

트윈 빌딩의 적합 직교 분해 기법을 이용한 풍하중 및 풍응답 평가

김법렬^{1*}

¹연세대학교 건축구조헬스케어연구단

Evaluating Wind Load and Wind-induced Response of a Twin Building using Proper Orthogonal Decomposition

Bub-Ryur Kim^{1*}

¹Center for Structural Health Care Technology in Building, Yonsei Univ., Seoul, 03722, Korea

Abstract

The wind load and structural characteristics of a twin building are more complex than those of conventional high-rise buildings. The pressure load due to wind on a twin building was therefore measured via wind tunnel experiments to analyze such characteristics. The wind pressure pattern was then deduced from measured data using proper orthogonal decomposition. Channeling and vortex shedding were observed in the first and second modes, respectively. The along-wind loads on the two buildings featured a positive correlation and the cross-wind loads featured no correlation. Such a correlation affected the wind-induced displacement. The structural member connecting the two buildings had an insignificant effect on the positive correlation, but it notably reduced the wind-induced displacement with a negative correlation.

Keywords : tall building, twin building, wind load, proper orthogonal decomposition, wind-induced response, aerodynamic correlation

1. 서 론

트윈 빌딩들 중에는 일반적으로 고층 빌딩이 많이 있고, 옥상 다리, 옥상 수영장, 옥상 정원과 같은 구조부재를 추가적으로 설치하여서 두 빌딩이 연결되어 있는 경우가 많이 있다.

이러한 트윈 빌딩 시스템의 두 빌딩은 서로 가까운 위치에 지어지게 되고, 근접한 빌딩에 의해 발생하는 바람의 변화 때문에 풍하중은 일반 고층 빌딩과 크게 달라진다. 특히, 이러한 트윈 빌딩 시스템의 경우 구조부재로 연결되어 있기 때문에 각 빌딩의 풍하중에 의한 빌딩의 횡 방향 진동 및 변위가 다른 빌딩에 서로 영향을 주게 된다. 따라서 이와 관련된 풍하중과 공력 특성을 파악하고 트윈 빌딩에서 두 빌딩의 풍하중의 상호 연관성을 파악할 필요가 있다. 또한 트윈 빌딩에서 두 빌딩을

연결하는 구조부재가 횡 방향 변위에 어떤 역할을 하는지 알아볼 필요가 있다.

대도시의 경우에 고층 빌딩이 밀집해 있는 경우가 많이 있으며, 이와 관련된 많은 연구가 과거에 이루어졌다(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).

그러나 대부분의 과거의 연구는 다른 빌딩들에 의해서 기준이 되는 건물의 공력 특성이 어떻게 변하는지에 대해서 중점적으로 다루어졌다. 두 빌딩의 풍하중에 의한 상호작용에 대해서 다루어지지 않았다. 이와 관련해서 몇몇 연구자들이 트윈 빌딩과 같은 구조물의 공력 특성에 대해서 조사한 바가 있으며, 각 빌딩의 풍하중의 상호 연관성에 대해서 조사한 바 있다(Lim

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-7786; E-mail: rlaqjufuf@gmail.com
Received September 12 2018; Revised November 5 2018;
Accepted November 6 2018

©2018 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.

et al., 2011; Song et al., 2016). 그러나 이러한 트윈 빌딩에 있어서 공력 특성은 매우 복잡한 상태이며, 좀 더 자세한 공력 특성을 파악할 필요가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 통계적 방법인 적합 직교 분해(POD: proper orthogonal decomposition)를 이용해서 트윈 빌딩의 공력 특성을 파악하고, 트윈 빌딩의 두 빌딩의 풍하중의 상호 연관성에 대해서 파악하고자 한다.

풍하중 평가에 있어서 풍동실험을 통해서 얻은 빌딩 모델 표면의 풍압력 데이터에 적합 직교 분해 기법을 이용하여 공력 특성을 평가하는데 많이 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). 이에 더하여 독립성분 기법(ICA: independent component analysis)와 같은 통계적 기법을 이용하여 공력 특성을 파악하여 왔다(Kim et al., Under review).

그러나 대부분의 적합 직교 분해 기법 및 독립성분 기법을 이용한 연구는 일반적인 고층 빌딩에 집중되었으며, 트윈 빌딩이나 빌딩들이 밀집해 있는 도시에 있는 빌딩의 경우에 대해서 적용된 바 없다.

본 논문의 목적은 적합 직교 분해 기법을 이용해서 트윈 빌딩의 공력 특성을 파악하고, 두 빌딩의 풍하중의 상호작용에 대해서 알아보는 것이다. 또한, 트윈 빌딩을 연결하는 구조 부재와 두 빌딩의 풍하중 상호작용성이 풍하중에 의한 횡 방향의 변위에 어떤 역할을 하는지 알아보았다.

이를 위해서 전형적인 트윈 빌딩의 모델을 제작하였으며 풍동실험을 통해서 트윈 빌딩 모델 표면에 풍압을 측정하였다. 이에 더하여 적합 직교 분해 기법을 풍압 측정 결과에 적용하여 풍압의 다양한 형태를 파악하였다. 확률밀도 함수(PDF: probability density function)을 이용하여 풍하중의 상호 연관성에 대해서 파악하고자 하였다.

마지막으로 구조해석을 위한 3차원 트윈 빌딩 모델을 이용하여 두 빌딩을 연결하는 구조부재와 두 빌딩의 풍하중의 상호 연관성이 횡 방향 변위에 어떤 역할을 하는지 알아보았다.

2. 풍동실험 방법

풍동실험을 위해서 본 논문에서는 높이가 160m이고, 바닥의 크기가 30m×30m인 일반적인 트윈 빌딩을 고려하여 1:400의 축소된 트윈 빌딩 모델을 제작하였다. 따라서 트윈 빌딩 모델의 크기는 75mm×75mm×400mm가 된다.

난류의 강도와 평균 풍속은 AS/NZS 1170.2:2002의 기준을 따랐으며, 개활지로 가정하여 풍동실험을 실시하였다.

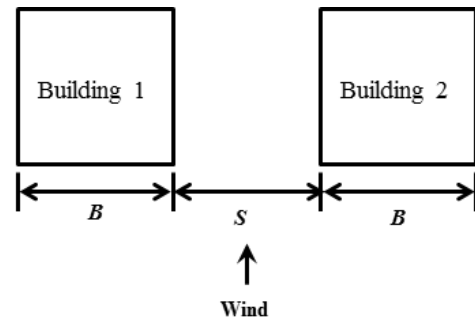


Fig. 1 Twin building model in the wind tunnel (Kim and Tse, 2018)

트윈 빌딩 모델의 꼭대기 부분의 난류의 강도는 13.9%이고, 평균 풍속은 15.9m/s로 측정되었다. 또한 레이놀즈수는 7.9×10^4 으로 나타났다.

복수의 풍압 센서를 트윈 빌딩 모델 표면에 설치해서 풍압을 측정하였다. 트윈 빌딩 시스템의 한 빌딩 표면에 풍압 센서는 5개씩 9개 층으로 설치하여 한 빌딩 표면에 설치한 풍압 센서는 총 180개이다. 풍압 센서의 수신 주기는 500Hz로 측정하였다.

트윈 빌딩 시스템에 있어서 두 빌딩 사이의 거리는 중요한 부분이다. Fig. 1과 같이 빌딩의 폭을 B 라고 하고 두 빌딩사의 거리를 S 라고 할 때 $S/B=0.33$ 으로 가정하였다.

그리고 바람 하중의 방향은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 트윈 빌딩의 두 빌딩이 나란히 서있을 때 정면에서 불어오는 경우를 고려하였다.

3. 적합 직교 분해 기법

앞서 언급한 바와 같이 트윈 빌딩에 있어서 풍하중은 매우 복잡한 형태로 이루어져 있다. 적합 직교 분해 기법을 통해서 이러한 복잡한 형태의 풍하중의 특성을 식별할 수 있다.

적합 직교 분해 기법을 적용하기 위해서 풍압 센서들로부터 측정된 데이터를 $X \times Y$ 매트릭스로 나열할 수 있다. 여기서, X 축은 풍압 센서의 총 개수를 나타내고, Y 축은 각 풍압 센서에서 측정시간 동안 측정한 풍압계수 데이터를 나타낸다. 이러한 $X \times Y$ 매트릭스를 기반으로 상관 행렬을 계산할 수 있으며, 다음 식을 통하여서 고유 값을 계산할 수 있다.

$$C_m \times \Phi_i = \lambda_i \times \Phi_i (i = 1, \dots, N) \quad (1)$$

여기서, C_m 은 풍동 실험을 통해 얻어진 데이터로 계산한 상관 행렬을 나타낸다. 그리고 Φ_i 은 고유벡터를 나타내고 λ_i 는 고유값을 나타낸다. $i = 1, \dots, N$ 을 위한 고유벡터와 고유값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[\Phi] = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n] \quad (3)$$

기존에 단지 시간 이력에 따른 풍압 데이터만을 이용하여 풍압의 평균값을 주로 이용하였으며, 최대 혹은 최소의 풍압만 이용하여 공기역학적 특성을 파악하는 것과는 달리 추가적으로 공기역학적 특성을 파악할 수 있는 정보를 적합 직교 분해 기법을 통해서 얻을 수 있다.

본 논문에서 적합 직교 분해 기법을 이용해 얻어진 고유벡터는 식별되어진 다양한 풍압의 분포를 나타내고 고유값은 각 고유벡터의 에너지 분포를 나타낸다.

적합 직교 분해 기법으로부터 얻어진 고유벡터들은 필요에 따라서 선택할 수 있으며 선택되어진 고유벡터에 대해서 공기역학적 특성을 파악할 수 있다. 이를 위해서는 선택된 고유벡터의 재생성이 필요한데 재생성을 위해서는 다음과 같은 식을 이용하게 된다.

$$P_s = \Phi_s \times (P_c - \bar{P}) \quad (4)$$

여기서, Φ_s 는 선택되어진 고유벡터들의 매트릭스를 나타내고, P_c 는 기존의 풍압계수 원본 데이터를 나타낸다. \bar{P} 는 계측된 원래 풍압계수의 평균값을 나타낸다.

필요에 따른 고유벡터를 선택한 다음에는 식 (4)에서 풍압계수의 평균값을 제거하였기 때문에 재생성 시에는 다음의 식을 이용해서 다시 더하여 준다.

$$D_s = (\Phi_s^T \times P_s) + \bar{P} \quad (5)$$

여기서, D_s 는 선택되어진 고유벡터들에 의해 재생산된 데이터이다.

본 논문에서는 두 종류의 고유값과 고유벡터를 논의하였다. 혼돈을 피하기 위해서 풍동실험과 적합 직교 분해 기법을 통해서 얻는 결과는 본 논문에서는 POD 고유값, POD 고유벡터, 그리고 POD 모드라 칭하기로 하였다.

반면에, 구조공학에서 고유값과 고유벡터는 주로 구조물의 동적 특성을 파악하는데 사용한다. 따라서 트윈 빌딩 구조물 동적 특성과 관련된 내용들은 본 논문에서는 구조적 고유값, 구조적 고유벡터, 그리고 구조적 모드라 칭하기로 한다.

4. 구조해석을 위한 3차원 트윈 빌딩 모델

풍하중에 의한 빌딩의 횡 변위는 풍직각 방향과 풍 방향과

같이 다양하게 일어난다. 그러므로 풍하중으로 빌딩의 변위를 계산하기 위해서 트윈빌딩의 3차원 해석 모델이 필수적이다. 또한 일반 고층 빌딩과 비교해서 두 빌딩이 연결된 경우에 더 복잡해지므로 해석 모델을 만드는 것이 더욱 중요하다.

본 논문에서 적용한 3차원 트윈 빌딩의 모델은 풍동실험에서 적용한 트윈 빌딩과 같으며 두 빌딩의 구조적 특성은 동일하다고 가정하였다. 두 빌딩을 연결하는 구조부재는 각 빌딩의 최상층에 설치되었다.

풍하중을 고려한 트윈 빌딩의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M + M_L]\ddot{u} + C\dot{u} + [K + K_L]u = F \quad (6)$$

여기서, M , C , K 는 각각, 트윈 빌딩 각층의 질량, 댐핑, 강성 매트릭스를 나타낸다. M_L 과 K_L 은 두 빌딩을 연결함으로써 생기는 추가적인 구조부재의 질량과 강성 매트릭스이다. F 는 시간 이력에 따른 풍하중을 나타낸다. \ddot{u} , \dot{u} 그리고 u 는 각각 각층의 횡 방향 가속도, 속도, 변위를 나타낸다.

두 빌딩의 연결 부재 양 끝 부분의 강성 매트릭스 K_L 은 Fig. 2와 같이 축 방향과 전단 방향에 대한 힘과 그리고 휨 모멘트가 고려되었다.

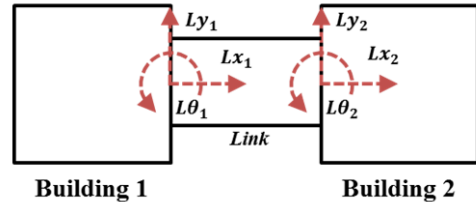


Fig. 2 Degrees of freedom at the two link ends

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 POD 모드에 의한 압력 분포

트윈 빌딩의 두 빌딩이 바람이 불어오는 방향에 마주하여 나란히 위치할 때는 두 빌딩의 공력 특성은 수학적으로 동일하다. 이러한 이유로 본 장에서는 Fig. 1에서 나타낸 빌딩 1의 공기역학적 특성에 대해서 주로 논의하였다.

1차 POD 모드와 평균 풍압 분포도에서 바람을 마주하는 앞쪽(windward)의 표면에서는 두 빌딩들 사이에 채널링(channeling) 효과 때문에 풍압의 분포도가 비대칭으로 나타나고, 앞쪽의 표면과 가까운 안쪽(inner) 측면의 표면에서는 음의 풍압이 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

이러한 결과 또한 채널링 효과와 관련이 있다. 그러나 바깥쪽(outside) 측면의 표면과 바람이 가려지는 뒤쪽(leeward)

측면의 표면에서는 음의 풍압이 나타나기는 했지만, 일반적인 고층 빌딩의 압력 분포도와 비슷하였다.

2차 POD 모드에서는 음의 풍압이 바깥쪽 측면의 표면에 1차 모드 보다 명확하게 나타났다. 이러한 압력 분포도는 와류 현상과 관련이 있으며 풍 직각 방향의 하중에 영향을 미치게 된다.

반면에 안쪽 측면의 표면은 음이나 양의 압력이 거의 발생하지 않았다. 이러한 이유는 두 빌딩의 간격이 상대적으로 작기 때문에 바람의 흐름이 빌딩의 간격의 큰 경우보다 상대적으로 작게 된다. 그러므로 안쪽 측면의 표면에는 와류 현상이 나타나지 않게 된다.

3차 POD 모드에서는 바람의 흐름이 두 빌딩 사이에는 매우 약하므로 주로 바람을 마주하는 앞쪽 표면에 영향을 많이 미치게 된다. 따라서 3차 POD 모드는 풍 방향의 하중과 직접적인 관련이 있는 압력 분포도를 나타낸다.

5.2 POD 모드의 확률밀도 함수

앞서 언급한 바와 같이, 본 논문에서 언급하는 트윈 빌딩의 두 빌딩은 구조부재로 연결되어 있고, 풍하중에 의한 각 빌딩의 움직임은 서로에게 영향을 주게 된다. 각 빌딩의 하중은 시간에 따라서 나타낼 수 있다. 본 장에서는 이 결과를 조인트 확률밀도 함수를 이용해서 나타내었다.

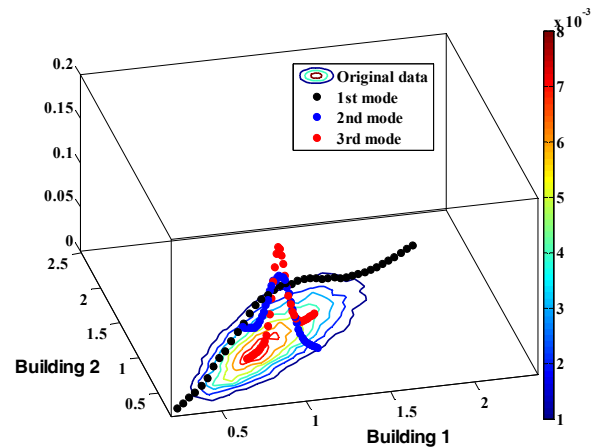
5.1에서 언급한 적합 직교 분해 기법을 이용해서 얻은 각 고유벡터를 재생성하여 확률밀도 함수로 나타내었고, 기존의 원래 데이터로 얻어진 결과도 참고사항으로 함께 나타내었다.

풍 방향의 풍하중을 나타내는 Fig. 3의 (a)에서 기존의 원래 데이터를 보면, 전반적으로 빌딩 1의 하중이 증가하면 빌딩 2의 하중 또한 증가하게 된다. 반대로, 빌딩 1의 하중이 감소하면 빌딩 2의 하중도 감소하게 된다. 따라서 풍 방향의 풍하중은 양의 연관성을 가지게 된다.

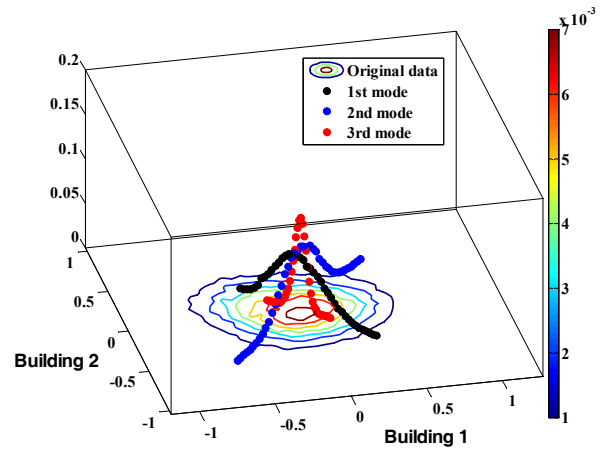
여기서 1차 모드와 2차 모드는 두 빌딩의 풍 방향의 풍하중이 양의 상관관계를 하는데 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 또한 3차 모드는 음의 상관관계를 나타내기는 하지만, 그 영향력이 1차와 2차 모드들에 비교해서 적은 것을 알 수 있다.

반면에 풍 직각 방향의 풍하중을 나타내는 Fig. 3의(b)에서 기존의 원래 데이터를 보면 양의 상관관계나 음의 상관관계를 나타내지는 않는다. 이러한 결과는 POD 모드들을 통해서 명확히 파악할 수 있다. 2차 모드는 양의 상관관계를 나머지 1차와 3차 모드들은 음의 상관관계에 주된 기여를 한다.

적합 직교 분해 기법으로부터 얻어진 모드들을 통해서 기존의 원래 데이터가 나타내는 풍 하중의 상관관계에 따른 결과를 좀 더 명확하게 이해할 수 있었다.



(a) Along-wind forces



(b) Cross-wind forces

Fig. 3 Joint PDF of wind forces between the two buildings(Kim and Tse, 2018)

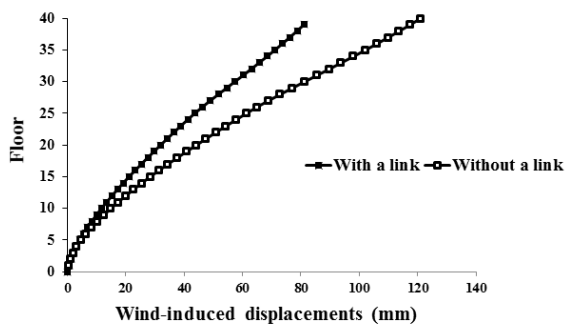
5.3 트윈 빌딩을 연결하는 구조 부재의 효과

풍하중에 의한 고층건물의 횡 변위에 대한 평가는 구조 설계를 하는데 있어서 중요한 부분이다. 본 장에서는 POD 모드를 이용하여 횡 변위에 대한 트윈 빌딩의 연결하는 구조 부재의 효과를 조사하여 보았다.

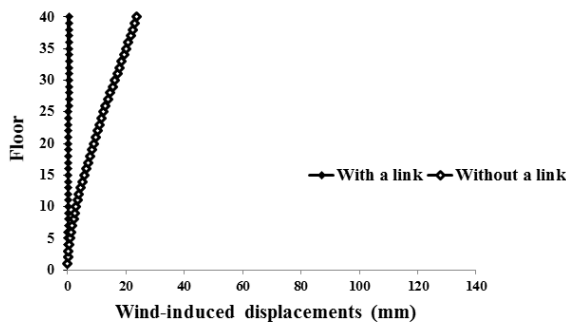
일반적인 고층건물에서의 횡 변위는 풍 방향보다는 풍 직각 방향에 변위에 대해서 중점적으로 다루어야 한다. 이에 따라서 Fig. 4에서는 풍 직각방향의 풍하중에 의해서 발생하는 횡 변위를 기존의 데이터와 적합 직교 분해를 통해서 얻어진 결과를 이용하여 각각 계산하여 보았다.

적합 직교 분해 기법을 적용전의 기존 데이터를 이용한 횡 방향 변위의 결과를 보면, Fig. 4(a)와 같이 트윈 빌딩을 연결하는 구조 부재가 있는 것과 없는 것의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

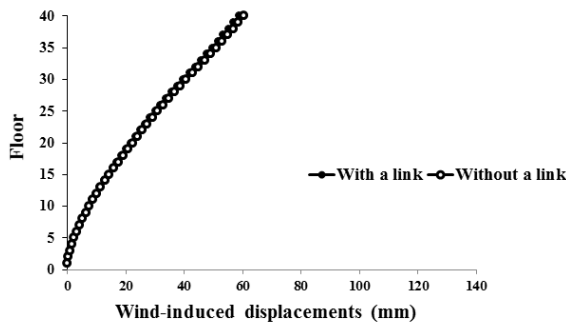
적합 직교 분해 기법을 적용전의 기존 데이터의 결과만 보면



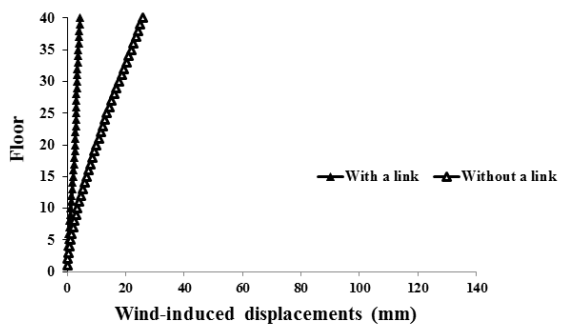
(a) Original data



(b) 1st mode



(c) 2nd mode



(d) 3rd mode

Fig. 4 Standard deviation of the wind-induced displacements

Fig. 4(a)와 같이 트윈 빌딩을 연결하는 구조 부재의 효과를 파악하기 어렵다. 그러나 적합 직교 분해 기법을 적용함으로써 그 원인을 상대적으로 보다 명확히 파악할 수 있다.

예를 들어 풍 직각 방향의 횡 변위에 있어서 1차 POD 모드의 경우에는 5.2장의 Fig. 3(b)에서 본 바와 같이 두 빌딩의 풍 하중은 음의 상관관계를 명확하게 나타내게 된다. 두 빌딩을 연결하는 구조부재가 없는 경우와 비교해서 연결하는 구조 부재가 있는 경우, Fig. 4(b)와 같이 횡 방향의 변위가 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

같은 이유로, 풍 직각 방향의 횡 변위에 있어서 Fig. 3(b)와 같이 3차 POD 모드의 경우에 음의 상관관계를 명확하게 나타 내면, Fig. 4(d)와 같이 연결하는 구조부재가 있을 경우에 횡 변위가 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과의 이유는 두 빌딩의 풍하중이 음의 상관관계를 가지면 횡 변위는 서로 반대 방향으로 생기게 된다. 이러한 상황에서 두 빌딩을 연결하는 구조부재가 있으면 서로 반대 방향으로 움직이는 횡 변위를 경감시켜 주는 역할을 한다.

반면에, 2차 POD 모드의 경우는 Fig. 3(b)와 같이 두 빌딩의 풍하중이 양의 상관관계를 가지게 되면, Fig. 4(c)에서 보는 바와 같이 두 빌딩을 연결하는 구조부재가 횡 방향을 줄이 는데 역할이 거의 없으며, 횡 변위가 구조부재가 없는 경우와 비슷함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 적합 직교 분해 기법을 이용해서 트윈 빌딩의 공기역학적 특성을 평가하여 보았으며, 트윈 빌딩의 두 빌딩의 풍 하중의 상관관계를 파악하였다. 이에 더하여 두 빌딩을 연결 하는 구조부재의 영향에 대해서 조사하여 보았다.

적합 직교 분해 기법을 이용해서 트윈 빌딩 모델의 표면에서 나타나는 다양한 풍압에 대해서 파악하였으며 1차 모드에서 채널링 효과를 2차 모드에서 와류 효과를 파악할 수 있었다.

두 빌딩의 풍 방향의 풍하중은 명확한 양의 상관관계를 가지는 반면에 풍 직각 방향의 풍하중은 양이나 음의 상관관계를 나타 내지 않았다. 적합 직교 분해 기법을 통한 각 고유 POD 벡터는 두 빌딩의 풍하중의 상관관계를 알아보는데 추가적인 정보를 제공하였다.

두 빌딩의 연결하는 구조부재의 효과에 있어서 적합 직교 분해 기법의 결과가 두 빌딩의 풍하중이 음의 상관관계를 가지면, 횡 방향 변위를 줄이는데 연결하는 구조부재가 영향을 미치는 것을 파악할 수 있었다.

반면에 두 빌딩의 풍하중의 양의 상관관계를 가지면 두 빌딩의 연결하는 구조부재의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 풍하중이 양의 상관관계를 가지면, 두 빌딩이 풍하중에 대해서 같은 방향으로 움직이기 때문에 두 빌딩의 연결하는 부재의 역할이 미비하기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 2011년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0018360).

References

Bailey, P.A., Kwok, K.C. (1985) Interference Excitation of Twin Tall Buildings, *J. Wind Eng. & Ind. 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., 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. & Ind. Aerodyn.*, 115, pp.150~161.

Khanduri, AC., 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. & Ind. Aerodyn.*, 69-70, pp.631~646.

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., Yoshida, A., Park, H.S. (Under review) Independent Component Analysis of Wind-induced Pressure Fields on Two Tall

Buildings, *Build. & Environ.*

Kim, W., Tamura, Y., Yoshida, A. (2011) Interference Effects on Local Peak Pressures between Two Buildings, *J. Wind Eng. & Ind. 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. & Ind. 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. & Ind. Aerodyn.*, 99(5), pp.615~623.

Solari, G., Carassale, L., Tubino, F. (2007) Proper Orthogonal Decomposition in Wind Engineering. Part 1: A State-of-the-Art & Some Prospects, *Wind & Struct.*, 10, 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. & Ind. 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. & Ind. Aerodyn.*, 72, pp.421~432.

Taniike, Y., Inaoka, H. (1988) Aeroelastic Behavior of Tall Buildings in Wakes, *J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.*, 28(1-3), pp.317~327.

요 지

트윈 빌딩의 풍하중의 특성과 구조적 특성은 일반 고층건물보다 복잡하다. 이러한 특성을 조사하기 위해서 풍동실험을 통해서 트윈 빌딩의 풍압을 측정하였다. 측정된 데이터와 적합 직교 분해 기법을 이용하여 풍압의 패턴을 파악하였다. 1차 모드에서는 채널링 효과가 2차 모드에서는 와류 효과가 나타났다. 또한, 두 빌딩의 하중의 상관관계를 파악하였는데, 풍 방향 하중은 양의 상관관계를 가지며, 풍 직각 방향의 하중은 명확한 상관관계가 나타나지 않았다. 이러한 상관관계는 횡 방향 변위에도 영향을 미쳤다. 양의 상관관계를 가지면 트윈 빌딩을 연결하는 구조부재의 영향이 적게 작용한 반면에 음의 상관관계를 가지면 연결 구조부재의 영향이 횡 방향의 변위를 줄이는데 큰 영향을 미치게 되었다.

핵심용어 : 고층 빌딩, 트윈 빌딩, 풍하중, 적합 직교 분해 기법, 풍응답, 공기역학적 연관성