

하부 구조의 고유 진동수비에 따른 돔 구조의 고유 진동 특성에 관한 연구

A Study on Natural Vibration Characteristics of Dome Structure According to Natural Frequency Ratio of Substructure

박 광 섭*
Park, Kwang-Seob

김 윤 태**
Kim, Yun-Tae

Abstract

Large space structures exhibit different natural vibration characteristics depending on the aspect ratio of structures such as half-open angle. In addition, since the actual large space structure is mostly supported by the lower structure, it is expected that the natural vibration characteristics of the upper structure and the entire structure will vary depending on the lower structure. Therefore, in this study, the natural vibration characteristics of the dome structure are analyzed according to the natural frequency ratio by controlling the stiffness of the substructure. As the natural frequency of the substructure increases, the natural frequency of the whole structure increases similarly to the natural frequency of the upper structure. Vertical vibration modes dominate at 30° and 45°, and horizontal vibration modes dominate at 60° and 90°.

Keywords : Dome structure, Half-open angle, Roof structure, Substructure, Natural frequency, Natural mode

1. 서론

최근 우리나라에 이례적으로 큰 지진들이 나타나고 있다. 2016년 9월 경주의 5.1 규모 지진의 발생부터 2018년 2월 포항의 4.6 규모 지진까지 몇 차례의 크고 작은 지진이 발생하였다. 국제적으로도 2017년 9월 멕시코에서 7.1 규모의 지진이 발생하여 많은 인명피해를 일으킨 바 있다.

대공간 구조물은 극장, 체육관과 같이 구조물의 특성상 많은 인원을 수용하는 목적 외에 지진이나 태풍 등의 국가적 재해·재난 시 피난소로도 이용될 가능성이 높아 구조적 안전성 확보가 더욱 중요한 요소로 작용하게 된다^{1),2)}.

일반 라멘 구조물은 지진에 대해 많은 경험을 축적하고 있는 반면, 대공간 구조물은 다양한 규모와 형상에 따라 그 구조적 특성이 매우 다르며 경험적

으로 예측할 수 없는 요소가 많이 존재한다^{1),2)}. 대공간 구조물은 대부분 돔 형상이며 기본적으로 아치 구조를 내포하고 있다. 따라서 수평 방향의 지반 진동에 대해서 수평 방향 응답과 수직 방향 응답이 나타나고, 수직 방향 지반 진동에 대해서도 수직 방향 응답뿐만 아니라 수평 방향 응답도 나타난다. 이러한 수직, 수평 방향 응답의 정도는 돔 구조의 반개 각이나 높이-경간비 등에 따른 진동 모드에 의해 결정된다³⁾.

또한 실제 대공간 구조물은 대부분 하부 구조에 의해 지지된다. 비교적 장경간을 이루는 상부의 돔 구조물은 고유 진동수가 작은 연성 구조물이며, 지지하는 하부 구조물은 상부 돔 구조물에 비해 상대적으로 고유 진동수가 큰 강성 구조물로 구분할 수 있다. 상부와 하부 구조물간의 고유 진동수 차이로 인해 전체 구조물의 고유 특성이 변하게 될 것을 예상할 수 있다⁴⁾.

상부 돔 구조의 형상에는 리브 돔, 래티스 돔, 지오데식 돔 등이 있으며, 돔 형상에 따라 구조물의 질량과 고유 진동수가 다르게 나타날 것이다. 이러한 차이 또한 전체 구조물의 고유 특성을 변화시

* 교신저자, 정회원, (주)보루 이사
Boru E&C
Tel: 053-742-6411 Fax: 053-742-6413
E-mail: parkks@borueng.co.kr

** 정회원, (주)보루 대표이사
Boru E&C

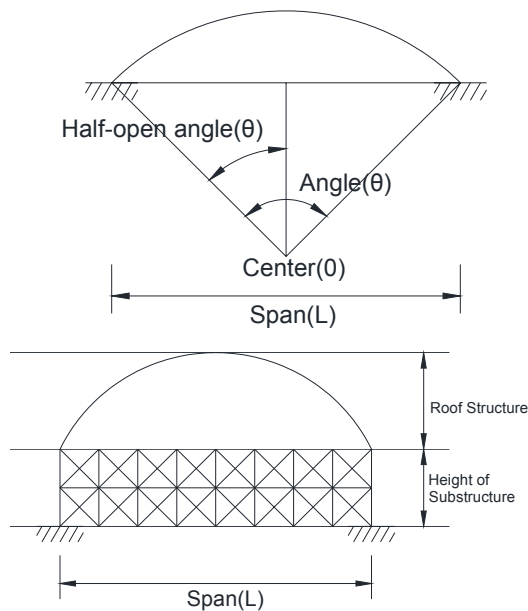
키는 한 요소가 될 것으로 예상된다. 따라서 하부 구조에 따른 고유 진동 특성을 파악하는 것이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 돔 하부 구조의 고유 진동수비에 따라 돔 형상별로 모델링하여 고유치 해석을 수행하였으며, 각 구조물의 주요 고유 벡터와 고유 진동수를 비교하였다.

2. 해석 모델의 개요

2.1 해석 모델의 주요 변수 설정

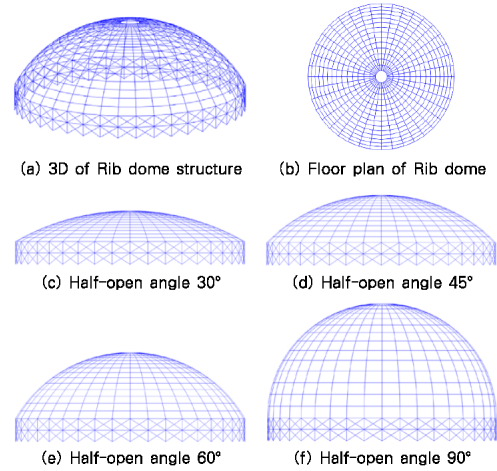
해석 모델의 형상 변수는 <Fig. 1>과 같이 지붕 구조의 반개각을 30°, 45°, 60°, 90°로 설정하였고, 경간(L)은 100m로 모델링하였다. 하부 구조의 높이(H)는 10m의 기둥으로 모델링하였다. 지붕 구조로 사용된 돔의 형상은 리브 돔, 래티스 돔, 지오데식 돔으로 선정하였다.



<Fig. 1> Shape parameters of dome structure

<Fig. 2>에 나타낸 것은 3차원에서 리브 돔 형상과 평면도, 반개각 30°, 45°, 60°, 90°를 모델링한 것이다. 래티스 돔과 지오데식 돔의 모델링도 리브 돔과 같은 방식으로 하였다.

해석 모델의 상부 돔 구조는 하부 기둥에 의해 지지되고 일체화 되어 있다. 따라서 하부 구조의 특성



<Fig. 2> Analysis model (Rib dome)

변화에 따라 지붕 구조의 거동 양상을 알아볼 수 있을 것이다.

2.2 해석 모델의 1차 고유 진동수 산정

본 논문에서 주요 변수인 고유 진동수를 산정함에 있어 상부 돔 구조와 하부 구조를 따로 나누어 1차 모드 진동수를 산정하였다. 상부 돔 구조와 하부 구조의 1차 모드 진동수 산정에서 지점을 모두 고정 단으로 하여 산정하였다. 1차 모드 진동수를 산정함에 있어서 Yoon & Park(2009)이 국내외 장스팬 구조물의 고유 진동수를 비교한 연구⁵⁾에서 정리한 식을 이용하였다.

$$f = -0.39 \ln(L) + 2.646 \quad (1)$$

$$f = -0.57 \ln(L) + 3.776 \quad (2)$$

$$f = -0.49 \ln(L) + 3.309 \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{0.007L} \quad (4)$$

여기서, f =고유 진동수(Hz), L =경간(m)

식 (1)은 국내 공간 구조물을 토대로 제안한 식이고, 식 (2)~(4)는 일본의 건축학회에서 제안한 식과 일본의 건축물 진동을 분석하여 얻은 고유 진동수에 대한 식이다. 일본에서 제안한 식은 일본 건축학회에서 제안한 도표를 이용하여 만든 식이고, 진동을 분석하여 제안된 식은 준공 후 몇 년이 경과된

후의 데이터를 이용하여 산정된 식이다. 그러므로 본 논문은 4가지 식 중 국내 공간 구조물을 분석하여 제안한 식 (1)을 토대로 1차 모드 진동수를 산정하였다. 이때 1차 모드 진동수를 0.85Hz로 하였다.

해석 모델의 부재로 상부 돔 구조물 전체와 하부 구조의 기둥 및 보는 원형 강관으로 SM490에 $\phi 500 \times 14$ 를 사용하고, 하부 구조의 브레이스는 SM490에 $\phi 165.2 \times 5$ 를 사용하였다. 상부 돔 구조와 하부 구조의 진동수를 조절하기 위해 <Table 1>, <Table 2>와 같이 탄성계수를 변경하였다.

<Table 1> Specification of dome structure

Upper dome structure				
Span (m)	Dome shape	Half-open angle (deg)	Modulus of elasticity (N/mm ²)	Member
100	Rib	30	9.3323E+04	$\phi 500.0^*$
		45	7.6529E+04	
		60	8.5082E+04	
		90	2.1703E+05	
	Lattice	30	7.5690E+03	$\phi 500.0^*$
		45	4.4414E+03	
		60	3.8080E+03	
	Geodesic	90	6.6210E+03	14
		30	6.9902E+03	
45		3.8243E+03		
60		3.2047E+03		
		90	5.3320E+03	

<Table 1>은 상부 돔 구조의 제원을 나타내었고, <Table 2>는 하부 구조 중 리브 돔 반개각 30°일 때의 제원을 나타내었다. 래티스 돔과 지오데식 돔에서 반개각에 따른 제원 또한 <Table 2>에서와 같이 조정하였다. 앞에서 산정한 1차 고유 진동수인 0.85Hz를 상부 돔 구조의 1차 고유 진동수로 하고, 하부 구조의 1차 고유 진동수는 상부 돔 구조 1차 고유 진동수의 배수로 증가시켜 10배수까지 10개의 해석 모델을 형성하였다. 본 논문에서는 1차 모드 진동수를 고려하여 이에 따른 고유 모드 해석을 하고자 한다. 해석 모델의 해석은 MIDAS Gen 2017을 사용하였고, 질량은 구조체의 자중만 고려하였다.

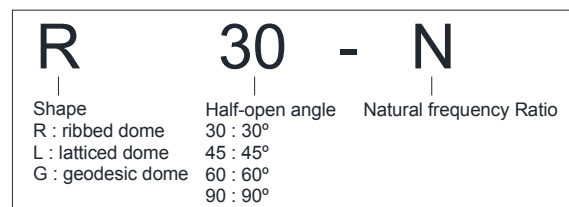
<Table 2> Specification of rib dome substructure

Half-open angle (deg)	Substructure			
	Modulus of elasticity		Member	
	Column & Girder	Brace	Column & Girder	Brace
30	5.0544E+02	2.0500E+05		
	5.8386E+03	2.0500E+05		
	2.0789E+04	2.0500E+05		
	5.4267E+04	2.0500E+05		
	1.2013E+05	2.0500E+05	\emptyset	\emptyset
	2.2489E+05	2.0500E+05	500.0*14	165.2*5
	3.6892E+05	2.0500E+05		
	5.6641E+05	2.0500E+05		
	8.1693E+05	2.0500E+05		
	1.1286E+06	2.0500E+05		

각각의 해석 모델은 상부 돔 구조와 하부 구조의 진동수비에 따라 전체 구조물의 진동수 또한 달라진다. <Table 3>은 반개각 30° 리브 돔의 상부, 하부 구조의 1차 고유 진동수와 전체 구조물의 1차 고유 진동수를 나타내었다. 해석 모델은 <Fig. 3>과 같이 명명하였다.

<Table 3> First natural frequency of rib dome

Analytical model	Natural frequency		
	Upper	Sub	Total
R30-N		0	0.85
R30-1		0.85	0.7335
R30-2		1.70	0.7643
R30-3		2.55	0.7928
R30-4		3.40	0.8149
R30-5	0.85	4.25	0.8283
R30-6		5.10	0.8354
R30-7		5.95	0.8392
R30-8		6.80	0.8416
R30-9		7.65	0.8433
R30-10		8.50	0.8444



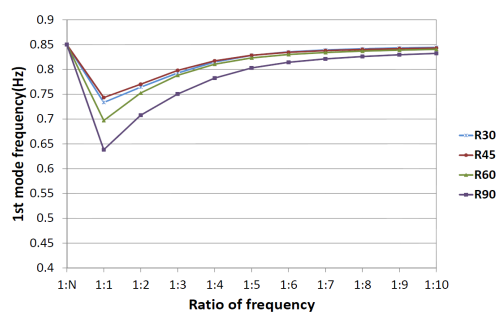
<Fig. 3> Name of analysis model

3. 해석 모델의 고유 진동수

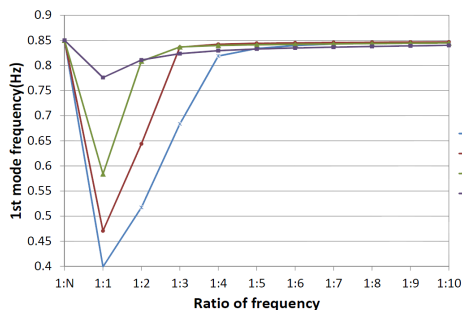
3.1 해석 모델의 1차 고유 진동수

상부 돔 구조를 지지하는 하부 기둥의 1차 고유 진동수를 1배에서 10배까지 변화시켜 상부와 하부 구조물의 진동수비를 조절하였을 경우 고유 특성에 대해 분석하였다. 본 절에서는 해석 모델의 1차 고유 진동수와 최대 고유 벡터가 발생하는 모드 시 고유 진동수를 비교 분석하였다.

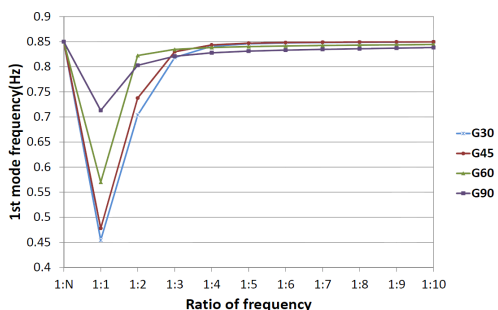
<Fig. 4>는 해석 모델의 1차 고유 진동수를 분석하기 위해 돔 형상별로 하부 구조의 1차 고유 진동수를 변화시켜 전체 구조물의 1차 고유 진동수를 나타내었다.



(a) Rib dome



(b) Lattice dome



(c) Geodesic dome

<Fig. 4> First natural frequency of analysis model

기둥이 없는 구조의 진동수에 비해 기둥이 있는 전체 구조물의 1차 고유 진동수가 더 작은 것으로 나타났다. 하부 구조의 강성을 크게 함에 따라 1차 고유 진동수가 증가한다. 이것은 하부 구조의 강성을 증가시키는 것으로 1차 고유 진동수가 커짐에 따라 기둥이 없는 구조 즉, 상부 돔 구조물을 지반에 직접 지지시킨 것과 유사한 조건으로 변하기 때문에 전체 구조물의 1차 고유 진동수는 기둥이 없는 구조의 진동수에 근사하다. 이때 하부 구조의 진동수가 상부 돔 구조의 진동수의 5배 이상일 때부터 그래프의 형상이 평탄하게 나타나고 있다.

래티스 돔과 지오데식 돔에서 상부 돔 구조와 하부 구조의 진동수비가 1:1인 경우에는 반개각 90°인 해석 모델의 1차 고유 진동수가 가장 크게 나타나지만, 기둥의 진동수가 증가함에 따라 반개각에 따른 1차 고유 진동수의 크기 순서가 변화되고 있다. 특히 상부 돔 구조와 하부 구조 진동수비 1:5 이후에는 1차 고유 진동수의 크기 순서가 완전히 바뀌는 것을 알 수 있다. 또한, 반개각 30°인 경우 1차 고유 진동수의 증가율이 1:1부터 1:5에서 가장 크게 나타나고 있다. 하지만 리브 돔에서는 다른 2가지 돔 형상과는 다르게 진동수의 비율이 1:1일 때부터 1:10까지 대체적으로 역전 현상이 없이 유지되는 것을 볼 수 있다. 즉, 1:1의 반개각 90°일 때 가장 작은 1차 고유 진동수를 나타내고 1:10까지 반개각 90°가 가장 작은 1차 고유 진동수를 유지하는 것으로 나타난다. 따라서 1:1인 경우에는 모든 돔의 해석 모델에서 공통적으로 반개각 30°일 때 가장 큰 1차 고유 진동수를 가지고, 반개각 90°일 때 가장 작은 1차 고유 진동수를 가지고 있는 것으로 나타난다.

3.2 해석 모델의 최대 고유 진동수

<Table 4>는 최대 고유 벡터가 나타나는 모드에서의 고유 진동수를 나타내고 각각의 반개각에서 수평 방향과 수직 방향의 최소 및 최대 고유 진동수를 나타내었다. 또한 반개각에서 최소 및 최대 고유 진동수의 수평 방향, 수직 방향 증가율을 표시하였다.

<Table 4> Natural frequency at maximum eigenvector mode

Model	Frequency		Rate of increase (%)	Model	Frequency		Rate of increase (%)	Model	Frequency		Rate of increase (%)
	Horizontal	Vertical			Horizontal	Vertical			Horizontal	Vertical	
R30-N	2.2600	3.2937	Horizontal 15.5%	L30-N	1.1931	1.3311	Horizontal 24.1%	G30-N	0.9913	1.2176	Horizontal 100.3%
R30-1	1.9336	1.5705		L30-1	1.1861	1.0281		G30-1	0.5915	1.2043	
R30-2	1.9982	3.0805		L30-2	1.2125	1.0427		G30-2	1.1705	1.2389	
R30-3	2.0858	3.2499		L30-3	1.2717	1.3694		G30-3	1.1849	1.2634	
R30-4	2.1518	3.2933		L30-4	1.0245	1.3882		G30-4	1.0226	1.2875	
R30-5	2.1891	3.5050		L30-5	1.0313	1.4005		G30-5	1.0293	0.8457	
R30-6	2.2076	3.5463		L30-6	1.0354	1.4100		G30-6	1.0329	0.8475	
R30-7	2.2176	3.6033		L30-7	1.0379	1.4186		G30-7	1.0349	1.2028	
R30-8	2.2242	3.6788		L30-8	1.0396	1.4268		G30-8	1.0361	1.2079	
R30-9	2.2290	3.1085		L30-9	1.0409	1.2697		G30-9	1.0370	1.2112	
R30-10	2.2329	3.1698	L30-10	1.0419	1.2839	G30-10	1.0384	1.2150			
R45-N	3.9735	3.6567	Horizontal 142.2%	L45-N	1.0399	1.2020	Horizontal 3.4%	G45-N	1.0246	0.8500	Horizontal 7.8%
R45-1	1.5714	1.5658		L45-1	0.9955	1.0774		G45-1	0.9481	0.8642	
R45-2	2.3860	2.7077		L45-2	1.0181	1.0146		G45-2	1.0033	0.8868	
R45-3	1.7075	2.8349		L45-3	1.0008	1.0412		G45-3	1.0112	0.8299	
R45-4	3.0279	2.9472		L45-4	1.0105	1.0958		G45-4	1.0151	0.8435	
R45-5	3.0830	3.0204		L45-5	1.0170	1.1765		G45-5	1.0173	0.8470	
R45-6	3.1174	3.0581		L45-6	1.0211	1.1898		G45-6	1.0188	0.8483	
R45-7	3.1391	3.7381		L45-7	1.0238	1.1947		G45-7	1.0198	0.8490	
R45-8	1.8009	3.7705		L45-8	1.0260	1.1970		G45-8	1.0206	0.8493	
R45-9	3.7897	3.0966		L45-9	1.0277	1.1984		G45-9	1.0213	0.8495	
R45-10	3.8066	3.1014	L45-10	1.0292	1.1992	G45-10	1.0218	0.8496			
R60-N	4.0273	3.1816	Horizontal 96.9%	L60-N	1.1723	1.1907	Horizontal 10.8%	G60-N	1.1205	0.9109	Horizontal 3.9%
R60-1	1.7563	1.6500		L60-1	1.0501	1.1529		G60-1	1.0765	0.9446	
R60-2	2.7212	2.6684		L60-2	1.0650	1.1692		G60-2	1.0942	0.9881	
R60-3	2.7722	2.8504		L60-3	1.0840	1.1451		G60-3	1.1041	0.8934	
R60-4	3.3659	2.9983		L60-4	1.0967	1.1710		G60-4	1.1092	0.9037	
R60-5	3.4215	3.0803		L60-5	1.1041	1.1784		G60-5	1.1122	0.9073	
R60-6	3.4579	3.1185		L60-6	1.1556	1.1818		G60-6	1.1143	0.9089	
R60-7	2.4524	3.1376		L60-7	1.1584	1.1838		G60-7	1.1158	0.9097	
R60-8	2.4629	3.1491		L60-8	1.1605	1.1852		G60-8	1.1168	0.9101	
R60-9	2.9170	3.1565		L60-9	1.1623	1.1862		G60-9	1.1175	0.9103	
R60-10	2.9337	3.1616	L60-10	1.1638	1.1870	G60-10	1.1187	0.9104			
R90-N	3.9783	4.4250	Horizontal 97.9%	L90-N	1.6155	1.6155	Horizontal 38.2%	G90-N	1.5072	1.4124	Horizontal 9.6%
R90-1	2.2087	1.9564		L90-1	1.1672	1.5111		G90-1	1.3748	1.4218	
R90-2	3.1051	1.9493		L90-2	1.4737	1.5555		G90-2	1.4935	1.3966	
R90-3	3.5926	3.1110		L90-3	1.5889	1.5889		G90-3	1.5011	1.4069	
R90-4	3.7043	3.1795		L90-4	1.5996	1.5995		G90-4	1.5037	1.4097	
R90-5	3.9512	3.2252		L90-5	1.6048	1.6048		G90-5	1.5049	1.4109	
R90-6	4.1284	3.2530		L90-6	1.5474	1.6077		G90-6	1.5055	1.4115	
R90-7	3.6472	4.1945		L90-7	1.5487	1.6096		G90-7	1.5059	1.4118	
R90-8	4.3720	4.2211		L90-8	1.6109	1.6109		G90-8	1.5062	1.4119	
R90-9	3.9281	4.2459		L90-9	1.6118	1.6118		G90-9	1.5064	1.4120	
R90-10	3.9722	4.2686	L90-10	1.6125	1.6125	G90-10	1.5065	1.4121			

먼저, <Table 4>에서 모델링을 반개각에 따라 나누어 비교 분석하였다. 모든 돔 형상의 30°에서는 최대 진동수를 수평과 수직 방향을 비교하였을 때 수직 방향이 크게 나타나고 있다. 하지만 90°로 반개각이 커짐에 따라 수평과 수직 방향의 최대 진동

수 차이가 줄어들고, 대부분의 모델링에서 60° 이상 일 때부터 수평 방향이 수직 방향보다 큰 것으로 나타나고 있다.

돔 형상에 따라 비교하였을 때 대체적으로 리브 돔의 증가율이 다른 돔의 증가율보다 높으며, 상부

에 대한 하부의 진동수비에 따라 최대 진동수의 변동이 잦은 것으로 나타난다.

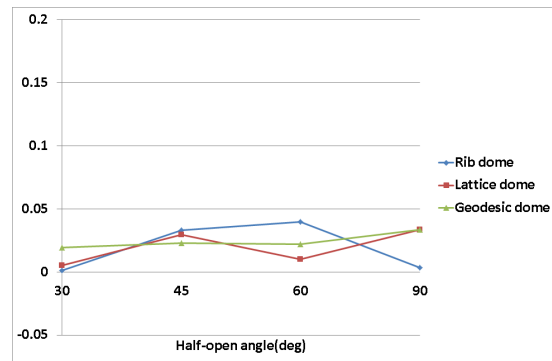
4. 해석 모델의 고유 벡터

앞 장에서는 해석 모델의 1차 고유 진동수와 최대 벡터가 발생하는 모드의 고유 진동수 2가지를 기준으로 분석하였다. 본 장에서는 해석 모델의 고유 벡터에 대하여 분석하고자 한다. 먼저 1차 모드에서의 최대 고유 벡터를 분석하기 위해 하부 구조가 없는 모델인 R30-N, R45-N, R60-N, R90-N, L30-N, L45-N, L60-N, L90-N, G30-N, G45-N, G60-N, G90-N을 비교하였다.

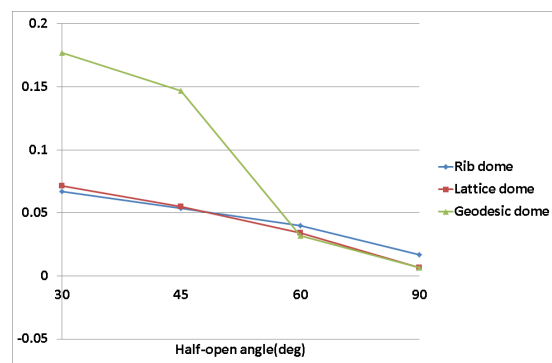
<Fig. 5>는 리브 돔, 래티스 돔, 지오데식 돔의 반개각에 따른 수평 및 수직 최대 고유 벡터, 수직과 수평 최대 고유 벡터의 차를 나타낸 것이다.

1차 모드에서 수평 최대 고유 벡터는 반개각이 증가함에 따라 대체적으로 증가하고 있는 것으로 보여지는 반면, 수직 최대 고유 벡터는 반개각에 따라 감소하고 있는 것으로 나타나고 있다. 또한 수직과 수평의 최대 고유 벡터의 차는 전반적으로 감소하는 형태를 나타내고 있다. 따라서 반개각이 작아질수록 수직 진동 모드의 영향이 증가하고, 반개각이 커질수록 수평 진동 모드의 영향이 증가하는 것으로 나타난다.

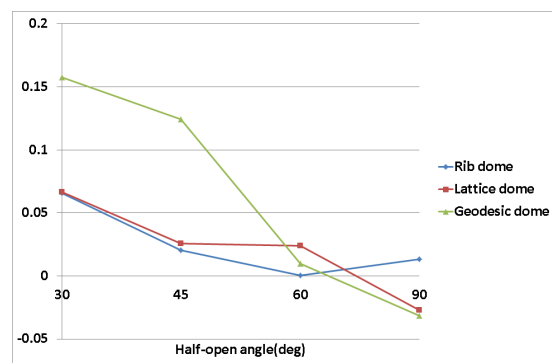
1차 모드 수평 방향 최대 고유 벡터는 반개각의 크기에 따라 30°와 90°가 큰 차이를 보이고 있지 않지만, 1차 모드 수직 방향 최대 고유 벡터는 반개각의 크기에 따라 30°와 90°의 차이가 크게 나타나고 있음을 보여준다. 또한 수평과 수직 방향의 1차 모드 최대 고유 벡터를 돔 형상에 따라 비교하였을 때 수평 방향의 1차 모드 최대 고유 벡터는 반개각이 커짐에 따라 돔 형상별 변동의 정도가 크지 않다. 반면 수직 방향의 1차 모드 최대 고유 벡터의 변동이 크게 나타났다. 또한 다른 돔 형상에 비하여 지오데식 돔에서 반개각이 30°에서 90°로 커짐에 따른 1차 모드 최대 고유 벡터의 수직과 수평 차이의 변동이 많이 나타나고 있다. 돔 형상에 따라 수직과 수평 차이의 변동 정도는 지오데식 돔, 래티스 돔, 리브 돔 순으로 적게 나타나고 있다.



(a) Horizontal



(b) Vertical

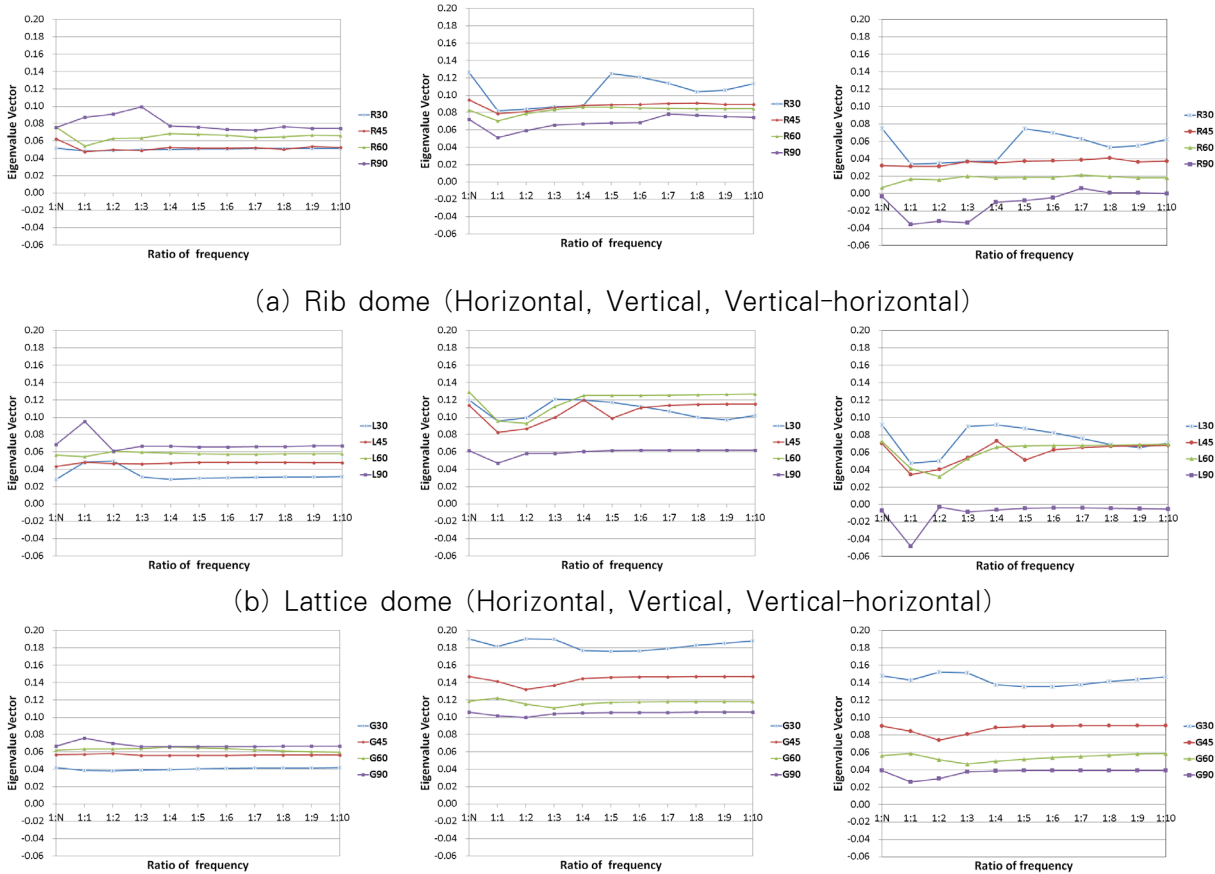


(c) Vertical-horizontal

<Fig. 5> First mode maximum eigenvector

상부 돔 구조물과 하부 구조물의 진동수비에 따른 최대 고유 벡터를 돔 형상에 따라 비교 분석하였다. <Fig. 6>은 리브 돔, 래티스 돔, 지오데식 돔의 하부 구조 진동수에 따라 최대 고유 벡터를 수평, 수직, 수직과 수평의 차를 그래프로 나타낸 것이다.

<Fig. 6>의 그래프에서 지오데식 돔을 제외한 나머지 돔 형상의 수평 최대 고유 벡터와 수직 최대 고유 벡터를 비교했을 때 반개각 90°를 제외하고 수



(a) Rib dome (Horizontal, Vertical, Vertical-horizontal)

(b) Lattice dome (Horizontal, Vertical, Vertical-horizontal)

(c) Geodesic dome (Horizontal, Vertical, Vertical-horizontal)

〈Fig. 6〉 Maximum eigenvector according to ratio

평 최대 고유 벡터가 수직 최대 고유 벡터보다 낮게 나타나고 있다. 리브 돔, 래티스 돔 및 지오데식 돔을 비교했을 때 대부분의 상부에 대한 하부의 진동수비에서 최대 고유 벡터 차이가 지오데식 돔, 래티스 돔, 리브 돔 순으로 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 지오데식 돔은 다른 돔에 비해 수직 진동의 지배를 많이 받고 있으며, 리브 돔은 수평 진동의 지배를 많이 받고 있는 것으로 예상된다.

최대 수평 고유 벡터는 반개각에 따라 90°에서 가장 크며 30°에서 가장 작은 것을 볼 수 있다. 반면 최대 수직 고유 벡터는 반개각의 크기가 작을수록 크게 나온 것을 볼 수 있다. 또한 수직과 수평의 최대 고유 벡터 차에서 하부 구조의 진동수 변화에 따라 전반적으로 반개각이 작을수록 최대 고유 벡터의 차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 선행 연구의 리브 돔과 래티스 돔에서 나타난 것과 같이 지오데식 돔에서도 반개각의 크기가 작을수록

수직 진동의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 또한 1차 모드 최대 고유 벡터에서 나온 결과인 반개각의 크기가 작을수록 수직 진동의 영향을 많이 받는 것과 같다.

상부에 대한 하부의 진동수비에 따른 최대 고유 벡터에서도 1차 모드 최대 고유 벡터에서 수직과 수평의 변동 정도 결과와 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 세 종류의 상부 돔 구조와 하부 구조의 특성 변화에 따른 상부 돔 구조의 고유 진동 특성을 분석하였다. 상부 돔 구조를 기준으로 하부 구조의 고유 진동수를 조정함으로써 고유 진동 특성을 분석하였으며, 하부 구조물의 고유 진동수는 구조물의 탄성계수를 조절하여 상부 돔 구조의 고

유 진동수의 1에서 10배까지 조정하였다. 또한 상부 돔 구조는 반개각을 조정한 돔 구조를 이용하여 분석하였다.

1) 해석 모델의 1차 고유 진동수 분석을 통해 하부 구조의 진동수비가 증가할수록 하부 구조가 없는 모델과 유사하게 거동되며, 진동수비가 1:5부터 유사하게 나타난다. 그러므로 최적의 진동수비는 1:5로 판단된다. 또한 전반적으로 1:1에서 1:5 사이의 모델에서는 반개각 30°의 고유 진동수가 작게 나타나며, 이후 점차 역전되어 1:10 모델에서는 반개각 90°의 고유 진동수가 작게 나타남을 볼 수 있다.

2) 해석 모델의 최대 고유 벡터를 분석한 결과, 반개각의 크기에 따라서 30°에서 90°로 커지면 수직 진동 영향이 작아지고, 수평 진동 영향이 커지는 것으로 나타났다. 또한 돔 형상에 따라 분석한 결과, 지오데식 돔이 다른 돔에 비해 반개각이 커짐에 따라 1차 모드 최대 고유 벡터의 수직과 수평 차의 변화가 크게 나타난다.

3) 해석 모델의 최대 고유 벡터가 나타나는 모드에서의 고유 진동수를 비교한 결과, 돔 형상에 관계 없이 30°에서의 고유 진동수는 수직 방향이 크게 나오며 90°에서의 고유 진동수는 수평 방향이 크게 나와 반개각이 커짐에 따라 수평 진동 모드의 영향이 커지는 것으로 판단된다. 하지만 리브 돔의 경우 다른 돔에 비해 수평과 수직 방향의 증가율이 높으며, 하부의 고유 진동수 변화에 따라 최대 고유 진동수의 변동이 많이 나타난다.

향후 하부 구조와 상부 돔 구조의 형상 변화를 통한 다양한 연구가 필요할 것으로 예상된다. 또한 지진파를 적용하였을 때의 동적 응답 특성에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. Jung, C. W., Park, S. M., & Kang, J. W., "A Study on the Seismic Response of Arch Structures Using Artificial Earthquake Ground Motions", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.6, pp.59~66, 2008
2. Jung, C. W., Seok, K. Y., & Kang, J. W., "Natural Frequency Analysis of Arch by Galerkin's Method", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.7, No.4, pp.55~61, 2007
3. Jung, C. W., "A Proposal of Quasi Static Seismic Force for Arches subjected to both the Horizontal and Vertical Seismic Wave", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.7, No.6, pp.103~110, 2007
4. Seok, K. Y., & Kang, J. W., "Dynamic Response of Arch Structure according to Natural Frequency Ratio between Arch and Columns", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.13, No.3, pp.65~72, 2013
5. Yoon, S. W., & Park, Y., "Comparison of Natural Frequency of Domestic and Foreign Long-spanned Structure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.9, No.1, pp.79~85, 2009

- Received : June 29, 2018
- Revised : July 12, 2018
- Accepted : July 13, 2018