

풍압과 변위의 동시계측을 통한 고층건물의 공력 특성 평가

Simultaneous Measurement of Wind Pressures and Displacements on Tall Building

김 용 철*
Kim, Yong Chul

로 위안룽**
Lo, Yuan-Lung

윤 성 원***
Yoon, Sung-Won

Abstract

Vortex-induced vibration and instability vibration of tall buildings are very important fluid-structure interaction phenomenon, and many fundamental questions concerning the influence of body movement on the unsteady aerodynamic force remain unanswered. For tall buildings, there are two experimental methods to investigate the characteristics of unsteady aerodynamic forces, one is forced vibration method and the other is free vibration method. In the present paper, a free vibration method was used to investigate the unsteady aerodynamic force on tall building whose aspect ratio is 9 under boundary layer simulating city area. Wind pressures on surfaces and tip displacements were measured simultaneously, and the characteristics of tip displacements and generalized forces were discussed. It was found that variation of across-wind displacements showed different trend between the case when wind speed increases and wind speed decreases, and the fluctuating generalize forces in across-wind direction of vibrating model are larger than that of static model near the resonant wind speed and approach to the static value. And for higher wind speed range, there were two peaks in across-wind power spectra of generalize forces of vibrating model, which means that two frequency components are predominant in unsteady aerodynamic forces.

Keywords : Unsteady aerodynamic force, Instability vibration, Tall building, Free vibration method

1. 서론

건물이 고층화되고 형상비가 커질수록 구조설계에서 지진하중보다는 풍하중이 지배적이라는 것은 매우 잘 알려진 사실이다. 바람에 의한 구조물의 진동은 크게 풍방향 진동, 풍직각방향 진동, 그리고 비틀림 진동으로 구분할 수 있으나, 비틀림 진동은 다른 두 진동에 비해 매우 작기 때문에, 구조물에 편심이 크지 않은 경우에는 설계상 문제가 되지 않는다.

풍방향 진동은 주로 바람의 난류성분에 의해 발생하는 진동으로 버페팅(Buffeting)이 대표적이다. 풍직각방향 진동에는 구조물의 측면이나 후면에 교대로 형성되어 방출되는 와류에 의한 와류진(Vortex-induced vibration)이나 건물의 진동과 함께 발생하는 부가적인 공기력(비정상공기력, Unsteady aerodynamic force)에 의한 공력불안정 진동(Instability vibration) 등이 있다.

구조물의 감쇠율이 비교적 작거나 혹은 구조물의 일반화질량이 작은 경우에는 버페팅 진동보다는 풍속과 함께 증가하는 와류진이나 공력불안정 진동이 문제가 된다. 와류진은 와류의 방출주파수와 건물의 고유진동수가 같은 풍속(공진풍속)에서 최대 변위를 보이는 진동으로, 와류진과 공력불안정 진동은 자려진동적인 성격이 강해 일단 발생하면 경우에 따라서는 구조물이 파괴될 수 있다는 특징이 있다. 따라서 예비설계 단계에서 와류진이나 공력불안정진동

* 교신저자, 동경공예대학교 건축학과 부교수, Ph.D.
Tokyo Polytechnic University
Tel: +81-(0)46-242-9521 Fax: +81-(0)46-242-9521
E-mail: kimyc@arch.t-kougei.ac.jp

** 정회원, 탐강대학교(대만) 토목학과 조교수, Ph.D.
Tamkang University(Taiwan)

*** 정회원, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
Seoul National University of Science and Technology

을 상세히 검토하는 것은 고층건물의 내풍설계상 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

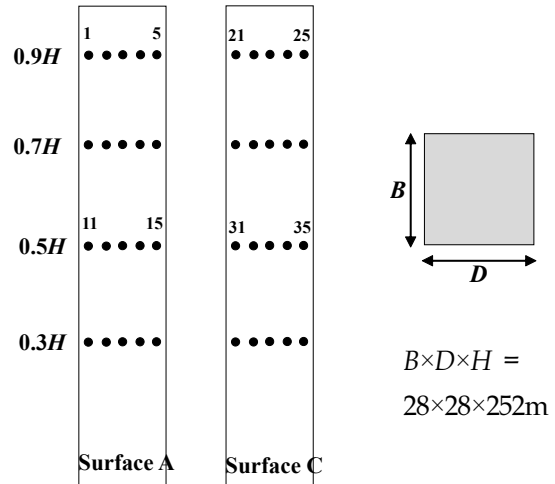
고층건물의 형상은 사회적인 역할과 요구되는 기능에 따라 다양화됨과 동시에, 건물이 진동할 경우에도 박리(Separation)가 항상 발생하기 때문에 고층건물에 작용하는 비정상공기력을 이론적으로 검토하기는 거의 불가능하고, 풍동실험에 의존할 수밖에 없다. 고층건물과 같은 비선형물체에 작용하는 비정상공기력을 실험적으로 검토하는 대표적인 방법에는 자유진동법과 강제진동법이 있다. 자유진동법은 상사법칙에 근거하여 시스템의 고유진동수와 감쇠를 스프링과 댐퍼 등을 이용하여 실제 고층건물과 유사하게 재현하고, 탄성지진된 모형에 작용하는 풍압을 계측함으로써 진동하는 모형의 비정상공기력을 검토하는 방법이다. 이 방법의 가장 큰 장점은 기존의 짐발(Gimbal)을 사용하여 실험이 가능하다는 점이지만, 비정상공기력만을 직접 계측할 수 없기 때문에 비정상공기력의 유무와 특성을 정성적으로밖에 검토할 수 없다는 단점이 있다. 이에 반해 강제진동법은 모형을 일정한 변위와 진동수로 강제로 진동시키고, 이 때 발생하는 관성력을 적당한 방법으로 제거함으로써 비정상공기력만을 직접 계측하는 방법으로, 강제진동장치를 별도로 제작해야 하는 어려움이 있지만, 비정상공기력의 시간이력을 직접 계측할 수 있기 때문에 정량적인 검토가 가능하다는 큰 장점이 있다.

유체역학 분야에서는 일반적으로 시간과 함께 변동하는 공기력(Aerodynamic force)을 총칭하여 비정상공기력으로 부르지만, 본 연구에서는 모형의 진동에 의해 발생하는 부가적인 변동풍력만을 비정상공기력으로 한정하였다. 난류경계층하에서 3차원 모형을 대상으로 한 연구가 적다는 점을 감안하여 기존의 짐발을 이용한 자유진동법으로 형상비가 9인 고층건물에 작용하는 풍압과 변위를 동시에 계측하여 비정상공기력의 특성을 검토하였다.

2. 풍동실험

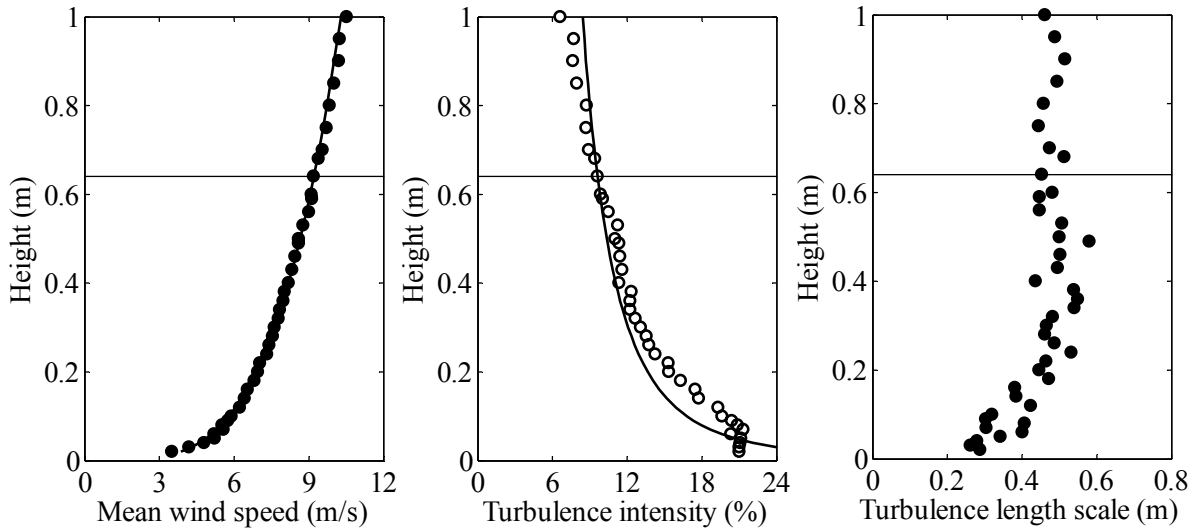
풍동실험은 대만의 탐강대학교 풍공학연구센터에서 수행하였다. 실험 모형 및 전경을 <Fig. 1>에 나

타내었다. 한 변의 길이가 0.07m이고, 형상비가 9인 정사각형 단면을 가진 고층건물로 대상으로 하였다. 길이 스케일은 1/400, 시간 스케일은 1/40로 가정하여, 실제 10분 상당의 샘플을 25개 얻을 수 있도록 실험시간을 조절하였다. 풍압공은 모형의 마주보는 두 면에 설치하였고, 한 면에 20개씩 총 40개의 풍압공을 동시 계측하였다.



<Fig. 1> Pressure taps (Taps are not installed on Surface B and D) and setting of model

실험기류의 연직분포를 <Fig. 2>에 나타내었다. 풍속고도분포지수(α)가 0.25인 난류경계층으로, 모형 높이에서의 평균풍속은 0~9.8m/s이고, 난류강도는 약 10%이다. 또, 난류스케일은 풍동바닥으로



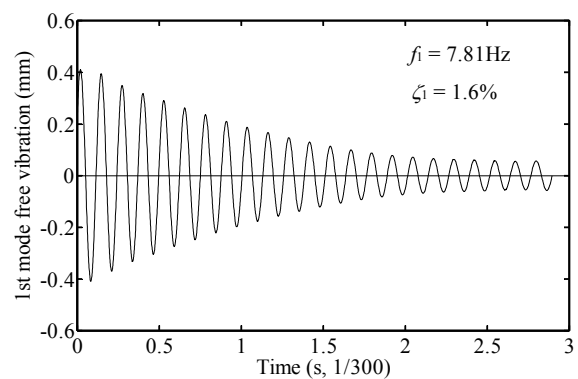
<Fig. 2> Profiles of mean wind speed, turbulence intensity and turbulence length scale (From the left)

부터 0.25m 이상에서는 0.5m로 일정한 값을 보였다. 풍진동실험은 풍방향과 풍직각방향의 변위를 레이저 변위계로 계측하였지만, 해석에서는 풍압공이 설치된 방향만을 대상으로 하였다. 레이저 변위계의 샘플링주파수는 300Hz이다. 고정된 모형을 대상으로 풍압실험을 먼저 수행한 후 진동이 허용된 상태에서 풍압실험과 풍진동실험과 동시에 수행하였다. 풍압실험의 샘플링주파수는 300Hz이고, 풍향은 풍압공이 설치된 면이 풍방향에 위치한 경우(풍향 0°)와 풍직각방향에 위치한 경우(풍향 90°)를 대상으로 하였다. 풍속이 증가할 경우(0→9.8m/s)와 풍속이 감소할 경우(9.8m/s→0m/s)의 변위와 풍압을 각각 계측하였다.

본 연구에서 사용한 실험 조건을 <Table 1>에, 풍압공이 설치된 방향의 자유진동파형을 <Fig. 3>에 나타내었다. 자유진동파형으로부터 구한 시스템의 1차 모드의 고유진동수와 감쇠율은 각각 7.81Hz와 1.6%로, 모형 내에 풍압공과 연결된 튜브의 영향으로 감쇠율은 다소 크지만, 고유진동수는 목표값(7.94Hz)과 비슷함을 알 수 있다. 실험 전후에 자유진동을 각각 수행하여 자유진동파형으로부터 고유진동수와 감쇠율을 확인하였다. 무차원풍속은 실제 설계풍속이 98m/s까지 되도록 설정하였고, 1차 모드의 일반화질량(M_1)은 0.15kg로, 실제 건물 밀도의 150kg/m³에 해당한다.

<Table 1> Experimental conditions

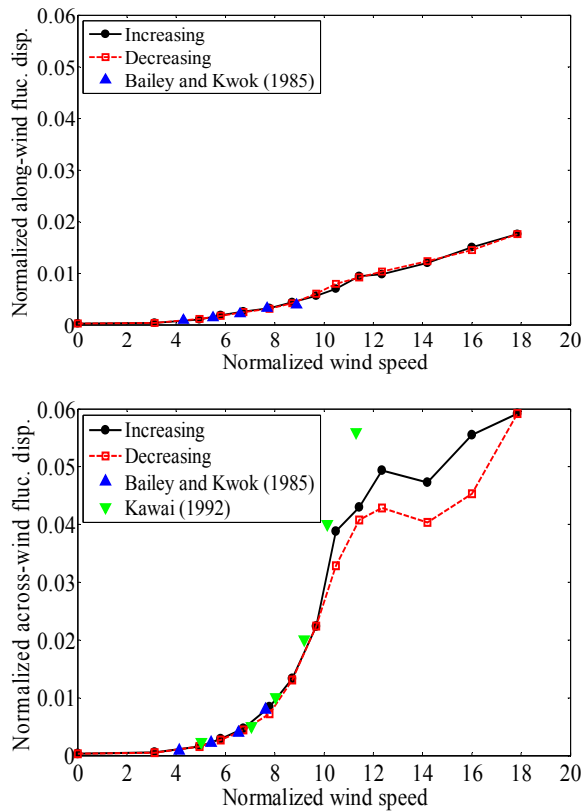
	Full	Model	Scale
B (m)	28	0.7	1/400
D (m)	28	0.7	1/400
H (m)	252	0.63	1/400
U_H (m/s)	~ 98	~ 9.8	1/10
f_1 (Hz)	0.2	7.94	1/40
ζ_1 (%)	as low as possible	1.6	1
M_1 (kg)	9.87×10^6	0.15	$(1/400)^3$
Scruton number	-	1.97	-



<Fig. 3> Free vibrations the system

3. 실험결과 및 고찰

<Fig. 4>에 풍진동실험으로부터 구한 풍방향 및 풍직각방향의 무차원변동변위(σ/B)의 무차원풍속($U_H^*=U_H/f_1/B$)에 따른 변화를 나타내었다.



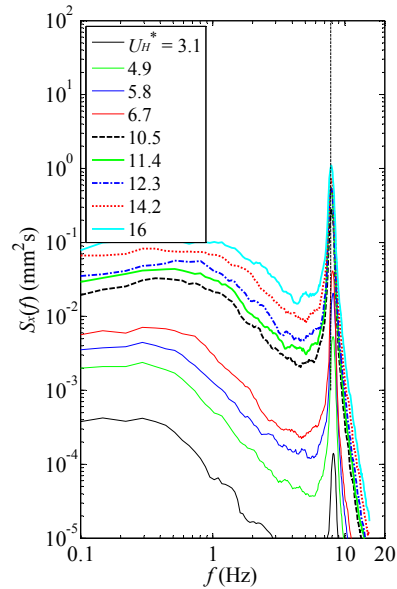
<Fig. 4> Variation of along-wind(top) and across-wind displacements(bottom)

풍방향의 경우, 무차원풍속과 함께 천천히 증가하고, 풍속을 증가시키면서 계측한 결과(검정 실선)와 풍속을 감소시키면서 계측한 결과(붉은 점선)에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 풍직각방향의 경우, 무차원풍속과 함께 큰 폭으로 증가하고, 특히 고풍속영역에서는 풍속을 증가시키면서 계측한 결과가 풍속을 감소시키면서 계측한 결과보다 더 큰 값을 보임을 알 수 있다. Bailey and Kwok(1985)¹⁾과 Kawai(1992)²⁾의 실험 결과를 본 연구의 실험 결과와 함께 <Fig. 4>에 나타내었다. <Table 2>는 실험 조건을 정리한 것으로, 실험 조건이 다소 틀리지만, 풍방향의 경우 매우 비슷한 값을, 풍직각방향의 경우 고풍속영역에서 Kawai(1992)의 결과와 다소 차

이가 나지만, 전체적으로 보았을 때, 본 실험과 잘 일치한다고 할 수 있다.

<Table 2> Comparison of experimental conditions

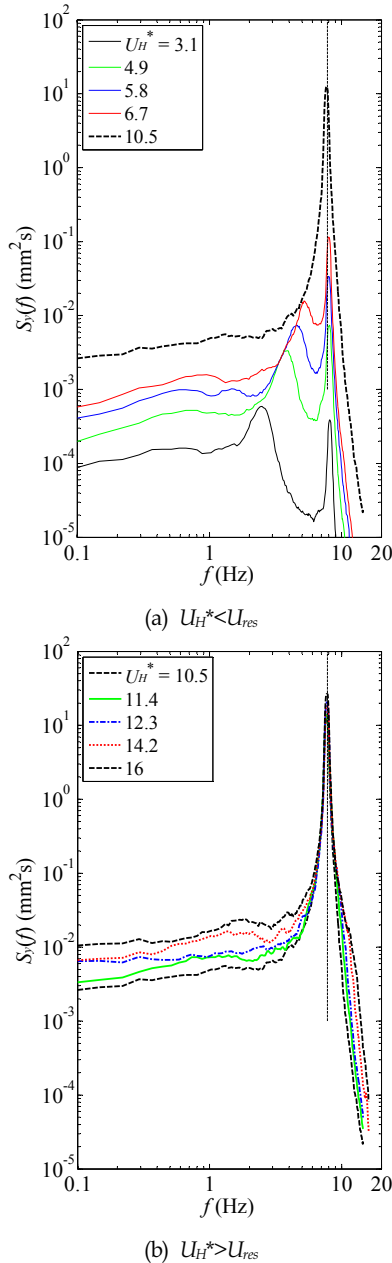
	Bailey and Kwok (1985) ¹⁾	Kawai (1992) ²⁾	Present study
H/B	9	10	9
α	0.15	0.3	0.25
$I_{uH}(\%)$	-	8~9	10
$\zeta_1(\%)$	1	1.7	1.6
$\rho_B(\text{kg/m}^3)$	0.11	0.12	0.15



<Fig. 5> The power spectra of along-wind displacements

<Fig. 5>에 풍방향 변위의 파워스펙트럼($S_x(f)$)을 나타내었다. 풍속이 증가함에 따라 변동변위의 분산에 해당하는 파워스펙트럼의 면적은 증가하고, 이는 <Fig. 4>와 정성적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 또 시스템의 고유진동수에 해당하는 주파수에서 피크를 보이고 있지만, 그 외의 주파수 영역에서는 특별한 특징을 찾아 볼 수 없다.

풍직각방향 변위의 파워스펙트럼($S_y(f)$)을 <Fig. 6>에 나타내었다. 고정된 모형으로부터 구한 공진풍속(스트로할 수의 역수) $U_{res} = 10$ 을 기준으로 저풍속



〈Fig. 6〉 The power spectra of cross-wind displacements

영역과 고풍속영역으로 구분하여 나타내었다. 저풍속영역에서는 시스템의 고유진동수에 해당하는 주파수에서 나타나는 피크 이외에 와류의 방출로 인한 피크를 관찰할 수 있고, 풍속이 커짐과 동시에 와류의 방출주파수도 증가하고, 공진풍속 부근에서는 와류의 방출주파수와 시스템의 고유진동수가 일치하는 록인(Lock-in)영역이 나타남을 알 수 있다. 풍속이 공진풍속보다 커질 경우에는 피크값과 함께

전 주파수 영역의 파워는 증가하였다.

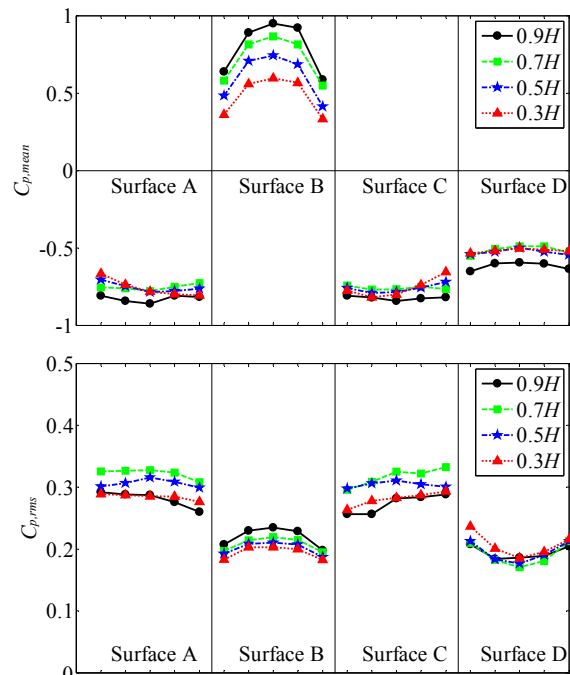
각 풍압공으로부터 계측된 풍압을 식 (1)과 같이 모형 높이에서의 속도압을 이용하여 풍압계수를 구하였다. 또, 각 풍압공의 분담 폭과 분담 높이를 이용하여 식 (2)와 같이 풍방향(풍향 0°) 및 풍직각방향(풍향 90°)의 1차 선형 모드에 대한 일반화풍력을 구하였다.

$$C_{pi} = \frac{p_i}{q_H} \tag{1}$$

$$C_{Fi} = \sum_{i=1}^n C_{pi} \left(\frac{b_i}{B}\right) \left(\frac{h_i}{H}\right) \left(\frac{l_i}{H}\right) \tag{2}$$

여기서,

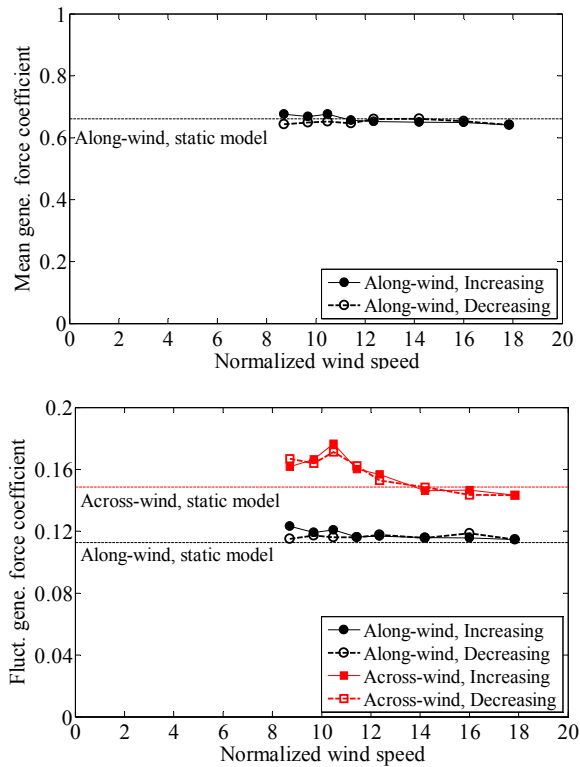
p_i 는 풍압공 i 에서의 풍압(N/m²), q_H 는 모형 높이에서의 속도압(N/m²), b_i 는 풍압공 i 가 분담하는 폭(m), h_i 는 풍압공 i 가 분담하는 높이(m), l_i 는 지면으로부터 풍압공 i 까지의 거리(m)이다.



〈Fig. 7〉 Distributions of $C_{p,mean}$ (top) and $C_{p,rms}$ (bottom) on the static model

〈Fig. 7〉에 모형이 고정된 모형의 각 면에 작용하는 평균풍압($C_{p,mean}$)과 변동풍압($C_{p,rms}$)의 변화를 나타내었다. Surface B와 Surface D는 풍압공이 설치

되지 않았으나, 편의상 풍향이 90°일 때의 Surface A와 Surface C를 Surface B와 Surface D로 나타내었다. 풍상면 중앙에 최대 평균풍압이 나타내고, 측면에서는 대체로 균일한 평균풍압이 나타남을 알 수 있다. 이는 본 실험에서 사용한 모형이 변장비 (B/D)가 1인 완전박리형이기 때문에 측면에서 재부착이 발생하지 않았기 때문으로 생각된다. 측면에서 재부착이 발생하지 않았음은 변동풍압의 변화로부터도 확인할 수 있다. 풍하측으로 갈수록 변동풍압이 증가하는 경향을 보이는데, 이는 박리전단층이 측면이 아닌 풍하측으로 이동함에 따라 와류가 형성되는 위치도 풍하측으로 이동하였기 때문이다. 또, 풍상면에 작용하는 평균풍압과 변동풍압의 비가 대략 난류강도의 2배로, 기존의 실험결과³⁾와 잘 일치함을 알 수 있다.

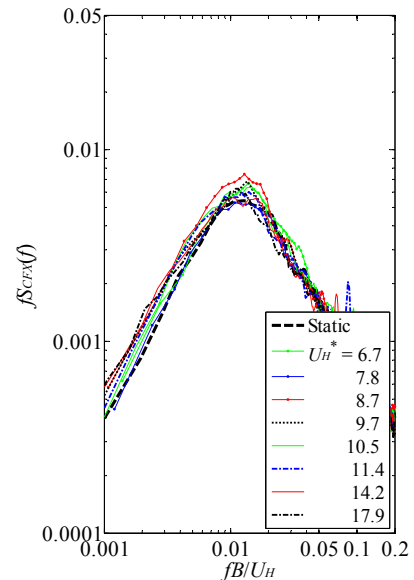


<Fig. 8> Variation of mean(top) and fluctuating generalized force coefficients(bottom)

식 (2)로부터 구한 풍방향과 풍직각방향의 일반화 풍력의 풍력계수를 <Fig. 8>에 나타내었다. 풍압 실험으로부터 구한 일반화 풍력의 평균 및 변동 풍력 계수는 무차원풍속($U_H/f_1/B$) 8 이상을 대상으로 하

였다. 그림 내의 점선은 고정된 모형의 값으로, 풍방향의 평균풍력계수의 경우 무차원풍속에 관계없이 고정된 모형의 평균풍력계수(0.66)와 거의 유사함을 알 수 있고, 풍속의 증감에 따른 변화도 매우 작음을 알 수 있다. 풍방향의 변동풍력계수의 경우, 고정된 모형의 값(0.11)보다 조금 큰 값을 보이지만 무차원풍속에 따른 변화는 거의 없었다. 그러나 풍직각방향의 변동풍력계수는 공진풍속 $U_{res}=10$ 에서 최대값을 보이고 무차원풍속이 커짐에 따라 점점 작아져, 무차원풍속이 대략 14보다 클 경우에는 고정된 모형의 변동풍력계수(0.15)와 거의 비슷함을 알 수 있다.

풍속을 증가시킬 경우의 각 방향의 일반화 풍력의 파워스펙트럼을 <Fig. 9>와 <Fig. 10>에 나타내었다. 풍방향의 경우(<Fig. 9>), x 축은 주파수와 모형의 폭 B , 그리고 모형 높이에서의 풍속 U_H 를 이용하여 무차원화 한 것으로, 모형의 진동 유무에 상관없이 거의 유사한 형상과 값을 보임을 알 수 있다. 단지 <Fig. 8>에서도 알 수 있듯이, 고정된 모형의 파워가 진동이 허용된 경우보다 저주파수 영역에서 다소 작음을 알 수 있다.

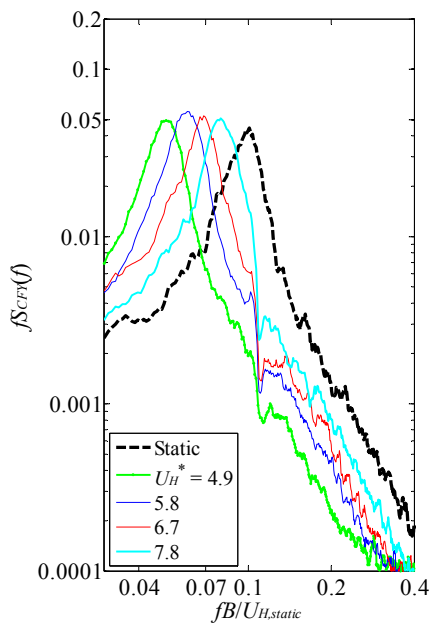


<Fig. 9> Power spectrum of along-wind force coefficients

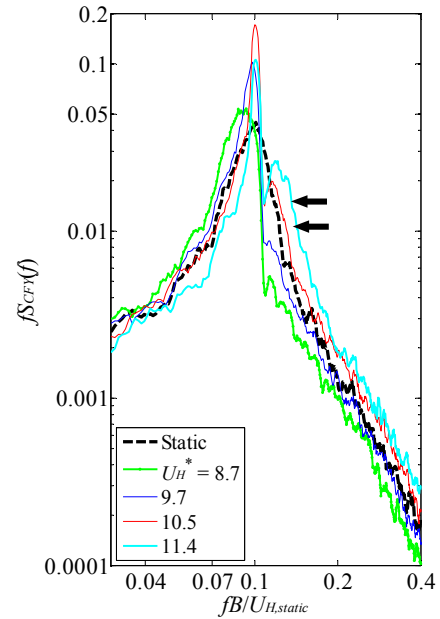
그러나 풍직각방향의 경우(<Fig. 10>), 모형의 진동유무 및 무차원풍속에 따라 큰 차이가 있음을 알

수 있다. 풍직각방향의 경우, x 축은 모형이 고정된 경우의 모형 높이에서의 풍속을 이용하여 무차원화하였다($fB/U_{H,static}$). 모형이 고정된 경우 무차원주파수 0.1 부근에서 피크를 보이고 있고, 이로부터 공진풍속을 $U_{res}=10$ 으로 구할 수 있다. <Fig. 10>으로부터 무차원풍속이 공진풍속보다 작을 경우에는 한 개의 피크만 나타나고, 풍속이 증가함에 따라 피크가 나타나는 피크주파수도 증가함을 알 수 있다. 그러나 공진풍속에 부근에서는 피크가 고정된 모형의 피크보다 커지도, 스펙트럼 폭도 작아짐을 알 수 있다. 또 한 가지 주목할 만한 특징은 스트로할 수에 해당하는 주파수 이외에 그보다 큰 고주파수에서 두 번째 피크(화살표)가 나타남을 알 수 있다. 무차원풍속이 공진풍속보다 더 커지면, 스트로할 수에 해당하는 피크주파수는 고정된 반면, 고주파수에서 나타나는 피크주파수(화살표)는 풍속과 함께 증가함을 알 수 있다.

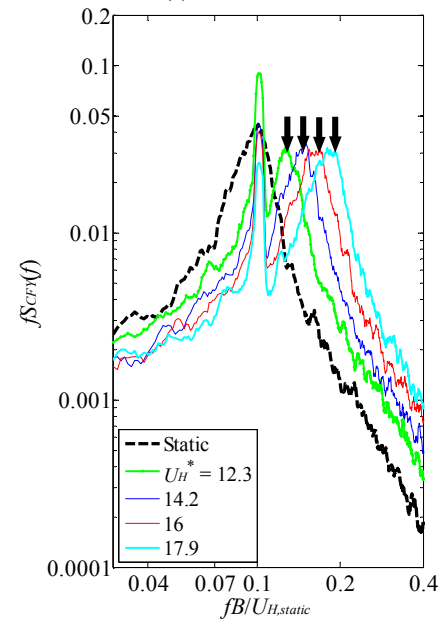
공진풍속 부근에서부터 관찰할 수 있는 이러한 특징은 비정상공기력에 의한 것으로 생각된다. 강제진동법을 이용하여 비정상공기력의 특징을 검토한 기존 연구에 의하면^{4),5)}, 비정상공기력은 모형의 진동수와 동일한 진동수를 가진 성분(f_m 성분)과 고정



(a) $U_H^* < U_{res}$



(b) $U_H^* = U_{res}$

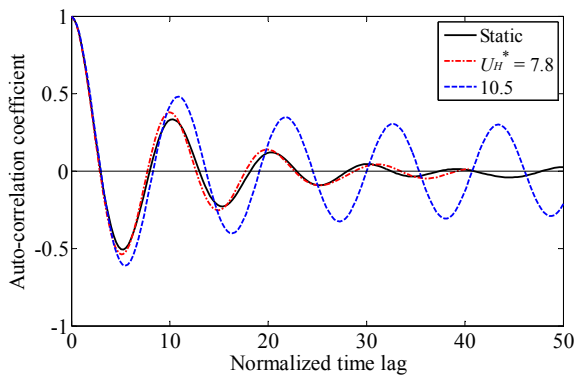


(c) $U_H^* > U_{res}$

<Fig. 10> Power spectrum of across-wind force coefficients

된 모형으로부터 구한 와류의 방출주파수를 가진 성분(f_s 성분)으로 구성되어 있다. 풍속이 공진풍속보다 작은 경우에는 f_m 성분이 f_s 성분보다 비정상공기력에 더 큰 기여를 하고, 풍속이 공진풍속보다 큰 경우에는 f_s 성분이 f_m 성분보다 더 큰 기여를 한다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 자유진동법에 의해 비정상공기력을 검토하였기 때문에 기존 연구와

동일한 결과를 얻을 수는 없었다. 하지만, 기존 연구를 바탕으로 고려한다면 풍속이 공진풍속보다 작은 경우에는 고정된 모형에서 구한 외류의 방출주파수를 가진 성분(f_s 성분)만이, 풍속이 공진풍속보다 큰 경우에는 f_s 성분 뿐만 아니라 고주파수 영역에서 보이는 성분(f_r 성분)이 존재한다고 할 수 있다. 풍속이 공진풍속보다 작은 경우에 f_s 성분의 영향은 명확히 확인할 수 있지만 f_m 성분에 해당하는 성분의 영향은 확인할 수 없었다. 또, 강제진동법에서의 f_m 성분과 자유진동법에서의 f_r 성분의 관계에 대해서는 더욱 연구가 필요할 것으로 생각된다.



<Fig. 11> Auto-correlation coefficient of generalized force

<Fig. 11>에 일반화풍력의 자기상관계수를 나타내었다. x 축은 시간지연을 풍속과 모형의 폭으로 무차원화 한 값($\tau U_H/B$)으로, 풍속이 공진풍속보다 작은 경우에는 고정된 모형과 진동이 허용된 모형의 상관은 거의 비슷하지만, 공진풍속 부근에서는 비교적 큰 상관이 오래 지속되고 있음을 알 수 있다. 이는 모형이 진동할 경우 공진풍속 부근에서는 고정된 모형보다 크고 강한 외류에 의해 영향을 받는다는 것을 의미하고 <Fig. 10>의 공진풍속 부근에서의 피크가 고정된 모형보다 크다는 사실과 잘 일치한다.

4. 결론

자유진동법에 의해 형상비가 9인 고층건물을 대상으로 비정상공기력의 특징을 검토하였다.

- 1) 풍직각방향의 일반화풍력의 경우, 진동이 허용

된 모형의 변동풍력계수는 고정된 모형의 변동풍력계수보다 공진풍속 부근에서 큰 값을 보임을 알 수 있었다.

- 2) 진동이 허용된 경우, 공진풍속 부근에서는 고정된 모형의 스트로할 수에 해당하는 파워는 급격히 커지고, 또 공진풍속 이상에서는 스트로할 수보다 큰 주파수에서 또 다른 피크가 나타남을 알 수 있었다.

- 3) 특인영역에서의 비정상공기력은 스트로할 수에 해당하는 성분과 풍속과 함께 증가하는 성분으로 구성됨을 확인할 수 있었다.

감사의 글

Support was provided by Year 2016 Joint Research Program of Emerging Scholars of Wind Engineering Research Center in Tamkang University.

References

1. P.A. Bailey, K.C.S. Kwok, "Interference excitation of twin tall buildings", *Journal of the Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 21, pp.323-338, 1985.
2. H. Kawai, "Vortex induced vibration of tall buildings", *Journal of the Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 41-44, pp.117-128, 1992.
3. Y.C. Kim, J. Kanda, Y. Tamura, S.W. Yoon, "Pressure fluctuations on tapered and setback tall buildings", *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol.13, No.1, pp.97-104, 2013.
4. Y. Taniike, "Study on aeroelastic instability of tall buildings", Ph.D. Dissertation, 1983 (In Japanese).
5. T. Taniguchi, "Study on unsteady aerodynamic force on structures", Ph.D. Dissertation, 2001 (In Japanese).

- Received : January 28, 2017
- Revised : February 18, 2017
- Accepted : February 20, 2017