

아치 구조물의 비대칭 조건에 대한 동적 불안정성과 임계점 근방의 주파수 변화에 관한 연구

손수덕*, 하현주**, 김병준**

*한국기술교육대학교 건축공학과

**한국기술교육대학교 미래융합공학전공

e-mail:sdshon@koreatech.ac.kr

A Study on the Dynamic Stability of an Arch in Accordance with Asymmetric Condition and Its Frequency near Critical Point

Sudeok Shon*, Hyeonju Ha**, Byeongjun Kim**

*Department of Architectural Engineering, Korea University of Technology and Education

**Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

얇은 아치의 동적 불안정 현상과 임계 하중 근방의 응답을 연구하였다. 대칭 및 비대칭 변위 성분을 고려하여 동적 불안정 현상을 살펴보고, 외력에 따른 주파수를 분석하였다. 하중 증가에 따른 시계열 응답의 주파수 변화는 고속 푸리에 변환을 이용해서 분석하였고, 아치 형상이 $h=3$ 이상인 모델에서 좌굴 현상이 나타나며, $h=5$ 이상인 모델에서 초기조건에 민감한 좌굴 현상이 발생한다. 여기서 비대칭 초기조건에 따라 그 결과는 다르게 나타난다. 상수 하중에 대한 변위 응답의 분해 결과에서 볼 때, 임계 이전의 탁월 주파수는 하중이 증가할수록 낮아지며, 임계 레벨에서 탁월 주기는 배로 증가한다. 임계 레벨 근처에서는 변위가 급격하게 증가하는 구간이 있다.

1. 서론

아치나 셸이 장스팬 지붕구조에 적합한 까닭은 편평한 판으로 지붕을 덮을 때 보다 더 얇게 덮을 수 있기 때문이다. 이것은 중력 하중을 효과적으로 저항하는 특성으로 설명할 수 있다. 그러나 여기에는 예상치 못한 불안정 현상도 동반하게 된다. 특히 얇은 아치는 아름답고 가벼우나 구조적 불안정성을 잘 알아야만 안전하게 설계할 수 있다.

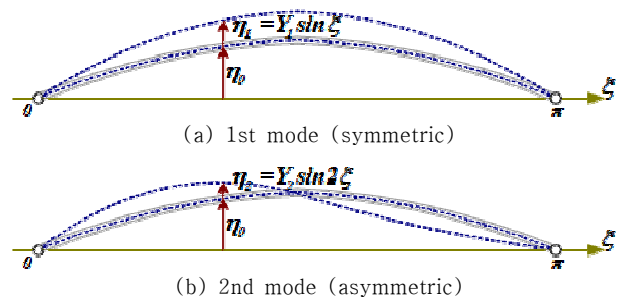
아치의 좌굴에 대한 임계 하중은 시계열 응답의 위상공간을 관찰하거나 미세한 파라미터의 변화에 대한 과도한 반응을 관찰하여 결정한다. 이러한 까닭에 지배방정식의 해석적 정해나 수치적 해를 얻는 것과 더불어 응답 특성을 분석하는 것이 중요하다. 특히, 시계열 응답의 주파수를 분석하는 것도 불안정 특성을 알아보는 한 방법으로 사용되며, 임계 전과 후의 특성의 관찰이 필요하다. 특히 임계 근방의 응답과 특징들은 파라미터에 따라 민감하게 반응하며, 다양한 특성을 보인다. 주로 비대칭성에 의한 간접좌굴의 경우 미소한 비대칭 변위 성분의 연성 작용으로 말미암아 아치가 스넵핑 현상과 같은 좌굴이 발생하며, 이것은 파라미터의 크기나 조건에 영향을 받는다. 이와 같은 현상에 대해서 다양한 각도에서 주파수와 에너지를 관찰할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 얇은 아치의 동적 좌굴 임계

하중과 임계 전후의 다양한 변화를 시계열 응답과 주파수 영역에서 나타나는 특성으로 설명한다. 변위 응답을 관찰하고, 임계 좌굴 하중을 산정하여 변화와 특성을 분석하여 민감성을 판단하고자 한다. 여기서, 하중의 증가에 따른 시계열 응답의 주파수 변화 특성을 고속 푸리에 변환을 통하여 분석하도록 하며, 임계 근방의 민감한 신호에 대해서는 힐베르트 변환을 통해서 관찰하도록 한다.

2. 얇은 아치의 대칭 및 비대칭 모드

본 연구의 대상인 아치의 대칭 및 비대칭 모드는 아래 그림과 같고, 각각의 파라미터는 무차원화 변수를 이용하여 모델링한다.



[그림 1] Shallow arch and the modes

그림의 2차 비대칭 변위 성분까지 고려한 $N=2$ 의 무차원화 지배방정식을 구하면 다음과 같다.

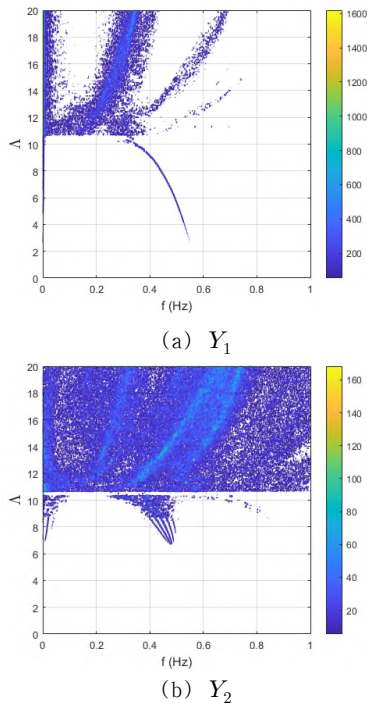
$$\ddot{Y}_1 + \gamma \dot{Y}_1 + Y_1 + \frac{1}{4}(Y_1^2 + 4Y_2^2 + 2hY_1)(h + Y_1) = A \quad (1)$$

$$\ddot{Y}_2 + \gamma \dot{Y}_2 + 16Y_2 + (Y_1^2 + 2Y_2^2 + 2hY_1)Y_2 = 0$$

위 식은 가장 낮은 차수의 대칭 변위와 비대칭 변위 성분으로 구성된 얇은 아치의 지배방정식이다.

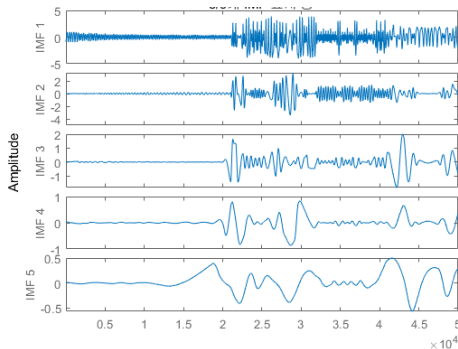
3. 임계레벨에 대한 주파수 변화

비대칭 성분이 포함된 스펙트럼의 변화는 그림과 같이 복잡한 주파수의 특성이 나타난다.



[그림 2] Dynamic response spectrum ($Y_2(0) = 0.001h$)

임계근방의 특성에 대한 EMD의 분해 결과는 다음과 같다.



[그림 3] Intrinsic mode functions of displacement response at $x = \pi/4$ ($h = 5, Y_2(0) = 0.001h, A = 10.32$)

4. 결론

본 논문은 얇은 아치의 동적 불안정 현상과 임계 하중 근방의 응답 특성에 관해서 연구한 것으로 아치 형상에 대해서 임계하중은 달라진다. 형상 파라미터가 높을수록 임계레벨도 높고, 스펙트럼의 변화에서 명확한 복잡성이 나타난다. 이것은 주파수 변화에서도 동일하게 나타나는 특성이다. 임계 근방에서 나타나는 변화의 관찰도 분리된 구간을 확인할 수 있으며, 힐베르트 변환에서 특징이 있는 주파수가 관찰되었다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2020R111A1A01065032). 또한, 본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(20AUDP-B100343-06)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Ha, J., Gutman, S., Shon, S. & Lee, S., "Stability of shallow arches under constant load," International Journal of Non-linear Mechanics, Vol.58, pp.120-127, 2014
- [2] Pokhrel, B., Shon, S., Ha, J. & Lee, S., "Dynamic Stability and Semi-Analytical Taylor Solution of Arch With Symmetric Mode," Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.18(3), pp.83-91, 2019
- [3] Shon, S., Ahn, S., Lee, S., & Ha, J., "A Semianalytical Approach for Nonlinear Dynamic System of Shallow Arches Using Higher Order Multistep Taylor Method," Mathematical Problems in Engineering, Vol.2018, <https://doi.org/10.1155/2018/9567619>
- [4] Shon, S., Ha, J., Lee, S. & Kim, J., "Application of Multistage Homotopy Perturbation Method to the Nonlinear Space Truss Model," International Journal of Steel Structures, Vol.15(2), pp.335-346, 2015
- [5] Shon, S., Ha, J. Pokhrel, B. & Lee, S., "Intrinsic Mode Function and its Orthogonality of the Ensemble Empirical Mode Decomposition Using Orthogonalization Method," Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.19(2), pp.101-108, 2019
- [6] Shon, S. and Ha, J., "Dynamic Instability and Instantaneous Frequency of a Shallow Arch With Asymmetric Initial Conditions", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.20, No.2, pp.77-85, 2020