

## 모드의 방향이 불분명한 건축구조물의 지진해석

### Seismic Analysis of Building Structures with Ambiguous Modal Direction

김 태 호\*      이 동 근\*\*      김 대 곤\*\*\*  
Kim, Tae-Ho   Lee, Dong-Guen   Kim, Dae Kon

---

#### Abstract

This study is for seismic analysis of building structures with ambiguous modal direction. This case is revealed symmetrical building structure or the structure that isn't coincided building axis with physical axis. Seismic analysis-time history analysis, response spectrum analysis and lateral force procedure-is carried out. It is concluded that analysis method for the structure with ambiguous modal direction don't suitable for lateral force procedure. It is recommended to use the CQC method for combining modal responses to the individual components and the SRSS rule for combining responses to the two horizontal components are of nearly equal intensities.

---

#### 1. 서 론

건축 구조물은 한번 건설되면 짧게는 30년, 길게는 70~80년 혹은 수 백년 동안 사용되도록 계획한다. 이러한 건축 구조물은 사용연한 동안 적재하중과 고정하중뿐만 아니라 바람, 폭설, 지진 등과 같은 많은 자연 현상에 대해서도 견딜 수 있어야 한다. 자연현상 중에서도 특히 지진의 경우에는 인명과 재산에 많은 피해를 가져다 줄 수 있기 때문에 이에 대한 고려가 있어야 한다. 그런데 지진이 어느 정도 규모로 언제 발생할지 예측하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 예측 불가능한 지진에 대해서 견딜 수 있도록 설계하기 위해서는 지진에 대한 많은 자료가 필요하다. 이에 각 나라마다 이러한 자료를 분석하여 내진 설계 기준을 정하고 있다.

건축 구조물의 내진 설계에 널리 사용되는 해석법은 크게 세 가지가 있다. 이는 등가정적 해석법, 응답스펙트럼 해석법, 시간이력 해석법으로 현재 국내에서 구조설계시에 가장 널리 사용되고 있는 해석법은 응답스펙트럼 해석법이다. 이 방법은 작용하는 지진에 대하여 여러 주기에 따른 구조물의 최대응답에 대한 정보를 가진 응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 최대응답을 산정하여 설계하는 방법이다. 이 해석법은 설계시 산정된 밀면전단력과 등가정적해석법에 의하여 산정된 밀면 전단력을 비교하여 적을 경우 설계값을 증폭시키는 계수(Scale Factor)를 두어 보다 안전한 설계를 하게 하고 있다. 현재 지어지는 많은 건축구조물들은 설계기술의 발달로 인하여 설계자의 창작의도를 반영하고 있으며, 이에 때에 따라서는 대지의 조건 등의 문제로 인

---

\* 정희원, 성균관대 건축공학과 대학원 박사과정

\*\* 정희원, 성균관대 건축공학과 교수

\*\*\* 정희원, 서울산업대 구조공학과 교수

하여 구조물이 비정형성을 가지는 경우도 많다. 그런데, 현재 국내에 보고되는 많은 문제 중 하나는 이러한 비정형 건물에 대하여 응답스펙트럼 해석을 수행할 경우 경우에 따라서 각 방향에 대한 해석을 수행하여 구한 x, y방향 밀면 전단력이 거의 비슷한 결과를 나타내며 이 각각의 전단력은 등가정적해석에서 산정되는 밀면 전단력의 값에 비하여 현저히 적게 되어 증폭계수가 2이상인 되는 경우까지 발생하여 구조 엔지니어들에게 부담을 주고 있다. 이러한 문제를 일으키는 건축구조물의 대부분은 구조물의 주축방향이 구조해석모형의 좌표계와 다른 경우이며 동적해석 결과 나타나는 주요모드 또한 x, y 방향 성분을 동시에 포함하는 경우가 많다. 본 논문에서는 제기된 문제를 파악하고 각 해석법에 따른 문제점을 분석하여 해결책을 제시하고자 한다.

## 2. 지진해석법

서론에서 언급하였듯이 건축 구조물의 동적 해석법에는 크게 세 가지가 있으며 각각에 대하여 간단히 알아보면 다음과 같다. 먼저 등가정적해석법은 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 환산한 후에 이를 이용하여 정적해석을 수행함으로써 구조물의 지진에 의한 거동을 예측하는 방법인데 비정형구조물에 대해서는 사용이 곤란한 방법이다. 하지만 실제 내진 설계 과정에서는 구조물의 비선형 거동에 근거하여 지진하중을 감소시키는 방법을 사용하며 이에 의하여 나온 결과가 큰 오차를 가지지 않는 것으로 알려져 있어 내진 설계의 편의성 때문에 널리 사용되고 있다.

응답스펙트럼 해석법은 현재 가장 많이 사용되는 해석법으로 시간이력 해석법인 모드 중첩법을 응용한 해석법으로서 탄성해석에 국한되지만 고차모드의 영향까지 고려할 수 있어 비정형구조물의 해석에도 사용되고 있다. 응답스펙트럼은 임의의 지반운동에 대하여 일정 주기 범위 내에서 단자유도계 시스템의 최대응답을 기록한 것으로 이 해석법은 구조물을 모드별로 분리시킨 후 각 모드의 최대응답을 응답스펙트럼에서 구하여 이를 SRSS나 CQC기법을 이용하여 조합하여 구조물의 최대응답을 산정하는 것이 주요 흐름이다.

시간이력 해석법은 모드 중첩법이나 직접 적분법 등이 있으며 제시된 방법 중 가장 정확한 해석결과를 주는 장점이 있다. 그러나 해석 방법이 어렵고 결과의 분석 또한 다른 방법에 비하여 많은 시간을 소요하는 등의 문제가 있기 때문에 현재 구조물의 설계에는 특별한 상황이 아니면 잘 사용되지 않고 주로 연구목적으로 많이 사용되고 있다.

앞서 제기된 비정형 구조물의 설계시 생기는 문제는 구조물의 주축과 설계시 사용하는 좌표계가 일치하지 않는 것으로 이 경우는 사실상 여러 방향에서 가진하는 것과 마찬가지로 이에 대한 몇가지 연구결과를 살펴보면 우선 Kiureghian<sup>(1)</sup>은 여러 방향에서 가진되는 입력스펙트럼 상호간의 관계에 의한 효과는 대체로 적고, 주요한 축을 따라 가해지는 지반가속도 성분이 같거나 거의 같은 강도를 가질때는 이러한 효과는 무시할 수 있다고 했다. 또한 이런 경우 실제 적용을 위해서는 각 방향의 해석을 CQC기법에 의하여 조합하고, 각 방향의 입력스펙트럼이 거의 같을 경우는 이 응답을 SRSS함으로써 고려할 수 있다고 밝혔다. 그리고, Wilson<sup>(2)</sup>은 각각의 입력스펙트럼이 같을 경우는 SRSS가 가장 보수적인 값을 준다고 밝히고 있으며 두 방향 가진시 많이 사용되는 30%rule보다는 40%rule이 설계에서 좀 더 안전성을 줄 수 있다고 했다.

본 연구에서는 모드의 방향이 불분명하게 나타나는 경우에 대해서 알아보고 이러한 경우 해석결과에 미칠 수 있는 영향들을 파악하였다.

### 3. 모드의 방향이 불분명한 완전대칭구조물의 지진해석

모드의 방향이 구조기술자들이 설정하는 좌표계와 동일하게 나오지 않는 경우는 비대칭 구조물만 있는 것은 아니다. 즉, 완전 대칭구조물일 경우 모드의 방향은 전혀 예상할 수 없다. 이러한 구조물의 일반적인 평면 형태는 다음 그림과 같다.

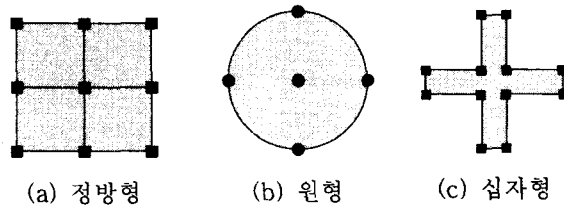


그림 1. 완전 대칭 구조물의 평면형태

위에 제시한 그림 1의 평면들이 정확한 모드의 방향을 가지지 않는 것은 x, y 각 방향에 한 개의 자유도를 가지는 간단한 구조물을 예로서 설명할 수 있다. 이 구조물은 완전 대칭이므로 x, y방향 모두 강성이 k이고 질량은 m인 그림 2와 같이 가정할 수 있다. 따라서, 이 구조물의 자유진동 운동방정식은 식(1)과 같다.

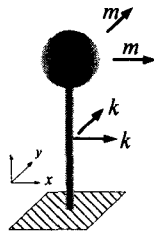


그림 2. 2자유도 대칭 구조물

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 = a_1 \sin(\omega t - \alpha) \\ x_2 = a_2 \sin(\omega t - \alpha) \end{bmatrix} \quad (2)$$

대칭 구조물의 운동 방정식을 풀기 위하여  $x_1$ 과  $x_2$ 를 식(2)와 같이 조화함수를 취하여 식(1)에 대입하면 식 (3)과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} k - m\omega^2 & 0 \\ 0 & k - m\omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

이 식(3)을 풀면  $\omega_1, \omega_2$  모두 동일한 값인  $\sqrt{k/m}$ 을 갖는다. 이는 모드 형상 또한 동일한 것임을 뜻한다. 즉, 모드의 방향이 특별히 정해지지 않는 식이 되는 것이다.

위에서 알아본 사항을 예를 들어 보면 다음과 같다. 그림 3은 예제 구조물의 형상이다. 이 구조물은 5층 정방형 콘크리트 구조물로서 감쇠율은 5%이다.

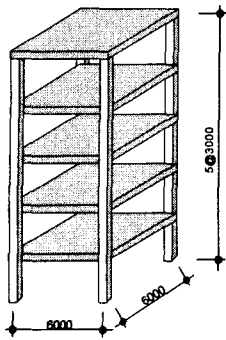
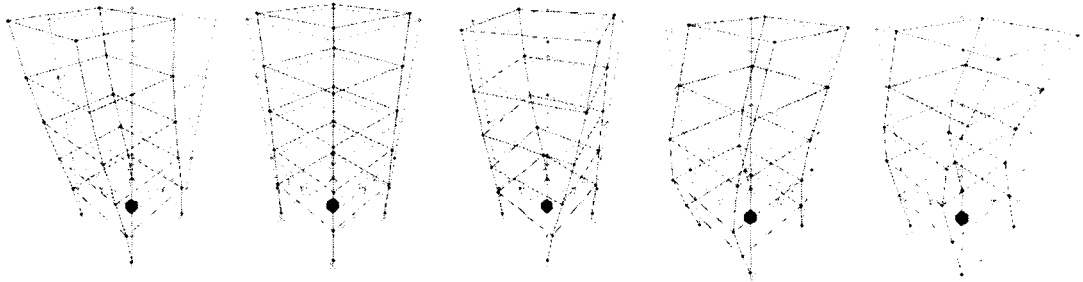


그림 3 예제 구조물

표 1 질량 참여율

모드	주기 (초)	X-dir	Y-dir
1	0.42	40.68	40.64
2	0.42	40.68	40.64
3	0.37	0.00	0.00
4	0.13	11.12	0.15
5	0.13	0.15	11.12



(a) 1차모드

(b) 2차모드

(c) 3차모드

(d) 4차모드

(e) 5차모드

그림 4 주요 저차모드 형상

앞서 식을 통해 알아본 바와 같이 표 1을 통해 다시 한번 확인 할 수 있다. 예제의 주기와 질량참여율은 비틀림 모드인 3차를 제외하고 쌍으로 동일하게 나오며, 1차와 2차 모드형상 및 4차와 5차 모드형상들은 방향이 서로 직교하며 동일한 거동을 보이고 있다.

이러한 구조물의 경우에 등가정적 해석법이나 시간이력해석법을 적용할 경우 해석방향에 대하여 이에 상응하는 응답을 주는 결과를 얻을 수 있어 문제가 없으나, 응답스펙트럼 해석을 수행할 경우는 약간 다른 양상을 보인다. 적용 스펙트럼을 UBC 94 soil type 2를 X방향으로 적용하였으며, 모드간의 조합방법을 다음과 같은 세 가지로 나누어 밀면 전단력을 계산하였고, 그 결과는 표 2에 나타내었다.

case 1) SRSS 조합 ; case 2) CQC 조합 ; case 3) SRSS 조합 : x방향의 질량을 미소하게 추가한 경우

해석 결과를 보면 case 1)의 경우 모드 방향성의 문제로 인하여 X, Y 양방향에 밀면전단력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 SRSS기법 자체가 각 모드의 응답을 제공하는 특성을 가지므로 부호를 고려하지 못하여 생기는 문제이다. case 2)의 조합방법을 사용한 경우는 CQC기법이 모드간의 상관도를 고려하여 이러한 문제가 발생하지 않았다. case 3)은 case 1)의 해결책으로 제시된 방법으로 완전 대칭 구조물에 미소한 질량추가로 모드의 방향을 명확히 해 줌으로써 정확한 결과를 얻어낼 수 있다. 따라서, 완전대칭 정형 구조물의 경우에는 응답스펙트럼 해석법에서 모드 조합법을 CQC기법과 같은 모드간의 상관성을 고려할 수 있는 방법을

표 2 밀면 전단력

(단위 : tonf)

	case 1	case 2	case 3
X-방향	15.56	21.84	21.84
Y-방향	15.56	0.00	0.00

사용하는 것이 좋으며, 이것이 여의치 않을 경우 구조물에 미소한 질량이나 강성추가를 통하여 모드방향을 명확히 한 후 SRSS방법을 적용하면 좋은 결과를 얻을 수 있다.

#### 4. 모드의 방향이 불분명한 비정형구조물의 지진해석

최근 건설되고 있는 많은 건축물들에는 건축가의 창작욕구에 의하거나 기타 여러 가지 사항으로 인하여 비정형 구조물이 설계되기 쉬우며 때에 따라서는 구조물의 주요 진동모드의 방향이 구조엔지니어가 설정한 축과 다른 방향으로 나타나는 경우도 많다. 이러한 경우에 응답스펙트럼 해석과 같은 지진해석을 수행하면 가진 하중방향의 응답뿐만 아니라 나머지 축에서도 적지 않은 응답이 나타난다. 이를 그림 2와 같은 동가의 구조물로 단순화시켜 생각해보자. 일단 구조물의 형상에 의한 문제로 한정하여 강성의 차이로 인하여 구조물의 주축이  $\theta$ 만큼 기울어져 있고 강축의 강성이 약축에 비해  $n$ 배만큼 강하다고 가정한다. 이때, 구조물의 진동수는 강축의 방향에 관계없이 모드에 관한 것이므로

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & nk \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

마찬가지로 식(2)와 같은 조화함수를 취하여 진동수를 구하면  $\omega_1, \omega_2$ 는 각각  $\sqrt{k/m}$ 과  $\sqrt{nk/m}$ 를 가지게 되며 이때 두 모드간의 진동수비는  $\sqrt{n}$ 배가 될 것이다. 질량참여율은 가정에서 각 방향의 질량이 같다고 가정하였으므로 강성의 차이에 의한 진동주기는 변화하지만 질량 참여율은 항상 같다. 즉, 강성비가 1:2인 구조물이나 1:100인 구조물이나 질량참여율 자체는 변화가 없고 물리좌표계와 구조물의 축이 이루는 방향에 대하여 질량참여율이 나뉠 뿐이다.

구조물의 응답을 살펴보면 일단 강축이 물리좌표계의 축과 다르기 때문에 고유진동모드는 강축에 직각방향으로 생길 것이며 이는 물리좌표계상에서 X, Y방향 모두에 값을 갖게 될 것이다. 즉, 이는 응답스펙트럼 해석의 경우에 하중이 가해지는 축 뿐만 아니라 나머지 방향의 모드에도 값을 주게 된다. 여기서 식(5)는 일반모드좌표의 최대값에 관한 식이다.

$$q_{i,\max} = \max_t |q_i(t)| = \frac{L_i}{\mu_i} S_d(\omega_i, \xi_i) \quad (5)$$

여기서,  $L_i$ 는 모드참여계수,  $\mu_i$ 는 일반화 질량,  $S_d(\omega_i, \xi_i)$ 는 진동수  $\omega_i$ 이고, 감쇠율이  $\xi_i$ 인 경우에 대한 응답스펙트럼 값이다. 만약, 앞 절에서 언급한 완전대칭정형구조물이나 이에 가까운 구조물일 경우 각 방향을 대표하는 두 진동모드의 진동수는 거의 같게 나올 것이다.

$$\{X\}_{(i),\max} = \{\phi\}^{(i)} q_{i,\max} = \{\phi\}^{(i)} \frac{L_i}{\mu_i} S_d(\omega_i, \xi_i) \quad (6)$$

그리고, 이는 응답스펙트럼 값이 동일하거나 비슷한 값을 가짐을 의미하며, 이렇게 구해진 일반 좌표계상의 응답을 물리좌표계로 변환하는 식 (6)을 거치게 되면서 거의 가진 방향의 응답만을 나타내는 결과를 만드는 것이다. 반면, 강성의 차이가 큰 경우에는 강성의 차이가 크게 없는 경우와 마찬가지로 모드참여계수는

같으나 주기의 차이에 의한 응답스펙트럼 값의 차이를 가지게 되며, 이는 식(6)의 물리좌표계상의 응답에서 가진방향뿐만 아니라 나머지 방향에도 적지 않은 값을 주게 되는 것이다.

지금까지 설명한 바를 예제를 들어 알아보면 다음과 같다. 그림 5는 예제구조물의 형상이며 이것은 모드의 방향이 불분명한 다자유도 구조물을 단순하게 표현한 것이며 이를 모사하기 위하여 구조물의 축을 0° 에서 45° 까지 15° 간격으로 변환하며 구조물의 진동모드와 질량참여율을 조사하였다. 단면의 폭  $b$ 는 고정시키고 깊이  $h$ 만을 변화시켜 구조물의 강성을 바꾸었으며, 이때 각각 구조물의 주축을 변환시켜보았다. 표 3은 이 경우의 고유진동수를 나타낸 것이다.

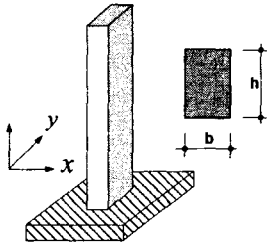


그림 5 예제 구조물

표 3 예제 구조물의 고유진동수

(단위 : Hz)

	$h/b=1$	$h/b=2$	$h/b=3$	$h/b=4$	$h/b=5$
1차모드	0.1	0.14	0.17	0.20	0.22
2차모드	0.1	0.27	0.46	0.66	0.85

구조물의 진동수를 나타낸 표 3을 보면 구조물의 단면이 증가함에 따라 고유진동수가 증가함을 볼 수 있는데 이는 예상하였던  $\sqrt{n}$  배는 나오지 않았다. 이것은 단면을 단순히 증대시킴으로서 약축의 강성도 증가하였기 때문이다. 표 4에 나타낸 구조물의 주축이 회전하였을 때의 질량참여율을 살펴보면 앞서 설명했던 바와 같이  $h/b=1$ 인 경우는 완전대칭 구조물의 경우로 질량참여율은 예상할 수 없는 값이 나온다. 하지만 강성이 커짐에 따라서 구조물의 주축에 따라 질량참여율은 명확히 나뉘며 예상하였던 대로 구조물의 강성과는 무관한 결과를 보임을 알 수 있다.

표 4 예제 구조물의 모드별 질량참여율

		$h/b=1$		$h/b=2$		$h/b=3$		$h/b=4$		$h/b=5$	
		x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0°	1차모드	16.5	83.5	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0
	2차모드	83.5	16.5	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0
15°	1차모드	16.9	83.1	6.7	93.3	6.7	93.3	6.7	93.3	6.7	93.3
	2차모드	83.1	16.9	93.3	6.7	93.3	6.7	93.3	6.7	93.3	6.7
30°	1차모드	92.2	7.8	25.0	75.0	25.0	75.0	25.0	75.0	25.0	75.0
	2차모드	7.8	92.2	75.0	25.0	75.0	25.0	75.0	25.0	75.0	25.0
45°	1차모드	16.5	83.5	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
	2차모드	83.5	16.5	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0

## 5. 예제 해석

### 5.1 강성의 차가 큰 경우

시간이력해석, 응답스펙트럼 해석 및 등가정적해석법을 적용하여 예제 구조물을 해석하였으며 이 절에서

는 강성의 차이가 큰 구조물의 경우를 다룬다. 구조물의 형상은 물리 좌표계에 대하여 45° 기울어진 5층 막대 구조물로서 높이는 15m이고 한 층의 높이는 3m이며 단면의 크기는 50cm×200cm인 콘크리트 구조물이다. 가진 방법은 X, Y방향에 각각 가하였으며, 가진 하중은 El Centro NS(1940) 지반 가속도이다. 정적 해석에 사용된 층 하중은 등가정적해석법의 절차에 따라 구해진 것이다.

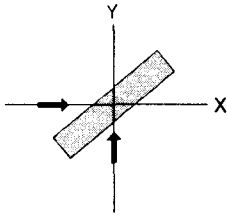


그림 6 평면형상

표 5 예제 구조물의 주기 및 질량 참여율

모드	주 기	질량참여율(%)		
		X	Y	Z
1	0.88 초	33.55	33.55	0
2	0.22 초	33.55	33.55	0
3	0.15 초	10.51	10.51	0
4	0.06 초	3.58	3.58	0
5	0.04 초	10.51	10.51	0

표 6 예제 구조물의 응답

(변위 :  $\times 10^{-2}$ )

방 향		시간이력해석		응답스펙트럼 해석				정적 해석	
		X 방향 가진	Y 방향 가진	SRSS		CQC		X 방향 가력	Y 방향 가력
				X 방향 가진	Y 방향 가진	X 방향 가진	Y 방향 가진		
밀면	x	13.68	13.68	12.34	12.34	12.39	12.30	13.68	0.00
전단력	y	13.68	13.68	12.34	12.34	12.30	12.39	0.00	13.68

해석 결과를 보면 45° 기울어진 경우이기 때문에 1, 2차 진동모드의 질량참여율은 같으며 단면형상에 의한 강성차이로 인하여 주기의 차가 발생하고 있다. 표 6은 구조물의 밀면 전단력을 구한 것이다. 나타난 응답을 살펴보면 시간이력해석에 의한 값을 정답이라고 볼 경우 응답스펙트럼 해석의 결과가 약간 부족한 것으로 나타나며, 정적해석의 경우는 가진하지 않은 방향에 전혀 밀면 전단력을 산출해주지 않음으로서 큰 문제를 발생시킬 수 있는 소지가 있다.

## 5.2 강성의 차가 작은 경우

앞 절에서 강성의 차가 작을 경우는 거의 완전대칭 구조물의 응답과 비슷할 것으로 예상을 하였었다. 이를 확인해보기 위하여 2경간 3층 콘크리트 구조물에 대하여 구조물의 주축을 45° 회전시켜 적용 스펙트럼을 UBC 94 soil type 2로 하여 응답스펙트럼 해석을 수행하였고 감쇠율은 5%이다. 기둥사이의 거리는 모두 6m이며, 층고는 3m이다. 보의 크기는 30cm x 50cm이며, 기둥의 크기는 50cm x 50cm이다. 보의 강성은 무한대로 하여 보의 휨은 무시하였다.

먼저, 하중의 가진 방향을 구조물의 주축과 마찬가지로 45° 와 135° 방향으로 가하였을 경우의 밀면전단력은 표 8에 나타내었고, 물리 좌표계의 X, Y방향으로 가진하였을 경우는 표 9에 나타내었다. 표 8의 조건은 그림 6의 해석방법과 동일하나 결과는 가진방향을 중심으로 응답이 나타났다. 이것은 앞에서 언급하였던데로 직교하는 두 진동모드의 진동주기가 거의 동일하기 때문이다. 표 9의 경우는 구조물의 축에 일치시켜 하중을 가하였기 때문에 당연히 나타난 응답이다. 의미있는 것은 두 경우 모두에 대하여 각 방향의 응답을 SRSS하였을 경우 동일한 결과를 준다는 것이다. 이것은 2장의 참고문헌의 연구결과에도 나타난 것으로서 내진설계

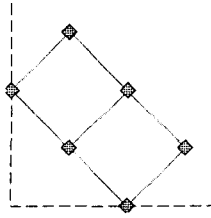


그림 7 평면형상

표 7 예제 구조물의 진동주기 및 질량참여율

모드	주 기 (진동수)	질량참여율(%)		
		X	Y	Z
1	0.137	45.64	45.64	0.00
2	0.136	45.79	45.79	0.00
3	0.129	0.00	0.00	0.00
4	0.050	3.85	3.85	0.00
5	0.047	3.71	3.71	0.00

표 8 구조물의 주축을 따라 가진한 경우

	X방향	Y방향
X방향해석	2.94	0.18
Y방향해석	0.18	2.94
$\sqrt{(X^2+Y^2)}$	2.94	2.94

표 9 물리좌표계의 축을 따라 가진한 경우

	X방향	Y방향
X방향해석	2.10	2.10
Y방향해석	2.10	2.10
$\sqrt{(X^2+Y^2)}$	2.94	2.94

시 모드의 방향을 예측할 수 없을 경우에는 두방향 모두를 해석하여 각각의 응답을 조합하여 구하는 것이 가장 합리적이라고 판단된다.

## 6. 결론 및 추후연구과제

- 1) 완전대칭 구조물의 모드방향은 불분명하거나 비정형 구조물로서 모드의 방향이 물리좌표축에 일치하지 않더라도 양방향의 모드의 주기가 거의 같다면 이 경우에 대한 지진해석을 수행할 경우에는 모드간의 상관성을 고려할 수 있는 방법을 사용하는 것이 좋다.
- 2) 비정형 구조물의 어느 한방향 해석에 양방향 응답이 모두 큰 경우는 양방향에 대한 해석을 수행한 후 이들 결과를 SRSS하는 것이 합리적이다.
- 3) 본 논문에서는 질량의 차이에 대해서는 다루지 않았으며, 다자유도 구조물을 단순화시켜 접근하였다. 이에 대한 보완 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)마이다스아이티의 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. W. Smeby, A. Der Kiureghian, "Modal Combination Rules for Multicomponent Earthquake Excitation", Earthquake eng. struct. dyn, Vol.13, 1985, pp.1-12
2. E. L. Wilson, M. R. Button, "Three-dimensional Dynamic Analysis for Multicomponent Earthquake Spectra", Earthquake eng. struct. dyn, Vol.10, 1982, pp.471-476