

단면의 변의 수가 초고층 건물의 공력특성에 미치는 영향

Effects of Number of Sides on Aerodynamic Characteristics of Super-Tall Buildings

김 용 철* 반디 에스와라 쿠마** 유키오 타무라*** 요시다 아키히토**** 윤 성 원*****
Kim, Yong-Chul Bandi, Eswara Kumar Tamura, Yukio Yoshida, Akihito Yoon, Sung-Won

Abstract

A series of wind tunnel tests were conducted on 7 super-tall buildings with various polygon cross-sections, including triangle, square, pentagon, hexagon, octagon, dodecagon, and circular. The primary purpose of the present study is to investigate the effect of increasing number of sides on aerodynamic characteristics for super-tall buildings. Wind tunnel tests were conducted under the turbulent boundary layers whose power-law exponent is 0.27. Fluctuating wind pressures from more than 200 pressure taps were recorded simultaneously, and time series of overturning moments were calculated considering tributary area of each pressure tap. The results show that the overturning moment coefficients and the spectral values decrease with increasing number of sides, and the largest mean and fluctuating overturning moments were found for the triangular super-tall building, and the largest spectral values were found for the square super-tall building. The analysis should be conducted more in detail, but currently it can be roughly said that there seems to be a little differences in the aerodynamic characteristics for the super-tall buildings whose number of sides is larger than 5 or 6.

Keywords : Wind pressure measurement; Polygon cross-section; Tall building; Overturning moment; Power spectrum

1. 서 론

초고층 건물에 있어서 풍하중은 지진하중보다 커서 지배적인 횡하중으로 간주된다는 사실은 잘 알려져 있다. 풍하중을 줄이기 위해서 건물 형상을 변화시키거나 단면 형상을 변화시킨 이른바 공기역

학적인 방법에 대한 많은 연구가 행해졌다. 풍력은 건물의 외적 형상에 전적으로 의존하기 때문에 공기역학적인 방법에 의한 풍력 저감 효과에 대한 연구는 지난 20 ~ 30년 동안 풍공학 분야에서 가장 인기 있는 테마 중에 하나였을 것이다. 공기역학적인 형상변화는 테이퍼(Taper)¹⁾²⁾, 셋백(Set-back)¹⁾²⁾, 헬리컬(Helical), 개구부 혹은 각 요소의 조합으로 나타나고, 2102년에 Tanaka et al. (2012)³⁾ 등에 의해 폭넓은 연구가 이루어졌다. 이러한 비정형적인 혹은 자유스러운 건물형상은 건축 설계자의 설계 개념으로부터 비롯된 표현 방법이지만, 풍공학자의 입장에서 볼 때는 초고층 건물의 안전성과 사용성에 중요한 요소인 풍직각방향의 풍력을 줄일 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.

건물의 외적 형상이 다양화되는 것과 함께 실제 초고층 건물에 있어서도 단순한 사각형 단면이 아닌 다각형 단면을 가진 초고층 건물을 다수 찾아볼 수 있다. 단면 형상이 다각형으로 바뀔으로써 원형

* 교신저자, 고려대학교, 건축사회환경공학부, 연구교수.
Korea University, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Research Professor.
Tel: +82-2-3290-3833, Fax :+82-2-921-2439
E-mail : gentle95@gmail.com.

** 동경공예대학, 풍공학 연구센터, 박사과정.
Tokyo Polytechnic University, Wind Engineering Research Center, Ph.D Candidate.

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

**** 동경공예대학, 풍공학 연구센터, 준교수.
Tokyo Polytechnic University, Wind Engineering Research Center, Associate Professor.

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

에 가까워져 공력특성이 좋아질 거라고 예상할 수는 있지만, 의외로 이 부분에 대한 체계적이고 포괄적인 연구는 거의 없고, 지금까지의 발표된 몇몇 연구는 대부분 제한된 조건하에서 행해졌다.

Szalay (1989)⁴⁾는 형상비가 3.3인 4각형, 12각형 16각형과 원형 단면의 다각형 모형에 대해 풍력실험과 풍압실험을 수행하였다. 실험 결과가 기존의 문헌과 일치한다고 보인 후에, 예상과는 달리 16각형 모형의 평균항력은 12각형과 원형 모형의 값 사이에 있지 않는다고 보고하였고, 그 이유를 레이놀즈 수에 대한 의존성과 민감성 때문이라고 하였다. Chien et al.(2010)⁵⁾은 2차원 Computational Fluid Dynamics(CFD) 해석을 이용하여 8가지 다각형 단면의 매스트 구조체에 작용하는 평균항력을 조사하였다. 그들은 10각형 이상의 다각형 모형의 평균항력에는 거의 차이가 없음을 보고하였다. Tang et al.(2013)⁶⁾은 직선(Straight) 형상과 헬리컬(Helical) 형상의 다각형 초고층 건물의 평균항력과 후류 형상을 CFD를 이용하여 변의 증가, 모서리부의 형상 변화, 그리고, 헬리컬 각도에 대한 영향을 조사하였다. 그들은 10개의 다각형 단면을 가진 직선형 초고층 건물, 모서리부의 형상을 변화시킨 11개의 초고층 건물과 헬리컬 각도가 22.5도 간격으로 180도까지 변하는 초고층 건물을 대상으로 하였다. 해석결과로부터 변이 증가할수록 평균항력은 작아지고 14각형부터는 감소폭이 작아진다고 보고하였고, 14각형의 평균항력은 4각형 단면의 평균항력에 약 40% 정도라고 하였다. 또, 모서리부의 변형에 대한 해석 결과로부터 모서리부의 변형 곡률 r 과 단면의 폭 b 의 비 r/b 가 0.15가 될 때까지 평균항력은 크게 감소하지만, 그 이상의 r/b 에서는 큰 변화가 없음을 보고하였다. 또한 후류 폭도 그 이상의 r/b 에서는 크게 변화하지 않음을 보였다. 마지막으로 헬리컬 각도에 대한 수치해석으로부터 평균항력은 헬리컬 각도에 따라 증가하기도 감소하기도 함을 보였고, 위 결과로부터 공력특성에 가장 큰 영향을 주는 것은 모서리 부분의 변형이고, 그 다음으로 변의 증가이며, 마지막으로 헬리컬 형상이라고 결론지었다. Szalay(1989), Chien et al.(2010)과 Tang et al.(2013)의 연구에서는 균등류(Uniform flow)를 사

용하여 단지 평균항력에만 초점을 맞춘 다소 제한적인 조건하에서 얻어진 결과이므로 다각형 초고층 건물의 풍하중 산정에 그들의 연구결과를 그대로 적용하기에는 다소 문제가 있어 보인다.

Thoroddsen et al.(1988)⁷⁾과 Kanda and Choi(1992)⁸⁾의 연구에서는 3각형 단면과 4각형 단면을 가진 초고층 건물의 풍력 간의 상관관계에 따른 응답해석을 수행하였지만, 그들 연구에 있어서 단면 형상은 임의로 정해졌기 때문에 단면의 변의 증가에 따른 공력특성의 변화를 이해하기에는 한계가 있다.








지금까지 단면의 변의 수의 증가에 따른 효과를 검토한 연구는 몇몇 있지만, 그들의 연구에서는 언급한 바와 같이 균등류를 이용한 수치해석 결과로부터 평균항력에만 초점을 맞추었고, 다른 방향의 풍력 성분과 변동 성분 그리고 경계층 기류를 대상으로 한 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 다양한 다각형 단면을 가진 초고층 건물의 공력특성을 경계층 기류를 이용하여 다양한 각도에서 검토하였다.

2. 풍동실험개요

풍동실험은 일본 동경공예대학교 경계층 풍동에 서 수행하였다. 풍동실험실의 길이는 19m, 단면 폭은 2.2m, 높이는 1.8m이고, 제어 가능한 실험풍속은 난류강도 1%미만의 15m/s까지이다. 표 1에 본 연구에서 이용한 다각형 초고층 모형을 나타내었다. 단면 형상은 정다각형으로, 모형의 단면적은 모두 동일하도록 설계하였다(형상비=8). 그 외 실험모형에 관한 기본 특성을 표 2에 나타내었다. 변의 수의 증가에 따라 한 변의 길이는 작아지지만, 투영면적(Projected area)은 12각형이 아닌 8각형 모형이 제일 작음을 알 수 있고, 3각형 모형의 투영면적은 4각형 모형보다 약 50%정도 크다.

실험에 사용한 기류의 평균풍속과 난류강도의 연직분포를 그림 1에 나타내었다. 도심부를 재현한 기류(풍속고도분포지수=0.27)를 대상으로 실험풍향은 모형에 따라 45도에서 180도까지 5도 간격으로 실험하였다. 모형 높이에서의 평균풍속은 12m/s이고,

〈Table 1〉 Test models and cross-sectional shape

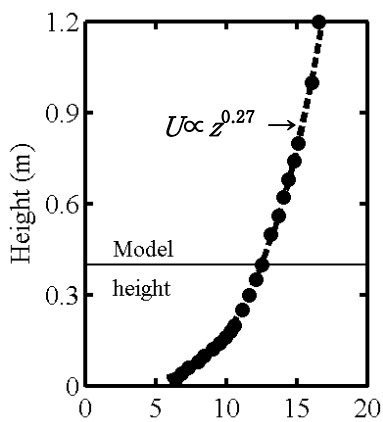
Test models							
Cross-section	Triangle	Square	Pentagon	Hexagon	Octagon	Dodecagon	Circular
Name	TR	SQ	PE	HE	OC	DO	CI

〈Table 2〉 Properties of building models

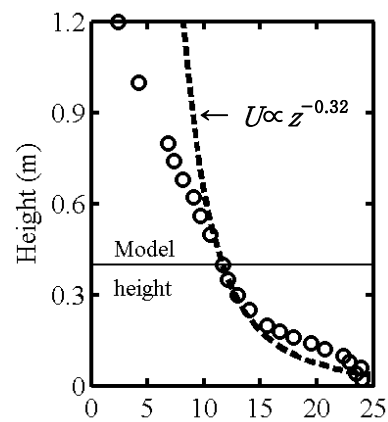
	TR	SQ	PE	HE	OC	DO
Height (mm)	400	400	400	400	400	400
Cross-sectional area (mm ²)	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Number of sides	3	4	5	6	8	12
Length of one side* ¹ (mm)	76	50	38	31	23	15
(Ratio to SQ)	(1.52)	(1)	(0.76)	(0.62)	(0.46)	(0.3)
Projected area* ¹ (mm ²)	30400	20000	24600	24800	22200	24000
(Ratio to SQ)	(1.52)	(1)	(1.23)	(1.24)	(1.11)	(1.2)
Internal angle (°)	60	90	108	120	135	150
# of pressure tap* ²	210	184	250	240	240	240

*¹ Values are for the wind direction of $\theta=0^\circ$

*² # of pressure tap of the circular model is the same as that of the square model

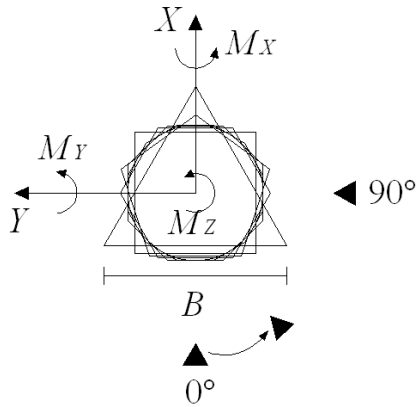


(a) Mean wind speed (m/s)



(b) Turbulence intensity (%)

〈Fig. 1〉 Profiles of mean wind speed and turbulence intensity.



〈Fig. 2〉 Coordinate and symbols.

난류강도는 11%이다. 또, 본 연구에서 사용한 좌표계를 그림 2에 나타내었고, 바람을 기준으로 한 풍향좌표(D나 L)가 아닌 모형을 기준으로 한 구조좌표(X나 Y)를 사용하였다.

길이 스케일은 1/1000, 시간 스케일은 1/167로 가정하였고, 풍향별 계측 시간은 30개 이상의 실제 10분 상당의 샘플을 얻을 수 있도록 조절하였다. 모형에는 200개 이상의 풍압탭을 설치하였고(표 2), 모든 풍압탭을 동시에 계측하였다. 샘플링 주파수는 781Hz로, 각 풍압탭 별 300Hz의 차단 주파수(cut-off frequency)를 가진 로패스 필터(low-pass filter)를 장착하였다. 모형 정상부에서의 평균풍속과 4각형 단면의 폭을 이용해 구한 레이놀즈 수는 약 $Re=42,000$ 로, 변의 수가 증가할수록 레이놀즈 수의 영향은 중요해지지만, 본 연구에서는 아임계 영역에 속하는 레이놀즈 수를 대상으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

풍압탭의 분담 면적을 고려하여 전도모멘트의 시간 이력 데이터를 구하였고, 아래 식을 이용하여 전도모멘트 계수를 구하였다.

$$C_{MX} = M_x / (q_H B H^2) \quad (1)$$

$$C_{MY} = M_y / (q_H B H^2) \quad (2)$$

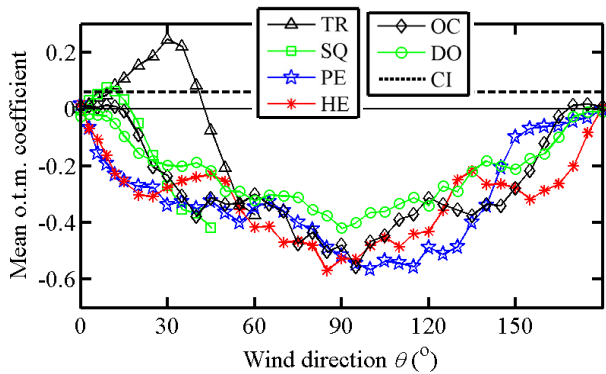
$$C_{MZ} = M_z / (q_H B^2 H) \quad (3)$$

여기서, M_x , M_y 와 M_z 는 X, Y와 Z축에 대한 전도모멘트, q_H 는 모형 높이에서 정의된 속도압, H는

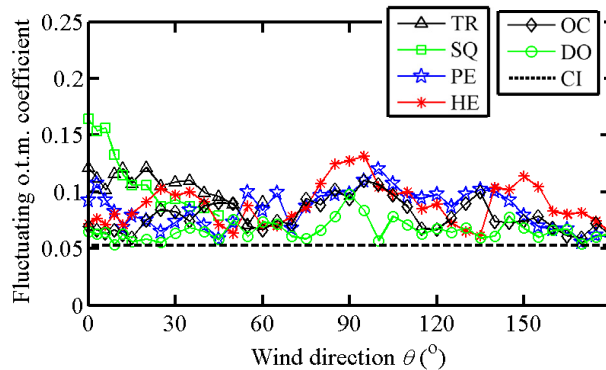
모형 높이이고, B는 4각형 단면의 모형 폭으로, 본 연구에서는 4각형 모형의 폭을 대표폭으로 하였다.

3.1 평균 및 변동 전도모멘트계수

그림 3에 X방향 전도모멘트 계수의 풍향에 따른 변화를 나타내었다. 그림 내의 점선은 원형 모형의 값으로 원형 모형의 경우 풍향성이 없기 때문에 모든 풍향에 대해 같은 값이라고 가정하였다.



(a) Mean o.t.m. coefficient

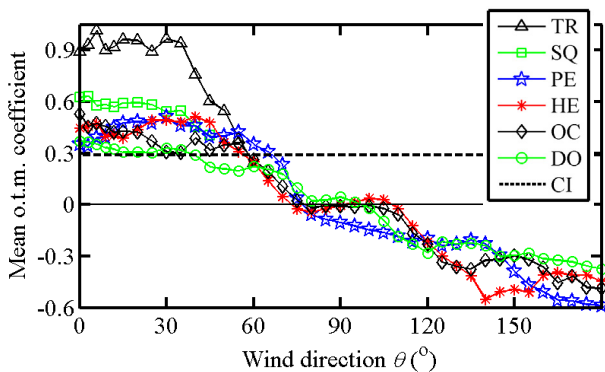


(b) Fluctuating o.t.m. coefficient

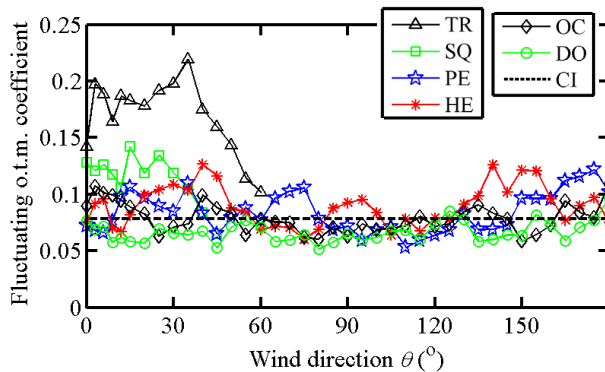
〈Fig. 3〉 Variations of overturning moment coefficients for X-direction.

3각형 단면의 경우 60도까지 계측하였고, 약 30도 근처에서 평균값은 0.2정도의 값을 보이지만, 풍향이 증가할수록 값이 감소하여 풍향이 60도일 때는 -0.4정도의 값을 보인다. 4각형 단면은 풍향이 약 10도 일 때 최대값을 보이지만, 3각형 단면과 마찬가지로 풍향과 함께 평균 전도모멘트는 작아져 풍향이 45도 일 때는 -0.4정도의 값으로 된다. 5각형부터 12각형까지의 모형은 풍향이 작을 때 양의 값을 보이지

않고, 풍향과 함께 작아져 풍향 약 100도 전후에서 음의 최대값을 보임을 알 수 있다. 변동전도 모멘트의 최대값은 4각형 단면에서 나타나고, 모형별 차이는 거의 없지만, 원형 단면의 값보다는 다소 큼을 알 수 있다.



(a) Mean o.t.m. coefficient

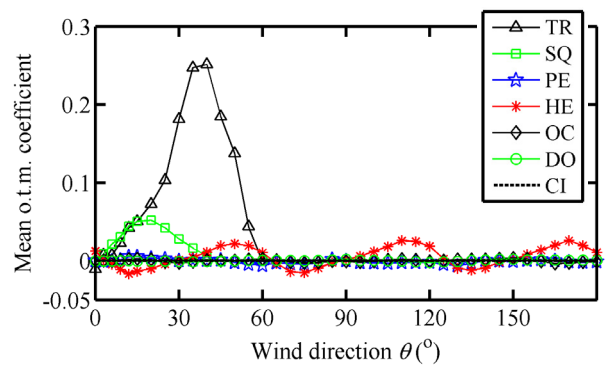


(b) Fluctuating o.t.m. coefficient

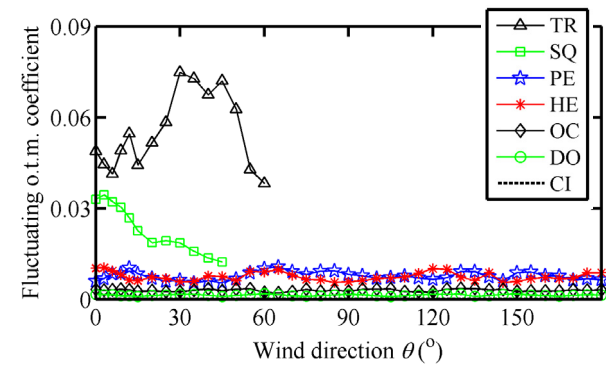
〈Fig. 4〉 Variations of overturning moment coefficients for Y-direction.

그림 4에 Y방향 전도모멘트 계수의 풍향에 따른 변화를 나타내었다. 그림 3과 마찬가지로 그림 내의 점선은 원형 모형의 값이다. 3각형 단면의 평균값은 약 30도까지 거의 일정한 값을 보이고 있고, 그 후부터는 풍향과 함께 감소하였다. 4각형 단면의 경우도 약 30도까지 약 0.6으로 일정한 값을 보였다. 5각형 이상의 다각형 모형의 경우 변의 수가 증가할수록 풍향 0도 부근의 값은 작아지고, 풍향이 약 75도와 120도 부근에서는 모형별 차이가 적음을 알 수 있다. 변동전도 모멘트는 3각형 단면이 제일 크고, 5각형 이상의 다각형 모형의 값은 원형 단면의 값과 비슷함을 알 수 있다.

Z방향 전도모멘트 계수의 풍향에 따른 변화를 그림 5에 나타내었다. 3각형 단면의 경우 약 30도 부근에서 0.25정도의 큰 값을 보이고 있고, 4각형 단면은 약 15도 근처에서 0.08정도의 값을 보이고 있으나, 다른 다각형 모형의 평균 전도모멘트 계수는 거의 0임을 알 수 있다. 한 가지 재미있는 사실은 6각형 모형의 경우, 평균 전도모멘트 값 자체는 작으나, 약 60도를 주기로 비슷한 경향이 반복적으로 나타난다는 점이다.



(a) Mean o.t.m. coefficient

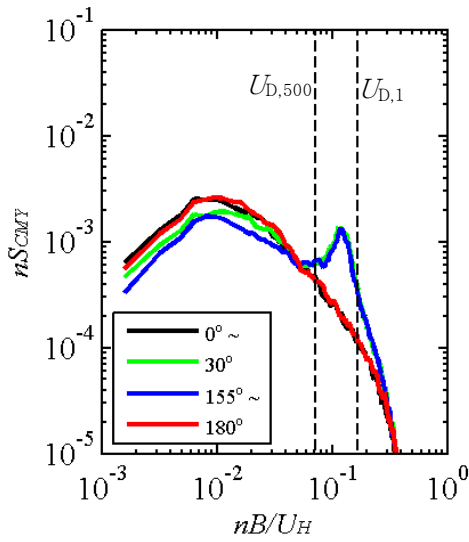


(b) Fluctuating o.t.m. coefficient

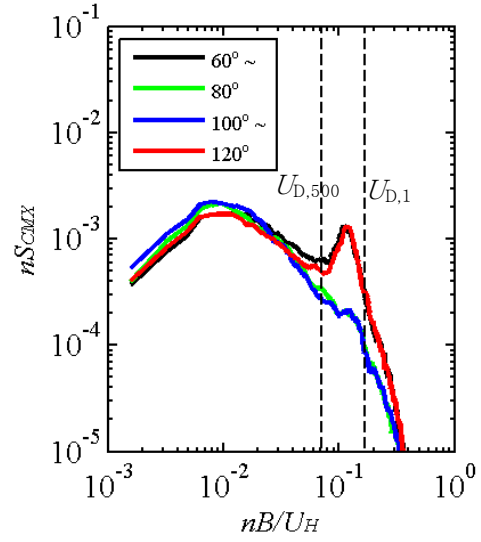
〈Fig. 5〉 Variations of overturning moment coefficients for Z-direction.

3.2 전도모멘트계수의 파워스펙트럼

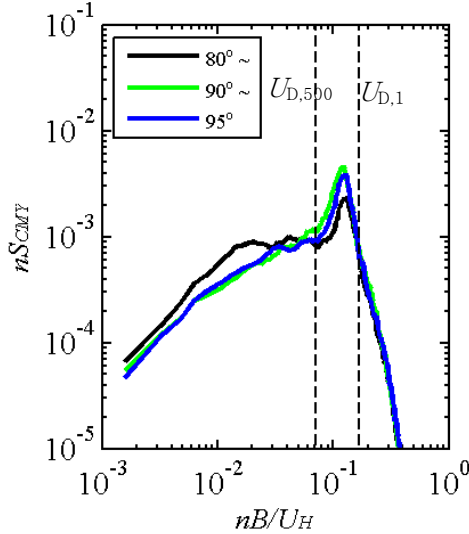
변동풍력의 주파수 영역에서의 특성을 파워스펙트럼으로 검토하였고, 한 예로 12각형 모형의 파워스펙트럼 형상의 풍향에 따른 변화를 그림 6에 나타내었다. 파워스펙트럼 형상은 풍향에 따라 무차원 주파수 약 0.01 부근에 완만한 피크를 가진 전형적인 풍방향 파워스펙트럼과 유사한 파워스펙트럼 (Shape I)과 무차원주파수 약 0.1근처에서 피크를



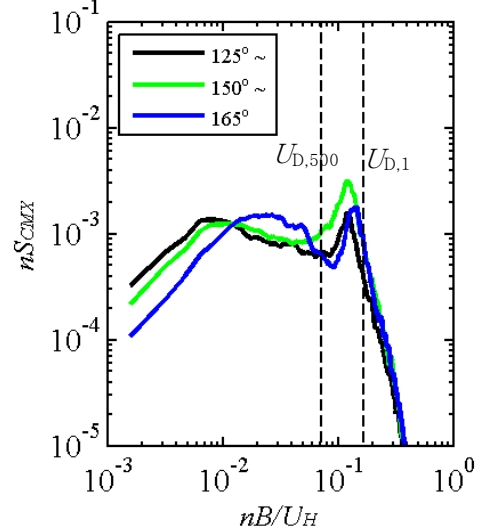
(a) Shape I power spectra of Y direction



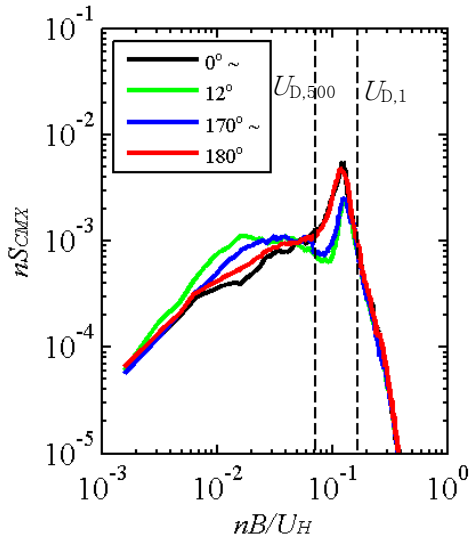
(d) Shape I power spectra of X direction



(b) Shape II Power spectra of Y direction



(e) Shape III power spectra of X direction
 (Fig. 6) Power spectra of dodecagon model(DO) at various wind directions.

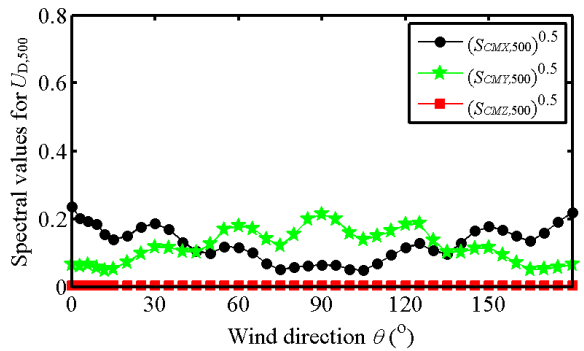


(c) Shape II Power spectra of X direction

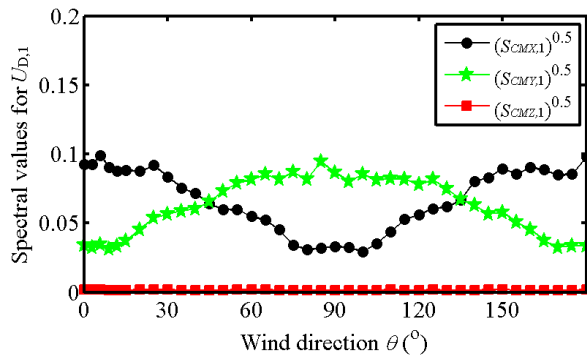
갖는 전형적인 풍직각방향 파워스펙트럼과 유사한 파워스펙트럼(Shape II), 그리고, 두 방향의 파워스펙트럼이 적절히 혼합된 파워스펙트럼(Shape III)으로 정성적으로 분류 할 수 있었다. 또, Shape I 파워스펙트럼에서도 전체적인 파워스펙트럼 형성은 풍방향 파워스펙트럼과 유사하지만, 무차원주파수 약 0.1부근에서 또 다른 피크를 갖는 형상과 그렇지 않은 형상으로 세분할 수 있었다.

Y방향의 경우(nS_{CMY}), 풍향 0도부터 30도 부근까지, 그리고 155도부터 180도 부근까지 Shape I 형상(풍방향 파워스펙트럼과 유사한 형상)을 보였고, 풍

향 80도부터 약 95도까지는 Shape II 형상(풍직각방향 파워스펙트럼과 유사한 스펙트럼 형상)을 보였다. X방향의 경우(nS_{CMX})도 풍향에 따라 비슷한 양상을 보였고, Z방향의 파워스펙트럼(nS_{CMZ})은 풍향에 따른 변화가 심하여 구분이 용이하지 않았다. 또, 그 이외의 풍향에서의 파워스펙트럼은 풍방향 스펙트럼의 형상과 풍직각방향 파워스펙트럼의 형상이 섞여있는 형상(Shape III)을 하고 있었다(그림 6(e)).



(a) Power spectral values at safety level wind speed

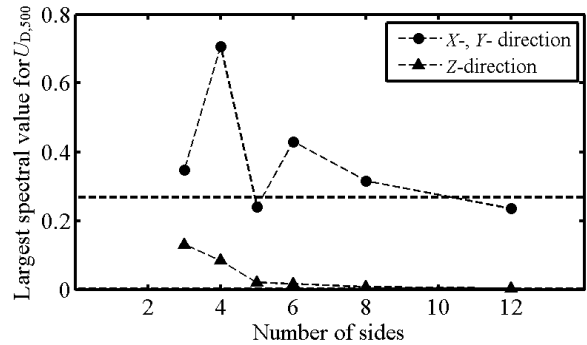


(b) Power spectral values at habitability level wind speed

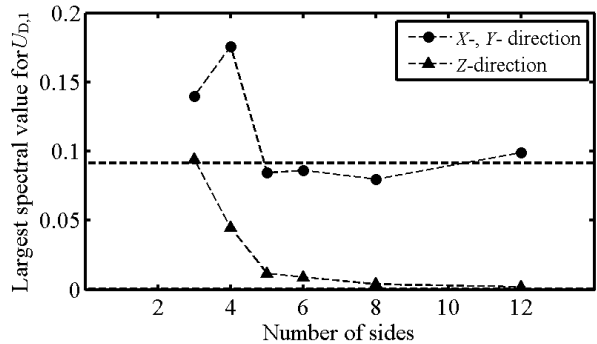
(Fig. 7) Power spectral values of dodecagon model(DO).

그림 6의 두 점선은 각각 안전성과 사용성 검토에 사용되는 설계풍속에 대한 파워스펙트럼 값으로, 12각형 모형의 파워스펙트럼 값의 풍향에 따른 변화를 그림 7에 나타내었다. 초고층 건물이라는 사회적 상징성과 중요성을 고려하여 안전성 평가를 위한 설계풍속으로 500년 재현주기 설계풍속(중요도 계수 1.1 이상)을, 사용성 평가를 위한 설계풍속으로 1년 재현주기 설계풍속을 사용하였다. 그림 7(a)의

안전성레벨의 파워스펙트럼 값은 그림 7(b)의 사용성 레벨의 파워스펙트럼 값보다 대략 두 배정도 컸고, 안전성과 사용성 레벨의 설계풍속 모두 X 방향의 최대값은 풍향 0도와 180도 부근에서, Y 방향의 최대값은 90도 부근에서 나타났고, Z 방향의 값은 거의 0임을 알 수 있었다.



(a) Largest power spectral values at safety level wind speed



(b) Largest power spectral values at habitability level wind speed

(Fig. 8) Largest power spectral values.

모형별로 그림 7과 같이 풍향에 따른 파워스펙트럼 값을 조사하였고, 전체 실험풍향에서 최대값을 구하여 단면의 변의 수의 증가에 따른 변화를 그림 8에 나타내었다. 그림 내의 점선은 원형 모형의 값이고, X방향과 Y방향의 파워스펙트럼 값은 풍향에 따라서 서로 바뀌므로 방향에 관계없이 최대값을 구하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 변의 수가 증가할수록 일반적으로 파워스펙트럼 값은 감소하였고 원형 모형의 값에 가까워지는 경향을 보였다. X와 Y방향의 경우 전도모멘트와 달리 최대값은 4각형 모형에서 나타났고, 안전성 레벨의 경우 원형 모

형의 약 2.5배, 사용성 레벨의 경우 약 2배 정도의 큰 값을 보였다. Z방향의 경우 3각형 모형의 값이 가장 컸고, 5각형 이상의 다각형 모형에서는 값의 변화가 작음을 알 수 있었다.

4. 결론

단면의 변의 수의 증가에 따른 초고층 건물의 공력특성을 파악하기 위한 풍동실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전도모멘트는 일반적으로 변의 수가 증가할수록 감소하였고, 원형 단면의 값에 가까워짐을 알 수 있었다. 방향에 상관없이 3각형 모형이 제일 큰 값을 보였고, X와 Y방향의 경우, 평균값은 4각형 단면의 약 1.6배, 변동값은 약 1.4배의 큰 값을 보였다. Z방향의 경우 평균값은 4각형 단면의 약 5배, 변동값은 약 2.3배의 큰 값을 보였다.

(2) 파워스펙트럼 값도 변의 증가와 함께 작아지고 원형 모형의 값에 가까워짐을 알 수 있었다. 그림 8에서 알 수 있듯이 X와 Y방향의 경우, 최대값은 4각형 모형에서, Z방향의 경우 3각형 모형에서 나타났다.

(3) 현재까지의 연구결과로부터 5각형 혹은 6각형 이상의 초고층 건물의 공력특성에는 큰 변화가 없는 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 일본의 문부과학성 글로벌 COE프로그램(풍공학, 교육연구의 뉴 프론티어, 동경공예대학교)의 연구비 지원에 의한 결과입니다. 또 한국연구재단의 일반연구자지원사업(No.R1305331)으로부터 일부 연구비 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. 김용철, 칸다 준, 타무라 유키오 (2013), 비정형 초고층 건물의 바람에 의한 편심응답 특성, 한국공간구조논문집, Vol.13(1), 79-86.
2. 김용철, 칸다 준, 타무라 유키오, 윤성원 (2013),

비정형 초고층 건물의 변동 풍압, 한국공간구조 논문집, Vol.13(1), 97-104.

3. Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M., Kim, Y.C. (2012), Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations, J. Wind Eng. & Indust. Aerodyn., Vol.107-108, pp.179-191.
4. Szalay, Z. (1989), Drags on several polygon cylinders, J. Wind Eng. & Indust. Aerodyn., Vol.32, pp. 135-143.
5. Chien, C.W., Jang, J.J., Li, Y.C. (2010), Wind-resistant design of high mast structures, J. Chin. Inst. Eng., Vol.33(4), pp. 597-615.
6. Tang, J.W., Tang, J.W., Xie, Y.M., Felicetti, P., Tu, J.Y., Li, J.D. (2013), Numerical simulations of wind drags on straight and twisted polygonal buildings, Struct. Design Tall Spec. Build., Vol.22, pp. 62-73.
7. Thoroddsen, S.T., Peterka, J.A., Cermak, J.E. (1988), Correlation of the components of wind-loading on tall buildings, J. Wind Eng. & Indust. Aerodyn., Vol.28, pp. 351-360.
8. Kanda, J., Choi, H. (1992), Correlating dynamic wind force components on 3-D cylinders, J. Wind Eng. & Indust. Aerodyn., Vol.41(1-3), pp. 785-796.

(접수일자 : 2013년 08월 15일)

(심사완료일자 : 2013년 08월 30일)

(게재확정일자 : 2013년 09월 04일)