

비선형 과도해석을 이용한 스페이스 프레임 구조물의 동적특성

손진희¹ · 김주우^{2*}

¹대리, (주)시엘에스이엔지, ²교수, 세명대학교, 건축공학과

Dynamic Characteristics of Space Framed Structures by Using Nonlinear Transient Analysis

Son, Jin Hee¹, Kim, Joo-Woo^{2*}

¹Assistant Manager, CLS Co., Ltd, Seoul, 06251, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

Abstract - Space frame structures considering the components such as forms, layers, grids, etc. are possible to form a large space without interior columns. Here, steels having the yield strengths of 210 MPa to 450 MPa are generally used. The high strength steel (i.e., yield strength of 690 MPa) having suitable weldability, aseismicity and economics have been recently developed. In this paper, the high strength steel is applied to the space frame structures in order to analytically find out their transient responses considering the material and geometric nonlinearities. For various circular dome types of space frame structures, the modal analysis and nonlinear transient analysis are carried out using nonlinear three dimensional finite element analysis.

Keywords - Space frame, Dome, High strength steel (HSA800), Modal analysis, Nonlinear transient analysis, Nonlinear three-dimensional FE analysis

1. 서론

대공간 구조물은 3차원적인 힘의 흐름 등 셸구조의 역학적인 원리를 이용하여 면내력에 의해 외부하중에 대한 저항능력을 확보하는 형태저항 구조로서, 비교적 작은 단면을 가지고 내부기둥 없이 넓은 공간을 계획할 수 있는 특징을 가진다. 이러한 대공간 구조물의 한 형태인 스페이스 프레임(space frame) 구조물은 독일 등의 기술 도입과 더불어 독자적으로 설계, 제작 및 시공한 것은 약 30년 전 일이며, '88년 서울올림픽'과 '93년 대전엑스포'를 통하여 스페이스 프레임의 시장이 본격적으로 활성화되어 오늘에 이르고 있다.

돔 구조형식으로 입체적인 배열의 규칙성과 반복적인 형태로부터 나타나는 형상이 미적요소로 사용되며, 구조의 경량화 및 제작기술의 공업화 등의 장점으로 인해 폭 넓게 사용되고 있다. 또한 스페이스 프레임 구조는 내부기둥 없이 대공간 연출이 가능하여 일반적으로 장스팬이 사용되는 경우가 많다. 그러나 이러한 구조는 부재에 발생하는 변형도가 작은 경우에도 전체적으로 큰 변형이 일어날 수 있으므로 기하학적 비선형 해석이 필요하다. 반복하중으로 인한 유지관리 측면에서 검토하여야 할 사항으로 안정문제, 비탄성 거동, 동적 거동 등 다양한 문제가 대두되어진다.

특히, 반복되는 진동은 장스팬 구조물 손상에 치명적일 수 있기 때문에 이런 구조물의 동적 거동을 분석하여 구조물 설계에 이용되어야 한다. 이처럼 구조물의 동적 거동을 예측하기 위해서는 구조물의 동적 거동을 지배하는 자유진동해석이 우선적으로 선행되어야 하며, 이를 이용하여 손상된 구조물의 동적 거동을 예측하게 된다.

스페이스 프레임에 대한 동적 거동 분석은 많은 연구자에 의해 수행되었다. Karpurapu and Yogendrakumar^[1]는 스

Note.-Discussion open until June 30, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 15, 2016; revised October 1, 2016; approved on October 4, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-43-649-1329 Fax. +82-43-649-1755

E-mail. jw_kim@semyung.ac.kr

페이스 구조의 동적 분석을 위한 기구학적 모델을 제시하였다. 제안된 방법은 다양한 강성의 두 가지 속성 스페이스 프레임의 동적 응답을 분석하였다. Chan^[2]은 스페이스 프레임의 정적 및 동적 분석을 위한 활선강성의 개념을 기반으로 수치적 절차를 제안하였고, 이 방법은 스페이스 프레임의 비선형 정적 해석 후 좌굴 및 동적 해석을 수행할 수 있으며, 또한 동적 비선형 거동을 처리하는 방법의 다양성을 설명하기 위한 연구를 수행하였다. Qian *et al.*^[3]은 강철 버팀대 스페이스 프레임 구조의 손상위치 및 정도를 진단하기 위하여 모드 해석을 통하여 두 단계의 손상 진단 방법을 제시하였다. 스페이스 프레임 부재와 연결 손상을 찾기 위하여 확장된다는 연구 결과를 얻어냈다. Guo *et al.*^[4]은 복잡한 3차원 스페이스 프레임 구조의 분석을 위하여 모드해석을 수행하였고, 자유 진동 및 과도응답에 대한 모드 중첩법의 잔향 선 매트릭스 분석을 위한 연구를 수행하였다.

최근 스페이스 프레임이 대형화 및 장스팬화 됨에 따라 적용되는 강재에 대해서 고강도화와 안정성을 요구하고 있다. 지금까지 대부분의 스페이스 프레임의 부재는 210 MPa에서 450 MPa의 항복강도를 가진 강재가 주로 사용되어 왔으나, 용접성능이 확보된 항복강도 600 MPa급 이상의 고강도 강재 도입으로 스페이스 프레임 구조물의 자중감소와 부재 크기의 축소로 인한 경제성 및 시공성 향상 효과를 기대할 수 있다^[5].

본 연구에서는 다양한 원형 돔(dome) 형태의 스페이스 프레임 구조물의 진동특성과 과도응답에 미치는 영향을 알아보기 위하여 강재의 종류, 돔의 직경과 높이의 비, 그리고 원형강관의 부재 크기 등을 변수로 하여 3차원 비선형 유한요소 해석을 수행하였다.

2. 과도해석

과도해석(transient analysis)은 시간에 종속적인 하중에 의해 구조물의 과도응답(transient response)을 결정하는데 사용된다. 즉, 정적, 과도, 고진동수 등의 조합에 응답하는 구조에서 시간에 따라 변화하는 변위, 변형 및 응력 등을 결정하기 위해 사용할 수 있는 해석기법이다. 이러한 과도해석의 풀이과정은 시간 t_{n+1} ($n=0,1,...,N$)에서 다음과 같은 운동방정식으로부터 시작된다.

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F^n\} \quad (1)$$

여기서,

$[M]$ = 질량 행렬

$[C]$ = 감쇠 행렬

$[K]$ = 강성 행렬

$\{\ddot{u}_{n+1}\}$ = 시간 t_{n+1} 에서의 절점 가속도 벡터

$\{\dot{u}_{n+1}\}$ = 시간 t_{n+1} 에서의 절점 속도 벡터

$\{u_{n+1}\}$ = 시간 t_{n+1} 에서의 절점 변위 벡터

$\{F^n\}$ = 작용 하중 벡터

시간 t_{n+1} 에서의 변위는 Newmark 법에 의해 얻어낸 다음 식 (2)와 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\{\ddot{u}_{n+1}\} = a_0(\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) - a_2\{\dot{u}_n\} - a_3\{\ddot{u}_n\} \quad (2)$$

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + a_6\{\ddot{u}_n\} + a_7\{\ddot{u}_{n+1}\} \quad (3)$$

여기서,

$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}, \quad a_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}, \quad a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}, \quad a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$$

$$a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right), \quad a_6 = \Delta t(1 - \delta), \quad a_7 = \delta \Delta t$$

식 (2)와 (3)에서 α 와 δ 는 Newmark 적분 매개변수이며, $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ 이다.

식 (2)에서의 $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ 을 식 (3)에 대입하면 $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ 과 $\{\dot{u}_{n+1}\}$ 에 대한 식을 구하고자하는 변위 $\{u_{n+1}\}$ 항으로 나타낼 수 있다. 이때 $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ 과 $\{\dot{u}_{n+1}\}$ 식을 식 (1)에 대입하면 다음 식 (4)가 도출된다.

$$(a_0[M] + a_1[C] + [K])\{u_{n+1}\} = \{F^n\} + [M](a_0\{u_n\} + a_2\{\dot{u}_n\} + a_3\{\ddot{u}_n\}) + [C](a_1\{u_n\} + a_4\{\dot{u}_n\} + a_5\{\ddot{u}_n\}) \quad (4)$$

식 (4)에서 적용되는 Newmark 매개변수는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{4}(1 + \gamma^2), \quad \delta = \frac{1}{2} + \gamma \quad (5)$$

여기서, γ 는 진폭감소계수이며 일반적으로 0.005와 같은 작은 값이 이용된다.

비선형 문제에서 식 (4)의 해는 변위, 속도, 가속도에 대한 초기조건, 즉 시간 t_0 에서의 $\{u_0\}$, $\{\dot{u}_0\}$, $\{\ddot{u}_0\}$ 를 적절히 선택하여(과도해석인 경우, $\{u_0\} = \{\dot{u}_0\} = \{\ddot{u}_0\} = 0$ 를 적용) Newmark 가정과 Newton-Raphson 법을 적용하여 구할 수 있다.

3. 유한요소 해석 모델

리브 돔(Rib dome), 지오데식 돔(Geodesic dome), 패러렐 라멜라 돔(Parallel Lamella dome), 슈베들러 돔(Schwedler dome)으로 분류되는 4가지 원형 돔 형태의 스페이스 프레임 구조물이 Fig. 1에 나타나 있다. 본 연구에서는 이러한 4가지 형태의 돔에 대한 동적특성을 비교·분석하기 위하여 범용유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS^[6]를 이용하였다. Fig. 2는 직경 $D = 50\text{m}$, 높이 $h = 5\text{m}$, 그리고 링의 개수가 5개인 전형적인 지오데식 돔의 기하학적인 형상과 크기를 나타내고 있다. 지오데식 돔 이외의 나머지 돔들에 대해서도 동일한 링의 개수를 적용하였으며, 스페이스 프레임의 구성요소인 원형강관 부재는 재료 비선형과 대변형이 가능한 Pipe 288 요소를 이용하여 FE 모델링을 수행하

였다(Fig. 1 참조).

모드해석과 과도해석을 위한 돔의 지지 조건은 $x-z$ 평면 상에서 최상부 절점을 기준으로 할 때, 지오데식 돔은 2번째 링의 절점과 연결한 연장선을 마지막 링에서 만나는 절점을 고정 지지하였으며, 그 외 리브 돔, 패러렐 라멜라 돔, 슈베들러 돔은 마지막 링에서 수평 및 수직의 대칭축이 만나는 절점을 고정시켰다(Fig. 3 참조).

4가지의 돔 형태(여기서 $D/h=10$ 으로 일정)에 따른 고유진동수 및 모드형상을 비교하기 위하여 모드해석을 수행하였다. 이를 위한 FE 해석모델의 강관 크기는 KS규격의 P-150, 5×4.5를 사용하였으며, 이 강관의 탄성계수는 205,000MPa, 프와송비는 0.3, 그리고 단위 중량은 $7.85 \times 10^{-9} \text{kg/mm}^3$ 이다.

2장의 이론에 근거한 비선형 과도해석에서는 돔 형태에 미치는 영향을 알아보기로 Table 1에서와 같이 강재의 종류, 돔의 직경과 높이의 비 및 원형강관의 부재 사이스를 변수로 하여 FE 해석모델에 적용하였다. 강재는 고강도강인 HSA800

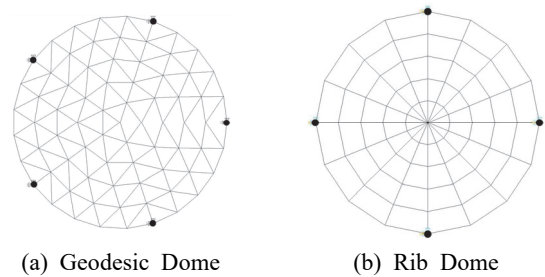


Fig. 3. Support conditions of domes

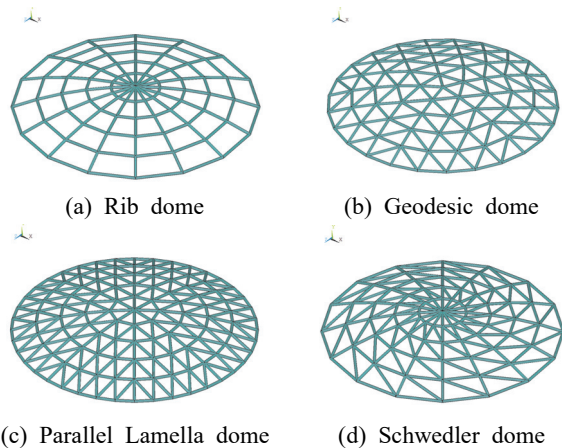


Fig. 1. Various types of circular dome

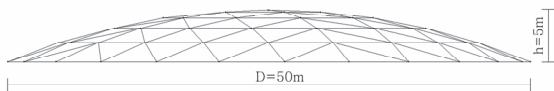


Fig. 2. Typical geometric shape and size of Geodesic dome

Table 1. Analytical cases for various types of dome

Analytical model designation	Shape of dome	D/h	Member size	F_y (MPa)
Case_1	Rib dome	10	P-190.7×4.5	690
Case_2	Geodesic dome			
Case_3	Parallel Lamella dome			
Case_4	Schwedler dome			
Case_5	Rib dome	5	P-190.7×4.5	690
Case_6	Rib dome	10	P-165.2×4.5	690
Case_7			P-216.3×4.5	
Case_8	Rib dome	10	P-190.7×4.5	235
Case_9	Geodesic dome			

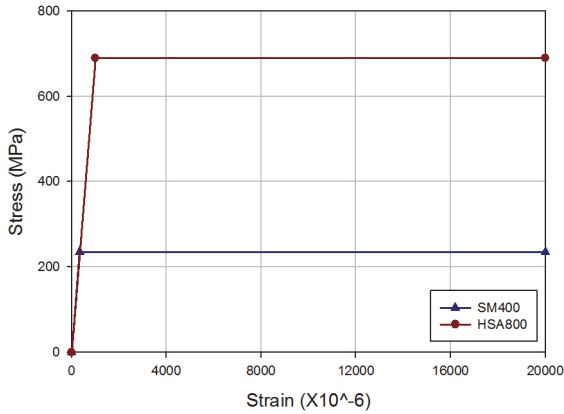


Fig. 4. Material nonlinear model for FE analysis

을 기준으로 하였으며, SM490 강재를 비교 대상으로 선택하였다. 돔의 직경과 높이의 비 D/h 에 대해서는 10에서 5로 변화 시켰으며, 돔을 구성하는 부재인 원형강관의 직경은 190.7mm을 기준으로 165.2mm와 216.3mm을 선택하여 과도응답의 변화를 비교하였다(Table 1 참조).

비선형 과도해석을 수행하기 위하여 4가지 돔에 적용되는 항복강도 $F_y = 235\text{MPa}$ 인 SM400 강재와 $F_y = 690\text{MPa}$ 인 HSA800 강재의 응력-변형률 관계를 Fig. 4와 같이 bilinear (SM400)와 multi-linear(HSA800)로 가정하였다.

4. 유한요소 해석결과

4.1 모드해석 결과

Fig. 5는 동일한 크기를 갖는 4가지 원형 돔에 대하여 1차에서부터 6차 모드까지의 고유진동수의 변화를 나타내고 있

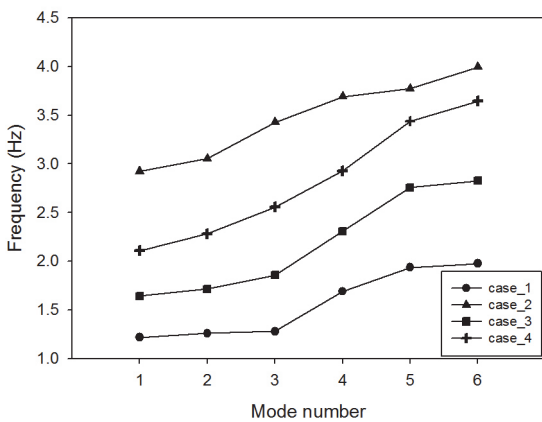


Fig. 5. Natural frequencies according to various shapes of dome

다. Fig. 5로부터 리브 돔(Case_1)이 가장 낮은 고유진동수 값으로 변화하고 있으며, 패러렐 라멜라 돔(Case_3), 슈베들러 돔(Case_4), 지오데식 돔(Case_2) 순으로 고유진동수 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 지오데식 돔은 5개의 지지 조건을 가지고 있음을 유의해야 하며(Fig. 3 참조), 이로 인해 가장 큰 고유진동수 값으로 변화하게 되었음을 예상할 수 있다. 상이한 지지조건을 갖는 지오데식 돔을 제외한 경우, 원형 돔이 동일한 크기와 링의 개수를 가질 때 가장 큰 강성을 갖는 스페이스 프레임은 슈베들러 돔으로 예상될 수 있다. 1차 에서부터 6차 모드까지의 고유진동수의 변화는 돔의 형태에 관계없이 유사한 것으로 나타났다.

Table 2는 1차에서부터 3차 모드까지 각 고유진동수에 상응하는 원형 돔들의 모드형상을 나타내고 있다(4~6차 모드형상은 지면 문제로 생략됨). Table 2로부터 4가지 돔 모두가 1차 모드 형상과 2차 모드형상에서 대칭을 이루고 있음을 볼 수 있다. 또한 최대 변형이 리브 돔에서는 상부(즉, 중앙부)에서 발생하나, 그 외의 돔들에서는 가장자리 링 부위에서 발생함을 알 수 있다. 이는 리브 돔이 링재와 직선재 만으로 구성되어 있으나, 지오데식 돔, 패러렐 라멜라 돔, 슈베들러 돔은 링재와 직선재외에 경사재를 포함하고 있기 때문으로 판단된다.

Table 2. Mode shapes according to various types of dome

Case	Mode number		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Case_1			
	1.219Hz	1.260Hz	1.280Hz
Case_2			
	2.924Hz	3.055Hz	3.427Hz
Case_3			
	1.644Hz	1.715Hz	1.858Hz
Case_4			
	2.108Hz	2.281Hz	2.558Hz

4.2 비선형 과도해석 결과

과도응답을 구하기 위하여 각 돔의 최상점에 가진하였으 며 비선형 과도해석의 총 해석 시간은 4초로 하고, 시간증분 은 모드해석에서 얻어낸 첫 번째 모드의 고유진동수 값의 1/20을 적용하였다. 리브 돔의 첫 번째 고유진동수 값은 1.22Hz, 지오데식 돔은 2.92Hz, 파라렐 라멜라 돔은 1.64Hz, 슈베들러 돔은 2.11Hz(Fig. 5 참조)로 각 돔 형상에 대한 시간증분 Δt 값은 Table 3과 같다.

Fig. 6은 동일한 크기와 링의 개수를 갖는 4가지 원형 돔 에 대한 시간에 따른 최대변위의 과도응답을 나타내고 있다. 리브 돔(Case_1)의 최대변위가 가장 작은 변위 값에서 가장 큰 진폭을 가지고 변화한 반면, 지오데식 돔(Case_2)의 최 대변위가 가장 큰 변위 값에서 가장 작은 진폭으로 변화하였 다. Fig. 6으로부터 슈베들러 돔(Case_4)은 리브 돔(Case_1) 과 유사한 최대 변위 값을 가지지만 진폭과 진동주기에서는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 가장 진동주기가 짧은 경우가 Case_2에서 나타났음을 유의해야 한다. Fig. 7은 4가지 원형 돔의 변위 분포를 나타내고 있으며, 공통적으로 돔의 중앙부에서 최대변위가 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 4가지 원형 돔을 구성하는 원형강관 부재에 발 생하는 축방향에 대한 응력분포를 나타내고 있다(여기서, +는

Table 3. Time increment (sec)

Rib dome	0.2
Geodesic dome	0.4
Schwedler dome	0.4
Parallel Lamella dome	0.3

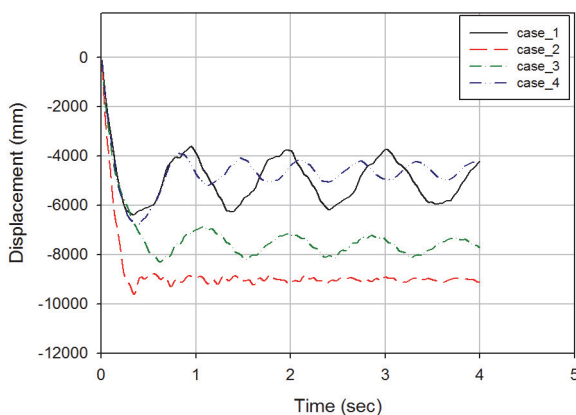


Fig. 6. Transient time history of displacement corresponding to the shapes of dome

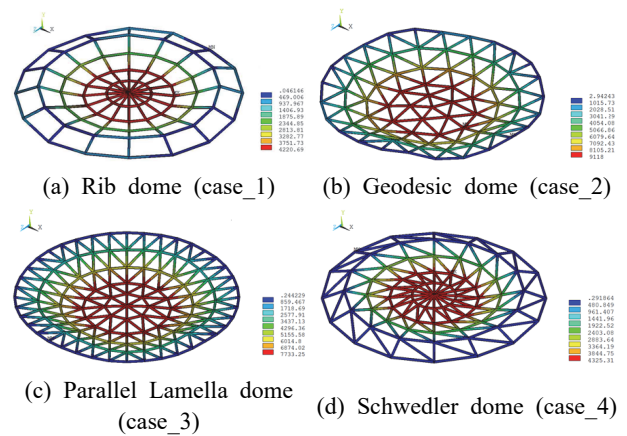


Fig. 7. Displacement contours of various domes

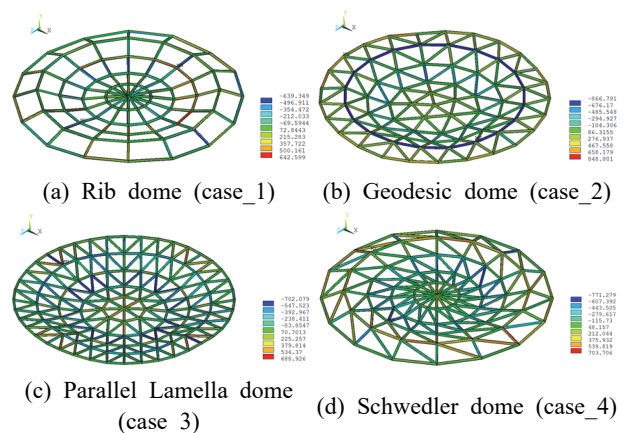


Fig. 8. Axial stress contours of various domes

인장응력, -는 압축응력을 나타냄). 리브 돔은 세 번째 링 부 재에서 약 642.6MPa의 최대 인장응력이 나타났으며, 일부 방사 부재에서 약 639.3MPa의 최대 압축응력이 발생하였 다.(Fig. 8(a) 참조). 지오데식 돔은 가장자리 링 부재에서 약 848.8MPa 최대 인장응력이 발생하였으며, 네 번째 링 부 재에서 866.8MPa의 최대 압축응력을 보였다(Fig. 8(b) 참 조). 패러렐 라멜라 돔과 슈베들러 돔은 링 부재 외에 일부 경 사 부재에서 최대 인장응력과 압축응력이 나타났다(Fig. 8(c)와 (d) 참조).

Fig. 9는 리브 돔이 직경과 높이의 비, 즉 D/h 값이 5(Case_5)과 10(Case_1)인 경우에 대하여, 시간에 따른 최 대변위의 과도응답을 나타내고 있다. 예상한바와 같이, 동 일한 직경을 갖는 리브 돔에 대하여, 높이가 증가하는 경우 (질량의 증가 보다 강성의 증가가 훨씬 더 큰 경우) 최대변위 에 관한 과도응답의 크기와 진폭 그리고 주기가 현저히 감소 하였다.

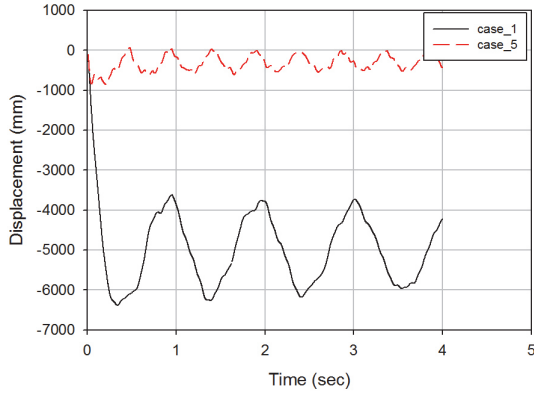


Fig. 9. Transient time history of displacement corresponding to the rise of Rib dome

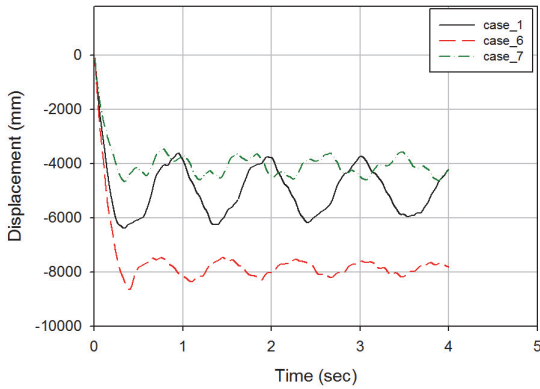


Fig. 10. Transient time history of displacement corresponding to the member size of Rib dome

Fig. 10에서 리브 돔 부재인 원형강관의 직경을 165.2mm (Case_6), 190.7mm(Case_1), 216.3mm(Case_7)로 변화시킨 후(Table 1 참조) 시간에 따른 최대변위의 과도응답을 나타내고 있다. 여기서, 원형강관의 두께는 일정하게 하였다.

Fig. 10으로부터 원형강관의 직경이 커질수록 최대변위가 감소함을 알 수 있으며, 홍미롭게도 진폭과 주기는 직경의 크기에 따라 일정하게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 즉, 직경이 Case_6보다 상대적으로 큰 Case_1인 경우 최대변위는 작지만, 진폭과 주기는 상당히 큰 값을 갖고 있으며, 반면 상대적으로 큰 직경을 갖고 있는 Case_7과 비교할 경우 앞에서와는 전혀 다른 경향을 나타내고 있다. 따라서 스페이스 프레임의 구조설계 시 강성의 크기와 진동주기를 정확히 고려해서 강관의 크기를 정해야 한다.

Fig. 11로부터 리브 돔 부재의 직경이 상대적으로 작은 165.2mm(Case_6)인 경우 가장자리 링 부재에서 왜곡된 변

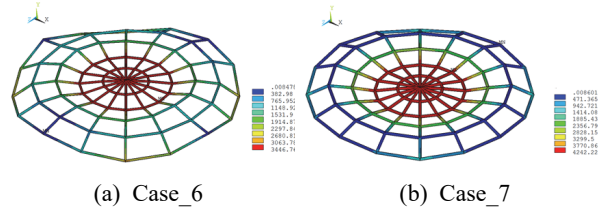


Fig. 11. Displacement contours of Rib domes with different member sizes

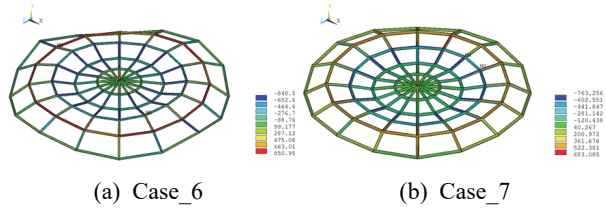


Fig. 12. Axial stress contours of Rib domes with different member sizes

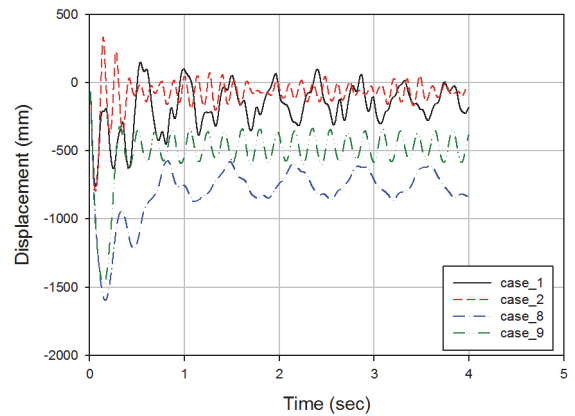


Fig. 13. Transient time history of displacement corresponding to the yield strength of Rib dome and Geodesic dome

형이 발생됨을 볼 수 있으며, Case_7의 변형과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 12는 리브 돔에서 원형강관의 직경이 165.2mm(Case_6)와 216.3mm(Case_7)인 경우의 축응력 분포를 나타내고 있다. 여기서 Case_6은 네 번째 링 부재에서 약 851.0MPa의 최대 인장응력이 나타났으며, 최대 압축응력은 돔 중앙부에서 나타났다. 원형강관의 직경이 190.7mm인 Case_1인 경우 최대 인장응력이 세 번째 링 부재에서 발생한 것과 비교해 볼 때(Fig. 8(a)참조), 돔 부재 크기의 변화는 최대 축응력의 발생의 위치를 달라지게 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 리브 돔과 지오데식 돔을 구성하는 원형강관 부재의 항복강도 F_y 를 각각 690MPa(HSA800)로부터 235MPa

(SM490)으로 다르게 하였을 때의 시간에 따른 최대변위의 과도응답을 나타내고 있다. 강재는 고강도강인 HSA800을 기준으로 하였으며, SM490 강재를 비교 대상으로 선택하였다(Table 1 참조). Fig. 13으로부터 돔의 형태에 관계없이 항복강도가 감소할 때 최대변위가 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났으며, 진폭과 주기는 다소 작게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 동일한 크기의 과도응답을 얻는 경우, 강재의 강도를 증가시킴으로써 부재의 크기를 줄여 경제적 구조설계를 확보할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 14는 항복강도가 235MPa일 때 리브 돔과 지오데식 돔의 변위 분포를 나타내고 있다. 리브 돔(Fig. 14(a))의 경우 가장자리 링 부재에서 왜곡된 변형이 발생됨을 볼 수 있으며 고강도 강재를 사용한 리브 돔(Fig. 7(a))과 비교할 때 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다.

Fig. 15는 항복강도가 235MPa일 때 리브 돔과 지오데식 돔의 축응력 분포를 나타내고 있다. 여기서 Case_8은 최대인장응력이 링 부재와 방사 부재에 전체적으로 분포되어 발생하였으며 고강도 강재를 사용한 리브 돔(Fig. 8(a))과는 전혀 다른 응력분포를 나타내고 있다. 지오데식 돔의 최대인장응력은 돔의 중앙부에서 발생하였으며(Fig. 15(b)), 고강도 강재를 사용한 지오데식 돔(Fig. 8(b))과 비교해볼 때 상당히 차이가 있음을 볼 수 있다. 이를 통해 항복강도 값의 변화가 최대 축응력의 발생위치를 달라지게 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

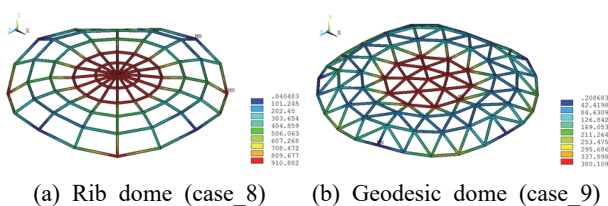


Fig. 14. Displacement contours of Rib dome and Geodesic dome with the yield strength of 235MPa

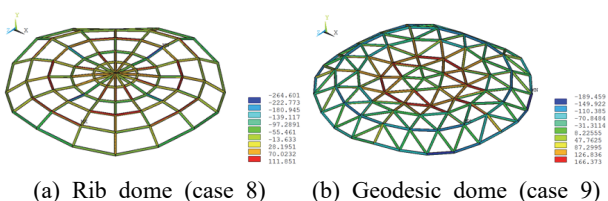


Fig. 15. Axial stress contours of Rib dome and Geodesic dome with the yield strength of 235MPa

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 원형 돔(dome) 형태의 스페이스 프레임 구조물에 대하여 강재의 종류, 돔의 직경과 높이의 비, 그리고 원형강관의 부재 크기를 변수로 하여 3차원 비선형 유한요소 해석을 통하여 구조물의 진동특성과 과도응답을 파악하였다. 이와 같이 본 연구의 해석결과를 분석하고 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 동일한 크기와 링의 개수를 갖는 돔의 형태에 따른 모드 해석 결과, 지오데식 돔, 패러렐 라멜라 돔, 슈베들러 돔, 리브 돔 순으로 고유진동수가 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 4가지 돔에 대하여 시간에 따른 최대변위의 과도응답 분석 결과, 리브 돔이 작은 변위 값에서 가장 큰 진폭을 가지고 변화한 반면, 지오데식 돔이 장 큰 변위 값에서 가장 작은 진폭으로 변화 하는 것을 알 수 있었다. 또한 슈베들러 돔은 리브 돔과 유사한 최대 변위 값을 가지지만 진폭과 주기에서는 상당한 차이가 있었으며, 지오데식 돔에서 진동주기가 짧은 것으로 나타났다.
- (3) 리브 돔의 부재가 커질수록 최대변위가 감소함을 알 수 있으나, 흥미롭게도 진폭과 진동주기는 직경의 크기에 따라 일정하게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 이는 스페이스 프레임의 동적거동을 고려한 구조설계 시 적절한 크기의 부재 선정이 매우 중요하다는 것으로 생각될 수 있다.
- (4) HSA800과 SM490 강재를 적용한 리브 돔과 지오데식 돔의 과도응답 분석결과 돔의 형태에 관계없이 항복강도가 감소할 때 최대변위가 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났으며, 진폭과 주기는 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이는 동일한 크기의 과도응답을 얻고자 할 경우, 강재의 강도를 증가시킴으로써 부재의 크기를 줄여 경제적 구조설계를 확보할 수 있다는 것을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 세명대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌(References)

- [1] Karpurapu, R., and Yogendrakumar, M. (1993) A Kinematic Model for Dynamic Analysis of Space Frames, *Computers and Structures*, Elsevier, Vol.47, No.6, pp. 945-955.
- [2] Chan, S.L. (1996) Large Deflection Dynamic Analysis of Space Frames, *Computers and Structures*, Elsevier, Vol. 58, No.2, pp.381-387.
- [3] Qian, J., Ji, X., and Xu, Y. (2007) Two-Stage Damage Diagnosis Approach for Steel Braced Space Frame Structures, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.29, No.12, pp.3277-3292.
- [4] Guo, Y.Q., Chen, W.Q., and Pao, Y.-H. (2008) Dynamic Analysis of Space Frames: the Method of Reverberation-Ray Matrix and the Orthogonality of Normal Modes, *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, Vol.317, pp.716-738.
- [5] 김도환, 김주우, 이동우, 양재근, 이명재(2014) 건축구조용 고성능 강재 HSA800의 효율적 사용을 위한 초고층 건물의 적용성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제5호, pp.463-471.
- Kim, D.H., Kim, J.W., Lee, D.W., Yang, J.G., and Lee, M.J. (2014) Evaluation of Applicability on a High-Rise Building for the Effective Usage of High Performance for Building Structures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.5, pp.463-471 (in Korean).
- [6] ANSYS (2012) *Reference Manual*, Ver. 13.0, ANSYS, Inc., USA.

요 약 : 형태(from), 층(layer), 격자(grid) 등의 요소들이 고려되는 스페이스프레임 구조는 내부기둥 없이 대공간 연출이 가능하고, 대다수의 부재들이 210MPa에서 450MPa의 항복강도를 가진 강재들이 사용된다. 최근 국내에서 용접성과 내진성 및 경제성이 확보하고 제작 효율이 높은 항복강도 690MPa이상의 고강도 강재가 개발되고 있다. 본 연구는 스페이스 프레임 구조시스템에 위와 같은 장점을 가진 고강도 강재를 적용하여 구조물의 동적응답을 알아보기 위한 내용이며, 재료 및 기하학적 비선형성에 의한 스페이스 프레임의 구조적 성능을 해석적으로 규명하고자 한다. 이를 위해 각 형태에 따른 스페이스 프레임 구조물의 모드해석 및 비선형 과도해석 등의 유한요소 해석을 수행하였다.

핵심용어 : 스페이스 프레임, 돔, 고강도 강(HSA800), 모드해석, 비선형 과도해석, 3차원 비선형 유한요소해석
