적방정식을 유도하였다.

본 논문에서는 무수히 많은 고유 진동 모드 중 시스템에 가장 크게 악 영향을 미치는 3개의 저주파 진동 모드만을 고려하였다. 이들 모드에 대한 동적방정식은 시스템 식별법으로 유도하였으며, 유도된 동적방정식을 이용하여 H_2 제어기를 설계하였고, H_2 제어기의 제어성능을 시뮬레이션과 실험결과로부터 입증하였다.

2. 본 론

2.1 평판 능동 진동 시스템

본 연구에서 사용되는 평판 능동 진동 시스템은 그림 1과 같이 구성되어 있다. 평판 능동 진동 시스템은 유연체로 된 알루미늄 평판, 안전소자를 사용한 감지기와 작동기로 구성되어 있으며, 외부 구성으로는 평판을 가진시키기 위한 파워 앰프와 감지로부터 얻은 신호를 증폭시키기 위한 전압 증폭기로 구성되어 있다. 작동기는 평판 하단의 중심으로부터 두개의 작동기를 서로 비대칭으로 부착했으며, 감지기 역시 평판의 중심으로부터 서로 비대칭으로 부착하였다.

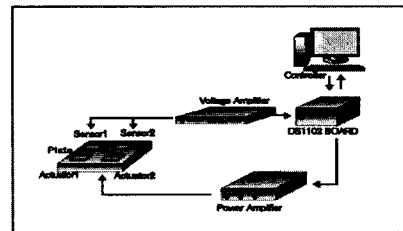


그림 1 평판능동진동 시스템의 구성도

2.2 시스템 식별

2.2.1 시스템 식별 절차

시스템 식별 절차는 실험의 계획, 자료 수집, 모델 구조의 선택, 모델 선정 방법 선택, 파라미터 추정, 모델 검증의 순서로 구성되며, 이와 같은 과정을 반복하게 된다. [1],[2] 시스템 식별에 사용되는 입력 신호로는 시스템의 전체적인 특성을 잘 나타내는 PRBS(pseudo random binary signal)를 사용하

저자 소개

- * 準 會 員 : 成均館大學 電子電氣工學科 博士課程
- ** 準 會 員 : 成均館大學 電子電氣工學科 碩士
- ***正 會 員 : 成均館大學 電子電氣工學科 助敎授 · 工博

였고, 모델구조는 상태공간 모델 구조, 식별 방법으로는 PEM (prediction error/maximum likelihood method) 방법을 선택하였다.[3],[4]

2.2.2 동적 방정식 식별

MIMO 시스템으로 구성된 평판 진동 시스템의 동적 방정식 식별은 MATLAB의 함수를 이용하여 추정하였다. 1차적인 추정 성능 평가에서는 90%이상의 일치성을 보여주었고, 2차적인 모델 검증은 자기 상관관계와 상호 상관관계 그래프를 통해 추정된 모델의 타당성을 검증한다. 그림 2에서와 같이 모든 상관관계 그래프가 신뢰영역 안에 존재함으로 실제 시스템을 잘 추정하였다고 판단할 수 있다.

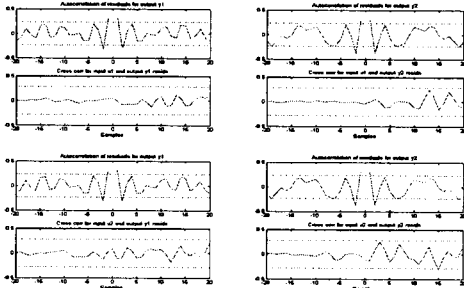


그림 2. 각 가진기와 감지기에 대한 상관관계

시스템 식별과 모델 축소를 통해 얻어진 이산 동적방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(t+Ts) &= Ax(t) + Bu(t) + Kc(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0.21238 & -0.97088 & -0.0037486 & -0.00015544 & -0.010008 & -0.0066571 & 0.010497 & -0.0048522 \\ 0.97348 & 0.20878 & -0.0055232 & -0.0019034 & 0.010824 & -0.0065252 & -0.0075187 & -0.0028709 \\ -0.0014825 & 0.0043515 & 0.95546 & -0.23774 & -0.0098158 & -0.037357 & 0.004901 & -0.0070766 \\ 0.00025292 & -0.0027441 & 0.25673 & 0.96544 & 0.0048492 & -0.005238 & -0.0046501 & 0.0036311 \\ -0.0043892 & 0.015296 & -0.043176 & 0.0090619 & -0.13133 & -0.90248 & -0.10246 & -0.11585 \\ 0.0013848 & 0.0054179 & 0.0050908 & 0.00039646 & 0.94238 & -0.13521 & 0.225 & -0.1011 \\ -0.0012859 & -0.012016 & 0.0070672 & -0.007354 & 0.04554 & -0.16292 & 0.17103 & 0.95099 \\ -0.0066837 & -0.0075175 & -0.0074809 & -0.0062238 & 0.22637 & 0.047561 & -0.92908 & 0.15317 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.35454 & -1.0654 \\ -0.56128 & 0.16112 \\ -0.51196 & -0.56526 \\ -0.20053 & 0.088882 \\ -0.28705 & -1.0777 \\ -0.54222 & -0.20776 \\ -0.21776 & 0.69477 \\ -0.66161 & 0.024049 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -0.87968 & -0.055932 & -0.67686 & -0.09801 & 0.41567 & -0.6371 & -0.052059 & 0.063605 \\ 0.26759 & 0.86933 & -0.35996 & 0.1448 & -1.0227 & -0.19628 & 0.93461 & -0.19439 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.099706 & -0.61983 \\ 0.67468 & -0.46372 \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} -0.052199 & -0.10324 \\ -0.19601 & 0.202 \\ -0.31702 & 0.21182 \\ -0.23594 & 0.002899 \\ 0.32116 & -0.34816 \\ -0.00092743 & -0.13293 \\ 0.086684 & -0.1765 \\ 0.029209 & -0.035319 \end{bmatrix}$$

이산 동적방정식은 H_2 제어기 설계에 사용된다.

2.3 평판 진동 시스템의 H_2 제어기 설계

평판 진동 시스템에서 발생하는 TM필로우버 현상과 외란을 제거하고 각 감지기의 측정 잡음에 대한 영향을 최소화하며 제 1 고유 진동 모드에 대한 가중치를 부여하기 위해 W_1 에서 W_6 까지의 가중치 함수(weighting function)를 두었다.[5],[6] 그림 7은 표준 플랜트 모델을 나타낸다.

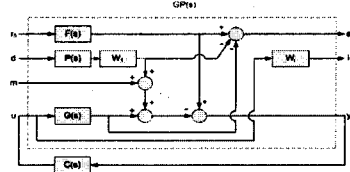


그림 7 표준 플랜트 모델의 블록도

표준 플랜트의 전달행렬 표기법으로 표현하면 식 2와 같다.

$$GP(s) = \begin{bmatrix} A & [W_{f_m} B_f - W_{f_m} B_y W_1 0] & \dots & -B \\ C & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} -D \\ W_f I \end{bmatrix} \\ C & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \dots & -D \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$W_{f_m} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{W_4 a_3 b_4 - W_5 a_4 b_3}{a_3 b_4 - a_4 b_3} & -\frac{W_4 a_4 b_3 + W_5 a_3 b_4}{a_3 b_4 - a_4 b_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{W_6 a_4 b_4 - W_7 a_4 b_4}{a_3 b_4 - a_4 b_3} & -\frac{W_6 a_4 b_3 + W_7 a_3 b_4}{a_3 b_4 - a_4 b_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_i = \begin{bmatrix} W_2 & 0 \\ 0 & W_3 \end{bmatrix}$$

MATLAB에서 제공하는 dh2lag 함수를 이용하여 H_2 제어기를 설계하였으며 최종적으로 구한 가중치는 식 3과 같다.

$$\begin{aligned} W_1 &= 30, & W_2 &= 0.19, & W_3 &= 0.545, & W_4 &= 0.5, \\ W_5 &= 2.1, & W_6 &= 0.4, & W_7 &= 2.1 \end{aligned} \quad (3)$$

2.4 시뮬레이션 및 실험결과

2.4.1 시뮬레이션 결과

그림 3~5는 각 모드에 따른 시뮬레이션 결과이다.

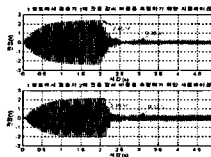


그림 3. 1 모드에서의 진동 감쇠 비율을 측정하기 위한 시뮬레이션 결과 (제어기가 2초에서 동작)

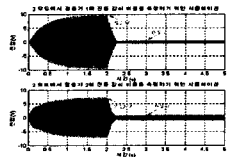


그림 4. 2 모드에서의 진동 감쇠 비율을 측정하기 위한 시뮬레이션 결과 (제어기가 2초에서 동작)

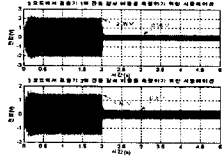


그림 5. 3 모드에서의 진동 감쇠 비율을 측정하기 위한 시뮬레이션 결과 (제어기가 2초에서 동작)

표 1은 시뮬레이션을 통한 각 고유 진동 모드에 따른 안정화 시간과 진동 감쇠를 비교한 것이다.

표 1 각 모드에 대한 평균 진동 시스템의 진동 감쇠 비율과 안정화 시간 감소 비율 비교

진동 모드	진동 감쇠 비율		안정화 시간		
	감쇠기 1	감쇠기 2	제어기가 없는 경우	H_2 제어기가 동작한 경우	안정화 시간 감소 비율
1	89.79%	85.11%	1.7초	0.69초	59.41%
2	94.84%	87.53%	1.8초	0.26초	85.55%
3	86.34%	79.31%	0.51초	0.065초	87.25%

2.4.2 실험 결과

그림 6~8은 각 모드에 따른 실험결과이다.

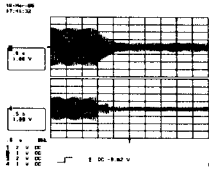


그림 6. 1 모드에서의 진동 감쇠 비율을 측정하기 위한 실험 결과 (제어기가 2초에서 동작)

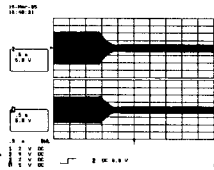


그림 7. 2 모드에서의 진동 감쇠 비율을 측정하기 위한 실험 결과 (제어기가 2초에서 동작)

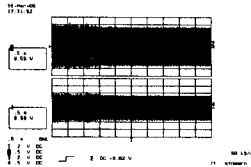


그림 8. 3 모드에서의 진동 감쇠 비율을 측정하기 위한 실험 결과 (제어기가 2초에서 동작)

표 2는 실제 평판 진동 제어 실험을 통해 얻어진 각 고유

진동 모드에 따른 안정화 시간과 진동 감쇠를 비교한 것이다.

표 2 각 모드에 대한 평균 진동 시스템의 진동 감쇠 비율과 안정화 시간 감소 비율 비교 (실험)

진동 모드	진동 감쇠 비율		안정화 시간		
	감쇠기 1	감쇠기 2	제어기가 없는 경우	H_2 제어기가 동작한 경우	안정화 시간 감소 비율
1	80.15%	82.05%	2.379초	1.105초	53.55%
2	79.64%	74.44%	1.615초	0.683초	57.70%
3	16.23%	19.41%	0.642초	0.213초	66.82%

3. 결 론

본 논문에서는 우선적으로 평판 진동 시스템의 정확한 수학적 모델링을 구하기 위해 시스템 식별법을 도입하였으며 얻어진 동적방정식은 자기 상관관계와 상호 상관관계 그래프에서 나타난 바와 같이 정확하게 추정되었음을 신뢰할 수 있었다. 이렇게 구해진 동적방정식을 H_2 제어기 설계에 이용하였으며 H_2 제어기의 시뮬레이션과 실제 실험에 대한 제어 성능은 표 1과 표 2에서 비교, 분석하였다. 얻어진 결과를 살펴본 바와 같이 두 실험에서는 수치상으로 다소 차이점을 보이지만 서로 비슷한 제어 성능과 시스템 특성을 보임을 알 수 있으며, 두 실험 결과상에서 가장 크게 나타난 상이한 점은 진동 감쇠에서 시뮬레이션에서는 나타나지 않았던 1모드와 3 모드 사이에 상반관계(trade-off)가 실제 실험에서 나타난다는 부분이다. 따라서 이와 같은 점들을 고려한 결과 시뮬레이션과 실험에서 설계한 H_2 제어기가 모두 효과적인 능동 진동 제어를 수행했음을 확인하였다.

앞으로 연구되어야 할 부분은 여러 다른 종류의 제어기를 설계하여 평판 능동 진동 제어에 어느 제어기가 우수한 성능을 발휘하는지 비교 및 분석하는 것이 되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Lennart Ljung, "System Identification Theory for the user", Prentice Hall, 1999.
- [2] Rolf Johansson, "System Modeling and Identification", Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- [3] Lennart Ljung, "System Identification Toolbox For Use with MATLAB", The MathWorks Inc., May 1995.
- [4] Stacy S. Wilson, Charles L. Carnal, "System Identification with disturbances", Department of Electrical Engineering Tennessee Technological University Cookeville, TN 38505
- [5] Kemin Zou with John C. Doyle and Keith Glover, "Robust and Optimal Control", Prentice Hall, 1995
- [6] Jeffrey B. Burl, "Linear Optimal Control H_2 and H_∞ Methods", ADDISON WESLEY