

구조물 진동제어장치 개발 및 최적 면진설계 시스템 개발

Development of the vibration control devices and the optimal base-isolation design system for Structures

김병현*, 정정훈*, 문석준*, 허영철*, 정종안*

ByungHyun Kim*, JungHoon Chung*, SeokJun Moon*, YoungCheol Huh*, JongAhn Chung*

Key Words : Isolator, Damper, Seismic Isolation, Vibration Control, Optimum Isolation

ABSTRACT

Seismic Isolation and Shock/Vibration Control Laboratory has performed the National Research Laboratory(NRL) project, "Design and Application of Control Devices against Earthquake/Shock/Vibration". In this project, the prototypes of the vibration control devices for structural control against earthquake and wind were developed and verified their performances. And also, the computer programs were developed for the seismic response analysis and the optimum design of the base-isolated structures with vibration control devices. This paper introduces the developed vibration control devices and computer programs.

1. 서론

건축 및 토목구조물 등 대형구조물의 진동을 유발하는 주요 기진원은 지진과 바람이다. 그러므로 이를 제어하기 위한 연구는 대형구조물이 많이 건설되고 있고 지진이 많이 발생하고 있는 미국과 일본을 중심으로 시작되었으며, 현재는 유럽, 중국 등에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.

한국기계연구원 제진설계 및 장치 연구실에서는 과학기술부 국가지정연구실 사업으로 수행한 "제진장치를 활용한 제진설계 기술 개발" 과제에서 지진과 바람에 대한 구조물의 진동제어에 활용할 수 있는 제진장치들의 설계와 이들 제진장치를 활용한 구조물의 진동제어에 관한 연구를 수행하였다. 이를 통해 구조물의 지진 또는 바람에 의한 진동제어에 활용할 수 있는 마찰형 Isolator, 오리피스 유체댐퍼, 자기유변 감쇠기 및 자기변형 구동기를 시제 개발하였다. 이들 진동

제어장치 각각에 대하여 단독 성능실험과 구조물에 적용실험 및 해석 평가를 수행하여 성능과 활용성을 검증하였다. 또한, 각종 Isolator 및 댐퍼를 설치한 구조물에 지진하중과 같은 지지부하중이 작용하는 경우 동 응답을 해석하는 프로그램과 면진설계 시에 최적 제진성능을 발휘하는 isolator 및 댐퍼 특성을 결정하는 프로그램을 개발하였다.

본 논문에서는 개발된 진동제어장치들과 프로그램들을 요약 소개한다.

2. 진동제어장치 시제 개발

2.1 마찰형 Isolator

교량, 건물 등의 구조물을 지진으로부터 보호하기 위하여 사용되는 면진장치로 대표적인 것은 적층고무 베어링(LRB; Laminated Rubber Bearing)과 마찰형 Isolator이다. 적층고무 베어링은 국내에서도 제작/실험 연구가 다수 이루어진 바 있으나, 마찰형 Isolator의 경우에는 국내에서

* 한국기계연구원 구조연구부

아직까지 실제 제작하여 실험된 바 없다. 본 연구에서는 마찰진자형(FPS; Friction Pendulum System)과 순수마찰형(PFS; Pure Friction System) Isolator를 시제 제작하였다. 마찰재로는 기존에 많이 사용되는 PTFE를 기본으로 한 복합재를 사용할 때 발생하는 마모 및 변형에 따른 마찰력 증가 및 사용 수명의 문제점을 Polyimide 재료를 사용함으로써 해결하였다. 제작된 시제품에 대하여 단독 성능시험을 수행하여 Isolator의 특성 파악과 수학적 모델을 정립하였다.

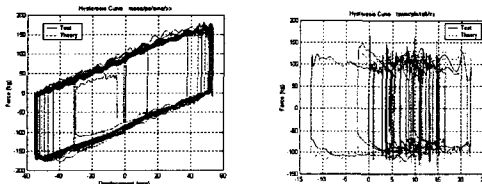


(a) FPS

(b) PFS

Dead Load	800 kg/Unit
Vertical Stress	20 MPa
Diameter of Friction Material	22.3 mm
Radius of Curvature of Upper Plate & Friction Material	0.5 m
Surface Roughness	0.03 μm
Frequency/Period	0.705Hz/1.42 s
Restoring Stiffness	16000 N/m
Total Displacement of Design	400 mm
Plate Material	SC45C Steel
Surface Coating Material/Thickness	Cr / 50 μm

Fig. 1 Prototypes of the Friction Type Isolators and Principal Specifications of the FPS



(a) FPS

(b) PFS

Fig. 2 Prototypes of the Friction Type Isolators and Principal Specifications of the FPS

또한, 구조물 적용시험을 수행하여 면진성능의 확인과 면진 구조물 면진성능해석 프로그램의 검증에도 활용하였다. Fig. 3은 5층 철골 프레임 구조물에 FPS를 설치하여 지진시험을 수행하여 면진성능을 평가한 예이며, Fig. 4는 쌍계사 석탑 모형에 PFS를 적용하여 지진시험을 수행하여

면진성능을 확인한 결과이다. PFS는 복원력이 없는 제진장치이므로 LRB와 같이 사용하였다. 일련의 시험을 통하여 마찰형 Isolator는 작은 마찰력에 의해서도 대상 구조물의 지진응답 감소 효과가 우수하지만, 정지 마찰력을 초과하는 일정 크기 이상의 지진파에서 그 효과가 좋음을 확인할 수 있었다.

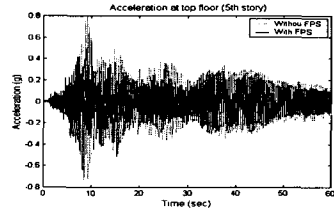


Fig. 3 Comparison of seismic response of five stories steel frame structure with/without FPS

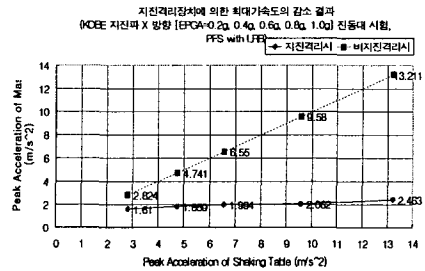


Fig. 4 Comparison of seismic response of five stories stone pagoda with PFS +LRB

2.2 오리피스 유체댐퍼

오리피스를 이용한 유체댐퍼(OFD; Orificed Fluid Damper)는 제작비용이 저렴하고, 감쇠력이 크며 설치가 용이한 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 OFD의 기본적인 특성파악을 위하여 최대 감쇠력이 약 2톤인 수동형 OFD를 설계·제작하고 일련의 실험을 수행하였다. OFD는 실린더 단면적의 크기, 사용 오일의 종류 및 온도, 오리피스의 형상 및 크기에 따라 다른 특성을 가진다. 따라서 오리피스의 직경, 동작 주파수 및 변위 크기에 따른 감쇠력 특성을 실험을 통해 조사하였다. 제작한 OFD를 6층 철골 시험구조물에 설치하여 랜덤파형 및 지진파형 가진 실험을 통해 OFD가 시험구조물의 1차 모드는 물론 고차 모드 모두를 동시에 제어함에 매우 효과적임을 확인하였다. 또한, OFD를 선형 등가

맥스웰 모델로 수학적으로 모델링하고, 이를 이용한 수치모사 결과와 실험 결과를 비교한 결과, 두 결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 실용화/상용화 관점에서, 개발된 OFD에 대해 2백만회의 반복하중 내구성 시험을 수행하였으며, 특성 변화는 거의 없는 것으로 확인되어 실용화 가능성을 확인하였다.



Piston Rod Diameter	35mm
Piston Head Diameter	55mm
Effective Piston Area	14.14cm ²
Maximum Stroke	±50mm
Maximum Damping Force	2000kgf
Used Oil	Compressible DTE24

Fig. 5 Prototype and Principal Specifications of the OFD

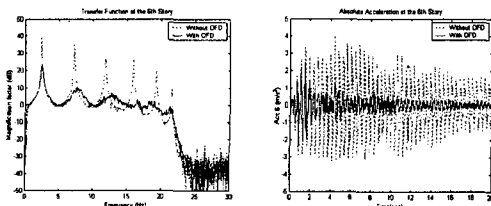


Fig. 6 Control Performances of the OFD under Random Excitation and Earthquake for 6-Story Steel Structure

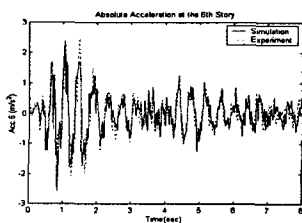


Fig. 7 Comparison of the Simulation and Experimental Results under Earthquake for 6-Story Steel Structure with the OFD

또한, 최대 제어력이 약 2톤인 반능동형 OFD를 설계·제작하였다. 이것은 수동형 OFD에 스프링과 댐퍼와 직경이 다른 2개(1mm, 2mm)의 오리피스를 설치하여 2단 OFD를 구현하였다. 반능동형 OFD의 제어를 위한 제어 로직은 clipped-optimal algorithm을 사용하여 설계하였다. 기본적인 특성파악을 위하여 만능시험기를 이용하여 단독 성능시험 수행하였으며, 각 단계

(Passive-On 및 Passive-Off)에서의 특성을 파악하였다. 시험 결과를 바탕으로 선형 등가 맥스웰 모델로 수학적으로 모델링하고, 이를 이용한 수치실험결과와 시험결과를 비교한 결과 두 결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 6층 철골 시험구조물에 설치한 후 랜덤파형 및 주파수 특성이 상이한 여러 가지 지진파형에 대해 진동대 실험을 수행하여 진동제어 효과를 실험적으로 확인하였다. 대부분의 경우 Passive-On 제어와 반능동 제어에서의 결과가 Passive-Off 제어에서의 결과보다 우수한 것으로 나타났으나, 일부 시험구간에서 Passive-Off 제어의 결과가 Passive-On 제어보다 우수한 경우도 발견되었다. Passive-On 제어와 반능동 제어의 비교에서는 어떤 제어방법이 더 우수하다고 단정할 수 없었으며, 지진파형과 관심구조응답에 따라 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 설치될 구조물의 특성 및 설계하중(지진) 특성을 고려하여 제어방식을 결정해야 함을 알 수 있었다.

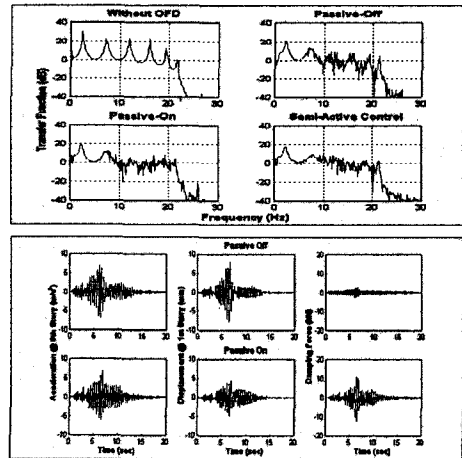
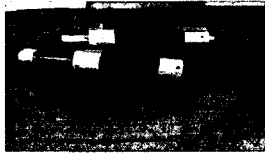


Fig. 8 Control Performances of the Semi-active OFD under Random Excitation and Earthquake for 6-Story Steel Structure

2.3 반능동형 자기유변 감쇠기

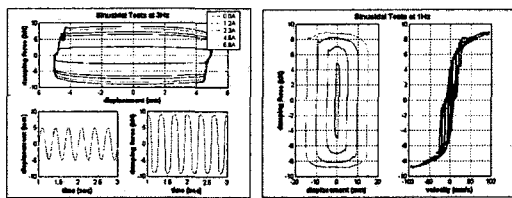
반능동형 진동제어장치는 장치의 특성을 실시간으로 변경 가능한 반면, 소규모 에너지만을 요구한다. 따라서 작은 전력원을 이용하여 능동형과 같은 적용성을 얻을 수 있는 장치로서 많은 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 국외에서 진행되었던 유사한 연구결과를 바탕으로 지반 기진력을 받고 있는 구조물의 진동제어를 위한 자기

유변 감쇠기를 자체 설계·제작하였다. 제작한 자기유변 감쇠기의 성능을 확인하기 위해 단독 성능시험 및 구조물 적용시험을 수행하였다. 단독 성능시험에서는 입력전류, 변위 및 속도 의존성을 조사하였으며, 속도 의존성이 매우 큰 것을 확인하였다. 6층 시험구조물을 이용한 적용시험에서는 랜덤파형 및 지진파형에 대한 시험을 수행하였다. 랜덤파형 시험에서는 가속도 응답 레벨을 각 고유진동수에서 약 10dB이상 제어할 수 있음을 확인하였다. 특성이 다른 지진파형에 대한 시험결과 모든 파형에 대해 약 30~60% 지진 응답을 제어할 수 있음을 확인하였다.



Max. Force (F)	10kN
Max. Stroke	± 30 mm
Designed Velocity	62.8mm/sec
Cylinder Outer Diameter	95mm
Cylinder Inner Diameter (D_2)	80mm
Piston Diameter (D_0)	35mm
Coil Size (Diameter)	20gage(0.81mm)
Coil Turns (N)	800 turns
Designed Current (I)	2A

Fig. 9 Prototype and Principal Specifications of the MR Damper



Current-Dependent Curves at 3Hz Disp.-Dependent Curves at 1Hz

Fig. 10 Characteristics of the MR Damper

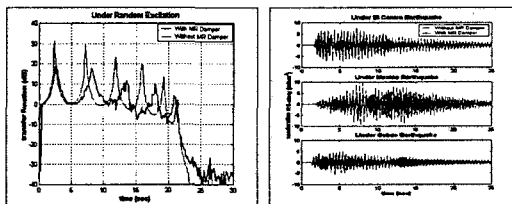


Fig. 11 Control Performances of the MR Damper under Random Excitation and Earthquake for 6-Story Steel Structure

2.4 능동형 자기변형 구동기

Terfenol-D 재료는 자기장의 변화에 따라 생기는 재료의 변형률을 이용하여 힘을 내는 자기 변형 지능 재료이다. 본 연구에서는 지름 25mm, 길이 100mm인 Terfenol-D 막대를 이용하여 선형 자기변형 구동기(MSA)를 설계 및 제작하였고, 이의 기본적인 특성을 파악하기 위해서 50Hz이하의 주파수 영역에서 일련의 동특성 실험을 수행하였다. 제작된 구동기는 3A 이하의 인가 전류에 대하여 선형적인 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 자기장 해석에 의해 예측된 구동기의 유도 자유 변위는 실험에 의해서 측정된 값과 거의 일치하였다. 제작된 구동기의 블록힘은 구동기의 외부에 구조물을 연결한 상태에서 힘과 변위를 동시에 측정함으로써 간접적으로 추정하였다. 이를 바탕으로 구동기의 블록힘은 구동기의 강성과 구동기의 유도 자유 변위의 곱으로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 그리고 구동기가 외부 구조물과 연결된 경우에, 구동기의 변위와 발휘되는 힘은 외부 구조물의 강성과 유도 자유 변위를 알면 가능함을 확인하였고, 구동기의 변위와 힘을 나타내기 위한 모델 방법의 타당성을 확인하였다. 또한, 양 끝단이 각각 MSA로 지지된 알루미늄 보에 대하여 수치 및 실험적인 시험을 수행하여 저차 4개의 탄성모드를 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

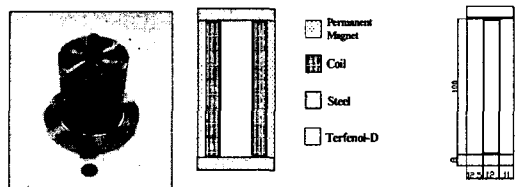


Fig. 12 Prototype of the MSA

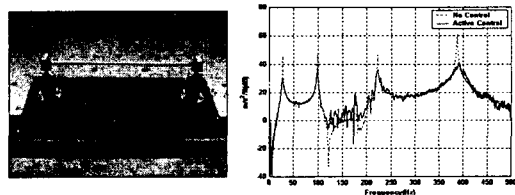


Fig. 13 Control Performances of the MSA under Impact Test for Beam Structure

3. 최적 면진설계시스템 개발

내진설계를 위한 효과적인 대안으로써 구조물에 지진격리장치 및 댐퍼 등과 같은 제진장치의 설치를 들 수 있는데, 이 경우 전체 계에 대한 상세한 면진성능해석이 반드시 필요하다. 또한, 제진장치를 사용하여 구조물 면진설계를 하는데 있어서 좋은 효과를 발휘할 수 있는 제진장치의 특성을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 상용 프로그램과의 연계를 통해 각종 제진장치가 적용된 3차원 면진구조물의 동특성을 정도 높게 계산할 수 있는 면진성능해석 프로그램인 NLDA-BIS와, 주어진 조건하에서 가장 효과적인 면진성능을 발휘하는 최적의 제진장치 특성을 결정할 수 있는 최적 면진설계 프로그램인 OPT-BIS를 개발하였다.

3.1 구조물 면진성능해석 프로그램

개발프로그램 NLDA-BIS에서는 대상 면진구조물을 2개의 부분구조 즉, 상부구조물과 면진장치를 설치하기 위한 구조하부인 base 구조로 분리하여 각 부분구조에 대한 운동방정식으로부터 전체 계에 대한 운동방정식을 유도하였다. 해석 모델링의 대부분을 차지하는 3차원 상부구조물에 대해서는 상용 유한요소 구조해석 프로그램을 사용하여 고정지지부의 고유진동 해석을 한번만 수행하게 되고, 계산결과인 고유진동수와 고유모드를 입력 자료로 활용하기 때문에 여타의 상용 유한요소 구조해석 프로그램과도 연계가 가능하다. 또한, 상부구조물과 지진격리장치 및 댐퍼를 분리하여 취급하기 때문에 이들 지진격리장치 및 댐퍼의 특성변경에 따른 응답 재해석도 매우 효과적으로 수행할 수 있으며 지반하중의 경우 시간이력의 형태뿐만 아니라 응답스펙트럼의 형태로 주어지는 하중까지도 고려할 수 있다.

NLDA-BIS에서는 현재 사용되고 있는 아래와 같은 대부분의 지진격리장치 및 댐퍼를 모델링할 수 있다. 즉,

- 고무적층베어링과 같은 선형 지진격리장치
- 납삽입 고무 적층베어링, 금속댐퍼와 같은 단일 또는 양방향의 비선형 지진격리장치 및 댐퍼
- 탄성-마찰베어링, 순수마찰베어링, 마찰진자베

어링과 같은 단일 또는 양방향의 비선형 지진격리장치

- 고감쇠 고무베어링과 같은 비선형 stiffening hysteretic isolator
- 각종 선형 및 비선형 댐퍼

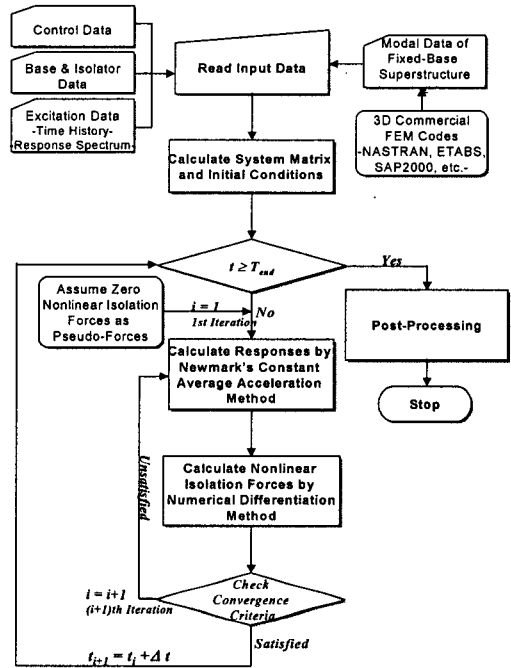


Fig. 14 Flow chart of the program "NLDA-BIS"

개발프로그램은 수치계산 예제 및 6층 프레임 구조물에 대한 지진응답 실험을 통해 정확도를 검증하였다.

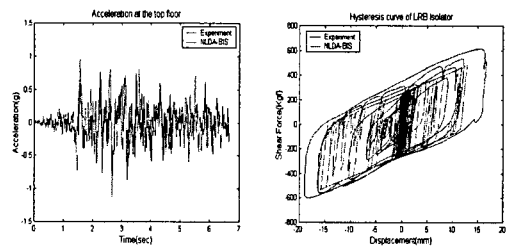


Fig. 15 Verification Example of NLDA-BIS

3.2 구조물 최적 면진설계 프로그램

지진격리장치 및 댐퍼를 이용한 구조물의 내

진 설계를 위해서는 주어진 설계요구 조건하에서 최적의 성능을 갖는 지진격리장치 및 댐퍼의 특성을 선정할 필요가 있다. 내진 설계를 위한 설계 지진하중은 시간이력의 형태로 사전에 알 수 없기 때문에 설계 지진하중을 random process로 가정하고, 확률론적 방법에 의거한 면진 구조물의 최적설계 방법이 요구된다. 본 연구에서는 지진하중을 stationary Gaussian filtered white noise로 가정하여 평균, 표준편차 등의 통계학적 물리량으로 표현되는 면진 구조물의 응답을 이용하여 설계요구조건하에서 확률적으로 가장 효과적인 면진성능을 얻을 수 있는 제진장치의 최적 특성치를 결정하는 최적 제진설계 프로그램(OPT-BIS; OPTimum design of Base Isolated Structures)을 개발하였다. 선형강성, 점성감쇠 및 마찰(hysteretic) 요소의 복합체로 이상화시킬 수 있는 대부분의 제진장치를 적용한 면진 구조물에 적용이 가능하다. 전단형 면진 구조물에 대해 마찰형 지진격리장치, 마찰진자형 지진격리장치 및 hysteretic 지진격리장치들의 특성치를 설계변수로 택하여 수치계산을 수행하고 검증하였다. Fig. 16은 개발된 최적 제진설계 프로그램의 흐름도를 보여주고 있다.

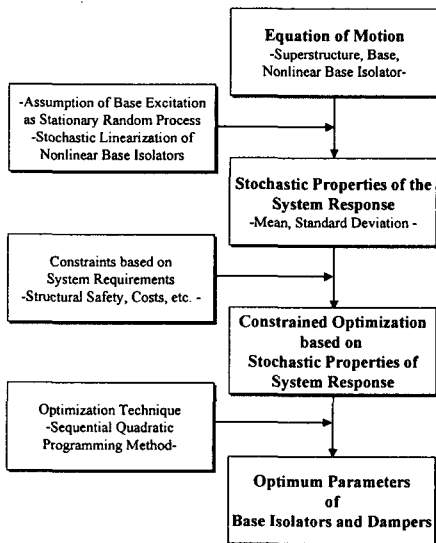


Fig. 15 Flow chart of the program "OPT-BIS"

3. 결론

구조물의 지진 또는 바람에 의한 진동제어에 활용할 수 있는 마찰형 Isolator, 오리피스 유체 댐퍼, 자기유변 감쇠기 및 자기변형 구동기를 시제 개발하였다. 이를 통하여 구조물의 진동제어에 활용할 수 있는 다양한 제진장치의 설계 및 제작에 대한 핵심기술들을 확보하였다. 또한, 각종 Isolator 및 댐퍼를 설치한 구조물에 지진하중과 같은 지지부 하중이 작용하는 경우 동 응답을 해석하는 프로그램과 면진설계 시에 최적 제진성능을 발휘하는 isolator 및 댐퍼 특성을 결정하는 프로그램을 개발하였다. 이들 프로그램은 Isolator 및 댐퍼를 활용한 구조물의 면진설계와 이에 대한 평가 및 Isolator, 댐퍼의 개발연구에 핵심적인 도구로 많은 활용이 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원 하에 국가지정 연구실사업으로 수행한 "제진장치를 활용한 제진 설계기술 개발"과제의 일환으로서 수행되었다.

참고문헌

1. 정태영, 임채욱, 김병현, 문석준, 2002, "오리피스 유체댐퍼를 이용한 건축구조물 진동제어의 실험적 연구", 한국소음진동공학회 논문집, 제12권, 제6호, pp.469-477
2. 문석준, 김병현, 정종안, 2004, "반능동형 오리피스 유체댐퍼를 이용한 구조물 진동제어에 관한 실험적 연구", 한국지진공학회 논문집, 제8권 제2호, pp.55-62
3. 임채욱, 정태영, 문석준, 김병현, 2003, "Terfenol-D를 이용한 선형 자기변형 구동기의 설계 및 특성 연구", 한국소음진동공학회 논문집 제13권 제4호, pp.308~316
4. 정정훈, 허영철, 김병현, "면진 구조물의 지진응답 해석 프로그램 개발", 한국지진공학회 추계학술발표회, pp.348-355, 2001
5. 정정훈, 김병현, 양용진, "면진구조물의 최적설계에 관한 연구", 한국지진공학회 추계학술발표회, pp.339-347, 2001
6. 허영철, 김영중, 김병현, "신경망 이론을 적용한 납 삽입 적용 고무베어링의 비선형 모델링 기법에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제8권 제4호, pp.97-103