

적층고무받침이 설치된 단층 래티스 돔의 동적 거동 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Dynamic Behavior of Single Layer Latticed Domes with Laminated Rubber Bearing

한 상 을*
Han, Sang-Eul

배 상 달**
Bae, Sang-Dal

ABSTRACT

This paper presents the studies of the characteristics of dynamic behavior of single layer latticed domes with laminated rubber bearing and establishes the effectiveness of the system. The base isolation system installed between base and structures reduces the responses due to earthquake motions and increases the natural period of structures. Numerical analysis is carried out using modal superposition method and Newmark- β method which is linear acceleration method with $\nu = 1/2$ and $\beta = 1/6$. The time interval Δt for response calculation is 0.001 sec. Damping ratio is 2 % as Rayleigh damping and El Centro NS(1940) as earthquake motion is the input excitation data. The acceleration response of dome with base isolation is reduced to 30 % of the response of non-isolation system. From the results of the numerical studies on the models, it is confirmed that base isolation system effectively suppresses the responses of the domes subjected to horizontal earthquakes.

1. 서 론

최근 우리나라에서는 인천국제공항과 특히 2002 Korea / Japan 월드컵 경기, ASEM 등과 같은 대규모 국가적 행사로 인해 대공간 구조물에 대한 관심이 높아짐에 따라 이들 시스템의 구조적 거동 특성에 관한 체계적인 연구의 필요성이 제기되고 있다. 따라서 이런 대공간 구조물 중 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 단층 래티스 돔의 지진하중에 따른 동적 거동과 지진 격리장치를 이용한 면진설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 동적 해석을 통한 구조물의 내진설계를 함에 있어서는 단지 구조물의 저항 내력을 증대시켜 지진에 대비할 수도 있지만, 지진파에는 단주기 성분보다 장주기 성분이 상대적으로 에너지를 적게 내포하고 있다는 사실이 발견된 후에 구조물의 고유주기를 길게 하는 면진설계도 최근 많이 활용되고 있다. 면진설계는 구조물과 지반사이 수평방향으로 유연한 특성과 에너지 감쇠특성을 갖는 지진 격리장치를 설치하여 구조물의 고유주기를 장주기화하고, 구조물에 감쇠성능을 제공하는 것이다. 최근 면진설계에 많이 사용되고 있

* 정회원 · 인하대학교 건축공학과 교수

** 학생회원 · 인하대학교 건축공학과 대학원

는 지진 격리장치는 구조물과 지반사이에 설치하여 구조물의 고유주기를 길게 함으로써 구조물에 입력되는 지진력의 영향을 감소시킨다. 이런 지진 격리장치에는 적층고무받침(laminated rubber bearing, LRB), 납삼입 고무받침, R-FBI, FPB(friction pendulum bearing)등이 있으며, 이 논문에서는 단층 래티스 돔에 적층고무받침을 설치하여 지진하중에 대한 동적 거동 특성을 고려하고, 가속도 응답과 변위 및 주기를 비교, 분석하여 적층고무받침의 응답 저감효과를 규명하고자 한다.

2. 적층고무받침의 구조적 특성

지진 격리장치가 선형 탄성적으로 거동하는 선형 면진구조의 대표적인 예는 적층고무받침이다. 적층고무받침이란 고무와 철판을 층상으로 쌓아올린 구조를 갖는 것으로, 순수한 고무받침만으로는 큰 고정하중에 대해 부풀림 현상이나 좌굴 현상이 나타나므로, 고무와 고무 사이에 보강용 철판을 수평으로 설치하여 수직하중에 대해서는 안정적으로 견디면서 수평하중에 대해서는 고무의 유연성을 이용한다.

2.1 적층고무받침의 수평강성

적층고무받침의 강철판은 구조물의 수평거동에 거의 영향을 미치지 않으므로, 고무받침을 수직 전단보로 가정할 수 있다. 그러므로 고무의 전단응력과 전단변형률의 관계를 이용하면, 적층고무받침의 수평하중-변위 관계는 식 (1) 과 같다.

$$Q = \frac{GA_b}{h} \Delta \quad (1)$$

여기에서, G 는 전단탄성계수로서 주로 $2.04 \sim 10.204 \text{ kgf/cm}^2$ 의 값을 사용하고, h 는 강철판을 제외한 고무층의 높이, A_b 는 고무층의 면적(rubber layer area)이다. 따라서, 적층고무받침의 수평강성은 식 (2) 와 같다.

$$K_h = \frac{GA_b}{h} \quad (2)$$

2.2 적층고무받침의 수직강성

적층고무받침의 압축력과 수직 변위와의 관계는 식 (3) 과 같다.

$$P = \frac{E_c A_b}{h} \delta \quad (3)$$

여기에서, E_c 는 고무압축계수(rubber compression modulus)로서, Gent & Lindley¹⁾에 의한 방법으로 구한다.

$$E_c = E_o (1 + 2kS^2) \quad (4)$$

위 식(4) 에서 E_o 는 고무의 탄성계수로서, 고무의 비압축성에 따라 $3G$ 또는 $4G$ 를 사용한다. k 는 체적탄성계수(bulk modulus)로서 재료상수이며, S 는 형상계수로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
S &= \frac{\text{재하 면적}}{\text{비재하 면적}} \\
S &= \frac{ab}{2(a+b)t} && : \text{사각형 단면의 경우} \\
S &= \frac{a}{4t} && : \text{정사각형 단면의 경우} \\
S &= \frac{a}{2t} && : \text{반지름 } a \text{인 원형 단면의 경우}
\end{aligned} \tag{5}$$

여기에서, t 는 고무 1개층의 두께이다. 그러므로, 위 식 (3)으로부터 적층고무반침의 수직강성은 다음과 같다.

$$K_v = \frac{E_c A_b}{h} \tag{6}$$

3. 수치해석 알고리즘

이 논문에서는 대공간 구조물의 동적 해석과정에 있어서 자유도를 줄이는 효과적인 방법으로 구조물의 자유진동모드 벡터를 이용한 모드 중첩법을 사용한다. 모드 중첩법에 의한 해석과정을 간단히 설명하면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P\} - [M]\{1\}\ddot{u}_g(t) \tag{7}$$

여기에서, $\ddot{u}_g(t)$ 는 지반가속도, $\{1\}$ 은 지진이 가해지는 수평방향의 자유도에 대해서는 1, 그 이외에 대해서는 0인 상수벡터이다. 변위함수 $\{u(t)\}$ 는 일반 모드좌표계에 의해서 다음과 같이 가정한다.

$$\{u(t)\} = \sum_{i=1}^n \Phi_i q_i = [\Phi]\{q(t)\} \tag{8}$$

여기에서, $[\Phi]$ 는 자유진동 모드벡터로 구성된 상수행렬, $\{q(t)\}$ 는 일반 모드좌표계로서 미지의 함수이다. 식 (8)을 식 (7)에 대입해서 정리하면, 자유진동모드의 질량행렬과 강성행렬에 대한 직교성 때문에 아래와 같이 모드좌표계에 대해 독립적인 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \mu_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \mu_i \omega_i^2 q_i(t) = -L_i \ddot{u}_g(t) \tag{9}$$

여기에서, $\mu_i = \{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i$, $2\xi_i \mu_i \omega_i = \{\Phi\}_i^T [C] \{\Phi\}_i$, $\mu_i \omega_i^2 = \{\Phi\}_i^T [K] \{\Phi\}_i$, $L_i = \{\Phi\}_i^T [M] \{1\}$ 로서, $\{\Phi\}_i$ 는 i 번째 자유진동모드이며, μ_i 와 $2\xi_i \mu_i \omega_i$ 및 $\mu_i \omega_i^2$ 은 i 번째 모드에 대한 일반화 질량계수, 일반화 감쇠계수, 일반화 강성계수라 하며, L_i 는 모드 참여계수이다. 식 (9)로부터 i 번째 모드에 대한 일반 모드좌표계 $q_i(t)$ 를 $i = 1, 2, 3, \dots, l$ 번째 모드까지 중첩해서 전체 응답을 구한 후, 식 (8)을 통해서 구조물의 변위벡터 $\{u(t)\}$ 를 구할 수 있다. 시간이력해석은 Newmark- β 법의 선형가속도법($\gamma = 1/2$, $\beta = 1/6$)을 사용한다.

4. 수치해석 결과

4.1 단위 스타 돔의 수치해석

이 절에서는 지진 격리장치를 이용한 가속도 응답의 저감효과를 입증하기 위해 적층고무받침이 설치되지 않은 스타 돔과 적층고무받침이 설치된 스타 돔의 가속도 응답과 변위 및 주기를 비교, 분석한다. 또한 적층고무받침의 개수에 따른 거동특성 분석을 통해 적층고무받침의 유효 설치개수 범위에 대해서 알아본다. 입력지진파로는 지진해석에 많이 이용되는 수평지진파인 El Centro NS파 (1940)를 사용한다. 입력지진파는 0.02 초 간격이고, 해석 증분시간 Δt 는 0.001 초, 해석시간은 최대 지반가속도를 포함하는 구간인 약 5 초로 한다. 감쇠비(ξ)는 레일리 감쇠로서 0.02 이고, 질량행렬은 집중질량행렬을 이용한다.

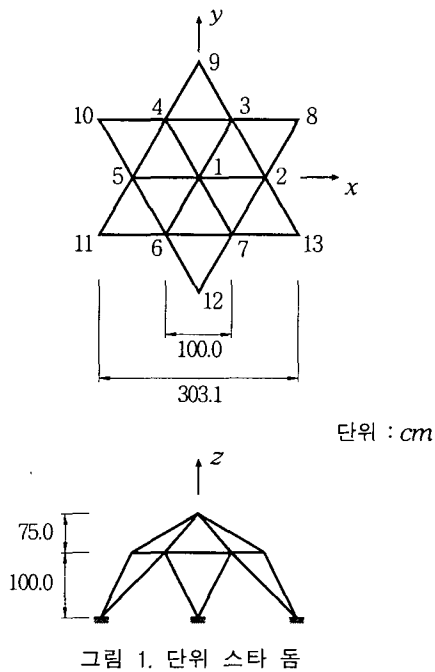


표 1. 단위 스타 돔의 부재제원

구 분	탄성계수 (tf/cm ²)	바깥지름 (cm)	두께 (cm)	단면적 (cm ²)	단면2차모멘트 (cm ⁴)
원형강관	2,100	3.40	0.22	2.198	2.79

표 2. 고무의 감쇠비

구 분	감쇠비 (ξ)
고무 - 30 durometer*	0.015
40 durometer	0.02
50 durometer	0.04 ~ 0.05
60 durometer	0.06 ~ 0.09
70 durometer	0.08 ~ 0.13
코르크	0.064
강철판	0.001 ~ 0.005

durometer* : 고무재료의 경도 측정기구

해석모델은 그림 1 과 같이 절점 13 개, 지점 6 개, 부재 24 개인 단위 스타 돔으로서 스패는 303.1 cm 이고, 각 부재길이는 약 100 cm 이다. 지점에 적층고무받침을 적용할 경우에는 지점을 이동단으로 가정하고, x 축과 y 축방향으로 수평강성을 부여한다. 단위 스타 돔의 부재제원은 표 1 과 같다. 지진 격리장치는 선형탄성받침인 적층고무받침으로, 고무의 전단탄성계수 G 는 9.99 kgf/cm^2 , 탄성계수 E_0 는 29.37 kgf/cm^2 , 포아송비 ν 는 0.47 이다. 고무의 감쇠비는 0.02 로 가정하며, 적층고무받침의 제원은 표 3 과 같다.

표 3. 적층고무받침(LRB)의 제원(I)

단위 : mm

구 분	D_b	H	D_s	t_r	t_s	t_e	n	총고무층 두께
적층고무	150	45.5	142	2.4	1.5	10	5	12

여기에서,

- D_b : 적층고무받침의 직경
- H : 적층고무받침의 총높이
- D_s : 보강철판의 직경
- t_r : 고무층의 두께
- t_s : 보강철판의 두께
- t_e : 마무리철판의 두께
- n : 고무층의 갯수

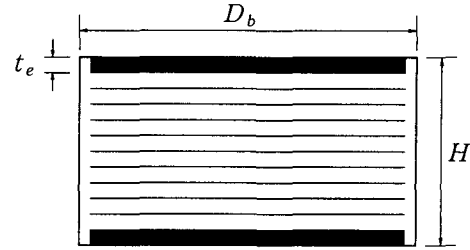


그림 2. 적층고무받침의 구조

단위 스타 돔의 지점에 적층고무받침이 설치되지 않은 경우는 9차모드까지, 그리고 적층고무받침이 설치된 경우에는 3차모드까지 해석한다. 각 절점에 $2\text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ 의 집중질량을 주었을 때, 그림 3에서 보는 바와 같이 각 지점에 6개의 적층고무받침이 설치된 경우는 적층고무받침이 설치되지 않은 경우보다 가속도

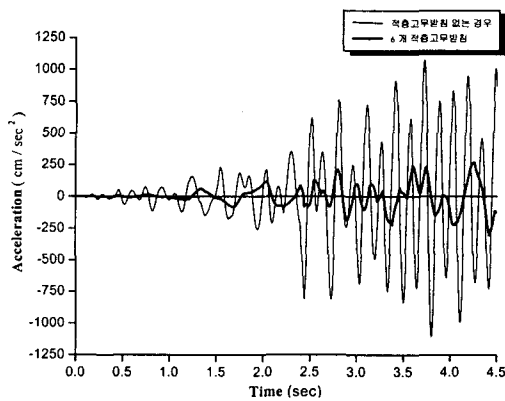


그림 3. 가속도 응답 비교(I)

응답이 현격하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 최대 가속도 응답은 적층고무받침이 설치되지 않은 경우에는 3.80초에서 $-1,106\text{ cm/sec}^2$ 이고, 적층고무받침이 설치된 경우는 4.42초에서 -307 cm/sec^2 로서, 약 28퍼센트 정도로 저감됨을 알 수 있다. 적층고무받침의 개수에 따른 가속도 응답의 변화를 알아보기 위해서 그림 4와 같이 5개, 4개, 3개의 적층고무받침을 설치한 경우의 가속도 응답은 그림 6과 같다. 그림 6에서 보는 바와 같이 적층고무받침이 모든 지점에 설치된 경우와 5개, 4개의 적층고무받침이 설치된 경우는 거의 비슷한 응답차이를 나타내고 있지만, 그림 4-c)와 같이 적층고무받침이 전체 지점수의 50퍼센트인 3개가 설치된 경우의 응답은 다른 경우와 비교해서 큰 차이를 보이고 있다.

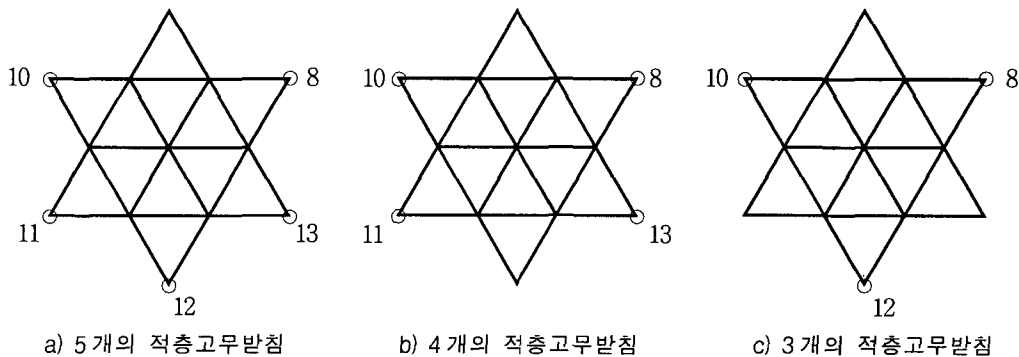


그림 4. 단위 스타 돔의 적층고무받침의 위치

그림 5는 동일개수의 적층고무받침의 위치를 달리 했을 경우로서, 그림 7은 그에 따른 가속도 응답을 보여주고 있다. 그림 7에서 나타난 바와 같이 적층고무받침의 위치에 따른 가속도 응답 진폭이 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 스타 돔과 같은 대칭구조물일 경우에 지진 격리장치의 위치에는 큰 영향을 받지 않고, 개수에 의해서 가속도 응답에 영향을 미치고 있음을 예상할 수 있다.

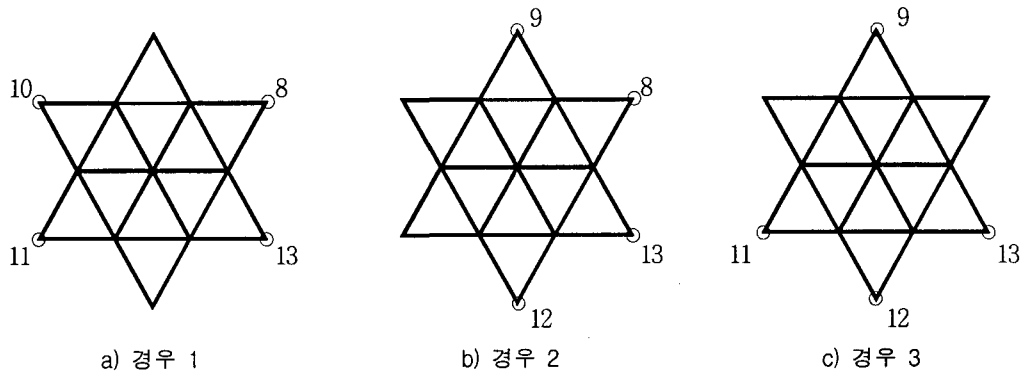


그림 5. 단위 스타 돔의 적층고무받침의 위치 비교

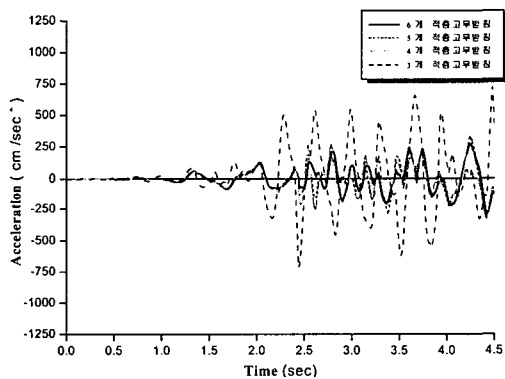


그림 6. 가속도 응답 비교(II)

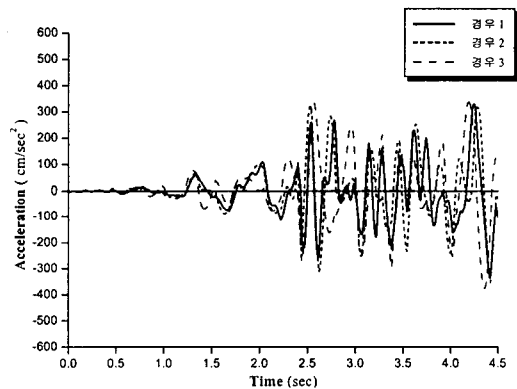


그림 7. 적층고무받침의 위치에 따른 응답 비교

표 4. 단위 스타 돔의 고유주기와 고유진동수

구 분	적층고무받침 없는 경우	적층고무받침				
		6 개	5 개	4 개	3 개	
고유 주기 (T)	1 차	0.3976	0.9588	0.9458	0.9291	0.8669
	2 차	0.3518	0.9588	0.9174	0.8765	0.8669
	3 차	0.3517	0.8825	0.8794	0.8501	0.8049
고유진동수 (ω)	1 차	15.8046	6.5533	6.6431	6.7628	7.2478
	2 차	17.8626	6.5533	6.8491	7.1686	7.2478
	3 차	17.8627	7.1198	7.1449	7.3916	7.8052

4.2 단층 래티스 돔의 수치해석

단위 스타 돔의 해석결과를 토대로, 이 절에서는 단층 래티스 돔에 대한 수치해석을 수행한다. 단층 래티스 돔의 형상은 그림 8에서 보는 바와 같이 지점 24 개, 절점 61 개, 부재 156 개인 부재길이가 동일한 3 방향 그리드 돔(3-way grid dome)과 단위 스타 돔의 형상이 연장된 패러렐 라멜라 돔(parallel lamella dome)으로 한다. 스패는 30 m 이고, 반경은 17.32 m, 반개각은 60°, 부재길이는 4.52 m 이다. 각 절점에는 자중과 적재 하중을 고려해서 $5 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ 의 집중질량을 주며, 부재제원은 표 5 와 같다. 적층고무받침의 제원은 표 6 과 같다. 적층고무받침의 개수는 지점 수의 66 퍼센트인 16 개를 지점에 설치하고, 적층고무받침이 설치되지

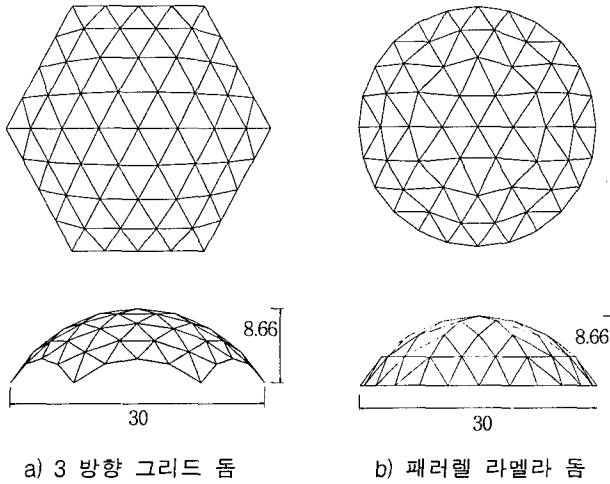


그림 8. 단층 래티스 돔(단위 : m)

표 5. 단층 래티스 돔의 부재제원

구 분	단성계수 (tf/cm ²)	바깥지름 (cm)	두께 (cm)	단면적 (cm ²)	단면2차모멘트 (cm ⁴)
원형강관	2,100	11.43	0.45	15.52	234

표 6. 적층고무받침(LRB)의 제원(II)

단위 : mm

구 분	D_b	H	D_s	t_r	t_s	t_e	n	층고무층 두께
적층고무	400	250	380	8.7	3.5	35	15	130.5

5. 결 론

이 논문에서는 적층고무받침이 설치된 단층 래티스 돔의 동적 거동 특성을 파악하고, 지진격리장치의 유효성을 살펴보았으며, 결론을 요약하면 다음과 같다.

않은 경우와 비교한다. 입력지진파는 기존의 El Centro NS 파를 이용하며, 증분시간 Δt 는 0.001 초, 해석시간은 5 초로 하고, 감쇠비는 0.02 로 가정한다. 3 방향 그리드 돔에서 적층고무받침이 설치되지 않은 경우는 44 차모드, 적층고무받침이 설치된 경우는 52 차모드까지 해석을 수행하고, 패러렐 라멜라 돔에서 적층고무받침이 설치되지 않은 경우는 42 차모드, 적층고무받침이 설치된 경우는 56 차모드까지 해석을 수행한다. 그림 9 는 3 방향 그리드 돔의 가속도 응답 곡선으로 적층고무받침이 설치되지 않은 경우에는 최대 가속도 응답이 2.86 초에서 $-959.45 \text{ cm}/\text{sec}^2$ 이지만, 적층고무받침이 설치된 경우는 최대 $328.80 \text{ cm}/\text{sec}^2$ 로서 약 34 퍼센트 저감되었다. 패러렐 라멜라 돔의 경우는 최대 가속도 응답이 2.44 초에서 $986.82 \text{ cm}/\text{sec}^2$ 이고, 적층고무받침이 설치된 경우에는 $279.41 \text{ cm}/\text{sec}^2$ 로 약 28 퍼센트 저감되었다.

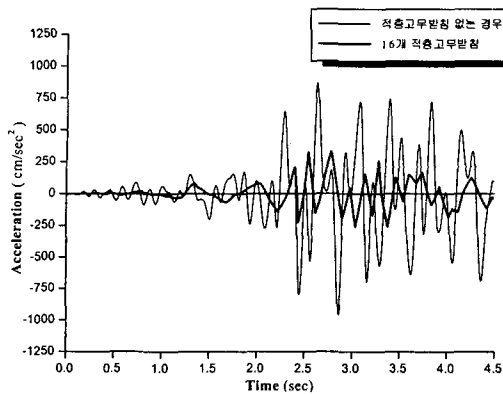


그림 9. 3 방향 그리드 돔의 가속도 응답

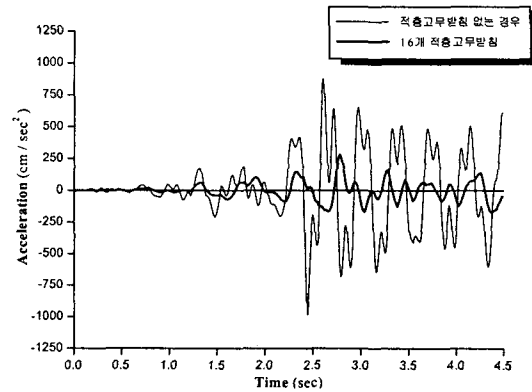


그림 10. 패러렐 라멜라 돔의 가속도 응답

1. 단위 스타 돔에서는 지점에 적층고무받침이 설치된 경우 가속도 응답이 28 퍼센트 정도로 저감되었으며, 단층 래티스 돔에서는 3 방향 그리드 돔의 경우 약 34 퍼센트, 패러렐 라멜라 돔의 경우는 약 28 퍼센트로 저감되었다.
2. 적층고무받침의 개수에 따라서 가속도 응답이 달라짐을 알 수 있다. 또한 설치 개수가 동일한 경우 적층고무받침의 위치에 따른 가속도 응답 진폭이 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 스타 돔과 같은 대칭 구조물일 경우에 적층고무받침의 위치에는 큰 영향을 받지 않고, 단지 설치 개수에 의해서 가속도 응답이 달라지는 것으로 판단된다.
3. 고유주기에 있어서는 단층 래티스 돔에 적층고무받침이 설치되지 않은 경우 0.3 초 이하의 값을 갖지만, 적층고무받침이 설치된 경우는 0.7 ~ 1.02 초로서 약 2~3 배정도 길어지는 것으로 나타났다. 따라서 이는 구조물의 진동이 작아지고, 구조물이 보다 안정화됨을 알 수 있었다. 적층고무받침을 사용할 경우에 구조물에 전달되는 진동의 영향이 감소되는 것은 지진 격리장치의 감쇠효과로 인해 에너지가 흡수, 소산되기 때문인 것으로 판단된다.

향후 연구과제로는 지진 격리장치의 종류에 따른 단층 래티스 돔의 거동차이에 대한 분석과 다양한 지반의 상태 및 지진의 특성에 따른 구조물의 거동 특성이 규명되어야 하며, 실제적인 구조물への 적용을 위해 지진 격리장치의 저온에서의 거동 특성 등에 대한 다양한 실험연구가 필요하다고 사료된다.

참고 문헌

1. Gent A. N. and Lindley P. B., "The compression of bonded rubber block", *Proc. of Institution of Mechanical Engineers*, 1959, pp.173-324
2. Kato, S. and Nakazawa, S., "Earthquake Response of Domes Implemented by Hysteresis Dampers for Earthquake Isolation", *IASS. LSA98*, 1998, pp.451-459
3. Kawaguchi, M. and Tatemichi, I., "Seismic Isolation Systems and their Application in Space Structures", *Proc. of IASS-Symposium 2000*, Istanbul, Turkey, 2000, pp.217-228
4. Reynolds D., *Engineering Principles of Acoustics : Noise and Vibration Control*, Allyn & Bacon, 1981
5. Skinner R. I., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, BL, Chichester, 1993