

## 고층 타워에 작용하는 동적 풍압력의 POD 방법을 이용한 시공간적 특성 해석

### Proper Orthogonal Decomposition Analysis of Dynamic Wind Pressures Acting on a Tall Tower Model

이 미 화\*      함 희 정\*\*  
Yi, Mee-Hwa    Ham, Hee-Jung

#### Abstract

The wind and wind-induced dynamic wind pressures fluctuate irregularly according to time and space. In this study, the proper orthogonal decomposition(POD) technique is applied to wind pressures acting on a tall tower model, and the following results are found: the along-wind and across-wind forces can be reconstructed by only four dominant POD modes, and the reconstructed errors are 4.71% and 22%, respectively for across-wind and along-wind directions. The physical meanings for dominant modes are also presented in the paper. The POD analysis can compress complex wind pressure data only by a few dominant modes and interpret spatio-temporal characteristics of wind pressure by novel way while existing statistical methods do not have such benefits.

키워드 : POD 기법, 풍방향 풍력, 풍직각방향 풍력, 시공간적 특성, 재건 오차율

Keywords : *Proper orthogonal recomposition analysis, along-wind force, across-wind force, spatio-temporal characteristics, reconstructed error*

#### 1. 서론

바람과 이에 기인한 풍압력은 시간과 공간에 따라 불규칙하게 변동하는 랜덤(Random)한 특성을 가지고 있다. 전통적으로 건물에 작용하는 동적 풍하중의 시공간적 성격은 평균, 표준편차, 극대치와 같은 통계치를 기초로 해석되어왔다. 그러나 이러한 통계치들로부터 접근풍과 건물의 상호작용에 대한 물리적 현상을 종합적으로 나타내기 어렵다는 것이 일반적인 견해이다. 따라서 기존 해석방법의 단점을 해결하기 위해 여러 가지 수치해석 기

법이 소개 되었으며 본 논문에서 적용한 Proper Orthogonal Decomposition(POD) 방법은 그러한 기법 중의 하나이다.

Holmes & Best(1981)<sup>1)</sup>는 복잡한 난류 유동(자연 바람)에서 건물의 풍압 변동을 POD 기법을 사용하여 해석하였다. 여기에서는 상관관계와 공분산, 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터 성분에 대한 개념을 설명하고 있다. 압력의 공분산이 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 찾아내기 위해 적용되었으며, 압력 변동 성분과 관계된 고유벡터 모드(여기에서는 첫 번째, 세 번째, 네 번째 고유벡터 모드)의 중요성이 논의되었다. Bienkiwicz<sup>2),3)</sup>, Ham<sup>2),3),4)</sup> 등은 저층건물 지붕에서의 동적 하중을 연구하기 위해 POD 기법을 적용하였다. 압력 공간 공분산이 지붕 동적 하중의 주요 모드와 주좌

\* 강원대학교 대학원 건축학부 석사과정

\*\* 강원대학교 건축학부 조교수, 공학박사

표(principal coordinates)를 찾기 위해 적용되었으며, 지붕 압력의 시간이력을 재건하는데 이용되었다. 이때, 오직 몇 개의 모드와 주좌표를 이용하여 압력을 재건한 결과 실제 시간 이력과 잘 일치함을 알 수 있었다. Tamura<sup>5),6)</sup> 등은 압력과 접근풍(approaching wind) 사이의 상호관계를 찾기 위해 POD 기법을 고층건물에 작용하는 변동 풍압에 적용하였다. Tamura<sup>5),6)</sup> 등에 의하면 변동풍압의 주요 주좌표와 접근풍속 중의 횡방향 성분이 큰 상호관계를 가지고 있다고 하였다. 또한, Davenport<sup>7)</sup>는 풍하중과 풍하중으로 인한 응답을 단순화하기 위해 POD 방법을 적용시켰다.

이를 바탕으로, 본 논문에서는 변동 풍압장에 숨겨진 체계적인 시공간적 구조를 찾아내기 위해 POD 해석 방법을 이용해 고층 타워 모형의 풍압을 해석하였으며, 더불어 POD 해석방법과 그 유용성에 대해 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

본 실험은 대우 건설 기술연구소의 회류형 경계층 풍동에서 수행되었다. 풍동 규모는 3×2×20m (W×H×L)이다. 송풍기는 직경 3m의 축류 팬 형식으로 풍속 측정 범위는 0.5~30m/s이며 측정 장치는 다점 풍압 동시측정이다. 이 풍동은 외기 영향을 최소화하기 위해 지하구조물로 설치되었으며 소음을 차단하고 특수한 목적 실험이 가능하게 하기 위해 특수 차음 시트가 사용되었다. 대기 경계층(ABL)을 형성하기 위해 풍동 바닥에 표면 조도 요소와 스파이럴을 설치하였다. 건물의 풍압계수는 1:250 스케일로 만든 각형 모형으로부터 측정되었다. 건물모형과 압력공 위치는 그림 1에 나타나있다. 각형 모형은 높이 40cm(실제 100m), 폭 3.4cm(실제 8.5m)의 정방형 평면으로 되어 있다. 측정 풍향은 0°이며 각형 모형 표면은 120개 압력공이 균등하게 분포되어 있다. 변동 풍압의 샘플링 간격은 0.0025초이며 16,384의 샘플링 포인트를 갖는다. 결과적으로 각각의 압력공으로부터 40.96초의 시간이력이 측정되었다. 변동 풍압력은 POD 해석 시 사용되는 공분산 행렬을 계산하기 위하여 전자식 풍압 측정기기를 사용하여 얻어졌다.

## 3. 해석 방법(POD)

POD 해석 방법의 가장 큰 목적은 임의장(random field) 전체의 모든 요소들과 상관관계를 가지는 결정함수  $\varphi(x,y)$ 를 찾는 것이다. 함수  $\varphi(x,y)$ 에 주어진 임의의 신호  $p(x,y,t)$ 를 투영한 최대값이 얻어졌다. 이 연산의 적분 형식은 다음과 같다.

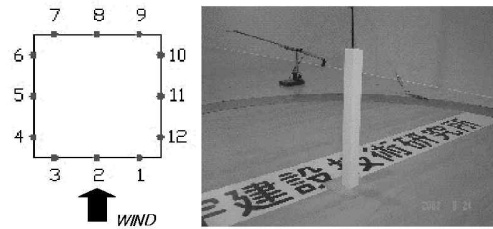
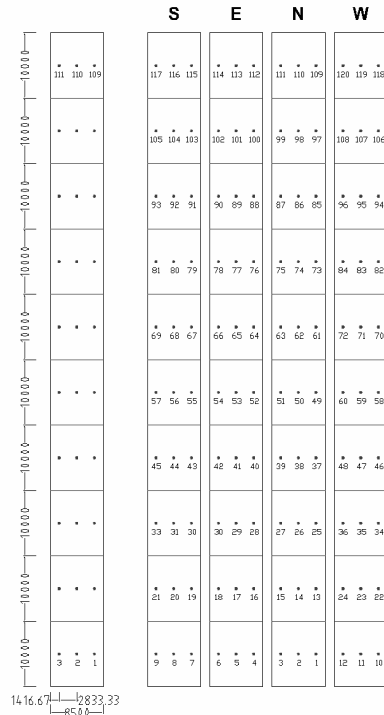


그림 1 건물 모형과 압력공 위치

$$\int p(x,y,t)\phi(x,y)dxdy = \max \quad (1)$$

그리고 이것을 정규화하면,

$$\frac{\int p(x,y,t)\phi(x,y)dxdy}{\sqrt{\int \phi^2(x,y)dxdy}} = \max. \quad (2)$$

건물 압력이 랜덤(random)하고 양(+), 음(-)의 값 둘 다 가지고 있기 때문에, 식 (1)의 체급값이 POD 해석에서 고려되어야 하고 이것의 최대값이 얻어질 때 (2)식은 (3)식과 같이 전개될 수 있다.

$$\frac{\langle [\int p(x,y,t)\phi(x,y)dxdy] [\int p(x',y',t)\phi(x',y')dx'dy'] \rangle}{\int \phi^2(x,y)dxdy} = \lambda > 0. \quad (3)$$

(3)식은 결과적으로 (4)식과 같은 고유값 문제 (Eigenvalue problem)를 유발시킨다.

$$\int R_p(x,y,x',y')\phi(x',y')dx'dy' = \lambda \phi(x,y) \quad (4)$$

여기에서  $R_p(x,y,x',y')$ 는 압력의 공간 공분산이다. 적분은 압력의 이산값(discrete values)이 명기될 때 수학적으로 수행된다. 가장 간단한 경우로, 압력이 규칙적으로 공간에 분포되어 있고 직교규칙(rectangular rule)이 적분에 적용되는 경우, 식 (4)는 (5)식과 같이 대체될 수 있다.

$$[R_p]\phi = \lambda\phi. \quad (5)$$

여기에서  $[R_p]$ 는 공분산 행렬이고  $\phi$ 는 고유벡터이다. 식 (5)는 Homes & Best에 의해 논의된 공분산 방법을 이용한 것과 같은 것이다. 결과적으로 변동 풍압력의 공간 공분산 행렬을 알게 되면, 식 (4)에서의 고유값 문제는 풀리고, 고유값  $\lambda_n$ 과 고유함수  $\phi_n$ 이 계산된다. 고유벡터는 압력의 급수 전개에서 기본 함수로 사용된다.

$$p(x,y,t) = \sum a_n(t)\phi_n(x,y) \quad (6)$$

여기에서 주좌표  $a_n(t)$ 는 다음과 같다.

$$a_n(t) = \frac{\int p(x,y,t)\phi_n(x,y)dxdy}{\int \phi_n^2(x,y)dxdy} \quad (7)$$

식 (7)에서, 고유함수는 (8)식과 같이 정규직교(orthonormal)의 성격을 가지고 있다.

$$\int \phi_n(x,y)\phi_m(x,y)dxdy = \delta_{nm}. \quad (8)$$

즉 이는 주좌표들이 직교하는 것을 의미한다.

$$\langle a_n(t)a_m(t) \rangle = \lambda_n\delta_{nm} \quad (9)$$

여기에서  $\delta_{nm}$ 은 Kronecker delta이다.

#### 4. 해석 결과

그림 2와 3은 실험에서 얻어진 평균 풍압과 RMS 풍압 분포를 나타낸다. 변동 풍압력 전체의 해석을 위하여 해석된 풍압력은 평균값을 포함하고 있다. 전체 120개의 압력공의 시간이력을 사용하여 POD 해석을 수행하였으며 그림 4는 에너지

를 가장 많이 가지고 있는 8개의 고유벡터(식 4 참조)들의 모습들이다. 그림에서 왼쪽 수직좌표는 모형높이를 나타내고, 오른쪽 수직좌표는 무차원화된 높이( $z/H$ )를 나타내고 있다. 그림 5는 풍방향과 풍직각 방향의 파워 스펙트럼을 보이고 있다. 그림 6에는 에너지가 큰 8개 주좌표의 파워 스펙트럼이 그려져 있다. 그림 7은 각각의 고유 벡터와 주좌표에 의해 얻어진(식 6 참조) RMS 풍력의 수직분포를 나타내고, 그림 8은 선택된 지배적인 모드들로부터 재건한 풍력의 RMS 수직분포를 나타낸다. 그림 9는 선택된 지배적인 모드들로부터 재건된 풍방향과 풍직각방향 풍력의 시간이력의 모습이다. 비교를 위해 원래 풍력의 RMS 수직분포와 시간이력을 그림 8과 9에 각각 제시하였다.

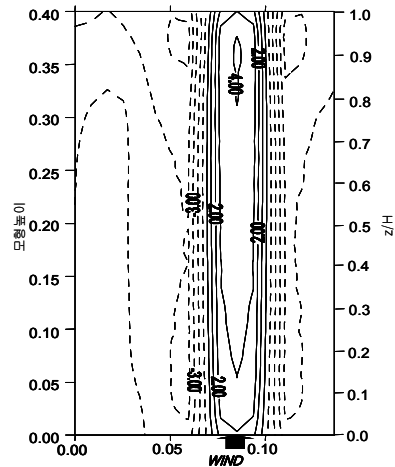


그림 2 평균 풍압

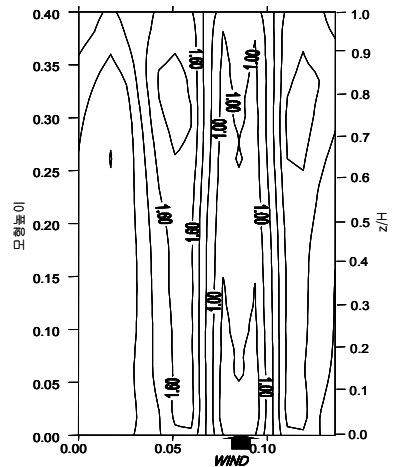
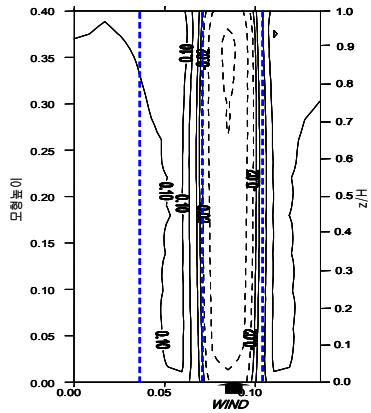
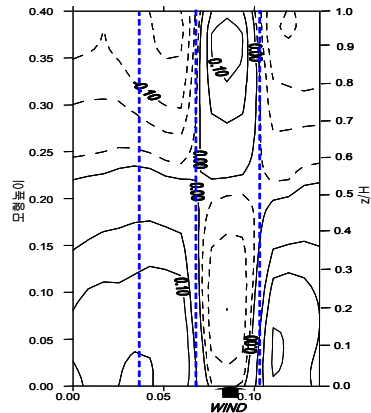


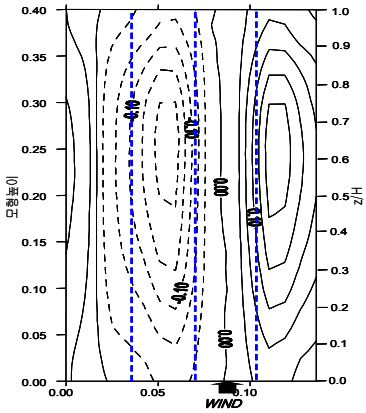
그림 3 풍압의 RMS



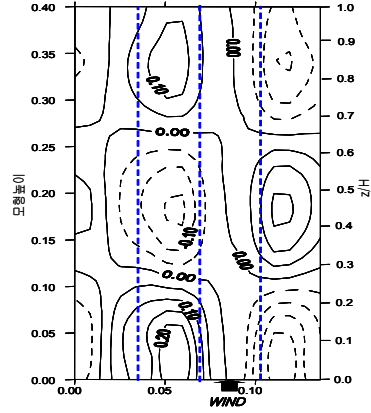
(a) 1st mode shape



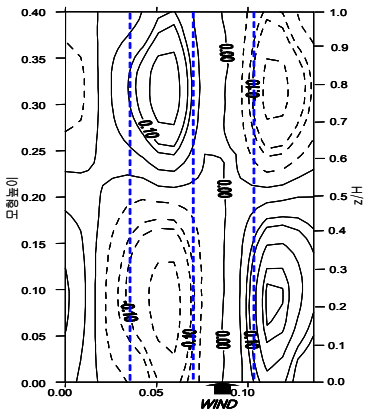
(d) 4th mode shape



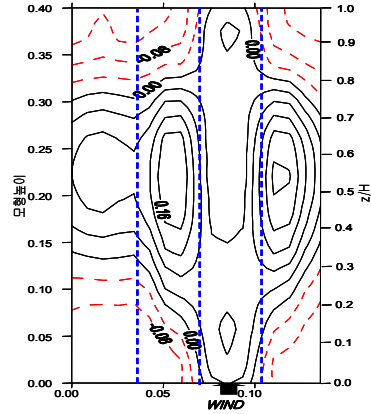
(b) 2nd mode shape



(e) 5th mode shape



(c) 3rd mode shape



(f) 6th mode shape

그림 4 에너지가 가장 큰 8개의 고유벡터(계속)

고층 타워에 작용하는 동적 풍압력의 POD 방법을 이용한 시공간적 특성 해석

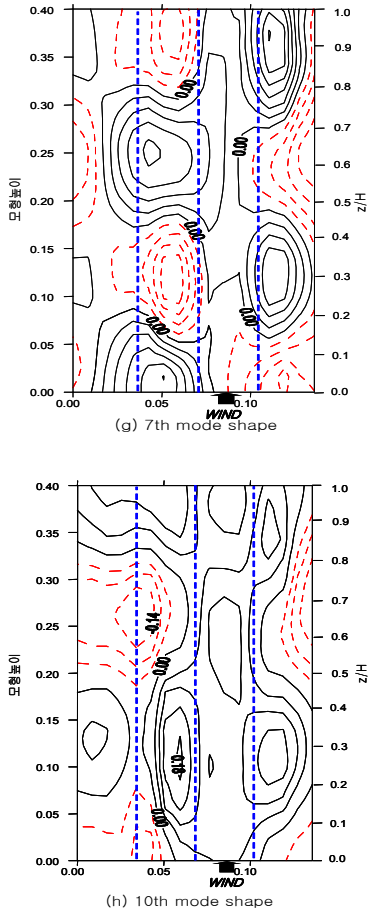


그림 4 에너지가 가장 큰 8개의 고유 벡터

가장 큰 에너지를 가지고 있는 8개의 고유벡터(mode shape)의 특징을 분석하면 다음과 같다.

**1st mode:** 첫 번째 모드의 형상(mode shape)은 좌우 대칭이다. 이것은 바람이 불어오는 면(windward face)의 0.8H에서 높은 값을 가진다. 첫 번째 모드의 파워 스펙트럼(power spectrum density)은 풍방향(along-wind) 파워 스펙트럼과 유사한 모습을 보이고 있음을 알 수 있다. 첫 번째 모드로부터 도출된 풍방향 풍력(along-wind force)의 RMS(Root mean square)는 POD 해석을 하지 않은 원래(original) 풍압력과 유사하게 분포되어 있고, 크기도 다른 모드들에 비해 월등히 큰 것을 알 수 있다. 이것은 풍방향의 풍력에 대해 첫 번째 모드의 기여도가 크다는 것을 나타낸다. 반면, 풍직각 방향 풍력(across-wind force)의 RMS에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타난다.

**2nd mode:** 두 번째 모드의 형상은 좌우 비대칭으로 나타난다. 이것은 측벽 중앙부근(0.6H)에서 높은 값을 보이고 있다. 두 번째 모드의 파워 스펙트럼은 풍직각방향 풍압력의 파워 스펙트럼과 유사함을 알 수 있다. 두 번째 모드로부터 도출된 풍직각방향 풍압력의 RMS는 POD 해석을 하지 않은 원래 풍압력의 RMS치와 유사하게 나타나며, 풍방향 풍력에 대한 기여도가 거의 없는 것으로 나타난다.

**3rd mode:** 세 번째 모드 또한 좌우 비대칭으로, 풍직각방향 풍력의 RMS가 0.8H와 0.2H에서 큰 값을 나타내고 있다. 반면, 0.55H에서는 거의 0에 가까운 값을 나타내며, 풍방향 풍력의 RMS에는 거의 영향을 주지 않는다. 세 번째 모드의 파워 스펙트럼 밀도는 풍직각방향 풍력의 파워 스펙트럼과 유사한 모습을 보인다.

**4th mode:** 네 번째 모드의 형상은 좌우 대칭의 모습을 보이며, 파워 스펙트럼은 풍방향 풍력의 파워 스펙트럼과 유사한 모습을 보이나, 저주파수에서는 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 네 번째 모드로부터 도출된 풍방향 풍력의 RMS의 수직분포를 살펴보면, 0.55H에서는 0이고, 꼭대기와 밑바닥에서 큰 값을 나타내고 있다. 반면, 풍직각방향 풍력의 RMS에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타난다.

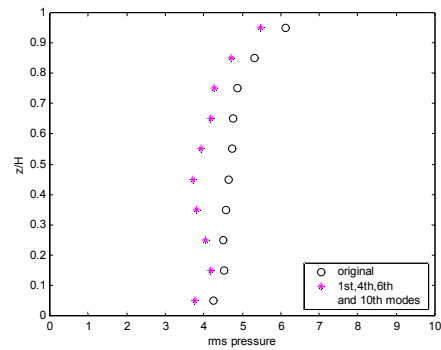
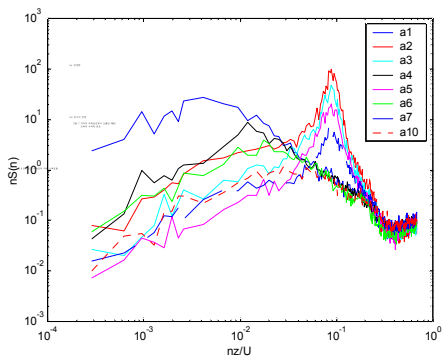
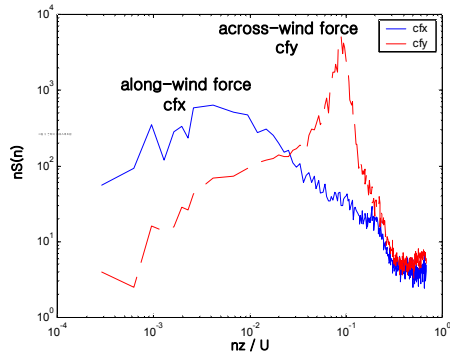
**5th mode:** 다섯 번째 모드의 형상은 좌우 비대칭으로 나타나며, 파워 스펙트럼 밀도는 풍직각방향 풍력의 파워 스펙트럼과 비슷하다. 다섯 번째 모드로부터 도출된 수직풍력의 RMS의 수직분포에서, 0.85H와 0.45H에서 큰 값을 보이고 있는데 반해, 0.65H와 0.25H에서는 0에 가까운 작은 값을 나타낸다. 풍방향 풍력의 RMS의 수직분포에는 영향이 거의 없는 것으로 나타난다.

**6th mode:** 여섯 번째 모드의 형상은 좌우 대칭으로, 파워 스펙트럼은 풍방향 풍력의 파워 스펙트럼과 유사한 모습을 보이고 있다. 여섯 번째 모드로부터 도출된 풍방향 풍력의 RMS를 보면, 위에 언급한 모드보다 기여도가 크지는 않으나, 0.15H와 0.75H 윗부분에서 약간의 기여를 함을 알 수 있다.

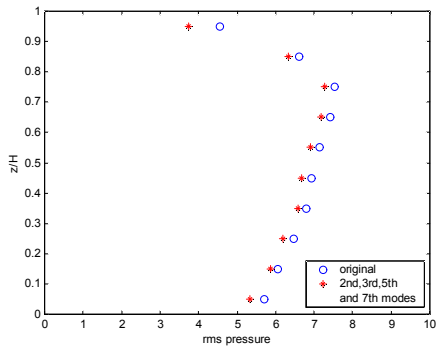
**7th mode:** 일곱 번째 모드의 형상은 좌우 비대칭으로, 파워 스펙트럼은 풍직각방향 풍력과 유사하게 변하고 있다. 일곱 번째 모드로부터 도출된 풍직각방향 풍력의 RMS는 0.75H, 0.45H, 0.15H 세부분에서 0에 가까운 값을 나타내고 있으며, 0.6H와 0.3H에서 최대값을 보이고 있다. 그러나

풍방향 풍력의 RMS를 살펴보면, 0.25H에서 0의 값이 나타나고 이 위치의 상하에서 다소 영향을 주고는 있지만, 그 값이 크게 나타나지 않는다. 따라서 일곱 번째 모드는 풍직각방향 풍력에 영향을 주는 모드로 구분할 수 있다.

**10th mode:** 열 번째 모드는 좌우 대칭적인 모습을 보이고 있다. 열 번째 모드의 파워 스펙트럼은 풍방향 풍력의 파워 스펙트럼과 유사하게 변하나, 저주파수에서는 다소 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 열 번째 모드로부터 도출된 풍방향 풍력의 RMS의 수직분포를 살펴보면, 0.85H와 0.25H에서 0에 가까운 값을 나타내며, 0.65H에서 최대값을 나타낸다. 그러나 열 번째 모드는 풍직각방향 풍력의 RMS에는 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.



고층 타워에 작용하는 동적 풍압력의 POD 방법을 이용한 시공간적 특성 해석



(b) 풍직각방향

그림 8 선택된 지배적 모드들로부터 재건된 RMS 풍력의 수직적 분포

