

빌딩에 작용하는 공력 특성의 통계 분석

Statistical Analysis of Aerodynamic Characteristics on Buildings



박희원*
Park Heewon



유바라지 나타라잔**
Yuvaraj Natarajan



김법렬***
Kim Bubryur

1. 서론

고층 빌딩에서 풍하중의 공력 특성은 매우 복잡한 형태를 가진다. 복잡한 풍하중의 특성으로 인해 빌딩 표면에서 발생하는 풍압 패턴과 고층 빌딩 주변에서 발생하는 바람의 흐름을 파악하기 위한 통계 분석 기법이 발전을 거듭해 왔다.

다수의 연구에서 고유 직교 전개 분석(POD: Proper Orthogonal Decomposition)으로 알려진 주성분 분석(PCA: Principal Component Analysis)의 통계적 접근 방법을 이용해 왔다. 이 접근 방법은 PCA를 통해 난류 풍압의 고유 구조를 확인할 수 있으며, 광범위하게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 직교성이 물리적으로 정의되지 못하는 경우도

발생한다는 단점이 있다. 이에 따라 독립 성분 분석(ICA: Independent Component Analysis)에 근거한 비직교 전개를 사용하여 풍압 패턴을 확인하는 방법이 사용되기 시작하였다.

주성분 분석과 독립 성분 분석은 서로 다른 방법으로 통계적 방법을 이용하여 풍압이나 공력 특성을 분석한다. 따라서 두 방법을 모두 사용하여 빌딩 표면의 풍압 패턴이나 공력 특성을 확인할 필요성이 대두되고 있다¹⁻⁴⁾. 본고에서는 풍압 및 바람의 흐름을 계측하는 풍동 실험 방법을 소개하고, 계측을 통해서 얻은 데이터에 독립 성분 분석과 주성분 분석을 적용하는 방법을 논하고자 한다. 더불어 주 성분 분석이 적용된 사례를 소개하고자 한다.

2. 통계 분석

2.1 독립 성분 분석(ICA)

주성분 분석과 독립 성분 분석에서는 먼저 중심화 공정을 확인해야 한다. 풍압 패턴을 파악하기 위한 통계 분석적 방법을 보면 풍동 실험으로부터 얻

* 경일대학교 건축공학과, 학사
Dept. of Architectural Engineering, Kyungil University

** 경일대학교 건축공학과 박사후과정, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Kyungil University

*** 경일대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Kyungil University

은 풍압 계수를 영평균 변수로 만들기 위해서 풍압 계수의 평균값을 빼야 한다.

중심화 공정에서 진행한 풍동 실험을 통해 얻은 풍압 데이터 $q(t)$ 는 생성 모델로 만든 데이터이다. 예를 들어 풍압 계수 $q(t)$ 의 임의 변동은 식 (1)과 같은 기본 소스의 선형 혼합에 의해 계산된 수치이다.

$$q(t) = A \times s(t) \tag{1}$$

단, A 는 미지의 역행렬로서 데이터 성분을 혼합한 행렬이며, $s(t)$ 는 미지의 독립 성분을 포함한다. 기본 소스의 추정값이 선형 변환 데이터인 새로운 행렬 W 는 식 (2)와 같이 구성한다.

$$\tilde{s}(t) = W \times z(t) \tag{2}$$

단 $z(t) = \lambda^{-1/2} \times \phi_i^T \times q(t)$ 이고, W 는 $\tilde{s}(t) \approx s(t)$ 인 A^{-1} 의 근사값이다. $z(t)$ 에서 λ_i 와 ϕ_i 는 각각 고유값과 고유 벡터이다. $i = 1, \dots, n$, λ_i 이면 ϕ_i 를 다음과 같은 행렬로 나타낼 수 있다.

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$[\phi] = [\phi_1 \dots \phi_n] \tag{4}$$

W 를 정의하면 빌딩 모델에 작용하는 풍압 패턴이 식 (5)와 같이 혼합 행렬 A 로 나타남을 알 수 있다.

$$A = \phi_i \times \lambda_i^{1/2} \times W^T \tag{5}$$

그러면 $s(t)$ 를 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$s(t) = W \times \lambda^{-1/2} \times \phi_i^T \times q(t) \tag{6}$$

단 W 는 미지의 직교 행렬이다. 행렬 $W = [w_1 \dots w_n]^T$ 를 구하기 위한 한 가지 접근법은 직교 벡터로 확률

변수 $y_k = w_k^T \times z$ ($k = 1, \dots, n$)의 비가우스성을 최대화하는 것이다. 이러한 개념을 사용하여 비가우스성을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{NG}(y) = E[g(y)^2] \tag{7}$$

단, g 는 식 (8)에서 얻은 매개 변수 a (예, $a=1.5$)를 가지는 비선형 함수이다.

$$g(y) = \frac{1}{a} \log[\cosh(ay)] \tag{8}$$

행렬 W 를 활용하면 w_k ($k = 1, \dots, n$)의 임의 초기값이 식 (9)와 같아진다.

$$E[zg'(w_k^T z)] - E[g''(w_k^T z)] \rightarrow w_k \quad (k = 1, \dots, n) \tag{9}$$

단, g' 와 g'' 은 각각 g 의 1차 및 2차 도함수이다. 행렬 W 는 식 (10)과 같이 새롭게 얻은 w_k ($k = 1, \dots, n$)로 직교화 할 수 있다.

$$(WW^T)^{-1/2} \times W \rightarrow W \tag{10}$$

비가우스성 $J_{NG}(y)$ 은 Fast ICA라는 알고리즘으로 최대화 할 수 있다.

2.2 주성분 분석(PCA)

주성분 분석은 풍동 실험을 통해 생성된 랜덤 데이터 원본에서 풍압 또는 바람의 흐름 패턴을 찾아낸다. 풍압 패턴을 파악하기 위한 통계 분석적 방법을 살펴보면 빌딩 모델에 작용하는 풍압 계수의 임의 변동은 $q(t)$ 로 표현되며 이는 $t = 1, \dots, N$ 인 이산 함수이다. 풍압 계측으로 추정된 공분산 행렬은 식 (11)과 같다.

$$C_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q(t)q(t)^T \tag{11}$$

공분산 행렬은 다음 고유값 문제를 계산함으로써 구할 수 있다.

$$C_m \times \phi_i = \lambda_i \times \phi_i (i = 1, \dots, N) \quad (12)$$

C_m 은 랜덤 데이터 원본을 통해 추정된 공분산 행렬이다. ϕ_i 는 고유 벡터이며, λ_i 는 고유값이며 내림차순으로 정렬된다. 본 연구에서의 모드, 즉 풍압 패턴은 고유 벡터에서 얻은 것이다. 나아가 주성분 분석을 통해 확인된 고유 벡터와 고유값은 식 (3) 및 (4)와 동일한 행렬 형태를 가진다.

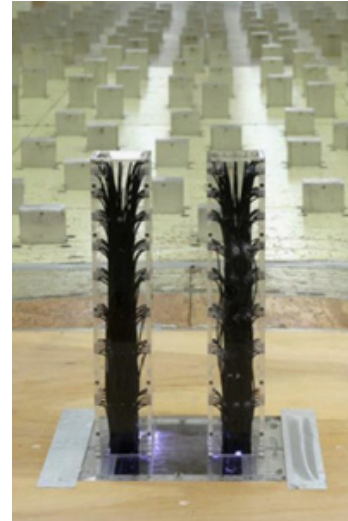
3. 풍동 실험

본 장에서는 풍동 실험 종류의 하나인 풍압 계측과 입자 영상 유속계(PIV: Particle Image Velocimetry)에 대해서 소개한다. 그리고 이를 통해서 얻은 결과에 주성분 분석을 적용하여 풍압의 패턴과 바람 흐름의 패턴을 파악한 사례를 소개하고자 한다.

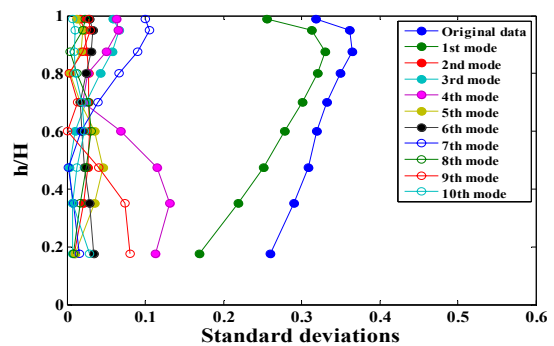
3.1 풍압 계측

1960년대에 도입된 풍동 실험은 실계측의 한계로 인해 축소 모형을 활용하여 구조나 환경에 작용하는 바람의 영향을 연구한다. 풍압 계측 실험은 <Fig. 1>에서 볼 수 있듯이 빌딩 모형의 표면에 위치한 압력 센서를 사용하여 이루어진다. 압력 센서는 국소 풍압과 빌딩 모형 표면에 작용하는 바람의 영향을 파악할 수 있다. 빌딩 표면에 부착된 다수의 센서를 이용하여 모든 국소 부위에서 풍압을 계측할 수 있다. 압력 센서와 이에 해당하는 지류의 풍압을 통해 빌딩에 작용하는 풍력을 계측할 수 있다. 또한 빌딩 전반에 걸친 풍압 분포를 추정할 수 있으며, 국소 풍하중(빌딩에 작용하는 풍압 패턴 및 빌딩 높이에 작용하는 풍력의 상관 계수)도 확인할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 풍압 패턴과 풍하중은 매우 복잡하다. 주성분 분석을 이용하면 각 주성분 분석 모드에 근거하여 풍력 요소, 즉 성분을 재구성할 수 있다. 재구성된 풍력 요소는 빌딩에 작용하는

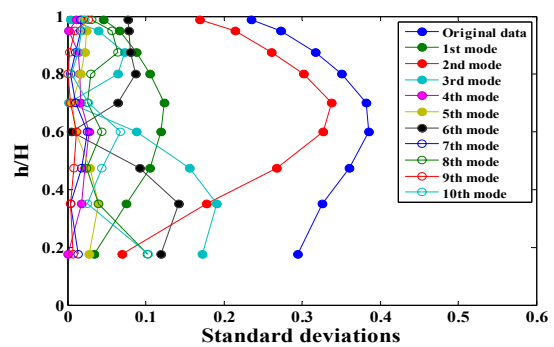
풍력 특성을 이해하는데 도움이 된다. 나아가 각 주성분 분석 모드는 풍력 요소(국소 변동풍, 측풍 및 비틀림역 요소)에 영향을 미친다. 각 주성분 분석 모드가 주는 영향을 파악한 덕분에 기존의 데이터에 나타난 풍력 요소의 원인을 더 명확히 규명하는 것이 가능해졌다.



<Fig. 1> Downscale model in the wind tunnel²⁾

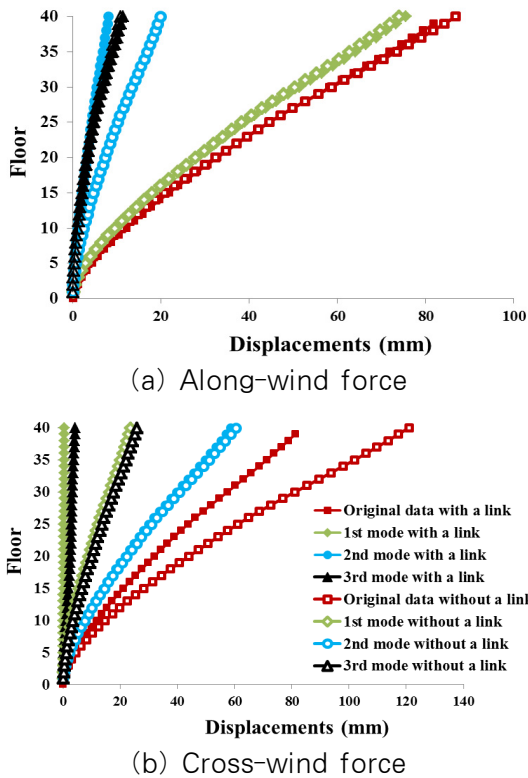


(a) Along-wind force



(b) Cross-wind force

<Fig. 2> Standard deviation of wind force coefficients on building³⁾



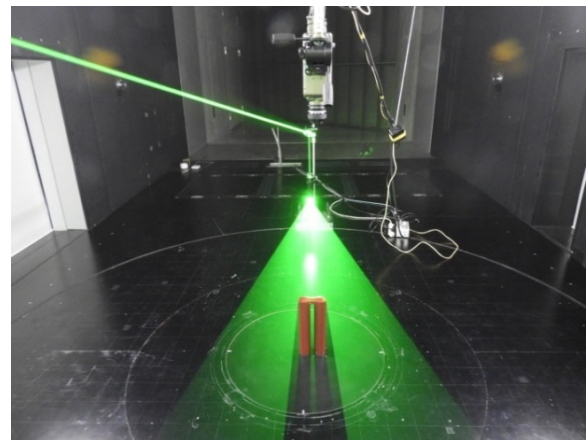
〈Fig. 3〉 Standard deviation of the lateral wind-induced displacement responses¹⁾

구체적인 예로서 기존의 데이터 및 각 모드에 나타난 국소 풍력 계수의 표준 편차가 〈Fig. 2〉에 표현되어 있다. 재구성된 풍력 요소는 각 풍력 요소에 대한 정보를 제공한다. 그 뿐만 아니라 주성분 분석 모드를 사용하면 다양한 풍하중이 건물의 풍응답에 미치는 영향을 파악할 수 있으며, 그 외 다양한 정보를 알 수 있다. 〈Fig. 3〉은 두 고층 빌딩이 링크로 연결된 구조물에서 한쪽 고층 건물의 풍응답을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 링크로 연결된 구조물에서 링크가 풍응답에 미치는 영향을 주성분 분석을 이용하여 면밀히 조사하였다.

3.2 입자 영상 유속계

입자 영상 유속계(PIV)는 추적 입자의 속도를 측정하여 풍속을 계산하는 간접 계측 시스템이다. 입자 영상 유속계를 통해 평면에서 각 입자의 속도 벡터를 관찰할 수 있다. 입자 영상 유속계 시스템은 풍속 필드를 갖추기 위해 하위 시스템으로 이루어

진다. 우선 한정된 짧은 기간 동안 추적 입자를 바람에 산발적으로 날리도록 한다. 바람의 흐름을 적절하게 살펴보기 위해서는 충분한 수량의 입자가 요구되며, 이때 단면광이 입자의 흐름을 비춘다. 디지털 고체촬상소자 카메라가 바람의 흐름을 측정하며, 이미지 데이터는 후처리한다. 각 이미지 데이터는 하위 영역에 저장된다. 계측에 이용된 두 단면광 사이의 시간차에 의한 변위 벡터를 나누어 국소 풍속과 바람의 벡터를 확인할 수 있다. 〈Fig. 4〉는 풍동 실험에 사용된 빌딩 모형과 카메라이며, 단면광이 입자의 흐름을 비춘 모습이다.

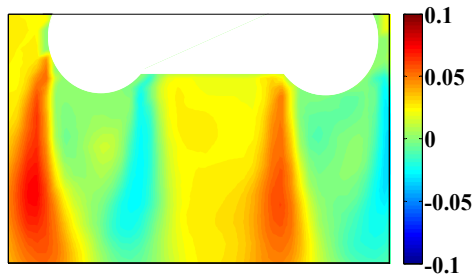


〈Fig. 4〉 Device for measuring the linked building model and the wind flow⁴⁾

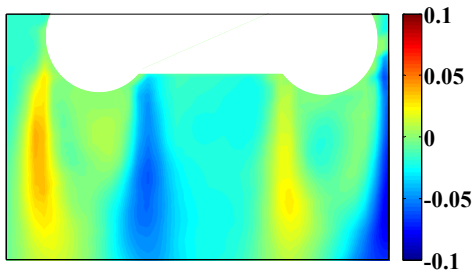
앞서 언급한 바와 같이 다양한 빌딩 유형에 작용하는 바람 흐름의 패턴을 연구할 때 주로 영상 유속계나 유동 가시화 기법을 사용한다. 영상 유속계는 풍동 실험에서 빌딩 주변에 부는 바람의 순간 유동과 벡터, 속도 및 소용돌이도를 계측한다. 그러나 난류와 같은 바람의 환경은 매우 복잡하여 영상 유속계만을 사용하면 순간 유동을 계측함으로써 관련된 공력 특성들을 이해하기 어렵다. 그러므로 주성분 분석을 사용하여 영상 유속계를 통해 얻은 기존 데이터에서 주풍의 유동 패턴을 파악하는 것이 중요하다.

〈Fig. 5〉는 영상 유속계를 통해서 얻은 데이터에 주성분 분석을 적용한 사례로 두 빌딩이 링크로 연

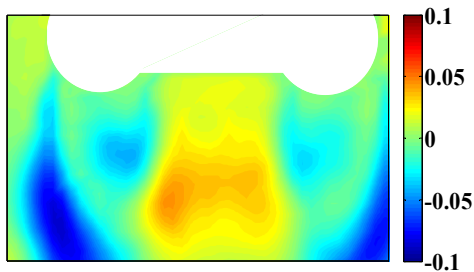
결된 구조물에서 바람의 흐름을 나타낸 것이다. 링크가 설치된 아래쪽을 계측하여 바람의 흐름을 관찰하고자 하였다. 두 빌딩 주변에서 바람의 흐름이 가지는 평행한 패턴을 관찰할 수 있었으며, 건물 주변에서 발생하는 와류 현상이 나타났다. 그리고 입자 영상 유속계와 주성분 분석을 이용하여 바람의 흐름을 명확하게 시각화 할 수 있었으며, 이를 통해 건물 주변의 바람 특성을 직접 확인할 수 있었다. 이는 입자 영상 유속계 데이터에 주성분 분석을 적용할 때 얻을 수 있는 장점 중 하나이다.



(a) First mode



(b) Second mode



(c) Third mode

〈Fig. 5〉 PCA modes of velocity⁴⁾

4. 결론

본고에서는 빌딩에 작용하는 공력 특성을 파악하기 위한 통계 분석 방법인 주성분 분석과 독립 성분 분석 방법을 몇 가지 분석 사례와 함께 소개하였다.

현대사회에 접어들면서 건축 기술과 설계 방법은 많은 발전을 이루어왔지만 태풍과 같은 풍하중의 피해는 여전히 발생하고 있다. 이는 재산 피해는 물론이고 인명 피해와도 관련이 있다. 본고에서 소개한 통계 분석 방법들을 이용하여 빌딩에 작용하는 공력 특성을 더욱 면밀하게 조사한다면 빌딩 구조재의 안전성은 물론이고 창문이나 가설물과 같은 비구조재의 안전성까지 확보할 수 있으리라 판단한다.

References

1. Kim, B., & Tse, K. T., "POD analysis of aerodynamic correlations and wind-induced responses of two tall linked buildings", *Engineering Structures*, Vol.176, pp.369~384, 2018
2. Kim, B., Tse, K. T., & Tamura, Y., "POD Analysis for Aerodynamic Characteristics of Tall Linked Buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.181, pp.126~140, 2018
3. Kim, B., Tse, K. T., Yoshida, A., Tamura, Y., Chen, Z., Phuc, P. V., & Park, H. S., "Statistical Analysis of Wind-Induced Pressure Fields and PIV Measurements on Two Buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.188, pp.161~174, 2019
4. Kim, B., Tse, K. T., Yoshida, A., Chen, Z., Phuc, P. V., & Park, H. S., "Investigation of Flow Visualization Around Linked Tall Buildings with Circular Sections", *Building and Environment*, Vol.153, pp.60~76, 2019