

공기로 지지되는 수직 아치의 구조거동에 관한 연구

A study on the structural behaviors of air-pressurized vertical arch

김 재 열* 이 장 복** 권 택 진***
Kim, Jae-Yeol Lee, Jang-Bok Kwun, Taek-Jin

ABSTRACT

The structural behaviors of a arch composed of flexible membrane are investigated. The membrane is considered as thin shell with internal pressure during FEM analysis by using ABAQUS. In the paper, a wind load and uniformly distributed vertical load are considered. As a vertical load, snow loads including applied over all and half of the structure are introduced. The ends of arch are fixed to the ground. Load-Deflections relationship, buckling mode of the structure are presented.

1. 서 론

막구조물의 종류에서 공기지지 지붕 구조물은 지붕을 지지하기 위해서 지속적으로 공기를 공급해야 할 필요가 있다. 또 다른 막 구조물들은 철골이나 알루미늄과 같은 강제 프레임을 가지는 경우가 있다. 이러한 막 구조물중에서 운송과 설치라는 면에서 장점을 가진 공기팽창식 텐트형 구조물을 고려할 수 있다. 이 건물을 구성하는 요소중에서 지지부를 담당하고 있는 공기팽창식 아치에 대한 연구는 전체 연구에서 중요한 부분을 차지하고 있다. Kawaguchi(1971)은 두 개의 공기팽창식 구조의 기본적인 형태를 정의하였다. 그 첫 번째는 돔 구조물과 같이 공기압이 전체적으로 작용하는 형식이다. 이 형식은 공기 누출이 발생하기 때문에 낮은 압력의 공기압을 지속적으로 공급해야 한다. 또 다른 형태는 공기로 지지되는 보(air beam)이다. 이러한 보 구조에서는 양단이 봉해져 있는 한 외부 하중을 지탱 할 수 있는 만큼의 고압의 공기가 누출 없이 유지 될 수 있다. 후자의 경우가 적은 재료의 사용 및 공기유지 비용이라는 측면에서 장점을 가진다. 그러나 이 경우의 문제점은 아치 부분의 직경이 외부 하중에 의해 변형될 수 있다는 것이다. Kawabata 와 Ishii(1994)는 공기 팽창식(air-inflated) 구조물의 재하능력에 대해 연구하였다. 이들은 단순지지 보 와 반 구형 아치에 있어서 다양한 내부압에 대한 구조거동을 조사하였다. Steeves(1979)는 그의 연구에서 공기로 팽창시켜 안정화된 프레임등으로 지지되어 구성되는 공기 팽창식 리브의 개념에 대해 발표하였다. 이러한 구조물들은 경량 막으로 이루어져 있으며 접을 수 있고 운송 및 펼침이 간단하다. Krainski(1988)는 두 개의 공기 팽창식 아치의 거동을 조사했으며, 무게, 처짐, 내압등에 대한 장 단점을 비교 분석하였다. Hou(1996)는 두 개의 경사진 아치가 기대어 구조체를 이루는 형식의 아치에 대해서 연구하였다. 모델은 평면으로부터 수직 한 선에 대해 각각 10° , 20° , 30° 의 각을 이루는 아치에 대해 해석하였다.

* 성균관대학교 과학기술연구소 특별연구원
** 성균관대학교 건축공학과 박사과정
*** 성균관대학교 건축공학과 교수

본 연구는 1998년도 초대형 구조시스템 연구센터 (STRESS)의 연구비지원에 의한 연구 결과임

Hou는 14가지의 하중 조건에 따른 아치의 좌굴 현상과 기대있는 두 아치간의 접촉 거동에 대한 결과를 발표하였다. 이 경우 모델의 형상은 반 구형을 이루고 있으며 고체임을 가정하여 보 요소를 이용하였다.

텐트를 지지하는 아치의 형태는 수직으로 지지하는 형식과 두 개의 아치가 서로 기대는 형식이 있다. 본 연구에 있어서는 개구부를 가지며 공기팽창식 아치로 지지된 텐트형구조물을 고려하여 이 구조물의 지지부인 공기 팽창식 수직 아치에 대한 연구를 수행하였다. 이들과 같은 운송가능 구조물들은 다양한 분야에 있어서 응용이 가능하고 특히 대규모 야전용 군용텐트 및 트럭, 항공기를 격납할 수 있는 구조물로써 매우 유용하게 이용될 수 있다. 또한, 홍수, 지진 그리고 태풍과 같은 재난시 피난처로도 이용될 수 있다. 컴팩트하게 접혀진 단위 모듈들은 이 구조물이 필요시 되는 어느 곳이든지 이동되어 쉽게 펼쳐 세울 수 있다. 공기팽창식 아치 튜브를 이용한 종전의 많은 연구들은 막이론을 이용하곤 하였다. 그러나 본 연구에서 고려하고 있는 것과 같은 대규모 텐트구조물에서는 높은 내압을 받고 있기 때문에 재료의 휨강성을 어느 정도는 보장 받을 수 있기 때문에 쉘 이론을 적용하여 해석을 수행하였다.

2. 기본 가정

본 논문의 전 해석과정은 상업용 패키지 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 데이터 입력 및 해석 수행과정의 고려사항들은 다음과 같다.

2.1 해석의 종료

- 1) 하중-진동수 그래프에 있어서 분기점에 도달했을 경우
- 2) 하중-진동수 곡선에서 극한점에 도달 했을 경우
- 3) 처짐이나 하중량이 과다하게 커졌을 경우
- 4) 국부 좌굴이 일어나 하중중분이 너무 작아졌을 경우

2.2 재료

- 1) 아치재료는 선형 탄성이며 등방성이다.
- 2) 실제 모델이 매우 크기 때문에 자중 고려(중량밀도 $1440kg/m^3$)

2.3 기하학적 비선형성

본 논문에서 채택한 모델은 구조물의 크기, 재료의 성질, 단면적에 비해 상대적으로 작은 두께등에 의해 매우 유연하다. 그러므로 대변형을 일으키게 되며, 이것을 고려하기 위해 기하학적 비선형이 고려된다.

3. 매쉬 분할

본 논문에 채택된 아치의 매쉬를 분할하기 위해서 mathematica(Wolfram, 1993)를 이용하였다. 프로그래밍을 위한 식들은 다음과 같다.

$$s_i = (i \cdot s_0) \quad (1)$$

$$s_0 = \int_0^{x_0} \sqrt{1 - z'(x)^2} dx \quad (2)$$

$$z_i = z(x_i) \quad (3)$$

$$\sin \gamma_i = \frac{z'(x_i)}{\sqrt{a + z'(x_i)^2}} \quad (4)$$

$$\cos \gamma_i = \frac{1}{\sqrt{a + z'(x_i)^2}} \quad (5)$$

$$\Phi_j = \frac{j}{m} 2\pi \quad (6)$$

$$x_{ij} = x_i + r \cdot \sin \gamma_i \cdot \cos \Phi_j \quad (7)$$

$$y_{ij} = r \cdot \sin \Phi_j \quad (8)$$

$$z_{ij} = z_i + r \cdot \cos \gamma_i \cdot \cos \Phi_j \quad (9)$$

여기에서,

n : 아치의 원호 방향의 분할 수

i : 아치의 원호 방향의 i 번째의 분할

s_i : 아치의 i 번째 원호의 길이

s_0 : 아치의 전체 원호의 길이

$z(x)$: 아치의 형상을 결정하는 함수

x_0 : $z(x)$ 의 첫 번째 양의 근

x_i : 아치의 i 번째 점의 x 좌표, $\int_0^{x_i} \sqrt{1 - z'(x)^2} dx - s_i = 0$ 의 첫 번째 양의 근

r : 아치 단면의 직경

γ : 단면과 수직선과 이루는 각

Φ : 아치 단면의 각 ($0 \leq \Phi \leq 2\pi$)

m : 아치의 단면의 분할 수

j : 아치 단면 방향의 j 번째 분할

x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} : 아치의 임의 점에서의 좌표

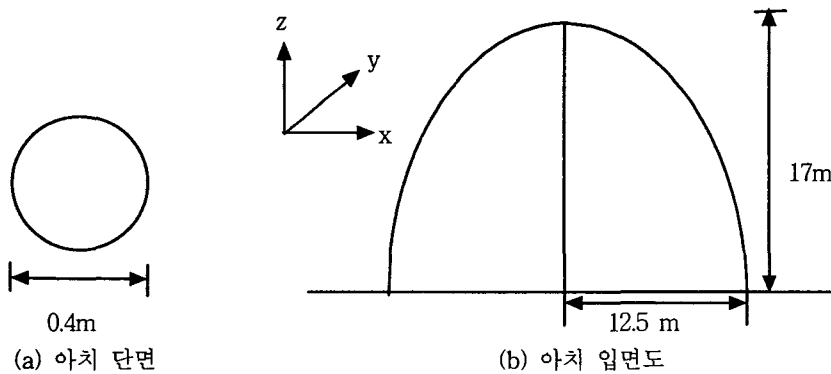


그림 1: 해석 모델

4. 수직 아치의 해석

그림 1과 같은 모델에 대해서 표-1의 제원을 고려하여 해석을 수행한다. 하중으로는 대칭으로 작용하는 雪荷重, 비대칭으로 작용하는 雪荷重 그리고 임의의 風荷重을 고려하였다. 또한, 앞서 언급한 외력들을 고려한 해석이 진행되기 전 아치의 내부에 500 kPa(72.5 psi) 内部壓을 적용시킨다. 내부압이 작용하면 처음 도입한 모델보다 단면의 크기가 커지게 된다.

표-1. 해석 모델의 제원

평면 스패	25 m
아치 높이	17 m
아치 형태	포물형 $\left(z(x) = 17 - \left(\frac{17}{12.5^2}\right)x^2\right)$
단면 반경	0.4 m
아치의 두께	0.00025 m
탄성계수	7Gpa(1015 ksi)
프와송비	0.3
중량 밀도	1440kg/m ³
경계 조건	양단 고정
분할 요소 수	4800(m=24, n=20)
요소 형태	S4R

4.1 雪荷重(對稱)

아치 전체적으로 일정한 각도에 설 하중이 작용한다고 고려하여 해석을 수행한다(그림 2). 雪荷重은 수직 하중이기 때문에 아치 정상부의 수직 처짐(z 방향)만을 알아본다.

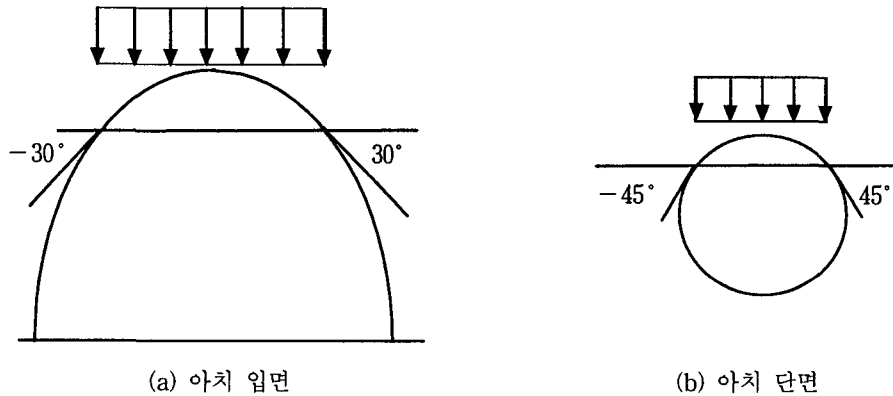


그림 2: 대칭으로 작용하는 설하중

4.2 雪荷重(非對稱)

그림 2에서 아치의 반쪽 부분에서만 일정한 각도 위에 설 하중이 작용한다고 고려하여 해석을 수행한다. 비 대칭인 경우 편심 하중에 의한 변형이 생기므로 x, z 방향의 변형을 알아본다.

4.3 風荷重

풍하중은 다양하게 가정할 수 있지만, 본 논문에서는 풍하중이 코사인 형상으로 작용한다고 가정하여 해석을 진행한다.

$$k(\theta) = \cos \theta \quad (10)$$

원형 아치에 있어서 θ 에 관한 식은 다음과 같이 x 좌표에 관한 식으로 변환시킬 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{1}{z'(x)}\right), \quad (0 \leq \theta \leq \pi/2) \quad (11)$$

$$\theta = \pi + \tan^{-1}\left(\frac{1}{z'(x)}\right), \quad (\pi/2 \leq \theta \leq \pi) \quad (12)$$

여기에서 양의 값은 구조체로 향하는 하중을 의미하고, 음의 값은 구조체에서 밖으로 향하는 하중(wind suction)을 의미한다.

5. 해석 결과

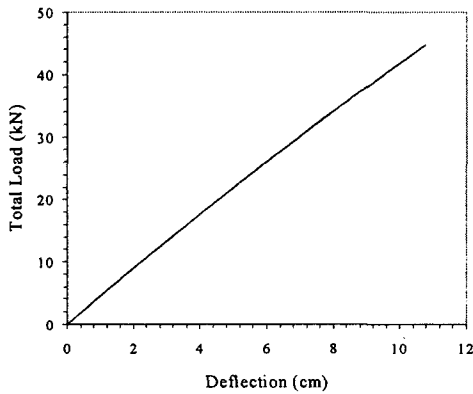


그림 3: 하중-변위 곡선(대칭 설하중)

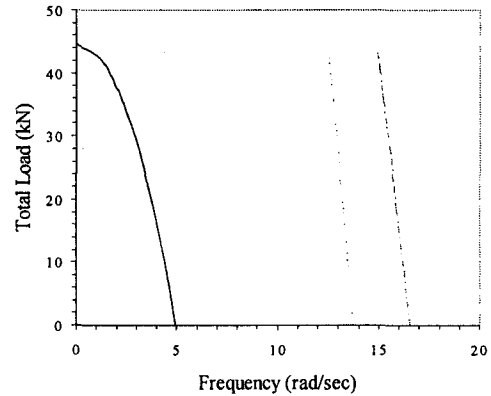


그림 4: 하중-진동수 곡선(대칭 설하중)

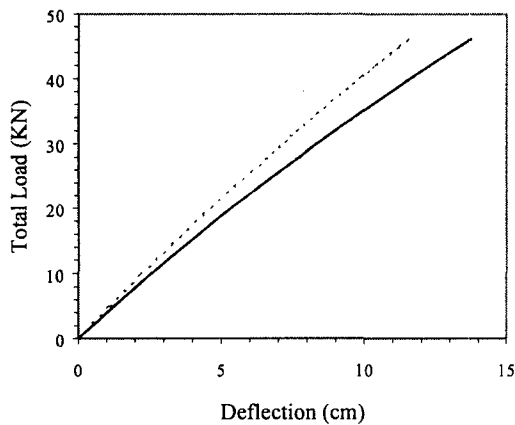


그림 5: 하중-변위 곡선(비대칭 설하중)

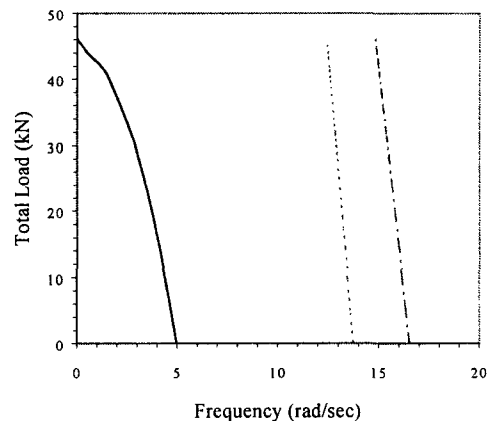


그림 6: 하중-진동수 곡선(비대칭 설하중)

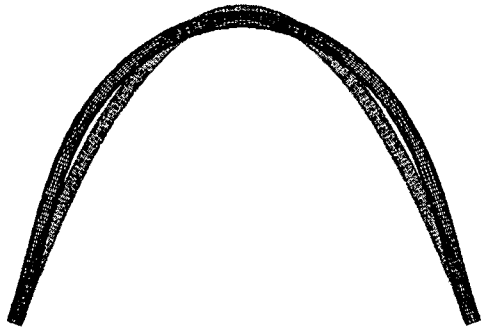


그림 7: 변형 형상(대칭 설하중)

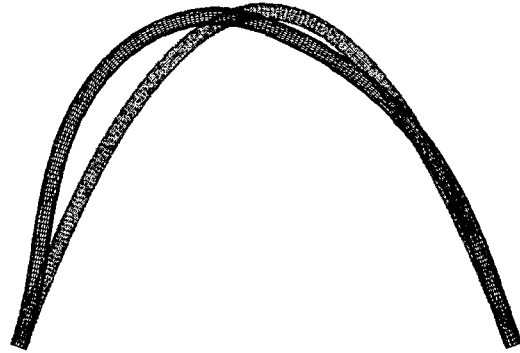


그림 8: 변형 형상(대칭 설하중)

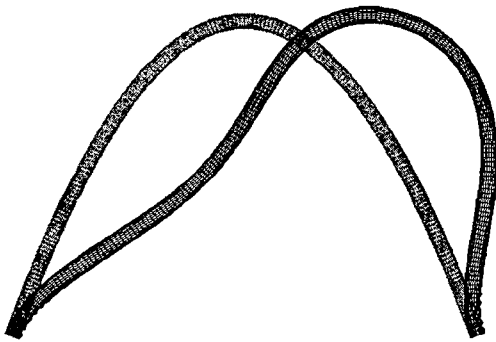


그림 9: 변형 형상(푹하중)



그림 10: 좌굴 모드(대칭 설하중)

대칭 설하중의 경우 1차 진동수가 0이 될 때까지 하중을 증가시켰다. 그 결과 하중은 총 하중 44.kN까지 진행되었으며, 이때 10.8cm의 z 방향 처짐이 발생하였다. 그림 3, 그림 4, 그림 7, 그림 10에 결과를 나타내었다. 비대칭 설하중의 경우도 마찬가지로 1차 진동수가 0이 될 때까지 하중을 증가시켰으며 총 하중이 46.1 kN까지 증가하였다. 이때 아치는 최초의 평형 형상으로부터 13.7cm의 x 방향 변형과 11.6cm의 z 방향 처짐이 발생하였다. 그림 5, 그림 6, 그림 8에 결과를 나타내었다. 푹 하중에 관한 결과는 총 하중 재하후의 변형 형상만이 그림 9에 나타나 있다.

6. 참고문헌

1. Hibbitt, Karlsson, and Sorenson Inc. (1994). *ABAQUS*, Pawtucket, RI.
2. Hou, A. (1996). *Analysis of the Deflections, Vibrations, and Stability of Leaning Arches*, Masters Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.