

압전 복합재료 작동기 LIPCA를 이용한 보의 진동 제어

Vibration Control of Beam using Piezoceramic Composite Actuator LIPCA

아리프수하리요노*

Arief Suhariyono

구 남 서**

Goo, Nam Seo

박 훈 철**

Park, Hoon Cheol

윤 광 준**

Yoon, Kwang Joon

ABSTRACT

This paper presents application possibility of Lightweight Piezoceramic Composite Actuator(LIPCA) to suppress vibration of dynamic structures as an actuator. LIPCA is composed of a piezoelectric layer, a carbon/epoxy layer and glass/epoxy layers. When compared to the bare piezoelectric ceramic(PZT), LIPCA has advantages such as high performance, durability and reliability. In this study, performances of LIPCA have been estimated in an active vibration control system. Experiments were performed on an aluminum beam with cantilever configuration. In this test, strain gages and single LIPCA are attached on the aluminum beam with epoxy resin. Digital ON-OFF control algorithm is applied into the system to exhibit performance of LIPCA as actuator in active vibration control system. First, we performed static actuation test of bare PZT and LIPCA in order to show the superiority of LIPCA. Secondly, we carried out beam vibration control test using LIPCA. The results showed LIPCA could suppress free vibration of the aluminum beam, which means that LIPCA can be applied as an actuator to control vibration of dynamic structures.

주요기술용어(주제어) : LIPCA(Lightweight Piezoceramic Composite Actuator, LIPCA 작동기), Vibration Suppression (진동 억제), ON-OFF Control(ON-OFF 제어)

1. 머리말

최근 항공기 조종면의 제어, 대형 우주 구조물 또는 항공기 날개 등의 진동 억제 등과 같은 다양한 공

학적 분야에의 응용을 목적으로 작으면서도 강력하고 신뢰성이 높은 지능형 작동기가 연구, 개발되고 있다. PZT(lead zirconium titanate)로 대표되는 압전 재료는 대표적인 지능형 작동기로 널리 응용되고 있다.

동적 구조물의 진동제어는 압전 작동기의 중요한 응용 분야의 하나이며, PZT 웨이퍼를 진동 억제 시스템에 사용하려는 연구가 많이 보고 되어 있다^[1]. 그러나 PZT 웨이퍼를 진동 억제 시스템에 바로 적용하는 경우, 작동력과 작동변위가 충분하지 않을 뿐 아니라 내구성과 신뢰도에 문제가 발생할 소지가 많이 있다. LIPCA(Lightweight Piezoceramic Composite

† 2005년 8월 11일 접수~2005년 12월 15일 게재승인

* 건국대학교 대학원 신기술융합학과,
인공근육연구센터(Konkuk University)

** 건국대학교 기계항공공학부, 인공근육연구센터
(Konkuk University)

교신저자 이메일 : nsgoo@konkuk.ac.kr

Actuator) 작동기는 순수 PZT 웨이퍼(bare PZT wafer)의 단점인 성능, 내구성 및 신뢰도를 개선하고자 개발되었다^[2].

능동 작동기의 개발과 함께 디지털 제어 알고리즘, 마이크로 프로세서와 같은 디지털 장비들이 빠른 속도로 개발됨에 따라 능동 진동 제어 분야의 연구에 대한 관심도 계속 증가되어 왔다. 최근의 연구는 DVD(digital video disc) 드라이브와 같은 소형 구조물에서 항공기 날개와 같은 대형 구조물의 진동 제어와 같은 대형 구조물에 이르기까지 그 폭이 넓어 졌다^[3]. 그 이유는 수동 제어와는 달리 능동 제어는 작동기 뿐 아니라 감지기를 사용하여 진동을 보다 효과적으로 제어할 수 있기 때문이다.

LIPCA 작동기는 압전 세라믹 웨이퍼, 탄소/에폭시 층 및 세 장의 유리/에폭시 층으로 이루어진 단일 압전 작동기(unimorph piezoceramic actuator)이다. 그림 1에는 LIPCA와 순수 PZT를 비교하여 나타내었다. 그 동안의 연구에서 재료, 적층 형태와 크기를 달리하는 일련의 LIPCA를 개발하여 성능을 비교하였다^[4]. 또한 LIPCA 작동기의 설계 개념과 성능 평가에 대한 연구^[2,5], LIPCA 작동기의 피로 특성을 파악하기 위한 연구로 내구성 시험 및 작동 성능 저하^[6,7] 등과 같은 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 LIPCA 작동기가 동적 시스템의 진동 제어에 적용 가능한지를 고찰하였다. 한쪽이 고정인(cantilevered) 알루미늄 보의 진동을 LIPCA-C2(길이 70mm, 순수 PZT 웨이퍼의 길이와 같음)를 사용하여 제어하는 연구를 수행하였다. 변형률 게이지를 사용하여 보의 변형을 감지하여 디지털 피드백 제

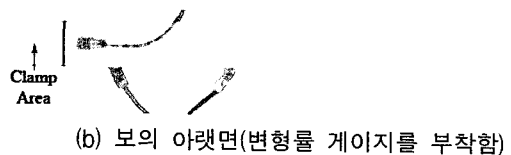
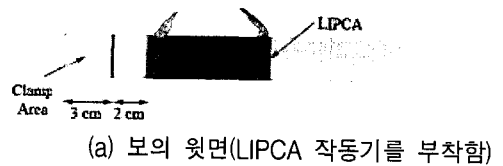
어를 사용하여 LIPCA에 공급되는 전력을 제어하였다.

먼저 정적 작동 시험을 수행하여 순수 PZT 웨이퍼를 사용하였을 때의 작동 성능과 LIPCA 작동기를 사용하였을 때의 작동 성능을 비교하였다. 다음으로 LIPCA를 사용한 보의 진동 제어 시험을 수행하여 LIPCA가 동적 구조물의 제어에 사용될 수 있음을 확인하였다.

2. 실험장치 및 절차

가. 시편

보의 변형 신호를 계측하기 위하여 아랫면에 변형률 게이지를 부착하고 윗면에 LIPCA 작동기를 에폭시로 부착한 Al 5052재질의 보 시편을 그림 2와 같이 준비하였다. 보의 전체 크기는 300×25×0.75mm이며 한쪽 끝의 30mm를 고정하였다. 실험에 사용한 PZT는 3195HD이었다. 작동 성능을 비교하기 위하여 같은 크기의 알루미늄 시편에 순수 PZT를 부착한 시편을 준비하였다.

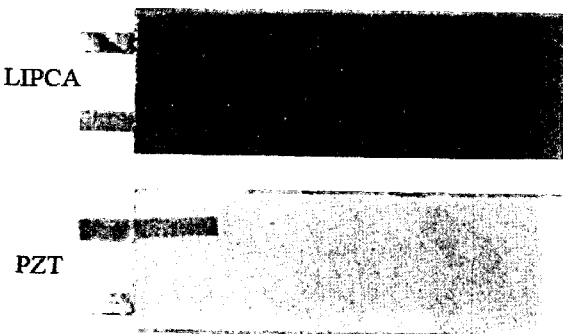


[그림 2] 실험에 사용된 Al 5052 보

나. 실험 장치

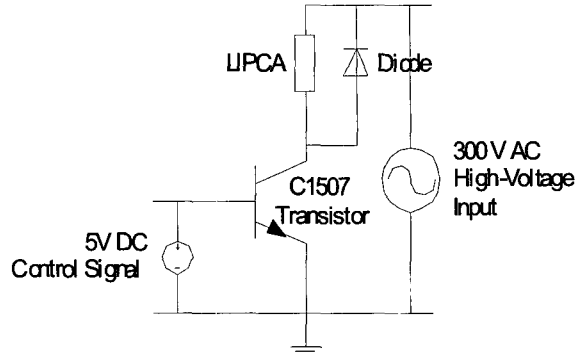
실험 장치는 클램프, 변형률 인디케이터, 고전압 전원 공급기, 스위칭 회로, DA/AD 보드, PC 등으로 구성하였으며 C언어를 사용하여 제어 프로그램을 구성하였다.

클램프는 캔틸레버 경계 조건의 구현하기 위하여



[그림 1] LIPCA 작동기와 순수 PZT

제작되었으며, 그림 3에 나타낸 스위칭 회로는 전원 공급의 전력을 제어하여 LIPCA에 공급하는 역할을 수행하며 고전압 트랜지스터와 다이오드로 구성되어 있다. 제어 신호는 DAQ 보드로부터 입력된 신호에 따라 제어 프로그램에서 생성된다. 고전압 전원 공급기로는 Face International사의 TD2를 사용하였고 Axiomtek AX-5412H DA/AD 보드를 사용하였다.



다. 진동 제어 시스템

알루미늄 보에 부착된 변형률 신호를 변형률 게이지로 감지하여 DAQ 시스템에 보내져 ON-OFF 알고리즘에서 제어 신호를 발생하고 스위칭 회로를 통하여 고전압 전원 공급기를 제어하게 된다. 고전압 전원 공급기에서는 300V의 DC로 LIPCA를 구동시켜 진동을 억제하도록 하였다.

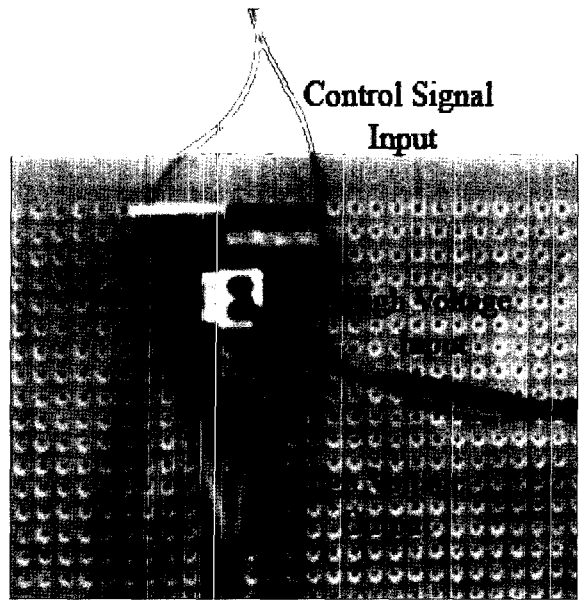
ON-OFF 제어 알고리즘은 식 (1)로 나타낼 수 있다^[8].

$$u(kT) = 1(e(kT)) \quad (1)$$

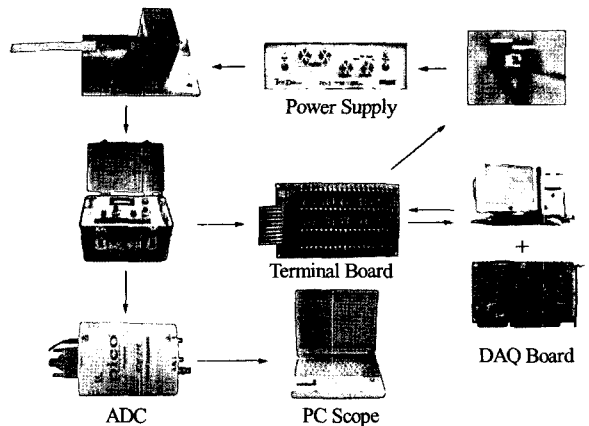
여기에서 T 는 샘플링 주기($1/T$ 는 샘플링속도)이고, $1(.)$ 는 헤비사이드(Heaviside) 계단함수이다. 헤비사이드 계단함수는 인수가 양수이면 1이고, 나머지 경우에는 0인 함수를 의미한다. 그림 4에는 진동 제어 하드웨어를 나타내었고 그림 5에는 블록 다이어그램을 나타내었다. 5V DC 제어 신호에 따라 트랜지스터가 스위치로 작용하여 LIPCA 작동기에 300V의 고전압을 가하게 된다.

일반적으로, 제어기의 샘플링 속도가 시스템의 밴드폭의 10배 이상 되어야 제어가 잘 이루어짐이 알려져 있다^[9]. 따라서 사인 형태의 가진 신호를 LIPCA 작동기에 가하여 보의 진동을 계측하여 고유진동수를 측정하여 샘플링 속도를 정하였다. 즉 사인 형태의 가진 신호를 주파수를 달리하여 LIPCA 작동기로 보를 가진하면서 진폭의 변화를 눈으로 확인하여 최대 변위가 발생하는 주파수를 공진 주파수로 정하였다. 실험을 통하여 계측된 시스템의 고유진동수는 8.8Hz 이었다.

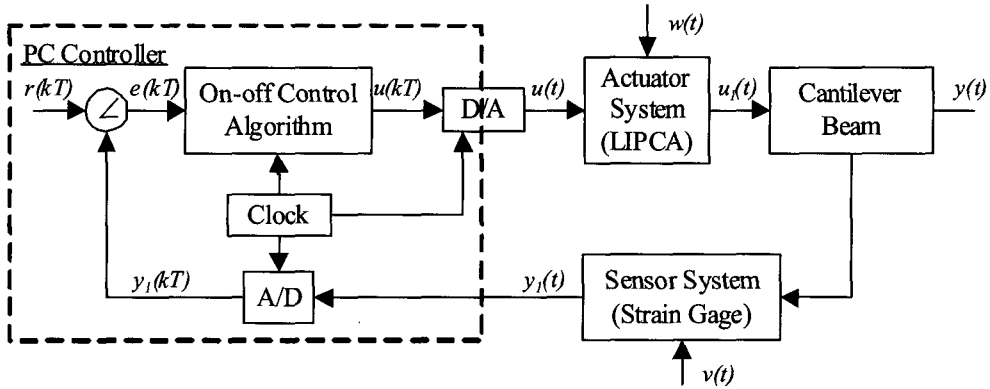
캔틸레버 형태의 알루미늄 보의 고유 진동수는 다음과 같다^[10].



[그림 3] 스위칭 회로의 회로도 및 기판



[그림 4] 진동 제어 시스템 하드웨어



[그림 5] ON-OFF 진동 제어 시스템 블록 다이어그램

$$\omega^2 = \frac{\beta^4 EI}{m} \quad (2)$$

$$\beta_1 l = 1.875104$$

여기에서 E 는 탄성계수, I 는 단면 2차 모멘트, m 은 단위길이당 질량, l 은 보의 길이이다.

식 (2)에 알루미늄의 물성과 시편의 치수를 대입하면 1차 고유 진동수는 8.4Hz 이었다. 시스템의 고유 진동수와 약간 차이가 있는 것은 유연한 알루미늄 보에 LIPCA 작동기가 부착되어 있기 때문이라고 생각된다.

3. 실험 결과

가. 작동력 비교

압전 복합재료 작동기 LIPCA의 성능과 순수 PZT의 작동 성능을 비교하기 위하여 정적 작동력을 비교하였다. 일반적으로 큰 작동력을 내는 작동기가 진동 제어에서도 보다 우수한 성능을 낼 수 있기 때문에 정적 작동력을 비교함으로써 LIPCA 작동기와 순수 PZT의 작동 성능을 비교할 수 있다.

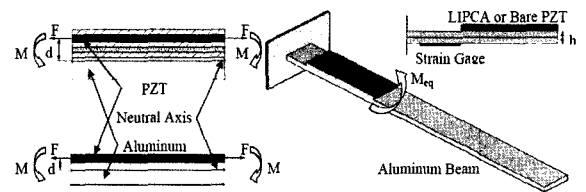
그림 6에는 압전 작동기가 발생하는 작동력을 변형률 게이지로부터 등가 모멘트로 계산하는 식을 유도하기 위한 그림을 나타내었다. 즉, 인장력 또는 압축력의 형태로 발생하는 압전 작동기의 작동력을 등가 모멘트로 환산하여 비교하고자 한다.

변형률 신호로부터 등가 모멘트는 간단한 보 이론

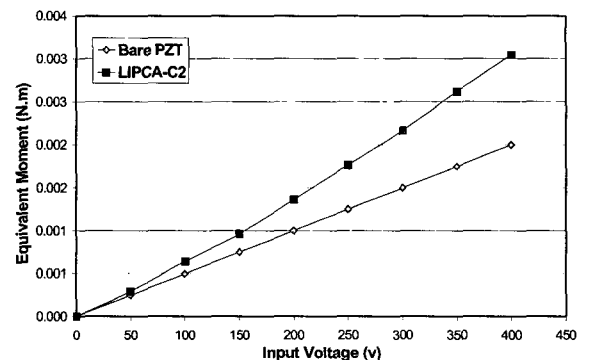
을 사용하여 식 (3)과 같이 계산된다.

$$M_{eq} = \frac{2EI\epsilon}{h} \quad (3)$$

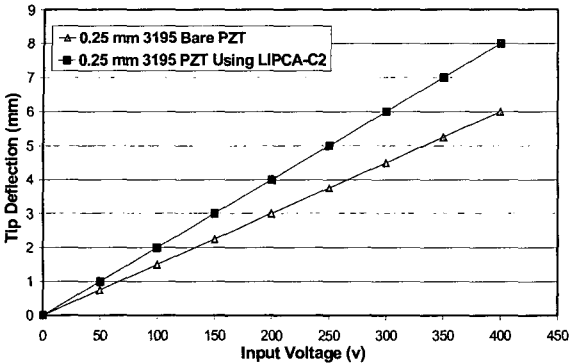
그림 7에 LIPCA 작동기와 순수 PZT의 작동력을 인가 전압에 따라 비교하였다. 인가 전압이 300V 일 때 LIPCA 작동기가 44% 큰 등가 모멘트를 발생하였다. 그림 8에는 끝단 변위를 비교하여 나타내었다



[그림 6] 변형률로부터 등가 모멘트의 계산



[그림 7] LIPCA와 순수 PZT의 작동 모멘트 비교



[그림 8] LIPCA 작동기와 순수 PZT에 의한 보의 끝단 변위 비교

데, 인가전압이 300V 일 때 LIPCA 작동기가 33% 큰 끝단 변위를 발생하였다. 이러한 결과로부터 LIPCA 작동기가 순수 PZT보다 작동 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

나. 진동 제어 결과

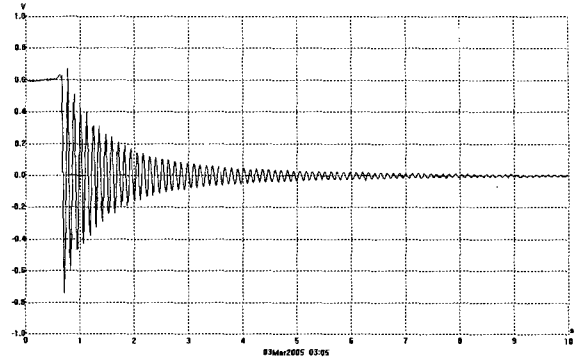
앞 절에서 LIPCA가 순수 PZT보다 작동 성능이 우수함을 확인하였으므로 LIPCA를 사용한 진동제어 실험을 수행하였다.

그림 9는 진동 제어 시스템을 끄고 보의 끝단에 초기 변위를 주어 보를 자유 진동하게 하였을 때 변형률 신호를 나타내었다. 보에 내재한 구조적인 감쇠로 말미암아 진동이 지수적으로 줄어드는 전형적인 양상이 관찰되고 있다.

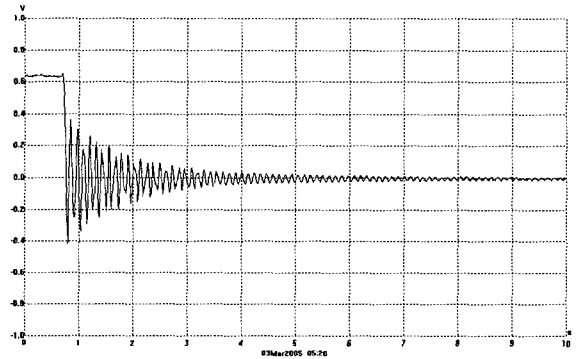
그림 10은 진동 제어 시스템을 켜고 마찬가지로 초기 변위를 가하였을 때의 진동 신호이다. 여러 가지의 샘플링 속도에 대하여 실험을 수행하였으며, 여기에서는 ω_n 의 1.5배와 10배의 두 종류의 샘플링 속도에 대한 결과를 비교하였다. 낮은 샘플링 속도인 그림 10(a)를 보면 보의 진동이 제어시스템이 없을 때보다 진폭을 잘 억제함을 확인할 수 있다.

이에 비하여 샘플링 속도가 시스템 진동수의 10배인 경우에는 진동 신호가 보다 빠른 속도로 감쇠되고 있다. 이는 샘플링 속도가 낮은 경우 감쇠가 작아진다는 디지털 제어 이론과 부합한다고 생각된다.

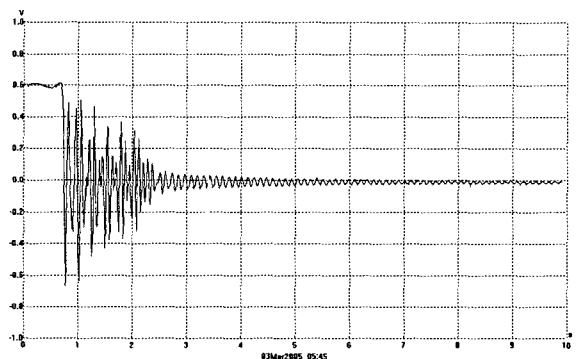
그러나 진폭의 감쇠가 균일하게 일어나지 못하는 현상이 관찰되었는데, 이는 ON-OFF 제어의 단점으



[그림 9] 제어시스템이 없을 때의 자유 진동 신호



(a) 낮은 샘플링 속도인 경우(ω_n 의 1.5배)



(b) 높은 샘플링 속도인 경우(ω_n 의 10배)

[그림 10] LIPCA를 이용한 보의 자유진동 제어

로 인해 나타나는 오버슈트(overshoot) 때문이라고 생각된다.

본 연구에서 ON-OFF 제어를 사용한 이유는 첫째

실험 장비가 완전히 갖추어지지 못하여 PID 제어에 사용 가능한 고속 전원 공급기가 없어서이고 둘째로는 ON-OFF 제어와 같은 가장 기초적인 제어 이론을 사용하여서도 LIPCA 작동기를 진동 제어에 사용 가능한지를 확인하고자 함이었다.

4. 결론

본 연구에서는 LIPCA를 동적 구조물의 진동을 제어하는데 적용가능성에 대한 연구를 수행하였다. 알루미늄 보의 자유 진동을 제어하는 시스템을 구성하여 정적 작동력 시험을 통하여 LIPCA의 작동성능이 순수 PZT보다 우수함을 확인한 후, LIPCA 작동기가 보의 진동을 억제할 수 있음을 확인하였다. 향후 장비가 보완되어 ON-OFF 제어가 아닌 PID 제어나 PPF(positive position feedback) 제어와 같은 제어 기법을 사용하면 보다 원활히 진동 제어를 수행할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 중점연구소 지원사업(과제번호: KRF-2004-005-D00046)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] M. R. Kermani, M. Moallem, R.V. Patel, "Parameter selection and control design for vibration suppression using piezoelectric transducers", *Control Engineering Practice*, Vol. 12, pp.1005~1015, 2004.
- [2] K. J. Yoon, S. J. Shin, H. C. Park, N. S. Goo, "Design and manufacture of a lightweight piezo-composite curved actuator", *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, pp.163~168, 2002.
- [3] A. Suleman, A. P. Costa, "Adaptive control of an aeroelastic flight vehicle using piezoelectric actuators", *Computers and Structures*, Vol. 83, pp.1303~1314, 2004.
- [4] A. Haris, N. S. Goo, H. C. Park, K. J. Yoon, "Modeling and analysis for the development of Lightweight Piezoceramic Composite Actuators(LIPCA)", *Computational Materials Science*, Vol. 30, pp.474~481, 2004.
- [5] K. J. Yoon, K. H. Park, S. K. Lee, N. S. Goo, H. C. Park, "Analytical designmodel for piezo-composite unimorph actuator and its verification using lightweight piezo-composite curved actuators", *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp.1~9, 2004.
- [6] K. J. Yoon, K. Y. Kim, N. S. Goo, H. C. Park, J. R. Haw, "Actuator performance degradation of piezo-composite actuator LIPCA under cyclic actuation", *Key Engineering Materials*, Vol. 261~263, pp. 1331~1336, 2004.
- [7] H. Setiawan, N. S. Goo, K. J. Yoon, "Degradation prediction of piezo-composite actuator under cyclic electric field", *Proceeding of the KSCM Conference*, Pusan, 2004.
- [8] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures: An Introduction, 2nd Edition*, Chapter 12, Kluwer Academic Publishers, Brussels, 2002.
- [9] G. F. Franklin, J. D. Powell, M. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems, 3rd Edition*, Chapter 3, Addison Wesley Longman, Menlo Park, 1998.
- [10] Francis S. Tse, Ivan E. Morse and Rolland T. Hinkle, *Mechanical Vibrations, 2nd Edition*, Sec. 7-8, Allyn and Bacon, Inc., 1978.