

## 면진 및 제진 구조물의 경계비선형 시간이력 해석

박 지 훈\*

### 1. 서 론

근래에 들어서 바람이나 지진 등의 동적하중에 의해 발생하는 구조물의 과도한 응답을 제어하기 위한 방법으로 면진 및 제진 기술이 연구의 단계를 넘어서서 기존의 내진구조에 대한 대안으로서 널리 적용되고 있다. 기존의 내진설계는 크게 강도 증가와 연성증가의 두가지 방법으로 분류될수 있다. 이 가운데 강도증가에 의한 내진설계의 경우 지나치게 큰 부재가 설계되어 비경제적이며 구조물의 갑작스런 취성 파괴 양상에 의해 큰 인명피해를 유발할 수 있다. 연성증가에 의한 내진설계는 구조부재의 소성변형에 의해 지진에너지를 흡수함으로써 지진하중의 크기를 효과적으로 줄일 수 있도록 하는 방법이지만 지진발생 이후의 보수보강이 어렵고 비용도 많이 들게 된다.

반면에 면진 및 제진 구조는 구조물에 유입되는 진동에너지를 부가적인 제진장치나 면진장치에 집중시킴으로써 구조물을 보호한다. 따라서 면진 및 제진 구조가 비록 초기 건설 비용은 일반 내진구조물에 비교하여 유사하거나 약간 높지만 구조물 자체의 소성변형을 방지하거나 최소화하므로 지진

이후의 보수·보강이 용이하고 비용이 적게 든다는 장점을 가지며 구조물에 전달되는 지반진동을 효과적으로 차단 혹은 감소시켜서 내부에 수용된 여러 장비와 문화재 등을 보호하는데 있어서도 보다 월등한 성능을 갖는다.

면진 및 제진 기술은 주로 지진 다반 지역의 교량, 병원, 원자력 발전소 등의 중요 시설물 들을 위주로 실제 적용이 시작되었고, 1994년 Northridge 지진, 1995년 Kobe 지진에서 면진 구조물의 우수성이 입증된 이래 그 적용이 광범위하게 확대되어 가고 있는 추세이다. 중앙진지역에 속하는 국내에서도 40여개의 교량에 면진장치가 설치되었고, 건축물에 있어도 점차 지진에 대한 사회적 인식이 확대되어감에 따라 주거 및 업무용 건물에 면진장치가 적용되기 시작하였다. 또한 인천 및 양양의 공항 관제탑에 제진장치가 설치, 운용되고 있다.

이상과 같이 점차적으로 늘어가는 국내의 면진 및 제진 구조에 대한 수요에 부응하고 아울러 이와 같은 구조형식이 널리 적용되고 있는 일본, 미국 시장의 진출을 겨냥하여 MIDASIT에서는 MIDAS/Gen 및 MIDAS/Civil에(이하 MIDAS로 통칭함) 경계비선형 시간이력해석 기능을 추가하게 되었다. 경계

\* (주)마이다스아이티 기술연구소 대리

비선형 시간이력해석 기능은 면진 및 제진 구조물의 특성상 비선형 거동이 주로 면진 및 제진 장치에서만 발생하는 점에 근거하여 모드중첩법을 이용한 비선형 시간이력 해석으로서 본 원고에서는 먼저 면진 및 제진 장치의 원리와 종류에 대해 알아 본 뒤, MIDAS에서 제공하는 이들 장치의 모델 및 경계비선형 시간이력해석의 이론적 배경을 설명하고 해석예제를 통해 면진 및 제진 장치의 효과를 검증해 본다.

## 2. 면진 및 제진 장치의 원리

### 2.1 면진장치

면진장치는 지반의 진동으로부터 구조물을 보호하기 위해 진동의 전달을 차단하는 장치로서 낮은 강성과 큰 연성을 보유하며 진동의 주요 전달 경로인 건축물의 지상구조와 기초 사이 및 교량의 교각과 상판 사이 등에 설치한다. 이는 전체 구조물의 주기를 증가 길게 만들어 주는데 구조물의 주기가 강성에 반비례하기 때문이다. 주기의 증가는 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 응답스펙트럼

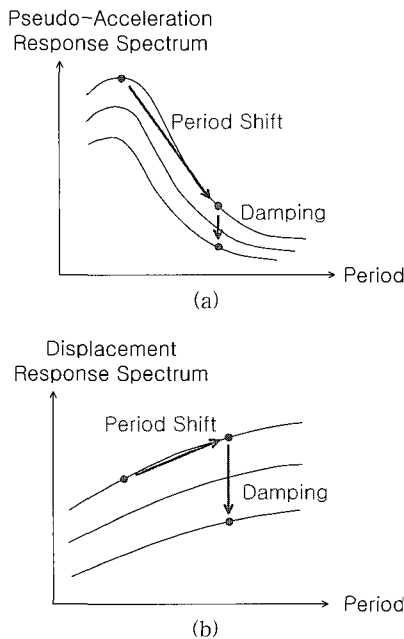


그림 1 면진장치의 효과

상에서 의사가속도(pseudo-acceleration)를 감소시키며 이는 지진하중의 감소로 직결된다. 단 이 때 문제가 될 수 있는 것은 면진 층에 과도한 변위가 발생할 수 있다는 것이다. 이는 인접 구조물과의 충돌, 배관 손상, 면진 층에서의 불안정성(instability) 등을 초래할 수 있으므로 적정치 이내로 제한할 필요가 있다. 면진 층의 변위 제한은 면진장치에 에너지 소산능력을 증가시킴으로써 얻어질 수 있으며 이는 그림 1에서 확인할 수 있듯이 변위 응답스펙트럼에서 감쇠비의 증가에 따라 변위가 감소하는 것으로부터 확인할 수 있다. 이와 같은 에너지 소산능력은 부가적인 감쇠장치를 추가하여 얻기도 하지만 근래 들어서는 면진장치 자체의 재료적 특성을 통해 얻어지고 있다.

### 2.2 제진장치

제진장치는 그림 2에서 볼 수 있듯이 주로 에너지 소산작용에 의해 구조물에 유입되는 지진 에너지를 흡수하여 구조물의 감쇠능력을 향상시킴으로써 응답스펙트럼 상에서 변위감소의 효과를 얻게 된다. 감쇠 능력의 증대를 통해 응답을 감소시키므로 단주기 구조물을 주요 대상으로 하는 면진장치와는 달리 고층 건물에서도 충분한 효과를 볼 수 있으며 지진 뿐만 아니라 풍하중에 대한 거주성 향상의 목적으로도 사용되고 있다.

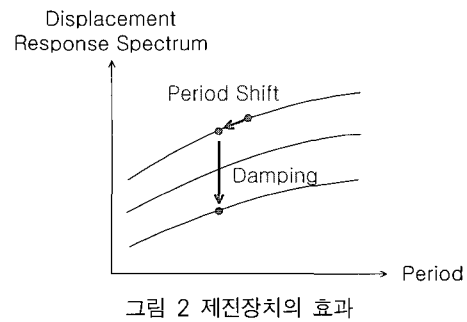


그림 2 제진장치의 효과

## 3. 면진 및 제진 구조의 해석

면진 및 제진 장치를 설계, 적용함에 있어서 가장 큰 문제점은 면진 및 제진 장치가 갖는 재료적 비선형성으로 인해 설계 중이거나 또는 설계 된

면진 및 제진 장치의 성능을 해석하기 위해서 비선형 해석이 요구된다는 점이다. 이와 관련하여 UBC97에서는 면진 및 제진장치의 비선형성이 강한 경우에 반드시 비선형 시간이력해석을 수행하도록 규정하고 있다. 비록 등가강성과 등가감쇠비를 이용한 선형 응답스펙트럼 해석이나 설계과정에서 유용하게 사용될 수 있지만 비선형 속성을 이용하는 면진 및 제진 장치의 사용과 비선형해석 기법의 발전으로 인해 최종단계에서는 비선형 시간이력 해석을 수행하여 설계결과를 검증하는 절차를 밟는 것이 일반적이다.

이번에 MIDAS에 추가되는 경계비선형 시간이력해석 기능은 면진 및 제진 장치의 모델링과 해석을 주 목적으로 개발된 동적 비선형해석 기능이다. 동적 비선형해석은 구조 부재의 비선형 거동에 대한 규명과 모델링이 아직 충분히 이루어지지 않은 상태이며, 해석에 드는 시간이 매우 길기 때문에 아직 널리 사용되고 있지 않다. 그러나 다행히도 면진 및 제진 장치의 경우에는 그 거동이 상대적으로 일반 구조 부재에 비해 단순하고 따라서 여러 실험을 통해 충분히 검증된 모델들이 존재한다. 또한 면진 및 제진 장치는 그 특성 및 사용 목적에 있어서 구조물의 소성변형을 방지하거나 낮은 수준에 머물게 하는 것이기 때문에 비선형 거동은 이들 장치에서만 발생하고, 나머지 다른 부재들은 탄성인 것으로 가정하여 해석하는 것이 전체 구조물을 비선형 구조로 보고 해석하는 것보다 합리적, 효율적이다. 따라서 본 해석 기능은 이 점을 이용하여 보다 효율적으로 비선형 시간이력해석을 수행할 수 있도록 개발 되었다. 또한 가장 널리 사용되는 면진 및 제진 장치를 모델링 할 수 있는 비선형 연결 요소(Nonlinear Link)가 추가되었다.

#### 4. 비선형 연결요소

##### 4.1 비선형 연결요소의 구성

MIDAS에 추가되는 비선형 연결요소(Nonlinear Link)는 그림 3과 같이 2개의 절점을 연결하는 6개의 스프링으로 구성되며, 이 가운데 일부의 스프링만을 선택하여 이용할 수 있다. 각각의 스프링은

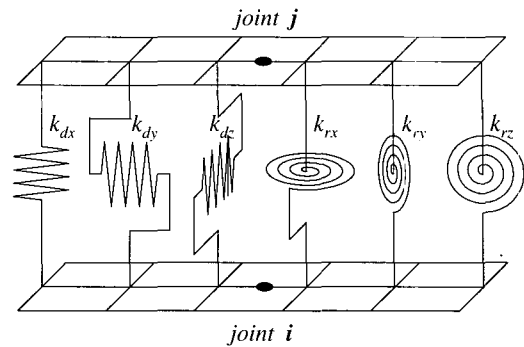


그림 3 비선형연결요소의 구성

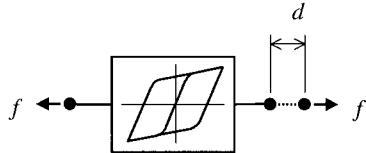
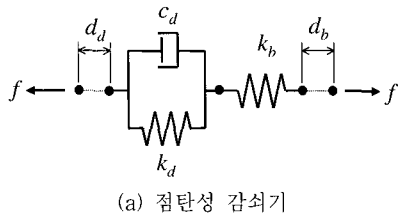
유효강성 값을 갖게 되며 앞서 설명한 면진 및 제진 장치의 모델링을 위해 각각의 스프링에 독립적인 혹은 상호 연관된 비선형 속성을 입력할 수 있다. 유효강성은 뒤에서 설명할 모드중첩법에서 필요한 고유치해석과 면진 및 제진장치가 설치된 구조물의 선형탄성 해석의 수행에 사용된다. 후자의 해석은 상시하중에 대해 면진 및 제진 장치가 소성변형 없이 충분한 저항 능력을 발휘하는지를 검토하기 위해 필요하다.

이들 비선형 연결요소에는 제진장치로 이용되는 점탄성 감쇠기(Viscoelastic Damper) 및 이력거동 시스템(Hysteretic System)과 납삽입고무베어링형 면진장치(Lead Rubber Bearing type Isolator), 마찰진자형 면진장치(Friction Pendulum System Isolator)가 있으며, 이 가운데 이력거동 시스템은 주로 금속항복형 감쇠기(Metallic Yield Damper)의 모델링에 사용된다.

#### 4.2 면진 및 제진 장치의 동적 특성

##### 4.2.1 점탄성감쇠기(Visco-elastic Damper)

점탄성 감쇠기는 점성과 탄성을 동시에 갖고 있는 제진장치이다. MIDAS의 점탄성 감쇠기는 그림 4와 같이 병렬 연결된 점성 대시포트(dashpot)와 탄성 스프링의 조합이 다른 탄성 스프링과 직렬 연결된 형식을 취하고 있다. 따라서 전자의 스프링 강성  $k_d$ 를 0으로 입력 하거나 후자의 스프링을 강제로 입력함으로써 Maxwell 모델과 Kelvin 모델 가운데 한가지를 선택할 수 있다. 또한 점성 대시포트의 감쇠는 선형 점성감쇠 뿐만 아니라 변형



(b) 이력거동 시스템 및 납삼입고무베어링형 면진장치 전단스프링

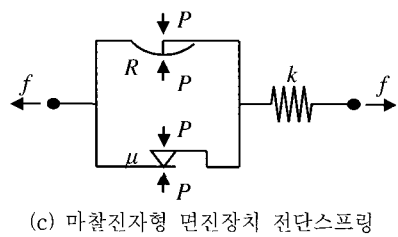


그림 4 비선형 연결 요소를 구성하는 주요 비선형 스프링

변화율의 지수 승에 비례하는 비선형 점성감쇠로 모델링 할 수 있다.

#### 4.2.2 이력거동시스템(Hysteretic system)

이력거동 시스템은 1축소성(Uniaxial Plasticity)의 특성을 가진 6개의 독립적인 스프링으로 구성된다. 이력거동 시스템은 Wen(1976)의 미분방정식 모델에 의거하여 bilinear 형태의 이력거동을 모델링하기 위한 비선형 연결요소로서 금속 항복형감쇠기(Metallic Yield Damper)를 모델링하는데 유용하게 사용될 수 있다. 금속항복형 감쇠기는 금속 재료의 항복에 의해서 진동 에너지를 소산시키는 형식의 제진장치로서 주변 부재에 비해 상대적으로 큰 강성과 낮은 항복강도를 갖도록 설계하여 주변 부재보다 먼저 소성변형을 일으키도록 한다. 적절한 파라미터의 설정을 통해 이력곡선의 형태를 변화시킬 수 있으며 그 예를 그림 5에 나타내었다. 여기서 이력거동에 의한 에너지 소산량은 이력곡선에 의한 폐곡선의 면적에 비례하게 된다.

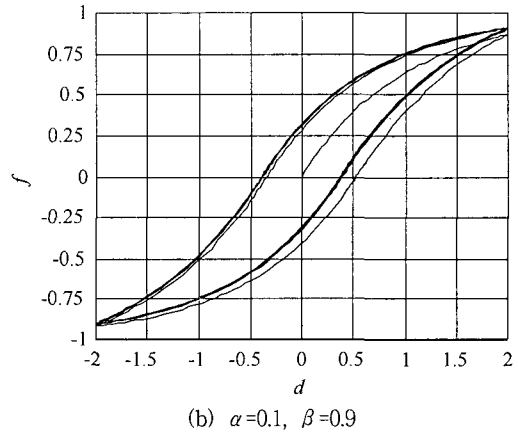
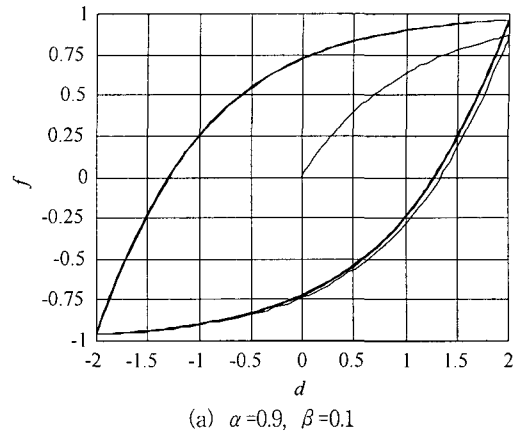


그림 5 이력거동에 의한 변위-내력 관계  
( $r=0, k=F_y/s=1.0$ )

#### 4.2.3 납삼입고무베어링형 면진장치

(Lead Rubber Bearing type Isolator)

납삼입고무베어링형 면진장치는 2개의 전단방향 변형에 대해서 상호 연관된 2축 소성(Biaxial Plasticity)의 특성을 가지며, 1축소성에 대한 Wen(1976)의 모델을 확장시킨 Park, Wen, and Ang(1986)의 2축소성(biaxial plasticity) 모델을 채택하고 있다. 나머지 4개 방향의 변형에 대해서는 상호 독립된 선형탄성 스프링의 속성을 입력할 수 있다.

#### 4.2.4 마찰진자형 면진장치

(Friction Pendulum System type Isolator)

마찰진자형 면진장치는 2개의 전단방향 변형에 대해서는 상호 연관된 2축소성(biaxial plasticity)의 특성을 가지며, 축방향 변형에 대해서는 인장저

항을 못하는 구조이므로 갭(Gap)과 동일한 비선형 특성을 가지는 스프링으로 구성된다. 전단방향 비선형 스프링은 그림 4에서 볼수 있듯이 곡면상에서의 복원력과 마찰력이 병렬로 작용하는 것으로 가정하고 있다. 적용된 2축 소성모델은 Park, Wen, and Ang(1986)의 2축소성(biaxial plasticity) 모델이지만 마찰면에서 발생하는 마찰력은 마찰면에 작용하는 압축력과 마찰계수의 곱에 의해 결정되므로 전단 스프링은 시간에 따라 변화하는 압축력의 영향도 받게 된다. 나머지 3개의 회전변형에 대해서는 상호 독립된 선형탄성 스프링의 속성을 입력할 수 있다.

## 5. 경계비선형 시간이력해석 개요

### 5.1 기본 가정

해석 대상 구조물은 비선형 연결요소를 포함하는 구조물로서 비선형 연결요소를 제외한 나머지 구조 부재들은 모두 선형 탄성인 것으로 가정한다. 이는 면진 및 제진 장치가 설계 하중에 대한 구조물의 소성 변형을 방지하거나 최소화 시켜주므로 타당한 가정이라고 할 수 있다. 그러나 해석 결과에 대한 검토를 통해 구조부재의 응력이 충분히 탄성 영역에 들어와 있는지 확인해 볼 필요가 있다.

### 5.2 해석모델의 구성

경계비선형 시간이력해석은 전체 구조물을 선형계와 비선형계로 나누고 비선형계에서 발생하는 비선형 부재력을 선형계에 가해지는 외부 동적하중으로 치환하여 해석한다. 여기서 선형계는 선형탄성 부재로 구성되며, 비선형계는 비선형 연결요소의 비선형 스프링만으로 구성된다.(만약 비선형 연결요소에 선형 스프링이 포함되어 있다면 이는 선형계에 포함된다.)

비선형 연결요소가 포함된 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + (K_S + K_N)u(t) = B_P p(t) + B_N(f_L(t) - f_N(t))$$

여기서

$M$  : 질량행렬

$C$  : 감쇠행렬

$K_S$  : 비선형연결요소를 제외한 나머지 선형탄성 부재들의 강성행렬

$K_N$  : 비선형연결요소의 유효강성에 의한 강성행렬

$B_P$  : 동적하중의 절점하중으로의 변환행렬

$B_N$  : 비선형 연결요소에 속한 비선형 스프링 내력의 절점하중으로의 변환행렬

$u(t), \dot{u}(t), \ddot{u}(t)$  : 각각 절점의 변위, 속도, 가속도

$p(t)$  : 동적하중

$f_L(t)$  : 비선형 스프링의 유효강성에 의한 가상내력

$f_N(t)$  : 비선형 스프링의 실제 내력

위 식에서 우변의  $f_L(t)$ 는 좌변의 비선형연결요소 강성행렬  $K_N$ 에 의해 발생하는 설점력 가운데 비선형 스프링의 유효강성에 의한 것과 상쇄되며 실제 비선형 스프링 내력  $f_N(t)$ 만이 동적 거동에 영향을 주게 된다.

### 5.3 모드중첩법과 등가 동적하중

위 운동방정식에서 좌변은 선형탄성 구조물로 해석될 수 있으며 모드중첩법을 통해 중요 모드만을 고려한 효율적인 해석을 수행할 수 있게 된다. 다만 선형탄성 구조물의 시간이력해석과 차이점이 있다면 우변에 존재하는 비선형 연결요소의 유효강성 및 비선형 내력을 해석의 각 타임 스텝(time step)마다 계산하여 하중으로서 작용시켜야 한다는 점이다. 이들 비선형 연결요소 관련 하중은 각 타임 스텝의 해석을 시작할 때 가정이 되고 가정된 하중이 다시 구조물의 응답을 변화시키므로 처음에 가정된 하중과 차이가 발생하게 된다. 이 차이는 반복계산을 통해 수렴시켜 나가게 되며 사용자가 지정한 횟수 이내에서 수렴이 이루어지지 않는다면 자동적으로 타임스텝을 세분하여 다시 반복계산을 수행하는 구조로 이루어져 있다. 미분 방정식으로 표현되는 비선형 연결요소의 내력은 방정

식의 수치해석을 통해 얻어지며 MIDAS의 경계비선형 시간이력해석에서는 Runge-Kutta Fehlberg method를 사용한다.

다음은 상기 비선형 시간이력 해석에 관한 도해의 설명이다. 그림 6(a)는 비선형 요소에서 유효강성의 기능을 비선형 해석과 선형해석의 경우로 나누어 도시하고 있다. 비선형 해석에 사용되는 유효강성은 가상의 강성으로 실질적으로는 구조물에 영향을 미치지 않게 될 것임을 알 수 있다. 그림 6(b)는 비선형 연결요소가 설치된 구조물에서 비선형 연결요소 및 그 실제 내력이 어떻게 각각 유효강성의 선형 스프링과 등가 동적하중으로 치환되는지를 도시하고 있다. 여기서  $f_N$ 과  $f_L$ 은 각각 비선형

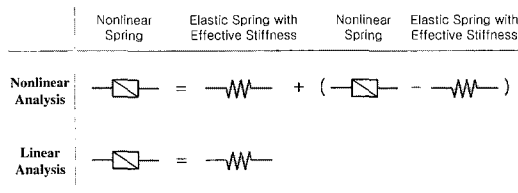
형 스프링의 실제 내력과 유효강성에 의한 가상의 내력을 나타내며 위의 운동방정식에서와 동일한 변수를 의미한다. 그림 6(c)는 모드중첩법을 통한 시간이력 해석에 있어서 비선형 연결요소의 실제 내력이 구조물 변형의 각 모드별 성분으로부터 어떻게 계산되어 조합되는지를 도시하고 있다.

## 6. 해석예제

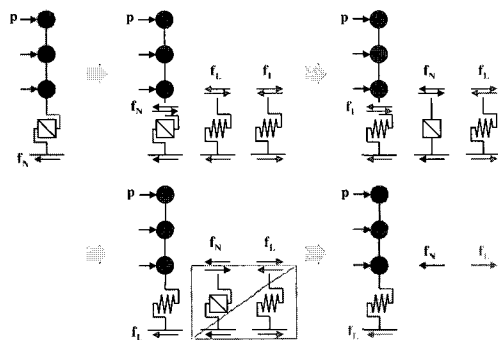
### 6.1 면진장치를 설치한 경우

예제건물은 풍하중에 대해서만 설계된 3층 철골조 건물로서 내진성능 향상을 위해 건물과 기초 사이에 면진장치를 사용하는 것으로 가정하였다. 지진하중은 면진장치가 충분히 항복하여 그 효과가 뚜렷이 나타날 수 있도록 El-Centro 지진의 X, Y 방향 성분을 그대로 사용하였다. 면진장치는 납삽입 고무베어링형을 네 모서리에 배치하고 나머지 기둥 밑에는 마찰진자형을 배치하였다.

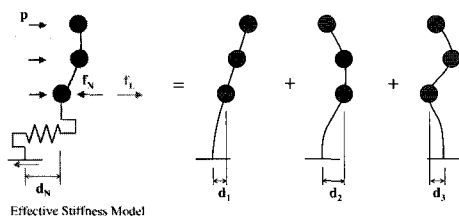
층간변위에 대한 해석결과는 그림 8과 같다. 면진 모델의 경우 최대 층간변위가 현저히 감소함을 확인할 수 있다. 그러나 최상층 변위에 대한 해석결과는 그림 9에서 볼 수 있듯이 면진장치를 적용한 경우에 최상층 변위의 최대치가 더 증가했음을 볼 수 있다. 이는 상부 구조물이 강체에 가까운 거동을 하기 때문에 최상층 변위는 면진장치에서 발생한 변위가 대부분을 차지하기 때문이다.



(a) 유효강성



(b) 등가 동적하중



Nonlinear Link Force :  $f_N = \text{function of } d_N (=d_1+d_2+d_3)$

(c) 모드별 등가 동적하중의 조합

그림 6 등가 동적하중 해석법

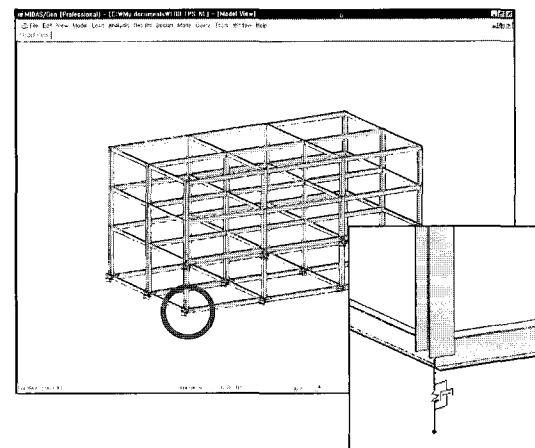


그림 7 면진장치를 설치한 예제 모델

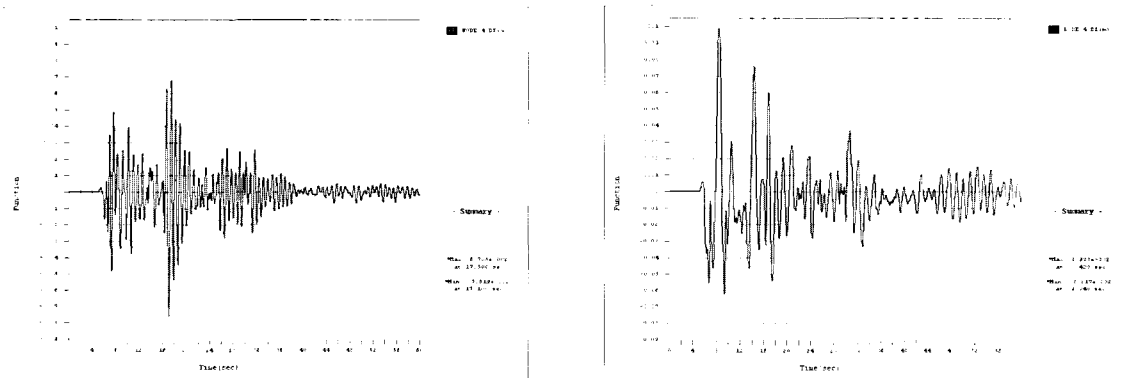
Load Case	Node	Story	Level (cm)	Height (cm)	S-Drift (cm)	M-Drift (cm)	Dgn-R	Alw-R	Remark
RMF=1, Scale=1, Allowable Ratio=0,015 Press right mouse button and click 'Set Story Drift Parameters...' menu to change RMF/Scale/Allowable Ratio!									
Time Lin(all)	35	3F	900,00	400,00	4,3874	4,3874	0,0110	0,0150	OK
Time Lin(all)	34	2F	500,00	400,00	5,6046	5,6046	0,0140	0,0150	OK
Time Lin(all)	13	1F	0,00	500,00	5,2689	5,2689	0,0105	0,0150	OK

(a) 기초 고정 모델의 최대 층간변위

Load Case	Node	Story	Level (cm)	Height (cm)	S-Drift (cm)	M-Drift (cm)	Dgn-R	Alw-R	Remark
RMF=1, Scale=1, Allowable Ratio=0,015 Press right mouse button and click 'Set Story Drift Parameters...' menu to change RMF/Scale/Allowable Ratio!									
Time NL(all)	15	3F	900,00	400,00	1,9254	1,9254	0,0048	0,0150	OK
Time NL(all)	14	2F	500,00	400,00	2,5808	2,5808	0,0065	0,0150	OK
Time NL(all)	33	1F	0,00	500,00	3,7343	3,7343	0,0075	0,0150	OK

(b) 면진 모델의 최대 층간변위

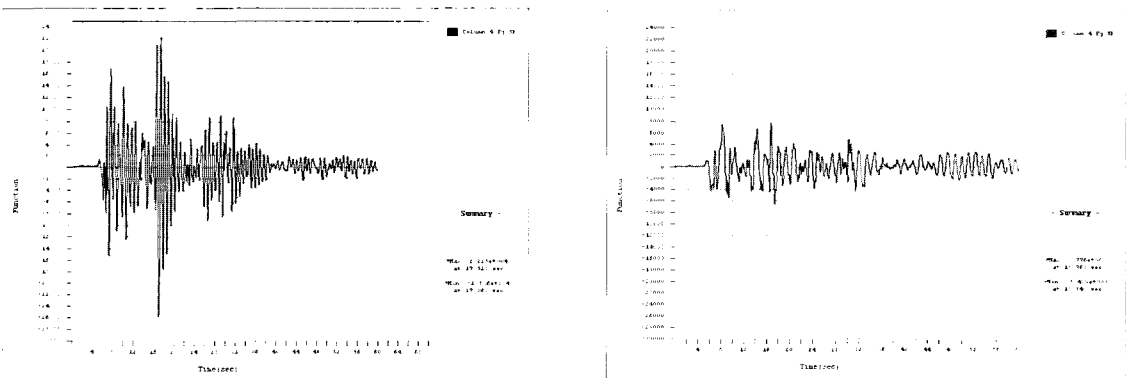
그림 8 층간변위 검토



(a) 기초 고정 모델

(b) 면진 모델

그림 9 최상층 변위 시간이력(Global X 방향)



(a) 기초 고정 모델

(b) 면진 모델

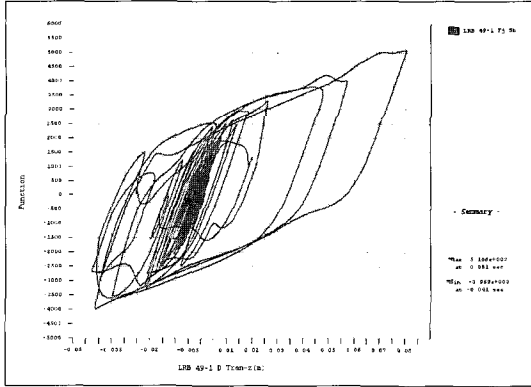
그림 10 1층 기둥의 전단력(Global X 방향)

층간변위의 감소로 인한 기둥 부재의 전단력 감소는 그림 10에 나타난 기둥 부재의 전단력 감소

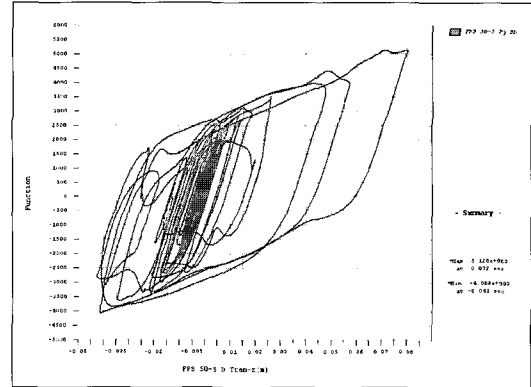
로부터 확인할 수 있다. 면진장치의 전단력과 전단 변형을 이력곡선으로부터 확인하면 그림 11과 같

다. 그림에서 납삽입고무베어링형 면진장치의 이력곡선인 기본 가정인 bi-linear 형태에 비해 왜곡이 많이 발생하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 2방

향 전단력간의 상호작용에 의한 것이다. 마찰진자형 면진장치의 경우에 거의 동일한 이력곡선을 보이고 있음을 볼 수 있는데 이는 각 층 바닥판이 강

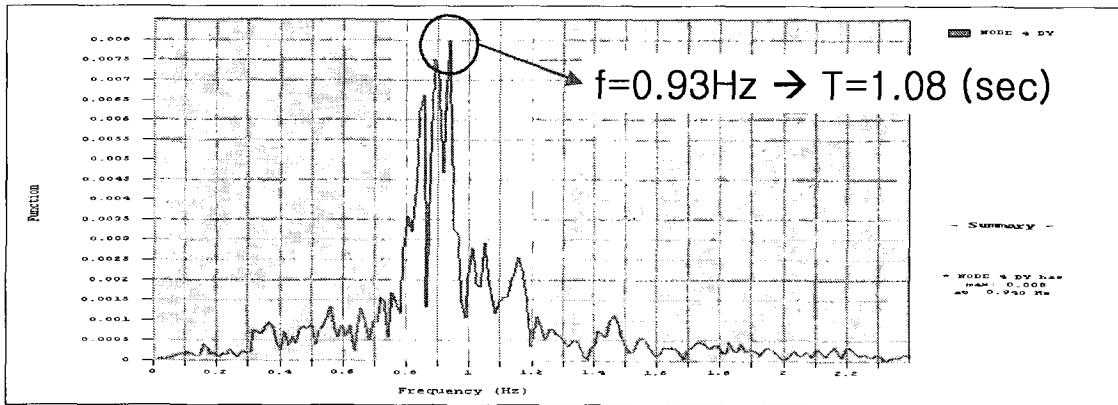


(a) 납삽입고무베어링형

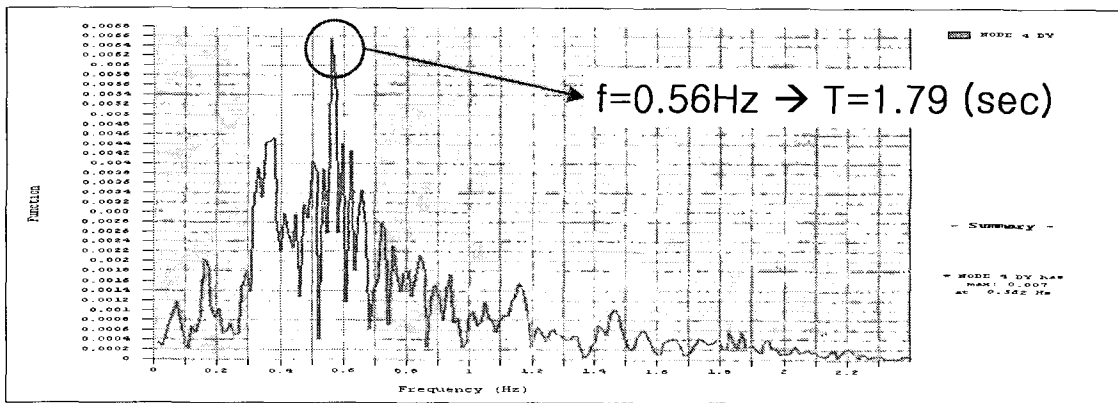


(b) 마찰진자형

그림 11 면진장치의 이력거동(Local z 방향)



(a) 기초고정 모델



(b) 면진 모델

그림 12 최상층 변위(Global X 방향)의 진동수 영역 변환 결과



막으로 구속되어 있고 면진장치의 속성이 납삼입 고무베어링형과 유사한 거동을 보이도록 입력되었기 때문이다.

마지막으로 면진장치에 의한 주기의 증가 효과를 확인한다. 면진장치를 설치하면 비선형 구조물이 되어 일정한 주기를 갖지 않고 고유치 해석도 불가능하므로 변위응답의 시간이력을 진동수 영역으로 변환한 뒤 탁월 주기를 찾았다. 그림 12은 그림 9의 최상층 변위 시간이력을 MIDAS의 진동수영역 변환기능을 사용하여 변환한 결과이다. 진동수 영역 응답에서 최대치를 나타내는 부분의 진동수를 읽어서 계산하면 주기가 1.08(sec)에서 1.79(sec)로 약 1.7배 증가하였음을 간접적으로 확인할 수 있다.

### 6.2 제진장치를 설치한 경우

예제건물은 5층 철골조 건물로서 앞서와 마찬가지로 풍하중에 대해서만 설계되었고 내진성능 향상을 위해 건물 각 층에 제진장치를 설치하는 것으로 가정하였다. 지진 하중은 앞의 면진 예제와 마찬가지로 지진하중은 앞의 면진 예제와 마찬가지로 지진하중은 앞의 면진 예제의 성능이 뚜렷이 나타날 수 있도록 스케일링 하지 않은 El-Centro 지진을 사용하였다. 제진장치는 점탄성 감쇠기를 장변방향의 대각선 가새 형식으로 배치하고 금속항복형 감쇠기를 단변방향에 지진에 저항하도록 배치하였다.

최상층 변위의 시간이력을 그림 14에 나타내었으며 제진장치에 의해 상당한 응답 감소를 획득할 수 있음을 알 수 있다. 제진장치의 이력거동을 그림 15

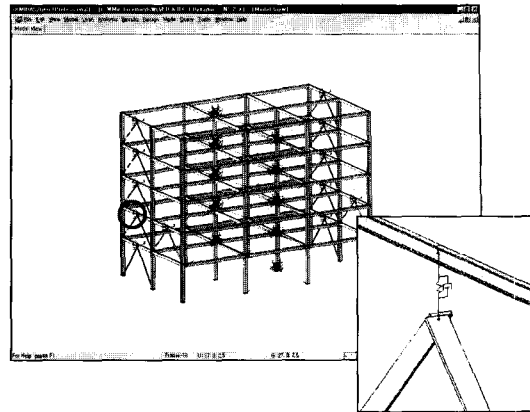
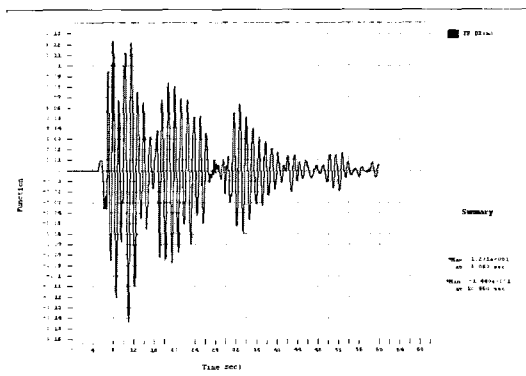


그림 13 제진장치를 설치한 예제 모델

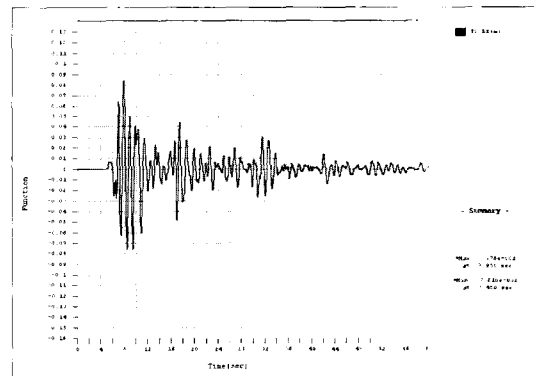
에 나타내었으며 금속항복형 감쇠기의 경우에 bilinear에 가까운 이력 곡선을 그리고 있다. 점탄성 감쇠기의 경우에는 고유의 강성으로 인해 이상적인 조화하중에 대해서는 기울어진 타원형의 이력곡선을 보이는데, 본 예제의 경우에 지진하중의 불규칙성으로 인해 이상적인 형태는 아니지만 유사한 이력 곡선 경향을 보여주고 있다.

### 7. 결 론

이상으로 MIDAS에 추가되는 경계미선형 시간이력해석에 의한 면진 및 제진 구조물의 해석에 대해 알아보았다. 면진 및 제진은 각각 구조물의 고유주기와 감쇠비를 증가시킴으로써 구조 부재에 유입되는 지진하중을 감소시켜서 주 구조물 및 인

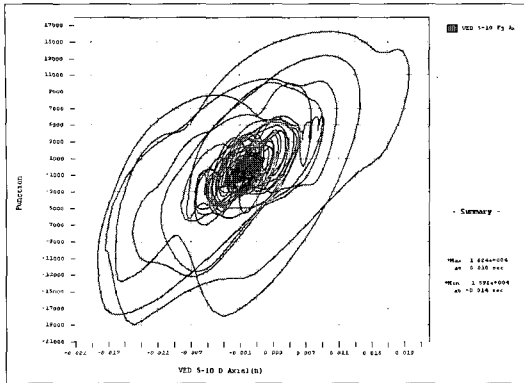


(a) 일반 모델

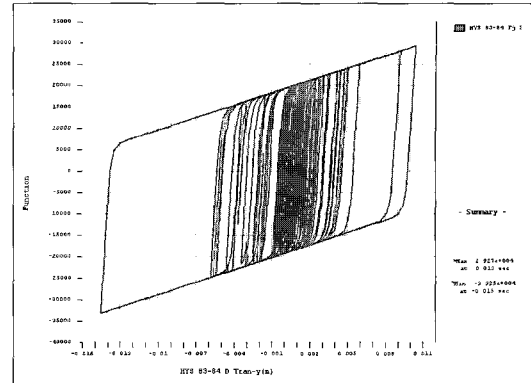


(b) 제진장치 설치

그림 14 최상층 변위 시간이력(Global X 방향)



(a) 점탄성 감쇠기(X 방향 지진)



(b) 점속항복형 감쇠기(Y방향 지진)

그림 15 제진장치의 이력거동

명과 재산을 보호할 수 있으며 내진설계에 비해 상대적으로 구조물의 피해를 적게하고 보수 보강에 드는 비용을 절감할 수 있는 효율적인 내진 방안이라고 할 수 있다.

그러나 면진 및 제진 장치의 속성으로 인해 요구되는 비선형 해석으로 비선형 시간이력해석을 통해 내진 성능과 장치의 안정성이 검토될 필요가 있다. 그러나 일반적으로 구조물 전체에 대해서 직접적분법을 통해 비선형 시간이력해석을 수행하는 것은 많은 시간을 필요로 하게 되며 면진 및 제진 구조물에 발생하는 비탄성 변형은 면진 및 제진 장치에 집중되므로 비효율적이라고 할 수 있다. 이번에 MIDAS에 탑재되는 경계비선형 시간이력해석은 구조물을 탄성으로 가정하고 모드중첩법을 이용하기 때문에 면진 및 제진 구조물의 특성을 반영한 보다 효율적인 해석이 가능하다. 비록 우리나라가 중약진 지역에 속해 있지만 생활 수준의 향상과 더불어 지진 및 바람 등 진동에 대한 관심이 높아져 가고 있는 상황에서 본 해석 기능의 보급은 선진 구조 기술로서 각광받고 있는 면진 및 제진 기술의 국내 보급과 국내건설기업의 해외 진출에도 있어서도 큰 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. FEMA, NEHRP Guidelines for Seismic Reha-

bilitation of Buildings, National Earthquake Hazards Reduction Program, FEMA-273, 1998

2. Koh, H.-M., Hong, S.-G., Cho, D., Ha, D.-H., Kim, D. H., Lee, N. H., "Progress of Application and R&D for Seismic Isolation and Passive Energy Dissipation for Civil and Industrial Structures in Korea", 7th International Seminar on Seismic Isolation, *Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures*, 2001

3. Komodromos, P., "Seismic Isolation for Earthquake-Resistant Structures", WIT Press, 2000

4. SEAOC, Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, Structural Engineers Association of California, Blue Book, 1999

5. Wilson, E. L., "Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures", *Computers and Structures, Inc.*, 2000

6. 김대곤, 이동근, 정재은, 남궁계홍, "정형 및 비정형 건물에 대한 비선형 면진장치의 적용", 한국지진공학회논문집, 한국지진공학회, 제5권, 제1호, 2001, pp.37~44

7. 김대곤, 이상훈, 안재현, 박철림, "면진 장치 적용 전, 후의 철골조의 내진 성능 평가", 한국지진공학회논문집, 한국지진공학회, 제2권, 제1호, 1998, pp.47~62