

동적 해석법을 이용한 내진설계 결과의 비교 고찰

Comparative Study on the Results of Seismic Design  
by Dynamic Analysis Method

이 성우\*, 노 홍식\*\*, 심 규점\*\*\*  
Lee, Sung Woo Roh, Hong Shik Shim, Kyue Jhum

ABSTRACT

Recently increasing number of highrise buildings are aseismically designed by dynamic analysis method. To perform comparative syudy on the results of seismic design by dynamic analysis method, five-to thirty-story building models of ductile moment resisting frames and braced frames are considered. Base shears of these models using the spectrum of equivalent static method in the current Korean code and the ones of dynamic analysis method in the UBC-88 code are compared. Based on this study design spectra to be used in the dynamic analysis in Korea are proposed and the results are compared.

1. 서론

현행 한국의 내진설계 기준에는 건물의 내진설계는 등가정적 해석법<sup>(1)</sup>을 이용하도록 규정하고 있다. 등가정적 해석법은 구조물의 1차 진동모드의 영향만을 주로 고려하여 지진하중을 산정하기 때문에 고차모드의 기여도가 큰 고층건물이나 비정형 구조물 또는 중요도가 높은 구조물일 경우 동적특성을 적절히 고려한 동적해석에 의한 내진설계를 할 필요가 있다. 동적해석 방법 적용시 구조물에 대한 내진 안전성과 등가 정적해석법에 비해 설계지진력을 낮게 취할수 있는 잇점 때문에 최근 동적해석에 의한 내진설계 방법을 많이 채택하고 있다. 그러나 한국의 현행기준에는 동적해석 방법에 대해 규정된 바가 없으므로 동적해석에 의한 내진설계를 하기위해서는 UBC-88기준<sup>(2)</sup>이나 ATC3-06기준<sup>(3)</sup>을 준용할 수 밖에 없는 실정이다. 현재 한국에서의 동적해석에 의한 내진설계는 대부분 ATC3-06 기준을 준용하여 수행하고 있다. 본 연구에서는 한국의 등가정적 해석법에 사용되는 설계 스펙트럼을 이용하여 ATC방법으로 수행한 내진설계 결과와 UBC-88 기준에서 채택하고 있는 동적해석을 위한 설계 스펙트럼을 이용하여 수행한 내진설계 결과를 비교 검토하였다. 비교대상 구조물로 5층, 10층, 15층, 20층, 30층으로 된 철골 및 철근 콘크리트 모멘트 연성골조와 브레이스 골조를 고려하였다. 비교연구 결과 고층 구조물인

경우 한국의 등가 정적 해석용 스펙트럼을 사용한 지진력이 UBC 동적해석용 스펙트럼을 사용한 지진력보다 더 크게 산정됨을 알았다. 그러나 상대적으로 약한 한반도 지진을 고려해 볼때 UBC 지진력보다 큰 지진력으로 산정될 필요는 없을 것으로 판단되었다. 이러한 근거를 바탕으로 본 연구에서는 UBC 동적해석용 스펙트럼의 단주기부분을 수정한 스펙트럼을 한국에서의 동적해석용 스펙트럼으로 사용할 것을 제안하였다. 각 건물모델에 대하여 제안된 스펙트럼을 사용한 내진설계 결과와 한국의 정적해석용 스펙트럼 및 UBC 동적해석용 스펙트럼을 사용한 내진설계 결과들을 비교하여 제안된 스펙트럼사용의 타당성 여부를 검토하였다.

2. 동적 해석에 의한 내진설계

2.1 스펙트럼 해석법

한국의 내진설계 기준에는 동적해석 방법에 대한 요구조항이 없으나 UBC-88 기준에는 어느 구조물에도 동적해석 방법을 이용할수 있다고 되어 있다. 뿐만아니라 구조물의 높이가 240 ft(73 m) 이상되는 모든 구조물과 5층이상 또는 65 ft(20 m) 이상되는 비정형 구조물에 대해서는 의무적으로 동적해석법을 적용하도록 규정하고 있고 그방법과 절차를 규정하고 있다.

동적해석법은 대별해서 반응 스펙트럼 해석법과 시간이력 해석법으로 구분할 수 있다. 보통건물의 동적해석에는 보다 경제적인 스펙트럼 해석법을 주로 이용하고 있다. 스펙트럼 해석을 이용한 내진설계 방법은 여러 동역학 서적에<sup>(6,7)</sup> 상

\* 정회원, 국민대학교 토목공학과 부교수  
\*\* 국민대학교 토목공학과 석사과정  
\*\*\* 국민대학교 토목공학과 석사과정

술되어 있으므로 여기서는 간단히 기본이론만 기술하기로 한다.

지진하중을 받는 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = -[M] \{I\} \ddot{u}_g \quad (1)$$

여기서  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$ ,  $\{u\}$ 는 구조물의 변위, 속도, 가속도 벡터이고  $\ddot{u}_g$ 는 지반가속도를 나타낸다.  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 는 각각 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬 및 강성행렬이다. 식(1)은 모드중첩법 ( $\{u\} = [\phi] \{q\}$ )을 이용하여 각 모드에 대해 독립적인 방정식으로 분리할 수 있고, m번째 모드에 대한 식을 쓰면 다음과 같다.

$$\ddot{q}_m + 2\xi_m \omega_m \dot{q}_m + \omega_m^2 q_m = -\Gamma_m \ddot{u}_g \quad (2)$$

여기서  $\Gamma_m$ 은 m번째 모드의 모드기여 계수이고 다음과 같이 표시된다.

$$\Gamma_m = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \phi_{im}}{\sum_{i=1}^N W_i \phi_{im}^2} \quad (3)$$

여기서 N은 총 층수,  $W_i$ 는 i층의 무게이고  $\phi_i$ 는 i층의 모드형상이다.

특정지진에 대한 지반가속도  $\ddot{u}_g$ 를 이용하여 식(2)의 응답을 구할 수 있고 이들응답의 최대값으로 반응 스펙트럼을 만들수 있다. 건물의 내진설계에는 일반적으로는 특정지진에 대한 반응 스펙트럼 보다는 여러지진을 분석하여 단순화 시킨 설계 스펙트럼을 주로 사용하고 있으며 다음 절에서 이에 대해 자세히 기술하고자 한다.

어느층 X에서 m번째 모드의 증지진 하중은 가속도 스펙트럼값  $S_{am}$ 을 이용하여 구할수 있고 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$F_{xm} = (\ddot{u}_{xm})_{max} W_x = \Gamma_m \phi_{xm} S_{am} W_x \quad (4)$$

m번째 모드의 밀면전단력은 증지진 하중의 합으로 구해지고 다음과 같이 표시된다.

$$V_m = \sum_{i=1}^N F_{im} = W_m S_{am} \quad (5)$$

여기서  $W_m$ 은 m번째 모드의 유효중량으로 다음과 같이 표시된다.

$$W_m = \left[ \sum_{i=1}^N W_i \phi_{im} \right]^2 / \sum_{i=1}^N W_i \phi_{im}^2 \quad (6)$$

동적해석에서는 일반적으로 식(4)의 층 지진하중을 미리 계산하는것이 아니고 식(5)의 각 모드별 밀면전단력을 먼저 계산한 후 증지진 하중을 구한다. 식(4)와 식(5)를 이용하여 증지진 하중을 다

시 표시해보면 다음과 같이 된다.

$$F_{xm} = (W_i \phi_{xm} / \sum_{i=1}^N W_i \phi_{im}) V_m \quad (7)$$

스펙트럼 해석법에서는 식(5)에서 구해진 각 모드별 밀면 전단력을 SRSS방법이나 CQC방법(6)등으로 조합하여 조합된 밀면전단력을 구한다. 구조물의 부재력은 식(4)에서 구해진 모드별 증지진 하중을 횡하중으로 작용시켜 구조물을 정적으로 해석하여 구하게 되고 모드별 결과를 조합하여 조합된 부재력을 구한다.

## 2.2 동적해석을 위한 설계 스펙트럼

전항의 식(5)에서 알수 있듯이 동적해석 결과는 적용한 설계 스펙트럼에 의해 좌우된다. 설계 스펙트럼은 ATC에서 제안하는 방법과 UBC-88기준에 명시된 방법이 각각 틀린다. 3절에 나오는 예에서는 2가지 방법을 모두이용하여 지진해석을 한 결과를 비교 검토하였다.

ATC방법은 등가정적 해석법에 적용한 스펙트럼 가속도 값을 동적해석시 에도 그대로 이용하도록 하고 있는데, 한국의 내진설계 기준으로부터 산정해보면 다음과 같다.

$$S_{am} = A I C_m S / R \quad (8)$$

여기서 A는 지역계수, I는 중요도 계수, S는 지반계수, R은 반응 수정계수이고  $C_m$ 은 내진설계 계수로 다음과 같다.

$$C_m = \frac{1}{1.2 \sqrt{T_m}} \leq 1.5, C_m S \leq 1.75 \quad (9)$$

여기서  $T_m$ 은 m번째 모드의 진동주기이다.

식(7)에서  $A I / R$ 을 1.0으로 표준화 시키고, 주기 T를 횡축으로 하여 지반종별 2( $S=1.2$ )에 해당되는 가속도 스펙트럼을 그린것이 다른 스펙트럼들과 함께 그림 1에서 보여주고 있다. 앞으로 나오는 예에서 이 스펙트럼을 한국의 정적해석용 스펙트럼이라 부르고 ATC방법을 적용하여 동적해석을 할 경우 이 스펙트럼을 사용한다.

UBC-88 기준에는 동적해석에 사용하는 스펙트럼을 별도로 채택하고 있는데 이는 UBC의 정적해석용 스펙트럼과 다소 차이가 난다. 이 스펙트럼은 ATC3-06 에서 제안된 스펙트럼을 이용한 것으로 동적해석에만 이용하도록 하고 있다. 그림 1에는 여러기준의 스펙트럼을 함께 보여주고 있는데 모두 지반종별 2에대한 표준화된 스펙트럼이다. 그림 2에는 각 지반종별에 대해 UBC-88에서 사용되고 있는 동적해석용 가속도 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림 3, 4, 5에는 각 지반종별로 UBC스펙트럼의 단주기 부분에 대해 한국의 정적해석용

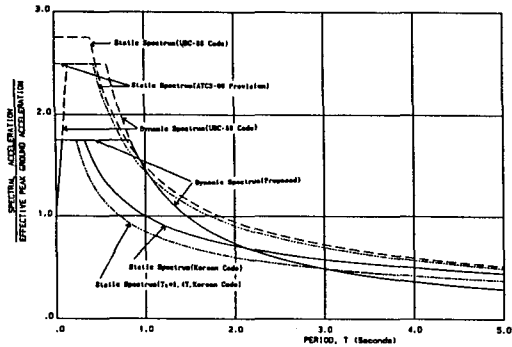


그림 1. 표준화 시킨 설계 스펙트럼

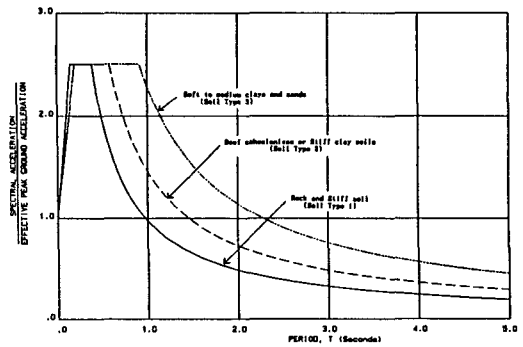


그림 2. UBC 동적해석용 가속도 스펙트럼

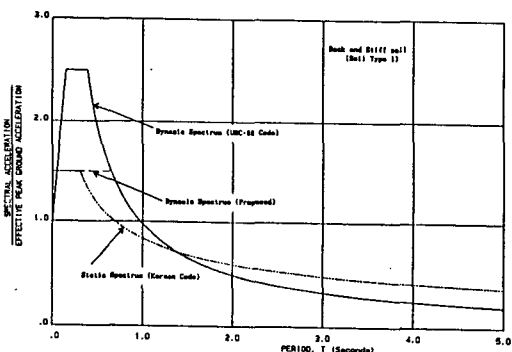


그림 3. 지반종별 1에 대한 가속도 스펙트럼

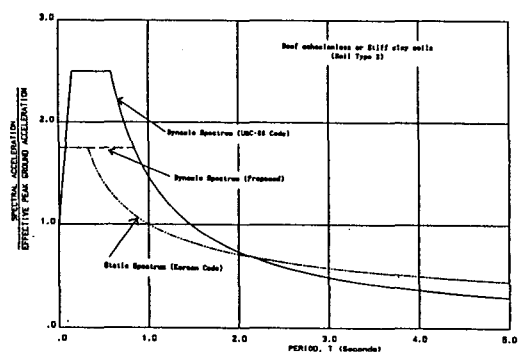


그림 4. 지반종별 2에 대한 가속도 스펙트럼

표1. 동적해석용 설계 스펙트럼 식

지반종별	UBC-93 동적해석용 스펙트럼		제안된 한국의 동적해석용 스펙트럼	
	가속도 스펙트럼 (\$S_a\$) 식	시 적용 범위 (\$T\$) (초)	가속도 스펙트럼 (\$S_a\$) 식	시 적용 범위 (\$T\$) (초)
\$S_1\$	\$S_a = 1 \cdot 10T\$	\$0 < T \le 0.15\$	\$S_a = 1 \cdot 10T\$	\$0 < T \le 0.075\$
	\$S_a = 2.5\$	\$0.15 < T \le 0.29\$	\$S_a = 1.50\$	\$0.075 < T \le 0.555\$
	\$S_a = 0.975/T\$	\$T > 0.29\$	\$S_a = 0.975/T\$	\$T > 0.555\$
\$S_2\$	\$S_a = 1 \cdot 10T\$	\$0 < T \le 0.15\$	\$S_a = 1 \cdot 10T\$	\$0 < T \le 0.075\$
	\$S_a = 2.5\$	\$0.15 < T \le 0.585\$	\$S_a = 1.75\$	\$0.075 < T \le 0.835\$
	\$S_a = 1.463/T\$	\$T > 0.585\$	\$S_a = 1.463/T\$	\$T > 0.835\$
\$S_3\$	\$S_a = 1 \cdot 7.5T\$	\$0 < T \le 0.2\$	\$S_a = 1 \cdot 7.5T\$	\$0 < T \le 0.1\$
	\$S_a = 2.5\$	\$0.2 < T \le 0.915\$	\$S_a = 1.75\$	\$0.1 < T \le 1.305\$
	\$S_a = 2.288/T\$	\$T > 0.915\$	\$S_a = 2.288/T\$	\$T > 1.305\$

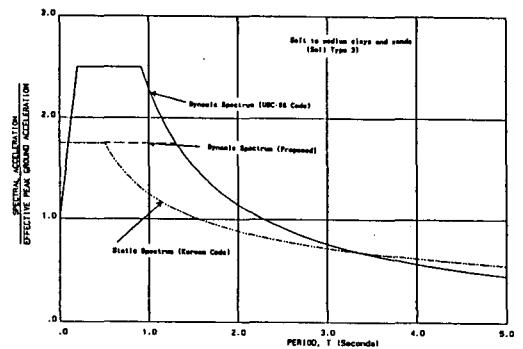


그림 5. 지반종별 3에 대한 가속도 스펙트럼

스펙트럼에서와 같이 가속도를 낮게 수정한 스펙트럼을 보여주고 있는데, 이 수정된 스펙트럼들은 3절의 내진설계 값들의 비교결과를 토대로 본 연구에서 제안하는 한국의 동적해석용 스펙트럼들이다. 수정 스펙트럼을 제시하는 주된 이유는 한국의 정적 해석용 스펙트럼을 사용할 경우 고층건물에 대한 지진력이 UBC 동적해석용 스펙트럼을 사용한 지진력 보다 더 크게 산정되기 때문이다. UBC 동적해석 스펙트럼은 SEAOC-90(4)에 따라 해석적인 표현도 가능한데 표1에는 UBC 스펙트럼과 수정 제안된 스펙트럼식을 지반종별로 보여주고 있다. 3절의 예에서는 이 수정 스펙트럼을 이용하

여 구한 내진설계 결과도 비교 분석하였다.

### 2.3 최종 설계값 산정

동적해석법으로 구한 지진해석 결과는 등가정적 해석법으로 구한 결과에 비해 지진에 대한 응답을 더 정확하게 나타내준다. 따라서 계산된 밀면전단력값이 등가 정적해석 결과보다 작게되더라도 타당성이 있다고 받아들여진다. 그러나 해석모델에 포함시키지 않은 비내력벽등의 비구조재나 건축미관재등이 강성증가 효과를 일으켜서 동적해석으로 구해진 주기보다 실제로는 짧아 질수도 있

다. 따라서 실제 유발되는 지진력은 해석으로 계산된 지진력 보다 더 커질수도 있다. 또한 고려하고 있는 구조물의 감쇠율이 동적해석에 사용되는 스펙트럼에서 기준으로 한 감쇠율보다 작으면 같은 주기에서도 사용된 스펙트럼 값보다 더 큰 가속도 응답을 갖게되고 따라서 더 큰 지진력을 유발하게된다. 예컨대 UBC-88 동적해석용 스펙트럼은 5%의 감쇠율을 기준으로 작성되었으나 실제 구조물은 5%보다 낮은 감쇠율을 가질 수 있다. 뿐만 아니라 고려하고 있는 지반에서의 실제지진에 의한 가속도 스펙트럼이 동적해석에 사용하고 있는 단순화시킨 이론적 스펙트럼보다 더 크게 나타날 수도 있다. 그리고 동적해석으로 구해진 모드별 결과를 조합하는 방법에서도 오차를 유발할 수 있다. 예컨대 SRSS방법으로 조합할 경우 진동모드가 서로 상당히 비슷한 진동주기를 가질경우 많은 오차를 내포하게 되어 구조물의 실제거동을 과소평가 할 수도 있다. 이러한 여러가지 이유로 인해 부재설계를 위한 최종설계값은 2.1항의 동적해석으로 구해진 값을 그대로 사용하지 않고 등가정적 해석법으로 구한 밀면전단력과 동적해석으로 구해진 조합된 밀면전단력을 비교하여 조정비율을 결정한 후 이 조정비율을 밀면전단력, 지진하중, 부재력, 횡변위 등의 모든 조합된 결과에 곱하여 최종 결정한다. 이 조정방법은 ATC3-06의 방법과 UBC-88의 방법이 서로 다르기 때문에 같은 설계 스펙트럼을 사용하더라도 최종 설계값이 달리 산정될 수 있다.

ATC3-06 기준에서는 동적해석으로 구해진 조합된 밀면전단력( $V_t$ )이 등가정적 해석방법 적용시 구해지는 진동주기( $T$ )를 40%증가시킨 수정된 주기( $T_a=1.4T$ )를 이용하여 등가정적 해석법으로 구한 수정된 밀면전단력( $V_s$ )과 비교하여  $V_t$ 가  $V_s$ 보다 작은 경우에는 조정비율  $V_t/V_s$ 를 밀면전단력을 포함한 모든계산결과 (전단력, 지진하중, 전도모멘트, 변위, 부재력등)에 곱해서 최종설계값을 산정하도록 규정하고 있다. 정적해석법의 진동주기를 40%증가시킨 값으로 제한한 배경은 비구조재등의 강성 증가효과를 감안하여 동적해석에서 너무 긴 진동주기를 사용함으로써 인해 지진력이 실제보다 작게 계산되는것을 방지해 주기위한 의도이다. 그림 1에는 한국의 정적해석용 스펙트럼 주기를 1.4 배로 수정한 주기( $T_a$ )를 기준으로한 수정 스펙트럼도 함께 보여주고 있는데 여기서 알수 있는 바와같이 이  $T_a$ 로 구해진 스펙트럼값은 원래 스펙트럼값보다 항상 작으므로 수정된 밀면전단력 $V_s$ 는 원래 주기로 구한 밀면전단력  $V$ 보다는 항상 더 작은값이 된다. 따라서 ATC방법을 준용하면 동적해석으로 구한 밀면전단력을 상향 수정한 최종 설계 밀면전단력은 정적해석으로 구한 밀면전단력 보다 늘 항상 작게된다.

한편 UBC-88 기준에는 등가정적 해석과 비교를

위해 진동주기를 증가시켜 계산한 값( $V_s$ )를 사용하지 않고 원래 주기로 구한 밀면전단력  $V$ 를 이용하도록 규정하고 있다. UBC에서는 동적해석으로 구해진  $V_t$ 가  $V$ 보다 작으면 비정형 구조물일 경우에는  $V$ 의 100%로 정형 구조물일 경우에는  $V$ 의 90%(주기계산시 Raileigh 방법을 사용하지 않고 근사공식을 사용할 시  $V$ 의 80% 까지도 허용)로 밀면전단력을 조정하도록 하고있다. 따라서 모든 계산 결과도 같은 조정비율로 수정하여 최종설계값을 산정하도록 규정하고 있다.

이상에서는 동적해석법으로 구한 밀면전단력이 등가정적 해석법으로 구한 값보다 작은 경우를 언급하였다. 그러나 ATC나 UBC기준에서는 모두 동적해석법으로 구해진 밀면전단력( $V_t$ )은 등가정적 해석법의 원래 진동주기를 사용하여 구한 밀면전단력( $V$ )보다 클 필요는 없다고 규정하고 있다. 이러한 경우에는 동적해석으로 구해진 밀면전단력을 등가 정적 해석법으로 구해진 밀면전단력으로 하향 조정하여도 좋을것이다. 따라서 최종 설계값은 이 하향 조정비율을 동적해석으로 얻어진 모든 계산결과에 곱하여 구하면 된다.

### 3. 내진설계 결과비교

#### 3.1 설계 기준별 밀면전단력

앞절에서도 언급하였듯이 동적해석법의 결과는 사용하는 설계 스펙트럼에 따라 차이가 난다. 여기서는 한국의 정적해석용 스펙트럼, UBC동적해석용 스펙트럼, UBC 스펙트럼을 수정하여 한국의 동적해석에 적용하도록 제안한 동적해석용 스펙트럼을 이용하여 밀면전단력들을 구하였고 그 결과를 비교 검토하였다. 비교를 위해서 사용된 건물은 2차원 철골 모멘트 연성골조(A형골조), 철근 콘크리트 모멘트 연성골조(B형골조), 철골 브레이스 골조(C형골조)의 3가지 형태를 택하였다. 이들 3가지형태의 골조에 대해 저층 구조물 에서부터 고층 구조물에 대한 내진해석 결과를 분석하기 위하여 각각 5층형, 10층형, 15층형, 20층형, 30층형 모델을 선정하였다. 그림 6과 그림 7에는 이들 모델중 5층형, 15층형, 30층형을 보여주고 있고, 표 2에는 해석모델의 층량과 선별된 부재의 첫수를 보여주고 있다.

동적해석은 ETABS<sup>(5)</sup> 프로그램을 이용하여 수행하였고 표 3에는 각 모델별 자유진동 해석 결과 계산된 5개모드의 진동주기를 보여주고 있다. 표 4에는 식(6)을 이용하여 구한 각 모드별 유효층량을 보여주고 있다. 이 표에서 알 수 있는 바와같이 고층으로 갈수록 제1모드의 기여도가 점차줄고 고차모드의 영향이 커짐을 알 수 있다. 이러한 효과는 브레이스 골조형보다 상대적으로 유연도가 큰 모멘트 연성 골조형에서 더 커짐을 알 수

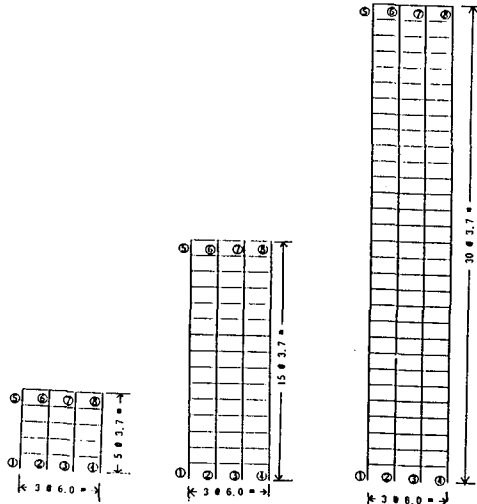


그림 6. 모멘트 연성골조형의 5층, 15층, 30층형 해석모델

표2. 해석모델의 층량 및 부재치수

구분	층량(톤)	기둥										보		표면이스			
		층간	층상	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
철골모멘트연성골조	5층형   214.4	최상층	H344X174   H350X175	H344X174   H350X175	H444X199   H390X199												
	15층형   844.4	기타층	H390X200   H350X250	H344X174   H350X175	H444X199   H390X199												
	30층형   1292.4	기타층	H428X407   H348X417	H344X174   H350X175	H444X199   H390X199												
R/C 모멘트연성골조	5층형   284.4	최상층	□30X50   □30X55	□30X50   □30X55	□30X50   □30X50												
	15층형   860.4	기타층	□40X70   □40X75	□30X50   □30X55	□30X50   □30X50												
	30층형   1724.4	기타층	□60X100   □60X105	□30X50   □30X55	□30X50   □30X50												
철골브레이스골조	5층형   214.4	최상층	H344X174   H350X175	H344X174   H350X175	H444X199   H390X199	H200X150											
	15층형   844.4	기타층	H390X200   H350X250	H344X174   H350X175	H444X199   H390X199	H200X150											
	30층형   1292.4	기타층	H428X407   H348X417	H344X174   H350X175	H444X199   H390X199	H200X150											

표4. 해석 모델별 유효중량 (Wm, 톤)

구분	층량	모드					계
		모드 1	모드 2	모드 3	모드 4	모드 5	
철골모멘트연성골조	5층형	212.4 (100%)	178.86 (84.68%)	21.22 (9.99%)	7.37 (3.47%)	3.10 (1.46%)	214.4 (100%)
	10층형	428.4 (100%)	323.42 (77.83%)	54.49 (12.72%)	15.28 (3.59%)	9.73 (2.27%)	418.55 (97.7%)
	15층형	544.4 (100%)	478.02 (74.18%)	85.77 (13.11%)	31.77 (4.93%)	12.60 (2.11%)	618.7 (96.01%)
	20층형	860.4 (100%)	618.54 (71.89%)	122.87 (14.28%)	41.56 (4.83%)	22.15 (2.59%)	818.85 (95.17%)
	30층형	1292.4 (100%)	859.19 (66.48%)	205.23 (15.88%)	72.28 (5.67%)	39.94 (3.09%)	1204.26 (93.18%)
R/C 모멘트연성골조	5층형	288.4 (100%)	228.50 (83.68%)	29.15 (10.25%)	10.72 (3.77%)	4.69 (1.55%)	288.4 (100%)
	10층형	572.4 (100%)	451.57 (78.89%)	64.40 (11.25%)	20.78 (3.63%)	12.94 (2.25%)	556.85 (97.28%)
	15층형	860.4 (100%)	663.11 (77.07%)	96.80 (11.25%)	35.45 (4.12%)	16.59 (1.94%)	823.67 (95.73%)
	20층형	1148.4 (100%)	872.33 (75.96%)	133.44 (11.62%)	45.32 (3.95%)	24.32 (2.12%)	1089.84 (95.29%)
	30층형	1724.4 (100%)	1280.88 (74.28%)	212.79 (12.34%)	67.54 (3.92%)	35.52 (2.06%)	1619.72 (93.93%)
철골브레이스골조	5층형	214.4 (100%)	165.80 (77.33%)	37.89 (17.67%)	7.93 (3.7%)	2.32 (1.08%)	214.4 (100%)
	10층형	428.4 (100%)	296.50 (69.21%)	80.07 (18.69%)	25.96 (6.06%)	12.81 (2.99%)	420.7 (98.2%)
	15층형	644.4 (100%)	425.37 (66.01%)	115.93 (17.99%)	45.17 (7.01%)	22.72 (3.53%)	622.08 (96.38%)
	20층형	860.4 (100%)	557.80 (64.83%)	150.83 (17.53%)	60.92 (7.08%)	32.27 (3.75%)	819.63 (95.26%)
	30층형	1292.4 (100%)	798.57 (61.79%)	225.40 (17.44%)	95.50 (7.42%)	52.47 (4.06%)	1203.75 (93.14%)

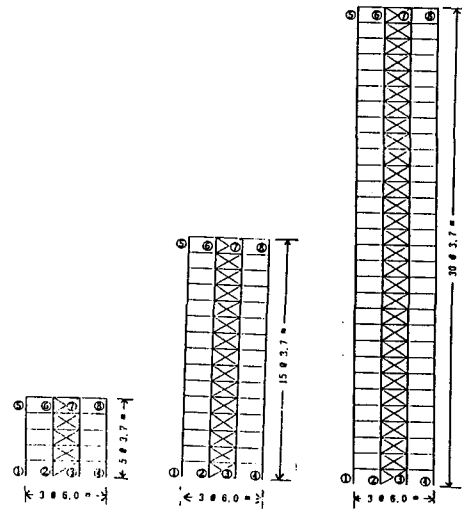


그림 7. 브레이스 골조형의 5층, 15층, 30층형 해석모델

표3. 해석 모델별 진동주기 (T, 초)

구분	층형	모드				
		모드 1	모드 2	모드 3	모드 4	모드 5
철골모멘트연성골조	5층형	1.233	0.407	0.241	0.173	0.142
	10층형	2.071	0.744	0.434	0.303	0.234
	15층형	2.890	1.044	0.613	0.434	0.328
	20층형	3.579	1.296	0.761	0.532	0.416
	30층형	4.722	1.689	0.985	0.700	0.535
R/C 모멘트연성골조	5층형	0.879	0.284	0.162	0.113	0.092
	10층형	1.618	0.549	0.313	0.256	0.162
	15층형	2.340	0.800	0.459	0.317	0.240
	20층형	3.071	1.048	0.601	0.415	0.314
	30층형	4.554	1.545	0.873	0.608	0.460
철골브레이스골조	5층형	0.508	0.147	0.079	0.058	0.050
	10층형	1.094	0.303	0.150	0.099	0.075
	15층형	1.690	0.476	0.229	0.145	0.105
	20층형	2.288	0.655	0.314	0.195	0.139
	30층형	3.420	0.981	0.481	0.296	0.206

다.

표 5에는 각 모델에 대하여 정적해석으로 구한 밀면전단력과 식(5)를 이용하여 구한 모드별 밀면전단력을 SRSS방법으로 조합한 동적해석 결과를 보여주고 있다. 정적해석 결과는 한국기준을 사용한 것이고 동적해석에 사용한 스펙트럼은 지반종별 2에 대한 한국 정적 해석용 스펙트럼, 제안한 한국 동적해석용 스펙트럼 및 UBC 동적해석용 스펙트럼을 사용하였다. 가속도 스펙트럼 값은 표준화된 스펙트럼 값에 AI/R 값을 곱한 값을 사용하였다. 지역계수 A는 지진구역 2를 기준으로 0.12g를 사용하였고 중요도 계수는 I = 1.0로 하였다.

표5. 해석모델별 밀면전단력 (톤)

구분		KOR(ST)	KOR(DY-1)	KOR(DY-2)	UBC(DY)
철골모멘트 연성골조	5층형	4.879	3.319	4.342	4.419
	10층형	7.587	4.842	5.126	5.262
	15층형	9.803	5.949	5.548	5.678
	20층형	11.751	6.992	6.020	6.133
	30층형	15.161	8.725	6.968	7.096
R/C 모멘트 연성골조	5층형	9.330	6.246	9.618	9.711
	10층형	14.480	8.837	10.222	10.644
	15층형	18.695	10.830	10.885	11.093
	20층형	22.401	12.477	11.157	11.373
	30층형	28.892	15.141	11.468	11.594
철골브레이스 골조	5층형	11.6363	8.236	10.129	14.453
	10층형	16.441	10.893	14.405	15.290
	15층형	20.192	12.880	14.622	16.513
	20층형	23.349	14.673	15.330	17.739
	30층형	28.636	17.629	17.644	18.947

\* KOR(ST) : 등가정적 해석 (한국기준)  
 \* KOR(DY-1) : 동적해석 (정적해석용 스펙트럼 이용)  
 \* KOR(DY-2) : 동적해석 (제안된 한국동적해석 스펙트럼 이용)  
 \* UBC(DY) : 동적해석 (UBC-88 동적해석 스펙트럼 이용)

반응 수정 계수는 철골 모멘트 연성골조는 R = 6.0, 철근 콘크리트 모멘트 연성골조는 R = 5.0로 철골 브레이스 골조는 R = 3.5를 사용하였다.

그림 8 에는 철골 모멘트 연성골조형에 대해 5층형, 10층형, 15층형, 20층형, 30층형 모델에 대한 밀면전단력 결과(지반종별 2)들을 도시하여 놓았다. 이 그림에는 한국기준과 UBC기준의 등가정적 해석법으로 구한 정적해석 결과와 한국 정적해석 스펙트럼, 제안한 한국 동적해석 스펙트럼 및 UBC 동적해석 스펙트럼을 이용하여 구한 동적해석 결과도 동시에 도시하여 결과를 서로 비교하여 볼 수 있도록 하였다. 이 그림에서 보면 한국 정적해석 스펙트럼을 사용한 밀면전단력값은 중·저층(13층형 정도)에서는 UBC 동적 스펙트럼으로 구한 결과보다 작게 나오나 그 이상의 고층으로 갈수록 UBC스펙트럼을 이용한 결과보다 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 그림 1 의 설계 스펙트럼에서 알 수 있는 바와같이 한국의 정적해석 스펙트럼은 장주기 부분에서 UBC 동적해석 스펙트럼보다 더 큰값을 갖게되는 것에서 기인한다. 동적해석이 고층건물에 많이 적용된다는 점과 한국의 지진위험도가 상대적으로 낮은 점을 감안해 본다면 이결과는 매우 바람직스럽지 못한 것으로 간주된다. 이러한 결과에 대해 저자들은 한국의 내진설계 결과가 적어도 UBC스펙트럼을 적용한 값보다는 적게 산정되는 것이 바람직할 것으로 생각되었다. 따라서 UBC 동

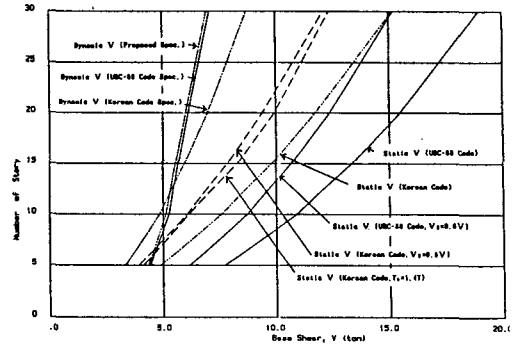


그림 8. 모멘트 연성골조의 밀면전단력 비교

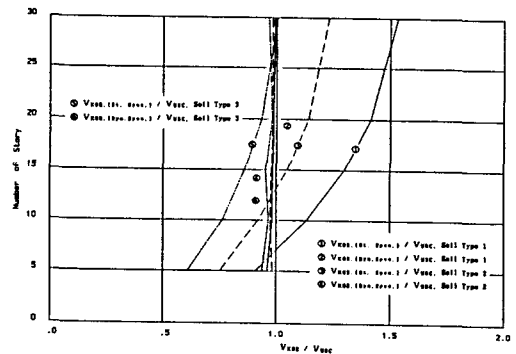


그림 9. 동적해석에 의한 지반종별 밀면전단력 결과비교 (철골모멘트 연성골조)

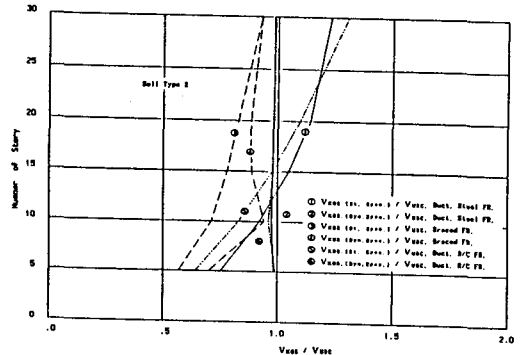


그림 10. 동적해석에 의한 구조물형태별 밀면전단력 결과비교 (지반종별 2)

적해석용 스펙트럼을 수정하여 한국의 동적해석에 적용하는 것이 이 문제를 해결하는 하나의 방안이 될것으로 생각되었다. 이러한 생각을 바탕으로 3 가지 지반에 대해 UBC 동적해석용 스펙트럼의 단주기 부분을 현행 한국의 정적해석 스펙트럼과 같은 수준으로 낮추고 나머지 부분은 UBC 스펙트럼을 그대로 이용하는 한국의 동적해석용 스펙트럼을 제안하게 되었다. 이 제안된 스펙트럼은 각 지반종별로 그림 3, 그림 4, 그림 5 에서 보여주었다. 지반종별 2에 대해 이 스펙트럼을 이용하여

해석된 결과가 그림 8에서 함께 보여지고 있는데 예상한대로 저층형에서 고층형까지 모두 UBC 스펙트럼을 적용한 경우보다는 작게 나옴을 알 수 있어서 바람직한 결과를 얻었다. 이 그림에는 최종설계값 산정에 필요한 동적해석 결과의 조정비율을 구하는데 필요한 수정된 정적해석 밀면전단력( $V_s$ )값들도 도시하여 놓았으며 이 조정에 대한 자세한 사항은 3.2 항에서 기술하기로 한다.

그림 8 에는 지반종별 2에 대해서 분석하였으나, 동적해석결과를 각종 지반종별로 비교하기 위하여 각 지반종별에 따르는 스펙트럼값을 적용하여 철골 모멘트 골조의 각 층형별 밀면전단력값을 산정하였다. 그림 9에는 한국의 정적해석 스펙트럼과 제안된 동적해석 스펙트럼을 이용하여 구한 밀면전단력 값들을 UBC 동적해석 스펙트럼을 이용하여 구한 밀면전단력값들로 나눈 비율을 도시하였다. 여기서 비율이 1.0 보다 크면 한국 스펙트럼을 이용한 값이 UBC 스펙트럼을 이용한 값보다 크다는 것을 나타낸다. 이 그림에서 지반종별 1에 대한 비교를 보면 정적 스펙트럼을 사용할 경우 7층보다 낮은 층형에서는 UBC 스펙트럼 결과보다 적으나 그 이상의 고층에서는 훨씬 더 큰 밀면전단력(30층형에서는 1.53배)이 계산된다. 반면에 제시한 동적해석 스펙트럼을 사용한 경우에는 항상 UBC 스펙트럼을 이용하는 경우보다 적다. 지반종별 2에 대해서는 그림 8에서 나온 값으로 그려 볼 수 있고 13층 정도보다 높은 고층에서는 정적 스펙트럼 사용시에는 역시 UBC 값보다 커져서 30층에서는 1.23배 정도가 된다. 지반종별 3에 대해서는 중·저층에서는 정적 스펙트럼을 사용한 값이 UBC 값보다 훨씬 적고 이 경우는 25층이상의 고층인 경우에 UBC 값보다 커짐을 알 수 있다. 이 커브들의 결과를 종합하여 보면 단단한 지반일수록 고층에서 한국정적스펙트럼을 사용한 결과가 UBC 스펙트럼을 사용한 결과보다 커진다는 사실을 알 수 있으며 제시한 한국 동적스펙트럼을 사용하면 저층형에서 고층형에 이르기까지 어느 지반이나 일률적으로 UBC 동적 해석 스펙트럼을 사용한 경우보다 적게 나옴을 알 수 있다.

그림 10에는 지반종별 2에서 구조물 형태별로 그림 9와 유사한 결과를 도시하고 있는데 철골 모멘트 연성골조형과 철골 브레이스 골조형 및 철근 콘크리트 모멘트 연성골조에 대해서 비교한 결과들이다. 여기서 알 수 있듯이 모멘트 연성골조형은 철골이나 콘크리트 모두 한국 정적스펙트럼을 이용한 결과가 고층에서는 UBC 스펙트럼을 이용한 결과보다 커지지만 횡방향 강성이 큰 브레이스 골조는 고층이라도 UBC 스펙트럼이용 결과보다 작게 나온다. 따라서 강성이 큰 경우에는 제시된 동적 스펙트럼을 이용하면 고층이라도 정적 해석용 스펙트럼 사용시보다는 밀면전단력이 크게 계산되나 역시 UBC 동적 해석용 스펙트럼 사용시 보다는 항

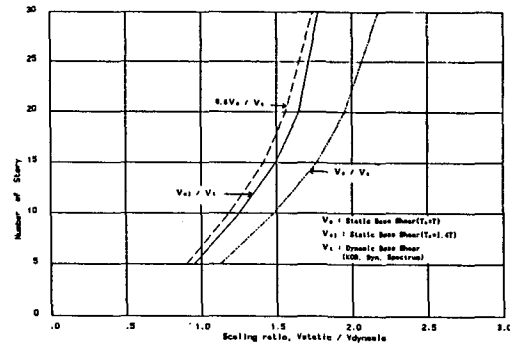


그림 11. 철골모멘트 연성골조의 설계밀면전단력을 위한 조정비율비교

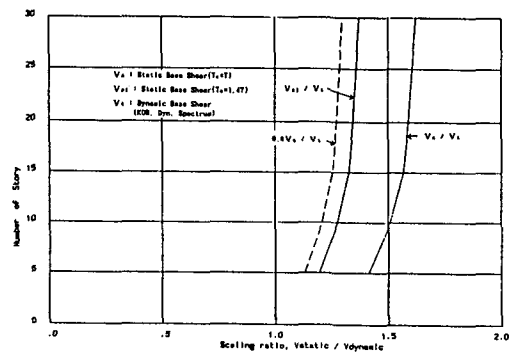


그림 12. 철골브레이스 골조의 설계밀면전단력을 위한 조정비율비교

상 적게 계산됨을 알 수 있다.

### 3.2 설계값 결정을 위한 조정비율 비교

2.3 항에서 기술했듯이 최종설계값은 동적해석으로 계산한 결과를 그대로 사용하지 않고 정적해석 결과와 비교하여 적절한 조정비율을 곱하여 결정한다. 조정하는 방법을 ATC 기준을 따를 것인지 UBC 기준을 따를 것인지 아니면 새로운 기준을 마련할 것인지는 앞으로 연구되어야 할 과제이다. 그림 8에는 조정의 기준이 될 정적 해석결과를 동적 해석결과와 함께 도시해 놓아 밀면전단력이 어느만큼 조정될 수 있는 지를 보여주고 있다. 조정비율이 구조형태별로 층형에 따라 어떻게 변화하는지 알아보기 위하여 지반종별 2에 대해 분석해보았는데 그 비교 결과가 그림 11 과 그림 12에 나와 있다. 그림 11에는 철골모멘트 연성골조에 대해 제시한 동적스펙트럼을 이용하여 얻은 결과를 ATC 방법으로 주기를 증가시켜 1.4T를 기준으로 하여 한국기준을 적용한 정적해석 밀면전단력과 UBC 방법을 준용하여 원래 주기로 계산된 한국기준을 적용한 밀면전단력을 각각 100% 및 80% 한 결과로 조정했을 경우 그 조정비율을 층형별로 도

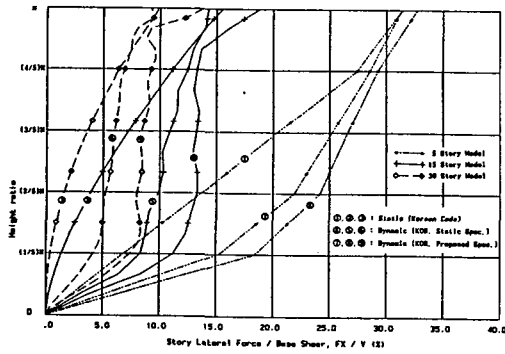


그림 13. 철골모멘트 연성골조의 층지진하중 분포비교

표 6. 30층형 철골 모멘트 연성골조의 층지진하중 (FX, 른)

높이 비	FX(ST)	FX(DY-1)	FX(DY-2)
H (30층)	1.402	0.860	0.964
(4/5)H (24층)	0.961	0.600	0.644
(3/5)H (18층)	0.551	0.522	0.582
(2/5)H (12층)	0.245	0.455	0.555
(1/5)H (6층)	0.061	0.366	0.517
밀면전단력	15.161	8.725	6.968

시해 놓고 있다. 이 그림에서 알수 있듯이 ATC의 1.4T 방법과 UBC 방법의 80%는 큰 차이가 없음을 알수 있다. 다만 UBC일 경우 비정형 구조물에 대해서는 80%가 아닌 100%를 적용하므로 큰 차이가 날수 있다. 그림에서 보면 80% 기준으로 볼때 5층형에서는 0.9배, 30층에서는 1.74배가 조정됨을 알수 있어 고층으로 갈수록 조정비율이 큰폭으로 높아짐을 알수 있다. 그림 12에는 브레이스 골조에 대한 비교결과를 보여주고 있는데 5층형에서는 1.13배, 30층형에서는 1.3배로 조정비율의 변화는 횡방향 강성이 큰 브레이스 골조에서는 큰 차이가 없음을 알수 있다.

설계값 결정을 위하여 조정의 기준이 되는 정적해석 밀면전단력이 설정되면(예를 들어 1.4T 를 사용한 밀면전단력값등) 동적해석값은 어느 스펙트럼을 사용하든간에 설정된 같은 기준으로 조정되어 동일한 밀면전단력값을 갖게된다. 이렇게 조정한다면 언뜻 생각하기에는 스펙트럼을 어떤것을 사용하든지간에 관계없이 같은 설계값으로 조정된다고 생각될수도 있다. 그러나 조합된 밀면전단력 값이 같다고 하더라도 사용한 스펙트럼이 다르면 모드별 밀면전단력값이 틀리므로 층지진하중의 설

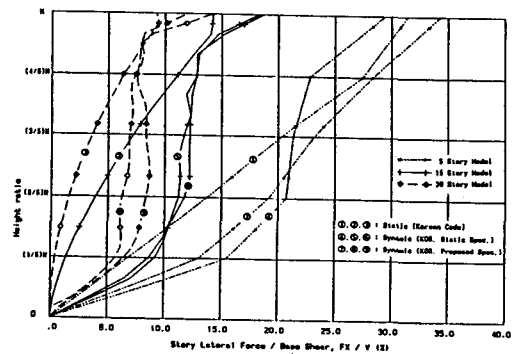


그림 14. 철골브레이스골조의 층지진하중 분포비교

계값들이 다르게 계산된다. 따라서 이 층지진 하중을 횡력으로 작용시켜 정적해석하여 조합한 설계부재력도 서로 다르게 된다.

### 3.3 층지진 하중 분포 비교

각 모드별 층지진 하중은 식(7)을 이용하여 구할 수 있고 이들을 SRSS 방법등으로 조합하여 조합된 층지진 하중을 구할 수 있다. 정적해석과 동적해석으로 구해진 층지진 하중의 분포를 분석해보면 동적해석의 필요성을 더욱 잘 이해할 수 있게 된다. 표 6에는 지반종별 2에 대해 30층형 철골모멘트 연성골조의 층지진 하중을 높이 비율로 계산한 결과를 보여주고 있다. 이 표에는 등가정적 해석 방법의 공식을 이용해서 구한 값과 함께 한국 정적해석용 스펙트럼 및 제시한 동적해석용 스펙트럼을 이용하여 구한 조합된 층지진하중을 수록하였다. 그림 13에는 이 표에 있는 30층형 뿐만 아니라 15층형 및 5층형에 대해서 층지진 하중을 밀면전단력으로 나눈 값을 높이비에 따라 도시 하였다. 이 그림에서 커브①, ②, ③은 등가정적 해석 방법, 커브④, ⑤, ⑥은 정적 스펙트럼을 이용한 동적해석 방법, 커브⑦, ⑧, ⑨는 제시한 동적해석 스펙트럼을 이용한 동적해석 방법으로 구한 값들이다. 이 그림에서 알수 있듯이 고층형일수록 동적해석으로 구한 층지진 하중의 분포가 등가정적 해석법으로 구한 값의 분포와 상당히 큰 차이가 남을 알수 있다. 예를 들어 층고의 2/5 높이에서 정적해석 대 동적해석 결과(동적 스펙트럼 이용)를 보면 5층형은 1.6, 30층형은 5.0이 됨을 알수 있다. 동적해석인 경우에도 정적해석용 스펙트럼을 사용하는 경우와 동적해석용 스펙트럼을 사용하는 경우가 층고가 높을수록 큰 차이가 남을 알수 있다. 최종 설계값을 위하여 조정을 할 경우라도 이 분포 형태는 변하지 않으므로 동적해석에 어떠한 스펙트럼을 사용하는 가에 따라 큰 차이가 남을 알수 있다. 그림 14에는 지반종별 2에



대해 철골 브레이스 골조의 층지진 하중 분포를 도시하고 있다. 이 경우에도 고층일수록 동적 해석결과와 정적해석결과가 크게 차이가 남을 알 수 있다.

#### 4. 결론

현행 한국의 내진설계 기준에는 등가정적 해석법을 이용하도록 규정하고 있어 중요 구조물이나 고층건물에 대한 동적해석을 이용한 내진설계는 UBC-88 기준이나 ATC3-06 기준을 준용할 수 밖에 없다. 본 연구에서는 이러한 두가지 기준을 적용하여 5층형, 10층형, 15층형, 20층형, 30층형의 철골 및 철근 콘크리트 모멘트 연성골조형과 철골 브레이스 골조형에 대해 동적해석으로 구해진 내진설계 결과를 비교 분석하여 UBC 동적해석용 스펙트럼을 수정한 한국의 동적해석용 스펙트럼을 제안하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) ATC3-06 기준을 준용하여 한국의 등가정적 해석법에 이용되고 있는 정적해석용 스펙트럼을 적용하여 동적해석으로 구한 밀면전단력은 UBC-88 기준의 동적해석용 스펙트럼을 이용하여 구한 밀면전단력보다 고층으로 갈수록 더 커지는 결과를 초래하였다. 이 현상은 단단한 지반일수록 더욱 큰 차이가 남을 알 수 있었다. 이러한 결과에서 볼때 상대적으로 약한 한반도 지진을 고려하여 스펙트럼을 다소 수정할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

2) 이와같은 분석결과를 바탕으로 UBC-88 기준의 동적해석용 스펙트럼의 단주기 부분을 한국의 정적해석용 스펙트럼 기준에 맞추어 가속도를 낮춘 새로운 동적해석용 스펙트럼을 세가지 지반종별에 대해 제안하였다.

3) 제안된 스펙트럼을 사용한 동적해석 결과는 UBC동적해석용 스펙트럼을 이용한 결과보다 저층에서 고층에 이르기까지 지반종별과 구조물형태에 구분없이 항상 작은 밀면전단력값이 산정되어 바람직한 설계 스펙트럼으로 평가되었다.

4) 최종설계값 산정을 위한 동적해석 결과의 수정방법에 대하여도 분석하였으며 제안된 스펙트럼을 사용한 경우 조정비율이 층형별로 어떻게 변하는가를 몇가지 기준에 대해 비교 분석해 보았다.

5) 한국의 등가정적 해석법으로 구한 층지진 하중의 분포와 제안된 스펙트럼과 정적해석용 스펙트럼을 이용하여 동적해석법으로 구한 층지진 하중 분포를 구조물형태별과 층별로 분석해본 결과 고층형인 경우 서로 많은 차이가 남을 알 수 있어 동적해석의 필요성을 잘 보여주었다.

#### 참고문헌

1. 건설부, 건축물의 구조기준등에 관한 규칙, 1988.1
2. International Conference of Building Officials, Uniform Building Code (UBC), 1988, Whittier, CA.
3. Applied Technology Council, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, ATC 3-06, Government Printing Office, 1978, Washington, DC.
4. Structural Engineering Association of California [SEAOC], Recommended Lateral Force Requirements and Tentative Commentary, 1990, Sanfrancisco, CA.
5. Computers and Structures Inc., ETABS - Enhanced Three - Dimensional Analysis of Building Systems, 1990, Berkeley, CA.
6. Paz, M., Structural Dynamics - Theory and Computation, Van Nostrand Reinhold, 1991, New York
7. Clough, R.W. and Penzien, J. Dynamics of Structures, Mc Grawhill, 1975, New York