

트윈 빌딩의 공력 특성이 풍응답에 미치는 영향 평가

김 범 렬^{1†}

¹경일대학교 건축공학과 교수

Impact of the Aerodynamic Characteristics of Twin Buildings on Wind Responses

Bub-Ryur Kim^{1†}

¹Professor, Department of Architectural Engineering, Kyungil Univ., Gyeongsan, 38428, Korea

Abstract

The wind responses of twin buildings are determined by the characteristics of wind loads and the dynamic characteristics of the structural systems of the buildings. In this study, the characteristics of wind pressure that influence wind responses were identified for two different spacings between the twin buildings using a wind tunnel test and the proper orthogonal decomposition (POD) method. Structural dynamic characteristics were also identified using 3D structural system modeling. The double modal transformation method was utilized to evaluate the characteristics of wind pressure for across-wind and along-wind conditions and the effect of the dynamic characteristics of each structure on the wind responses. The channeling and vortex effects were identified through the POD method. Across-wind loads were significantly affected by the spacings between the twin buildings, whereas along-wind loads were minimally affected. Similarly, while using the double modal transformation method, a significant difference was noticed in case of the cross-participation coefficients in the across-wind direction condition for the different spacings between the buildings; however, the along-wind direction condition showed negligible difference. Therefore, the spacing between the two buildings plays a more important role in across-wind responses compared to along-wind responses.

Keywords : double modal transformation method, twin building, tall building, wind-induced response, proper orthogonal decomposition

1. 서론

고층 빌딩은 주로 대도시에 밀집해서 건설되는 경향이 있다. 고층 빌딩들 주변의 공력 특성은 일반적인 단일 빌딩과 많이 달라지게 된다. 그리고 달라진 공력 특성은 풍하중의 변화에 영향을 주게 된다. 그 결과 고층 건물의 횡 변위와 가속도와 같은 풍응답은 일반 빌딩의 풍응답과 달라진다. 이에 따라 고층 빌딩이 밀집해 있는 지역에 대한 사용성과 안전성을 평가하기 위한 조사의 필요성이 대두되었으며, 이와 관련해서 많은 연구가 이루어져 왔다(Lee and Fowler, 1975; Bailey and Kwok, 1985; Taniike and Inaoka, 1988; Khanduri *et al.*, 1998; Lam *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2011; Hui *et al.*, 2013).

트윈 빌딩과 같이 고층 빌딩들을 연결 부재로 연결한 구조

시스템이 옥상 다리, 옥상 수영장, 옥상 정원 등으로 사용하기 위한 목적으로 많이 지어지고 있다. 그러나 고층 빌딩들이 근접하게 위치하여 건설된 트윈 빌딩 구조 시스템에서는 각 고층 빌딩의 공력 특성뿐 아니라 두 고층 빌딩을 연결하는 연결 부재가 풍응답을 주고 받으며 서로 영향을 미치게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 고층 빌딩이 밀집해 있는 경우에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 선행 연구에서는 한 빌딩에 의해서 다른 빌딩의 공력 특성이 어떻게 변하는지에 집중해 온 경향을 찾아볼 수 있었다. 반면에 트윈 빌딩의 공력 특성과 풍응답 상호작용에 대해서는 충분한 조사가 이루어지지 못하였다. 두 빌딩이 서로를 연결하는 부재로 인한 풍응답이 어떻게 상호작용하는 것에 대한 과거의 연구에서 평가가 되었으나(Lim *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2016), 구체적인 공력 특성

[†]Corresponding author:

Tel: +82-53-600-5456; E-mail: brkim1@kiu.kr
Received November 13 2018; Revised October 15 2019;
Accepted October 16 2019

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에 대한 구체적인 조사는 없었다. 이러한 이유로 본 논문에서는 트윈 빌딩과 같은 구조 시스템의 두 빌딩의 공력 특성이 서로에게 어떻게 영향을 미치는지 구체적인 조사하였다.

공력 특성은 다양한 형태로 존재하기 때문에 통계적 기법을 적용할 필요가 있다. 공력 특성을 명확하게 파악하기 위한 통계적 방법으로 적합 직교 분해(POD: Proper Orthogonal Decomposition) 기법이 이용되어 왔다(Bienkiewicz *et al.*, 1993; Tamura *et al.*, 1997; Kikuchi *et al.*, 1997; Tamura *et al.*, 1999; Solari *et al.*, 2007; Carassale *et al.*, 2007; Kim and Tse, 2018; Kim, 2018). 이러한 적합 직교 분해 기법은 일반적으로 하나의 빌딩에만 적용되어 왔으며, 트윈 빌딩 시스템과 같이 여러 빌딩에 함께 적용된 적은 없었다. 본 논문에서는 적합 직교 분해를 이용해서 트윈 빌딩의 공력 특성을 파악하였고, 두 빌딩의 공력 특성 사이의 연관성을 추가적으로 조사하였다.

이에 더하여 적합 직교 분해 기법으로부터 얻어진 공력 특성과 트윈 빌딩 구조물의 동특성이 풍응답에 어떻게 영향을 미치는지 구체적으로 파악하기 위해서 이중 모달 변환 기법(DMT: Double modal transformation)을 이용하였다. 이중 모달 변환 기법은 과거에 다리구조물이나 간단한 구조물에 적용된 적은 있으나(Solari and Carassale, 2000; Carassale *et al.*, 2001; Tubino and Solari, 2007; Torrielli *et al.*, 2010), 트윈 빌딩과 같이 고층 빌딩에 적용된 경우는 없었다.

본 논문의 목적은 적합 직교 분해 기법을 이용해서 트윈 빌딩의 공력 특성을 파악하고, 모달 변환 기법을 이용하여 구조물의 동특성과 공력 특성이 풍응답에 미치는 영향을 파악하는 것이다. 이를 위해서 일반적인 트윈 빌딩을 모델링하여 고깃값과 고유벡터와 같은 동특성을 파악하였다. 그리고 풍동실험을 통해서 트윈 빌딩의 풍압을 측정하였다. 이때 트윈 빌딩의 두 빌딩 사이의 간격이 다른 두 개의 트윈 빌딩 모델에 대해서 실험하였다. 나아가 적합 직교 분해 기법을 이용하여 다양한 풍압의 형태를 파악하여 공력 특성을 알아보았다. 마지막으로, 이중 모달 변환 기법을 이용하여 각 풍압의 형태와 각 구조물의 고유벡터가 풍응답에 어떤 영향을 미치는지 파악하였다.

2. 트윈 빌딩의 구조 해석적 모델

트윈 빌딩의 풍응답은 풍 방향과 풍 직각 방향 등에 따라 다양하게 일어나게 된다. 이러한 사항을 고려해서 본 논문에서는 3차원 해석 모델을 통해 트윈 빌딩의 풍응답을 계산하였다. 또한 트윈 빌딩의 두 빌딩 사이의 간격이 다른 두 가지 경우를 고려하였다. 3차원 해석 모델에서는 두 빌딩의 구조적 특성이 두 개의 경우에서 모두 동일하다고 가정하였다. 그리고 두 빌딩을 연결하는 연결 부재의 강성과 질량도 두 개의 경우에서 동일하

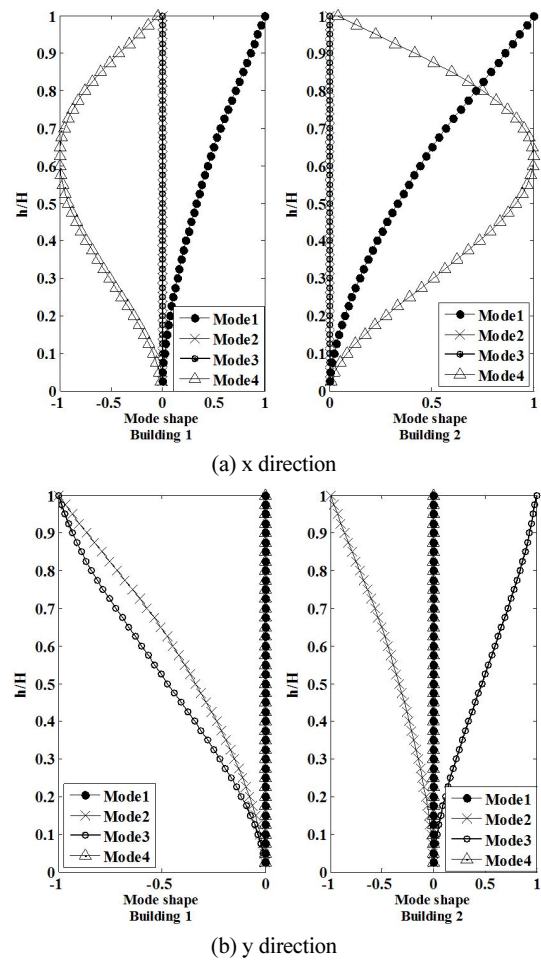


Fig. 1 First four structural mode shapes

다고 가정하였다. 또한 연결 부재의 설치 위치는 두 빌딩의 최상층으로 가정하였다.

트윈 빌딩의 두 빌딩은 40층으로 설계하였으며, 바닥의 넓이는 30m × 30m이라고 가정하였다. 두 빌딩의 높이는 160m로 정하였다. 트윈 빌딩의 풍응답을 계산하기 위한 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$[M + M_L]\ddot{u} + C\dot{u} + [K + K_L]u = F \quad (1)$$

여기서 M , C , K 는 각각 트윈 빌딩 질량, 댐핑, 강성 매트릭스를 나타낸다. M_L 과 K_L 은 두 빌딩을 연결하면서 생기는 추가적인 구조부재의 질량과 강성이다. F 는 각 층에서 발생하는 시간 이력에 따른 풍하중을 나타낸다. 이때 F 는 $F = [F_{1x}, F_{1y}, F_{1z}, F_{2x}, F_{2y}, F_{2z}]$ 과 같이 나타내어 두 빌딩의 여러 방향에 대한 풍하중을 고려하였다. \ddot{u} , \dot{u} 그리고 u 는 트윈 빌딩의 풍응답으로 가속도, 속도, 변위를 나타내고 있다. 식 (1)을 이용하여 트윈 빌딩의 구조 시스템의 고깃값과 고유벡터와 같은 동특성을 파악할 수 있다.

Fig. 1은 앞에서 언급한 트윈 빌딩의 구조 시스템의 초기 4차 모드의 고유벡터를 나타낸다. 여기서 H 는 빌딩의 최상층 높이이며, h 는 각 층의 높이를 말한다. 그림에서 보는 바와 같이, 두 빌딩에서 풍 직각 방향(x direction)과 풍 방향(y direction)에서 다양한 형태의 고유벡터가 나타난다.

3. 풍동 실험

풍동 실험에서 바람의 방향은 Fig. 2와 같이 트윈 빌딩의 두 빌딩이 바람이 불어오는 쪽으로 나란하게 위치한 경우를 실험하였다.

앞에서 언급한 바와 같이, 본 논문에서는 트윈 빌딩의 두 빌딩의 간격이 다른 두 경우에 대해서 풍동 실험을 시행하였다. 빌딩의 폭을 B (Building breadth)라고 하고, 두 빌딩 사이의 거리를 G (Gap distance)라고 가정하였다. 그리고 첫 번째 풍동 실험의 모델의 경우는 G/B 가 0.33인 경우로 하고, 두 번째 경우는 G/B 가 1.5인 경우로 하여서 상대적으로 두 빌딩 사이의 거리가 작은 경우와 큰 경우에 대해서 풍동 실험을 실시하였다.

풍동 실험실의 크기를 고려하여 2장에서 언급한 트윈 빌딩의 구조 해석적 빌딩 모델의 크기에 대해서 1:400로 축소하여 풍동 실험을 위한 빌딩 모델을 제작하였다. 이에 따라서 빌딩 모델의 크기는 $75\text{mm} \times 75\text{mm} \times 400\text{mm}$ 와 같다.

빌딩의 표면에서 작용하는 풍압 계측과 적합 직교 분해 기법과 이중 모달 변형 기법을 적용하기 위해서 본 실험에서는 빌딩 모델 표면에 동시에 풍압을 계측할 수 있는 다수의 풍압 계측 센서와 계측 시스템(SMPMS: Synchronous multi-pressure measurement systems)을 이용하여서, 수신주기 500Hz로 빌딩의 풍압을 계측하였다.

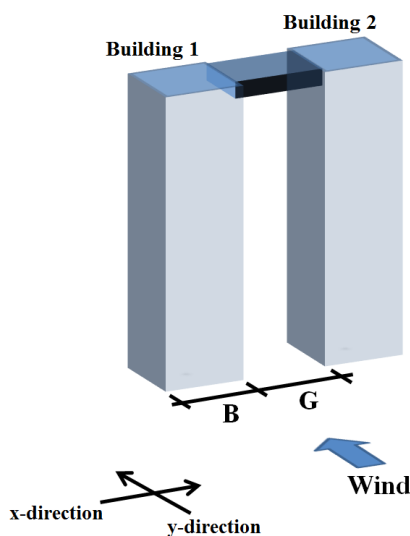


Fig. 2 Twin building model in the wind tunnel

레이놀즈수는 7.9×10^4 으로 나타났으며, 트윈 빌딩 모델 주변의 풍 환경은 개활지로 가정하여 실험하였으며, 트윈 빌딩 꼭대기에서의 평균 풍속과 난류 강도는 각각 15.9m/s와 13.9%로 나타났다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 적합 직교 분해에 의한 결과

풍압 센서를 통해서 얻어진 풍하중의 결과는 매우 복잡한 형태로 이루어져 있으므로, 앞에서 언급한 바와 같이 적합 직교 분해 기법을 이용해서 풍압의 패턴들을 식별하였다.

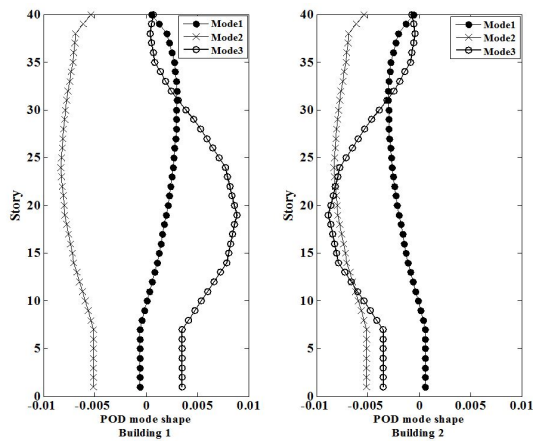
본 논문에서는 2장에서 언급한 바와 같이 구조물의 동특성과 관련된 고윳값과 고유벡터를 언급하였다. 그리고 본 장에서는 적합 직교 분해 기법을 이용해서 풍압 센서로부터 풍압의 패턴들을 식별하기 위한 고윳값과 고유벡터를 언급하였다. 두 가지의 고윳값과 고유벡터를 구분하기 위해서 풍압의 패턴과 관련된 고윳값과 고유벡터는 POD 고윳값과 POD 고유벡터로 POD 모드 등으로 구분하여 언급하였다.

적합 직교 분해 기법을 이용하기에 앞서, 풍동 실험에서 수집한 자료, 즉 다수의 풍압 센서에서 시간 이력에 따라 계측된 데이터로 공분산 행렬(Covariance matrix) M 을 계산하였다. 이 값으로 식 (2)를 이용하면 POD 고윳값 λ_i 과 POD 고유벡터 ϕ_i 를 계산할 수 있다.

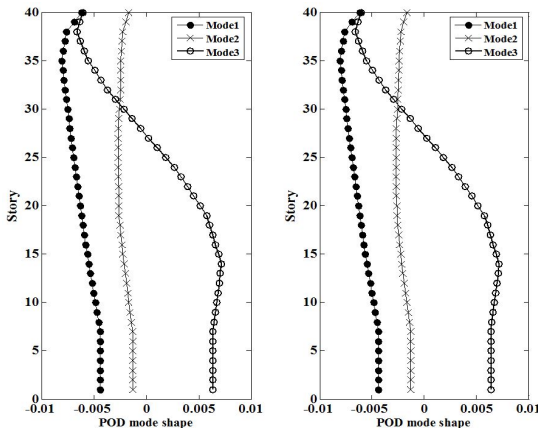
$$[M] \times [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \times [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \quad (2)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, N$ 이며, N 은 트윈 빌딩 모델의 표면에 설치된 풍압 센서들의 개수를 나타낸다. POD 고유벡터는 적합 직교 분해 기법을 통해서 식별되어진 풍압의 패턴을 나타낸다. 또한 POD 고윳값은 각 풍압 패턴이 전체 풍압에 기여하는 정도(Energy distribution)를 나타낸다.

Fig. 3과 4는 각각 $G/B = 0.33$ 인 경우와 $G/B = 1.5$ 인 경우 그 풍압의 패턴을 나타내고 있다. 기존의 적합 직교 분해 기법으로부터 얻어진 풍압의 패턴은 트윈 빌딩 모델 표면 전반에 걸쳐서 나타난다. 이러한 식별된 풍압의 패턴은 선행 연구들에서 자세히 설명되었다(Kim and Tse, 2018). 그러나 본 논문에서는 풍압의 패턴을 Fig. 1의 트윈 빌딩의 구조 시스템의 고유벡터들과 비교하고, 4.2장에서 그 패턴에 이중 모달 변형 기법을 적용하기 위해서 빌딩 모델 표면에 나타나는 풍압의 형태를 모드별로 x 와 y 방향으로 계산하였다.



(a) x direction



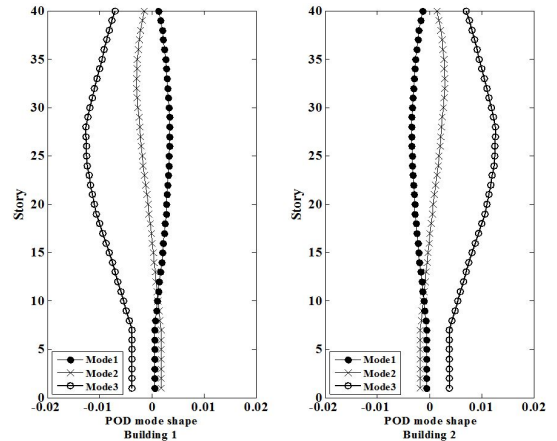
(b) y direction

Fig. 3 Pressure distribution of each POD mode ($G/B = 0.33$)

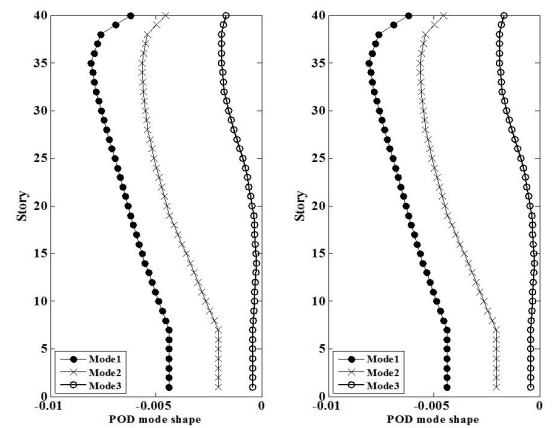
Fig. 3의 (a)에서 x 방향의 고유벡터를 보면, G/B 가 작을 때 1차와 3차 POD 벡터에서는 두 빌딩들 사이에 채널링(Channeling) 효과 때문에 풍압의 분포도가 대칭으로 나타났다. 반면에, 2차 POD 모드에서는 두 빌딩의 고유벡터가 대칭으로 나타나는 대신 같은 방향으로 나타났다. 이러한 고유벡터의 현상은 와류 현상과 관련이 있다. 두 빌딩의 간격이 작기 때문에 두 빌딩의 안쪽에서는 와류 현상이 나타나지 않기 때문이다.

반면에 G/B 가 커지면, Fig. 4의 (a)에서 나타나는 것처럼 x 방향의 고유벡터의 절댓값이 상대적으로 크게 나타났다. 그 이유는 두 빌딩의 간격이 증가함에 따라 두 빌딩의 안쪽에도 불어오는 바람의 영향이 증가하게 되고, 와류 현상과 같은 공력 특성이 x 방향에 하중을 증가시키기 때문이다.

Fig. 3의 (b)와 Fig. 4의 (b)를 보면, y 방향의 대부분의 POD 고유벡터들은 두 빌딩 사이의 간격에 상관없이 고유벡터의 값이 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 과거의 연구에서도 바람이 불어오는 방향의 풍 하중 혹은 공력 특성은 x 방향과 비교했을 때 상대적으로 빌딩들의 간격과는 상관이 없는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2018).



(a) x direction



(b) y direction

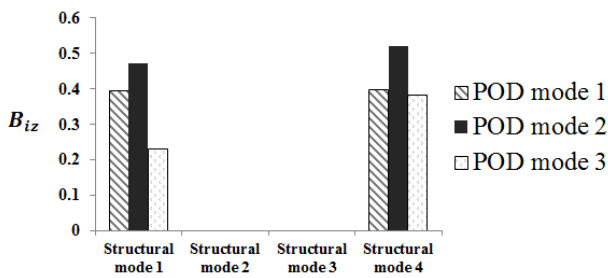
Fig. 4 Pressure distribution of each POD mode ($G/B = 1.5$)

4.2 이중 모달 변환 기법에 의한 결과

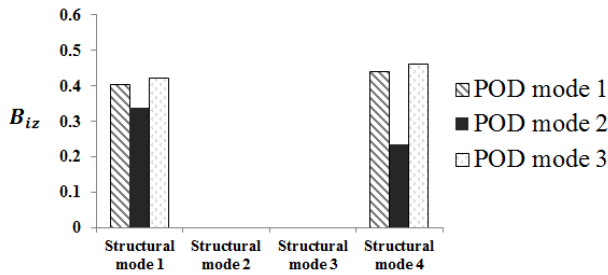
4.1장에서는 적합 직교 분해 기법을 통해서 트윈 빌딩의 공력 특성을 파악하였다. 그럼에도 불구하고 단지 적합 직교 분해 기법의 결과만으로는 식별된 POD 고유벡터들이 풍응답에 미치는 영향을 온전히 이해하는 데는 한계가 있다. 이를 보완하기 위하여 4.2장에서는 이중 모달 변환 기법을 이용하여 식별된 공력 특성과 구조물의 동특성이 풍응답에 미치는 영향을 알아보았다.

이중 모달 변환 기법은 교차 모달 참여 계수(Cross-modal participation coefficient)를 이용해서 POD 고유벡터와 구조 시스템의 고유벡터의 상관관계를 밝히는 것이다. 이러한 교차 모달 참여 계수의 절댓값이 커짐에 따라 풍응답에 기여하는 정도도 커지게 된다. 교차 모달 참여 계수는 식 (3)을 이용해서 계산할 수 있다.

$$B_{iz} = \psi_i^T \times A \times \Phi_z \quad (3)$$

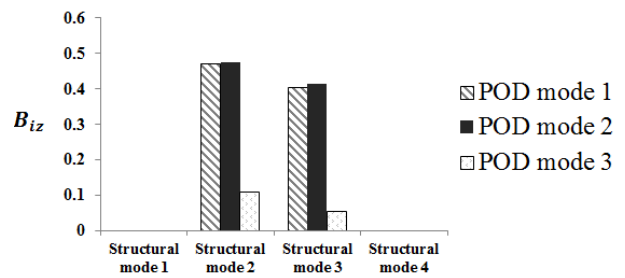


(a) $G/B = 0.33$

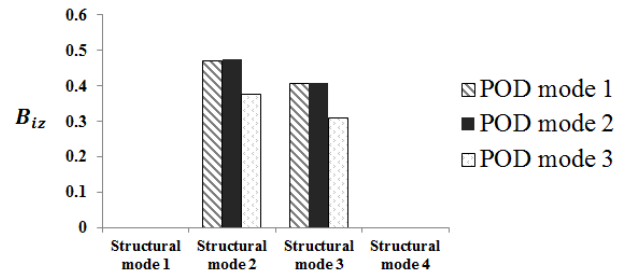


(b) $G/B = 1.5$

Fig. 5 x-direction



(a) $G/B = 0.33$



(b) $G/B = 1.5$

Fig. 6 y-direction

여기서 B_{iz} 는 교차 모달 참여 계수를 나타내고, 그 결과는 구조 시스템의 고유벡터 ψ_i , POD 고유벡터 ϕ_2 와 A , 즉 각 층의 면적에 의해서 결정된다. 본 논문의 각 층의 면적은 동일하다. 그리고 두 고유벡터의 교차 참여 모달 계수는 양수 혹은 음수를 가지게 되는데, 본 논문에서는 절댓값으로 나타내어 다른 고유벡터들과의 차이를 알아보고자 하였다.

Fig. 5와 6은 각각 x 와 y 방향에 대한 교차 참여 계수를 나타낸다. 앞의 장들에서 언급한 구조 시스템의 초기 3차 POD 모드의 고유벡터와 초기 4차 모드의 고유벡터에 대해서 교차 모달 참여 계수를 계산하여 나타내었다.

Fig. 1의 (a)에서 보는 바와 같이, x 방향에서는 구조 시스템의 고유벡터 1과 4차 모드의 고유벡터의 절댓값이 나타났고, 나머지 모드에서는 나타나지 않았다. 그래서 Fig. 5에서 보는 바와 같이, x 방향에서는 1차와 4차 모드에서 $G/B = 0.33$ 인 경우와 $G/B = 1.5$ 인 경우 모두 교차 모달 참여 계수의 절댓값이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

이에 더하여 교차 모달 참여 계수는 POD 고유벡터와도 밀접한 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 예를 들면, 1차와 3차의 POD 모드에서 $G/B = 1.5$ 일 때의 교차 모달 참여 계수가 $G/B = 0.33$ 일 때보다 대부분 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그 이유는 Fig. 3과 4의 x 방향에서 알 수 있듯이, G/B 가 작으면 두 빌딩 사이에서 와류가 발생하지 않으므로, 이때 x 방향으로 발생하는 풍압은 G/B 가 클 때보다 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이에 따라 G/B 가 커지면 두 빌딩 사이에서 x 방향으로 발생하는 풍하중이 증가하게 되므로 교차 모달 참여 계수 또한

증가하게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 1의 (b)에서 보는 바와 같이, y 방향에서는 구조 시스템의 고유벡터 2와 3차 모드의 고유벡터의 절댓값이 크게 나타난다. 따라서 Fig. 6과 같이 구조 시스템의 2차와 3차 모드에서 교차 모달 참여 계수가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 6(a)와 (b)에서 나타난 POD 모드가 구조 시스템의 2차와 3차 모드에서 나타난 교차 모달 참여 계수는 x 방향의 경우와는 다르게 상대적으로 비슷한 것을 볼 수 있다. 그 이유는 바람이 불어오는 방향인 풍 방향의 공력 특성은 풍 직각 방향에 비해서 빌딩의 간격에 영향을 적게 받기 때문이다.

이중 모달 변환 기법을 통해 각 POD 고유벡터와 각 구조 시스템의 고유벡터가 풍응답에 미치는 영향을 평가할 수 있었다. 또한 풍응답을 이해하는데 적절한 정보를 제공해 주었다.

5. 결론

본 논문에서는 이중 모달 변환 기법을 이용해서 트윈 빌딩의 식별된 공기역학적 특성들이 풍응답에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해서 트윈 빌딩의 두 빌딩이 다른 간격을 가지는 두 경우를 가지고 풍동 실험을 진행하였고, 이 과정에서 시간 이력에 따른 풍압을 계측하였다. 그리고 트윈 빌딩의 구조 시스템의 고유벡터와 계측한 풍압을 적합 직교 분해 기법을 이용하여 POD 고유벡터를 계산한 후, 이중 모달 변환 기법을 위한 교차 모달 참여 계수를 계산하였다.

적합 직교 분해 기법의 결과는 다음과 같다. 풍 직각 방향의 고유벡터들은 트윈 빌딩 시스템의 두 빌딩의 간격에 영향을 많이 받은 반면, 풍 방향 고유벡터들은 상대적으로 두 빌딩의 간격에 영향을 적게 받았다. 그리고 적합 직교 분해 기법을 통해서 트윈 빌딩의 두 빌딩에서 나타는 채널링 효과와 와류 현상 등을 파악할 수 있었으므로 트윈 빌딩에 대한 공력 특성을 좀 더 명확하게 이해하는데 도움이 되었다.

이중 모달 변환 기법의 교차 참여 계수를 통해 트윈 빌딩 구조 시스템의 고유벡터와 POD 고유벡터가 풍응답에 어떤 영향을 주는지 파악하였다. 풍 직각 방향의 교차 참여 계수는 두 빌딩의 간격에 따라 크게 달라진 반면, 풍 방향의 교차 참여 계수는 두 빌딩의 간격에 큰 영향을 받지 않았다. 이로 인해 트윈 빌딩 구조물에서도 풍 직각 방향의 풍응답은 두 빌딩의 간격에 큰 영향을 받고, 풍 방향의 풍응답은 상대적으로 두 빌딩의 간격에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1G1A1095215). 이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 해외우수신진연구자 지원사업(KRF, Korea Research Fellowship)의 연구임(No. 2019H1D3A1A01101442).

References

Bailey, P.A., Kwok, K.C.S. (1985) Interference Excitation of Twin Tall Buildings, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 21(3), pp.323~338.

Bienkiewicz, B., Ham, H.J., Sun, Y. (1993) Proper Orthogonal Decomposition of Roof Pressure, *J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.*, 50, pp.193~202.

Carassale, L., Piccardo G., Solari, G. (2001) Double Modal Transformations and Wind Engineering Applications, *J. Eng. Mech.*, 127(5), pp.432~439.

Carassale, L., Solari, G., Tubino, F. (2007) Proper Orthogonal Decomposition in Wind Engineering. Part 2: Theoretical Aspects and Some Applications, *Wind & Struct.*, 10(2), pp.177~208.

Hui, Y., Tamura, Y., Yoshida, A., Kikuchi, H. (2013) Pressure and Flow Field Investigation of Interference Effects on External Pressures between High-rise Buildings, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 115, pp.150~161.

Khanduri, A.C., Stathopoulos, T., Bedard C. (1998) Wind-induced Interference Effects on Buildings - A Review of the State-of-the-Art, *Eng. Struct.*, 20(7), pp.617~630.

Kikuchi, H., Tamura, T., Ueda, H., Hibi, K. (1997) Dynamic Wind Pressure Acting on a Tall Building Model-Proper Orthogonal Decomposition, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 69-71, pp.631~646.

Kim, B.R. (2018) Evaluating Wind Load and Wind-induced Response of a Twin Building using Proper Orthogonal Decomposition, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 31(6), pp.309~314.

Kim, B.R., Tse, K.T. (2018) POD Analysis of Aerodynamic Correlations and Wind-induced Responses of Two Tall Linked Buildings, *Eng. Struct.*, 176, pp.369~384.

Kim, B.R., Tse, K.T., Tamura, Yukio. (2018) POD Analysis for Aerodynamic Characteristics of Tall Linked Building, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 181, pp.126~140.

Kim, W., Tamura, Y., Yoshida, A. (2011) Interference Effects on Local Peak Pressures between Two Buildings, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 99(5), pp.584~600.

Lam, K.M., Leung, M.Y.H., Zhao, J.G. (2008) Interference Effects on Wind Loading of a Row of Closely Spaced Tall Buildings, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 96(5), pp.562~583.

Lee, B.E., Fowler, G.R. (1975) The Mean Wind Forces Acting on a Pair of Square Prisms, *Build. Sci.*, 10(2), pp.107~110.

Lim, J., Bienkiewicz, B., Richards, E. (2011) Modeling of Structural Coupling for Assessment of Modal Properties of Twin Tall Buildings with a Skybridge, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 99(5), pp.615~623.

Solari, G., Carassale, L. (2000) Modal Transformation Tools in Structural Dynamics and Wind Engineering, *Wind & Struct.*, 3(4), pp.221~241.

Solari, G., Carassale, L., Tubino, F. (2007) Proper Orthogonal Decomposition in Wind Engineering. Part 1: A State-of-the-Art and Some Prospects, *Wind & Struct.*, 10(2), pp. 153~176.

Song, J., Tse, K.T., Tamura, Y., Kareem, A. (2016) Aerodynamics of Closely Spaced Buildings: With Application to Linked Buildings, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 149, pp.1~16.

Tamura, Y., Suganuma, S., Kikuchi, H., Hibi, K. (1999) Proper Orthogonal Decomposition of Random Wind Pressure Field, *J. Fluids & Struct.*, 13(7-8), pp.1069~1095.

Tamura, Y., Ueda, H., Kikuchi, H., Hibi, K., Suganuma, S., Bienkiewicz, B. (1997) Proper Orthogonal Decomposition Study of Approach Wind-Building Pressure Correlation, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 72, pp.421~432.

- Taniike, Y., Inaoka, H.** (1988) Aeroelastic behavior of Tall Buildings in Wakes, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 28(1-3), pp.317~327.
- Torrielli, A., Tubino, F., Solari G.** (2010) Effective Wind Actions on Ideal and Real Structures, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 98(8-9), pp.417~428.
- Tubino, F., Solari G.** (2007) Gust Buffeting of Long Span Bridges: Double Modal Transformation and Effective Turbulence, *Eng. Struct.*, 29(8), pp.1698~1707.

요 지

트윈 빌딩의 풍응답은 풍하중의 공력 특성과 트윈 빌딩 구조 시스템의 동적 특성에 영향을 받는다. 본 논문에서는 트윈 빌딩의 두 빌딩의 간격이 다른 두 경우에 대해서 풍응답에 영향을 주는 풍압의 특성을 풍동 실험과 적합 직교 분해 기법을 이용해 파악하고, 3차원 구조 시스템 모델링을 통해 동특성을 파악하였다. 그리고 이중 모달 변환 기법을 이용해서 각 풍압의 특성과 구조물의 동특성이 풍응답에 미치는 영향을 파악하였다. 적합 직교 분해 기법을 통해서 채널링과 와류 효과에 대해서 파악할 수 있었다. 풍 직각 방향의 풍하중은 두 빌딩의 간격에 영향을 많이 받았으며, 풍 방향의 풍하중은 간격에 영향을 적게 받았다. 마찬가지로, 이중 모달 변환 기법에서 교차 참여 계수는 풍 직각 방향에서는 두 빌딩의 간격에 따라 크게 달라진 반면, 풍 방향은 영향이 적었다. 이에 따라 두 빌딩의 간격이 풍 방향의 풍응답 보다 풍 직각 방향의 풍응답에 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 이중 모달 변환 기법, 트윈 빌딩, 고층 빌딩, 풍응답, 적합 직교 분해 기법