

비정형 초고층 건물의 변동 풍압

Pressure Fluctuations on Tapered and Setback Tall Buildings

김 용철* 칸다 준** 타무라 유키오*** 윤 성원****
Kim, Yong-Chul Kanda, Jun Tamura, Yukio Yoon, Sung-Won

Abstract

Recent tall buildings tend to have unconventional shapes as a prevailing, which is effective for suppressing across-wind responses. Suppression of across-wind responses is a major factor in tall building projects, and the so called aerodynamic modification method is comprehensively used. The purpose of the present study is to investigate the pressure fluctuations on tapered and setback tall buildings, including peak pressures, power spectra and coherences through the synchronous multi-pressure sensing system techniques. And flow measurements around the models were conducted to investigate the condition of vortex shedding. The results show that by tapering and setback, different distributions of mean pressure coefficients at leeward surface were found, which is caused by the geometric characteristics of the models. And the power spectra of wind pressures at sideward surface become wideband and the peak frequencies are different depending on heights, which makes the correlation near the Strouhal component low or even negative. The differences in shedding frequencies were also confirmed by the flow fields around the models.

Keywords : Pressure fluctuation, Power spectrum, Coherence, Tapered tall building, Setback tall building

1. 서 론

최근 초고층 건물의 가장 대표적인 경향은 고층화와 경량화로 이러한 경향이 커질수록 초고층 건물의 구조설계에 있어서 풍하중이 차지하는 비중은 점점 더 커지게 된다. 특히 고층화 될수록 풍방향 하중보다는 풍직각방향 하중이 더욱 커지게 되어

완공된 혹은 공사가 진행 중인 초고층 건물의 안정성 및 사용성 설계에 있어서 풍직각방향 하중을 얼마만큼 효율적으로 줄일 수 있느냐가 구조설계에 있어서 중요한 이슈가 되었다. 일반적으로 풍응답을 제어하는 방법으로 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 지배방정식에 있어서 질량, 감쇠와 강성을 직접 컨트롤하여 풍응답을 제어하는 방법이고 (구조역학적 방법), 두 번째는 초고층 건물의 형상을 변화시켜서 풍하중 자체를 작게 함으로써 풍응답을 제어하는 방법 (공기역학적 방법) 이다. 두 번째 방법은 초고층 건물과 같은 bluff body는 풍상측 코너에서 항상 박리현상이 발생하기 때문에 박리전단층을 직접 제어하여 풍하중을 줄이는 것으로, 실제 초고층 프로젝트에 있어서는 두 가지 방법은 효율적으로 사용된다.

지금까지 공기역학적인 방법에 대한 많은 연구가 이루어졌지만¹⁾²⁾, 대부분의 연구는 초고층 건물의 형상변화로 인한 풍하중과 풍응답의 감소효과에만

* 교신저자, 동경공예대학, 풍공학 연구센터, GCOE준교수.
Tokyo Polytechnic University, Wind Engineering
Research Center, GCOE Associate Professor.
Tel: +81-46-242-9927 Fax:+81-46-242-9927
E-mail : kimyc@t-kougei.ac.jp

** 정회원, 일본대학, 건축학과, 특임교수.
Nihon University, Department of Architecture
Professor.

*** 정회원, 동경공예대학, 풍공학 연구센터, 교수.
Tokyo Polytechnic University, Wind Engineering
Research Center, Professor.

**** 정회원, 서울과학기술대학교, 건축학부, 교수.
Seoul National University of Science & Technology
School of Architecture, Professor.

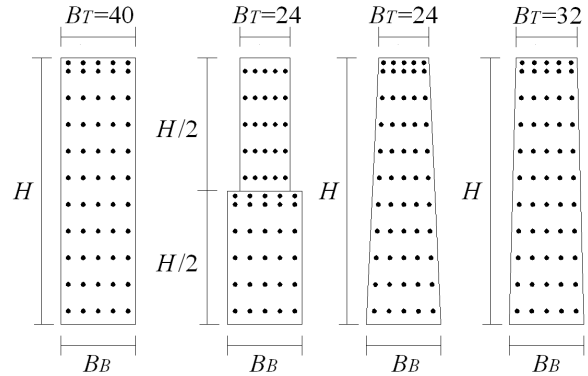
초점을 두고 있다. 그리고, 변동풍압에 대한 많은 연구가 있지만, 거의 모든 연구는 정형화된 초고층 건물을 대상으로 하고 있고³⁾⁴⁾, 비정형 초고층 건물의 변동풍압 특성에 대해 깊이 있게 연구한 연구 사례는 거의 없다.

따라서 본 논문에서는 풍압계수, 파워스펙트럼과 코히렌스를 이용하여 테이퍼 및 셋백이 비정형 초고층 건물의 변동풍압에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 또 모형 주변의 변동풍속을 계측하여 형상 변화가 모형 주변의 변동풍속에 미치는 영향에 대해서도 조사하였다.

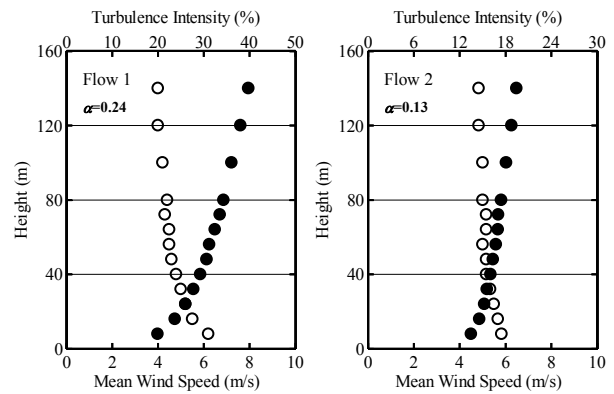
2. 풍동실험개요

풍동실험은 동경대학교 소유의 Eiffel-type 풍동실험실에서 행하였다. 풍동실험실은 폭이 1.8m, 높이가 1.8m, 길이가 12.5m로 약 0.5m/s에서 13m/s까지 측정 가능하다 (난류강도 0.5%미만). <Fig. 1>에 본 연구에서 사용한 실험모형을 나타내었다. 실험모형의 높이 (H)와 밑면 (B_B)은 각각 400mm와 100mm이고, 윗면 (B_T)은 모형별로 60mm에서 100mm이다. 압력탭은 모형의 한 면에 55개 설치하였고 (총 220개), 계측된 변동풍압은 내경이 1.4mm, 길이가 800mm의 비닐 튜브를 통하여 저장되도록 하였다. 압력탭은 수평방향으로 $B_H/5$ 와 $D_H/5$, 수직방향으로 $H/10$ 이 되도록 균등하게 배치하였고, 지붕에는 압력탭을 배치하지 않았다. 여기서, H 는 모형의 전체높이를 h 는 임의의 높이를 의미한다. 변동풍압은 MKS Baratron model (398형 차압계)가 내장된 60 piezoelectric transducer (Kyowa FPD-5G, F.S. ± 490 Pa)로 한 면의 압력탭 55개를 동시에 계측하였다. 변동풍압은 0° 에서부터 180° 까지 15° 간격으로 계측하였고 샘플링 주파수는 1,000Hz로 하여 40개 이상의 실시간 10분 상당의 시간이력 데이터를 얻을 수 있도록 계측시간을 조절하였다. 실험 기류의 난류적분스케일과 모형의 크기를 고려하여 풍동실험의 길이 스케일은 1/400, 속도 스케일은 1/5.7로 가정하였다. 모형정상부에서의 풍속을 기본 풍속으로 하여 속도압 q_H 를 구하였고, 이 속도압을 이용하여 풍압계수를 정의하였다. 또 풍압계수의 시

간이력 데이터에 TVL법을 이용하여 실제 외장재 크기 (4m)를 고려해 0.09초에 해당하는 이동평균을 적용하였다.

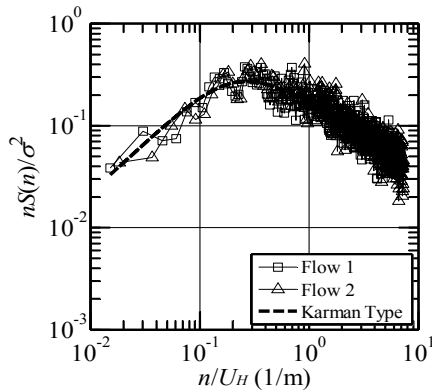


<Fig. 1> Experimental models ($B_B=100$, $H=400$, unit: mm, From the left, SQ, SB, TP1, and TP2).



<Fig. 2> Profiles of mean wind speeds and turbulence intensities.

<Fig. 2>에 본 연구에서 사용된 평균풍속과 난류강도의 연직분포를 나타내었다. 기류 1 (Flow 1, $\alpha = 0.24$)은 도심지역에 상당한 난류 경계층으로, 모형 높이에서의 평균풍속은 $U_H=8$ m/s, 난류강도는 $I_{u,H}=19\%$ 이고, 기류 2 (Flow 2, $\alpha = 0.13$)은 교외지역에 상당한 난류 경계층으로, 모형 높이에서의 평균 풍속은 $U_H=6.5$ m/s, 난류강도는 $I_{u,H}=15\%$ 이다. <Fig. 3>은 모형 정상부에서의 변동풍속의 파워스펙트럼으로, 두 기류 모두 Karman형 파워스펙트럼과 잘 일치함을 알 수 있다. 기류 1에서의 레이놀즈 수는 56,000, 기류 2에서는 45,000이고, 모형에 의한 폐쇄율은 1.2%로, 폐쇄율에 대한 실험 데이터의 보정은 실시하지 않았다.



〈Fig. 3〉 Power spectra of test flows.

3. 풍동실험 결과 및 고찰

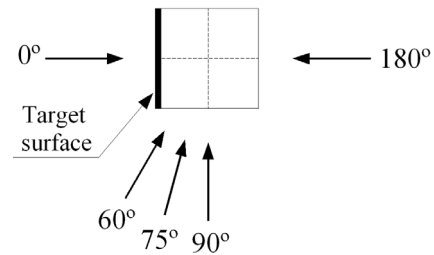
3.1 풍압계수

풍압계수는 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$C_{p,i} = p_i / q_H \quad (1)$$

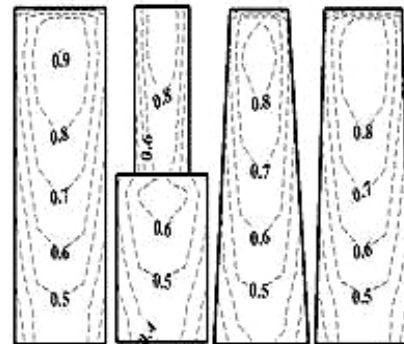
여기서, p 는 풍압이고, i 는 평균, 표준편차, 최대 또는 최소를 의미한다.

풍압계수의 분포에 있어서 기류에 의한 차이는 명확하게 나타났다. 예를 들어, 기류 1의 평균풍속 구배가 기류 2보다 크기 때문에, 기류 1에서의 풍상면의 평균풍압계수 분포가 기류 2의 분포보다 더 크게 변화하였고, 기류 2에서의 풍하면에서의 평균 풍압분포가 기류 1의 평균풍압분포보다 절대값이 큰 분포를 보였다. 이는 기류 1의 난류강도가 크기 때문에 모형의 측면에서 재부착이 일어나고⁵⁾, 이러한 재부착으로 인해 박리전단층이 건물 후방으로 늘어져서 생긴 결과라고 생각되어진다. 그러나 기류 1에서의 최대, 최소풍압계수가 기류 2에서의 값보다 더 절대값이 크기 때문에 본 논문에서는 기류 1의 값을 중심으로 논의하였다. 풍압계수는 실시간 10분 상당의 샘플 42개의 앙상블 평균이고, 〈Fig. 4〉에 풍향과 풍압면과의 관계를 나타내었다. 또 본 논문에서는 절대값의 크고 작음으로 풍압계수의 크고 작음을 표현하였다.



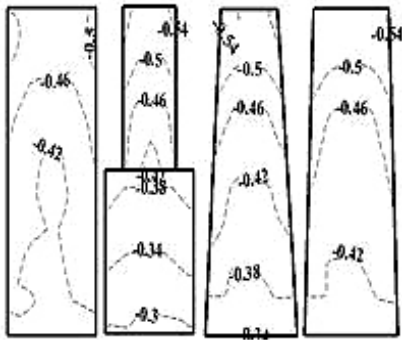
〈Fig. 4〉 Wind directions and target surface.

〈Fig. 5〉에 풍상면에 있어서의 평균풍압계수의 분포를 나타내었다 (풍향 0°). SQ의 값이 다른 모형에 비해 약간 크지만, 모형별 차이는 크지 않다는 것을 알 수 있다.



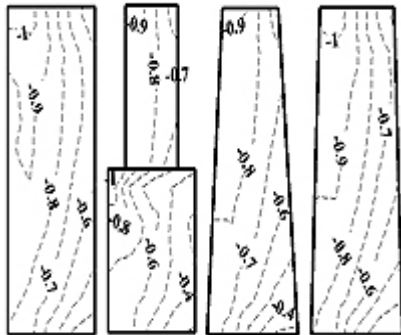
〈Fig. 5〉 Mean pressure coefficients at wind direction of 0°.

하지만, 〈Fig. 6〉의 풍하면의 평균풍압계수 분포에서는 모형별 차이가 명확하게 나타남을 알 수 있다 (풍향 180°). SQ의 평균풍압계수는 전체 높이에 걸쳐서 약 -0.45로 일정한 반면, 테이퍼 및 셋백 모형의 경우 저층부에서는 SQ보다 작은 값을, 고층부에서는 SQ보다 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 풍하면에서의 차이는 모형의 기하학적인 형상으로부터 기인한다고 할 수 있다. 테이퍼 및 셋백 모형의 경우, 저층부에서의 폭이 고층부에서보다 크고, 저층부에서의 평균풍속이 작기 때문에 모형 측면에서 발생하는 하강류가 상대적으로 SQ보다 작은 반면, 고층부에서는 건물의 폭이 작아지고, 평균 풍속이 크기 때문에 상승류가 상대적으로 SQ보다 커지기 때문이다. 풍하면에서의 이러한 변화는 평균 항력에도 영향을 끼친다⁵⁾.



〈Fig. 6〉 Mean pressure coefficients at wind direction of 180°.

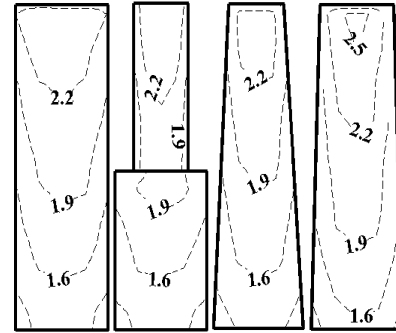
풍향이 90°인 경우의 평균풍압계수를 <Fig. 7>에 나타내었다. SQ의 경우 평균풍압계수의 최소값은 약 -1로 모형의 풍상측 코너부에서 나타남을 알 수 있다. 테이퍼 모형의 경우 SQ와 비슷한 분포를 보이고 있지만, SB의 경우, 셋백을 중심으로 고층부와 저층부는 서로 다른 분포를 보이고 있다.



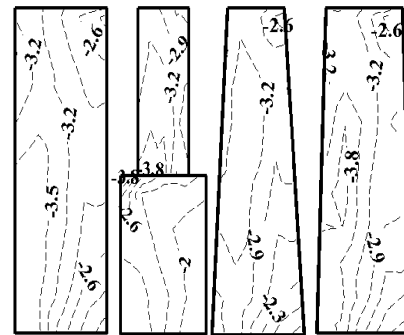
〈Fig. 7〉 Mean pressure coefficients at wind direction of 90°.

최대풍압계수는 풍향이 0°일 때 나타나고, <Fig. 8>에 나타낸 것과 같이 최대풍압계수의 분포는 평균풍압계수의 분포 (<Fig. 5>)와 비슷함을 알 수 있다. 최대풍압계수의 최대값은 모형에 상관없이 정류점 부근에서 나타났다.

<Fig. 9>에 풍향이 90° 일 때의 최소풍압계수의 분포를 나타내었다. 모형의 풍상측 저층부 코너에서부터 대략 0.65H까지 큰 풍압계수가 나타남을 알 수 있다. 최소풍압계수의 최대값은 SQ의 경우 약 -3.3, SB의 경우 약 -3.5, TP1의 경우 약 -2.8, TP2의 경우 약 -3.2로 최대값은 SB에서 나타났고, 비교적 큰 값을 보이는 면적도 SQ보다는 컸다.



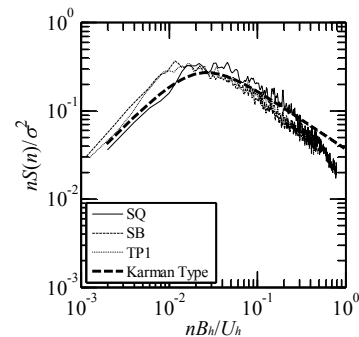
〈Fig. 8〉 Maximum pressure coefficients at wind direction of 0°.



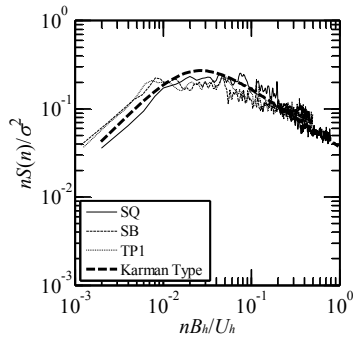
〈Fig. 9〉 Minimum pressure coefficients at wind direction of 90°.

3.2 변동풍압의 파워스펙트럼

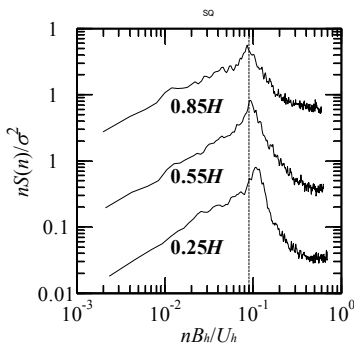
<Fig. 10>에 풍상면 (풍향 0°)과 풍하면 (풍향 180°)의 0.85H에서의 중앙부의 압력탭에 대한 변동풍압 파워스펙트럼과 Karman형 파워스펙트럼을 나타내었다 (기류 2). 모형에 상관없이 풍상면과 풍하면 모두 Karman형 파워스펙트럼과 잘 일치함을 알 수 있다. 풍상면에서는 모형 간 파워스펙트럼의 차이는 거의 없으나, 풍하면에서는 고주파수 영역에서 SQ의 파워가 다른 모형에 비해 약간 작았다.



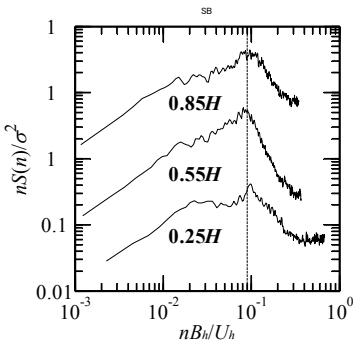
(a) Windward surface



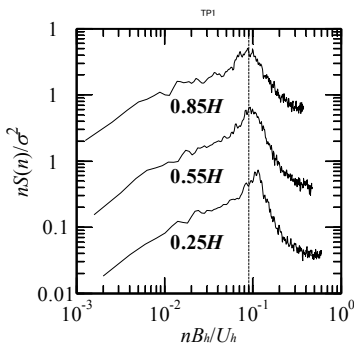
(b) Leeward surface
<Fig. 10> Power spectra in flow 2.



(a) SQ



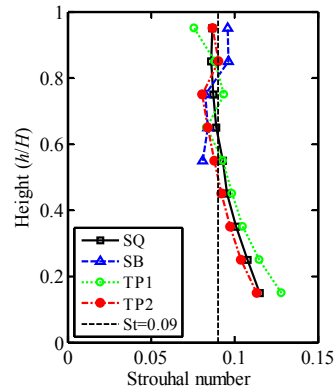
(b) SB



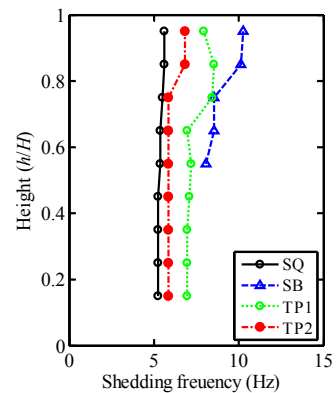
(c) TP1

<Fig. 11> Power spectra at side surface in flow 2.

기류 2에서의 측면 (풍향 90°) 풍상측 압력탭의 변동풍압 파워스펙트럼을 <Fig. 11>에 나타내었다. SQ의 경우, 저층부를 제외한 모든 높이에서 무차원 주파수 약 0.09에서 피크를 관찰할 수 있었다. 그러나 비정형 모형의 경우, 피크는 저층부에서만 나타나고, 건물의 높이가 높아질수록 피크의 형상은 둔해지고, 파워스펙트럼은 점차 광대역으로 변해 감을 알 수 있다. 특히 SB와 TP1의 고층부 (0.85H)에서의 파워스펙트럼의 경우, 형상의 광대역으로 인해 정확한 피크주파수를 구하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 즉, 테이퍼와 셋백으로 인해 파워스펙트럼의 형상은 광대역으로 변하고, 또 피크주파수가 높이에 따라 달라진다는 점을 알 수 있다. 여기서 단순히 스트로할 수를 파워스펙트럼의 최대값에 대한 무차원주파수라고 정의하면 스트로할 수의 높이방향으로의 변화는 <Fig. 12(a)>와 같다.



(a) Strouhal number



(b) Shedding frequency

<Fig. 12> Variation of Strouhal number and shedding frequency in flow 2.

<Fig. 12(a)>에 나타난 것과 같이 SQ의 경우, 저층부에서의 스트로할 수는 약 0.12이지만, 0.55H 이상의 높이에서는 0.09로 일정한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 테이퍼 모형의 경우, 스트로할 수는 높이와 함께 점차 작아지고 그 경향은 테이퍼 율이 커질수록 큼을 알 수 있다. SB의 경우, 고층부에서는 0.09로 SQ와 거의 비슷한 값을 보이지만, 저층부에서의 파워스펙트럼 형상은 매우 불규칙적으로, 스트로할 수를 정의할 수 없는 압력탭도 있었기 때문에, <Fig. 12>에는 고층부의 결과만을 나타내었다. 측면에서 발생하는 와의 방출주파수를 <Fig. 12(b)>에 나타내었다. SQ의 경우, 와의 방출주파수는 전체 높이에 걸쳐서 일정한 값 (약 5Hz)을 보이는 반면, 테이퍼의 경우 높이와 함께 방출주파수도 커짐을 알 수 있다. 한 가지 주목할 만한 점은 테이퍼 모형의 경우, 와의 방출주파수는 높이와 함께 꾸준히 증가하지 않고, 어느 높이에서 급격하게 증가하고 그 높이에서부터 일정 높이까지는 변화하지 않는다는 것으로, 이러한 경향은 Vickery and Clark (1972)⁶⁾의 연구결과와 일치한다. SB의 저층부의 경우 방출주파수는 매우 불규칙적이지만, 고층부의 경우 높이와 함께 일반적으로 증가하고 다른 모형들에 비해 약 1.5배 큼을 알 수 있다.

와의 방출주파수는 B_h 와 U_h 에 대한 스트로할 수로 정의된다. 난류 경계층이므로 U_h 가 높이에 따라 변하고, 또 B_h 가 일정하지 않다면 각 높이에서의 와 성분은 서로 다른 방출주파수로 방출되게 된다. SQ의 경우, B_h 는 일정하기 때문에 와의 방출주파수는 U_h 에 따라 달라지지만, 테이퍼 및 셋백 모형의 경우, B_h 와 U_h 가 높이에 따라 모두 달라지므로 와의 방출주파수는 SQ보다 더욱 커지게 된다.

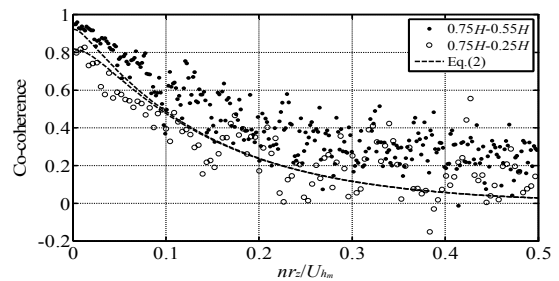
3.3 변동풍압의 코히런스

기류 2에서의 풍상면 (풍향 0°)과 측면 (풍향 90°)의 변동풍압에 대한 코히런스를 각각 <Fig. 13>과 <Fig. 14>에 나타내었다. 풍상면의 코히런스 (<Fig. 13>)는 풍상면 중앙부의 압력탭을, 측면의 코히런스 (<Fig. 14>)는 측면 풍상측 압력탭을 사용하였다. 또 <Fig. 13>에 金과 神田 (2008)⁷⁾에 의해 제안된 변동풍속의 코히런스도 나타내었다. 변동풍속의 코히런

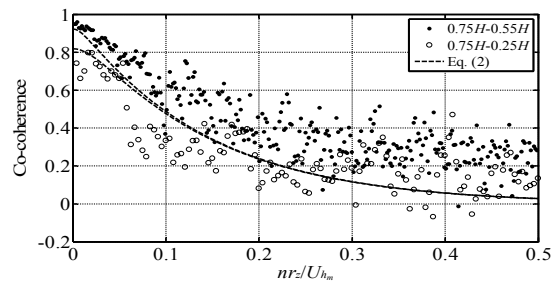
스는 식 (2)와 같이 무차원거리 (r^*)과 무차원주파수 (n^*)을 이용해 저주파수영역에서의 값을 고려하여 제안되었다.

$$C(r_y, r_z, n) = \exp(-r^* \cdot n^*) \quad (2)$$

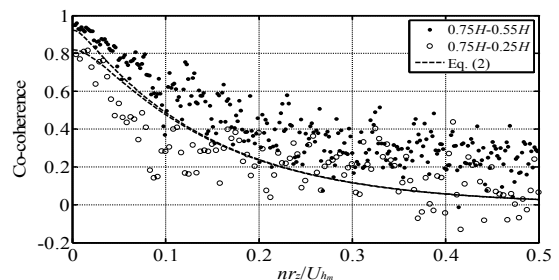
여기서, $r^* = ((k_y r_y)^2 + (k_z r_z)^2)^{0.5} / L_{x,zm}$ 는 무차원거리, $n^* = (1 + (n L_{x,zm} / k_2 U_{zm})^2)^{0.5}$ 는 무차원주파수, k_y, k_z ($k_y = k_z = 0.5$)와 k_2 ($= 0.07$)는 풍동실험으로부터 구한 상수, r_y 와 r_z 는 두 점간의 거리, L_x 는 난류적분스케일이고, z_m 은 두 점간의 기하평균이다. <Fig. 13>에서 보이는 것과 같이 풍상면의 변동풍압 코히런스는 무차원주파수의 증가와 함께 지수 함수적으로 감소하고, 모형의 형상과 압력탭의 거리에 상관없이 변동풍압의 코히런스는 변동풍속의 코히런스와 비교적 잘 일치한다고 할 수 있다.



(a) SQ

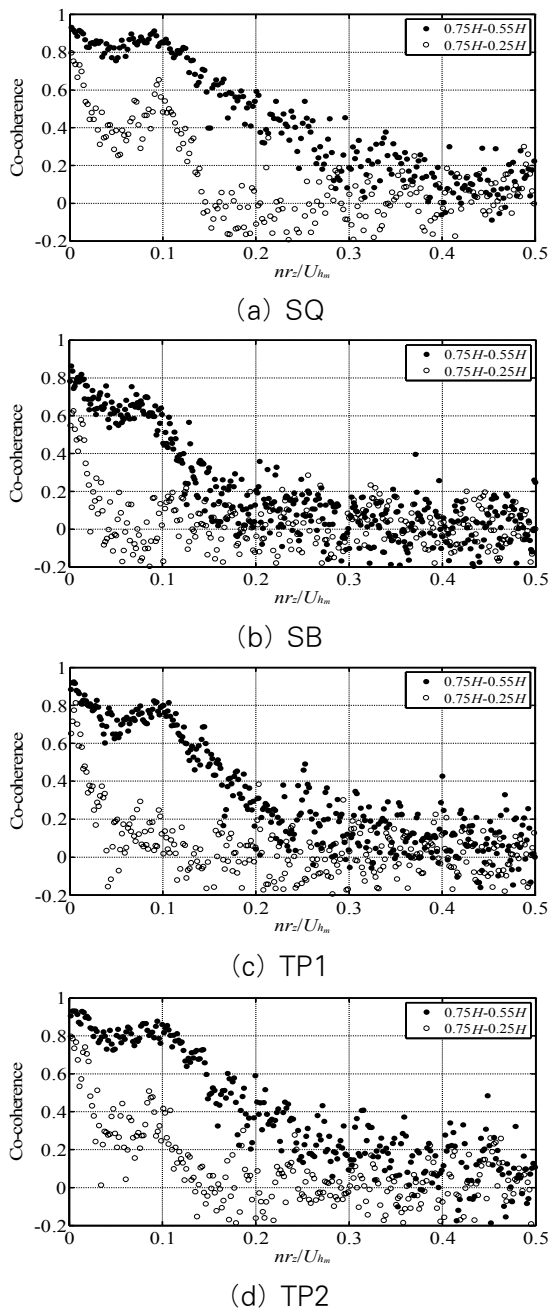


(b) TP1



(c) TP2

<Fig. 13> Co-coherence at windward surface.



<Fig. 14> Co-coherence at side surface.

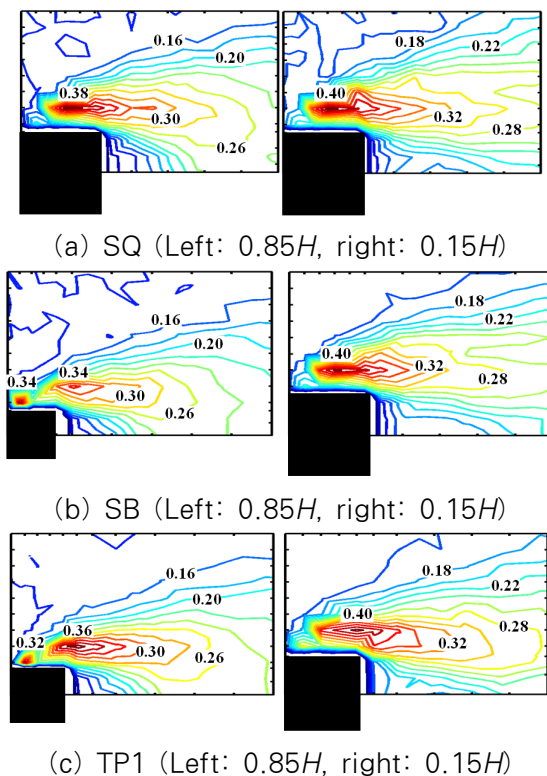
<Fig. 14>에 나타난 측면의 변동풍압 코히런스에서는 모형별로 명확한 차이를 찾아볼 수 있다. SQ의 경우 각 높이에서 스트로할 성분이 존재하기 때문에 무차원주파수 0.09 부근에 명확한 피크가 존재함을 알 수 있다. 그러나 테이퍼 모형의 경우 테이퍼율이 증가할수록 파워스펙트럼의 피크무차원주파수에 해당하는 무차원주파수에서의 피크는 점차 작아지고 테이퍼율이 10%가 되면 (TP1) 피크는 사라지게 되고 상관은 매우 낮아짐을 알 수 있다. SB는

TP1보다 더 낮은 상관을 보이고 있고, 피크무차원주파수에 해당하는 무차원주파수에서는 오히려 음의 상관을 보이고 있음을 알 수 있다.

파워스펙트럼과 코히런스의 결과로부터 테이퍼 및 셋백과 같은 형상변화로 인해 각 높이에서 생성된 와 성분의 파워는 작아지게 되고, 또 각 성분 간의 상관도 낮기 때문에 풍직각방향의 변동하중은 SQ보다 작아지게 됨을 알 수 있다⁵⁾.

3.4 모형 주변의 변동풍속

모형 주변의 변동풍속을 조사하기 위해 높이 당 150 포인트에 대해서 변동풍속을 계측하였다 (기류 2). SQ, SB와 TP1모형을 대상으로 0.15H에서 0.85H (0.15H, 0.35H, 0.55H, 0.75H와 0.85H)까지 계측하였고, <Fig. 15>에 0.85H와 0.15H에서의 변동풍속의 난류강도를 나타내었다.



<Fig. 15> Distributions of turbulence intensities around the model for various heights.

일반적으로 풍공학과 관계가 깊은 bluff body aerodynamics에서는 난류를 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 기류자체에 포함된 난류이고, 두 번째는 기류가 bluff body로부터 박리할 때 박리

전단층 내의 난류 (signature turbulence 혹은 body - induced turbulence)이다. Signature turbulence는 와의 형성 및 방출과 관련이 깊기 때문에 난류강도가 큰 부분에는 와가 존재한다는 것을 의미한다. 이것을 <Fig. 15>의 변동풍속의 계측결과에 적용하여 생각해보면, SQ는 전 높이에 걸쳐 하나의 와만 존재하는 반면, SB와 TP1의 경우, 저층부 (0.15H)에는 하나의 와만 존재하지만 고층부 (0.85H)에는 두 개의 와가 존재함을 알 수 있고, 이는 <Fig. 12(b)>의 결과와 정성적으로 일치함을 알 수 있다. 또 고층부에서 SQ의 난류강도가 상대적으로 크다는 점으로부터 <Fig. 11>의 측면에 있어서의 변동풍압의 파워스펙트럼 결과와도 잘 일치한다고 할 수 있다.

4. 결론

정방형 단면을 가진 네 종류의 초고층 건물을 대상으로, 도심지 및 교외지역의 난류경계층을 이용한 풍동실험 결과로부터, 변동풍압 및 모형 주변의 변동풍속 특성에 대해 조사하였다.

테이퍼 및 셋백을 이용한 공기역학적인 형상변화로 인해 풍하면의 평균풍압계수의 분포가 특징적이었고, 이는 평균항력이 작아지는 원인을 알 수 있었다.

측면의 파워스펙트럼에 있어서 파워스펙트럼 피크는 작아지고, 폭도 광대역으로 바뀔 수 있었다. 또, 피크 무차원진동수가 높이에 따라 서로 다른 값을 보였고, 이로 인해 측면의 높이 간 상관관계가 작음을 알 수 있었다. 측면에서의 변동풍압의 이러한 특징으로 인해 변동양력이 크게 감소함을 알 수 있었다.

모형 주변의 변동풍속 계측으로부터 SQ에는 전체 높이에 걸쳐 하나의 와 성분만 존재하지만, SB나 TP1의 고층부에는 두 개의 와 성분이 존재함을 알 수 있었다. 이는 고층부에서의 와 방출주파수가 저층부보다 더 크음을 의미하고, 이러한 경향은 스트로할 수로부터 구한 와 방출주파수와도 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 일본의 문부과학성 글로벌 COE프로그램 (풍공학, 교육연구의 뉴 프론티어, 동경공예대학교)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부입니다.

참고문헌

1. 김동우, 하영철 (2004), 초고층건축물의 풍하중 저감을 위한 공력학적 방법, 대한건축학회 논문집 20(11), 3-10.
2. 조지은 외 3인 (2005), 풍하중을 받는 테이퍼 고층건축물의 진동변위응답 평가, 한국셀·공간구조학회 논문집 5(4), 101-108.
3. Lin, N. 외 4인 (2005) Characteristics of wind forces acting on tall buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 93(3), 217-242.
4. Kareem, A., Cermak, J.E. (1984), Pressure fluctuations on a square building model in boundary-layer flows, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 16, 17-41.
5. 김용철 (2012), 비정형 초고층 건물의 풍응답 평가, 대한건축학회 논문집 28(12), 37-44.
6. Vickery, B.J., Clark, A.W. (1972), Lift or across-wind response of tapered stacks, Journal of Structural Division 98(ST1), 1-20.
7. 金容徹, 神田順 (2008), 風速相關および変断面角柱の風圧相關特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 193-194 (일본어).

(접수일자 : 2012년 12월 27일)
 (심사완료일자 : 2013년 02월 25일)
 (게재확정일자 : 2013년 02월 28일)