

초고층 건축물의 내진설계



김종호 >
(사)한국건축구조기술사회 회장
(주)창민우 구조 컨설턴트 대표이사

해당 하기 때문에 장주기 영역에 해당하는 구조물과
는 공진을 일으키지 않기 때문이며 이로 인해 지진
하중에 의해 구조물에 전달되는 외력은 풍하중에 의
해 전달되는 외력보다 훨씬 작게 평가된다.

하지만 새로이 개정된 KBC2005는 연약 지반에

1. 서론

20세기 초, New York과 Chicago를 중심으로
활발하게 진행되었던 초고층 건축물은 주로 사무소
용도에서 최근 건설된 진마오 타워(421m)처럼 호텔
과 사무소가 결합된 복합용도 건물로 변화하고 있으
며 현재 시공 중인 세계 최고높이의 Burj Dubai
(705m) 또한 사무소, 호텔, 주거의 복합공간으로 구
성되어 있다는 점은 이러한 초고층 건축물의 변화추
세를 잘 보여주고 있다.

국내의 초고층 건축물도 사무소 용도의 초고층 건
축물 보다는 건대 The # Star City(195m), 화성 동
탄 복합단지 Metapolis(256.9m), 목동 하이페리온
(256m)처럼 주거용도가 부각된 초고층 주거용도건
물이 많이 건설되고 있는 실정이다.

이러한 초고층 건축물은 일반적으로 장주기 구조
물에 해당하며 지진에 의한 구조물의 가속도는 감소
하게 된다. 이는 지반 진동의 주기는 단주기 영역에



그림 1. 건대 The # Star City

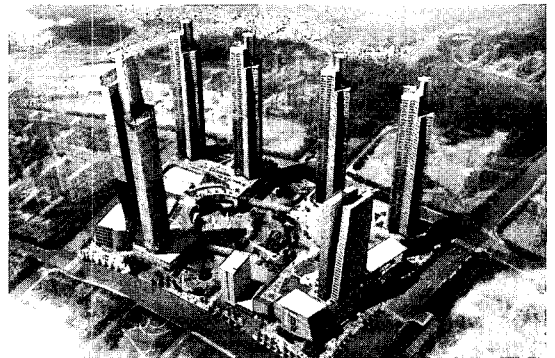


그림 2. 화성 동탄 복합단지 Metapolis

대한 지진하중이 크게 증가되어 일반적으로 연약 지반에 위치한 초고층 구조물의 경우, 풍하중보다 지진하중이 훨씬 크게 평가되기도 하며, 특히 주거용 건물인 경우에는 상대적으로 건물의 밀도가 높으므로 60~70층 규모인 경우에도 지진하중이 풍하중보다 크게 평가되는 경우도 있다.

또한 강릉 지역에 리히터 규모 4.8의 지진이 발생하였을 뿐만 아니라 90년도 이후 한반도 주변의 빈번한 지진발생으로 인하여 건축 구조물의 내진 설계에 대해서 많은 관심이 더욱 고조되고 있다.

그래서 개정된 KBC 2005 기준안에 따른 초고층 건축물의 내진 설계에 대해서 소개하고자 한다.

2. 지진하중 - AIK200과 KBC 2005

내진설계기준은 지진으로 인한 건축물의 손상 또는 붕괴로부터 인명과 재산을 보호하기 위해서 규정하는 최소한의 구조설계 요건을 말한다.

국내의 내진설계 기준은 1988년에 최초로 제정되었으며, “건축물의 구조기준 등에 관한 규칙”의 제 14조 지진하중편이 국내 최초의 내진설계 기준이다.

이 기준은 ATC(Applied Technology Council)의 Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings(ATC 3-06 Report), ICBO(International Conference of Building Officials)의 Uniform Building Code(UBC)등과 같은 미국 내진설계 기준을 근간으로 작성되었으며, 2000년에 “건축물의 구조 기준 등에 관한 규칙과 건축물 하중기준 고시”(AIK2000)를 통해서 소폭의 개정 작업이 이루어졌다.

2002년에 다시 내진설계 기준 개정작업이 시작되었으며, 2005년에 제정된 “건축구조 설계 기준”(KBC2005)은 ICC(International Code Council)에 의해서 발간된 IBC(International Building Code) 2000의 내용을 상당 부분 반영한 기준이다.

간단하게 KBC2005의 중요 사항 및 AIK2000과

의 차이점을 간략하게 소개한다.

(1) 설계 지반운동

AIK2000은 50년간 10%의 초과확률(재현주기 500년)을 가진 지반운동을 설계 지반운동으로 규정하고 있으나 KBC 2005는 50년간 2%의 초과확률(재현주기 2500년)을 가진 지반운동의 2/3 수준을 설계 지반운동으로 규정하고 있다.

KBC 2005는 아직도 지역계수를 0.11로 규정하고 있지만 이는 50년간 10%의 초과확률(재현주기 500년)을 가진 지반운동에 대한 유효최대 가속도이므로 설계 스펙트럼 가속도 산정 시, M 계수(=1.33)를 적용하고 있다.

재현주기 2500년에 대한 지진위험도가 재현주기 500년에 대한 지진위험도의 2배이기 때문에 생기는 계수이다.

KBC2005의 설계 지반운동

$$\begin{aligned} &= 2500년 재현주기 지진의 2/3수준의 지반운동 \\ &= 500년 재현주기 지반운동 \times 2 \times (2/3) \\ &= 500년 재현주기 지반운동 \times 1.33(M 계수) \end{aligned}$$

(2) 지반계수 및 지반분류

구조물에 작용하는 지진하중을 구할 경우에는 설계 응답 스펙트럼에 지반계수를 곱하여 지반의 특성에 따른 증폭효과를 고려하여야 한다.

연약 지반일수록 가속도의 응답은 커지게 되는데 AIK2000은 4가지의 지반종류(지반1~지반4)에 따라서 1.0~2.0까지의 지반계수를 적용하고 있다.

KBC2005는 지반을 상부 30m에 대한 평균 지반 특성을 이용하여 $S_A \sim S_E$ 의 5가지로 구분하고 있으며 별도의 지반계수를 제시하지 않고 있으나 가속도 설계 스펙트럼(S_{DS}, S_{DI})에 지반에 따른 증폭효과를 직접 고려하고 있다.

S_{DS} : 단주기 설계 스펙트럼 가속도

S_{DI} : 주기 1초의 설계 스펙트럼 가속도

지반분류 시 상부 30m에 대한 평균 지반특성을 고려하는 방법은 IBC2000의 내용을 그대로 받아들

인 것인데 국내의 지반 특성을 고려하지 못한 것으로 이에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

또한 설계 스펙트럼의 비교에서 확인할 수 있지만 AIK2000과는 달리 KBC2005는 단주기 영역에서의 지반운동에 의한 가속도 응답을 크게 평가하고 있으며 특히 지반이 연약할수록 가속도 응답의 증폭 현상이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 장주기 구조물의 경우에는 그 증폭량이 AIK2000에 비해 작게 평가되고 있음을 확인할 수 있다.

(3) 설계 응답 스펙트럼

설계 응답 스펙트럼이란 설계 지반 운동에 의한 구조물의 최대반응을 가속도, 속도, 변위 등으로 표시한 것인데 AIK 2000 및 KBC 2005는 가속도를 이용한 설계 응답 스펙트럼을 사용하고 있다. AIK 2000의 내진설계는 허용응력 설계법에 바탕을 두고 있고 KBC 2005는 강도 설계법을 바탕으로 수정되었다. 따라서 설계 응답 스펙트럼을 비교할 경우, 강도수준(Strength Level)에서 비교하기 위해 AIK 2000의 설계 응답 스펙트럼을 1.4배 증가시켜 KBC2005의 설계 응답 스펙트럼과 비교한다.

설계 응답 스펙트럼 비교 시, 횡력 저항 시스템은 건물골조 방식으로 가정하였으며, 비교 시 사용하는 가정된 지진계수는 아래와 같다.

구분	구조 시스템	반응수정 계수(R)	중요도계수(I)
AIK2000	건물골조 (RC 전단벽)	4.5	1.5
KBC2005	건물골조 (RC 전단벽)	5	1.5

설계 스펙트럼을 살펴본 결과, AIK2000은 연약 지반일 경우, 단주기 영역의 가속도 반응을 증폭시키기 보다는 장주기 영역의 가속도 반응을 증폭시키고 있다.

KBC2005는 지반이 연약할수록 단주기 영역의 가속도 반응이 크게 증가되고 장주기 영역의 가속도 반응은 AIK2000에 비해서 작게 증폭되고 있음을

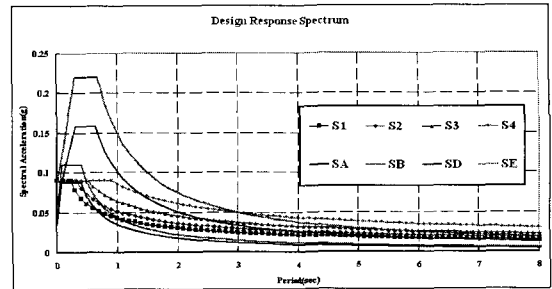


그림 3. AIK 2000과 KBC2005의 설계 스펙트럼

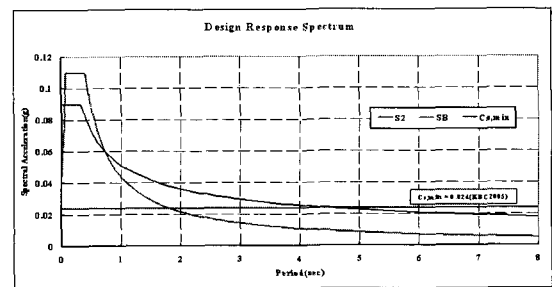


그림 4. KBC2005 최소 횡력 규정 - 암반지반

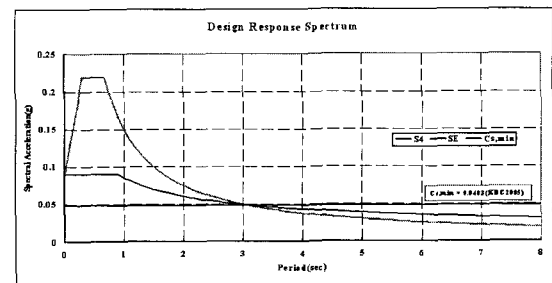


그림 5. KBC2005 최소 횡력 규정 - 연약지반

확인할 수 있다.

그림 3의 설계 스펙트럼으로부터 초고층 구조물을 설계할 경우, 과거 기준에 비해 지진하중이 작을 것이라고 판단할 수 있지만 KBC2005에서 제시하는 최소횡력 기준으로 인하여 지진하중이 과거 기준에 비해 증가할 수도 있다. (그림 4,5 참조)

그림 4에서 알 수 있듯이, AIK2000의 S1지반과 KBC2005의 SB 지반에 위치한 구조물의 응답을 비교하였을 경우, 주기가 6초에 해당하는 장주기 구조물은 KBC2005를 적용할 경우, 최소 횡력 기준으로 인하여 실제 응답보다 약 3배 이상 큰 응답에 대해서 구조물을 설계하여야 하며 AIK2000보다 다소 큰

지진하중에 대해서 구조물을 설계하여야 한다.

연약지반인 경우에도 주기가 6초에 해당하는 장주기 구조물은 KBC2005를 적용할 경우, 최소 횡력 기준으로 인하여 실제 응답보다 약 1.9배 이상 큰 응답에 대해서 구조물을 설계하여야 하며 AIK2000보다 다소 큰 지진하중에 대해서 구조물을 설계하여야 한다.

KBC2005에서 제안하고 있는 최소 횡력 기준은 대체로 장주기에 해당하는 초고층 건축물의 지진하중을 과도하게 크게 평가하고 있는데 IBC2006에서는 이런 최소 횡력 기준을 0.01로 하향조정하여 적용하고 있으므로 KBC2005도 이에 대한 보완이 필요할 것을 판단된다.


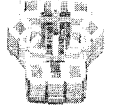

3. 초고층 건축물의 내진해석

지금까지 KBC2005와 AIK2000과의 차이점을 간략하게 설명했다.

이제 초고층 건축물의 지반종류별, 구조시스템별 해석을 통하여 초고층 건축물에 영향을 미치는 지진하중 및 풍하중을 평가한 후 비교·검토한다.

예제 모델은 당사에서 수행했던 초고층 프로젝트인 “화성 동탄 복합단지 Metapolis(지상66층, 지하4층)”이다.

3.1 고유치 해석 결과

	1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode
Mode Shape			
Period (sec)	7.30	5.80	3.66

고유치 해석결과, X 방향의 강성이 가장 작은 것으로 평가되고 있으면 비틀림의 영향은 적은 것으로 판단된다.

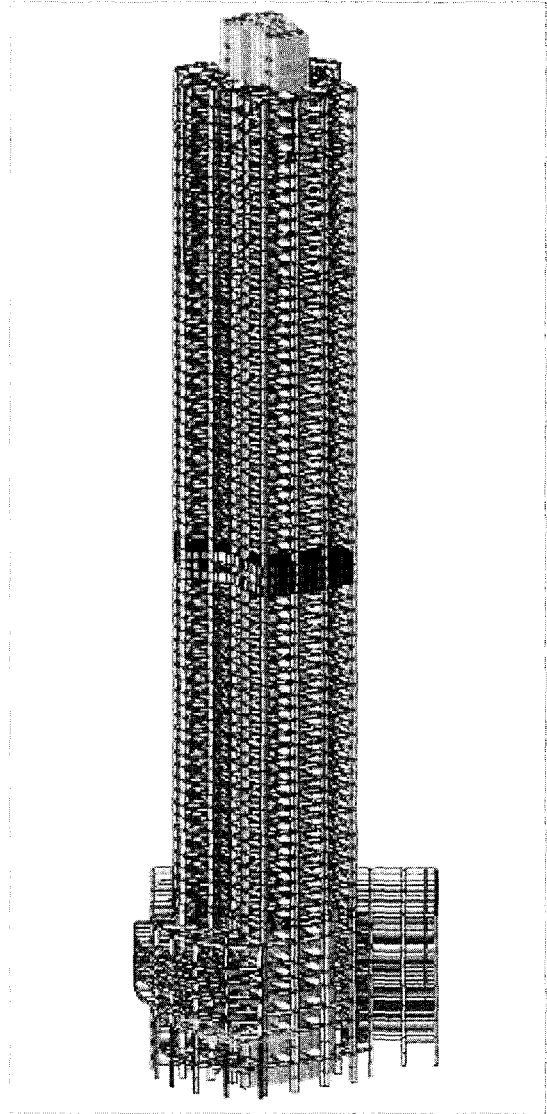


그림 6. 3D 해석 모델

3.2 기타구조 시스템에 대한 지반종류별 해석

(1) 설계조건

- 풍하중 설계 변수

구 분	설계변수
지 역	화성 동탄
설계기본풍속(V_o)	30m/sec
중요도 계수(I_w)	1.1
노풍도	B

- 지진하중 설계 변수
 - 지반종류, S_B 인 경우

구 분	설계변수
지역계수(A)	0.11
중요도 계수(I_p)	1.5
반응수정계수(R)	3.0(기타구조)
S_{DS}	0.3658
S_{D1}	0.1463

- 지반종류, S_D 인 경우

구 분	설계변수
지역계수(A)	0.11
중요도 계수(I_p)	1.5
반응수정계수(R)	3.0(기타구조)
S_{DS}	0.5267
S_{D1}	0.3365

(2) 해석 결과

- 지반종류가 S_B 인 경우

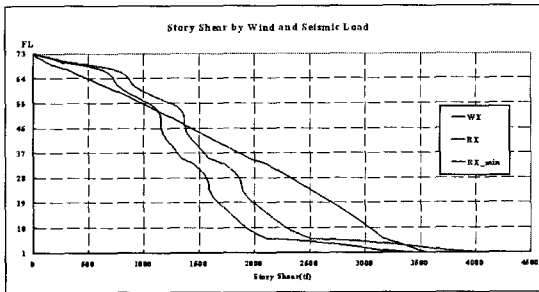


그림 7. X방향에 대한 층전단력 비교(S_B)

※ $R_{x,min}$: 최소 횡력 기준을 적용하지 않은 지진하중의 밀면전단력

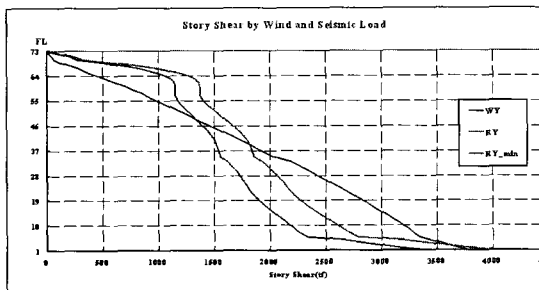


그림 8. Y 방향에 대한 층전단력 비교(S_B)

※ $R_{y,min}$: 최소 횡력 기준을 적용하지 않은 지진하중의 밀면전단력

구 분	X 방향	Y 방향
$C_{s,max}$	0.1829	0.1829
C_s	0.0203	0.0203
$C_{s,min}$	0.0241	0.0241
보정계수(SF)	1.66(1.40)	1.35(1.13)

- ※ C_s : 지진응답계수
- ※ $C_{s,max}$: 지진응답계수 상한치
- ※ $C_{s,min}$: 지진응답계수 하한치
- ※ () : 지진응답계수 하한치를 적용하지 않은 보정계수

X, Y 방향 모두 최소 횡력 기준의 적용을 받으므로 지진하중에 의한 밀면 전단력이 풍하중에 의한 밀면 전단력보다 크게 평가되고 있다.

하지만 최소 횡력 기준을 적용하지 않을 경우, 지진하중에 의한 밀면 전단력은 풍하중에 의한 밀면 전단력 보다 작게 평가되며 지진하중이 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

KBC2005의 최소 횡력 기준은 초고층 구조물의 내진설계 측면에서는 지진하중을 과도하게 평가하는 하나의 요소임을 확인할 수 있다.

- 지반종류가 S_D 인 경우

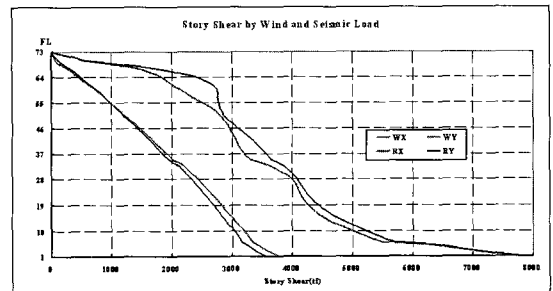


그림 9. X, Y 방향 층전단력 비교(S_D 지반)

구 분	X 방향	Y 방향
$C_{s,max}$	0.2634	0.2634
C_s	0.0466	0.0466
$C_{s,min}$	0.0348	0.0348
보정계수(SF)	1.62	1.21

- ※ C_s : 지진응답계수
- ※ $C_{s,max}$: 지진응답계수 상한치
- ※ $C_{s,min}$: 지진응답계수 하한치
- ※ () : 지진응답계수 하한치를 적용하지 않은 보정계수

초고층 건축물이 연약지반에 위치할 경우, 설계 지반 운동에 대한 가속도 응답이 크게 증폭됨으로서 X, Y 양방향 모두 지진하중에 의한 밀면 전단력이 풍하중에 의한 밀면 전단력보다 크게 평가되고 있으며 구조물의 전반적인 거동에 있어서 지진하중의 영향이 굉장히 크다.

3.3 건물골조 시스템에 대한 지반종류별 해석

(1) 설계조건

- 풍하중 설계 변수

구 분	설계변수
지 역	화성 동탄
설계기본풍속(V_o)	30m/sec
중요도 계수(I_w)	1.1
노풍도	B

- 지진하중 설계 변수
- 지반종류, S_B 인 경우

구 분	설계변수
지역계수(A)	0.11
중요도 계수(IE)	1.5
반응수정계수(R)	5.0(건물골조방식)
SDS	0.3658
SD1	0.1463

- 지반종류, S_C 인 경우

구 분	설계변수
지역계수(A)	0.11
중요도 계수(IE)	1.5
반응수정계수(R)	5.0(건물골조방식)
SDS	0.4389
SD1	0.2341

(2) 해석 결과

X, Y 방향 모두 최소 횡력 기준의 적용을 받으므로 지진하중에 의한 밀면 전단력이 풍하중에 의한 밀면 전단력보다 크게 평가되고 있다.

하지만 최소 횡력 기준을 적용하지 않을 경우에는 지진하중이 크게 감소하며 암반지반인 경우에는 풍하중이 초고층 건축물의 전반적인 거동 및 설계에

큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

KBC2005의 최소 횡력 기준은 초고층 구조물의 내진설계 측면에서는 지진하중을 과도하게 평가하는 하나의 요소임을 확인할 수 있다.

또한 반응수정계수를 크게 사용하여 구조물의 연성도를 높이는 경우에는 일반적으로 지진하중이 감소하여야하는데 KBC2005는 최소 횡력 기준으로 인하여 이러한 지진하중의 감소 현상이 없을 수도 있다.

- 지반종류가 S_B 인 경우

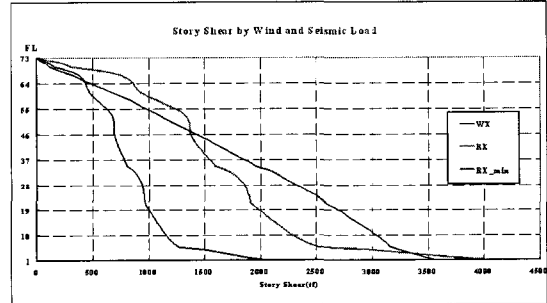


그림 10. X 방향에 대한 층전단력 비교(S_B 지반)

※ $R_{x,min}$: 최소 횡력 기준을 적용하지 않은 지진하중의 밀면전단력

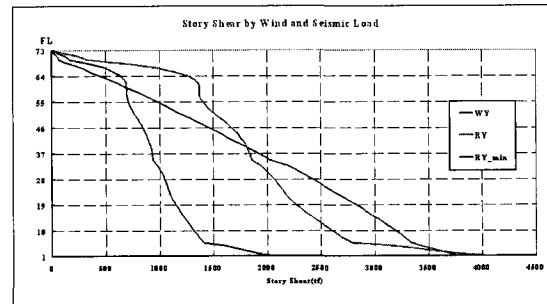


그림 11. Y 방향에 대한 층전단력 비교(S_B 지반)

※ $R_{y,min}$: 최소 횡력 기준을 적용하지 않은 지진하중의 밀면전단력

구 분	X 방향	Y 방향
$C_{s,max}$	0.1097	0.1097
C_s	0.0122	0.0122
$C_{s,min}$	0.0241	0.0241
보정계수(SF)	2.77(1.40)	2.25(1.14)

※ C_s : 지진응답계수

※ $C_{s,max}$: 지진응답계수 상한치

※ $C_{s,min}$: 지진응답계수 하한치

※ () : 지진응답계수 하한치를 적용하지 않은 보정계수

• 지반종류가 S_c 인 경우

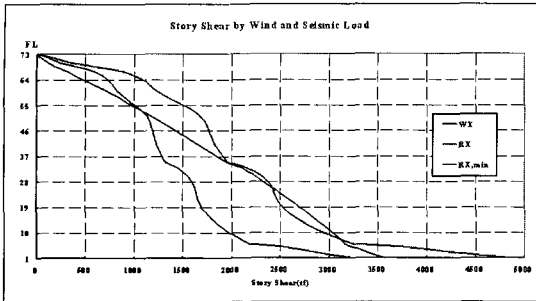


그림 12. X 방향에 대한 층전단력 비교(S_c 지반)

※ $R_{x,min}$: 최소 횡력 기준을 적용하지 않은 지진하중의 밀면전단력

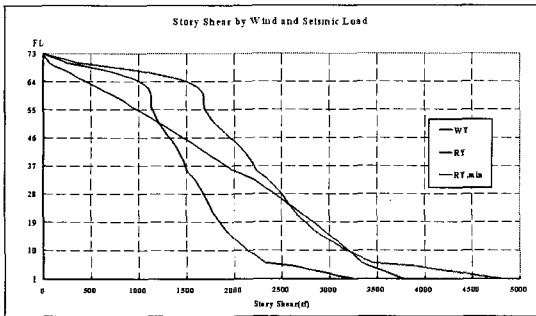


그림 13. Y 방향에 대한 층전단력 비교(S_c 지반)

※ $R_{y,min}$: 최소 횡력 기준을 적용하지 않은 지진하중의 밀면전단력

구 분	X 방향	Y 방향
$C_{s,max}$	0.1317	0.1317
C_s	0.0195	0.0195
$C_{s,min}$	0.029	0.029
보정계수(SF)	2.26(1.52)	1.75(1.18)

※ C_s : 지진응답계수
 ※ $C_{s,max}$: 지진응답계수 상한치
 ※ $C_{s,min}$: 지진응답계수 하한치
 ※ () : 지진응답계수 하한치를 적용하지 않은 보정계수

X, Y 방향 모두 지진하중이 구조물의 전반적인 거동에 큰 영향을 미치며, 이는 최소 횡력 기준의 적용으로 인하여 발생하는 현상임을 쉽게 확인할 수 있다. 하지만 최소 횡력 기준을 적용하지 않을 경우에는 풍하중이 구조물의 전반적인 거동에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 앞에서 확인할 수 있듯이, 지진하중의 최소 횡력 기준이 지진하중을 과도하게 평가하는 한 요소임을 확인할 수 있다.

4. 내진상세에 따른 부재설계

내진 설계의 목적은 구조물이 연성거동을 할 수 있도록 하중효과에 의한 구조 부재의 취성파괴의 방지에 있다.

즉 초고층 건축물에서 풍하중이 지진하중보다 크게 평가되어도, 반응수정계수를 적용하지 않은 탄성 지진하중에 대하여 구조물을 설계하지 않는 한 모든 구조물은 지진발생 시 비탄성거동을 하는 것으로 가정하였기 때문에 구조물이 연성거동을 할 수 있도록 구조시스템에 맞는 내진상세를 적용하여야만 한다.

구조물의 연성거동을 충분히 확보하기 위해서는 필로티와 같이 힘의 흐름이 급격히 변화하는 것을 방지하여야하며 국부적으로 발생할 수 있는 부재의 전단파괴 및 접합부의 파괴와 같은 취성파괴의 발생을 방지하여야 한다.

즉 필로티를 설계할 경우, KBC2005에서 제안하고 있는 특별지진하중을 적용하여 증가된 지진하중에 대해서 부재를 설계하여 비탄성 거동이 발생하지 않도록 설계하여야 하며, 보의 전단파괴를 방지하기 위해서는 보의 최대 휨성능이 발휘되는데 필요한 전단력에 대하여 설계하여야 한다.

특히 부재 길이가 매우 짧은 벽체 연결보(Link Beam)는 취성파괴가 일어나지 않도록 내진상세를 적용하여야 하며 배근이 어려울 경우에는 철골부재를 사용하여 취성파괴를 방지할 수 있는 상세를 적용하여야만 한다.

초고층 건축물일 경우, 비탄성 거동은 하부층에 국한되는 것이 일반적이므로 내진상세를 하부층에만 국한하여 적용할 수 있다. 즉 반응수정계수를 적용하지 않은 탄성지진하중을 초과하는 층 이상에서는 내진상세를 적용할 필요는 없다.

기본적으로 강재는 연성재료이므로 강구조는 기본적으로 연성거동을 할 수 있는 충분한 내진성능을 가지고 있으나 용접과 볼트접합 등의 연결부는 급격한 힘의 흐름 변화와 잔류응력으로 인하여 연성능력에 한계를 갖고 있으므로 연결부에서 비탄성 변형이

발생되지 않도록 접합부를 설계하는 것이 무엇보다 중요하다.

그러나 개정된 KBC2005는 강구조물의 내진상세를 위한 조항을 제시하지 않고 있으므로 추후에는 강구조물의 내진상세에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

일반적으로 초고층 건축물을 설계할 경우, 풍하중이 지진하중보다 크게 평가된다고 생각하는 것이 일반적인 통념이었다.

그러나 많은 지진 발생 이후에 내진설계 기준은 항상 변화되고 개선되어져 왔다. 90년대 고베 지진과 Northridge 지진 이후 내진기준은 크게 변화하게 되었고 KBC2005도 그러한 변화를 많이 받아들인 내진기준이다.

이렇게 개선된 내진기준을 근간으로 초고층 건축물 설계 시, 연약지반에 초고층 건축물이 건설될 경우에는 풍하중보다 지진하중이 더 크게 작용할 수 있다는 것을 앞에서 확인할 수 있었다.

즉 지진하중은 건물이 지어지는 지반에 따라 작아질 수도 있고 예상과는 달리 풍하중보다도 크게 커질 수 있다.

그리고 내진 구조 시스템을 어떻게 설정하느냐에 따라서 지진하중의 크기는 변화할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 무엇보다도 중요한 것은 구조 엔지니어가 변화하는 내진기준의 정확한 철학을 이해하고 기준에서 제시하는 바를 해석 및 설계에 적절히 반영하는 것이며, 기존의 해석방법에 의존하기보다는 시간이력해석 또는 비탄성 해석법을 이용하는 내진 설계 기법에 보다 큰 관심을 갖고 발전시켜 나가야 할 것이다.