

# 면진건축물의 내진설계를 위한 지진하중 분배식 제안

## Vertical Distribution of Seismic Load for Earthquake Resistant Design of Base Isolated Building Structures

이 동 근\*                      홍 장 미\*\*  
Lee, Dong-Guen                Hong, Jang-Mi

### ABSTRACT

In this paper, we investigated an applicability of earthquake regulations for seismic-isolated building structures which has been used currently and propose an efficient method for vertical distribution of seismic loads. The distribution of force is revised in UBC-94 as vertical distribution of force of UBC(Uniform Building Code)-91 is not sufficient safety but its distribution is inefficient, expensive because of similar expression to fixed-based structures. In order to overcome this difficulties, improved vertical distribution of seismic load is proposed using two degrees-of-freedom isolated structures and mode shape of fixed-based structures. Efficiency and accuracy of the proposed method are verified through analysis of an example structures with moment resisting frame and shear walls, so this study approximate to dynamic analysis result in each case.

### 1. 서 론

일반적으로 내진설계는 지진이 발생하는 경우에 구조물이 견딜 수 있도록 강성을 증가시키거나 부재의 소성거동으로 인한 에너지소산 방법을 이용한다. 하지만, 강성을 증가시키는 방법은 초기 건설비용이 많이 드는 방법이며, 규모가 큰 지진이 발생하였을 경우에 구조물이 붕괴될 우려가 있다. 반면에 소성거동을 이용하는 방법은 구조물의 붕괴를 방지할 수 있으나, 비구조재의 피해가 발생하여 지진 후에 보수비용이 많이 든다. 바람직하지 못한 구조적 피해가 발생하는 경우와 기존의 중요구조물에 대한 내진성능 향상이 요구되는 경우에는 면진기술이 매우 강력한 대안이 되고 있다. 최근 30여년간 면진기술은 경제적인 내진설계와 기존의 중요구조물에 대한 내진성능을 향상 시키기 위한 목적으로 활발히 연구되었다. 면진구조물의 초기건설비용은 일반구조물과 비슷한 수준이지만 지진 후의 보수비용을 현저히 저감할 수 있으며, 지진이 발생하는 경우에 구조물을 지반과 격리시키므로 거주자 및 내부설비를 보호할 수 있다. 특히 고베지진(1995)을 계기로 그 안전성을 인정받아 이후에 신축건물이나 기존건물에 적용되는 사례가 급증하고 있다.

미국에서 건설된 첫 번째 면진건물은 1985년에 완공된 Foothill Communities Law and Justice Center이다. 하지만 적절한 면진건축물의 내진설계기준이 없었고 면진장치의 해석 및 설계방법이 너무 복잡하여 두 번째 면진건축물은 3년 후에 건설되었다<sup>(1)</sup>. 이렇듯 적절한 설계기준은 건축공사에 있어서 가장 기본이 되는 요소이며 면진건축물에서도 마찬가지이다. 본 논문에서는 가장 일반적으로 사용되는 면진건축물의 설계기준인 UBC에 대하여 알아보고 기준에서 제시된 층지진하중 산정법에 대한 문제점과 개선방안을 제시하였다.

\* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 교수  
\*\* 학생희원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

## 2. 면진건축물의 내진설계

### 2.1 UBC-97

현재 미국의 면진건축물의 내진설계에 적용되는 기준은 International Conference of Building Officials의 UBC-97과 California Code of Regulations, Division III(OSHPD-96)이다. OSHPD-96은 UBC-94와 비슷하므로 본 논문에서는 UBC-97에 대하여 알아보았다.

UBC-97에서 제시한 면진건축물의 설계에 관한 규정은 일반적인 건물의 내진설계지침과 비슷하고, UBC-97에서는 16장의 부록으로 채택되었다. UBC-97에서 규정된 면진건축물의 설계에는 정적해석법과 동적해석법을 이용할 수 있으며 본 논문에서는 정적해석법에 대한 기준을 살펴보고 그 문제점을 분석하였다<sup>(2)</sup>.

정적해석법은 활성단층에서 10km 이상 떨어지고 지반계수  $S_A, S_B, S_C, S_D$ 인 대지에 건물이 위치할 경우 사용하는 방법으로, 면진시스템 상부의 구조물은 4층이하, 또는 19.8 m이하의 정형 구조물이어야 한다. 면진건축물의 설계변위( $D_D$ )는 식(1)에서 산정할 수 있다.

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4} \pi^2\right) C_{VD} T_D}{B_D} \quad (1)$$

여기서, 종전의 지반계수와 지역계수를 하나의 지진계수로 표현한  $C_{VD}$ 는 표 1에 나타내었으며,  $B_D$ 는 면진장치의 감쇠능력을 나타내는 값으로 표 2를 이용하여 구할 수 있다.

표 1. 지진계수 ( $C_{VD}$ )

지반계수	Seismic Zone Factor, Z				
	0.075	0.15	0.2	0.3	0.4
$S_A$	0.06	0.12	0.16	0.24	0.32 $N_v$
$S_B$	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40 $N_v$
$S_C$	0.13	0.25	0.32	0.45	0.56 $N_v$
$S_D$	0.18	0.32	0.40	0.54	0.64 $N_v$
$S_E$	0.26	0.50	0.64	0.84	0.96 $N_v$
$S_F$	지반조사와 동적해석으로 결정				

표 2. 감쇠계수

유효감쇠(%)	$B_D$
$\leq 2$	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
$\geq 50$	2.0

면진건축물의 기본진동주기는 면진장치의 강성( $K_{Dmin}$ )을 이용하여 식(2)로 계산한다.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{Dmin} g}} \quad (2)$$

면진장치 하부구조물의 설계하중( $V_b$ )은 식(3)과 같으며 면진장치 상부구조물의 설계하중은( $V_s$ ) 식(4)으로 계산한다.

$$V_b = K_{Dmax} D_D \quad (3)$$

$$V_s = \frac{K_{Dmax} D_D}{R_I} \quad (4)$$

여기서  $R_I$ 는 면진건축물에 적용되는 반응수정계수로서, 높이와 상부구조물의 횡저항 방식에 의하여 결정된다. 식(4)를 이용하여 얻어진 밀면전단력( $V_s$ )은 아래의 식(5)에 의하여 구조물의 높이에 따라 층지진하중으로 분포된다.

$$F_x = \frac{w_x h_x}{\sum w_i h_i} \cdot V_s \quad (5)$$

## 2.2 면진건축물의 내진설계에 대한 문제점

면진건축물의 내진설계기준에 대한 논의는 1986년 SEAONC(Structural Engineers Association of Northern California)에서 발족된 위원회에서 시작되었다. 그 결과로써 'Tentative Seismic Isolation Design Requirements(Yellow Book)'라는 보고서가 Blue Book 4판의 부록으로 출간되었다. 1988년에 SEAOC위원회에서는 'General Requirements for the Design and Construction of Seismic Isolated Structures'라는 문서를 제작하여 1990년 Blue Book 5판으로 인쇄되었으며, UBC-91의 23장 부록으로 채택되었다. UBC-94에서는 면진설계기준이 16장의 부록으로 채택되었으며 동적해석의 최소값 규정과 층지진하중 산정식 등에서 일부 수정된 부분이 포함되었다<sup>(1)</sup>.

면진건축물의 초기단계 내진설계기준(Yellow Book, UBC-91 etc.)에서는 상부구조물의 영향을 무시하고 모든 층에 동일한 가속도가 작용한다는 가정으로 식(6)과 같은 층지진하중 산정식을 이용하였다<sup>(3)</sup>.

$$F_x = \frac{w_x}{\sum w_i} \cdot V_s \quad (6)$$

이 식은 면진장치의 유연성만을 고려하고, 상부구조물은 강체로 가정한 것으로써 각 층의 질량에 의해서만 층지진하중이 분포된다. 그러나 이 방법은 상부구조물의 자유도에 의한 영향을 무시하였기 때문에, 충분한 안전성을 가지지 못하였다. UBC-94부터는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 식(5)로써 층지진하중을 산정하였다. 식(5)는 고정기초건축물의 층지진하중과 동일한 식이며 삼각형 형상으로 하중을 분포시킨다. 식(5)는 상부구조물이 강체로 가정되었던 식(6)과는 달리 면진장치가 강체로 가정되고 상부구조물의 자유도만을 고려한 것이다. 면진건축물의 동적해석 결과가 거의 사각형 형상의 하중 분포를 가지는데 반하여 식(5)는 면진건축물의 특성을 간과한 결과이지만, 납이나 마찰감쇠가 포함된 면진시스템의 비선형성 및 불확실성을 어느 정도는 감안한 것이다<sup>(4)</sup>.

UBC의 층지진하중 산정식과 동적해석의 결과를 비교해 보기 위하여 그림 1과 같은 간단한 4×2 경간의 5층 철근콘크리트 건물을 예제로 선정하였다. 면진장치의 수평강성은 0.28 t/cm이고 각 기둥마다 설치하였다. 면내비틀림으로 인한 해석상의 오차를 줄이고 실제 구조물과 유사한 거동을 위하여 바닥판은 강막으로 가정하였다. 지역계수는 2A, 지반계수는 S<sub>A</sub>로 가정하여 C<sub>VD</sub>와 C<sub>AD</sub>를 각각 0.12로 산정하였다.

동적해석은 UBC-97 표준응답스펙트럼을 사용하였고 등가정적해석은 각각 UBC-91, UBC-97을 근거하여 수행하였다. 그림 2.(a)는 층지진하중을 나타내고 부재력에 직접적인 영향을 주는 층전단력을 그림 2.(b)에 나타내었다. 해석결과를 비교하기 위하여 동적해석과 정적해석의 밀면전단력을 같은 수준으로 조정하였다. 그림 2.(a)와 그림 2.(b)에서 UBC-91의 결과는 동적해석의 결과와 비

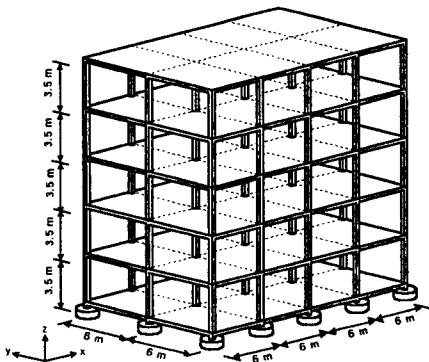
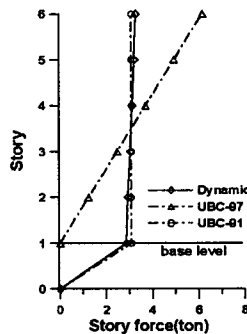
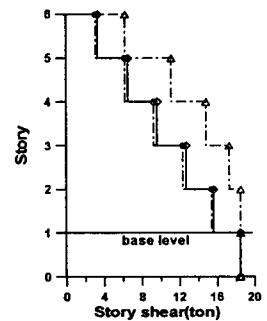


그림 1. 예제구조물



(a) 층지진하중의 비교



(b) 층전단력의 비교

그림 2. 면진구조물의 동적 및 정적해석결과 비교

슷한 층지진하중 분포와 층전단력 분포를 보이지만, 그 값이 상대적으로 작아서 충분한 안전성을 가지지 못함을 알 수 있다. 이러한 불안전성의 차이로 인하여 UBC-91의 층지진하중 산정식인 식(6)은 94년에 식(5)로 개정되었다. 반면에 UBC-97의 결과는 면진시스템을 강제로 가정하여 고정기초건축물과 유사한 형상의 층지진하중 분포를 보인다. 특히, 중간층의 전단력을 비교하면 동적 해석보다 매우 큰 값을 나타내므로 지나치게 안전축임을 알 수 있다. 이러한 동적해석과 정적해석의 층지진하중(또는 층전단력) 결과의 차이는 비선형 면진시스템의 경우에 고차모드의 영향으로 인하여 더욱 크게 발생할 수 있다.

### 3. 면진건축물의 층지진하중 산정식 제안

면진건축물의 밀면전단력을 각 층에 분배하기 위해서는 면진장치의 유연성과 상부구조물의 영향이 고려되어야 함을 알 수 있었다. 본 논문에서는 상부구조물의 영향을 고려한 2자유도계 면진건축물과 고정기초건축물의 1차모드를 이용하여 층지진하중 산정식을 제안한다.

면진건축물에서 1차모드의 영향을 알아보기 위하여 그림 1의 예제구조물에 면진장치를 설치하였을 경우와 그렇지 않은 경우의 고유치해석 결과를 표 3에 나타내었고, 1차모드의 형상을 그림 3에 나타내었다. 면진건축물의 1차모드 형상은 그림 3에서 보는 바와 같이 고정기초건축물 비하여 거의 일직선에 가까우며, 1차모드의 질량참여율이 95%이상 되기때문에 1차모드만으로도 구조물의 거동을 파악할 수 있다. 즉 면진건축물의 층지진하중 분포는 1차모드와 유사한 형태로 가정될 수 있으며 본 논문에서는 이 점을 착안하여 상부구조물의 영향을 고려한 층지진하중 산정식을 제안한다.

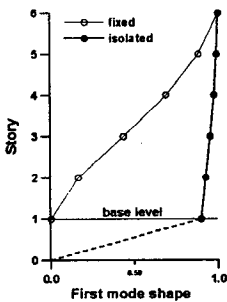


그림 3. 1차모드형상

표 3. 고유치해석 결과

모 드	고정기초건축물			면진건축물		
	주기 (sec)	질량참여율(%)		주기 (sec)	질량참여율(%)	
		X방향	Y방향		X방향	Y방향
1	0.43	0.00	81.27	1.58	0.00	99.85
2	0.40	81.87	0.00	1.57	99.89	0.00
3	0.16	0.00	0.00	0.64	0.00	0.00
4	0.13	0.00	11.07	0.25	0.00	0.14
5	0.12	10.80	0.00	0.23	0.11	0.00
6	0.06	0.00	4.62	0.11	0.00	0.01

#### 3.1 고정기초건축물의 주기 및 모드형상

다자유도계 고정기초건축물을 등가의 단자유도계 구조물로 치환하는 연구는 다양한 방법으로 진행되고 있다<sup>(5)</sup>. 하지만 등가정적해석은 주로 예비설계 단계에서 활용되므로 본 논문에서는 가장 간단하고 일반적으로 많이 사용하는 UBC-97의 기본진동주기 산정식을 이용하고자 한다<sup>(2)</sup>. 또한 면진건축물은 주로 저층이고 기본진동주기가 0.7초 이하이므로 UBC의 의하여 상부구조물의 1차 모드형상은 높이에 비례하는 것으로 가정한다.

#### 3.2 면진건축물의 2자유도계 모형화

면진건축물의 초기설계 단계에서는 구조물을 선형 스프링과 선형 감쇠를 갖는 2자유도계로 모형화하여 근사해석을 할 수 있다. 현재는 비비례 감쇠항을 갖는 면진시스템의 2자유도계 해법에 관하여 많은 연구가 진행된 단계이나, 본 논문에서는 선형 2자유도계 면진건축물의 고유치 해석에 관한 부분을 정리하였다<sup>(6)</sup>.

그림 4에서 면진건축물에서 상부구조물의 질량( $m$ )과 강성( $k_s$ ), 면진층의 질량( $m_b$ )과 면진시스템의 강성( $k_b$ )를 이용하여 동적운동방정식을 나타내면 식(7)과 같다.

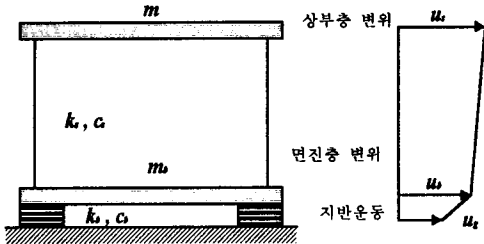


그림 4. 2자유도계 면진건축물

$$M \ddot{\mathbf{v}} + C \dot{\mathbf{v}} + K \mathbf{v} = -M \mathbf{r} \ddot{u}_g \quad (7)$$

$$M = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} u_s - u_g \\ u_s - u_b \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad M = m + m_b$$

운동방정식의 고유치 해석을 위하여 표 4에 주어진 변수를 이용한다. 상태방정식을 이용하여 구한 고유진동수를  $\epsilon$ 에 관한 1차식으로 표현하면 식(8)과 같다.

$$\begin{cases} \omega_1^2 = \omega_b^2 (1 - \gamma \epsilon) \\ \omega_2^2 = \frac{\omega_b^2}{1 - \gamma} (1 + \gamma \epsilon) \end{cases} \quad (8)$$

표 4. 고유치 해석에 사용된 변수

면진시스템의 진동수	$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m + m_b}$
상부구조물의 진동수	$\omega_s^2 = \frac{k_s}{m}$
질량비	$\gamma = \frac{m}{M}$
진동수비의 제곱	$\epsilon = \omega_b^2 / \omega_s^2$
면진시스템의 감쇠	$2\omega_b \beta_b = \frac{c_b}{m + m_b}$
상부구조물의 감쇠	$2\omega_s \beta_s = \frac{c_s}{m}$

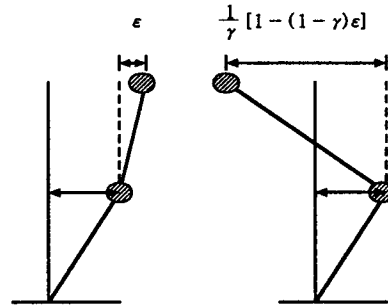


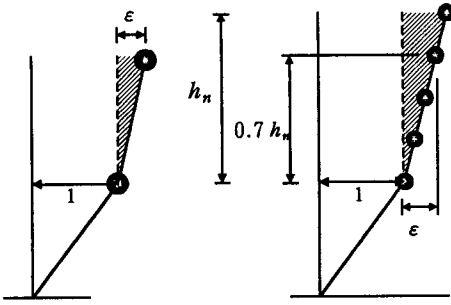
그림 5. 2자유도계 구조물의 모드형상

2자유도계 면진건축물의 모드형상은 식(9)와 그림 5에 나타난 바와 같다.

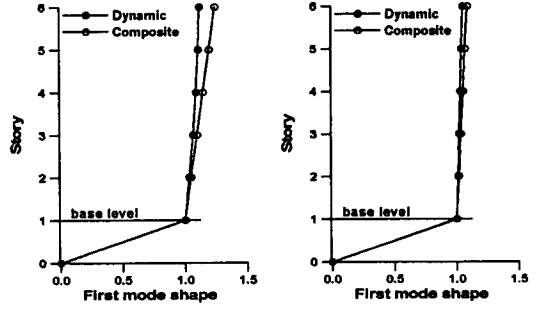
$$\begin{cases} \phi_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \epsilon \end{pmatrix} \\ \phi_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\epsilon] \end{pmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

### 3.3 면진건축물의 근사적 모드형상

면진건축물의 1차모드 형상은 고정기초건축물의 1차모드와 등가의 2자유도계 면진건축물의 모드 형상을 이용하여 근사적으로 나타낼 수 있다. 그림 6에 나타난 바와 같이 2자유도계 구조물의 1차 모드형상비인  $\epsilon$ 에 고정기초건축물의 대표변위를 맞추어 조절하면 실제 면진건축물의 모드 형상과 유사한 모드형상을 얻을 수 있다.



(a)면진건축물의 1차모드 (b)합성된 면진건축물의 모드  
그림 6.  $\epsilon$  을 이용한 면진건축물의 모드 합성



(a) 모멘트저항 골조 (b) 전단벽 구조  
그림 7. 동적해석 및 합성된 모드형상 비교

앞의 절에서 면진건축물의 층지진하중이 1차모드의 형상과 유사한 분포를 나타내는 것을 알아 보았다. 하지만, 면진건축물을 설계할 때는 1차 모드형상의 기울기를 더욱 완만하게 가정하여 충분히 안전성을 고려할 필요가 있다. 안전한 수준으로 기울기를 조정하기 위하여 건물 높이의 70%에 해당하는 대표변위를 이용하였다<sup>(5)</sup>. 그러므로 면진건축물의 합성된 1차모드는 그림 6에서 나타내었듯이, 2자유도계 면진건축물의 1차 모드형상비  $\epsilon$ 와 건물 높이의 70%에 해당하는 변위를 크기 조절하여 구할 수 있다.

그림 7은 구조시스템에 따른 면진건축물의 모드형상과 합성된 모드형상을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 합성된 모드형상은 동적해석의 결과보다 기울기가 완만하여 층지진하중이 동적해석의 결과에 비하여 안전측임을 예상할 수 있다.

### 3.4 층지진하중 산정

Lee와 Medland(1978)는 비선형 면진시스템을 사용한 면진건축물의 중간층의 전단력이 부푸는 현상(Bulge)에 대하여 연구하였으며, Andriano와 Carr(1991)는 비선형 계수(non-linearity factor)를 이용하여 층지진하중 산정식을 제안하였다<sup>(7)</sup>. 그러나 이러한 방법들은 복잡한 변수들을 이용하여 면진건축물의 설계단계에 적용하기가 어렵다. 본 논문에서는 면진건축물의 1차모드 형상을 이용하여 그림 7에 주어진 합성된 1차모드 형상으로 층지진하중을 분배시키는 방법을 제시한다. .

$$F_x = \frac{w_x (h_x + \alpha)}{\sum w_i (h_i + \alpha)} \cdot V_s \quad (10)$$

$$\text{여기서, } \alpha = \frac{0.7 h_n}{\epsilon}$$

식(10)에서  $\alpha$ 는 면진건축물의 층지진하중을 고정기초건축물의 층지진하중과 구별하기 위한 인자로써 가상적인 구조물의 높이를 의미한다.

## 4. 예제구조물의 해석결과

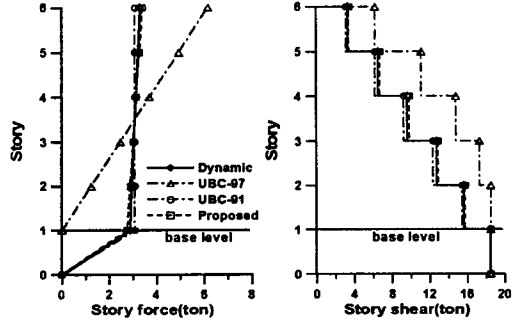
제안된 층지진하중 산정식의 타당성을 검증하기 위하여, 모멘트저항 골조와 전단벽식 구조의 예제구조물을 택하여 각각 정적해석과 동적해석의 결과를 비교하였다.

### 4.1 모멘트 저항골조 구조물

예제구조물은 그림 1에서 제시된 5층의 철근콘크리트 건물을 사용하였으며 층지진하중 산정에 사용된 변수들은 표 5와 같다.

표 5. 모멘트저항 골조 해석에 사용된 변수

면진시스템의 주기( $T_b$ )	1.523 sec
상부구조물의 주기( $T_s$ )	0.625 sec
질량비( $\gamma$ )	0.128
모드형상비( $\varepsilon$ )	0.168



(a) 층지진하중의 비교 (b) 층전단력의 비교

그림 8. 모멘트저항 골조의 해석결과비교

동적해석은 UBC표준응답스펙트럼을 이용하여 y방향의 응답을 얻었으며, 정적해석은 UBC-97에 근거하여 수행하였다. 그림 8에 동적해석과 정적해석 및 제안된 식을 이용하여 수행한 해석의 결과를 나타내었다. 그림 8.(a)는 동적해석의 결과보다 완만한 기울기를 보이는 안전측의 층지진하중 분포를 나타낸다. 그림 8.(b)에서 제안된 식의 층전단력은 동적해석과 거의 유사한 결과를 보였다. 이는 UBC-97의 층전단력과 비교하면 경제적이고 UBC-91의 결과에 대해서는 안전한 값이다.

#### 4.2 전단벽 방식 구조물

전단벽이 사용된 건물은 상부구조물이 강체처럼 거동하지만 1차모드의 형상이 상부층에서 급격히 커지므로 모멘트저항 골조보다 안전하지 못한 결과를 얻을 수 있다. 제안된 식이 전단벽 구조 또는 가새구조와 같이 휨변형 형상을 나타내는 구조에 적합하지 알아보기 위하여, 그림 9와 같은 평면을 갖는 5층의 철근콘크리트 건물을 예제로 택하였다. 동적해석과 정적해석에 사용된 조건은 모멘트저항 골조의 경우와 동일하다.

예제해석에 사용된 상부구조물의 주기는 0.367초이며, 면진시스템의 주기는 1.523초이다. 그림 10은 전단벽구조의 동적해석과 제안된 식을 이용하여 수행한 해석결과를 비교한 것이다. 그림 10.(a)에서 동적해석의 결과보다 완만한 기울기를 가지는 층지진하중 분포를 확인할 수 있다. 그림 10.(b)에서 전단벽구조의 경우에도 제안된 식을 이용한 해석은 동적해석의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

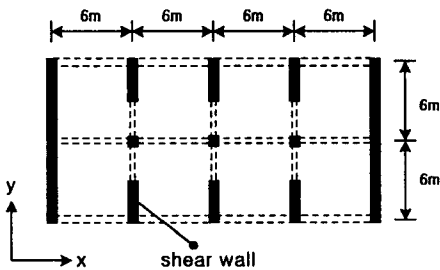
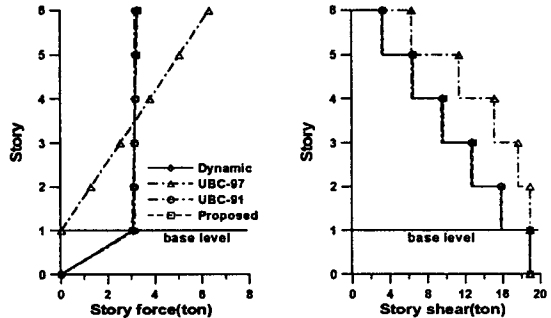


그림 9. 전단벽을 가지는 구조물의 평면도



(a) 층지진하중의 비교 (b) 층전단력의 비교

그림 10. 전단벽 구조의 해석결과 비교

## 5. 결 론

본 논문에서는 UBC의 면진건축물의 내진설계기준에 관하여 알아보고, 층지진하중 산정식의 문제점 및 개선방향에 대하여 연구였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) UBC-91에서 면진건축물의 내진설계에 관한 기준은 면진건축물의 동적특성을 고려하여 높이의 영향을 배제하고 총질량으로 하중을 분포시키는 방법을 사용하였으나 안전성이 부족한 문제점이 있다. UBC-97은 면진건축물의 동적특성을 무시하고 고정기초건축물의 층지진하중 분배식을 그대로 사용하여 비경제적인 구조설계를 유발한 문제점이 있다. 그러므로 면진건축물의 내진설계에 관한 UBC의 층지진하중 산정식에 관한 수정이 요구된다.
- (2) 2자유도 면진건축물을 이용하여 층지진하중을 구하는 제안식으로 모멘트저항 골조의 경우와 전단벽 구조에 대하여 해석을 수행하였으며, 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 이 방법은 어려운 해석기법의 적용을 최대한 제한하여 면진건축물의 예비설계 단계에서 쉽게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 유니슨 산업의 연구비 지원에 의한 것입니다. 연구비 지원에 대하여 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Kelly, James M. , "The Role of Damping in Seismic Isolation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp 4~20
2. Int. Conf. of Building Officials, "Earthquake Regulations for Seismic Isolated Structures", *Uniform Building Code*, Appendix Chapter 23, , 1997, pp2-405~2-416
3. Structural Engineers Association of Southern California, *Design and Construction of Base Isolated Buildings*, 1988,
4. Naeim, Farzad , Kelly, J. M. , *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley & Sons Inc, New York, 289pp
5. Lee, Dong-Guen, "Accurate and Simplified Models for Seismic Response Prediction of Steel Frame Structure", Ph. D. Dissertation, Stanford Univ., 1984.
6. Kelly, J. M., *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, 2nd edn, Springer, London, 1996, 243pp
7. Skinner, R. Ivan, Robinson, William H. , *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, New York, 1992, 304pp