

구조물의 능동제어 실험을 위한 시스템 구성 Experimental System of Active Control for Building Structures

민 경 원* 이 성 경** 황 재 승*** 김 두 훈****

Min, Kyung-Won Lee, Sung-Kyung Hwang, Jae-Seung Kim, Doo-Hoon

ABSTRACT

Increasing flexibility and lightness of recently built high-rise buildings make the structures susceptible to loads such as earthquakes and winds. Therefore, higher performance vibration control systems to reduce the vibration levels are demanded more than any time in the past. One of the typical active vibration control systems is the active mass damper (AMD). In this paper, an active vibration control system consisting of small shaking table, building model, sensors, signal processing board and AMD is constructed. The dynamic characteristics of these individual systems are investigated through the experimental study. The performance of the active vibration control system is verified through harmonic resonant load excitation on building model.

1. 서론

능동제어 시스템은 지진 및 바람 등의 외부적 진동에 대한 구조물의 응답을 제어하기 위하여 사용되며, 거주자의 사용성과 안전성이 관심사이다. 능동제어는 다양한 동력기를 사용하며 여기에는 힘의 작용방식에 따라 능동질량 감쇠기, 텐돈 제어기 등이 있고, 힘의 발생 방식에 따라 유압식, 공기압식, 전자기식, 모터를 이용한 볼-스크류 형식 등이 있다. 실험시스템을 구성하기 위하여, 지진과 같이 지반을 통하여 가해지는 외부하중을 묘사할 수 있는 진동대(shaking table)가 있어야 하며, 제어의 대상이 되는 구조물 모형, 안전성이 뛰어나며 제어력을 효율적으로 전달할 수 있는 동력기, 구조물의 응답을 측정하는 센서, 그리고 이들 상호간에 신호를 주고 받는 신호처리 부

* 인천대학교 건축공학과 교수

** 인천대학교 건축공학과 대학원 석사과정

*** 현대건설 기술연구소 선임연구원

**** 유니슨산업(주) 기술연구소, 소장

분으로 나눌 수 있다. 이들 개별적인 시스템의 실험 모형 및 사양을 고찰하고 실험을 통하여 각 시스템의 동적특성을 파악한다. 각 시스템의 특성에 따라 제어방식 및 통합된 각 시스템이 영향을 받기 때문에, 개별시스템의 동적특성을 우선적으로 고려하여야 한다.

개별적인 시스템의 특성이 결정되면 이를 이용하여 통합된 제어시스템의 특성을 파악하게 된다. 모든 시스템이 통합된 상태에서 실험을 통하여 입력과 출력만으로 시스템을 기술하는 실험모델은 전달함수를 만들어 실제 시스템의 특성을 구한다. 모델이 결정되면 제어 알고리즘을 적용한다. 제어 알고리즘은 센서에서 얻어지는 가속도를 적분하여 속도와 변위를 구하기 위한 적분과정, 모터의 입력으로 사용하기 위한 제어력의 적분과정, 모터의 발생 속도한계를 고려하기 위하여 변형하기도 한다. 이들 제어에 사용된 여러 변수들에 대하여 제어에 미치는 영향을 실험을 통하여 검증한다.

본 연구의 목적은 건물 모형, 진동대, 동력기, 센서 등 개별적인 시스템을 피드백(feedback) 제어를 이용하여 통합화하여 진동제어의 효과를 검증하는 데 있으므로 건물 모형을 축소시켜 진동대가 발휘할 수 있는 가진력을 작게 하여 소형 진동대를 설계, 제작하였다. 또한 동력기도 소형화된 건물 모형에 적합하게 성능이 좋고 운영하기가 편한 서보 모터를 이용하기로 한다. 또한 힘의 작용방식은 질량을 이용한 능동 질량감쇠기를 적용하기로 한다. 다음은 각 개별 시스템의 사양을 나타낸다.

2. 개별 시스템

2.1 건물 모형

본 연구의 목적은 능동 제어장치를 이용하였을 때의 진동 저감 능력을 살펴보기 위한 시스템을 구성하기 위한 것이므로 건물의 거동은 건물의 고유진동수나 감쇠비 등 동적 특성과 관계가 있으므로 건물 모형의 질량, 강성과 함께 동적 특성을 결정하는 고유진동수에 초점을 맞추어 다음 사진 1. 과 같이 모형을 제작하였으며 전단모드 거동을 하도록 설계하였다. 실제 건물의 1차 고유진동수는 저 진동수로써 10Hz 이내가 대부분이며 지진하중의 진동수 성분도 10Hz 이내의 성분이 주류를 이룬다. 따라서 건물 모형의 1차 고유진동수가 이러한 범위내에 드는 5Hz 내외가 되도록 건물의 질량과 강성을 조절하였다. 또한, 본 연구에서는 실험의 편의상 가진시기는 방향으로의 진동만을 고려하기 위하여 가진 방향과 직각 방향으로의 기동 강성을 크게 하여 가진 방향 이외의 진동을 억제하였다. 다음 표 1.은 건물 모형의 동적 특성을 나타낸다. 특히, 진동제어장치가 건물모형 위에 설치되므로, 전체질량은 바닥판의 질량, 진동제어장치의 질량 및 부가질량체까지 포함한 질량이며, 제어력산정시 사용되는 질량은 왕복운동을 함으로써 관성력을 발생시키는 부가질량체와 볼스크류 너트를 합한 질량으로써 2.7kg 이며, 전체질량의 0.8%에 해당한다.

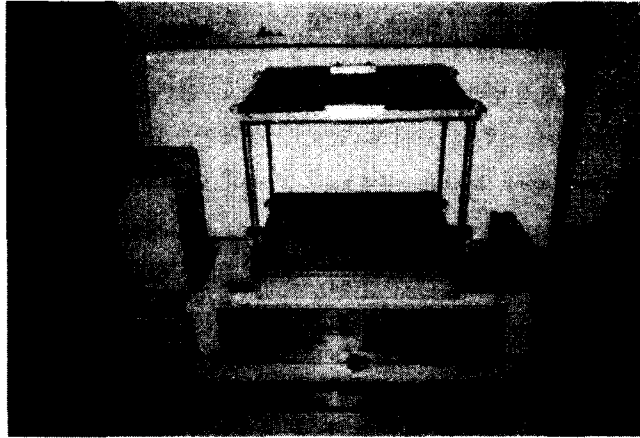


사진 1. 건물 모형

표 1. 건물 모형의 동적특성

	질 량 (kg)	진 동 수 (Hz)	강 성 (N/cm)	감 쇠 비 (%)
특 성 값	32.9	2.7588	98.882	0.35

2.2 진 동 대

본 연구에 이용이 되는 진동대는 본 연구팀이 수동 질량감쇠기의 성능실험을 위하여 사용하였던 스테핑 모터를 이용한 소형진동대를 이용하기로 한다. 이러한 진동대는 1/20로 축소된 E1 Centro 지진 및 Taft 지진 그리고 10Hz 이내의 조화하중을 정확하게 구현하였다. 다음 사진 2.와 표 2.는 진동대와 진동대의 사양을 나타낸다.

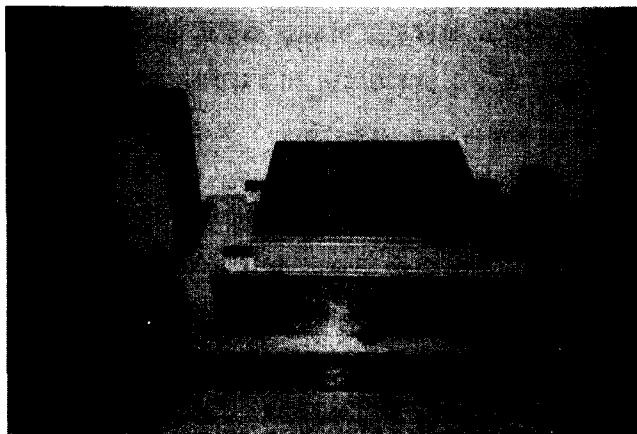


사진 2. 진동대 전경

표 2. 진동대 사양

진동대 허용 구조재 질량	150 kg
최대 발생 가속도	100 cm/sec ²
진동대 바닥판 크기	600 × 600 mm
진동대 자체 질량	500 kg
최대 이동변위	±200 mm
볼스크류 피치	10 mm
감속비 (볼스크류 기어수 / 모터 기어수)	40 / 14

2.3 동력기

제어력을 발생시켜주는 동력기로서 토크성능이 뛰어나고 고속회전이 용이하고 제어성능이 뛰어난 AC 서보 모터를 이용하였다. 이 모터를 구동하기 위하여 사용된 드라이버도 속도 피드백을 이용하여 정확한 회전을 구현하게 된다.

AC 서보모터의 기본구성은 교류전원이 모터 드라이버에 연결되고, 드라이버에서 모터로 구동신호를 보내어 모터가 회전하게 된다. 또한 모터에서 타코 신호를 다시 드라이버로 피드백하여 제어 효율을 높이는 모터 구동부와 원하는 신호를 드라이버로 보내는 제어부로 이루어진다. 원하는 위치로 진동대가 이동하기 위해서는 모터가 원하는 정도로 회전하여야 한다. 이러한 회전을 신호 발생기에서 모터 드라이버로 신호를 보내는 부분이 제어부이다.

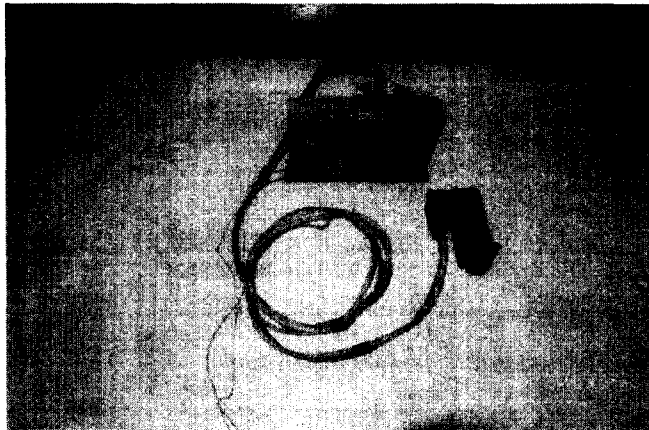


사진 3. AC 서보 모터와 드라이버

2.4 진동제어장치

부가 질량체를 모터로 구동시키고 이때 발생하는 관성력으로 건물에 인위적인 힘을 가하여 진동을 제어하는 장치로써, 원하는 크기의 가속도를 얻기 위하여 모터의 회전운동을 볼스크류를 이용하여 직선운동으로 바꾸도록 설계하였다. 다음 사진 4와 그림 1은 각각 진동제어장치의 전경과 평면 및 입면을 나타낸다. 그림 2는 진동제어장치의 입력과 출력을 비교한 것인데, 서로 비슷하여 입력에 의한 출력이 정확히 나타나는 것을 확인할 수 있다.

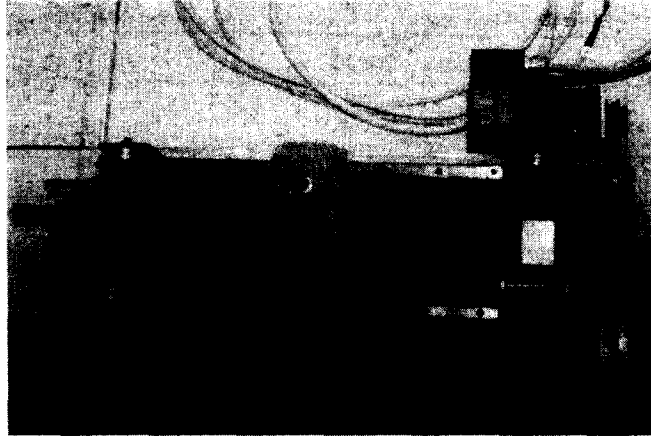


사진 4. 진동제어장치 전경

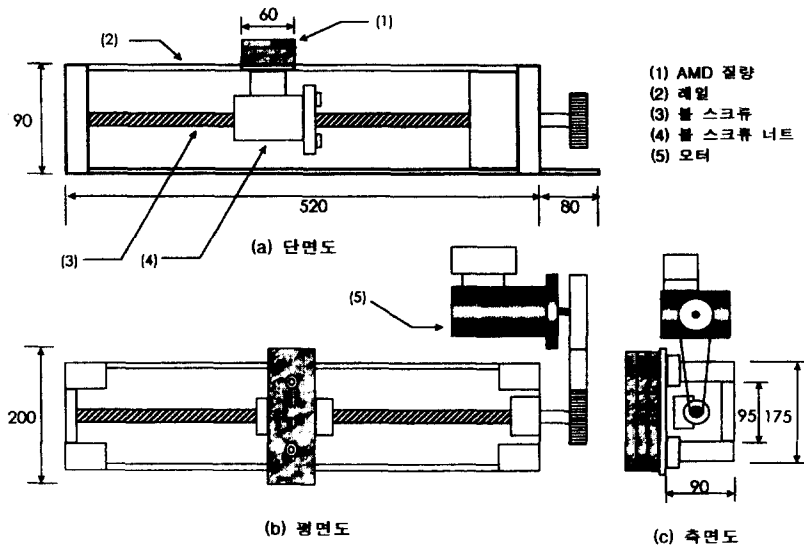


그림 1. 진동제어장치의 평면 및 입면

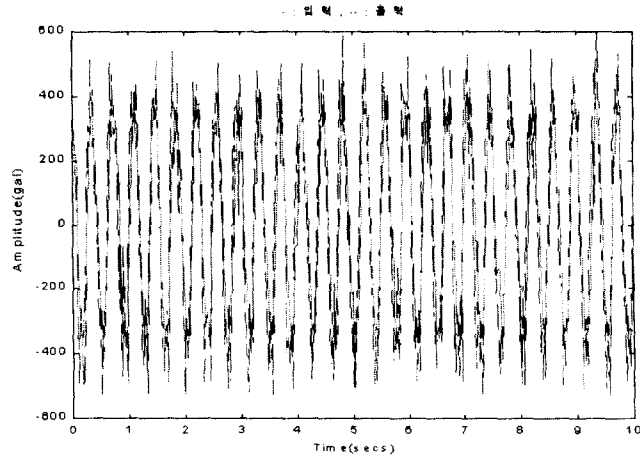


그림 2. 진동제어장치의 입출력 시간이력 비교

진동제어장치의 동적특성을 파악하기 위하여, 모든 진동수 성분이 포함된 그림 3.과 같은 랜덤 파를 입력하여 그림 4.와 같은 진동제어장치의 전달함수를 구하였다. 그림 4.와 같이 진동제어장치의 시스템 특성은 15 ~ 20Hz 에 분포하며, 이는 구조물의 고유진동수인 2.7588Hz 에서 크게 벗어나기 때문에, 구조물의 특성을 증폭시키지 않으므로 본 실험에 적합하다고 판단된다.

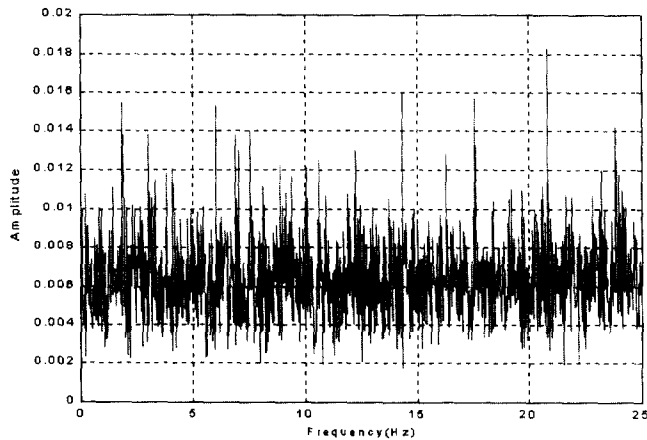


그림 3. 랜덤 입력전압의 진동수 특성

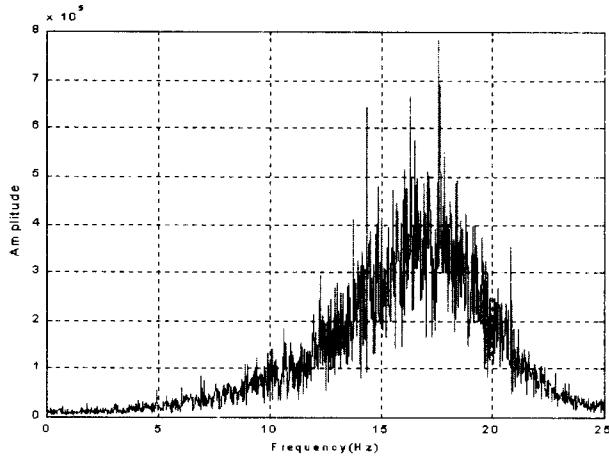


그림 4. 진동제어장치의 전달함수

2.5 신호변환 보드

진동제어장치를 구동시키기 위하여 모터 드라이버에 보내야 할 신호가 아날로그 신호이므로 컴퓨터에서 계산된 디지털 신호를 아날로그 신호로 바꾸기 위해 D/A 보드를 사용하고, 이와 반대로 가속도계에서 측정된 아날로그 신호를 컴퓨터가 처리할 수 있도록 A/D 보드를 사용하여 신호를 이산화시킨다.

신호변환 보드의 잡음을 측정하기 위해, 출력채널로 0V의 신호를 보낸 후, 입력채널로 신호를 취득한 결과가 그림 5와 같이 5mV의 크기로 나타나 있다. 이는 본실험에서 다루는 전압대역이 최소 0.1V 이상인 사실을 감안하면, 5mV의 크기는 5%로써 무시할 수 있는 크기이다. 측정잡음의 동특성을 알 수 있는 자기상관 함수가 그림 6에 나타나 있다. 이는 약간의 시간변화에도 상관성이 없으며, Dirac-delta 함수의 특성을 보이므로, 백색잡음으로 간주할 수 있다.

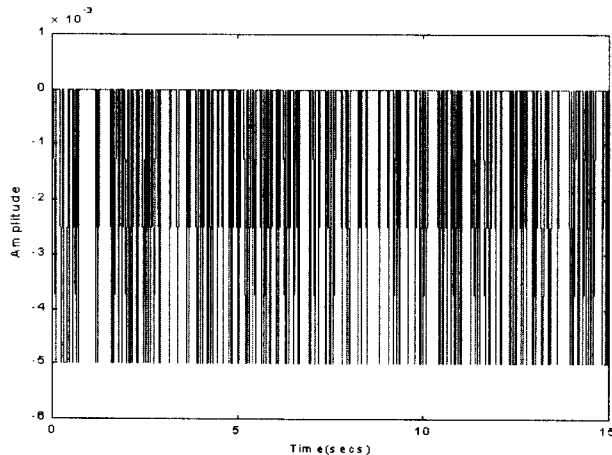


그림 5. 신호변환 보드의 잡음

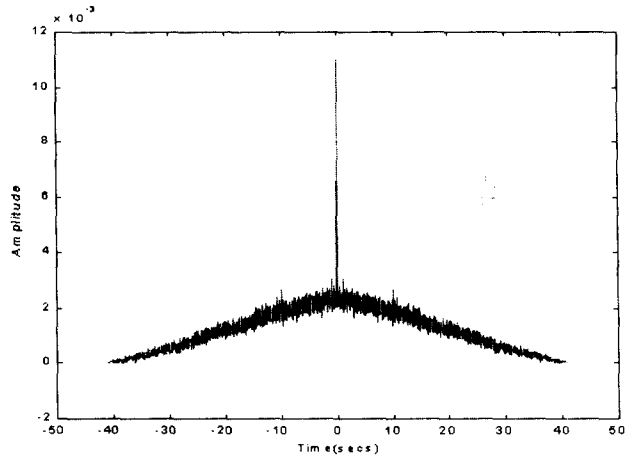


그림 6. 측정잡음의 자기상관함수

3. 시스템 통합에 의한 능동제어

능동제어 실험은 여러 전기, 기계장치로 이루어진 개개의 시스템들이 하나의 통합된 시스템을 구성함으로써 이루어진다. 이 통합된 시스템은 크게 진동제어 시스템과 외란을 발생시키는 진동 발생 시스템으로 나눌 수 있다.

진동제어 시스템을 구성하는 요소로는 구조물의 응답을 측정하는 계측기가 있으며 연속적으로 계측된 신호를 컴퓨터가 처리할 수 있도록 신호를 이산화하는 A/D 변환기, 이산화된 신호를 제어력으로 계산하는 제어알고리즘과 신호의 흐름을 관리하는 소프트웨어가 있다. 제어력으로 계산된 신호는 D/A 변환기를 통하여 연속적인 신호로 치환되어 작동기를 구동하게 된다. 이때 제어신호는 시스템의 특성에 따라 20msec로 이산화된 제어알고리즘에서 계산된다. 구조물의 능동제어는 센서로 측정된 건물의 응답을 근거로 하여 건물의 응답을 센서로 측정하여 최적의 이득을 곱하여 동력기를 통하여 건물에 제어력을 가하여 응답을 제어하는 방식이다. 따라서 그림과 같이 건물의 응답이 건물에 제어력으로 되먹임되는 폐회로 시스템(closed-loop system)이 구성되게 된다.

진동발생 시스템은 이미 이산화 형태로 입력된 기존의 지진이나 인공지진, 조화하중을 진동발생기에 내보내는 역할을 한다. 진동발생 신호 또한 20msec로 매순간마다 프로그램을 통하여 스테핑 모터로 보내진다.

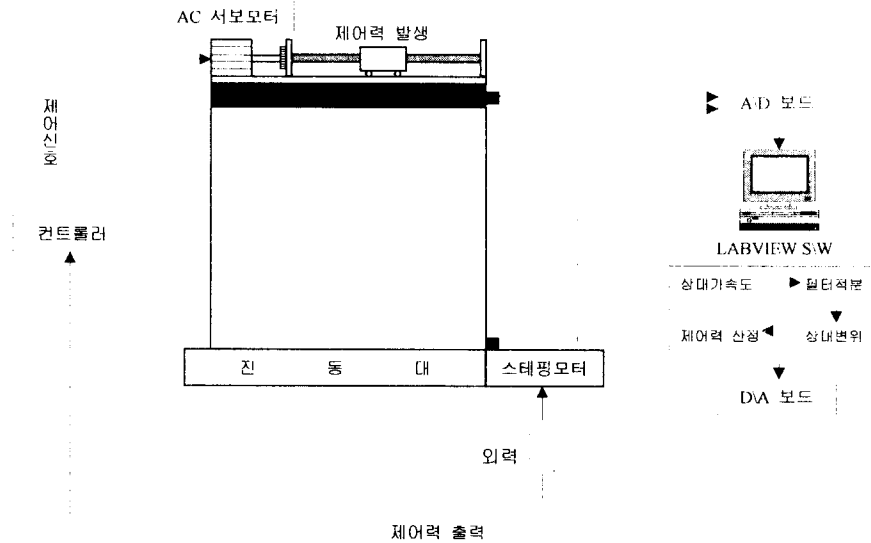


그림 7. 폐회로 시스템

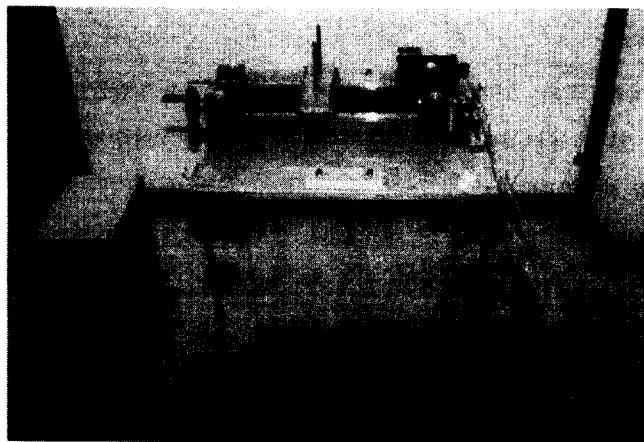


사진 5. 통합화된 진동제어 실험 시스템

위 그림과 같이 위에서 살펴 본 각각의 시스템들이 서로 연결, 통합화되어 건물의 응답을 제어하게 되는 하는데 있어 중요한 사항은 신호의 흐름을 관리하는 소프트웨어의 선정과 되먹임되는 신호의 선정 및 제어이득의 결정이며 마지막으로 제어력 산정에 따른 시간지연에 관한 사항이다.

3.1 신호처리 프로그램

신호의 흐름을 관리하는 소프트웨어는 전용 데이터 취득 프로그램인 Labview 을 사용하였다. 이 프로그램은 컴퓨터에 접속된 A/D, D/A 보드를 인식하여 이로부터 얻어진 전기적인 신호를 처리,

분석하고 필요에 따라 내보내는 역할을 한다. 제어력은 Labview 프로그램 내에서 센서를 통하여 얻어진 신호를 이미 사용자에게 의하여 결정된 제어법칙에 따라 결정된 후 모터드라이버에 보내게 되며 외란은 이미 데이터로 저장된 신호를 진동대의 모터 드라이버에 내보낸다.

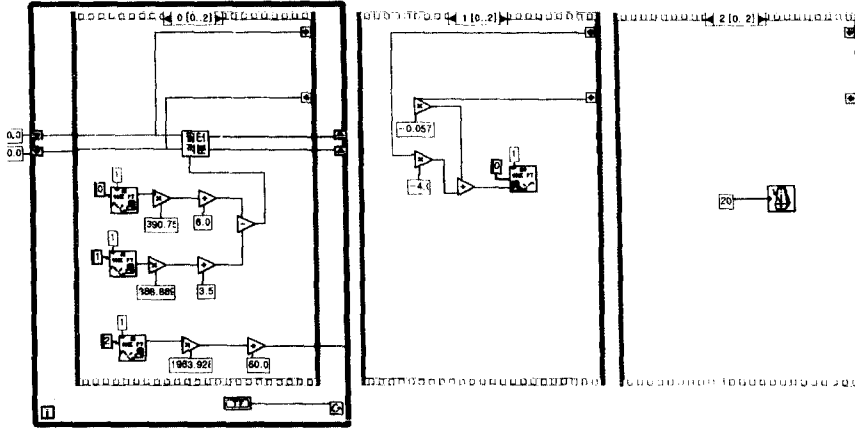


그림 8. Labview 에서 구현한 신호처리 화면

3.2 제어 알고리즘

본 실험에 사용된 진동제어장치는 모터의 회전운동이 볼스크류에 전달되고, 볼스크류는 모터의 회전운동을 부가질량체의 왕복운동으로 변화시킨다. 따라서, 왕복운동하는 부가질량체에 관성력이 발생하게 되고, 이 관성력이 구조물의 응답을 제어하는 제어력이 된다. 그러므로, 제어알고리즘에 의해 계산된 제어력, u ,로부터 부가질량체에 발생되어야 할 가속도, u/m ,를 구하고, 이 가속도를 구현하기 위해서는 모터에 입력해야 할 속도, v ,를 구해야 한다.

$$v = \int_0^t \frac{u}{m} dt \quad (1)$$

윗 식에서 v 는 모터에 입력되는 속도이며, u 는 제어알고리즘에 의해 계산된 제어력, m 은 부가질량체와 볼스크류 너트 질량의 합을 의미한다.

속도피드백의 경우, $u = -k\dot{x}$ 로 표현되므로, (1)식에 대입하면

$$v = \int_0^t \frac{-k\dot{x}}{m} dt = -\frac{k}{m}x \quad (2)$$

윗 식에서 k 는 제어이득이며, x 는 상대변위를 나타낸다. 즉, 순수 속도피드백의 경우, 변위를 모터에 입력함으로써 제어력이 발생하며, 본 실험에 사용되는 진동제어장치의 경우, 모터가 적분기 역할을 하는 것을 알 수 있다.

위와같은 제어알고리즘에 의해, 본 실험에서는 1 층과 지반에 설치된 가속도계로부터 상대가속도를 측정하여, 적분하여 구한 상대변위를 모터의 입력으로 사용하였으며, 제어이득은 시행착오를 통하여 실험적인 방법으로 구하였다.

3.3 시간지연

구조물의 능동제어 시스템 적용시, 가장 큰 문제점 중의 하나가 시간지연의 문제이다. 시간지연은 1) 구조물에 부착된 센서로부터 구조물의 응답을 계측하는 데 걸리는 시간, 2) 계측한 데이터로부터 제어력을 계산하고, 필요한 제어신호를 액츄에이터에 보내는 데 걸리는 시간, 3) 필요한 제어력을 액츄에이터가 실현하는 데 걸리는 시간의 합으로 볼 수 있다.

과도한 시간지연은 1) 시스템의 제어성능을 저하시키며, 2) 위상차에 의한 시스템의 불안정. 즉, 시간지연이 커질수록 위상차에 의하여 제어력의 의도와 반대방향으로 힘을 전달함으로써, 시스템의 제어력이 아닌 외력으로 작용하여 시스템을 발산시킨다. 이는 폐회로 시스템의 전달함수에서 구조물의 고유주기를 증폭시키는 것과 상통한다.

4. 진동제어 검증

다음 그림 9.는 지반에 구조물의 고유주기와 동일한 공진조화하중을 가진하였을 때의 제어성능을 보여주고 있으며, 제어효율이 매우 좋은 것을 알 수 있다.

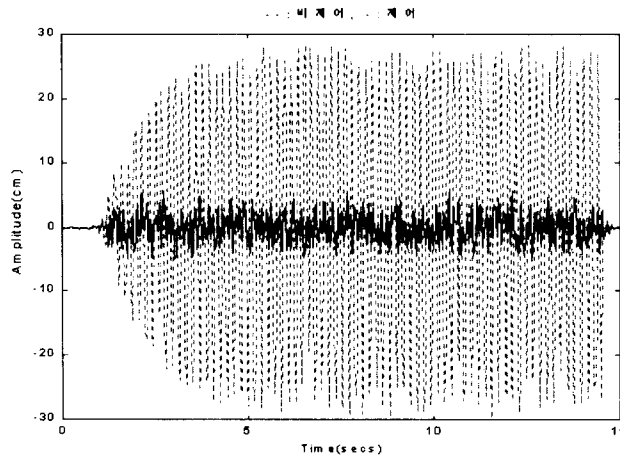


그림 9. 공진하중 가진시 제어효과

5. 결론

본 연구는 구조물의 능동제어에 관한 이론적인 연구를 떠나 실험을 수행하고자 할 때 필요한 실험 시스템을 구성하고 검증하는 데 목적이 있다. 수동제어와는 달리 능동제어는 구조물의 응답을 기준으로 하여 제어력을 산정하고 동력기를 통하여 구조물에 하중을 가하는 폐회로 시스템이 요구된다. 또한 이와 같은 과정이 실시간으로 이루어져야 하며 제어력에 의한 건물의 효율적인 진동제어가 이루어져야 한다.

여러 전기, 기계장치로 이루어진 개개의 시스템들인 건물 모형, 진동대, 동력기, 제어장치, 신호 변환기, 센서 등의 동적 특성을 파악하였으며 신호의 전달과정과 변환을 총괄하여 통합화시켜주는 소프트웨어인 Labview를 사용하여 건물의 응답을 측정하여 적절한 제어력을 산정, 건물의 진동제어를 실현하였다.

위와 같이 통합화된 폐회로 시스템을 구성하여 진동제어를 검증하였으며 향후 제어의 효율을 향상시키기 위하여 다양한 제어 알고리즘을 적용하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처의 특정연구기술개발사업 및 유니슨산업(주)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 대해 감사의 뜻을 전합니다.

6. 참고문헌

- (1) 황재승, “건축구조물의 능동제어에 관한 실험적 연구”, 서울대학교 대학원 건축학과 공학박사학위논문, 1998년 2월
- (2) 민경원, 안원수, “스테핑 모터를 이용한 진동대 설계 및 검증실험”, 인천대학교 대학논문집, 1996년
- (3) 문석준, “대형구조물 진동의 능동제어 방법에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 조선해양공학과 공학박사학위논문, 1995년 8월
- (4) 홍성목, “건축구조물의 진동제어 기술개발에 관한 연구”, 건설교통부연구개발사업 2차년도 연구개발 보고서, 1997년 10월
- (5) Lisa K. Wells, LabVIEW-Student Edition User's Guide, Prentice Hall, 1995
- (6) T.T. Soong, “Active Structural Control : Theory and Practice”, Longman Scientific & Technical, 1990
- (7) A.M. Reinhorn, T.T. Soong, R.C. Lin, Y.P. Yang, Y. Fukao, H. Abe and M. Nakai, “1:4 Scale Model Studies of Active Tendon Systems and Active Mass Dampers for Aseismic Protection”, Technical Report NCEER-89-0026, August 14, 1992