

## 비정형 고층 RC 건축물의 내진설계 시 문제점 Problems in Seismic Design of High-Rise RC Building Structures having Irregularity

이 한선\*      고 동우\*\*  
Lee, Han-Seon      Ko, Dong-Woo

---

### ABSTRACT

This paper clarifies the problems which structural engineers would have when the high-rise reinforced concrete building structures with vertical and plan irregularities are to be designed against earthquakes. The most important problems appear to be as follows: (1) ambiguity in defining the principal direction of the structure and the dynamic base shear, (2) the methodology how to account for the accidental eccentricity when the modal analysis should be conducted as required for the torsionally irregular structures, and (3) the choice of 100/30 and SRSS methods to take into account the effect of the critical direction of earthquake.

---

### 1. 서론

근래 우리나라에서는 가용 건축대지의 부족에 의해 복합용도의 건축물이 많이 건설되고 있다. 가장 보편적인 예가 아파트 건물로서 저층부는 건축적으로 주차장, 정원 또는 상업공간으로 활용하기 위해 기둥과 보의 형식을 가진 골조를 사용하되, 상부구조는 지금까지 널리 사용되어 왔던 벽식구조를 사용하는 철근콘크리트구조형식일 것이다. 이러한 구조형식은 저층부가 상대적으로 상층부에 비해 강도면에서 약하고 강성면에서 보다 유연하여 지진이 발생할 경우 대부분의 피해가 저층부에 발생하는 수직 비정형의 형태를 띠거나 코어의 위치 또는 평면형태에 따라 수평 비정형의 형태를 띠게 된다. 현재 우리나라에서 시공되고 있는 많은 주상복합 또는 필로티형식 아파트의 경우 이러한 수직 및 수평 비정형성을 동시에 가지고 있다. 현행 기준에 의하면 이러한 수직 및 수평 비정형성을 동시에 가진 고층 아파트의 경우 반드시 동적해석법을 사용하여 설계하도록 요구하고 있으나, 동적해석을 수행하기 위한 구체적인 지침이나 방법이 기준에서는 명확히 제시되어 있지 않아 많은 구조기술자들이 설계에 애로점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 우리나라에서 가장 전형적인 고층 비정형 건축물을 선정한 후 현행 기준에 따라 최선의 방법으로 해석과 설계를 수행하면서 이와 같은 구조물을 동적해석할 때 부딪히는 문제점을 정리하여 제시하고자 한다.

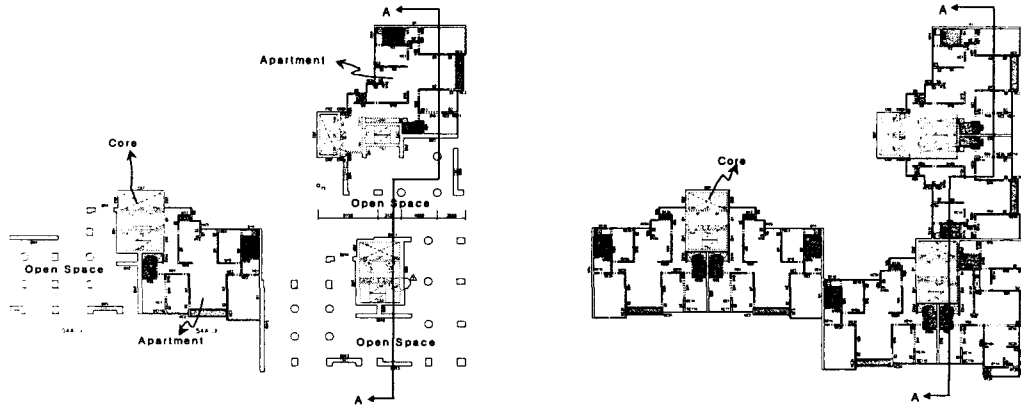
---

\* 고려대학교 건축공학과 교수, 정회원    \*\* 고려대학교 건축공학과 박사과정, 학생회원

## 2. 대상 구조물의 선정과 비정형성 평가

현재 우리나라에서 시공되고 있는 비정형 철근콘크리트 건물에 대한 자료를 분석한 후 그림 1에서 보듯이 하부에 필로티를 가진 L자형 평면의 P아파트를 선정하여 해석과 설계를 수행하였다. P아파트는 하부 4층을 주차공간과 단지 내 보행자 통로로 활용하기 위하여 부분적으로 필로티를 가지고 있으며, 상부 벽식과 하부 필로티 사이에는 두께 1.8m의 전이판을 두어 상부하중을 하부로 전달하고 있다.

우리나라 기준(AIK2000)<sup>1)</sup>에서는 비정형 구조물을 수직 비정형 구조물과 수평 비정형 구조물로 구분하였다. 수직 비정형 구조물은 강성 비정형, 중량 비정형, 기하학적 비정형, 횡하중 저항요소의 면내 불연속, 단면강도의 불연속으로 나뉘고, 수평 비정형 구조물은 비틀림 비정형, 요철형 평면, 격막 불연속, 면외 어긋남, 비평형 시스템으로 구분된다. 미국 기준(IBC2000)<sup>2)</sup>에서는 우리나라 기준과 동일하지만 강성 비정형과 비틀림 비정형에 대해 극심한 강성 비정형과 극심한 비틀림 비정형을 추가하여 좀더 세분하였다. 대상 구조물의 비정형성을 평가는 표 1에서 보여주고 있는데, 수직 비정형으로는 강성 비정형과 면내 불연속에 해당하고, 수평 비정형으로는 비틀림 비정형, 요철형 평면, 면외 어긋남에 해당한다.



(a) 하부필로티 층 (지하 1층 - 지상 4층)

(b) 상부아파트 층 (지상 5층 - 지상 35층)

그림 1 대상건물의 평면 (P아파트)

## 3. 비정형 구조물 설계시 요구사항

### 3.1 우리나라 기준(AIK2000)<sup>1)</sup>에서 요구사항

우리나라 기준에 따르면 높이 20m 이상 또는 6층 이상의 비정형 구조물은 동적해석을 사용하여 설계되어야 하는데, 대상건물의 경우 35층이므로 동적해석 대상이 된다. 동적해석은 반응스펙트럼에 의한 방법을 제시하고 있으며, 이때 모드조합법은 SRSS법 또는 그 이외의 방법을 사용할 수 있다. 또한 비틀림을 고려하기 위해서는 3차원해석모델을 사용하여야 하고, 우발 비틀림을 고려하기 위해서는 해석모델에서 질량의 위치를 조정하는 방법을 제시하고 있다.

표 1 대상건물에 대한 수직 비정형성 평가

수직 비정형	기준	대상건물	수평 비정형	기준	대상건물
강성 비정형	$\frac{k_i}{k_{i+1}} < 0.7, \frac{\Delta_i}{\Delta_{i+1}} >$	$0.49 < 0.7, 1.46 > 1.3$ (해당함)	비틀림 비정형	$\frac{Max(\Delta_L, \Delta_R)}{(\Delta_L + \Delta_R)/2} > 1.2$	$1.36 > 1.2$ (해당함)
중량 비정형	$\frac{W_i}{W_{i+1}} > 1.5, \frac{\Delta_i}{\Delta_{i+1}} > 1.$	$2.75 > 1.5, 0.83 < 1.3$ (해당없음)	요철형 평면	$\frac{l_x}{l_y} > 0.15$	$0.8 > 0.15$ (해당함)
기하학적 비정형	$\frac{l_i}{l_{i+1}} > 1.3$	$1.18 < 1.3$ (해당없음)	격막 불연속	$\frac{A_{int}}{A_g} < 0.5$ $K_i / K_{i+1} < 0.5$	RC 슬래브 (해당없음)
단면강도 불연속	$\frac{F_i}{F_{i+1}} < 0.8$	$1.26 > 0.8$ (해당없음)	면외 어긋남	수직부재의 면외 어긋남	해당함
면내 불연속	면내어긋남의 길이가 해당요소의 길이보다 큰 경우	해당함	비평행 시스템	횡력저항부재가 주축에 평행하지 않은 경우	해당없음

$k_i$ : i층의 강성,  $\Delta_i$ : i층의 층간변위,  $W_i$ : i층의 유효중량,  $l_i$ : i층의 횡력 저항요소의 투영길이

$F_i$ : i층의 층강도,  $\Delta_L$ : L의단부의 층간변위,  $l_x$ : 요철부 길이,  $l_y$ : 건물의 전체 길이

$A_{int}$ : 바닥슬래브 중 오픈된 면적,  $A_g$ : 바닥슬래브 전체면적  $K_i$ : i층 격막의 강성

### 3.2 미국 기준(IBC2000)<sup>2)</sup>에서 요구사항

미국 기준(IBC2000)은 건물의 중요도에 따른 내진용도그룹과 응답가속도에 따라 표 2와 같이 결정된 내진설계범주별로 건물의 해석법을 정하고 있다. 또한, 건물의 비정형성 형태와 설계범주에 따라 수행해야 할 최소한의 해석법과 고려해야할 추가 설계요구사항을 표 3와 표 4에서 보여주고 있다. 추가로 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

1) 비틀림중폭 : 동적비틀림의 영향을 고려하기 위해 비틀림모멘트에 비틀림 중폭계수( $A_x$ )를 곱하여 해석을 수행하여야 한다.

2) 지진의 방향 : 건물의 가장 취약한 방향을 고려하여 설계하여야 한다. 내진설계범주 D이상에는 직교하는 두개의 축으로 해석을 수행한 결과의 부재력을 100/30법 또는 SRSS법에 따라 조합하여 설계부재력을 계산하면 이를 만족하는 것으로 간주한다.

3) 수집재(Collector element) 추가하중 : 내진설계범주 D이상의 구조물에서 수집재에 대해서는 지진하중을 25%증가시켜 설계하도록 하고 있다.

4) 불연속벽체를 지지하는 부재에 대한 특별하중조합 : 불연속벽체를 지지하는 부재들에 대해서는 1605.4에서 정하는 특별하중조합에 따라 설계하여야 한다.

5) 약층에 대한 예외조항 : 해당층의 횡층강도가 상부층의 횡층강도의 65%보다 작을 경우에는 2층 또는 9m를 넘을 수 없지만, 등가정적해석으로부터의 지진력에 처짐 중폭계수의 75%를 곱한 지진력에 저항할 수 있도록 설계할 경우는 예외이다.

대상건물의 경우 내진설계범주 D에 해당하므로 IBC2000에 따라 설계할 경우 모드해석법에 따라 해석을 수행하고, 지진의 방향, 불연속벽체를 지지하는 부재의 특별하중조합, 수집재의 추가하

중, 비틀림 증폭계수 등을 고려하여 설계하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 우리나라 하중기준에 따라 대상 구조물을 설계하고, IBC2000에서 요구하는 사항도 검토하여 보았다.

표 2 내진설계범주의 구분

$S_{DS}$	내진 용도 그룹		
	I	II	III
$S_{DS} < 0.167g$	A	A	A
$0.167g \leq S_{DS} < 0.33g$	B	B	C
$0.33g \leq S_{DS} < 0.50g$	C	C	D
$0.50g \leq S_{DS}$	D	D	D

표 3 수평 비정형 구조물의 해석법과 추가고려사항

	내진설계범주	해석법	비틀림 증폭 <sup>1)</sup>	지진의 방향 <sup>2)</sup>	수집재 추가하중 <sup>3)</sup>	불연속벽체를 지지하는 부재의 특별하중조합 <sup>4)</sup>
비틀림 비정형(1.2)	C	E.L.F.	○	×	×	×
	D E F	M.A.	○	○	○	×
극심한 비틀림 비정형(1.4)	C	E.L.F.	○	×	×	×
	D	M.A.	○	○	○	×
	E F	Not Permitted				
요철형평면	D E F	E.L.F.(D)	×	×	○	×
격막불연속	D E F	E.L.F.(D)	×	○	○	×
면외어긋남	B C	E.L.F.	×	×	×	○
	D E F	E.L.F.(D)	×	○	○	○
비평행 시스템	C	E.L.F.(D)	×	○	×	×
	D E F	E.L.F.(D)	×	○	×	×

E.L.F. : 등가정적해석, E.L.F.(D):동적특성을 포함한 등가정적해석, M.A. : 모드해석

표 4 수직 비정형 구조물의 해석법과 추가고려사항

	내진설계범주	해석법	불연속벽체를 지지하는 부재의 특별하중조합 <sup>4)</sup>	수집재 추가하중 <sup>3)</sup>	약층에 대한 예외조항 <sup>5)</sup>
강성비정형 (80%)	D E F	M.A	×	×	×
극심한 강성비정형 (70%)	D	M.A	×	×	×
	E F	Not Permitted			
질량비정형	D E F	M.A	×	×	×
기하학적 비정형	D E F	M.A	×	×	×
면내불연속	B C	E.L.F.	○	×	×
	D E F	E.L.F.(D)	○	○	×
강도불연속 (80%)	B C	E.L.F.	×	×	○
	D	E.L.F.(D)	○	×	○
	E F	Not Permitted			

E.L.F. : 등가정적해석, E.L.F.(D):동적특성을 포함한 등가정적해석, M.A. : 모드해석

#### 4. 동적해석 시 문제점

##### 4.1 주축문제와 증폭계수

내진설계기준에서는 지진에 대해 건물의 가장 취약한 방향을 찾아 설계하도록 하고 있다. UBC 97에서는 ‘주축’이라는 용어를 사용하고 있으나 명확한 정의를 내리지 않고 있다. IBC2000에서는 ‘주축’이라는 용어를 사용하지 않고 ‘2개의 직교방향’으로만 정하고 있다.

현재 실무에서는 가력지진방향을 변화시키며 모드해석을 수행한 후 직각방향 반력이 나타나지 않는 방향을 주축으로 보는 경우 1과, 배치된 전단벽 또는 기둥의 주된 방향을 주축으로 가정하는 경우 2의 두 가지가 있다.

두 번째 문제는 동적밀면전단력의 정의이다. 보통 일정한 지진방향으로 모드해석을 수행하면 비틀림 비정형 건물의 경우 대부분 지진방향과 직각방향으로도 큰 밀면전단력이 반력으로 생성된다. 이때 동적 밀면전단력을 지진방향과 평행한 방향의 반력 밀면전단력으로 보는지, 아니면 지진방향과 수직을 이루는 반력을 포함한 합력을 동적 밀면전단력으로 보아야 하는지 명확히 정의되어 있지 않다. 그러나 주축을 경우 1과 같이 정의할 경우 이러한 문제는 사라진다.

예를 들면, 그림 2(a)와 (b)는 각각 경우 1과 경우 2의 방법으로 모드해석을 수행한 결과를 보여 주고 있다. 그림 2(a)는 경우 1로서 동적 밀면전단력을 지진방향 성분만으로 본  $V_{d1}$ 과 수직방향 반력을 포함한 합력으로 본  $V_{d2}$ 의 값이 거의 동일하지만, 그림 2(b)는 경우 2로서  $V_{d1}=1,337\text{tf}$ ,  $V_{d2}=1,437\text{tf}$ 로 차이를 보여주고 있다. 이와 같이 동적 밀면전단력에 대한 정의가 불분명하기 때문에 주축을 임의로 설정하였을 경우 증폭계수도 표 5에서 보듯이 동적 밀면전단력의 정의에 따라서도 다른 값을 보여주고 있다.

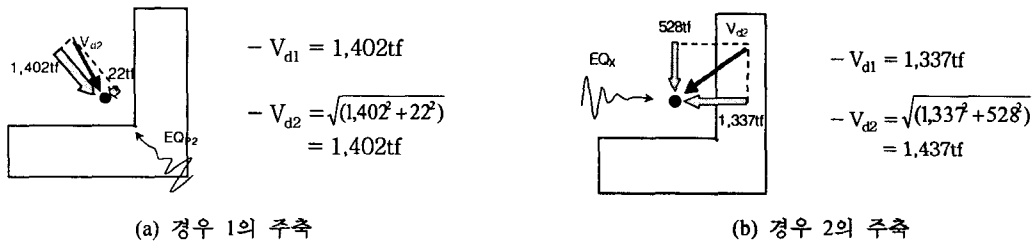


그림 2 주축 설정에 따른 동적 밀면전단력

표 5 주축 설정방법에 따른 증폭계수(Modification Factor)의 차이

구분	EQ <sub>x</sub> (tf)	EQ <sub>p2</sub> (tf)	비고
평행방향반력( $R_p$ )	1,337	1,402	V(1)
수직방향반력( $R_T$ )	528	22	V(2)
$\sqrt{(R_p^2 + R_T^2)}$	1,437	1,402	V(3)
M.F.= $V_s/V(1)$	1.727	1.646	
M.F.= $V_s/V(3)$	1.606	1.646	

$V_s = 2,308\text{tf}$

## 4.2 우발 비틀림 고려방법

건물이 지진을 받을 때 시공상 오차 또는 지반운동의 회전성분으로 인해 발생하는 모르는 우발 비틀림거동을 설계 시 고려하여야 한다. 이와 관련하여 AIK2000에서는 3차원모델에서 질량중심의 위치를 수정하여 동적해석을 수행하도록 하고 있으며, UBC97<sup>3)</sup>에서는 질량중심의 위치를 수정하여 동적해석을 수행하는 방법과 등가정적해석법을 사용하여 우발편심을 고려하는 방법을 제시하고 있으나, IBC2000에서는 구체적인 방법론이 언급되지 않았다.

그러나, 질량중심을 이동시켜 동적해석을 수행할 경우 1 개층의 평면상에서 경우의 수는 그림 3에서 보듯이 1 층당 4 개가 생긴다. 만약 건물의 층수가 20 층이라면, 80 가지 경우의 수가 발생하여 80가지 모델에 대한 모드해석을 수행하여야 하므로 이는 현실적이지 못한 방법이다.

또 다른 방법으로는 우발편심을 정적하중으로 고려하는 방법이다.<sup>3),4),5)</sup> 그림 4에서 보듯이 우발 비틀림에 대해서 정적하중으로 해석한 후 이를 동적해석결과에 더하는 것이다. 이러한 방법은 정적해석을 사용하므로 실무적으로도 적용이 용이한 방법이나 이의 정확성은 아직 검증되지 않고 있다.

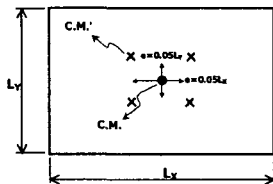


그림 3 질량중심 이동방법

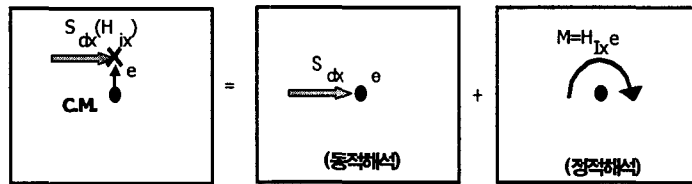


그림 4 우발 비틀림을 정적해석으로 수행하는 방법

## 5. 지진방향의 고려방법

내진설계기준(AIK2000, IBC2000)에서 구조물은 각 부재에 가장 큰 하중효과가 발생하는 지진방향에 대해 설계되어야 한다고 언급하고 있다. 이에 대해 AIK2000에서는 아무런 방법론이 언급되어 있지 않고, 임의의 직교방향에 대해 독립적으로 고려하여 설계하면 모든 방향으로 가해지는 지진력에 저항할 수 있는 것으로 보는 것이 실무관행이다. IBC2000에서는 각 설계범주에 따라 지진력의 방향과 관련하여 아래의 표 6에서 보듯이 별도로 규정하고 있다.

표 6 IBC2000에 의한 지진의 방향 고려방법

내진설계범주	A, B	C	D,E,F
고려방법	두개의 직교축을 각각 고려하면 충족된 것으로 본다.	수평 비정형 중 비평행 시스템의 경우 SRSS법 또는 100/30법을 적용하고, 그 외에는 A, B와 같다.	SRSS법 또는 100/30법을 적용한다.

이때, 100/30법을 적용할 경우 그림 5(a)와 같이 X방향 하중을 100, Y방향 하중을 30으로 볼 경우 4가지와 그 반대의 경우 4가지 총 8가지 하중조건이 생기고, SRSS법을 적용할 경우 그림 5(b)와 같이 두 방향의 부재력을 SRSS로 조합하므로 2가지 하중조건을 가지지만, 어느 방법이 더 합리적인지는 밝혀져 있지 않다. 이에 더하여 우발 비틀림의 경우의 수 4가지를 동시에 고려하면,

100/30법의 경우 32개, SRSS법의 경우 8개의 하중조건이 생긴다. 부재설계 시 이 모든 경우를 다 고려하는 것은 실무적으로 어려울 수 있다.

위 두 가지 방법으로 지진방향을 고려했을 때, 어떤 차이점이 발생하는 지 확인하기 위하여 P아 파트의 기둥의 부재력을 그림 6에서 비교하였다. 그림 6(a)는 축력-Mx, (b)는 축력-My, (c)는 Mx-My의 관계를 보여주고 있다. 두 가지 방법에 크게 차이는 보이지 않으며, 실무적으로 어떤 방법을 선택하여 설계값을 선택할지 연구가 필요하다.

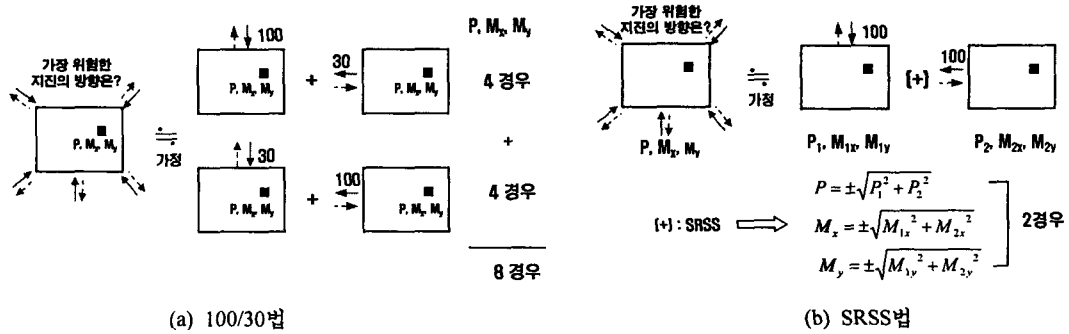


그림 5 지진방향의 고려 방법에 따른 하중조건 수

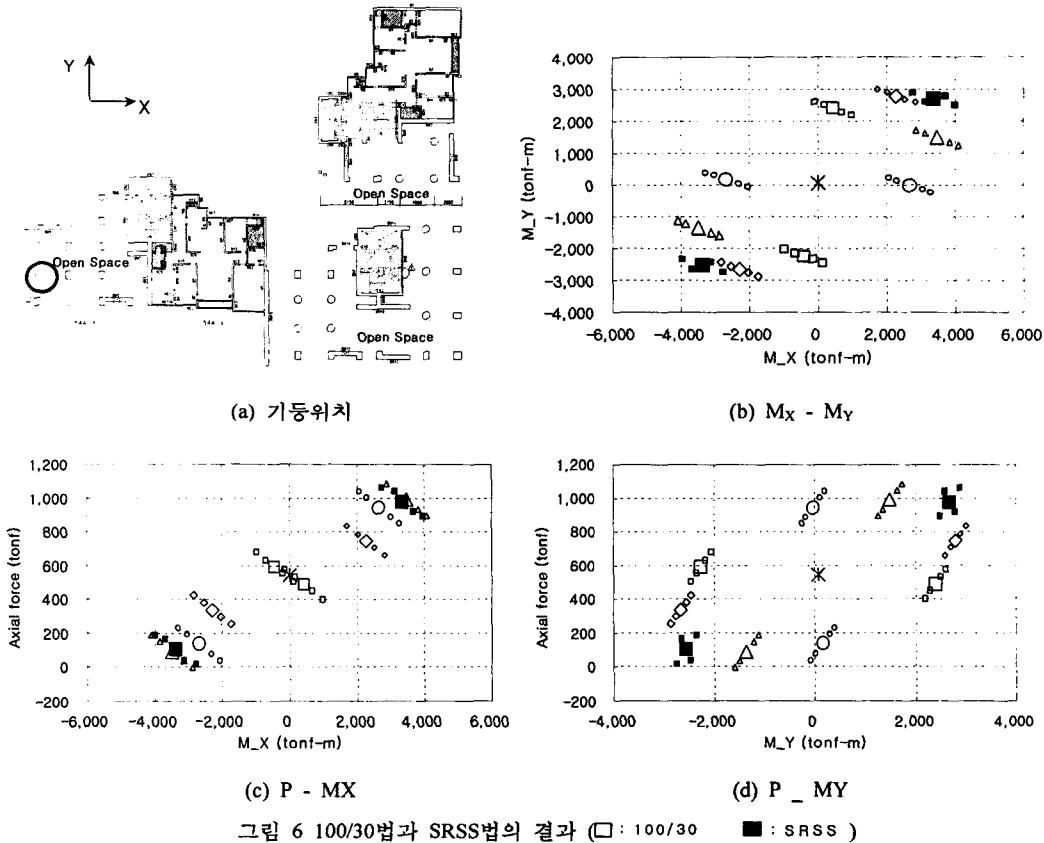


그림 6 100/30법과 SRSS법의 결과 (□ : 100/30    ■ : SRSS )

#### 4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 선정된 대상건물의 경우 수직적으로는 강성비정형과 면내불연속에 해당하고, 수평적으로는 비틀림 비정형, 요철형 평면, 면외 어긋남에 해당하였다. 이러한 건물을 설계함에 있어 우리나라 기준에서는 모드해석만 수행하도록 하고 있으나, 미국 기준(IBC2000)에서는 모드해석 이외에 지진의 방향, 비틀림 증폭계수, 불연속벽체를 지지하는 부재에 대한 특별하중조합, 수집재에 대한 추가하중 등을 추가로 고려할 것을 요구하고 있다.
- (2) UBC97에서는 주축과 관련하여 정확하게 정의를 내리지 않고 있으며, 동적밀면전단력을 구함에 있어서도 지진방향의 반력만 동적밀면전단력으로 볼지, 아니면, 지진방향에 수직성분을 포함한 합력을 동적밀면전단력으로 보아야 할지에 대해 명확히 정의되어 있지 않다.
- (3) 동적해석 시 우발 비틀림을 동시에 고려하기 위한 방법으로 구조물의 질량중심을 이동시켜 모드해석을 수행하는 방법이 있으나, 이는 모든 경우에 대해서 모드해석을 수행해야하기 때문에 현실적인 방법이 아니고, 또 다른 방법으로는 지진력에 대해 동적해석을 수행한 후 우발 비틀림을 정적해석으로 구한 후 더하는 방법이 있는데, 이 방법은 그 정확성이 검증되지 않았다.
- (4) 지진방향에 따른 설계부재력을 결정하기 위한 방법으로는 100/30법과 SRSS법이 있는데, 이 두가지 방법에 따라 부재력을 구한 결과 큰 차이는 보이고 있지 않지만, 어느 방법이 보다 현실적인 방법인지에 대한 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년도 선도연구자 지원과제(KRF-2002-041-D00539)로서 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며, 이 지원에 감사드린다.

#### 참고문헌

1. 대한건축학회 (2000), "건축물 하중기준 및 해설," 대한건축학회
2. International Code Council (ICC) (2000), "International Building Code 2000," ICC
3. International Council of Building Officials (ICBO) (1997), "Uniform Building Code," ICBO
4. E.L.Wilson (2002), "Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures," Computer and Structures, Inc.
5. A.J.Kappos (1997), "Earthquake-Resistance Concrete Structures," E&FN SPON