



탄성지지 및 면진설계

건축물의 지진진동 제어를 위한 면진 및 제진 장치

김 형 준*
(서울시립대학교)

1. 머리말

건축물은 다양한 자연력에 대하여 충분한 안전성을 확보하여야 한다. 건축물에 가해지는 대표적인 자연력은 바람에 의한 풍하중, 지진에 의한 지진하중, 눈이 지붕 등에 쌓여 발생하는 적설하중 등이 있다. 이 중 지구 중심방향으로 하중이 재하되는 적설하중과 달리, 풍하중과 지진하중은 수직방향에 비하여 강성과 강도가 비교적 취약한 수평방향으로 하중이 재하되기 때문에 건축물 설계에 주의를 기울여야 된다. 또한 풍하중과 지진하중은 건축물의 고유주기에 비하여 짧거나 유사한 하중 재하 주기를 가져 건축물에 공

진을 야기할 수 있다는 점에서 건축물에 심각한 구조적 피해를 발생시킬 수도 있다. 특히, 하중이 제거되었을 때 건축구조물이 하중 재하 전의 상태로 복원되는 것을 목적으로 한 탄성설계법에 의한 설계를 수행하는 풍하중 설계와 달리, 건축물에 유입되는 진동에너지가 상대적으로 큰 지진하중에 대해서는 탄성설계로 경제성을 확보하기 힘들다는 점을 고려하여 설계지진(design based earthquake)에 대하여 구조적 손상을 허용하는 설계법을 채택하고 있다.

하지만, 경제성을 고려한 구조적 손상을 허용하는 설계법은 그림 1에서 보는 바와 같이, 1994년 미국에서 발생한 Northridge 지진과 1995년 일



(a) Northridge 지진에 의해 발생한 건축물 피해
(FEMA 451b, 2007)



(b) Kobe 지진에 의해 발생한 건축물 피해

그림 1 지진으로 인한 건축물의 구조적 손상

* E-mail : hyungjoonkim@uos.ac.kr

본에서 발생한 Kobe 지진을 경험하게 되면서 구조물의 손상을 사회적으로 감내할 수 있는 수준으로 제어하고자 하는 연구가 본격화 되었고, 성능기반내진설계(performance based seismic design)가 제안되었다. 성능기반내진설계는 지진하중의 크기(지진의 재현주기)에 따라 건축구조물의 손상정도를 제어할 수 있도록 건축물을 설계하는 것이다. 예를 들어, 약 75년에 한 번 발생하는 정도의 지진(50년 동안 발생확률 50%에 해당하는 지진)에 대하여 보통 정도의 중요도를 가진 건축물은 구조적 손상이 거의 발생하지 않도록 설계함과 동시에, 약 500년에 한 번 발생하는 지진(50년 동안 발생확률 10%에 해당하는 지진)에 대해서는 건축물의 구조적 손상은 용인하되, 인명피해가 일정 수준으로 제어할 수 있도록 설계하는 방식이다.

이와 같이, 여러 개의 건축물 내진성능목표를 달성하기 위하여 지진으로 인해 발생할 수 있는 건축물의 진동을 제어할 수 있는 시스템 개발이 필요하다. 면진시스템과 제진시스템은 이러한 요구조건을 충족시키기 위한 일련의 기계적 장치로 현재까지 다양한 장치와 이를 활용한 시스템이 개발되고 있다. 이 글에서는 현재 건축물의 지진진동을 제어하기 위하여 사용되는 있는 다양한 면진/제진 장치의 작동원리와 장치의 종류 및 특징을 소개하고자 한다.

2. 면진장치와 제진장치의 지진진동 제어 원리

면진장치는 일종의 진동격리 시스템으로 건축구조물과 지반사이에 수평방향으로 강성은 매우 낮은 반면 대변형에 대하여 탄성거동을 할 수 있도록 고안된 장치이다. 하지만 수직방향으로는 강성과 강도를 보유하여 중력하중에 대하여 충분한 저항능력을 발휘할 수 있어야 한다. 이런 성능을 발휘할 수 있는 면진장치를 건축물과 지반사이에 삽입하게 되면 면진장치를 포함한 전체 건축물의 수평강성이 감소되고, 이에 따라 그림 2와 같이 건축물의 주기가 길어지게 된다.

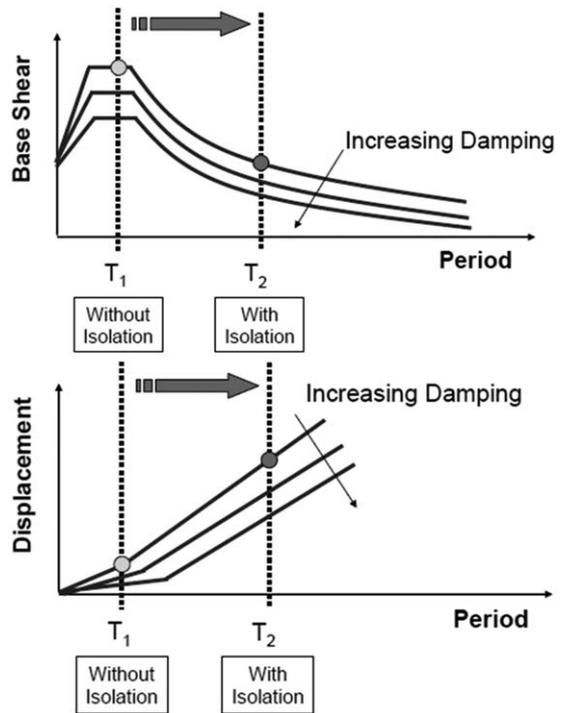


그림 2 면진장치의 진동 제어 원리(FEMA 451b, 2007)

건축물 주기의 증가는 지진에 의해서 발생한 건축물의 가속도가 줄어드는 효과를 발휘하게 되어, 결과적으로 지진 발생 시 건축물이 저항하여야 하는 지진력이 감소된다. 이와 반면, 지진에 의해 건축물에 요구되는 변위는 증가하게 되는데, 이때 증가된 요구 변위의 대부분은 면진장치에서 발생하여 흡수되기 때문에 건축물의 구조적 손상을 발생시키는 구조부재의 상대변위는 허용범위 내로 제어될 수 있다. 또한 면진장치에서 발생한 변위가 너무 과다할 경우, 그림에서 보는 바와 같이 감쇠장치 혹은 에너지 소산장치를 면진장치와 병렬로 설치하여 면진장치에서 발생하는 변위를 제어하기도 한다.

이와 같은 면진장치의 진동 제어 원리는 지진에 대하여 건축물의 피해 발생을 현격하게 줄일 수 있다는 점에서 매우 효과적인 방법이다. 하지만 일반 건축물에 비하여 현저히 낮은 수평방향 강성으로 인하여 바람과 같은 다른 수평진동원에 대하여 기준에서 허용하는 이상의 변위가 발

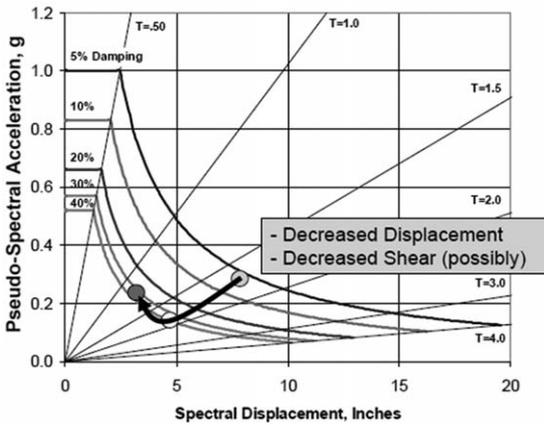


그림 3 제진장치의 진동 제어 원리(FEMA 451b, 2007)

생할 수 있다. 이런 문제점에 대하여 추가적인 강성을 확보할 수 있는 메커니즘을 면진장치나 면진장치가 설치된 층에 포함시켜야 한다.

건축물과 지반 사이에 유연한 물질을 삽입하여 지진으로 인한 진동을 제어하는 면진장치와 달리 제진장치는 건축구조물 내에 지진에너지를 소산할 수 있는 특수하게 고안된 장치를 삽입하여 지진진동을 제어하는 방법이다. 면진장치의 경우, 신축건축물에 적용하기에는 설계 단계에서 이를 고려하였다면 문제가 없지만, 기존건축물의 내진성능을 향상시킬 목적으로 사용하기에는 건축물을 지반과 이격시켜 장치를 삽입해야 하는 등과 같은 많은 어려움이 발생할 수 있다. 이런 점에서 제진장치는 신축건축물 뿐만 아니라 기존건축물의 내진성능확보를 위하여 폭넓게 사용될 수 있다는 장점이 있다.

그림 3은 제진장치의 진동 제어 원리를 설명한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 건축물에 감쇠(damping)가 증가할수록 스펙트럼 가속도와 스펙트럼 변위는 감소된다. 일반적으로 설계지진 발생 시 건축물의 고유감쇠비(damping ratio)를 5%라 가정하면, 단자유도계로 치환된 건축물의 경우 추가 5% 감쇠비에 의하여 약 20%의 구조물 진동가속도 감소를 기대할 수 있다. 이론적으로 건축물에 인입되는 모든 지진에너지를 제진장치의 감쇠능력과 건축물의 고유감쇠 메커니

즘을 통하여 상쇄할 수 있다면, 지진으로 인해 발생할 수 있는 건축물의 손상을 완전히 제거할 수 있다. 최근 들어, 이와 같은 진동가속도 감소 효과를 인하여 건축물의 내진성능향상을 위하여 제진장치의 적용이 활발하게 진행되고 있다. 특히, 국내에서도 기존건축물의 내진성능향상을 위한 제진장치의 적용사례를 많이 찾아볼 수 있다.

제진장치는 건축물에서 가새의 형태로 설치되는 것이 일반적이다. 제진장치의 종류에 따라 달라질 수 있지만, 일반적으로 제진장치의 설치가 건축물에 수평강성을 증가시킬 수 있다. 이는 결과적으로 제진장치가 설치되는 건축물에 인입되는 지진력 증가를 야기할 수 있어, 수평방향의 강성이 매우 큰 건축물에 제진장치를 적용시킬 경우에는 이를 주의하여야 하며, 건축물이 심각한 구조적 손상을 입고 난 후, 제진장치가 작동할 수 있기 때문에 설계 시 이를 고려하여야 한다.

3. 면진장치의 종류와 특징

면진장치는 크게 탄성받침계열(elastomeric bearings)과 슬라이딩받침계열(sliding bearings)로 나눌 수 있다. 탄성받침계열에는 사용하는 재료에 따라 천연 혹은 합성 고무받침(natural or synthetic rubber bearing), 고감쇠 고무받침(high-damping natural rubber bearing)과 납봉 삽입 고무받침(lead rubber bearing)으로 구분할 수 있다. 이와 반면, 슬라이딩받침계열에서는 슬라이딩이 발생하는 면의 형태에 따라 평판 슬라이딩받침(flat sliding bearing)과 원호형 슬라이딩받침(spherical sliding bearing)으로 구분된다.

그림 4는 탄성받침계열 중 납봉 삽입 고무받침의 절단면과 탄성받침의 이력거동을 보여주고 있다. 천연 혹은 합성 고무받침과 고감쇠 고무받침은 그림 4의 상단부 그림의 중앙부에 위치한 납봉이 제거된 것과 같다. 고무받침은 얇은 고무판과 철판을 교대로 배치한 적층고무 형태를 사용하고 있다. 적층고무 형태는 고무의 수평방향

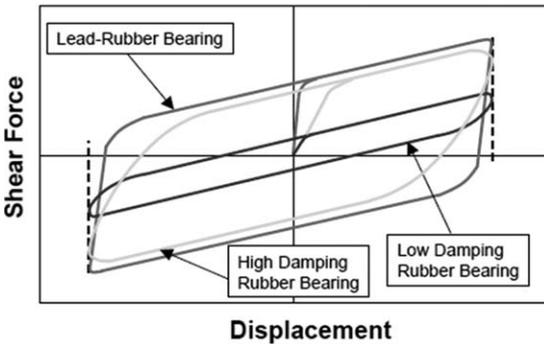
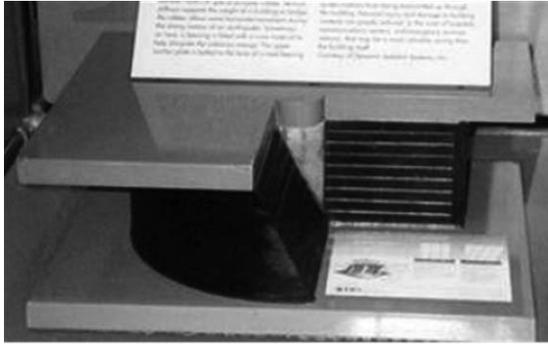


그림 4 탄성받침 계열 면진장치의 형상과 이력거동 (FEMA 451b, 2007)

낮은 강성을 활용함과 동시에 고무 사이에 배치된 철판과 고무의 접합을 통하여 수직방향 고강성을 제공할 수 있는 형태이다.

탄성받침계열의 면진장치는 그림 4의 하단에서 보이는 하중-변위 곡선에서 따라 달라진다. 천연 혹은 합성 고무받침은 수평강성과 에너지 소산면적이 작은 반면, 납봉 삽입 고무받침은 비교적 높은 수평강성과 에너지소산능력을 보인다. 이러한 두 종류 면진장치의 특징으로 인하여 풍하중과 지진하중에 대하여 면진장치가 적절하게 저항하기 위하여 납봉 삽입 고무받침과 천연 혹은 합성고무받침을 같이 적용하는 경우가 많다. 이와 반면, 고감쇠 고무받침의 경우에는 천연 혹은 합성고무받침과 납봉 삽입 고무받침의 장점을 모두 보유하고 있다는 점에서 우수한 면진장치로 사용가능하나, 성능의 변동성이 비교적 크기 때문에 이를 면진장치 설계에 반드시 반영되어야 한다.

탄성받침계열의 면진장치와 달리 슬라이딩받

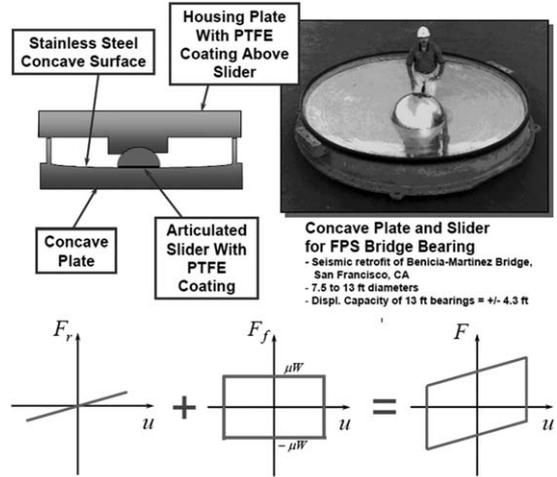
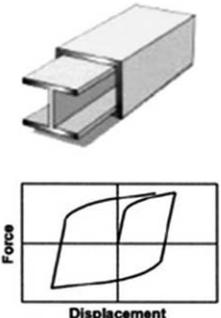
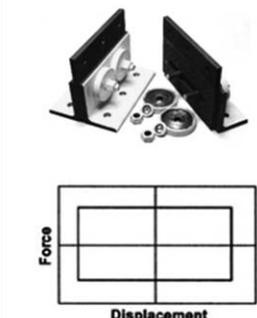
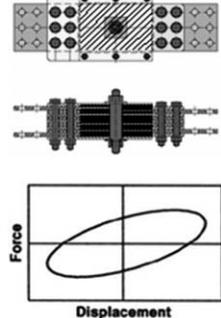
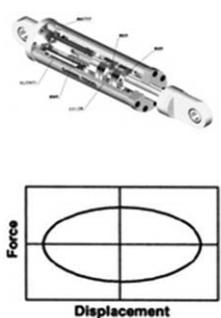


그림 5 슬라이딩계열 면진장치의 형상과 이력거동 (FEMA 451b, 2007)

침계열의 면진장치는 건축물이 부드럽게 미끄러지도록 마찰력이 거의 없는 마찰면을 이용한 장치로 그림 5와 유사한 형태이다. 그림은 원호형 슬라이딩받침으로 마찰계수가 지극히 낮은 PTFE와 스테인레스 스틸로 구성된 마찰면을 이용한 장치이다. 원호형태는 건축물 저면에 수평방향 변형이 발생했을 때 복원력을 확보하기 위하여 고안된 것으로 건축물의 급격한 기울어짐을 방지하기 위하여 충분한 곡률을 확보할 수 있어야 한다. 그림 5에 하단에는 원호형 슬라이딩받침의 이력거동을 묘사한 것으로 원호형태의 탄성 복원거동과 마찰에 의하여 발생한 직사각형 이력거동이 병렬로 결합되어 기울어진 마름모형태의 이력거동을 하게 된다.

슬라이딩계열의 면진장치는 수평방향 강성이 현저히 낮아 지진이 발생하였을 때 면진층에서 과도한 변형이 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 에너지 소산장치와 함께 사용하는 것이 일반적이다. 또한 풍하중에 대하여 충분한 강성과 강도를 확보하기 위하여 탄성거동 메커니즘을 추가로 장착하는 경우도 많다. 또한 슬라이딩계열의 면진장치는 과잉력(redundancy)이 현저히 낮기 때문에 지진 발생 시 거동을 명확하게 파악할 수 있는 건축물에 주로 사용된다.

표 1 제진장치의 종류와 이력 특성

변위의존형 제진장치		속도의존형 제진장치	
강제이력형	마찰형	점·탄성	점성
			

4. 제진장치의 종류와 특징

제진장치는 크게 수동형 제진장치와 반능동형/능동형 제진장치로 구분할 수 있다. 수동형 제진장치는 외부의 전력공급이 없이 지진에너지의 일정부분을 소산할 수 있도록 고안된 장치인 반면, 반능동형/능동형 제진장치는 입력신호(동적하중의 크기와 방향)에 따라 제진장치가 이에 반작용하여 구조물의 진동을 제어하는 방식으로 반능동형/능동형 제어를 위해 외부 전원장치와 액추에이터, 센서제어기술 등이 필요하다. 이 글에서는 제진장치의 사용빈도가 높은 수동형 제진장치에 대하여 기술한다. 수동형 제진장치는 표 1에서 보는 바와 같이, 변위의존형 제진장치(displacement dependent dampers)와 속도의존형 제진장치(velocity dependent dampers)로 구분할 수 있다.

4.1 변위의존형 제진장치

변위의존형 제진장치는 장치 양 쪽 끝단의 상대변위에 의해 발생하는 장치의 탄-소성 거동을 이용하여 지진에너지를 소산시킬 수 있도록 고안된 장치이다. 대표적인 변위의존형 제진장치로는 강재의 소성능력을 이용하여 지진에너지를 소산시키는 강제이력형 제진장치와 마찰력과 미끄러짐 관계에 의한 마찰에너지로 지진에너지를 소산할 수 있도록 고안된 마찰형 제진장

치 등이 있다.

구조용 강재가 탄성한계 이상의 응력을 받게 되면 강재는 항복을 하게 되고, 소성변형이 발생된다. 강재가 항복변형도 이상의 변형을 하게 되면 지진에너지가 소산되는 특징을 이용한 것이 강제이력형 제진장치된다. 강제이력형 제진장치를 사용한 건축물은 제진장치의 에너지 소산량이 극대화되어 나머지 구조시스템의 손상을 최소화할 수 있도록 설계되어야 하며, 이에 따라 제진장치는 뛰어난 연성능력을 발휘하여 대변형에도 강도의 저감이 발생하지 않으면서 안정적인 이력곡선이 구현될 수 있도록 고안되어야 한다.

마찰형 제진장치는 마찰면의 마찰력과 미끄러짐의 역학관계를 이용하여 지진에너지를 소산시킬 수 있도록 고안된 제진장치이다. 표 1의 마찰형 제진장치의 이력거동에서 보듯이, 장치의 양 끝단의 상대변위가 발생하기 전까지 즉 미끄러짐 현상이 발생하기 전까지는 거의 무한강성을 가지나, 미끄러짐 현상이 발생한 이후부터는 내력이 증가하지 않는 사각형 모양의 거동을 보인다. 마찰형 제진장치는 일반적으로 강제이력형 제진장치에 비하여 초기 탄성강성이 매우 크기 때문에 많은 지진에너지를 소산할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 마찰형 제진장치는 회전수 증가에 따라, 마찰재의 마모 등으로 인하여 마찰력이 감소되는 불안정한 거동을 보일 수도 있으며, 마찰재

의 마모로 인해 발생된 잔류물질이 마찰면 내에 존재하는 경우에는 갑작스러운 마찰력 증가가 발생하기도 한다. 이와 같이 마찰형 제진장치의 이력특성에 영향을 줄 수 있는 많은 영향인자들이 있으므로, 이들의 영향을 최소화하여 안정적인 이력거동을 유도할 수 있는 마찰재를 사용해야 한다.

4.2 속도의존형 제진장치

속도의존형 제진장치는 장치 양 쪽 끝단의 상대속도에 의해 에너지를 소산시키는 장치로 동적 거동 시 건축물의 저항력과 장치의 저항력 사이에 위상차가 발생한다. 이런 위상차는 제진장치와 건축물이 최대하중 도달 시점이 달라지게 한다. 이는 제진장치와 결합되어 있는 구조부재와 기초부재의 설계하중을 변위의존형 제진구조물에 비하여 낮출 수 있는 장점이 있다. 속도의존형 제진장치는 크게 점성 제진장치와 점·탄성 제진장치로 구할 수 있다.

점성 제진장치의 단면은 두 개의 챔버(chamber)와 오리피스(orifice)가 있는 피스톤(piston)과 장치의 외관을 형성하는 실린더(cylinder)로 구성되어 있다. 오리피스는 점성물질이 이동할 수 있는 피스톤 헤드에 있는 가는 관(통로)을 말한다. 피스톤 헤드에 의해서 나누어지는 두 개의 챔버에는 점성물질로 채워지며, 압축 액체 실리콘(compressed silicone fluid)이 주로 사용된다. 점성물질의 밀도가 높을수록, 오리피스의 단면적에 대한 피스톤 헤드의 단면적 비와 피스톤의 운동속도가 클수록 점성 제진장치의 저항력이 커지게 된다. 점성 제진장치의 이력형상은 최대 변위에서는 감쇠력이 0인 반면, 변위가 0에서 최대 감쇠력에 도달하는 타원형 모양이며, 감쇠력은 제진장치의 감쇠정수, 회전 진동수와 최대 진폭에 따라 증가하여 지진에너지 소산능력이 증대된다.

점성 제진장치는 속도에 의한 감쇠력만 제공하기 때문에 변위에 대한 저항시스템이 요구된다. 이와 반면 점·탄성 제진장치는 점성 제진장치와 유사한 속도에 의한 감쇠력뿐만 아니라 변위

에 저항할 수 있는 탄성력도 함께 보유하고 있는 것이 특징이다. 이와 같은 성질을 보유한 대표적인 재료로 혼성중합체(copolymer)계열과 유리질(glassy substance) 계열의 물질이 있다. 점·탄성 제진장치는 점성 제진장치와 유사하게 타원형의 이력형상을 가지나, 탄성의 성질로 인하여 최종적으로 기울어진 타원형 모양의 이력곡선이 된다.

점성과 점·탄성 제진장치를 포함하는 속도의존형 제진장치는 변위의존형 제진장치와 달리 대부분 에너지소산 후 원점지향의 탄성적인 성질을 보유하고 있다. 이런 이력특성은 지진으로 인한 진동 제어 뿐만 아니라 탄성설계를 근간으로 하는 바람에 의한 풍진동제어에 사용할 수 있다. 특히, 풍진동으로 인한 거주성 문제가 심각할 수 있는 고층건물에 대하여 적용이 가능하며 다양한 사례를 찾을 수 있다.

5. 맺음말

이 글에서는 지진에 의하여 발생할 수 있는 진동을 효과적으로 제어할 수 있는 면진장치와 제진장치에 대하여 소개하였다. 우선 면진장치와 제진장치를 적용한 건축물의 지진응답을 이용하여 장치의 작동원리를 설명하였다. 면진장치는 건축물의 주기를 증가시켜 지진력을 감소시키는 방법으로 지진진동을 제어하는 반면, 제진장치는 건축물에 인입되는 지진에너지를 소산시켜 건축물의 지진응답을 감소시키도록 고안된 것이다.

면진장치와 제진장치의 작동원리와 함께, 장치의 종류와 이력거동 상의 특징을 소개하였다. 면진장치와 제진장치는 건축물이 지진에 의하여 진동하게 될 때 이력거동 상에 독특한 특징이 있다. 건축물의 지진진동을 제어하기 위하여 면진 및 제진장치를 사용할 때, 앞서 언급한 각 장치별 특성은 고려하여 건축물의 최종 지진응답을 예측하여 적용성을 판단하여야 하며, 장치의 사용효과를 극대화하기 위하여 설치위치를 선정함에 있어서도 특별한 주의를 기울여야 한다. **KSNVE**