

지진을 고려한 구조물의 면진/제진 기술개발 현황

김 두 훈
(유니슨기술연구소 소장)

1. 머리말

최근에 들어 발생한 미국 및 일본에서의 대형 지진으로 지진에 대한 일반인의 관심이 고조되고 있는 가운데 우리나라도 산업체, 연구기관 및 학계를 중심으로 지진에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 구조공학의 발달에 힘입어 건축 구조물이 점차 대형화, 고층화되고 있으며 각종 자동화된 생산설비나 고도화된 첨단 장비가 생산 현장에 사용되고 있어 만일 지진으로 인해 구조물이나 시설물이 파손될 경우 막대한 인적, 경제적 손실이 예상된다. 따라서 원자력 발전소, LNG 저장 탱크 등 특수 구조물이나 컴퓨터 센터, 반도체 제조공장 등의 주요 생산 시설에서는 지진으로부터 구조물이나 그 내부에 설치된 기기의 보호를 위해 지진에 대비한 구조물 설계나 진동 제어장치가 사용되고 있다.

이와 같은 지진에 대한 안전성을 확보하기 위한 방법을 대별하면 내진(耐震), 면진(免震), 제진(制震)의 3종류가 있다. 지진력에 대한 구조물의 강도를 증가시켜 건물이 지진에 무너지지 않도록 하는 것을 목표로 하는 건물의 내진설계가 일반적인 추세였으나, 근년에 들어서는 면진, 제진에 대한 연구개발 및

실용화 노력도 활발히 이루어지고 있다. 면진설계란 지진의 진동에 견디는 내진설계 만이 아니라 문자 그대로 진동을 「피한다」는 개념에서 나왔다. 특수한 기초분리 장치를 이용하여 구조물을 지지하여 구조물의 수평방향으로 고유 진동주기를 길게하여 지반진동에 의한 반응력(response force)을 줄이는 개념이며, 지진시에 기초 분리장치에 생기는 과대한 변형량을 제어하기 위하여 에너지 흡수장치를 보조적으로 사용하기도 한다.

한편 고층빌딩, 전망탑, 초대형 현수교나 사장교의 주탑, 연돌 등의 고층구조물은 최근 더욱 고층화, 대형화되는 경향이 있어 구조의 합리화, 경제성의 추구 또는 내진 안전성 및 거주성 향상을 위하여 바람이나 지진에 대한 진동저감 요구가 높아지고 있다. 이에 대해 특수한 기계장치를 이용한 구조물의 진동제어 기술의 연구개발이 활발하게 진행되고 있으며 이와같이 적극적으로 건축구조물의 진동을 제어하는 것을 제진설계라 한다. 이 방법에 의하면 대지진시에도 구조물의 진동을 크게 감쇠시킬 수 있어 장래에는 근원적으로 지진피해를 줄이는 것이 가능할 것으로 기대된다.

본 글에서는 지진을 고려한 건축설비 및 구조물의 내진 및 면진/제

진 기술에 관한 이제까지의 국내외 연구개발과 실용화 현황에 대해 기술한다.

2. 지진의 크기와 지진 설계기준

2.1 지진 등급

지진은 지각속에 축적되었던 탄성에너지가 어느 특정한 면으로 지각이 파쇄되며 순간적으로 운동에너지로 전환되어 진동이 사방으로 전파해 나가는 현상으로 지진의 크기를 나타내는 단위로는 지면 진동 효과에 의하여 12 단계(I~XII)로 구분하는 MMI(Modified Mercalli Intensity), 일본 기상청의 진도계급(0~VII)인 JMA(Japan Meteorological Agency), 동유럽 등 소련에서 발달한 MSK(I~XII)진도 계급 등 다양하나 가장 많이 통용되는 것은 1935년 미국의 지진학자 리히터(Richter)에 의해 제시된 리히터 스케일이다. 이는 지진에 의해 방출된 에너지를 아래와 같은 식을 사용하여 지진의 강도를 1에서 9 이하의 숫자로 나타낸 것이다.

$$\log_{10}E(\text{erg}) = 11.8 + 1.5M$$

여기서, E 는 지진에너지이며 지진 강도는 M 으로 계산된다. 따라서 지진 강도가 1 증가함에 따라서 지진에너지는 약 31.5배 증가하게

된다. 표 1은 이들 진도계와 진동 가속도레벨의 관계를 보여주고 있으며 흔히 진동관련 기술자들이 측정된 구조물의 진동값을 이들 진도계에 비교하여 진동정도를 평가하기도 한다.

2.2 지진 설계기준

지진은 큰 진폭과 낮은 주파수(0.1~30Hz)를 갖는 지반 진동으로 특징지어 진다. 대개 진원지는 지각속 깊은 곳에서 발생하여 종파(L), 압축파(P), 전단파(S)라는 전파특성이 서로 다른 세가지 형태의 진동파로 전파되면서 지표면의 건물이나 건물내 설비기기에 작용할 때까지 암반층, 지반 또는 건물 구조물 등 다양한 매질을 통과하게 되는데 이들은 기본적으로 지진파의 진행에 대해 필터(Filter) 역할을 하게 된다. 즉 지진파가 암반층에서 지반으로, 지반에서 건물로, 건물에서 설비 기기로 전달됨에 따라 지진파의 어떤 주파수 성분은 감소되고 어떤 성분은 증폭 되기도 한다. 따라서 지진을 고려한 구조물 및 설비 기기의 방진 설계시 이들 특성을 항상 염두해두어야 한다. 그림 1은 동일한 지진일지라도 진동을 감지하는 수신부의 위치에 따라 입력진동의 어떻게 변화될 수 있는가를 예로 보여주고 있다.

구조물이나 설비기기의 구조/방진설계에 있어서 지진의 영향을 고려 할 경우 설계의 기준을 정해야 하는데 기기의 운전 조건에 따라 흔히 다음과 같은 설계기준을 사용한다.

- 안전정지 지진 (SSE; Safe Shut-Down Earthquake)
- 설계기준 지진 (DBE; Design Basis Earthquake)
- 운전기준 지진 (OBE; Operating Basis Earthquake)
- 돌발설계 지진 (DCE; Design Contingency Earthquake)

-설계운전 지진 (DOE; Design Operating Earthquake)

이들 서로 다른 등급의 설계 진동기준은 각 명칭이 의미하는 바와 같으며, 처음 세가지 기준은 원자력 발전소에 적용되는 것이며, 마지막 두가지 기준은 배관 시설물에 관련된 기준이다. 이로부터 지진 설계자는 구조물이나 설비기기가 설치될 특정 지역에서 확률적으로 예상되는 지진의 크기와 비교하여 진동 설계값을 정할 수 있게 된다. 일례로 현재 인천에 건설 중인 LNG 저장 구조물의 경우 OBE

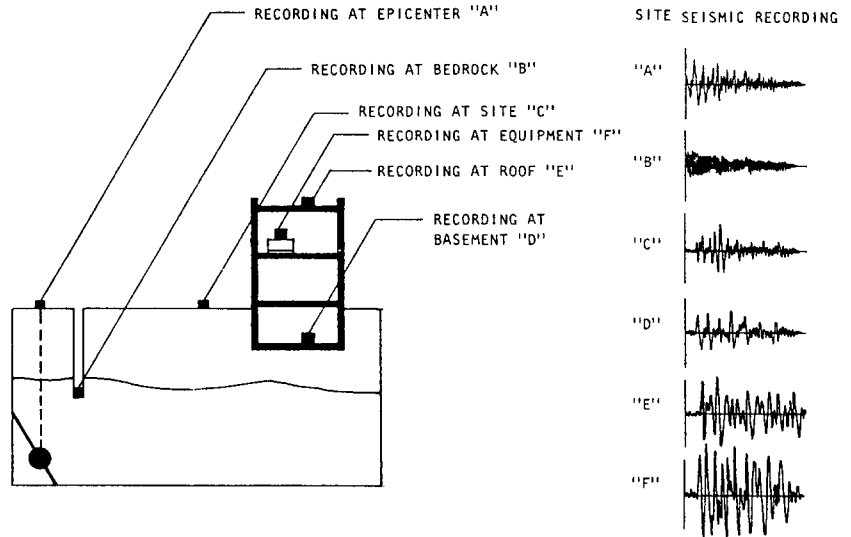


그림 1 수신점 위치에 따른 지진파의 특성 변화

표 1 진도계와 진동가속도 레벨의 관계

진도계	지진의 명칭	진동 가속도 피크치(cm/s ²)	진동가속도 레벨(dB)	비 고
0	무감(No Feeling)	0.8 이하	55 이하	인체로 느끼지 못함
I	미진(slight)	0.8~2.5	60±5	약간 느낌
II	경진(Weak)	2.5~8.0	70±5	크게 느낌
III	약진(Rather Strong)	8.0~25	80±5	창문, 미닫이가 흔들림
IV	중진(Strong)	75~80	90±5	기물이 넘어지고 물이 넘침
V	강진(Very Strong)	80~250	100±5	집의 벽이나 비석이 넘어짐
VI	열진(Disastrous)	250~400	105~110	가옥파괴 30%이하
VII	격진(Very Disastrous)	400 이상	110 이상	가옥파괴 30%이상, 단층 산사태 발생

표 2 인천 LNG 탱크 지진 설계기준

	OBE	SSE
최대 지반 가속도	0.1g	0.2g
최대 지반 속도	12.18cm/sec	24.36cm/sec
최대 지반 변위	9.14cm	18.28cm

발생 주기 475년, SSE 발생 주기 10,000년으로 가정하여 표 2 와 같은 지진 설계값을 정하였다. 현재 까지 가장 잘 측정된 지진으로 평가되는 것은 1940년 미국 California에서의 El Centro 지진을 꼽을 수 있는데 이 지진의 수평 가속도 레벨은 3Hz 에서 0.33g였으며 수직 성분은 수평성분의 절반수준 이었다.

3. 면진/제진 구조의 분류

진동 외란을 받는 구조물의 설계 방식을 면진구조와 제진구조의 위치에서 분류한 것을 그림 2에 나타낸다. 이 분야에 대한 연구는 10여년 정도의 짧은 역사를 가지고 있는 관계로 용어가 완전히 통일되어 있지 못하고 그 분류도 보는 시각이나 학자에 따라 약간씩 다른 실정이다.

면진설계방식은 적층고무 등의 기초 분리장치(Isolator)를 사용하여 건물을 지반으로부터 분리시켜 건물 진동주기를 길게하므로써 건물에 입사하는 지진력을 저감시키는 방법으로 건축 분야에서 최근 활발하게 적용되고 있다. 그림 3은 지진이나 교통 진동에 대해 기존의 고정기초 건물과 면진설계된 건물의 진동 모습을 상징적으로 나타내고 있으며 같은 수준의 지반 진동에 대해 면진건물이 일반 건물에 비해 작은 진동값을 보여주고 있다.

면진장치는 그 설치수준의 차이에 의해 다음의 3종류로 분류될 수

있다.

- 가. 기기 수준의 면진기술
- 나. 바닥 수준의 면진기술
- 다. 건물 수준의 면진기술

현재 이러한 3종류의 면진기술의 실용화가 진행되고 있는 배경에는 산업구조의 변화에 따라 지진에 의한 기기 및 건물의 피해를 방지하기 위한 것 뿐만이 아니라 컴퓨터 등으로 대표되는 첨단시스템의 확실한 기능유지를 위해 정숙한 진동 환경이 요구되기 때문이다.

한편 제진은 구조물에 일단 입력된 진동에너지를 내부에서 흡수하는 기구(감쇠요소)를 설치하거나 어떤 장치를 이용하여 외력에 대응하여 변동하는 힘을 구조물에 가하여 구조물의 진동을 억제하는 방법으로 고층 건물에도 적용이 가능하

다. 제진구조는 구조물의 진동제어 시 외부 에너지를 필요로 하는 능동적(active) 방식과 외부 에너지를 필요로 하지 않는 수동적(passive) 방식으로 분류할 수 있으며, 양자를 직렬적 또는 병렬적으로 조합한 조합형(hybrid) 방식이 있다. 능동적 방식은 건물의 내부 또는 외부에 센서를 설치하고 여기서 얻어진 진동 전후의 외란정보에 의한 각종 제어를 행하는 것이다. 센서를 건물 외부에 설치하고 외란을 사전에 감지하여 각종 제어를 행하는 Feedforward 제어와 센서를 건물 내부에 설치하고 건물의 진동응답을 감지하여 제어를 행하는 Feedback 제어가 있다. 그림 4는 제어 시스템의 구성요소 다이어그램의 일례를 보여주고 있

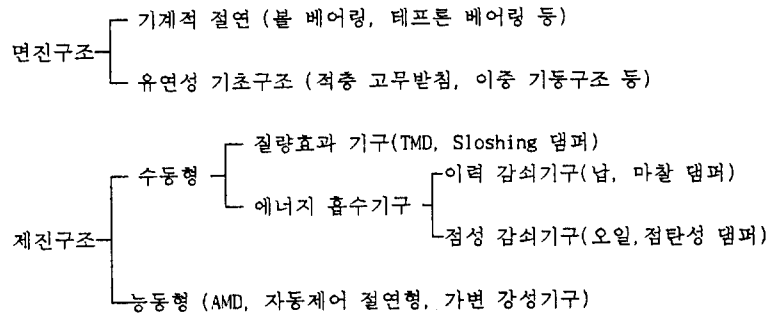


그림 2 면진/제진 구조의 분류

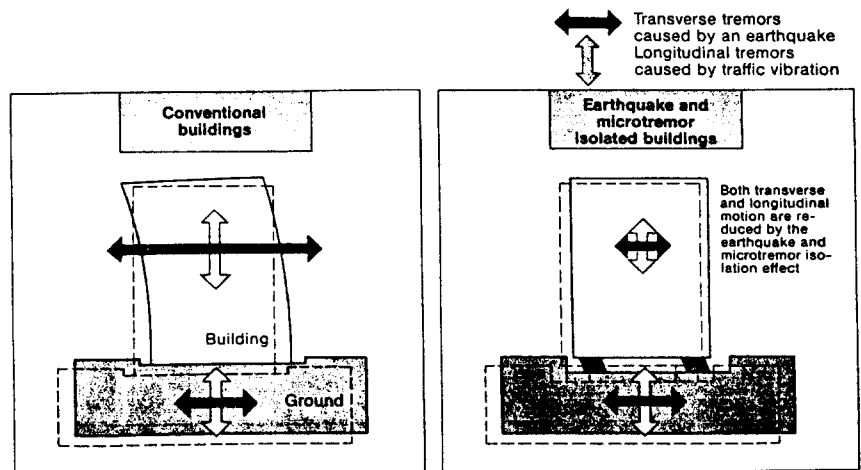


그림 3 고정기초 건물과 면진건물의 진동 모습 비교

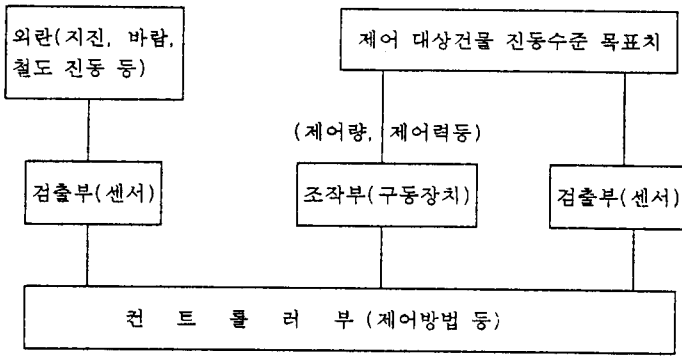


그림 4 제어시스템의 구성 요소 다이어그램

다.

4. 건물의 면진 설계기술

4.1 기초 분리장치의 종류

일본에서 건물의 면진구조 연구 개발은 당초 원자력 시설에의 적용을 최종 목적으로 하였다. 당시 원자력 시설에 면진기술이 적용되기 위해서는 먼저 일반건물에 면진기술이 적용되고 그 적용예가 많아져 일반적으로, 면진구조의 존재와 그 효과가 인지되는 것이 원자력 시설의 면진구조 실현을 위해 필요 최소 조건이라고 생각되었기 때문이다.

일반적으로 면진 구조설계에 사

용되고 있는 기초 분리장치로는 적층 고무받침(Laminated Rubber Bearing) 방식과 R-FBI(Resilient-friction Base Isolator) 방식으로 크게 나눌 수 있다. 적층 고무받침은 가장 널리 쓰이는 기초분리 장치로써 초기강성 및 에너지 소산능력을 증가시키기 위해서 단면 중앙에 납(lead plug)을 삽입하기도 한다. 그림 5는 LRB(적층 고무받침)의 구조와 설치 방법을 나타내고 있다.

R-FBI 방식은 고무판 내부에 PTFE(Polytetra Fluoro Ethylene)라는 미끄럼판을 가지고 있으므로 적층 고무받침에 비하여 더큰 수평변위를 허용한다. 이 이외에 BB

Isolator(Ball Bearing Isolator)라고 불리는 기계적 기초 분리장치도 있다. 이것은 접시모양의 기판과 볼베어링으로 구성되어 있고, 외력이 작용하면 볼이 움직였다가 외력이 멈추면 접시판의 기울기와 중력에 의해 볼이 다시 복원된다. 주로 정밀 기계의 기초 분리장치로 사용되고 있다.

4.2 적층 LRB의 설계

일반적으로 구조물의 기초 분리용으로 사용되는 LRB는 설계 개념상 수평방향으로 커다란 유연성을 가지며 수직방향으로는 매우 큰 강성을 갖도록 설계한다. LRB의 특성치는 2.2절에서 언급한 바와 같이 지역의 지진특성을 고려한 지진설계 조건으로부터 구조물의 응답해석을 한다. 이로부터 구조물의 운전 조건에 적합한 LRB의 성능요구치가 구해진다. LRB 설계시 사용되는 고무의 물성치로는 전단탄성계수(shear modulus) G , 체적 탄성계수(bulk compression modulus) E_0 , 결보기 압축 탄성계수(apparent compression modulus) E_c , 포아슨비(Poisson ratio) ν 가 있으며 이로부터 고무

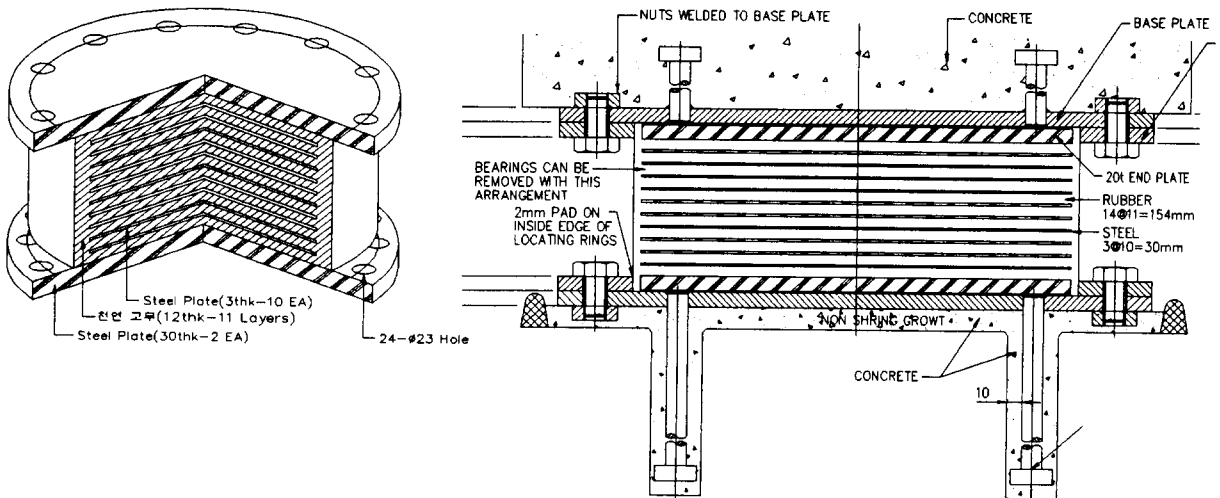


그림 5 LRB의 구조 및 설치곡법

의 형상과 화학적인 성분에 따라 변화하는 휨(bending)에 대한 겉보기 압축탄성계수(apparent compression modulus for bending) E_b 를 구하면 다음과 같다.

$$E_b = E_c(1 + \beta S^2)$$

여기서 β 는 고무의 화학적 성분에 의해 결정되는 상수이며 S 는 형상계수(shape factor)로 하중을 받는 고무의 단면적을 각 고무층에서 팽창이 일어날 수 있는 측면의 전체 면적으로 나눈 값이다. 또한 E_b , E_c 는 고무의 체적압축(bulk compressibility)이 고려되지 않은 계수로써 이것을 고려하면 다음과 같다.

$$E'_b = \frac{E_b E_0}{(E_b + E_0)}$$

$$E'_c = \frac{E_c E_0}{(E_c + E_0)}$$

이로부터 LRB의 수평 강성(K_H) 및 수직강성(K_V)을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_H = \frac{P^2}{\{2qS_b \tan(ql/2) - Pl\}}$$

$$K_V = \frac{A_{eff} E'_c}{nl_R}$$

여기서, $q = \sqrt{(P/S_b)(1 + P/S_s)}$

$$S_b = E'_b I (t_R + t_s) / t_R$$

$$S_s = GA_R (t_R + t_s) / t_R$$

P 는 수직하중, l 은 LRB의 전체높이, A_{eff} 는 유효단면적, I 는 단면 2차 모멘트(second moment of area), n 은 고무층 수 그리고 t_R , t_s 는 각층의 고무 및 철심의 두께를 나타낸다.

또한 좌굴 하중(buckling load) P_{cr} 을 계산하므로써 LRB가 지지할 수 있는 허용하중을 계산할 수 있다.

$$P_{cr} = (P_s/2) [\sqrt{(1 + 4P_E/P_s)} - 1]$$

여기서, $P_s = GA_R$, $P_E = \pi^2 E_c I / 3l^3$

따라서, 구조물의 동적 해석에서 구해진 건물 기초부 경계조건으로 최적의 수평, 수직 강성 및 댐핑값이 결정되면 상기식 들을 이용하여 LRB에 대한 기본적인 고무의 종류, LRB 형상을 설계할 수 있다.

4.3 LRB의 특성시험

제작된 LRB가 그 기능을 잘 발휘하기 위해 설계된 대로 특성이 나오는지 검증이 필요하다. 특히 LNG 저장소나 원자력 발전소 등 그 사용처의 중요도에 비해 고무의 품질은 기계요소처럼 항상 일정하지 않으므로 특성시험 뿐만 아니라 제작 전공정에 걸쳐 엄격한 품질관리가 요구된다.

대개 LRB의 특성 시험은 정적 시험과 동적시험으로 이루어지는데 좌굴하중 및 수직 강성은 압축 재하실험을 통해서 구하며 수평방향 특성치는 LRB에 일정한 수직하중을 가한 상태에서 수평방향으로 정적, 동적하중을 가하여 구한다. 여기서 얻어지는 힘-변위 관계는 고무의 재료적인 특성이 지배적이며 대개 그림 6과 같은 이력곡선(hysteresis loop)을 나타낸다.

이 곡선으로부터 유효강성(effective stiffness) K_{eff} 및 등가 감쇠비(equivalent damping ratio) ξ_{eq} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{eff} = \frac{(P_{max} - P_{min})}{(\delta_{max} - \delta_{min})}$$

$$\xi_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eff} \delta_{max}^2}$$

여기서, P_{max} , P_{min} , δ_{max} 및 δ_{min} 은 실험결과로 부터 얻어진 힘-변위 이력곡선의 최대, 최소값 들을 나타내며 ΔW 는 이곡선의 면적을 의미한다. 그림 7은 실제 제작된 LRB의 동적 수평 시험 사진과 이력곡선을 보여주는 것으로 이 경우 수직하중 26ton(SSE), 가진주파수 0.5Hz, 수평 strain 73.6%(1.0 SSE)로 시험하였으며, 시험결과 유효강성이 0.458ton/cm, 등가감쇠비 12.1%가 얻어졌음을 보여주고 있다.

이 이외에도 저온, 고온실험, EB(Elongation at break), Distortion 시험 및 Roll-out 시험 등 각 사용환경에 따른 다양한 시험이 이루어진다.

4.4 면진건물의 지진 진동특성

면진 설계를 도입하여 건축된 건물에서 실제 지진이 작용하였을 경우 적층 고무 받침에 의한 건물의 진동 저감효과를 알아보기 위해 1988년 3월에 발생한 Eastern Tokyo 지진시 ($M=6.0$) 측정된 건물 진동 가속도를 검토해 본다. 지진 진동을 측정한 건물은 The Oiles TC Buildings 로써 1987년 2월에 건축된 지상 5층 건물로 건물과 지반은 적층 고무받침(LRB)으로 분리되어 시공되었다.

그림 8은 지진발생시 측정된 최대 수평 가속도를 나타내고 있으며 GL-4m 에서의 진동 가속도는 71.7gal 로 GL-20m 에서의 진동 가속도보다 2배 큰 값을 보여주고 있는데 이는 지반의 작용에 의해 진동이 증폭되고 있음을 보여주고 있다. LRB 를 사용하여 건물의 진동 주기를 길게하므로써 건물 1층

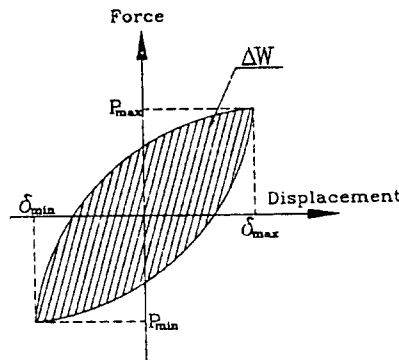


그림 6 일반적인 힘-변위 이력곡선

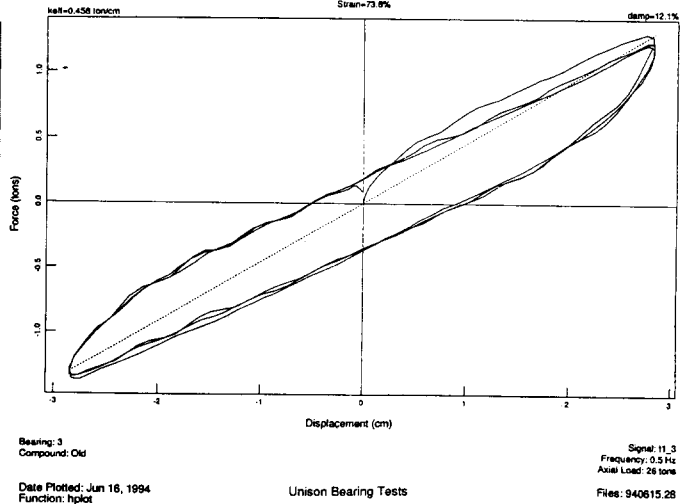
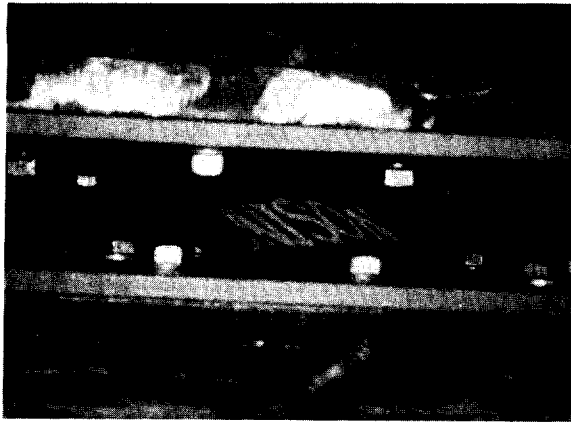


그림 7 LRB의 동적시험 사진 및 시험결과 예

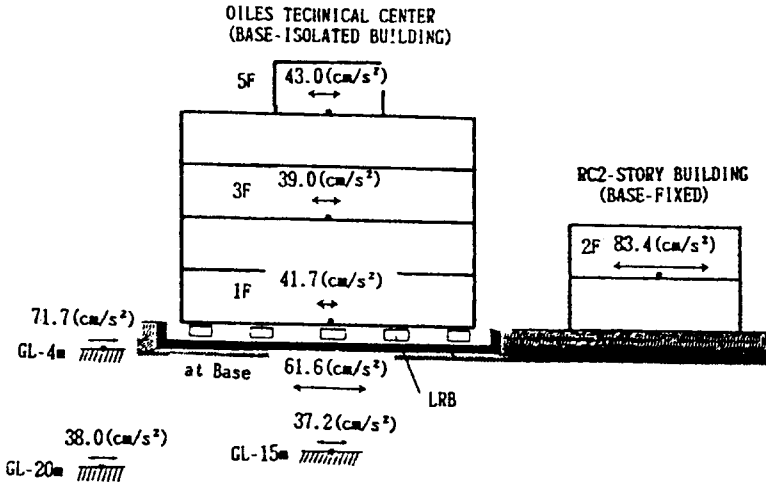


그림 8 측정된 최대 진동 가속도

에서의 진동은 지반의 2/3 수준으로 줄었으며 인접한 고정기초의 2층 RC(Reinforced Concrete) 건물의 경우 2층에서의 가속도 값이 83.4gal로 진동이 오히려 증폭되고 있다. 이는 면진 설계된 건물과 정반대 현상으로 같은 높이에서 진동치를 비교하면 LRB 기초로 건축된 건물이 고정기초로 건축된 건물에 비해 절반의 진동 수준을 보이고 있다. 면진건물의 또다른 장점은 건물자체의 진동응답은 전형적인 Sway Mode 를 보여주고 있어 건물 구조물에 작용하는 응력이 거

의 없다는 점이다.

4.5 설비기기의 지진 완충장치
일반적으로 건물 내부에 설치되는 각종 설비기기의 방진시 금속 스프링만으로 지지하게 되는데 지진이 발생할 경우 장비에 큰 충격 진동이 가해져 장비가 기울어지거나 배관 연결의 파열이 발생한다. 지진발생후 건물 기계실 내부 모습의 사진을 보면 방진 스프링이 여기저기 많이 흩어져 있음을 흔히 보게된다. 따라서 지진으로 인한 장비의 안전성이나 진동의 흡수를

위해 지진완충기 혹은 장비 이동방지 장치(motion restraint system)를 설치하게 되며 그림 9는 몇가지 예를 보여주고 있다. 그림 9(a)는 전형적인 3방향 지진 완충기(seismic snubber)를 보여주고 그림 9(b)는 완충기를 방진 스프링과 조합하여 사용한 예를 그리고 그림 9(c)는 스프링-완충기 일체형의 예를 보여주고 있다.

5. 건물 제진구조의 연구개발

건물의 제진구조로는 그림 2에 나타난 바와 같이 수동적(passive) 방식의 제진과 능동적(active) 방식의 제진이 있으며 질량효과를 이용한 TMD 방식이 이제까지 가장 많이 실용화 되어 있다.

(1) TMD(Tuned Mass Damper)

Danamic Damper 라고도 불리고 진동체, 스프링 (또는 진자) 및 감쇠기로 구성되어 있으며 진동수를 구조물과 거의 같게 한 장치로 이 장치는 구조물이 진동하기 시작하면 진동체가 동조하여 크게 진동하고 외력에 저항하는 힘(관성력)을 발생시켜 구조물의 진동을 제어하는 기능을 갖는다.

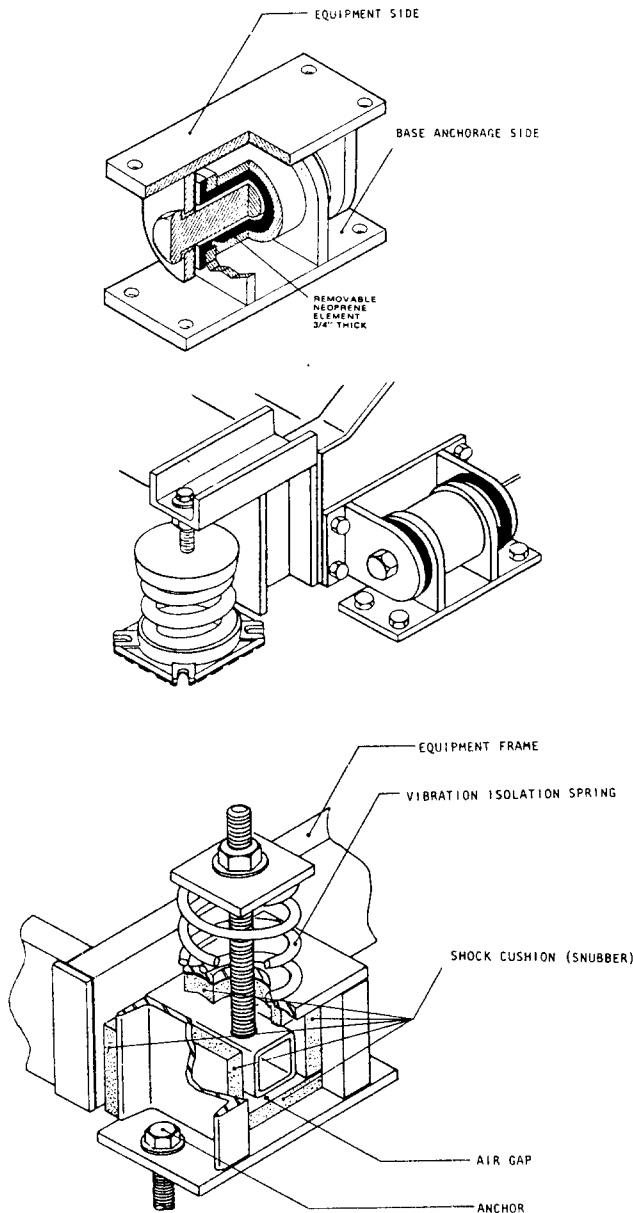


그림 9 지진 완충기의 예

- (2) TLD(Tuned Liquid Damper), TSD(Tuned Sloshing Damper), TLCD(Tuned Liquid Column Damper)

원리적으로는 TMD와 동일하지만 진동체 대신에 액체를 이용하여 Sloshing 주기를 구조물과 동조시키기도 하며 (TLD, TSD) 액주관 내의 동요주기를 구조에 동조시키는(TLCD) 것과 같은 장치로

TMD에 비하여 기구가 간단하지만 진동특성에 진폭 의존성이 있어 대형 구조물의 경우에는 장치가 커지는 문제점이 있다.

- (3) AMD(Active Mass Damper)

건물의 운동과 진동체의 운동을 센서로 감지하고 컴퓨터 제어에 의하여 진동체를 동력을 이용하여 움직여 구조물의 진동을 억제하는 장치로 TMD에 비하여 전반적으로

장치가 소형화되며, 성능이 크게 향상된다.

일반적으로 지진, 강풍 등의 동적하중이 작용할 때 건물의 거동은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F + P$$

여기서,

M : 진동계의 질량

C : 속도에 의존하는 점성 감쇠 계수

K : 변위에 의존하는 복원력

F : 계에 작용하는 외란 (바람에 의한 외력, 지진에 의한 외력 등)

\ddot{X} : 지반에 대한 건물의 상대 응답가속도

\dot{X} : 지반에 대한 건물의 상대 응답속도

X : 지반에 대한 건물의 상대 응답변위

P : 제진력

이러한 각종 기호는 Matrix 또는 Vector 표시이다.

이 경우 제진구조에 의하여 건물의 응답을 억제 또는 제어하는 양으로는 응답 가속도(\ddot{X}), 속도(\dot{X}), 변위(X) 3종류를 생각할 수 있다. 이를 위하여 질량(M), 감쇠(C), 복원력(K), 외력(F)을 제어, 조정하며 또한 제어력(P)을 도입하게 된다. 이러한 원리는 제진력을 도입하는 방법을 제외하면 종래의 내진, 내풍구조와 같은 것이며 다른 점은 종래의 내진, 내풍 구조에서는 감쇠력, 복원력 등을 기둥, 보, 벽, 지주 등 구조부재의 특성을 변화시켜 조절하는 반면 제진구조에서는 종래의 구조부재 이외의 다른 어떤 종류의 장치나 기구에 의한 조절을 한다는 점이다.

현재 실용화되어 있는 제진구조는 건물 최상층 또는 옥상에 부가 질량을 설치하여 이것을 건물의 일차 고유진동수에 동조시키는

TMD 방식과 건물의 각층간에 에너지 흡수장치를 설치하는 층간 댐퍼(Damper) 방식으로 대별할 수 있다. 제진성능 향상을 목적으로 한 능동적 제진기술의 연구개발도 활발하게 진행되어 AMD 방식도 실용화되어 있다. 이러한 제진구조의 연구개발은 대부분 미국과 일본에서 시작되었다.

표 3은 외국에 건설된 대표적인 제진구조 건물예를 나타낸다. TMD 방식의 제진 건물로는 미국에서는 John Hancock Tower (Boston)와 Citycorp Center (New York)가 유명하고 일본에서는 1986년에 건설된 Photo Tower와 1989년에 건설된 福岡 Tower가 유명하다. 층간 실시예로는 미국에서는 World Trade Center (New York)와 Columbia Center (Seattle)가 유명하며, 일본에서는 산업 문화 센터(통칭 소닉시티, 大宮)와 아사히빌딩, 吾妻橋 빌딩(동경) 등이 유명하다.

금후 계획되고 있는 건물에는

AMD 방식을 채용하는 경우가 많아질 것으로 예상되며 건물 발주자가 이것에 기대하는 것은 그 제진성능 뿐만이 아니라 최신의 제진기술을 구사한 설계라는 선진성이 건물의 부가 가치를 높이는 것도 사실이다.

6. 교량의 면진/제진 설계기술

6.1 면진교량

교량의 면진설계란 기초 분리장치 또는 기구를 이용하여 교량 구조물의 지진응답을 저감시키는 구조물 설계를 총칭하는 것으로 면진교는 주로 뉴질랜드, 미국, 일본 등지에 많이 건설되어 있다. 건물의 경우 대개 구조물과 기초 사이에 즉 각 기둥의 하단부와 기초 사이에 이 장치를 설치하나 교량의 경우 상부 구조와 교대 사이에, 그리고 상부 구조와 교각 사이에 설치한다. 그러나 설계자의 의도나 구조물 상황에 따라 교각 하부 또는 교각 중간에 설치할 수도 있다.

따라서 건물의 경우 이 방법의 기본 목적이 상부의 구조물을 보호하는 것인 반면 교량의 경우에는 기초분리면 하부의 구조물을 보호하는 것이 된다.

또한 기초 분리장치는 단단한 기반을 가진 구조물에 대해서 주로 사용되는데 이는 연약지반의 경우 이 장치가 오히려 구조물의 반응을 증가할 지도 모른다는 우려 때문이다.

일반교량과 면진교량의 차이점을 살펴보면 면진교량의 경우 교량의 상부 구조물이 하부 구조물과 분리되어 있어서 지진력이 상부 구조물에 잘 전달되지 않게 함과 동시에 하부 구조물의 수평 반력을 분산하게 된다. 그림 10에서 보는 바와 같이 고정단과 가동단으로 된 종래의 지지방식이면 지진시의 흔들림으로 고정단이 상부 구조물을 끌어당기게 되어 그 수평반력 전부를 받치기 위해 고정단의 교각이나 기초는 크게 만들어야 한다. 그러나 면진교의 경우는 모두 반고정단으

표 3 제진건물의 실시예

	건설년 (년)	건물명	장 소	건 물 총높이	1차 고유 주기(sec)	Mass중량 (ton)	비 고
매	1975	CN Tower	Toronto	553m	-	181.4	TMD
	1977	John Hancock Tower	Boston	58F	7.2	514	TMD
	1978	Citycorp Center	New York	293m	6.5	363	TMD
스	1981	Sydney Tower	Sydney	259m	-	132.5	TMD
	1986	Photo Tower	千葉	125m	2.7	15	TMD
댐	1988	고루도 Torwer	宇多津	157m	2.4	8	액체 댐퍼
	1989	東山 Torwer	名古屋	134m	2.2	19.8	TMD
	1989	福岡 Torwer	福岡	234m	3.2	3.0	TMD
	1991	I 빌딩	東京	58m	1.7	70	AMD
퍼	1992	東伸24兵松町빌딩	東京	59.9m	-	15.15	AMD
	1993	mm21 랜드마크 Tower	橫兵	296m	4.5	340	AMD
층 간 댐 퍼 방 식	1973	World Trade Center	New York	110F	-	-	VEM 댐퍼
	1983	日立本社빌딩	東京	20F	-	-	강재댐퍼
	1985	Columbia Center	Seattle	76F	-	-	VEM 댐퍼
	1988	産業文化 Center	大宮	31F	2.9	-	마찰댐퍼
	1989	아사히 吾妻橋빌딩	東京	22F	2.85	-	마찰댐퍼
	199-	후지타 工業 빌딩	東京	19F	-	-	납 댐퍼

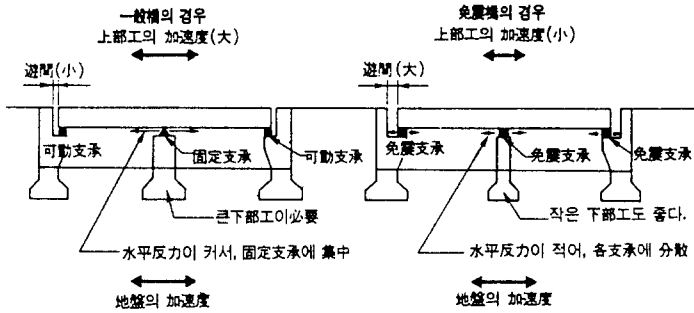


그림 10 일반교량과 면진교량의 비교

로 이루어져 있기 때문에 그림 10의 경우에는 수평반력이 교대(橋臺)에 각각 25%씩, 교각(橋脚)에 50%씩 분산된다. 따라서 교각에 큰 기초가 필요치 않으며 그 결과 건설비가 싸지고 인접 구조물과의 간섭을 피하는 것이 가능해진다.

6.2 면진교량의 설계

장주기화에 의하여 교량의 응답 가속도 즉 하부구조에 전달되는 상부구조의 관성력은 저하되지만 그 대신에 상부구조물의 응답변위는 증대되며 상부구조와 하부 구조간의 간극(遊間)을 크게 하지 않으면 상부 구조물이 하부구조에 부딪히게 된다. 그러나 이 간극은 교량상부 구조물의 신축이음장치(Expansion Joint) 등과의 관계로 그리 크게 할수는 없으며 서로 상반되는 조건중에 최적의 장주기화가 어느 정도인가가 교량 면진설계의 가장 중요한 판단항목이 된다.

큰 변위를 흡수할 수 있고 내구성도 우수한 신축이음장치의 개발이 중요하지만 현 상황에서는 무리하게 구조물의 장주기화를 피하지 않고 감쇠성능을 높인 면진 받침을 적용한 탄성고정의 분산받침으로 설계하는 것이 가장 면진설계를 도입하기 쉽다. 교량에서 면진기술을 개발할 때에는 다음과 같은 점을 염두에 두어야한다.

(1) 받침의 강성을 변화시켜 각 하부구조에 원하는 정도로 지진력을 분산하고 면진받침의 도입에 의해 감쇠성능을 향상시켜 지진력의 저감을 도모한다.

(2) 무리하게 장주기화 하지 않고 지진력의 배분과 균형을 취하면서 지반과의 공진을 피하여 고유주기를 조절한다.

(3) 교축 방향만이 아니라 교축 직각방향의 받침 이동도 허용하여 국부적인 무리에 의해 받침이 지진시에 손상되지 않도록한다. 이 개념은 특히 사교나 곡선교에 유효하다.

(4) 지진시의 변형이 받침에 집중하도록 하여 그 이외의 개소에 손상이 생기는 것을 방지한다. 손상된 받침은 지진후에 용이하게 교환할 수 있는 구조로 한다.

6.3 교량의 제진설계

교량에서 제진설계란 구조물에서 외부로부터 에너지를 공급하여 구조물의 지진응답을 저감시키려는 설계방법이다. 여러가지의 방식이 제안되어 있으나 가장 일반적인 방법은 Active Mass 라 부르는 추와 교량의 진동에 대응하여 추의 운동을 제어할 수 있는 제진회로 및 Actuator 로 이루어진 장비를 교량에 설치하는 것이다. Active Mass 방식에서는 추 중량과 추의

운동거리(Stroke)에 대응하여 지진시에 교량의 진동 제어량이 변하게 되며 Actuator 의 구동에 필요한 외부에너지 양도 달라지게 된다. Actuator 의 구동에는 일반적으로 전력 또는 유압이 이용되며 교량의 진동을 적게 하려면 할수록 다량의 전력 및 유압이 필요하게 된다. 이러한 개념을 지진만이 아니라 바람에 의한 구조물의 진동제어에 이용하려는 생각도 있으며, 이 경우에는 「制震」이라하지 않고 「制振」이라 한다. 원리적으로는 동일하지만 바람에 의한 구조물의 진동은 지진에 의한 진동에 비해 진폭도 작으며 매우 적은 제어에너지밖에 필요로 하지 않는다. 이 때문에 가설시의 바람에 의한 교량의 진동제어 등 이미 실용화가 되어 있는 것이 많다.

제진설계를 적용하는 장점으로서 는 구조물의 내진성을 근본적으로 향상시키며, 엄격한 환경조건 하의 특수 구조물은 제진설계의 도입에 의해 비로소 건설이 가능하게 된다는 점이다. 한편 제진설계가 가능하기 위해서는 다음과 같은 조건이 갖추어지지 않으면 안된다.

(1) 대지진시에도 안정된 에너지 공급이 가능해야 하며 특히 구조물 내에 에너지 저장 및 공급하는 시스템이 갖추어져 있어야 한다.

(2) 구조물내에 설치 가능한 Compact 한 제진장치가 개발되어야 한다.

(3) 대지진시에도 확실히 작동하며 장기적으로 안정된 제진장치가 개발 되어야 한다.

어느 것이나 고유의 문제를 내포하고 있으나 특히 (1)의 에너지 공급조건이 현 상황에서는 가장 큰 문제이다. 제진장비를 필요로 하는 대지진시에 다량의 안정된 에너지 공급의 가능성을 현 상황에서는 확신하기 어려우며, 이 문제가 해결

되지 않는 한 토목 구조물에 제진 설계를 이용하는 것은 당장은 곤란할 것으로 보인다.

6.4 기타 제진기술

이상과 같이 제진설계는 근본적으로 구조물의 지진응답을 저감시킨다는 점에서 매력적인 방법이기는 하지만 구조물의 진동제어에 필요한 에너지 공급량이 크므로 현상에서는 교량등의 토목 구조물에 실용화가 가능한 문제는 아니다. 이 때문에 제진설계의 여러가지 변화가 고려되고 있으며 그 중의 하나가 면진설계와 제진설계를 조합하여 현실적으로 공급가능한 에너지 양으로 효과적으로 구조물의 진동을 제어하려는 조합형(hybrid) 제진방법이다.

또 하나의 유망시되는 것은 반능동(semi-active) 형식에 속하는 가변형 점성 댐퍼(variable damper)로 댐퍼의 점성계수를 구조물의 응답에 대응하여 변화시켜 구조물의 진동을 최소가 되도록 하는 것이다. 가변 댐퍼란 기본적으로는 점성 댐퍼이지만 점성감쇠력을 교량의 응답에 대응하여 변화되도록 한 것이다. 즉 교량의 상부구조물의 진동진폭이 작은 경우에는 점성계수를 크게하여 사실상 차량의 제동 하중 등에 대해서는 고정받침과 같은 기능을 하며 온도변화에 의한 다리보의 변형과 같이 속도가 늦은 운동에 대해서는 가동받침으로 작용한다. 지진이 발생하여 상부구조물의 진동이 어느정도 커지게 될 경우에는 에너지 흡수를 최적으로 함과 동시에 하부구조에 전달되는 지진력을 적절히 조정 가능하도록 감쇠계수를 낮춘다. 상부구조물의 진동이 더욱 커지게 될 경우 그 이상의 진동을 제어하기 위하여 서서

히 점성계수를 크게하여 Stopper의 역할을 갖게 하는 것이다.

7. 맺 음 말

본 글에서는 건물 및 교량의 면진/제진 기술의 연구개발과 실용화 현황에 대하여 전반적으로 살펴보았다. 현재 면진/제진 기술의 연구는 매우 활발하게 진행되고 있으며 여기서 그 전체를 서술하기는 어렵다. 교량의 면진/제진 기술은 새로운 내진기술로서 금후 교량의 다경간(多徑間) 연속화, 장경간화(長徑間化), 고교가화(高橋脚化), 엄격한 용지조건에서의 교량건설에 중요해질 것으로 생각된다.

현재 제진구조 시스템은 안전한 거주성의 관점으로부터 중소지진 및 강풍 등에 대한 외란대책으로서 실용화 기술이 진행되고 있다. 실무적인 관점으로부터 주로 구동장치 개발이 중심이 되고 있으며 이것에 의하여 제진구조 시스템의 성능이 결정된다고 해도 과언이 아니다.

앞으로 국내의 면진/제진기술 개발 연구에 있어서 다음 사항 들을 충분히 검토할 필요성이 있다.

(1) 면진기술

미국이나 일본등과 같이 지진이 많이 발생하지 않는 우리나라의 상황을 고려하여 본 기술을 적용할 수 있는 분야를 명확히 파악하여야 한다. 현 상황에서 예상되는 적용 가능한 분야로는 원자력 시설, 가스 공급시설 등 고도의 안전성이 요구되는 구조물과 철도진동 및 차량 교통진동으로부터 일정수준 이하의 진동환경을 유지해야 하는 반도체공장 등의 정밀공장 및 일반 건물을 생각할 수 있다.

(2) 제진기술

평면에 비하여 구조물의 높이가 높은 탑, 연돌, 고층 건물 등을 대상으로 국내에서도 가까운 장래에 풍하중에 의한 진동으로부터 구조물의 안전성과 거주자의 쾌적성 향상을 목적으로 하는 제진기술 개발의 필요성이 대두될 것으로 생각된다.

(3) 교량의 면진/제진기술

현재 사용되고 있는 탄성받침, 포트 베어링(Pot Bearing) 등을 기본으로 면진설계의 개념이 도입될 수 있을 것으로 생각되며 기술 개발시에는 그 목적과 적용대상을 분명히 할 필요가 있다.

참고 문헌

- (1) 藤田, 1991, "建築 免震/制震 技術의 研究 開發과 實用化의 現狀," 機械의 研究, 第 43卷 第12號.
- (2) 北川良和, 1992, "建築構造物의 Active 制振技術 現況과 今後의 開發方向," 計測과 制御 Vol. 32, No. 4.
- (3) 川島一彦, "道路橋의 免震, 制震設計 技術," Concrete 工學, Vol. 30, No. 33.
- (4) Shimoda, I. and Ikenaga, M., 1989, "Study on Characteristics and Effects of Seismic Isolation of Laminated Rubber Bearing with Lead Plug," Seismic, Shock and Vibration Isolation, pp 49~57.
- (5) McGavin, G. L., 1981, Earthquake Protection of Essential Building Equipment, John Wiley & Sons, Inc.