

면진건축물의 동적특성을 고려한 층지진하중 분배식의 제안

Vertical Distribution of Seismic Load Considering Dynamic Characteristics of Base Isolated Building Structures

이 동근* 홍 장 미**
Lee, Dong Guen Hong, Jang Mi

국문요약

본 논문에서는 일반적으로 사용되고 있는 면진건축물의 내진설계기준에 대한 타당성을 검증하고 새로운 층지진하중 산정식을 제안하였다. UBC-91의 층지진하중 산정식은 충분한 안전성을 가지지 못하였으므로, 94년에 개정이 되었다. 그러나 개정된 산정식도 고정기초건축물과 유사한 층지진하중 산정식을 사용하였으므로, 비경제성이 문제점으로 지적되고있다. 그러므로 제안된 식에서는 2자유도계 면진건축물과 고정기초건축물의 모드형상을 이용하여 안전성, 경제성 및 적용성을 만족시키도록 하였다. 제안된 층지진하중 산정식의 정확성 및 적용성을 검증하기 위하여 모멘트저항 골조형식과 전단벽 구조형식의 구조물로 예제해석을 수행하였으며 동적해석의 경우와 근접한 결과를 얻었다.

주요어 : 면진건축물, UBC-91, UBC-97, 지진의 등가정적해석, 층지진하중

ABSTRACT

In this study, the validity of the currently used seismic regulations for seismic isolated building structures is investigated, and a new formula for vertical distribution of seismic load is proposed. The distribution formula in UBC-91 did not provide sufficient safety, and thus revised in 1994. However it is pointed out that the revised formula overestimates the seismic load because of its similarity to that of the fixed-base structure. Therefore, in the proposed approach, it is intended to satisfy safety, economy, and applicability by combining the mode shapes of the seismic isolated structure idealized as two degrees of freedom system and those of fixed-base structure. For verification of the proposed formula, both a moment resisting frame and a shear wall system are analyzed. The results obtained from the proposed method turn out to be close to the results from a dynamic analysis.

Key words : seismic isolated building, UBC-91, UBC-97, equivalent static analysis, vertical distribution of seismic load

1. 서 론

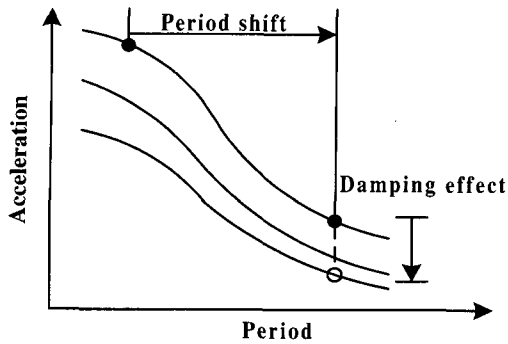
일반적으로 내진설계는 지진이 발생하는 경우에 구조물이 견딜 수 있도록 강성을 증가시키거나 부재의 소성거동으로 인한 에너지소산 방법을 이용한다. 하지만, 강성을 증가시키는 방법은 초기건설비용이 많이 드는 방법이고, 소성거동을 이용하는 방법은 지진 후에 보수비용이 많이 든다. 최근 30여년간 면진기술은

경제적인 내진설계와 기존의 중요구조물에 대한 내진성능을 향상시키기 위한 목적으로 활발히 연구되었다. 면진구조물의 초기건설비용은 일반 구조물과 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 적용이 급증하고 있다. 그림 1은 기본진동주기의 증가와 감쇠의 영향으로 인한 가속도응답과 변위응답을 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 주기와

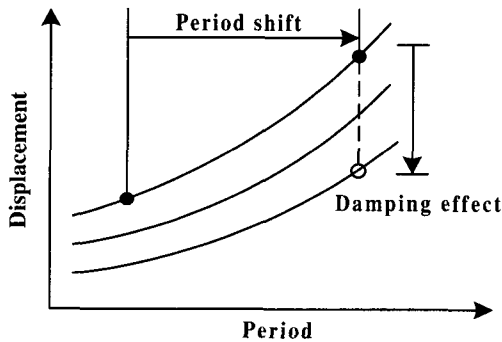
* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

** 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2000년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.



(a) 가속도 응답스펙트럼



(b) 변위 응답스펙트럼

그림 1 지진하중에 대한 면진시스템의 효과

감쇠가 증가함에 따라 가속도응답이 줄어들음을 보여주고 있다. 반면 그림 1(b)에서 알 수 있듯이 주기가 증가함에 따라 면진층의 상대변위가 증가되고 이 상대변위는 감쇠를 증가시켜서 일정 수준까지 줄일 수 있다.⁽¹⁾

미국에서 건설된 첫 번째 면진건물은 1985년에 완공된 Foothill communities law and justice center이다. 하지만 적절한 면진건축물의 내진 설계기준이 없었고 면진장치의 해석 및 설계 방법이 너무 복잡하여 두 번째 면진구조물은 3년 후에 건설되었다.⁽²⁾ 이렇듯 적절한 설계기준은 건축공사에 있어서 가장 기본이 되는 요소이며 면진구조물에서도 마찬가지이다. 본 논문에서는 가장 일반적으로 사용되는 면진건축물의 설계기준인 UBC(uniform building code)에 대하여 알아보고 기준에서 제시된 층진하중 산정법에 대한 문제점과 개선방안을 제시하였다.

2. 면진건축물의 지진거동

2.1 다자유도 면진건축물의 동적특성

면진건축물의 지진거동은 일반적인 고정기초건축물의 지진거동과는 매우 다르게 나타난다. 면진건축물은 면진장치의 유연성으로 인하여 건물과 지반이 분리되어 있으므로 상부구조물이 강체와 비슷한 거동을 보이며 1차모드의 영향이 지배적이다.⁽³⁾

면진건축물의 지진거동 특성을 파악하기 위하여 그림 2와 같은 예제구조물에 대하여 응답스펙트럼 해석을 수행하였다. 구조물은 4×2경간의 5층 철근콘크리트 건물이며, 면진장치의 수평강성은 0.28ton/cm이고 각 기둥마다 설치하였다. 면내 비틀림으로 인한 해석상의 오차를 줄이고 실제 구조물과 유사한 거동을 위하여 바닥판은 강막으로 가정하였다. 지역계수는 2A, 지반계수는 S_A로 가정하여 C_{VD}와 C_{AD}를 각각 0.12로 산정하였다.⁽⁴⁾

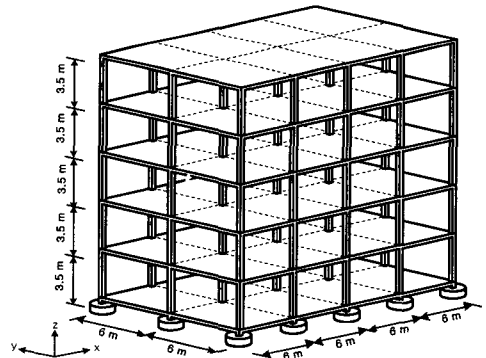


그림 2 예제구조물

면진장치를 설치하였을 경우와 그렇지 않은 경우의 고유치해석 결과를 표 1에 나타내었고, 1차모드의 형상을 그림 3에 나타내었다. 면진건축물의 1차모드 형상은 그림 3에서 보는 바와 같이 고정기초건축물에 비하여 거의 일직선에 가까우며, 표 1에서 1차모드의 질량참여율이 95%이상 되기 때문에 1차모드 만으로도 구조물의 거동을 파악할 수 있다.

표 1 고유치해석 결과

모드	고정기초 구조물			면진 구조물		
	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

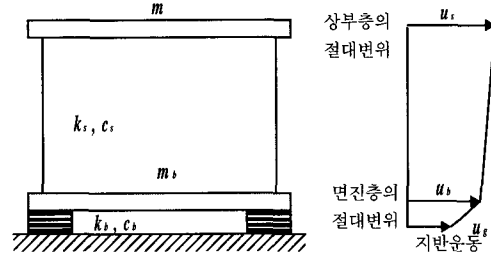


그림 4 2자유도계 면진건축물

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = -Mr\ddot{u}_g \quad (1)$$

여기에서

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

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

운동방정식의 고유치해석을 위하여 표 2에 주어진 변수를 이용한다. 상태방정식을 이용하여 구한 고유진동수를 ϵ 에 관한 1차식으로 표현하면 식 (2)와 같다.^{(1),(6)}

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

2자유도계 면진건축물의 모드형상은 식 (3)과 그림 5에 나타낸 바와 같다.^{(1),(6)}

표 2 고유치 해석에 사용된 변수

면진시스템의 진동수	$\omega_b = \frac{k_b}{M}^{1/2}$
상부구조물의 진동수	$\omega_s = \frac{k_s}{m}^{1/2}$
질량비	$\gamma = \frac{m}{M}$
진동수비의 제곱	$\epsilon = \omega_b^2 / \omega_s^2$
면진시스템의 감쇠	$2\omega_b \beta_b = \frac{c_b}{M}$
상부구조물의 감쇠	$2\omega_s \beta_s = \frac{c_s}{m}$

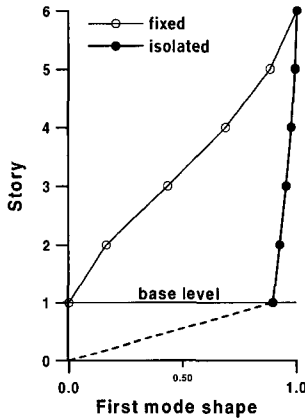


그림 3 1차모드형상

2.2 2자유도 면진건축물 고유치해석

면진건축물의 초기설계 단계에서는 선형 스프링과 선형 감쇠를 가지는 2자유도 구조물로 모형화하여 근사해석을 할 수 있다. 현재는 비비례 감쇠항을 가지는 면진시스템의 2자유도계 해법에 관하여 많은 연구가 진행된 단계이나,⁽⁵⁾ 본 논문에서는 면진구조물의 층지진하중 산정을 위하여 Kelly에 의하여 전개된 선형 2자유도계 면진건축물의 고유치 해석에 관한 부분을 정리하였다.^{(1),(3)}

그림 4에서 상부구조물의 질량(m)과 강성(k_s), 면진층의 질량(m_b)과 면진시스템의 강성(k_b)을 이용하여 동적운동방정식을 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\begin{cases} \phi_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{pmatrix} \\ \phi_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\varepsilon] \end{pmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

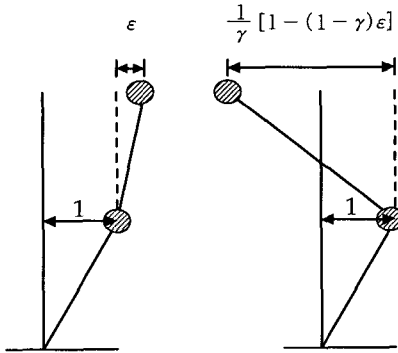


그림 5 2자유도계구조물의 모드형상

그림 5에서 ε 은 면진시스템과 상부구조물의 진동수 특성을 나타내는 계수로서 이 값이 클수록 면진시스템의 강성이 증가하여, 고정 기초건축물에 가까운 거동을 보인다. 표 3은 상부구조물의 주기 (T_s)를 0.63초로 고정하고 면진시스템의 주기 (T_b)를 달리하여 ε 의 변화를 나타낸 것으로 면진시스템의 주기가 작아질수록 그 값이 커진다.

표 3 면진시스템의 주기(T_b)에 대한 ε 의 변화

T_b	$0.1 T_s$	$0.5 T_s$	$1.0 T_s$	$2.0 T_s$	$3.0 T_s$	$4.0 T_s$	$20 T_s$
ε	100	4	1	0.25	0.11	0.06	0.002

3. 면진건축물의 내진설계

면진건축물의 내진설계기준에 대한 논의는 1986년 SEAONC(structural engineers association of Northern California)에서 발족된 위원회에서 시작되었다. 그 결과로서 'Tentative seismic isolation design requirements(Yellow book)'라는 보고서가 Blue book 4판의 부록으로 출간되었다. 1988년에 SEAONC위원회에서

는 'General requirements for the design and construction of seismic isolated structures'라고 하는 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.⁽²⁾

현재 미국의 면진건축물에 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 면진건축물의 내진설계기준 중에서 최초로 사용된 UBC-91과 현재 사용 중인 UBC-97의 등가정적해석에 대하여 알아보았다.

3.1 UBC-91에 의한 면진건축물 내진설계

UBC에서는 1991년에 처음으로 면진건축물의 내진설계기준을 23장의 부록으로 채택하였다.⁽⁷⁾

활성단층에서 15km이상 떨어지고 지반계수 S_1 또는 S_2 지역계수 3, 4인 대지에서는 등가정적해석법을 사용할 수 있다. 면진건축물의 설계변위는 식 (4)에 의하여 결정된다.

$$D = \frac{254 Z N S_I T_I}{B} \quad (\text{SI 단위}) \quad (4)$$

식 (4)에서 B 는 면진시스템의 감쇠에 의하여 결정되는 값이고, S_I 는 면진구조물에 대한 지반계수, Z 는 지역계수이다. N 은 해당지반이 활성 단층으로부터 떨어진 거리와 예상되는 지진의 규모로 결정되는 값으로 near field factor이다.

면진건축물의 주기는 단자유도 구조물로 가정하여 면진장치의 강성(K_{\min})과 상부구조물의 무게(W)를 이용하여 식 (5)로 계산한다.

$$T_I = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{\min} g}} \quad (5)$$

면진장치 하부구조물의 설계하중 (V_b)은 식 (6)과 같으며 면진장치 상부구조물의 설계하중 (V_s)은 식 (7)으로 계산한다. 여기서, K_{max} prototype test에서 구해지는 최대유효강성이다.

$$V_b = \frac{K_{max} D}{1.5} \quad (6)$$

$$V_s = \frac{K_{max} D}{R_{wI}} \quad (7)$$

여기서 R_{wI} 는 면진구조물에 적용되는 반응수정계수로서, 높이와 상부구조물의 횡저항 방식에 의하여 결정된다. 식 (7)을 통하여 얻어진 밑면전단력(V_s)은 아래의 식 (8)에 의하여 구조물의 높이에 따라 층지진하중으로 분배된다.

$$F_x = \frac{w_x}{\sum w_i} \cdot V_s \quad (8)$$

식 (8)은 주기산정식은 식 (5)의 경우처럼 면진건축물을 단자유도계 구조물로 가정한 것으로서 각층의 질량만으로 밑면전단력을 분배시킨다.

3.2 UBC-97에 의한 면진건축물 내진설계

UBC-97에서 제시한 면진건축물의 설계에 관한 규정은 일반적인 건물의 내진설계지침과 비슷하고 UBC-97에서는 16장의 부록으로 채택되었다.⁽⁶⁾

정적해석법은 활성단층에서 10km이상 떨어지고 지반계수 S_A, S_B, S_C, S_D 인 대지에 건물이 위치할 경우 사용하는 방법으로, 면진시스템 상부의 구조물은 4층이하, 또는 19.8m이하의 정형 구조물이어야 한다. 면진건축물의 설계면위(D_D)는 식 (9)에서 산정할 수 있다.

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4} \pi^2\right) C_{VD} T_D}{B_D} \quad (9)$$

여기에서, B_D 는 면진장치의 감쇠능력을 나타내는 값으로 표 4에 나타내었으며, 종전의 지반계수와 지역계수를 하나의 지진계수로 표현한 C_{VD} 는 표 5로 구할 수 있다.

표 4 감쇠계수

유효감쇠(%)	≤ 2	5	10	20	30	40	≥ 50
B_D	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0

표 5 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				

여기에서 T_D 는 면진 구조물의 기본진동주기를 나타내며 식 (5)와 유사한 형태로 구해진다.

면진장치 하부구조물의 설계하중 (V_b)은 식 (11)과 같으며 면진장치 상부구조물의 설계하중 (V_s)은 식 (12)로 계산한다.

$$V_b = K_{Dmax} D_D \quad (11)$$

$$V_s = \frac{K_{Dmax} D_D}{R_I} \quad (12)$$

여기서 R_I 는 UBC-91의 R_{wI} 와 동일한 개념의 반응수정계수이다. 고정기초구조물의 반응수정계수가 2.2~8.5의 값을 갖는데 비하여 거의 탄성거동을 한다고 가정하는 면진구조물의 경우는 1.4~2.0의 값을 갖는다. 식 (12)를 통하여 얻어진 밑면전단력(V_s)은 아래의 식 (13)에 의하여 구조물의 높이에 따라 층지진하중으로 분배된다.

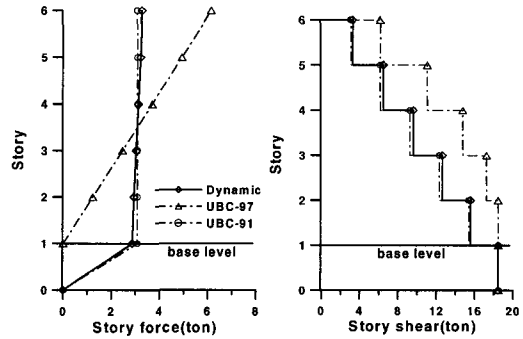
$$F_x = \frac{w_x h_x}{\sum_i w_i h_i} \cdot V_s \quad (13)$$

식 (13)은 식 (8)과는 달리 높이 h_x 항으로 상부구조물의 영향을 고려하고 있다.

4. UBC 면진구조물 설계의 문제점

면진구조물의 초기단계 내진설계기준(Yellow book, UBC-91 etc.)에서는 상부구조물의 영향을 무시하고 모든 층에 동일한 가속도가 작용한다는 가정으로 식 (8)과 같은 총지진하중 산정식을 이용하였다.^{(7),(9)} 이 식은 면진장치의 유연성만을 고려하고, 상부구조물은 강체로 가정한 것으로써 각 층의 질량에 의해서만 총지진하중이 분포된다. 그러나 이 방법은 상부구조물의 자유도에 의한 영향을 무시하였기 때문에, 충분한 안전성을 가지지 못하였다. UBC-94부터는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 식 (13)으로써 총지진하중을 산정하였다. 식 (13)은 고정기초건축물의 총지진하중 산정식과 동일한 식이며 삼각형 형상으로 하중을 분포시킨다. 식 (13)은 상부구조물이 강체로 가정되었던 식 (8)과는 달리 면진장치가 강체로 가정되고 상부구조물의 자유도만을 고려한 것이다. 면진건축물의 동적해석 결과가 거의 사각형 형상의 하중 분포를 가지는데 반하여 식 (13)은 면진건축물의 특성을 간과한 결과이지만, 납이나 마찰감쇠가 포함된 면진시스템의 비선형성 및 불확실성을 어느 정도는 감안한 것이다.⁽¹⁰⁾

UBC의 총지진하중 산정식과 동적해석의 결과를 비교하기 위하여 그림 2의 예제구조물로 해석을 수행하였다. 동적해석은 UBC-97 표준 응답스펙트럼을 사용하였고 등가정적해석은 각각 UBC-91, UBC-97을 근거하여 수행하였다. 그림 6(a)는 총지진하중을 나타내고, 부재력에 직접적인 영향을 주는 총전단력을 그림 6(b)에 나타내었다. 해석결과를 비교하기 위하여 동적해석과 정적해석의 밀면전단력을 같은 수준으로 조정하였다. 그림 6(a)와 그림 6(b)에서 UBC-91



(a) 총지진하중의 비교 (b) 총전단력의 비교

그림 6 면진구조물의 동적 및 UBC기준의 해석결과 비교

의 결과는 동적해석의 결과와 비슷한 총전단력 분포와 총지진하중 분포를 보이지만, 그 값이 상대적으로 작아서 충분한 안전성을 가지지 못함을 알 수 있다. 특히 상부구조물의 영향으로 기울기를 가지는 총지진하중의 동적해석 결과와 비교할 때, 상부구조물이 강체인 UBC-91의 결과는 일직선의 분포로 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 불안전성의 차이로 인하여 UBC-91의 총지진하중 산정식인 식 (8)은 94년에 식 (13)으로 개정되었다.⁽¹⁰⁾

반면에 UBC-97의 결과는 면진시스템을 강체로 가정하여 고정기초구조물과 유사한 형상의 총지진하중 분포를 보인다. 특히, 중간층의 전단력을 비교하면 동적해석보다 매우 큰 값을 나타내므로 지나치게 안전측임을 알 수 있다. 이러한 동적해석과 정적해석의 총지진하중 (또는 총전단력)결과의 차이는 비선형 면진시스템의 경우에 고차모드의 영향으로 인하여 더욱 크게 발생할 수 있다.

5. 합리적인 총지진하중의 산정

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

그림 7은 밀면전단력을 각 층에 분배하는 과정을 나타낸 흐름도이다. 1단계로 다자유도 계인 상부구조물의 모드형상을 가정하고 단자유도로 치환하여 기본진동주기를 결정한다. 다음으로 상부구조물과 면진시스템을 각각 하나의 자유도로 하는 2자유도계 구조물로 가정하고 주기 및 모드형상을 구한다. 1, 2단계에서 얻어진 주기와 모드형상을 이용하여 면진건축물의 합성된 1차모드를 구할 수 있으며, 이를 근거로 층지진하중을 산정한다.

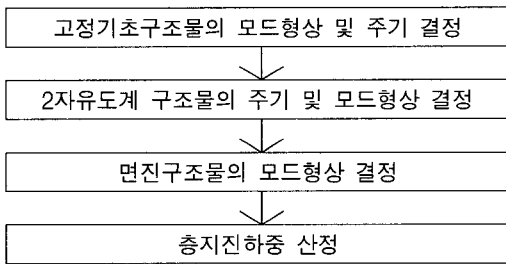


그림 7 층지진하중 산정의 흐름도

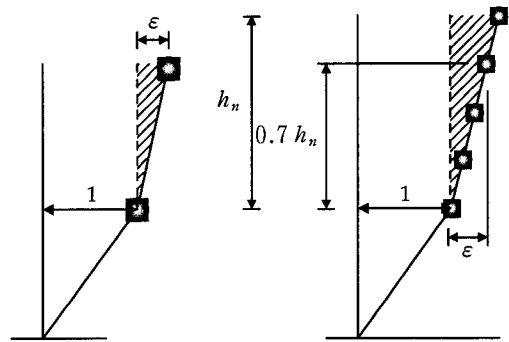
5.1 2자유도계 면진건축물의 모형화

면진시스템과 상부구조물을 각각 하나의 자유도를 가지는 2자유도계 구조물로 모형화하기 위하여, 면진장치를 제외한 상부구조물의 모드형상과 주기를 결정하여야 한다. 다자유도계 고정기초건축물을 등가의 단자유도계 구조물로 치환하는 연구는 다양한 방법으로 진행되고 있다.^{(11),(12)} 하지만 등가정적해석은 주로 예비설계 단계에서 활용되므로 본 논문에서는 간단하고 일반적으로 많이 사용하는 UBC-97의 기본진동주기 산정식을 이용하였다. 또한 면진건축물은 주로 저층이고 기본진동주기가 0.7초 이하이므로 UBC의 의하여 상부구조물의 1차모드형상은 높이에 비례하는 것으로 가정한다.⁽⁸⁾

면진시스템의 강성과 상부구조물의 질량으로 주기를 구할 수 있으며, 2.2절에서 설명한 방법으로 2자유도계 구조물의 모드형상을 얻을 수 있다.

5.2 면진건축물의 근사적 모드형상

면진건축물의 1차모드 형상은 고정기초건축물의 1차모드와 등가의 2자유도계 구조물의 모드 형상을 이용하여 근사적으로 나타낼 수 있다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 2자유도계 구조물의 1차 모드형상비인 ϵ 에 고정기초건축물의 대표변위를 맞추어 조절하면 실제 면진구조물의 모드형상과 유사한 모드형상을 얻을 수 있다.

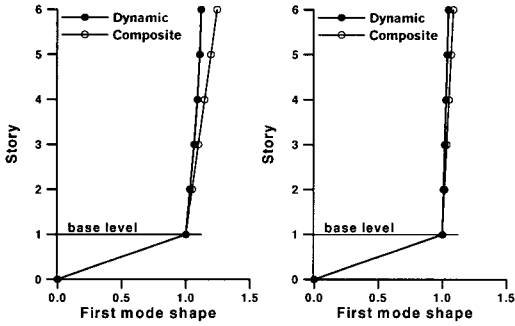


(a) 면진구조물의 1차모드 (b) 합성된 면진구조물의 모드

그림 8 ϵ 을 이용한 면진구조물의 모드 합성

앞의 절에서 면진건축물의 층지진하중이 1차모드의 형상과 유사한 분포를 나타내는 것을 알아보았다. 하지만, 면진건축물의 설계할 때는 1차 모드형상의 기울기를 더욱 완만하게 가정하여 충분히 안전성을 고려할 필요가 있다. 안전 수준으로 기울기를 조정하기 위하여 건물 높이의 70%에 해당하는 변위를 대표변위로 이용하였다. 본 논문에서 사용한 대표변위 산정방법은 매층 변위를 제공하여 더한 후 층수로 나누어 제공근을 구한 RMS방법이다. RMS 방법으로 구한 대표변위의 위치는 건물 총 높이의 약 50%~70%위치인 것으로 알려져 있다.^{(11),(13)} 대표변위의 위치를 50%~70%로 변화시키면서 층지진하중해석을 수행한 결과, 상부구조물이 거의 강제로 거동하는 면진건축물에서는 응답이 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인하였다. 그러므로 면진건축물의 근사적인 1차

모드는 그림 9에서 나타내었듯이, 2자유도계 구조물의 1차 모드형상비(ϵ)와 건물 높이의 70%에 해당하는 모드값을 크기 조절하여 구할 수 있다.



(a) 모멘트저항 골조 (b) 전단벽 구조
그림 9 동적해석 및 근사적인 모드형상 비교

그림 9는 구조시스템에 따른 면진건축물의 모드 형상과 근사적인 면진구조물의 모드형상을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 근사적인 모드형상은 동적해석의 결과보다 기울기가 완만하여 총지진하중이 동적해석의 결과에 비하여 안전측임을 예상할 수 있다.

5.3 총지진하중 산정

Lee와 Medland(1978)는 비선형 면진시스템을 사용한 면진건축물을 해석하여 중간층의 전단력이 부푸는 현상(bulge)에 대하여 연구하였으며, Andriano와 Carr(1991)는 비선형 계수(non-linearity factor)를 이용하여 총지진하중 산정식을 제안하였다.⁽⁹⁾ 그러나 이러한 방법들은 복잡한 변수들을 이용하여 면진구조물의 예비설계단계에 적용하기가 어렵다. 본 논문에서는 그림 9에 주어진 근사적인 1차모드형상을 근거로 하여 총지진하중 산정식을 제안한다.

$$F_x = \frac{w_x (h_x + \alpha)}{\sum w_i (h_i + \alpha)} \cdot V_s \quad (14)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{0.7h_n}{\epsilon}$$

식 (14)에서 α 는 면진건축물의 총지진하중을 고정건축물의 총지진하중과 구별하기 위한 인자로써 그림 8에 나타낸 ϵ 과 대표변위를 이용하여 구하여진다. 그림 10은 ϵ 과 h_n 의 관계를 나타낸 것이며, α 가 가상적인 구조물의 높이임을 의미한다.

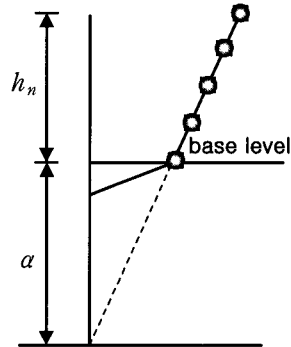


그림 10 h_n 와 α 의 관계

6. 예제구조물의 해석결과

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

6.1 모멘트 골조구조물

예제구조물은 그림 2에서 제시된 5층의 철근콘크리트건물을 사용하였으며 총지진하중 산정에 사용된 변수들은 표 6과 같다.

표 6 모멘트저항 골조 해석에 사용된 변수

면진시스템의 주기(T_b)	상부구조물의 주기(T_s)	질량비 (γ)	모드형상비 (ϵ)
1.523 sec	0.625 sec	0.128	0.168

동적해석은 UBC표준응답스펙트럼을 이용하여 y방향의 응답을 얻었으며, 정적해석은 UBC-97에 근거하여 수행하였다. 그림 11에 동적해석과 정적해석 및 제안된 식을 이용하여 수행한 해석의 결과를 나타내었다. 그림 11(a)는 동적해석의 결과보다 완만한 기울기를 보이는 안전층의 층지진하중 분포를 나타낸다. 그림 11(b)에서 제안된 식의 층전단력은 동적해석과 거의 유사한 결과를 보였다. 이는 UBC-97의 층전단력과 비교하면 경제적이고 UBC-91의 결과에 대해서는 안전한 값이다.

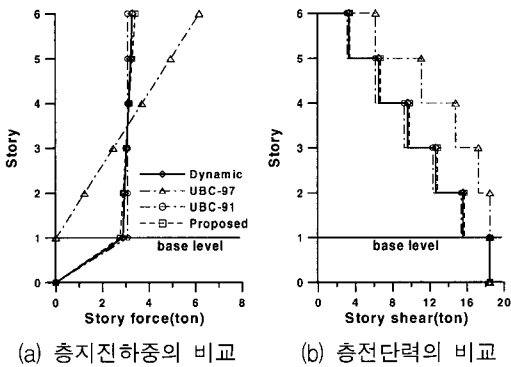


그림 11 모멘트저항 골조의 해석결과 비교

6.2 전단벽 방식 구조물

전단벽이 사용된 구조물은 상부구조물이 강체처럼 거동하지만 1차모드의 형상이 상부층에서 급격히 커지므로 모멘트저항 골조보다 안전하지 못한 결과를 얻을 수 있다.

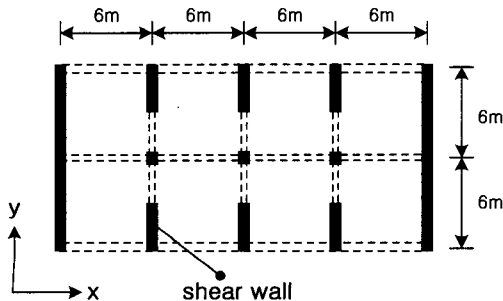


그림 12 전단벽을 포함한 건물의 평면도

제안된 식이 전단벽 구조 또는 가새구조와 같이 휨변형 형상을 나타내는 구조에 적합한지 알아보기 위하여, 그림 12의 5층 철근콘크리트 건물을 예제로 택하였다. 동적해석과 정적해석에 사용된 조건은 모멘트저항 골조의 경우와 동일하다.

층지진하중 산정에 사용된 변수들은 표 7과 같으며 그림 13은 전단벽 구조의 동적해석과 제안된 식을 이용하여 수행한 해석결과를 비교한 것이다. 그림 13(a)에서 동적해석의 결과보다 완만한 기울기를 가지는 층지진하중 분포를 확인할 수 있다. 그림 13(b)에서 전단벽 구조의 경우에도 제안된 식을 이용한 해석은 동적해석과 잘 일치함을 알 수 있다.

표 7 전단벽 구조 해석에 사용된 변수

면진시스템의 주기(T_b)	상부구조물의 주기(T_s)	질량비 (γ)	모드형상비 (ϵ)
1.523 sec	0.367 sec	0.128	0.058

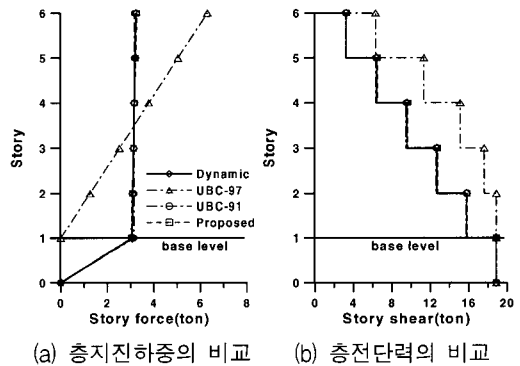


그림 13 전단벽 구조의 해석결과 비교

7. 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 층질량으로 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.
- (3) 본 연구의 결과는 등가정적해석을 수행하기 위하여 선형 면진장치가 설치된 경우에 대하여 층지진하중을 산정하였다. 추후로 제안식의 적용범위를 파악하기 위하여 비선형면진장치가 설치된 면진건축물의 층지진하중과 밀면전단력에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Kelly, J. M., "Base isolation: linear theory and design," *Earthquake Spectra*, Vol. 6, No. 2, 1990, pp. 223-244.
2. Kelly, J. M., "The role of damping in seismic isolation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp. 4-20.
3. Skinner, R. I., Robinson, W. H., and Mc Verry, G. H. *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, New York, 1992, pp. 304.
4. 이동근, 홍장미, 김두훈, "면진장치가 설치된 건축구조물의 개선된 내진설계", 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 1999, pp. 9-14.
5. Igusa, T. and Der Kiureghian, A., "Dynamic characterization of two-degree-of-freedom equipment-structure systems," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 111, No 1, 1985, pp. 1-19.
6. Kelly, J. M., *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, 2nd edn, Springer, London, 1996, pp. 243.
7. Int. Conf. of Building Officials, "Earthquake regulations for seismic isolated structures," Uniform Building Code, Chapter 23, 1991.
8. Int. Conf. of Building Officials, "Earthquake regulations for seismic isolated structures," Uniform Building Code, Appendix Chapter 16, 1997.
9. Structural Engineers Association of Southern California, *Design and Construction of Base Isolated Buildings*, 1988.
10. Naeim, F., and Kelly, J. M., *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley & Sons Inc, New York, pp. 289.
11. Lee, D. G., "Accurate and Simplified Models for Seismic Response Prediction of Steel Frame Structure," Ph.D. Dissertation, Stanford Univ., 1984.
12. Shahrooz, B. M. and Moehle, J. P., "Seismic response and design of setback build-

- ding," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, No. 5, 1990, pp. 1423-1439.
13. 서현주, "고층건물의 비틀림 거동 개선에 관한 연구", 박사학위논문, 성균관대학교, 1998, pp. 216.
 14. 문혜수, "면진시스템이 설치된 건축구조물의 설계에 관한 연구", 석사학위논문, 성균관대학교, 1988, pp. 86.
 15. Applied Technology Council, "Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings," ATC-3-06, Palo Alto, 1978.