

## 수평 및 수직방향 지진력을 받는 단층 래티스 돔의 동적 거동 특성에 관한 연구

### A Study on the Dynamic Characteristics of Single Layer Latticed Domes under Horizontal and Vertical Earthquake Motions

한 상 을\*                      정 명 채\*\*                      이 진 섭\*\*\*                      이 갑 수\*\*\*\*                      유 용 주\*\*\*\*\*  
Han, Sang-Eul    Cheong, Myung-Chae    Lee, Jin-Seop    Lee, Kap-Su    Yoo, Yong-Ju

---

#### ABSTRACT

The single layer latticed domes have various behaviors with each geometrical shape and scale, and they are affected by vertical component as well as horizontal component of the dynamic load. And they represent very different earthquake responses under each ground acceleration compared with another structural systems. Generally, all of the members of latticed domes undergo three dimensional deflections if they are subjected to arbitrary one dimensional horizontal load under earthquake motions. And their response characteristics are very different to their shapes, rise/span ratios, and damping mechanisms. In this study, the earthquake response behavior is verified according to the factor of each shape, rise/span ratio, and damping ratio of latticed domes, which undergo horizontal and vertical earthquake motions by numerical approaches.

---

#### 1. 서 론

현재 많은 종류의 대공간 시스템 중에, 래티스 돔은 다른 구조 시스템이 비하여 경제적이고, 시공하기가 수월하여, 많은 해석과 설계가 이루어지고 있다. 그 중 단층 래티스 돔은 그 기하학적인 형상과 규모에 의한 거동 특성이 각각 다르며, 수평 동하중 뿐만아니라 수직 동하중에 크게 영향을 받으므로, 래티스 돔의 보다 정확한 분석을 위하여, 지진해석과 같은 동적해석을 수행하는 것이 중요하다. 그러나, 국내의 단층 래티스 돔에 대한 동적해석은 미흡한 실정이며, 실제로 이에 대한 국내의 연구도 시작 단계에 있다. 단층 래티스 돔은 각 층의 질량을 집중질량으로 간주하여 해석하는 고층건물과는 달리, 각각의 절점에 집중질량이 작용하는 것으로 고려해야 하므로 상대적으로 많은 자유도를 가지며, 지진하중을 받을 경우 하중이 입체적으로 작용하므로, 임의의 1방향 수평지진력을 받더라도 진동시 3차원적으로 변형하는 것이 예상된다. 또한, 단층 래티스 돔은 각각의 돔 형상과 높이/스팬비 등 여러 가지 경우에 따라 그 응답이 다르며, 일반적으로 높이/스팬비가

---

\* 인하대학교 건축공학과 교수

\*\*\*\* 인하대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 전주대학교 건축공학과 교수

\*\*\*\*\* ES 건축구조 엔지니어링

\*\*\* 인하대학교 건축공학과 박사과정

큰 돔의 경우 수평 지진동의 영향이 수직 지진동의 영향보다 크고, 높이/스팬비가 작은 경우에는 수직 지진동의 영향이 더욱 큰 것으로 알려져 있다.

단층 래티스 돔의 동적해석에 대하여, 타나미(T. Tanami), 타키(S. Taki), 항가이(Y. Hangai)는 단층 래티스 돔에 상하방향으로 정현파를 작용시킨 모형실험을 하여, 그 동적 좌굴거동을 수치해석과 함께 비교 검토하였으며, 야마다(S. Yamada) 등은 구형 래티스 돔 모형에 대하여 충격하중에 의한 진동실험을 수행하여 고유진동수 및 고유모드를 높은 정밀도로 측정하였다. 또한, 야마다(O. Yamada) 등은 TMD가 설치된 단층 래티스 돔에 지진 응답해석을 실시하여 돔 구조물에 대한 제진효과의 가능성에 대하여 검토를 하였으며, 가토(S. Kato) 등은 원통형 래티스 돔을 대상으로한 탄소성 응답해석을 수행하였다.

본 연구에서는 단층 래티스 돔의 높이/스팬비를 변수로 하여, 각각의 고유주기와 자유진동모드 특성을 파악하며, 몇 개의 기록된 지진파에 대한 탄성응답해석을 수행하여, 단층 래티스 돔의 지진응답 특성을 규명하고자 한다.

## 2. 기본 방정식의 정식화

기본적인 수치해석으로는 시간증분을 고려하여 각 시간의 경과에 따른 가속도, 속도, 변위 등을 구하는 방법인 시간이력 해석(time history analysis)으로서 직접법인 Newmark- $\beta$ 법을 고려한다.

본 논문에서는 수치해석을 위한 정식화로서, 단층 래티스 돔을 편으로 접합된 트러스로 가정하며, 정식화를 위한 단위부재 모델은 그림 1과 같다.

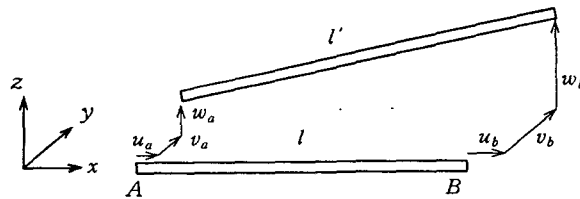


그림 1. 단위부재 모델

지진의 영향을 지반운동  $\ddot{u}_g(t)$  로 고려할 때, 단층 래티스 돔의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

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

위 식에서,  $\{\mathbf{1}\}$  은 지진이 가해지는 방향의 자유도에 대하여는 1 이고, 그 이외에 대하여는 0 인 상수벡터이다. 시간 스텝  $i$  와 그 다음 시간 스텝  $i+1$  사이의 시간 증분  $\Delta u_i$  에 대하여, 유효하중과 유효강성을 계산하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \{\Delta \hat{P}_i\} &= \{\Delta P_i\} + \left(\frac{1}{\beta \Delta t} [M] + \frac{\gamma}{\beta} [C]\right)\{\dot{u}_i\} \\ &\quad + \left(\frac{1}{2\beta} [M] + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right) [C]\right)\{\ddot{u}_i\} \\ [\hat{K}_i] &= [K_i] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C] + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} [M] \end{aligned} \quad (2)$$

비선형 수치해석으로서 Newton-Raphson 법을 이용하여 j 번째 스텝에 대하여 수렴을 시킨다. j 번째 스텝에서의 불평형력과 복원력은 식 (3)과 같으며, j+1 번째 스텝에서의 불평형력이 수렴할 때까지 반복 계산을 한다.

$$\begin{aligned} \{\Delta R^j\} &= [\hat{K}_j]\{\Delta u^j\} \\ \{\Delta f^j\} &= \{f^j\} - \{f^{j-1}\} + ([\hat{K}_j] - [K_j])\{\Delta u^j\} \\ \{\Delta R^{j+1}\} &= \{\Delta R^j\} - \{\Delta f^j\} \end{aligned} \quad (3)$$

수렴까지의 증분 변위를 모두 더하여  $\{\Delta u_i\}$  를 구하고, 이로부터 식 (4)로 표현되는 증분속도와 증분가속도를 구한다.

$$\begin{aligned} \{\Delta \dot{u}_i\} &= \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \{\Delta u_i\} - \frac{\gamma}{\beta} \{\dot{u}_i\} + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \{\ddot{u}_i\} \\ \{\Delta \ddot{u}_i\} &= \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \{\Delta u_i\} - \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}_i\} - \frac{1}{2\beta} \{\ddot{u}_i\} \end{aligned} \quad (4)$$

위에서 얻어진 증분변위, 증분속도, 증분가속도로부터, i+1 스텝에서의 변위, 속도, 가속도를 구한다.

### 3. 해석모델 및 해석결과

#### 3.1 해석모델

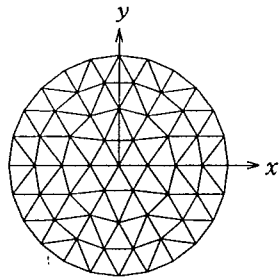
해석모델로는 그림 2 와 같은 절점 61 개, 부재수 156 개의 단층 패러렐 라멜라 돔(single layer parallel lamella dome)을 고려한다. 해석모델의 스펠은 20 m이며, 부재의 제원은 길이가 약 3 m, 탄성계수  $E = 2,100,000 \text{ kg/cm}^2$ , 항복응력  $\sigma_y = 2,400 \text{ kg/cm}^2$ , 단면적  $12.18 \text{ cm}^2$ ,  $22.72 \text{ cm}^2$ 로 하며, 자중과 적재하중을 고려한 질량을 절점에 집중질량  $0.955 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ ,  $1.91 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ ,  $2.865 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ 으로 부여하였다. 해석모델은 부재 크기와 집중질량을 조합한 네 개의 모델을 고려하였으며, 각각의 모델에 대하여, 높이/스팬비를 반개각  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 로 고려하여 해석하였다. 경계조건은 지점을 핀지지로 하여 모든 방향에 대하여 구속하였다. 표 1에 해석모델의 부재 제원과 작용하중, 그리고 반개각에 따른 높이/스팬비를 나타내었다.

해석의 결과를 비교하기 위하여, 선형 고유치 해석으로 얻어진 각 고유진동수는 이시카와(K. Ishikawa)에 의해 제안된 다음의 식 (5)로 무차원화 시킨다. 여기에서,  $g$ 는 중력가속도,  $l_e$ 는 부재길이,  $\rho_0$ 는 단위면적 중량,  $E$ 는 영계수,  $A$ 는 부재단면적,  $\Omega$ 는 무차원화 진동수이며,  $l_e$ ,  $\rho_0$ ,  $E$ ,  $A$ 는 돔 중앙부 부재의 값을 이용한다.

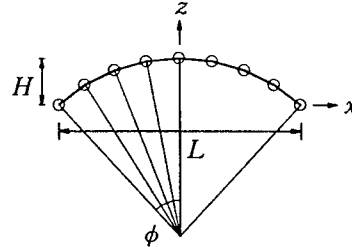
표 1. 부재 제원과 반개각에 따른 높이/스팬비

해석모델	부재크기(mm)	단면적( $\text{cm}^2$ )	자중( $\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ )
A	$\phi$ -114.3×3.5	12.18	0.955
B	$\phi$ -114.3×3.5	12.18	1.91
C	$\phi$ -165.2×4.5	22.72	1.91
D	$\phi$ -165.2×4.5	22.72	2.865

$$\Omega = \omega \times \sqrt{\frac{l_e \cdot \rho_0}{E \cdot A \cdot g}} \quad (5)$$



a) 평면도



b) 높이/스팬비 ( $H/L$ ) 및 반개각 ( $\phi$ )

그림 2. 해석모델의 형상

### 3.2 해석결과

해석모델의 선형 고유치해석을 수행하여, 해석모델의 1차 고유주기를 표 2에 나타내었으며, 그림 3에 해석모델의 높이/스팬비에 따른 고유모드와 고유주기를 나타내었다. 또한 해석모델의 1차, 2차, 3차의 고유진동수를 식 (5)로 무차원화 한 값  $\Omega$ 를 구해 반개각과  $\Omega$ 의 관계를 그림 4에 나타내었으며, 표 3에 해석모델의 고유주기, 고유진동수, 무차원화 진동수를 1차부터 3차까지 나타내었다.

해석모델의 고유진동수는 반개각이  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 인 경우는  $0 \sim 10$  Hz 사이의 진동수가,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 인 경우는  $20 \sim 30$  Hz 사이의 진동수가 월등하며, 그림 3에서 알 수 있듯이, 반개각  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 에서는 1차 ~ 3차의 진동모드가 수직방향의 변위를 나타내고, 반개각이  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 인 경우는 1차 ~ 3차의 진동모드가 수평방향의 변위를 나타내고 있다. 무차원화 진동수에서도, 반개각  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 의 돔은 1차 ~ 3차의 값이 거의 일치하는 반면, 반개각  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 돔은 3차의 진동수가 1차 ~ 2차의 진동수와는 약간의 차이를 보이고 있다. 해석 결과에 의하여 반개각  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 의 돔은 상부부재가 좌굴로 인한 스냅스루 현상이 예상되며, 반개각  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 돔은 수평방향의 진동에 의하여, 하부부재의 국부좌굴이 먼저 예상된다.

### 3.3 지진응답 해석

수치해석방법으로는 Newmark- $\beta$ 법을 이용하였으며,  $\beta$ 는 1/4의 평균가속법으로 하였다. 시간 간격은 0.02초, 계속시간은 최대 지반 가속도를 가지는 중심구간 10초로 하였으며, 정점에 집중하중  $P=2t$ 이 작용하도록 하였다. 각 감쇠비는 0.02이며 감쇠는 질량비례형으로 하였다.

표 2. 반개각에 따른 1차 고유주기( $T_1$ )

반개각	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$
A	0.172962	0.119770	0.105371	0.123035
B	0.239727	0.165748	0.145601	0.169107
C	0.178616	0.123650	0.108785	0.126942
D	0.216039	0.149418	0.131330	0.152747

표 3. 높이/스팬비에 따른 고유진동수( $\omega$ ), 고유주기(T), 무차원화 진동수( $\Omega$ )의 비교

반개각( $^\circ$ )	$\omega, T, \Omega$	해석모델			
		1차	2차	3차	111차
30	$\omega$	36.3269	36.3849	37.0988	718.383
	T	0.17296	0.17269	0.16936	0.00875
	$\Omega$	0.00754	0.00755	0.00770	0.14916
45	$\omega$	52.4604	52.5179	52.5860	695.465
	T	0.11977	0.11964	0.11948	0.00903
	$\Omega$	0.01089	0.01090	0.01092	0.14440
60	$\omega$	59.6292	59.6359	65.9611	663.644
	T	0.10537	0.10536	0.09526	0.00947
	$\Omega$	0.01238	0.01238	0.01370	0.13780
90	$\omega$	51.0682	51.0745	77.5143	574.194
	T	0.12304	0.12302	0.08106	0.01094
	$\Omega$	0.01060	0.01060	0.01609	0.11922

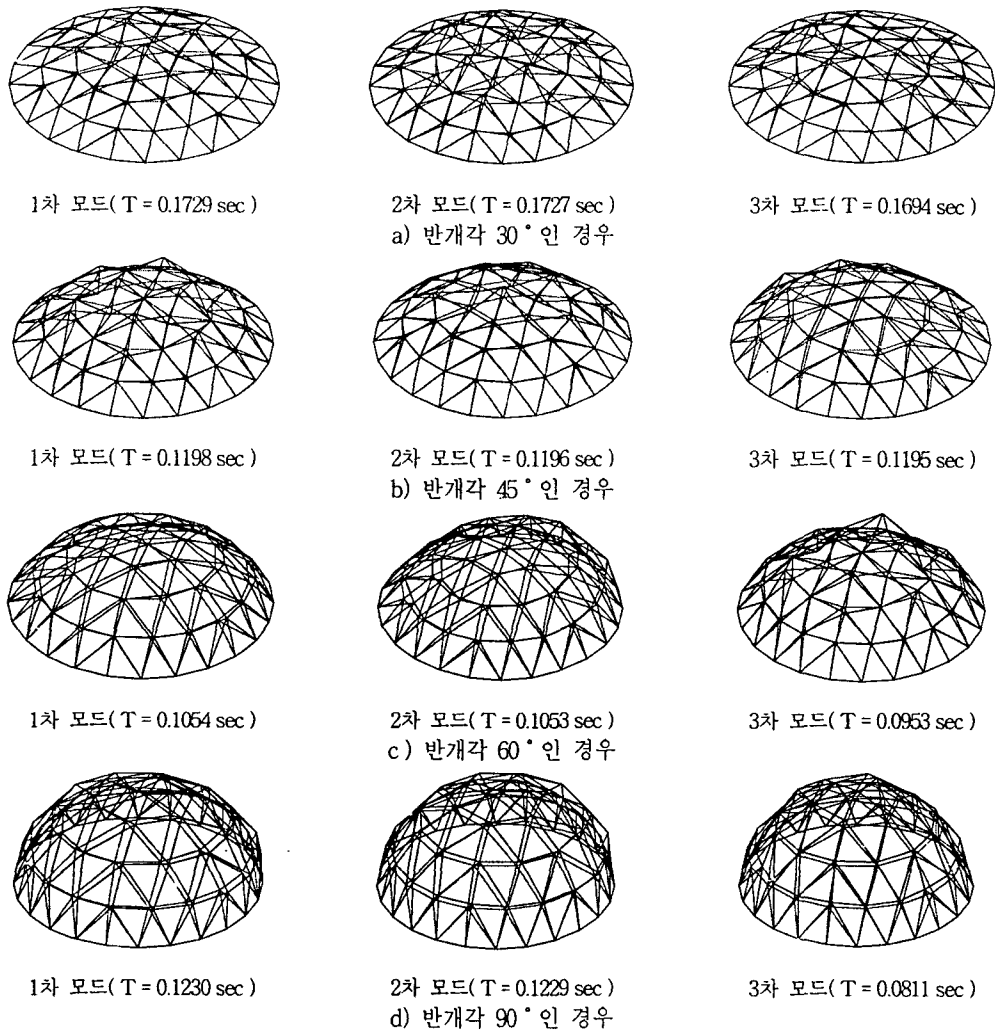


그림 3. 높이/스패비에 따른 고유모드와 고유주기

지진파는 Miyagi UD, Miyagi NS, Northridge UD, Northridge NS 파를 입력하였으며, 각 지진파의 최대 가속도는 Miyagi UD 파는 214gal, Miyagi NS 파는 314gal, Northridge UD 파는 541gal, Northridge NS 파는 337 gal 로 하였으며, 그림 5에 각 지진파의 가속도 시간 이력을 나타내었다.

해석모델 A의 가속도 응답은 Miyagi NS 파에서는 고유주기 0.67 초, Miyagi UD 파에서는 고유주기 0.14 초, Northridge NS 파에서는 고유주기 0.15 초에서 0.25 초, Northridge UD 파에서는 고유주기 0.14 초에서 최대 응답을 나타내었다.

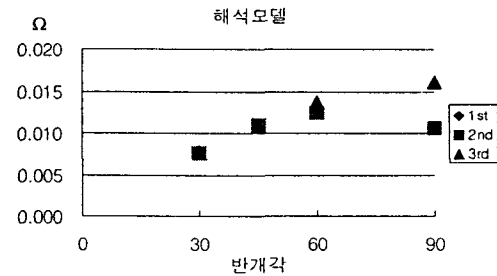


그림 4. 무차원화 진동수  $\Omega$ 와 반개각과의 관계

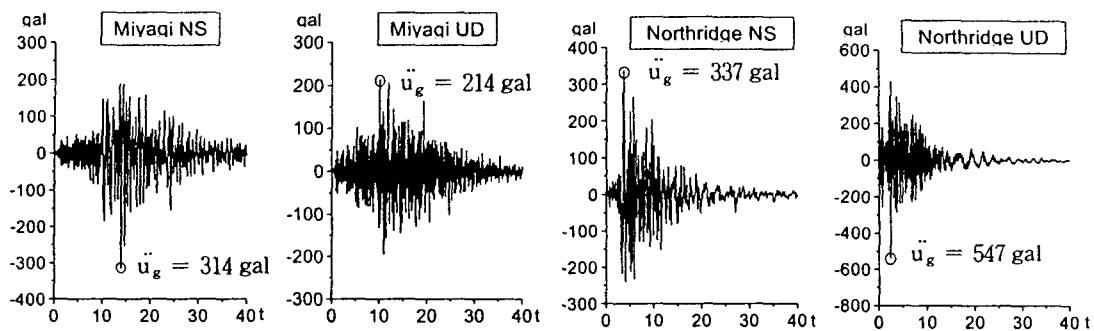
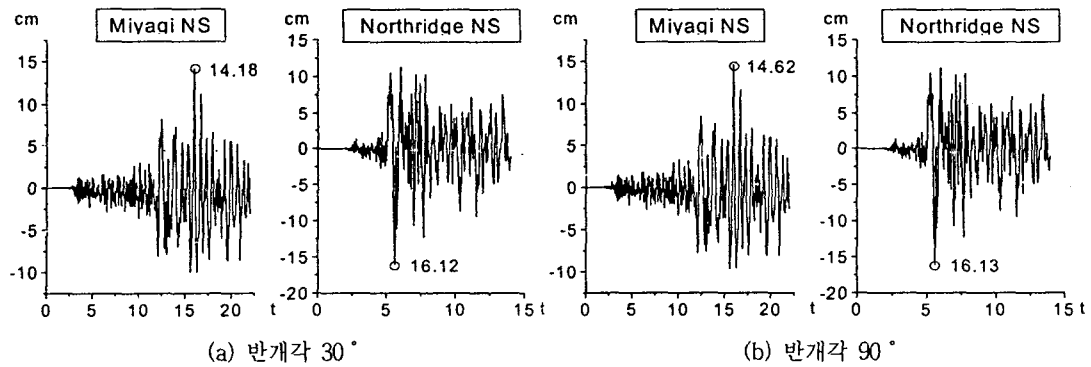


그림 5. 지진파의 가속도 시간 이력

### 3.4 지진응답 해석 결과

단층 래티스 등의 지진응답 해석결과, 해석모델의 수평변위는, 반개각이  $30^\circ$  인 모델은 Miyagi NS 파에서 14.18 cm, Northridge NS 파에서 16.12 cm 를 나타내었으며, 반개각이  $90^\circ$  인 모델은 Miyagi NS 파에서 14.62 cm, Northridge NS 파에서 16.13 cm 로서 반개각  $30^\circ$  인 경우보다 더 큰 값을 나타내었다. 수직변위에서는 초기하중에 의한 변위가 반개각  $30^\circ$  인 모델은 1.308 cm, 반개각  $90^\circ$  인 모델은 0.23 cm 를 나타내었다.

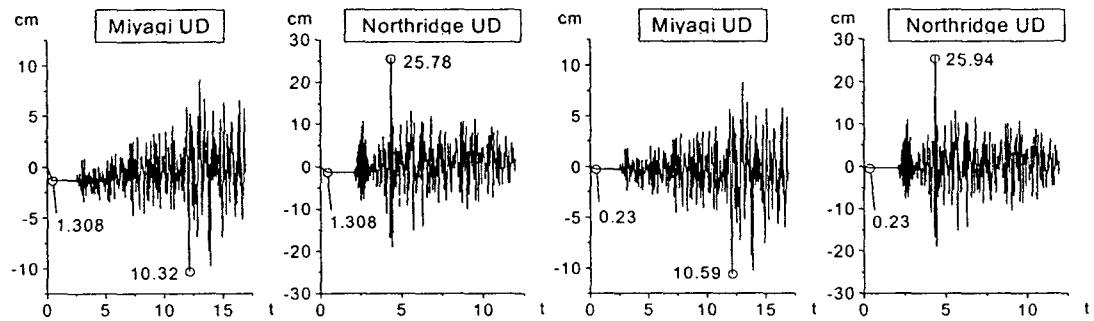
해석결과를 표 4 에 나타내었으며, 각 해석결과의 시간이력을 그림 6 과 그림 7 에 나타내었다.



(a) 반개각  $30^\circ$

(b) 반개각  $90^\circ$

그림 6. 동정상부 수평 변위



(a) 반개각  $30^\circ$

(b) 반개각  $90^\circ$

그림 7. 동정상부 수직 변위

다음으로, 모든 지진파의 최대 지반 가속도를 100 gal로 정규화 한 후, 각 해석모델의 지진 응답을 파악하였다. 해석모델의 반개각 90°인 돔의 수평변위가 Miyagi NS 파에서 7.765 cm, Northridge NS 파에서 6.44 cm로 가장 큰 값을 나타내었다. 반개각 90°인 모델이 반개각 30°인 모델보다 더 큰 수평변위를 보이고 있으며, 반개각이 클수록 수평변위가 더욱 커짐을 알 수 있었다. 또한, 수직변위의 경우, Miyagi UD 파를 받는 반개각 30°인 돔이 6.351 cm로 가장 큰 값을 나타내었으며, 각 지진파에 대하여, 반개각이 작은 돔의 수직변위가 더 크게 나타났다. 지진파 별로 파악될 때, Miyagi NS 파에 의한 응답이 가장 크게 나타났으며, Northridge UD 파에 의한 응답이 가장 작게 나타났다.

표 5에 각 모델의 변위를 나타내었으며, 각 모델의 시간이력을 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

표 4. 돔정상부의 변위 I (cm)

해석모델	수평 변위		수직 변위	
	Miyagi NS	Northridge NS	Miyagi UD	Northridge UD
30°	14.18	16.12	10.32	25.78
90°	14.62	16.13	10.59	25.94

표 5. 돔정상부의 변위 II (cm)

해석모델	수평 변위		수직 변위	
	Miyagi NS	Northridge NS	Miyagi UD	Northridge UD
30°	5.79	6.196	6.351	4.721
90°	7.765	6.44	4.624	4.813

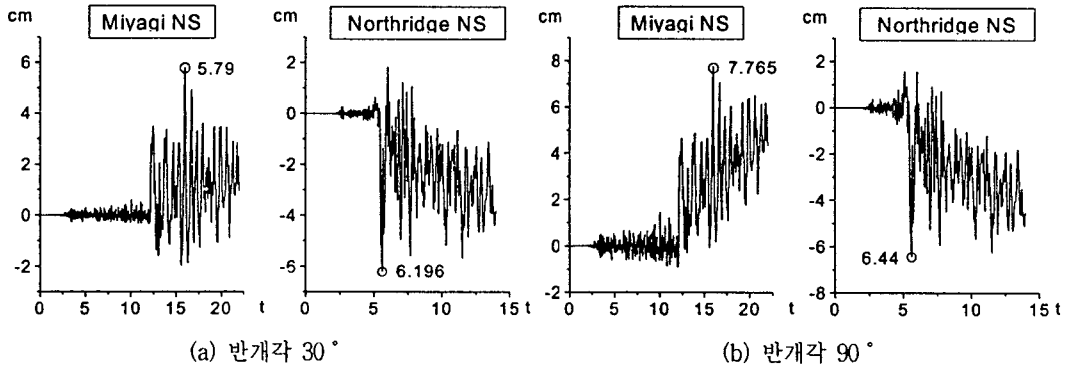


그림 8. 돔정상부 수평 변위

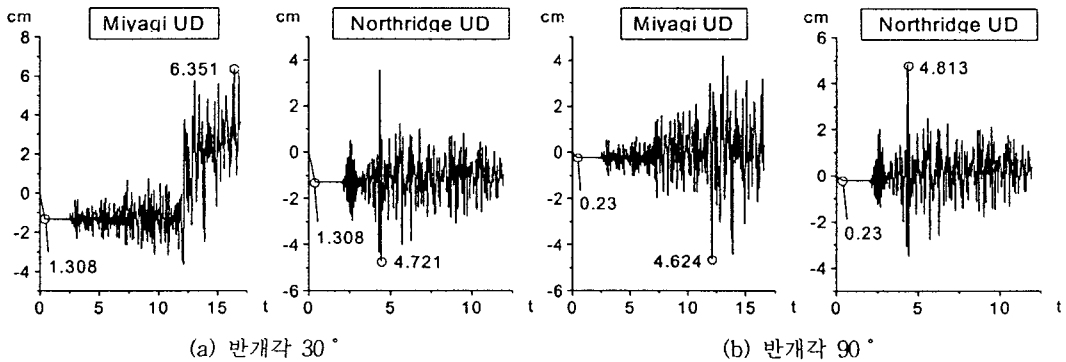


그림 9. 돔정상부 수직 변위

#### 4. 결론

본 논문에서는 수평 및 상하 지진동을 받는 단층 래티스 돔을 대상으로 하여, 그 동적 좌굴 모드와 지진 응답 특성을 규명하였다. 선형 고유치 해석을 통하여, 단층 래티스 돔의 고유주기 및 진동모드 형상에 대하여 고찰한 결과, 래티스 돔은 그 기하학적인 형상으로 인하여, 단주기의 고유주기를 가지고 있으며, 반개각 60° 이하의 얇은 돔의 경우에는 수직성분의 영향이 중요하여 국부좌굴에 의한 좌굴거동을 하고, 반개각 60° 이상의 높은 돔은 수평성분의 영향이 중요하여 스냅스루 좌굴거동을 함이 예측되었다. 또한, 각각의 형상에 따른 탄성 지진응답해석을 수행함으로써, 각 지진과에 대한 변위응답이 반개각 30°의 얇은 돔은 수직 변위응답이 수평 변위응답보다 크게 나타나고, 반개각 90°의 높은 돔은 수평 변위응답이 더욱 크게 나타났으며, 고유치 해석에 의한 진동모드 형상과 유사함을 알 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구 수행에 도움을 주신 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS)에 감사드립니다.

#### 5. 참고문헌

1. 加藤史郎 編, 単層ラチスドームの座屈に関する研究成果の報告(その4 : 単層ラチスドームの地震応答性状ならびに層せん断力係数に関する研究), 豊橋技術科学大学建設工学系構造工学講座, 構造力学研究室, 1996.4
2. 田波徹行, 滝論, 半谷裕彦, 単層スペースフレームの振動特性に関する研究(その3, その4), 日本建築学会学会講演梗概集, 構造 I, pp.1271~1274, 1989.10
3. 山田聖志, 田口孝, 河相成樹, 山田大彦 : インパルス法によるラチスシェルの振動実験(その2 : 球形ラチスシェルの自由振動性状), 日本建築学会学会講演梗概集, 構造 I, pp.1899~1900, 1994.9
4. 井上啓, 楠達明, 山田大彦他 : 単層ラチスドームの地震応答性状と制振に関する基礎的研究(その1~3), 日本建築学会学会講演梗概集, 構造 I, pp.1901~1906, 1994.9
5. 武田昌己, 加藤史郎, 柴田良一 : 水平・鉛直地震動を受ける円筒ラチスシェルの弾塑性応答解析, 日本建築学会学会講演梗概集, 構造 I, pp.583~589, 1995.8
6. 石川浩一郎, ピン接合単層ラチスドームの上下地震動応答, シェル・単層ラチス構造の振動解析-地震, 風応答と動的安定, 日本建築学会, 1993.8
7. 大崎順彦, 新・地振動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1976
8. Chopra, Anil K., Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, 1995
9. 한국전산구조공학회, SPACE FRAME 구조물의 구조해석, 설계 및 시공, 전산구조공학회 기술강습회 교재 12-1, 1995.7
10. 한국전산구조공학회, 구조물의 내진설계, 전산구조공학회 기술강습회 교재 15-1, 1997.1