공기청정기술 제9권 제2호(1996) / 19

구조물에 대한 진동 및 진동제어 방법에 관한 해석

이 호 범
삼성물산(주) 건설부문
기술연구소 / 선임연구원

1. 서 론

현대화된 엔지니어링 구조물들은 개념적인 면에서는 정착되어 가며, 설계와 관련되어서는 새로운 모습이 되도록 요구된다. 이는 점점 복잡해 가는 구조형상에 따라 재료의 응력을 산정하기 위한 재료거동 예측기술 및 해석기술이 크게 발전하고 있기 때문이다. 세장하면서도 많은 하중부담을 갖으며, 보다 안락한 환경여건이 요구되는 현대건물이나, 긴 스팬을 갖고 있는 교량인 장대교량은 필수적으로 진동학적으로 구조 및 환경적인 기준에 맞도록 설계되어야 하고 또한 이에대해 증명되어야 한다.

진동의 구분은 보는 관점에 따라 달리 구분할 수 있다. 그러나 보통 진동의 종류를 대별한다면 지진동 및 풍진동과 공해진동을 들 수 있다. 이러한 진동의 구분은 진동원의 종류와 그에 따른 특성등에 따라 이루어지며, 또한 방진 또는 제진기술은 이를 바탕으로하여 적용되게 된다. 현재 건축물에서는 두가지 범주의 경우에 대해서 진동제한을 받고 있다. 즉 구조적으로는 지진, 바람 등에 관한 진동해석 및 설계와 함께 환경적으로는 각종 공조기기진동, 엘리베이터 모터진동, 외부로부터 오는 교통지동 및 항타 또는 발파에 의한 공사진동 등에 의한 공해진동의 제진을 위한 노력을 수행하고 있다. 그러나 이러한 진동학적인 접근이 기본설계당시 고려되어 시공되어야 하지만, 실질적으로는 이에 대한 실행이 만족스럽게 진행되고 있지가 않다. 그러므로 현재 공사가 완료되었거나 진행중인 구조물들에서 민원과 함께 진동성능저하에 대해 문제제기가 점점 증가하고 있다.

여기서 진동개념과 지진동, 풍진동 및 공해진동에 관한 일반사항과 함께 이에관한 타당한 구조진동제어법을 논하기로 한다.

2. 구조진동의 일반개념

진동해석의 중요성은 진동으로 교란의 영향을 받고 있는 구조물이 최종적으로 과대

변위 또는 과대응력의 발생에 따른 위험을 방지하도록 한다. 이때 중요하게 고려할 것은 공진현상에 대한 것이다. 구조물은 기하형상과 재료가 결정되면 자기고유의 진동수(고유진동수)를 갖게되고, 고유진동수중 특정대역에서 크기(Magnitude)가 상대적으로 큰값을 갖는 탁월진동수를 얻게 된다. 외부적으로나 내부적인 가진에 의해 강제진동이 발생하면 구조물이 진동하게 되고, 구조물의 고유진동수와 같은 진동특성을 갖고 있는 작은 가진력에 의해서도 그 움직임이 크게 증폭하게 된다. 따라서 재료강도에 가까운 응력에 노출될 때 재료의 피로파괴학적 관점에서와 같이 응력-반복하중 관계에 따른 구조재료 피로파괴가 야기되기도 하며, 대형펌프 등 회전기기들의 진동이 기초를 거쳐 정밀기기에 전달되므로써 정밀기기에 고장을 일으킬 수 있다.

선형적인 거동을 하는 진동계의 물리적 의미는 다음과 같다. 존재하는 임의의 구조계는 주어진 에너지를 물리학적인 구성 요소들로 분리하여 수식화 된다. 즉 다음의 식에서와 같이 질량(Mass)은 가속도(Acceleration)에 의한 영향성을 표현하면서 운동에너지를 대변하고, 감쇠(Damping)는 속도(Velocity)에 의한 진동의 발산, 강성(Stiffness)은 처짐과 관련된 것으로 위치에너지를 대표한다.

$$M\ddot{Y}(t) + C\dot{Y}(t) + KY(t) = F(t)$$

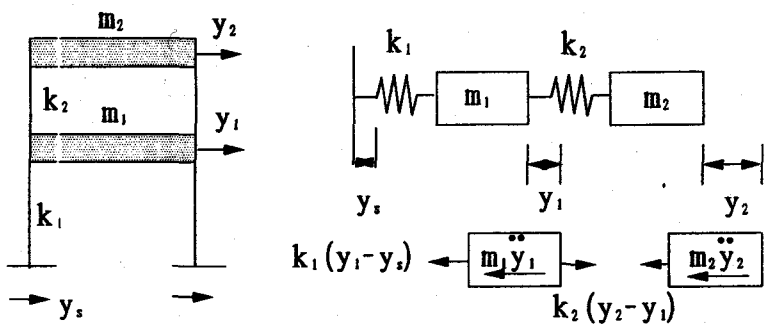
$M\ddot{Y}(t)$: 질량과 가속도

$C\dot{Y}(t)$: 감쇠와 속도

$KY(t)$: 강성과 변위

$F(t)$: 주어진 힘

이 식은 구조체 부위와 방향의 움직임을 대변하는 자유도(Degree of Freedom)에 따라 식이 구성되어 수치적인 계산이 수행된다. 다만 간단한 계산을 요하는 것을 제외하고는 일반적으로 컴퓨터 프로그램에 의한 진동해석을 수행한다. 이 개념은 진동학 이론에서 가장 기본이 되고 있는 항목이므로 2층 빌딩 모델에 대해 모드중첩법을 이용한 진동해석 과정을 개념적으로 간단히 예시한다.



(a) 2층구조 모델 (b) 수학적 모델과 자유도

그림 1 구조진동해석을 위한 예

그림 1의 a)는 2층 빌딩의 수학적 모형이다. 대부분의 구조물을 수치적으로 해석하여 원하는 물리적 진동량을 구하기 위해서 이와 같은 모델링 작업이 요구된다. 이 모델은 지반운동이 건물진동에 미치는 영향성을 분석하기 위한 것으로서 k는 각층 기둥전체의 합성강성, m은 각층의 집중질량, y는 각각의 위치에 따른 변위, $\ddot{y}$는 가속도를 나타낸다. 결과적으로 진동운동에 관한 선형운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$m_1 \ddot{y}_1 + k_1(y_1 - y_s) - k_2(y_2 - y_1) = 0$$
$$m_2 \ddot{y}_2 + k_2(y_2 - y_1) = 0$$

(상대변위) $u_1 = y_1 - y_s$

$u_2 = y_2 - y_s$

(가속도 성분) $\ddot{y}_1 = \ddot{u}_1 + \ddot{y}_s$

$\ddot{y}_2 = \ddot{u}_2 + \ddot{y}_s$

결과적으로

$$m_1 \ddot{u}_2 + (k_1 + k_2)u_1 - k_2 u_2 = -m_1 \ddot{y}_s$$
$$m_2 \ddot{u}_2 - k_2 u_1 + k_2 u_2 = -m_2 \ddot{y}_s$$

상기식의 전개는 운동방정식이 구조모델로부터 결정되는 과정을 설명하였다. 다음단계로 구조물의 임의의 위치에서의 운동의 크기 a, 질량의 운동크기에 대한 기여도 Γ, 강제진동시의 일반시간함수인 모드변위 z, 스펙트럼 모드응답 g 등을 계산하여 요청되는 위치에서의 최대 변위를 구한다. 이 식들을 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{z}_1 + \omega_1^2 z_1 = \Gamma_1 \ddot{y}_s(t)$$
$$\ddot{z}_2 + \omega_2^2 z_2 = \Gamma_2 \ddot{y}_s(t)$$

여기서

$$\Gamma_1 = -\frac{m_1 a_{11} + m_2 a_{21}}{m_1 a_{11}^2 + m_2 a_{21}^2}$$

$$\Gamma_2 = -\frac{m_1 a_{11} + m_2 a_{21}}{m_1 a_{11}^2 + m_2 a_{21}^2}$$

$$u_1 = a_{11} z_1 + a_{12} z_2$$
$$u_2 = a_{21} z_1 + a_{22} z_2$$

$$z_1 = \Gamma_1 g_1$$
$$z_2 = \Gamma_2 g_2$$

$$\ddot{g}_1 + \omega_1^2 g_1 = \ddot{y}_s(t)$$
$$\ddot{g}_2 + \omega_2^2 g_2 = \ddot{y}_s(t)$$

$$u_1(t) = \Gamma_1 a_{11} g_1(t) + \Gamma_2 a_{12} g_2(t)$$
$$u_2(t) = \Gamma_1 a_{21} g_1(t) + \Gamma_2 a_{22} g_2(t)$$

결과적으로 최대상대변위를 구하면 다음과 같다.

$$u_{1MAX} = \sqrt{((\Gamma_1 a_{11} g_{1MAX})^2 + (\Gamma_2 a_{12} g_{2MAX})^2)}$$
$$u_{1MAX} = \sqrt{((\Gamma_1 a_{11} g_{1MAX})^2 + (\Gamma_2 a_{12} g_{2MAX})^2)}$$

N개 층의 건물에 관한 해를 구할 때는 많은 양의 계산이 이루어지므로 Matrix해법 및 컴퓨터를 이용한 계산이 이용된다. 이러한 변위값과 함께 가속도와 속도 등의 산정 결과는 구조물 설계시 직접적용되어 보다 안전한 구조물이 되도록 한다.

이상과 같이 구조진동학에서 가장 기본이 되는 진동체의 진동방정식의 구성과 모델방법 및 계산에 따른 결과도출 방식을 알아보았다. 여기에서 설명되고 있는 수치 물리량들

은 구조물에서의 지진에 의한 진동제어나 공해진동에 의한 방진대책시 항상 고려해야할 변수들이다. 즉 진동제어에 관한 모델제시에 있어서 질량의 조절, 댐핑의 확산 및 강성의 변화를 각각 제어 구조물의 특성과 요구에 맞추어서 활용해야 하는 것이므로 이에대한 개념정립이 확실해야 한다.

구조물에 가해지는 가진력은 주기적인 형태를 갖거나 비주기적인 형태 또는 임의의 하중형태를 갖는다. 비정형적인 가진력 신호처리를 위해 통계학적인 고찰이 필요하기도 하다. 가진력은 진동해석에 있어서 매우 중요한 요소이다. 구조모델과 구성방정식의 정밀도가 확립되었다고 해도 가진력산정이 잘못되었을 때는 결과의 오류로 인해 과정 전체의 가치성이 없어진다. 많은 가진력 범주중 건설진동과 관련되어서는 지진, 바람, 발파, 항타, 압착, 굴착, 공작기계, 차량진동 등을 들 수 있다. 고층빌딩은 지진과 바람에 의한 영향을 매우 많이 받고 있다. 그중에서도 힘에 관해서는 바람의 영향에 지배를 받게 되므로 이에대한 징동해석과 골조시스템 및 부재상세설계가 행해지게 된다. 과진동에 따른 진동제어에 관해서 현재까지 여러가지 기법이 이용되고 있으며 지금도 계속적으로 연구발전되고 있다. 발파 및 항타의 경우 소음과 함께 진동민원문제를 야기시킨다. 이의 문제해결을 위한 노력중 프로그램에 의한 해석에 기대하기는 상당히 어렵다. 이는 대상구조재료의 비균일성, 비등방성, 비탄성의 정도가 타 대상구조보다 크기 때문에 모델링에 한계가 있게된다. 따라서 시험발파(시발파) 또는 시험항타(시항타)를 하여 현장진동측정과 진동신호의 분석에 의한 결론을 이끌어 내는 것이 일반적이다. 결과적으로 이에 의한 진동도 가진시 진동 형태가 변화변수의 하나이다. 지하철 및 고속전철에 의한 차량진동은 열차운행 횟수, 차량속도, 차량종류, 궤도종류, 구조물, 기초, 지반 등에 따른 다른 가진력 및 응답을 갖는다. 이들에 관한 것은 해당 절에서 설명한다.

일반적으로 구조물에 충격가진(Impulse Loading)이 가해질 때, 진동현상의 실체를 수학적으로 구명하기가 쉽지가 않다. 우선 충격 가진력은 구조물의 재료와 구조계에 영향을 주게 된다. 대부분 재료 항복점 이하의 응력을 주는 충격력은 재료도 탄성영역에서 거동을 하게하고 이 영역에 관한 수치적인 접근은 상당히 발전한 상태이다. 그러나 대부분의 경우 가진점과 수진점간의 반무한적인 경계요소들을 갖게 되고, 가진력의 크기가 커지므로써 발생하는 대변위 거동이 주종을 이루게되므로 이에 대한 수치적 거동규명은 매우 어렵게 된다. 이는 실제 상황에서 자주 볼 수 있듯이 가진력이 작을 때는 구조계 전체의 기하적인 움직임이 해석결과로 도출된 고유진동의 특성과 매우 근접될 수있으나, 가진력이 클수록 가진점 부근의 재료변화와 이의 인접 부분에 구조변화가 전체 구조계에 영향을 주고 있어 해석 정밀도가 떨어진다.

3. 지진과 풍력 및 공해진동

3.1 지진동

구조물과 연계되는 진동중 지진동은 연구대상의 큰 부분을 차지한다. 지진동은 큰 에너지를 갖는 진동을 지반을 거쳐 구조물에

도달되어 정도에 따라 건물 및 교량을 파괴하기도 한다. 지각은 그림 2와 같이 판(Plate)이라 불리우는 여러개의 큰 고체조각인 태평양판, 북미판, 남미판, 유라시아판, 아프리카판, 인도－오스트레일리아판, 남극판, 필리핀판 등 8개의 큰 판과 그 이외에 작은 판들이 있으며 많은 단층들로 구성되어 있다. 판들은 지구 위에서 서로만나고 떨어지면서 지각의 변동을 야기시킨다. 서로 조금 빠른 속도로 만나게 될 때는 하나의 판이 다른 하나의 판 밑으로 침강하게 된다. 이 침강하는 판은 천천히 상부 맨틀의 깊은 곳으로 침투하면서 마찰열로 부분용해를 이루게 된다. 이와같이 같은 방향이든 반대 방향이든 판들의 거동은 경계부근에서 거대한 화산이나 섬들을 형성하거나 해구를 이루게 한다. 지진은 이러한 경계면중 끝과 끝이 만나지 않는 단층에서 발생하며 단층면들 사이의 마찰운동이 지진파와 진동을 일으키게 된다.

지진파의 흐름은 그림 3과 같이 실체파와 표면파의 형태로 전파되며, 그림 4와 같이 각 파의 에너지 전달률을 갖고 있다.

일반적으로 파는 전파되면서 전파경로에의 변수로 파형자체가 변화하지만 해석차원에서는 원형 그대로 전달된다고 가정한다. 파의 전달순서로 지진 발생시 가장 먼저 도달하는 진동이 P파인데 이는 지반내부가 압축작용을 하는 형태로 전달되고 압축파 또는 종파라 하며 보통 초기미동이라고도 한다. 이 뒤를 이어 주기가 길고 진폭이 큰 진동이 이어지는 S파가 오며 이를 횡파로 부른다. 이 파들의 특징은 전파속도는 빠르나 경계대상의 파는 아니며 지중전파시 강도의 변화가 거리의 자승에 반비례한다. 다음으로 오는 것은 R파로써 레일리(Rayleigh)파라고 하는 파인데 이는 진폭이 크고, 먼거리까지 이동이 가능하며 지진파 에너지의 대부분을 차지하고 있는 성분이다. 이 파는 표면에서 수평성분의 크기가 크고 수직성분이 작다. 그러나 약간 들어간 곳에서 수평성분이 되는 곳이 있으며 이 때는 수직성분만 남는다. 더 깊은 곳에서는 수평성분의 방향이 반대로 되며 급격히 약해진다. 파의 강도는 거리의 자승근에 반비례한다. 그림 5에 이와 같은 진동성분들의 전달순서를 예시한다.

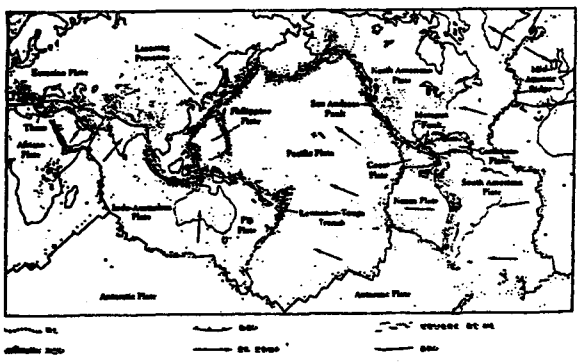
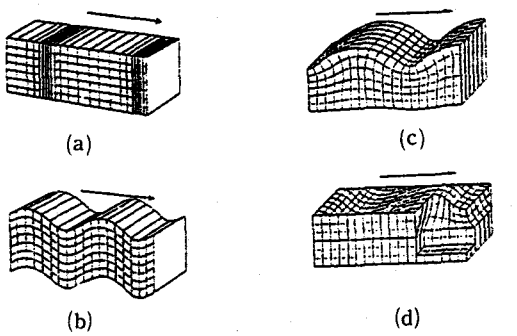


그림 2 지각을 구성하는 판(Plate)과 단층



실체파 : (a) 압축파(P파) (b) 횡파(S파)
표면파 : (c) 레일리파(R파) (d) 러브파(L파)

그림 3 지진파의 성분

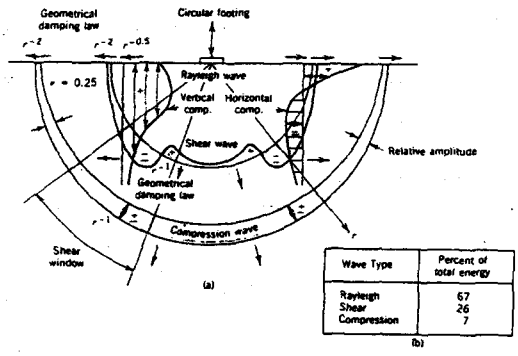


그림 4 탄성 반무한체에서의 원형판 진동원에 관한 파변화

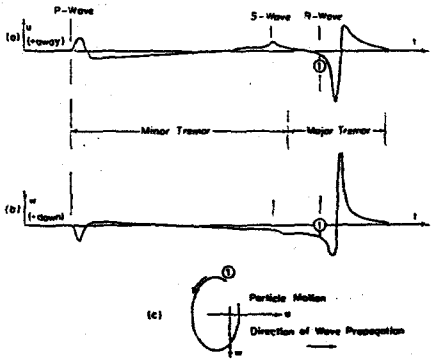


그림 5 수진점에서의 파전달순서

대표적인 지진동 자료로는 그림 6과 같이 El Centro 지진(1940년)을 들 수 있다. 이러한 지진력에 대해서 가진력의 시간이력을 입력으로하는 Computer프로그램을 이용해 구조물 전체의 진동해석을 하여 구조물의 동적 거동을 규명할 수 있다. 해석방법으로 등가정적해석, 모드해석(스펙트럼해석) 및 시간이력해석(직접적분, 모드중첩해석)등이 있다.

우리나라에서는 지진발생수가 비교적 적고 강도가 약하다. 우리나라에서는 1986년 12월 개정된 건축법, 1988년 1월 개정된 건축법

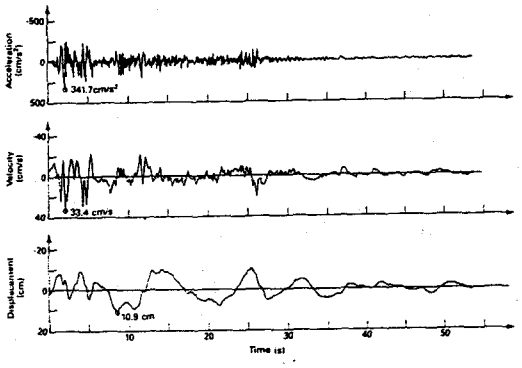


그림 6 1940년 E1Centro지진의 N-S성분

시행령과 동시에 개정된 건축물의 구조기준에 관한 규칙에서 내진설계의 근거를 두고 있다. 내진설계시 하중산정 과정중 건물의 등가정적해석법에 따른 밑면전단력(Base Shear Force, V) 및 층전단력 산정 다음과 같이 한다.

모든 빌딩은 최소수평전단력, V를 견딜 수 있도록 양쪽축 각각을 중심으로 구조설계가 이루어져야 한다.

$$V = AICSW/R$$

V : 밑면전단력　　A : 지역계수
I : 중요도계수　　C : 동적계수
S : 지반계수　　W : 건축물전중량
R : 반응수정계수

지진구역을 나타내는 지역계수(A)는 0.08(지진구역 1)과 0.12(지진구역 2)을 사용하며 이는 최대지반가속도를 의미한다. 중요도계수(I)는 구역을 1,2,3으로 나누어 중요 건축물의 정도에 따라, 도시계획 구역 여부에 따라 각각 계수값을 1.5~0.8까지 설정한다.

이는 경제적, 사회적으로 피해의 영향이 큰 건물은 내진 안전성을 높일 수 있도록 배려를 한 것이다. 지진에 의해 구조물이 진동할 때 예상되는 구조물 거동은 간단히 표시할 수 없을 정도로 복잡하다. 따라서 단자유도계로 가정된 응답스펙트럼을 지반조건이 다른 여러 지진기록을 바탕으로 구성하여 지진설계자료로 활용하게 된다. 여기서는 지진의 주기를 이용하여 동적계수를 산정한다. 주기(T) 계산법은 구조물 형식에 따라 다르지만 기본적인 동적계수(C)는 $C=1/(1.2\sqrt{T})$ (단, $C\leq 1.5$)로 계산하고 지반계수와의 곱이 1.75를 넘지 않도록 한다. 지반계수(S)는 지반상태의 단단함을 기준으로 각각 1.0(지반종류 1)에서 1.5(지반종류 3)으로 규정하고 있고 반응수정계수(R)은 구조방식에 따라 작게는 2.0에서 크게는 6.0까지 범위를 주고 있다. 이 반응수정계수는 구조부재의 연성에 관계하여 연성이 큰 구조물의 경우 비선형 거동을 고려할 수 있도록 큰 값을 갖게되어 지진하중을 낮게 책정한다. 또한 지진하중은 관성력에 의한 거동을 나타내므로 건물의 질량의 크기에 따라 유효중량(W)를 각각 조건에 맞도록 산정하여 계산한다. 이상과 같이 구조물의 밑면전단력을 산정한 후 층전단력을 구한다. 각층의 전단력은 위에서 구한 밑면전단력을 각층의 위치로 배분한다. 이는 지진하중이 각층의 중량에 비례하게 되고 높은 층 일수록 지진하중이 크게 계산된다.

지진에 관한 이론과 해석 및 Engineering을 위한 작업은 상당히 복잡하다. 위에서 일부 언급된 등가정적해석법은 지진에 의한 구조물에의 하중분배 형식을 이해하도록 하지만 비틀림 현상 규명, 전도에 관한 내용, 층변위 및 건축물간의 간격에 관한 것들을 규명해야 한다. 그러나 구조물 형태가 비정형적이고 1차 모드 이외의 고차 모드에 따른 진동모드의 영향을 고려할 때는 동적해석을 수행하도록 하고 있다. 동적해석에서 모드해석은 구조물에서 발생할 수 있는 각 모드별 최대거동을 기지의 지진기록을 이용하여 단자유도계 최대응답을 구한 응답스펙트럼으로부터 구한 다음 모드별 최대거동을 SRSS (Square Root Sum of Squares)등의 수치해법을 통하여 구조물의 최대거동을 예측하게 된다. 2장의 구조진동의 일반개념을 해설하는 과정에서 보여준 것이 시간이력해석의 모드중첩법에 관한 것이다.

지진의 규모(Magnitude)와 진도(Intensity)를 정의하고 피해의 정도를 나타내는 척도로 1935년 미국의 지진학자 리히터는 강도를 1에서 9이하의 숫자로 나타내었다. 이는 지진에너지를 정량적으로 표현하였다(리히터 스케일). 리히터 스케일 1의 강도는 60ton의 폭약의 힘에 해당된다. 다음으로 스케일 1만큼 증가할 때 마다 각각 31배의 강도가 증가하게 된다. 진도는 지진동의 강약을 나타내며 인체의 감각과 주위의 물체나 구조물에 지진동이 미치는 영향을 말한다. 진도표시로는 계급을 0에서 Ⅷ까지 구분한 일본의 JMA (Japan Meteorological Agency), Ⅰ에서 Ⅹ까지로 구분한 유럽의 로시-포엘 진도계급, 미국에서 많이 사용하는 진도계급 Ⅰ에서 Ⅻ까지로 구분한 MM(Modified Mercalii) 진도계급 및 Ⅰ에서 Ⅻ까지의 동유럽-소련에서의 진도계급을 들 수 있다. 이들 계급간의 관계는 표 1과 같다.

표 1. 진도등급과 규모와의 관계

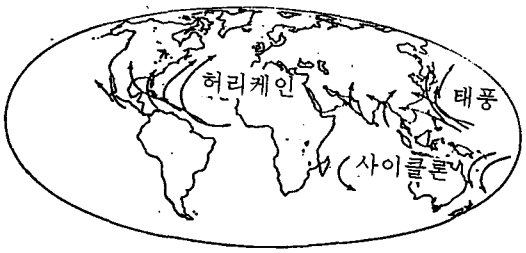
진도	MM	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	JMA	I			II	III	VI	V		VI		VII	
	RF	II	III		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
	MSK	II	III		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
규모		2		3	4		5	6		7		8	

이러한 계급등은 각각 평균속도－진도현상－평균최대 가속도와 함께 설명이 이루어진다. 일예로 평균속도가 45－55cm/sec일 때 가속도는 0.5－0.55g에 해당될 때 MM진도는 IX에 해당된다. 이 때는 특별히 설계된 구조물에 상당한 피해를 주고 잘 설계된 구조물이 기울어진다. 일반 설계 구조물은 기초에서 벗어나며 땅에는 금이 명백하게 생성되는 정도의 현상이 나타난다.

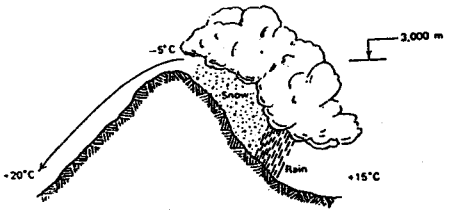
종합적으로 개념론에 입각한 지반진동의 형성, 지진진동의 형태와 해석법등을 이해하므로써 내진을 위한 지반 및 구조계획에의 중요성이 인식되며 특별힌 진동제어 시스템의 도입이전에 구조물의 기본골격에서 고려할 수 있는 많은 요소들을 거론하게 된다. 따라서 4장에서는 진동제어를 위한 수동적인 고려사항과 함께 능동적인 제어방법을 제시한다.

3.2 풍하중과 풍진동

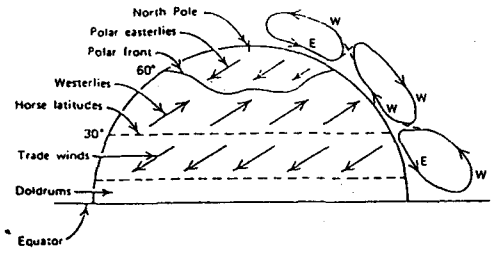
바람이란 지구상의 공기이동을 말한다. 공기대류는 자전과 지표와의 마찰 때문에 위도에 따라 나누어진다. 저기압에서 발생하는 2차 대류현상인 태풍, 허리케인, 사이클론 등은 동일한 종류의 현상이지만 지역에 따라 구분하여 부르고 있다. 태풍의 에너지원인 수분은 육지진입 상실되며 육지와의 마찰로 위력이 현저히 줄어든다. 북반구에서는 반시계방향으로 회전하고 속도는 대략 10km～50km 정도이며 눈의 크기는 30km 정도이다. 구조물에 미치는 지역적인 바람도 영향도가 크다. 우리나라에서는 지역적인 바람으로 Foehn이 있다. 이는 높은 산을 넘어간 바람에서 단열압축에 의해 온도가 올라가면서 발생한다. 그림 7의 (a), (b), (c)는 각각 지구상의 대기순환, 열대성 태풍의 진행경로 및 Foehn 현상을 도시한다. 우리나라에서는 거의 발생하지 않지만 미국 중서부의 Tornado는 바람에서 가장 강력한 것이다. 이 바람의 크기는 직경이 300m 정도이며, 최대풍속은 350km/hr 정도로 예측되고, 이동속도는 30km～100km 정도이다. 그림 8에서와 같이 일반적인 고도에 따른 평균풍속의 분포가 이루어진다. 풍속은 일정시간 동안의 평균치와 변동성분을 분리하여 취급한다. 국내에서는 지형조건이 개활지인 조건하에 지표면상 10m의 높이에서 관측시각전 10분간의 평균치를 이용하고, 미국은 최대마일풍속을 영국은 1시간 평균풍속을 사용한다. 바람분석에 관한 기술적인 부분으로 난류의 스펙트럼, 돌풍계수, 바람의 통계학적 특성등을 연구하고 해석해야 한다.



(a) 지구상의 대기순환



(b) Foehn 현상



(c) 열대성 태풍의 진행경로

그림 7 바람의 특성

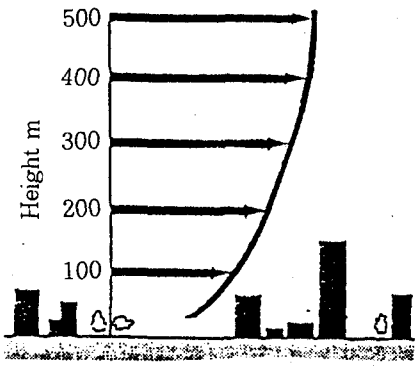


그림 8 고도에 따른 평균풍속의 분포

건설과 관련된 현대화 구조물들은 고강도 및 경량한 재료를 사용함에 따라 점차 장대화 및 고층화가 되고 있다. 이에따라 구조물들은 지진뿐만이 아니라 바람에 의해 큰 영향을 받게 되고, 고층빌딩과 같은 구조물은 실제로 지진보다 바람의 힘에 의해 지배를 받게 되므로 이에대한 사항이 설계의 중요한 요소가 된다. 바람이 건물의 하중으로 작용할 때에는 건물의 한쪽 방향으로 작용하는 것이 아니고 주요 관심이 되는 방향의 건물면을 다른면에서 오는 성분들이 영향을 주며 각각의 방향성분들이 합성되어 하나의 하중으로 계산된다. 또한 구조물(특히 고층빌딩)은 단면의 중심과 질량의 중심 및 강성의 중심이 달라질 경우가 있고 이들은 건물의 거동에 조합된 형태로 나타나게 된다. 중요 건축물의 경우 대부분 태풍 등 고풍속시 파손의 위험이 있거나 건물의 기울어짐, 지붕, 출입구, 창문 등의 국부적인 파손과 진동 및 소음에의 사용성 저해도 발생한다.

임의의 풍속에 대한 건물의 거동을 예측하기 위해서는 속도증분의 영향을 고려해야 하고 기류학적인 감쇠, 양력, 와류에 의한 가진 및 갤로핑(바람의 직각방향으로 큰 진폭을

발생시키는 1자유도 불안정 현상), 플러터(교량등의 Deck가 움직임에 따라 변하는 자발공기력으로 이에따라 구조물의 감쇠력을 저하시키므로써 구조물의 진동을 쉽게 야기시키는 현상)등의 산정이 요구된다. 큰 하중은 지진에 의한 하중과 같이 횡하중이 중요한 변수가 되나 기류 직각방향으로 진동하는 동적거동에도 신경을 써야 한다. 또한 구조물의 진폭이 임계점에 도달될 때 구조물 고유진동과 와류에 의한 진동수와의 공진문제도 해결되어야 한다. 교량진동과 관련되어 풍하중 붕괴사고중 1940년 미국 워싱턴주 타코마 해협의 Tacoma Narrow교의 경우가 매우 잘 알려져 있다. 이는 초기에 정적인 풍하중이 53m/s에 대하여 안전하도록 설계되었음에도 완공 4개월만에 불과 19m/s의 바람에 의해 심한 비틀림 진동이 발생하여 붕괴하였다. 이와 유사하게 국내에서는 1991년 완공 예정이었던 팔당대교(340m, 사장교)가 시공 마지막 단기에서 돌풍에 의해 붕괴된 사례를 들 수 있다. 이러한 사고는 장대교량의 진동문제를 중요시하게 하였고 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다.

3.3 공해진동

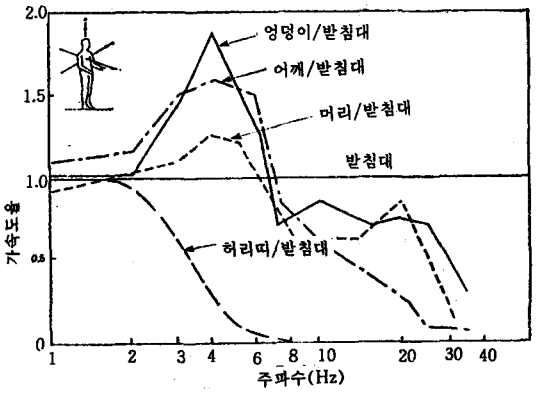
공해진동은 발생원으로부터 생긴 진동이 중간 매체를 통하여 건축물에 전달되어 기기나 인체에 영향을 미치므로써 기기작동이나 작업자의 작업활동에 제한을 주게되고 이에 따라 제품수율저감 및 작업자 상해 또는 혈관운동신경장해를 유발하게 한다. 공해진동의 해석과 연구는 지진공학적인 지식을 이용한다. 이러한 관점에서 볼 때 공해진동의 예측 및 평가는 일반적으로 4가지 정도를 수행하게 된다. 이는 파동론에 관한 연구, 지반진동에 관한 연구, 공해진동 계측에 관한 연구, 진동감각 및 평가척도에 관한 연구 등이다.

공해진동의 파동은 각각의 진동원에 따라 그 특성을 달리 한다. 그러나 이러한 진동들을 개략적인 특성을 갖고 있다. 지표에서의 진동의 크기는 일반적으로 지진과 비교할 때 미진의 영역이나 약진의 범위에 있고 영향권하의 전파거리는 약 100m의 수준이다. 성분으로 보면 수직진동이 수평진동보다 크게 나타나고 진동수 범위는 대략 1Hz~90Hz의 수준에 있다. 지반에서의 진동의 전파는 매질에 따라 속도와 진동특성이 달라진다. 종파의 경우 단단한 암반일수록 전파속도는 증가하게 된다. 그러나 절리가 존재할 때는 이의 영향이 암질의 종류변화로 영향을 주는 속도변화를 보다 크게하는 경향이 있다. 지반진동이 공해진동해석에 긴밀히 연결되는 것은 가진원으로부터 수진점까지 도달될 때까지 많은 에너지가 손실되면서 진동감쇠가 일어나기 때문에 이에관한 분석이 효율적으로 수행되도록 하여야 한다.

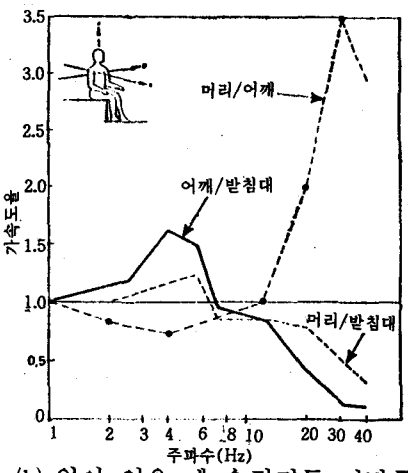
인간에 대한 진동의 영향은 심리적인 것과 생리적인 것으로 구별된다. 그러나 그 영향의 정도는 개인차 및 현지상황에 따라 강도에 차이가 있다. 심리적인 불쾌감 예로는 진동에 의한 전등의 요동, 문이나 창문의 흔들림에 대해서 불만을 호소하게 된다. 이에관한 조사 연구 방법은 진동대 위에 사람을 앉혀 놓고 여러가지 진동을 가하는 것과 일상적으로 진동의 영향을 받고 있는 주민의 의견조사와 진동측정 분석에 의한 상관관계를 조사하는 것이다. 생리적으로는 신경계, 호흡

계 및 신진대사에 영향을 주고 있다. 기본적으로 수면에 방해되는 정도로는 얕은 수면일 경우 진동레벨이 65dB 정도에 대부분 불만족하며, 깊은 수면의 경우 74dB 정도에 대부분 불만을 나타낸다. 가속도 레벨에 있어서 100dB를 초과하는 진동이 가해질 때 인체장해가 발생한다. 이는 말초순환장애, 감각장해, 운동기능장해, 순환기장해, 호흡기장해 등을 야기시킨다. 이에관한 일반적으로 밝혀진 사항으로 사람이 서 있을 때와 앉아 있을 때 신체 각부의 가속도진동율의 크기가 다르며 3Hz~6Hz 범위 및 20Hz~30Hz 범위에서 현저한 공진현상을 나타내게 되고, 발바닥이나 궁둥이에 가해진 진동이 머리에 전달되는 것은 20Hz까지는 5dB, 30Ez까지는 10dB정도 감쇠한다. 또한 진동수가 증가함에 따라 감쇠도 급격히 커지므로 고차 진동수에 의한 환경진동에의 기여는 크지 않을 수 있다. 생리적으로 허리, 가슴, 등쪽에의 통증을 유발하게 하는 진동수는 6Hz이다. 그리고 머리의 경우 초기에 9Hz, 추후 13Hz에서 가장 큰 진동의 불편함이 생긴다. 이때 안면과 눈꺼풀 부근에의 진동을 느낄 수 있다. 말을 할 때 12Hz~16Hz의 진동이 영향을 주며 1Hz~3Hz의 경우 호흡에 곤란함을 야기시키기도 한다. 복부와 가슴은 대부분 4Hz~14Hz의 진동수에서 영향을 받아 그 크기에 따라 구역질을 유발시키기도 한다. 그림 9에 이와 관련된 도표가 제시된다. 특히 폭로기준에 관한 도표에서는 거주시간의 차이에 따라 진동감각량이 다르게 표시되고 있는 것에 유의하여야 한다.

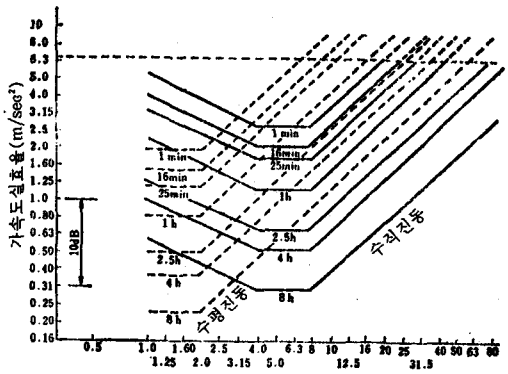
반도체 공장과 같은 정밀진동에 관한 조치가 필요한 경우는 기계에 대한 미진동 방진과



(a) 서 있을 때 수직진동전달률



(b) 앉아 있을 때 수직진동 전달률



(c) 진동의 감각특성곡선(ISO－2631)

실선은 수직진동 폭로기준
사선은 수평진동 폭로기준
수직진동의 진동레벨＝90db

그림 9 진동전달률과 감각특성곡선

관련이 되고 이를 위한 연구 및 Engineering 작업도 좀더 신중하고 정밀하여야 한다. 고집적 회로를 양산하는 클린룸에의 미진동 방진은 기계환경에 대한 것이다. 기계(Stepper), 초정밀 광학현미경 등의 진동기준은 대부분 변위가 1μm, 가속도가 0.15gal~1gal 정도의 수준으로 구조물에서 많은 진동을 차단시켜야 하고, 진동수도 상당히 낮은 영역(20Hz 이내)이 유입되지 못하게 하여야 한다. 따라서 복잡한 해석과 실험검증 및 시스템적인 방제진 형식을 갖게 된다. 또한 정밀천평의 경우는 2gal~4gal 정도의 기준이 있어야 계측이 가능하다.

일반 기계나 공장설비 등의 진동장해는 오차유발 및 사용불능 상태를 야기시키기도 한다. 현재 국내에서 사용되고 있는 방제진시스템을 효율도를 더욱 높이려면 좀더 깊은 연구와 조사 및 Engineering 작업이 요구된다. 그림 10은 정밀공장내에서 요구되는 진동관련 한계를 보여주는 그래프이며 가속도, 속도, 변위 및 진동수와의 관계를 도시하고 있다.

고층건물일 경우 강성이 상대적으로 낮으므로 바람에 의한 동적현상이 나타나고 이에 따른 진동의 진폭이 클 경우 거주자의 심리적 불안감과 업무효율을 떨어뜨려서 사용성을 저하시킨다. 실제로 폭풍이 불 때 진동측정한 결과로는 RMS 가속도가 0.002G일 경우 건물의 고층 거주자의 35%, 0.005G일 경우 45%가 멀미증세를 보였고 이에따라 일부의 기준은 건물 최상층에서 고풍속에 의해 발생하는 진동값의 빈도로 0.5G 이상의 진동이 6년에 1번 이상을 넘으면 안된다고 제안하고 있다. 이때의 RMS값의 주기는 최

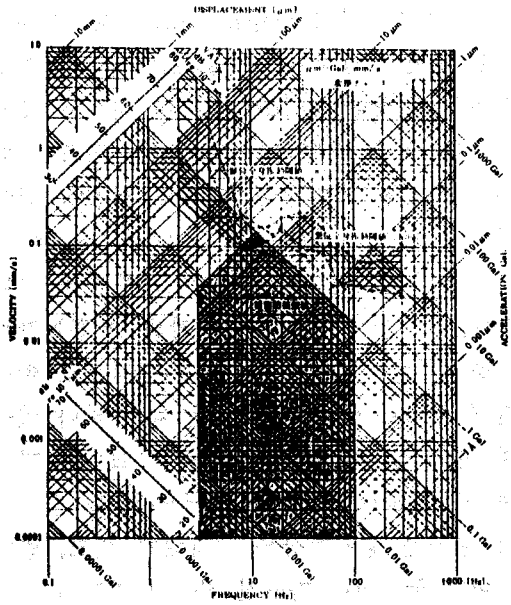


그림 10 정밀 반도체 공장내의 진동한계

고풍속 20분간 측정되어야 하며 동일층 내에서 측정된 평균값이어야 한다. World Trade Center의 경우 거주층에서 0.01G를 넘는 가속도의 평균 발생횟수가 연간 12회 이내로 제한하여 설계하였다. 현재 거주지, 산업시설, 건설현장, 교통에 의해 발생되고 있는 진동관련 시정사례를 예시하면 다음과 같다.

a) 주거지에서의 진동

20층 정도의 일반 오피스 건물 또는 주상복합건물의 경우 옥상부분에 설치되는 Cooling Tower팬의 이상움직임에 의한 하부 임의층에서의 공진발생, 중간층의교육실에서 다수의 사람이 동시에 움직일 때 임의의 상하층에 진동유발, 공조기에서 발생되는 진동에 의해 사무실 임의의 부분에서의 환경진동생성, 지하실에서의 미방진된 모터의 진동야기, 종합운동장과 장소에서 경우에 따라 다

수인의 동시 움직임에 의한 진동이 스탠드의 붕괴유발, 주거지인 아파트먼트에서 진동설계가 잘 고려되지 않은 곳에서 발생되는 정화조 펌프의 소음 및 진동야기, 엘리베이터의 모터진동에 의한 불편함, 초고층 빌딩에서 바람의 영향으로 발생되는 흔들림

b) 산업시설에서의 진동

기둥과 기둥사이가 긴 전자공장구조물에서 기계가 야기시키는 진동에 의해 야기되는 작업라인의 진동, 화학공장 정밀배관시설에 발생되는 진동으로 시설파괴에 의한 대형사고, 고직접회로와 같은 반도체 공장의 미진동 방진을 요하는 곳에서의 진동으로 불량율의 증가, 병원수술실과 관련된 진동방해, 자동차공장 Over Head Crane작업시 Control Room의 진동, 선박의 터빈움직임에 의한 선박구조물의 진동문제, 전자현미경의 떨림현상

c) 교통 및 건설진동

가까운 거리에서 지하철 차량통과시 건물 10여층 이상에서의 어지러움증 호소, 동차량 통과시 발생되는 역사내 상업지역의 진동, 교량에서의 차량에 의한 진동, 건설현장의 항타 또는 발파에 의한 주변건물 및 시설물의 안정성문제 야기

위와 같은 다양한 공해진동의 문제는 구조물이 점점 현대화, 거대화, 복합화되므로 더욱 확대되고 있다. 이는 1970년대 중반에 일본 자치제의 통계에 의한 결과로 전형적인 공해(대기오염, 수질오염, 토양오염, 소음, 진동, 지반침하, 악취)에서 진동 및 소음에 의한 경우가 30%를, 일본 경찰청 통계는 75%를 보이므로써 전체적으로 47%까지 차지하였다. 현재 우리나라와의 환경차원의 해석으로 보면 일본의 당시와 비슷한 위치에 있다고 가정할 수 있고 따라서 진동공해에 의한 문제해결은 매우 중요하다고 하겠다.

4. 진동제어

4.1 지진동제어를 위한 구조설계시 고려해야 할 기본사항

구조물은 설계단계에서 구조물의 형태, 재료, 형식등이 결정할 때 안정성과 경제성 및 현지사정 등이 고려되어 결정된다. 재료는 연성이 좋고 강한강도를 갖되 무게가 가볍고 부재간의 연결성이 좋아야 한다. 이는 지진발생시 지진에너지를 잘 흡수하게 되고 접합부의 내진성능의 증가 등으로 구조물에 손상정도가 작아진다. 대부분 높이가 높은 고층빌딩이나 길이가 긴 장대교량에서는 철골조가 이용된다. 이는 위에서 언급된 재료적인 특성이 내진성에 좋기 때문이다. 그러나 경제성이 떨어지기 때문에 현재는 콘크리트와 조합하여 구조형태를 이루게하는 경우가 많다.

일반적으로 내진구조물은 형태적으로 단순대칭의 형태를 갖고 입면이나 평면에서 길이와 폭의 비가 크지 않도록 한다. 강도와 강성이 균일해서 응력이 연속적으로 분포하도록 하고 안전을 위해 기둥보다 보에서 우선적으로 소성 변형이 일어나도록 한다. 이와 같은 조건은 내진 구조물이 기본적으로 갖추도록 해야하는 사항이지만 현대화 되고 있는 구조물들은 예술성 및 기능의 다양함을 추구

하게 되어 구조적 안전을 위한 고려점이 점점 증대되고 있다. 우선 단순 및 대칭형태의 구조물은 거동예측이 쉽고 이에 따라 설계 및 시공이 용이하다. 그렇지 못한 구조는 비틀림 및 응력집중 등에 의해 손상의 정도가 크게된다. 특히 평면상 비대칭 건물(L, T자형)의 경우 접합부위에서 큰 피해를 받고, 한쪽으로 편중되어 설치된 전단벽 시스템은 전단코어를 중심으로 비틀림 거동을 할 수 있다. 종횡비가 크게 되면 지반으로부터 유입되는 지진강도에 따른 밑면 전단력이 크게 증가하게 되므로 내진에 좋지 않은 결과를 갖는다. 높이와 폭의 비가 3 : 4 이상이 되면 구조적인 입장에서 2차적인 변형을 유발하게 되어 지나친 변위가 발생되어 기둥에 큰 손상을 주거나 모드 산정에 고차모드까지 고려하여야 한다. 구조물은 연속성이 있어야 한다. 종종 고층건물에 중간층 정도에 입면의 형태가 크게 변화(Set Back)하여 응력집중이 발생하게 된다. 해석적으로 두 경계층 평면적의 변화가 25% 정도 차이가 날 때 "Set Back"이 있다고 하며 주의를 요하게 된다.

위에서 언급된 구조물의 외형, 방식, 크기, 위치에 따라 지진동에 불리한 구조물 문제를 도시하여 각각 그림 11, 그림 12, 그림 13에 각각 도시한다.

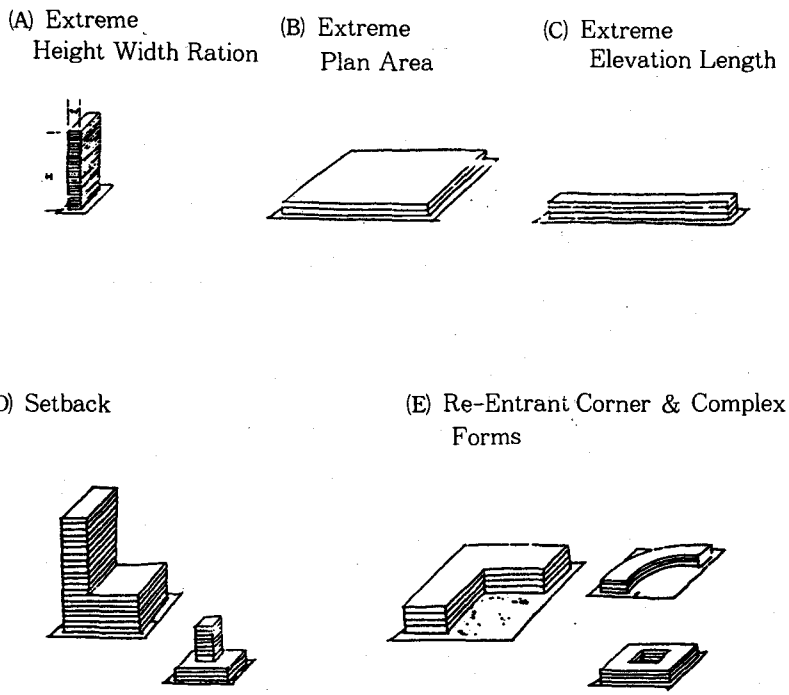
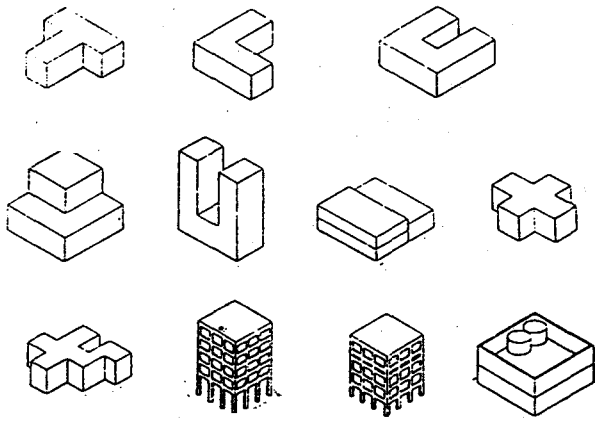
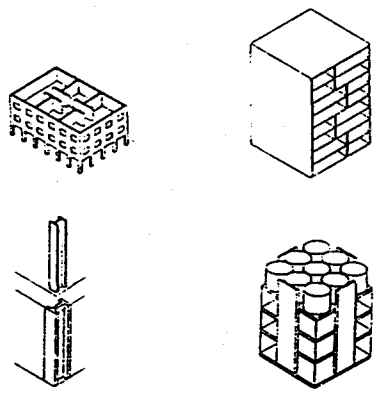


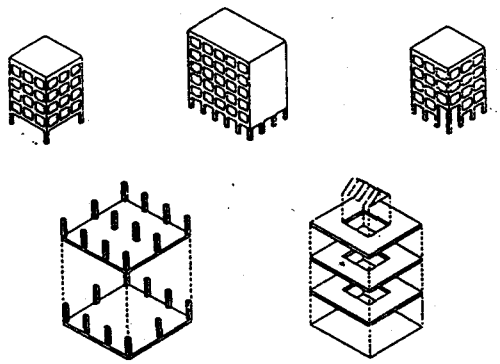
그림 11 일반외형에의 단점



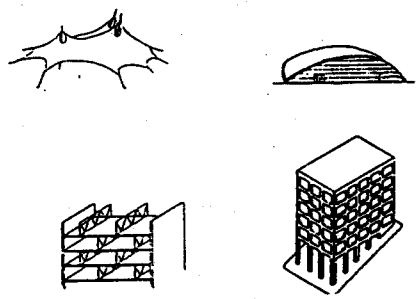
(a) Buildings With Irregular Configuration



(c) Buildings With Abrupt Changes in Lateral Stiffness



(b) Buildings With Abrupt Changes in Lateral Resistance



(d) Unusual or Novel Structural Features

그림 12 비정형 구조방식의 단점

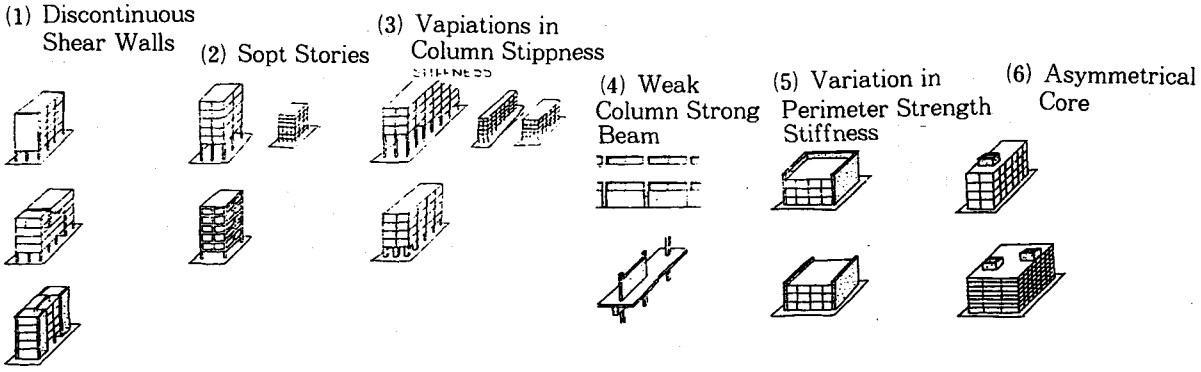
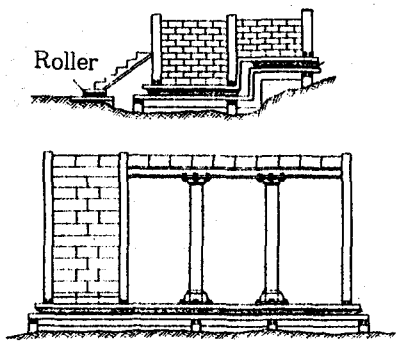


그림 13 구조요소들의 크기, 위치에의 단점

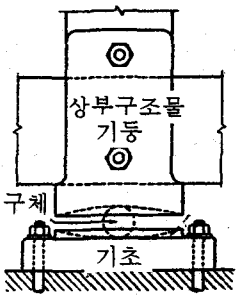
풍하중에 관한 구조물 설계시 기본적으로 내풍성이 좋은 단면을 선택하는 것이 바람직하다. 그러나 여건상 어려운 상황이 대부분이다. 따라서 완공후에 발생될 수 있는 문제해결로 공기역학적인 방법으로는 구조물 주위를 흐르는 기류의 형태를 변환시켜 준다. 이를위해 구조물 외각에 각이진 단면은 좋지않은 진동문제를 야기시키므로 박리형식을 이용하거나, Vane을 부착하거나 또는 Corner Cut등을 활용한다. 기계적인 방법은 와류진동을 제어하기 위해서 사용되는 장치로 TMD(Tuned Mass Damper), TLD(Tuned Liquid Damper), TLCD(Tuned Liquid Column Damper), IMD(Impact Mass Damper) 등과 Oil Damper 및 Viscous-Shear Damper등이 있다. 이에 관해서는 제어시스템을 이용한 진동제어에서 설명한다.

4.2 면진(免震)을 위한 수동적 진동제어

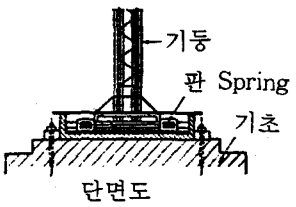
내진구조를 위해 구조물에 대해서는 수동적인 제진방법으로 진동 주기연장을 위한 적층고무, 매립형 장주, 스프링 및 에너지 흡수를 위한 탄소성 점성체인 댐퍼를 이용하거나 진동체의 추가로 설치한다. 기본적으로 구조물 기초를 띄우는 형상이 일반적이고 기둥과 기초 저판과의 이격 및 슬라이딩에 의한 순간이동력에 의한 이동을 미리 기초부의에서 발생하도록 하여 제진을 수행한다. 그림 14에서는 위에서 언급된 제진 구조형상을 보여준다. 구조재와의 직접 연결되는 부위는



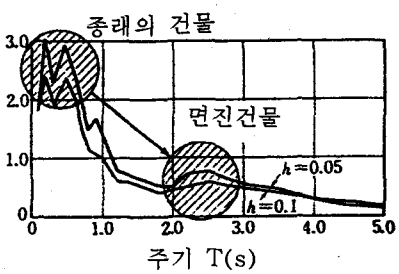
(a) 바닥전면 처리



(b) Ball Bearing



(c) 기둥과 기초사이 처리



(d) 응답전단계수

그림 14 면진을 위한 구조물 기초처리

Roller를 설치하여 건물에 직접 전달되는 힘을 차단하고 기초 전면에 슬라이딩을 유도하게 설계를 하였다. 주기적 및 비주기적으로 수십초 동안씩 발생하는 랜덤한 지진동의 순간력 소산을 그림과 같은 구조설계를 하므로써 효과적으로 대응할 수 있다. 응답전단계수의 변화를 보면 면진장치의 유무에 따른 응답의 크기를 비교해 볼 수 있다.

내진구조물 시스템을 분류하면 크게 고정시스템과 절연구조 시스템으로 나눈다. 고정식은 연성구조와 강성구조식이 있고, 절연식은 그림 15에서와 같이 다음의 여러 이상적 형태로 계획된다.

① 건물의 저면부 변위를 일부러 크게 유도시키는 방식
② 건물 하부에 완충층을 설치하는 방식
③ 건물의 하부를 Ball Bearing으로 처리하는 방식
④ 건물 하부에 스프링 설치 방식
⑤ 건물을 물위에 띄우는 방식
⑥ 건물을 매다는 방식
⑦ 횡 및 수직 진동에 대응하는 기둥의 소성발생 시스템

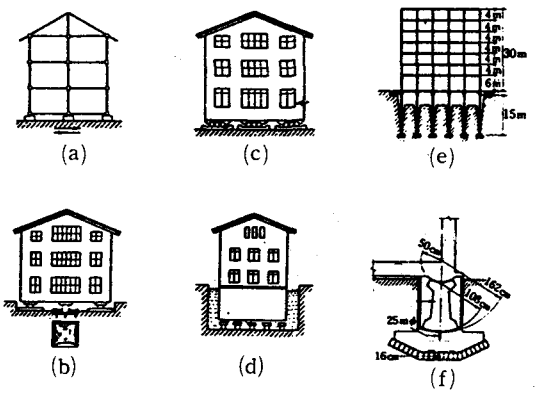


그림 15 건물의 내진구조방법의 분류

⑧ 특별히 고안한 수동장치

다음 그림 16의 진동신호는 이러한 제진방식에 의해 설계된 건물옥상과 그렇지 않은 건물옥상에서 실제로 진동가속도를 측정한 예를 보여주고 있다. 일본 이바라기현 남서부 지진시 동일한 지역내의 지상 3층~지하 1층의 철근콘크리트 건물 2채의 가속도 크기는 제진설계된 건물의 가속도가 1/7 수준에 머물고 있음을 알 수 있다.

구조물의 경우 여러가지 형태의 제진방식을 추구한다. 지반일 경우는 지진에 대처할 많은 시스템은 존재하지 않으나 지진에 의한 소성변위의 발생등은 매우 유의해야 할 사항이다. 일반적으로 단단한 암반위 매립된 지역과 같은 연약지반 지역은 지진이 발생하면 지진동의 크기가 증폭이 되며, 증폭된 낮은 진동수 성분들의 구조물의 주기와 근접하게 된다. 그러므로 연약지반을 개량하여 인공적으로 경질의 지반으로 바꾸거나 표면파의 흐름을 차단할 수 있도록 깊은 공구를 구조물 주변에 설치할 수 있다.

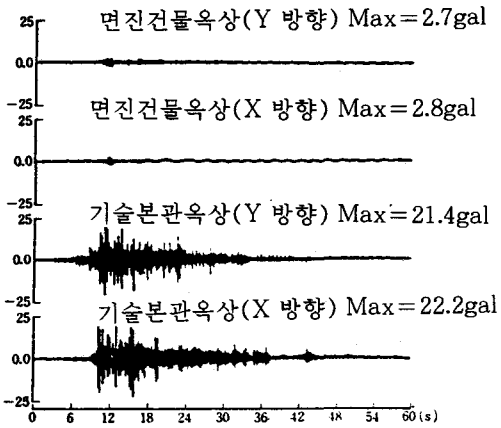


그림 16 면진 및 비면진 구조의 가속도 크기의 예

4.3 제어시스템을 이용한 진동제어

앞에서 정형적인 내진 또는 내풍 구조물의 형식과 최소한의 진동제어를 위한 조건들이 언급되었다. 이러한 구조적인 결정은 Engineering 차원에서 충분히 고려할 수 있다. 그러나 특별 제어를 위한 방법이 요구될 때가 종종 있다. 제어시스템을 이용한 장치를 분류하면 다음과 같다.

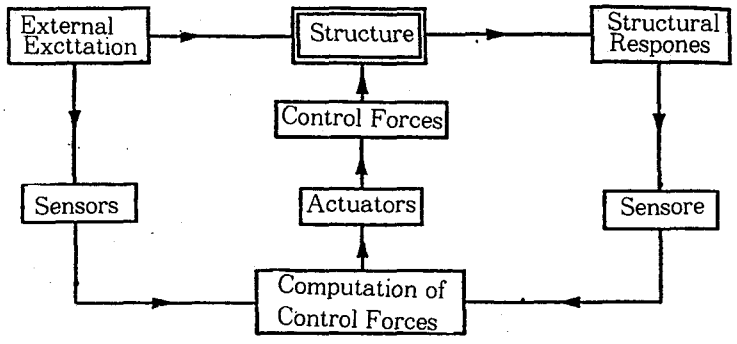
Mass Damper 형식 : 추 또는 물의 순환을 이용

자동제어 : HMD(Hybrid Mass Damper), Active Bracing System

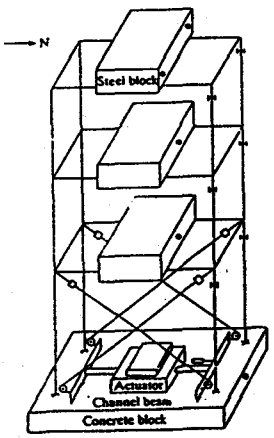
에너지 흡수방식 : Oil Damper, Frictional Damper

TMD(Tuned Mass Damper)에 의한 진동감쇠장치는 지진 또는 바람의 영향에 의한 횡방향 진동 및 비틀림 현상을 제어하도록 설치할 수 있다. 이를 위해 진동감쇠기의 설치위치, 질량비, 서로 독립된 횡방향 및 비틀림 방향의 고유진동수비의 변화가 요구된다.

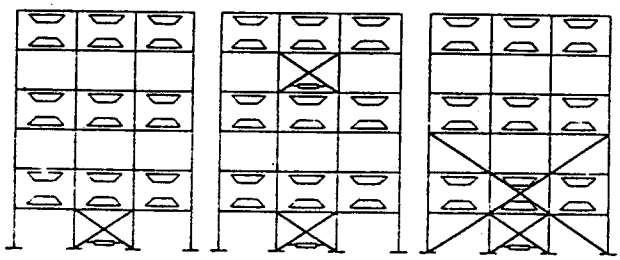
능동제어의 전형적인 제어과정은 다음의 그림 17 (a)와 같다. 이러한 제어형식을 이용하여 Active Bracing System을 설치하며 Bracing의 설치시 Tendon 배열의 형식을 여러가지로 조절하여 적용하기도 한다. (b)는 Tendon의 형식을 (c)는 건물구조에 Active Bracing System을 적용한 모양을 각각 보여주고 있고, (d)는 결과적으로 Control을 했을 때와 하지 않았을 때의 옥상층에서의 변위저감 정도를 나타내고 있다. 이와같이 능동제어의 경우 효율성은 상당히 있다고 하겠으나 많은 제한이 따른다. 즉 가진력에 대한 진동신호의 Sensing과 이의 Feed Back사이의 Computer 프로그램 능력과 제어된 신호를 제대로 Actuator에 전달해 주는 제어밸브의 성능, Actuator가 반응하는 정밀시간과 요구되는 진동수에 대한 충분한 힘의 생성 가능성 등등의 어려움이 있다. 큰 지진은 진동수가 빠른다. 그러므로 Actuator의 반응은 이에 대응하기가 어려워서 능동제어에 의한 진동조절은 한계가 있다.



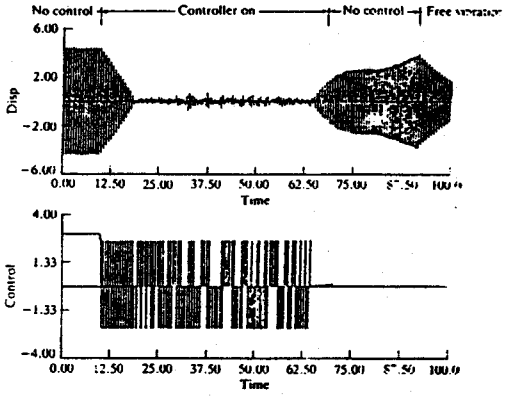
(a) 제어 알고리즘



(b) 구조 모형

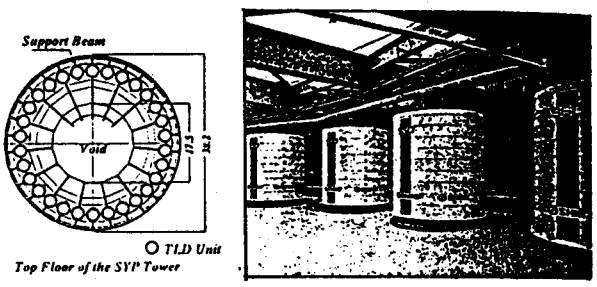


(c) Tendon의 배열



(d) 비제어 및 제어시의 진동신호

그림 17 Active Bracing System



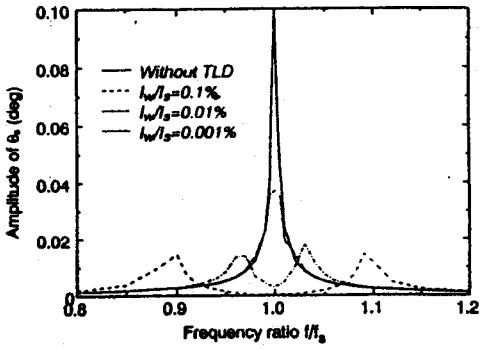


그림 18 고층빌딩 옥상층에 설치된 TLD 시스템과 효율도

TLD(Tuned Liquid Damper)는 단단한 집수통속에 어느정도 액을 채워 놓고 구조물이 진동할 때 액체가 내부에서 움직이며 진동에너지를 소산 또는 흡수시켜 구조진동특성을 바꿔놓는 수동적인 장치이다. TLD의 장점은 TMD보다 경제적이고 설치가 간편하며 유지관리하기가 쉽다. 이 시스템을 최초로 사용한 구조물은 일본 요코하마에 있는 Shin Yokohama Prince(SYP)호텔이다. 그림 18은 SYP의 TLD가 설치되어 있는 모습을 보여주고 있다. 결과적으로 고층빌딩의 풍하중(풍속 : 20m/s)에 의한 응답을 50~60%까지 감소시킬 수 있음이 확인되었고, Frquency 영역에서 나타난 결과에서 TLD가 없는 시스템의 Peak치가 상당히 낮아졌고 대신에 다른 진동수 부분은 약간씩 커졌지만 그 양은 그리 크지 않으며 구조물의 진동특성을 파악함으로써 조절이 가능하다. 이와함께 다겹의

TLD는 고층빌딩의 사용성에도 좋은 결과를 갖게할 수 있다. TLD와 유사한 시스템으로 TSD(Tuned Sloshing Damper), TCLD (Tuned Liquid Column Damper)등을 들 수 있다.

댐핑장치에 의한 진동제어 또한 효율적으로 운용이 된다. 이 장치는 고층빌딩의 댐핑을 증가시켜 진동량을 억제하도록 한다. Oil Damper의 경우는 전구조물에 대해 10%~20% 정도의 댐핑계수를 제공하고 있다. 여러 가지의 댐퍼들은 진동에너지를 감소시키고 지진등에 의한 응답을 수동적인 방법으로 낮추게 하고 있다. 탄소성 댐퍼와 마찰댐퍼는 이력댐퍼로써 탄소성 변형을 하면서 진동에너지를 흡수하게 된다. 점성댐퍼로 구별되는 것은 속도와 함수 관계를 갖고 점성적으로 작용하고 있다. 그러나 대부분의 경우 탄소성 댐퍼의 사용빈도가 크다. 기본적인 예로 그림 19에서 HiDAM이라는 개발된 시스

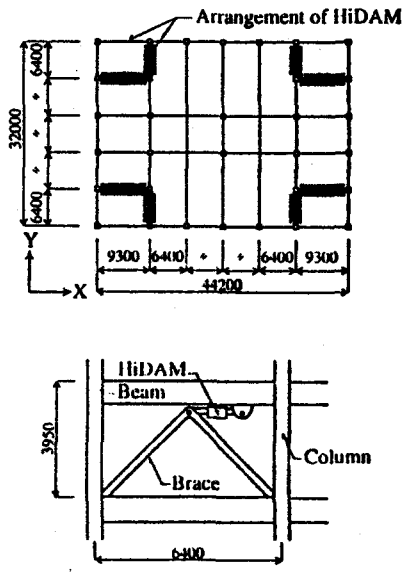


그림 19 Oil Damper(HiDAM)의 예

템을 소개하고 있다. 결과로 이 시스템은 10% 이상의 댐칭계수를 만들어 냄으로써 지진에 의한 구조물 손상을 매우 효과적으로 차단하게 되었다.

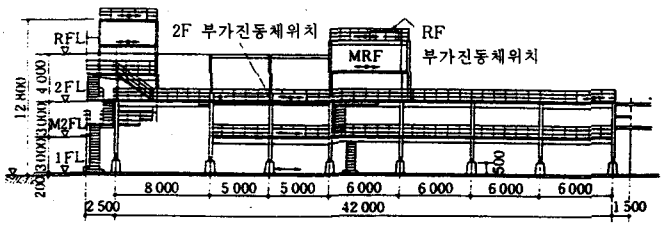
이외에도 이와같은 제어장치는 비틀림에 의한 제어, 고층빌딩 및 현수교 또는 사장교의 교량에서 나타나는 와류의 제어, 주탑의 시공중 및 완공후의 바람에 의한 정동제어, 굴뚝의 진동제어 등 그 적용분야가 매우 넓다.

4.4 환경진동 제어

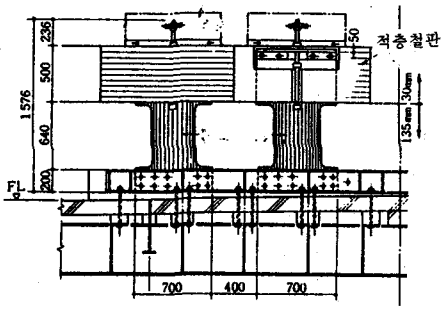
환경진동을 제어할 수 있도록 구조설계나 설비설계시 미리 고려하여 배치시키는 일은 현실적으로 그리 쉬운 일이 아니다. 환경진동의 발생은 많은 가진원의 종류와 변수가 상당히 많이 존재하며 그 특성 또한 찾기가 어렵다. 진동제어 방식을 논할 때 가진종류 및 구조물 형상에 따라 달라지게 되지만 대체적으로 큰 범주로 나눌 때 건물내의 공조기 또는 Cooling Tower 팬등의 Utility에 대한 진동제어와 발파 또는 항타에 의한 공사진동의 진동제어 및 헬리콥터 또는 정밀공장의 미진동과 같은 특수진동에 대한 진동제어로 분류할 수 있다. 대부분 이들에 대한 진동제어는 수동적인 입장에서 구조 Frame의 휨강성 증대를 위한 구조설계가 기본으로 되지만 완전한 진동제어를 위해서는 거주자들이 거주하는 건물의 수진바닥의 바닥제진을 수행하게 된다.

건물이나 공장내에 설치되는 기계에 의해 발생하는 진동은 각종 방진법 또는 Dynamic Balance를 이용한다. 구조물 설계시 대처할 때 각종 방진법을 사용하기 위해서 우선 설

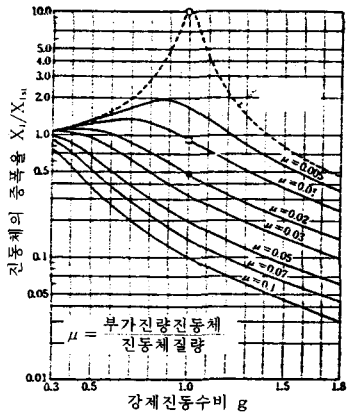
비장치인 공조기 또는 펌프의 가진력을 산정하고 진동특성의 자료를 준비한다. 일례로 송풍기와 같은 설비기계는 약 12Hz~25Hz 정도의 탁월 진동수를 갖는다. 이러한 진동수는 구조물 바닥이 상대적으로 수직성분에 대해 취약할 수 있기 때문에 종종 흔들림 느낌을 갖게 하여 거주자가 불쾌감을 느끼게 하는 원인이 된다. 가진력의 파워는 주로 진동가속도를 이용하게 된다. 이는 인체의 감각이 가속도와 밀접하게 반응하며, 이를 측정하는 자료가 진동레벨(dB(a or c))로 표시되어 환경진동량의 정도척도가 되기 때문이다. 이 가진력의 파워가 환경진동기준치를 넘지 않도록 한다. 다만 시간영역에서의 가속도 크기는 진동수 조절과 함께 이루어지므로 진동수와 가진력의 크기는 매우 밀접하게 작용된다. 다음단계로 구조물 바닥의 진동특성을 해석적으로 찾아낸다. 이를 위해서는 구조진동 전문가의 능력이 요구되는데 이는 컴퓨터 프로그램을 이용한 진동해석시 경계조건, 모델링, 결과에 대한 규명 등이 명확해야 하기 때문이다. 이 두가지 사항에 대한 Engineering 자료가 설정된 후, 앞에서 설명된 Rubber Pad, Spring 또는 Spring Damper, Air Mount 등을 이용해 공진봉의 강제감소를 유도한다.



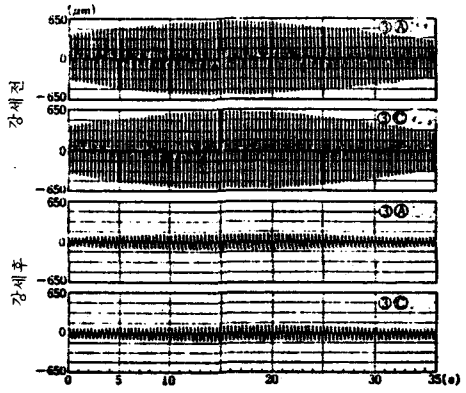
(a) 건물의 개요



(c) 진동체의 효율



(b) 2층에 설치된 부가질량체



(d) 부가질량체의 응답

그림 20 부가질량에 의한 진동제어 개괄도

Dynamic Balance는 부가질량체를 이용해 진동감쇄를 야기시키는 방법이다. 이 방법은 가진원이 확실하고 진동 영향을 받는 부분에 국부적으로 설치하여 효과를 얻는다. 기본적으로 그림 20의 (a)와 같은 부가질량체를 (b)와 같이 구조물에 배치한다. 단 부가질량의 효과에 대한 정밀한 해석 또는 실험을 수행할 필요가 있다. 이러한 Local Vibration의 제어는 전체진동모드에 영향을 주기도 한다. 그러나 예측설계에 대한 어려움이 따른다. (c)는 진동체에 대한 부가질량의 비에 따라 바닥에서의 응답치 효율성을 보여주고 있고 (d)에서는 시간영역에서 설치전과 후의 응답을 비교한 상태이다.

바닥제진 시스템으로 이중상 보강공법, 고정공법 등을 이용하는데 이들은 지진에 대응할 수 있는 면진대책으로도 이용된다. 이중이중상 방법은 사람에 대한 환경진동에 대처하기도 하지만 고가의 설치비가 들게 되므로 주로 중요기기 또는 중앙 Computer실 등에 적용한다. 이의 설치는 방진 Pad만의 경우보다 작업량이 좀더 많다. 대부분 기본 골조위에 조립이 용이한 철골조의 Frame을 설치하고 이 Frame을 방진용 Pad가 결합되거나 Spring Damper가 혼입된 지지물(Pedestal)로 벋치게 된다. 경우에 따라서는 고정식으로 기기장치만 분리하여 따로 바닥을 띄우는 방법도 사용한다. 그림 21에는 이중상의 일례를 도시하고 있다.

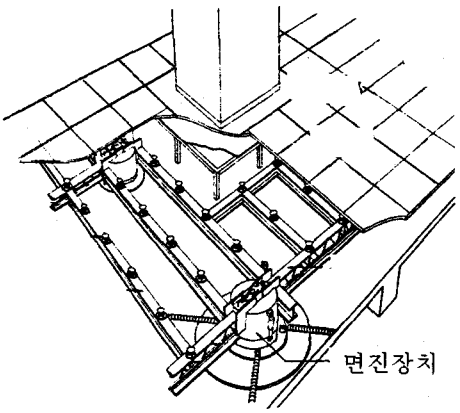
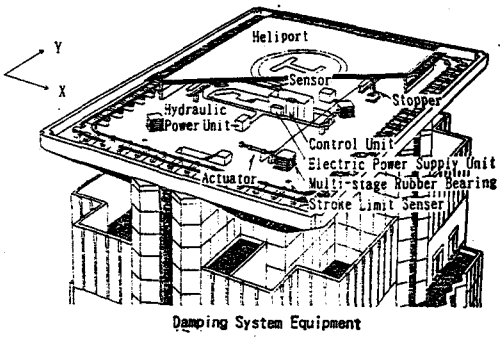
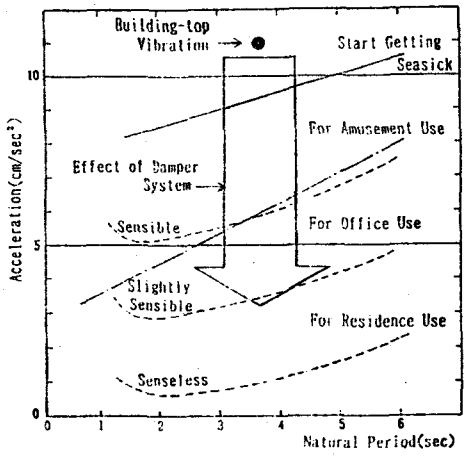


그림 21 이중상의 형식



(a) 설치도



(b) 효율도 조절의 과정

그림 22 능동제어법에 의한 헬기장의 진동저감

다른 경우로 옥상층에 설치될 수 있는 헬리콥터 안착장의 경우 댐핑 시스템에 의해 하부층의 진동을 제어할 때도 이와같은 이중상의 형식과 함께 질량을 이용한 능동 댐퍼 시스템을 활용할 수 있다. 그림 22에서 보이는 조감도는 건물의 주기가 X방향으로 3.74초, Y방향으로 3.40초인 건물의 경우 헬리콥터에 의한 진동저감을 목적으로 설치한 이중상 능동제어 실예이다. (b)에서 알 수 있듯이 댐퍼의 조절력에 따라 환경진동이 요구되는 수준까지 작업이 가능한 것을 알 수 있다.

고직접 회로와 관련된 정밀 반도체 공장의 클린룸과 같은 경우는 기계에 대한 환경을 개선시켜야 하므로 이와같은 이중상 구조 이외에 가진원 기초처리, 구조질량의 거대화 또는 강성의 증대로 구조물 전체의 Fundamental Frequency를 35Hz 이상으로 만드는 방법, 경로자체의 진동에너지 흡수 시스템, 작업자의 보행에 따른 진동유입방지를 위한 Access Floor 및 신발의 개선, 무인화에 의한 Robot Route의 방진설계, 외부로부터 유입되는 차량진동 차단 유지관리 시스템, 공기스프링을 이용한 능동제어 시스템의 도입, 개개의 Utility 방진, 펌프 스테이지의 특별 진동격리, 전자 현미경과 같은 측정장비의 제진 등등이 요구된다. 정밀기기 대부분이 미진동과 관련이 있다. 즉, 낮은 진동수(약 20Hz 이하)의 성분들의 파워를 적게하고 시간영역의 전체 파워 또한 크게 낮춰야 하는 어려움이 있게 되므로 이러한 기기환경에 대한 문제는 많은 연구와 실험 검증에 의한 Engineering 작업에 요구된다.

현재 가장 잘 쓰이고 있는 공장지역에서 자동차의 Press공장과 같이 큰 진동을 유발케하는 가진원에 대해서는 기초자체를 분리하고 Joint에 방진재를 이용한 충진으로 다른 작업에 방해가 안 되도록 유도한다. 이상적인 격리 시스템은 약 20dB정도의 진동차이를 갖게할 수 있다. 다른 방법으로는 기계기초의 계획설계에 의한 진동저감 및 기기를 위한 제진을 수행한다. 진동제어를 위한 기계기초의 종류는 블록형, 메트형, 프레임형 기초가 있다. 이들 하나하나는 각각의 특색을 갖고 있으므로 현장의 상황에 따라 사용하는 기초 형식이 다르게 된다. 특히 프레임형의 기초의 경우는 제지공장, 인쇄공장 등과 같은 곳에서 사용되는데 종종 기초의 윤전기와 같은 큰 진동원에 의한 공진으로 구조적인 진동문제를 야기시키고 반대로 기기의 사용이 제한되는 경우가 발생한다. 이러한 부분에의 진동제어는 대부분 구조적 진동학적으로 취약한 Open된 곳의 재결합과 브레이스 또는 헌치를 주므로써 휨진동 모드를 피해가도록 하고, 각 기둥과 거어더 또는 빔에의 구조보강과 추가질량으로 전체의 진동수를 바꾸어 주는 공법과 스프링 및 스프링 댐퍼 등을 이용하는 적극적 대처방법을 이용한다.

건설진동 특히 발파, 항타에 의한 진동은 인근 거주자에게는 심리적으로 불쾌감을 주고, 인근 구조물에는 종종 구조적인 손상을 입히기도 한다. 암발파에 대한 것으로는 Pre-Splitting에 의한 진동사전 차단, 공구의 설치, 방진벽의 설치, 장약량이 조절, 패턴발파 등의 방법을 사용하고 항타의 경우 항타방법을 유압식 또는 진동식등이 형식을 교체하거나 항타기 자체의 규모를 작게하기도 한다.

5. 결 론

본 주제에 의한 해석과설명은 지진동, 풍진동, 공해진동, 미진동 등 진동자체 가진력의 중요성을 인식하여야 많은 진동 문제를 해결할 수 있음을 설명하고 있다. 그러므로 대부분 앞부분에서는 진동에 대한 개념론과 정의등을 언급하였고 후반에 그에 대한 진동제어법을 논하였다. 이외에도 수많은 진동제어 사례가 있고 지금도 개발 중에 있다. 결국은 위에서 언급된 많은 진동제어법을 해당 진동전문가의 기술과 현장 및 관계되는 시공사, 설비담당 사람들이 적절히 협조하므로써 많은 진동문제를 해결할 수 있음을 말하고 싶다.

- 참 고 문 헌 -

1. "Dynamics of Structures", J.L. Humar, 1990.
2. "Impact Dynamics", John Wiley & Sons, 1982.
3. "Structural Dynamics", Mario Paz, 1991.
4. "구조물의 지진설계 기법", 최창근, 김규석, 이동근, 한국전산구조공학회.
5. "응용지구물리학", 민경덕, 서정희, 권병두 공저, 우성문화사.
6. "건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구", 대우Eng. 기술연구소, 1988.
7. "Foundations for Machines : Analysis and Design", Shamsher Prakash, Vijay K. Puri, 1988.
8. "풍공학", 서울대학교 토목공학과 교량공학 연구실, 1994.
9. "公害振動の豫測手法" 臨田正純, 井上書院, 昭和 61年.
10. "소음·진동학", 정일록, 신광출판사, 1989.
11. "Structural Control Research", Proceedings of the U.S. National Workshop Edited by G.W. Housner and S.F. Masri.
12. Passive Seismic Respones Controlled High-Rise Building with HIgh Damping Device, Naoki Niwa, Takuji Kobort, Motoichi Takahash, Tomohiko Hatada, Haruhiko Kurino, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 24, 1995, pp. 655~671.
13. A Model of Tuned Liquid Damper for Suppressing Pitching Motions of Structures, L.M. Sun, Y.Fujino, K.Koga, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 24, 1995, pp. 625~636.
14. "Practical Application of Tuned Damper for Tall Buildings", Toshihiro Wakahara, Kenji Shimada, Yukio Tamura Active Mass Damper Using the Weight of Rooftop Hiliport, Hankyu Chayamachi Building 보고서.
15. "진동기초의 설계법", 제철엔지니어링 주식회사 보고서.