

고층건축물의 비틀림방향 변동풍력의 특성에 관한 실험적 연구

하영철* · 김동우** · 길용식***

Wind tunnel test study on verifying the characteristics of torsional fluctuating wind force of rectangular tall buildings

Ha, Young-Cheol*, Kim, Dong-Woo** and Kil, Yong-Sik***

Keywords : tall building, roughness, aspect ratio, side ratio, fluctuating wind force

Abstract

This study aims at verifying characteristics of torsional fluctuating moment coefficient and power spectral density, which is needed to estimate torsional response of tall buildings. In order to estimate characteristics, the wind tunnel tests have been conducted on 52 types aero-elastic model of the rectangular prisms with various aspects ratios, side ratios and surface roughness in turbulent boundary layer flows. In this paper, characteristics of torsional fluctuating wind force are briefly discussed and then these results were mainly analyzed as a function of the aspects ratios and side ratios of buildings.

1 : 4, 1 : 5로 변화시킨 52개의 모형을 대상으로 노풍도를 A, B, C, D로 변화시켜 풍력실험을 실시하였다. 이 풍력실험 바탕으로 비틀림방향에 대한 변동비틀림모멘트계수 및 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도(Power Spectrum Density) 특성을 알아보았다. 본 연구에서 알아본 변동비틀림모멘트계수 및 파워스펙트럼밀도의 특성은 향후 고층건축물의 비틀림방향 풍하중 연구에 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 풍동실험

실험은 금오공과대학교 풍동실험실의 토출식 경계층풍동에서 실시하였다. 풍동의 측정부 길이는 14m이고, 측정부 단면은 1.54m×1.3m 이다. 노풍도 A, B, C, D 각각에 대한 풍속의 연직분포 및 기준난류강도는 풍동 내에 조도블록과 스파이어(Spire)를 사용하여 생성하였고, 풍속은 열선풍속계에 의해 측정하였으며, 그 값은 피토투관의 수치를 토대로 보정하여 사용하였다.

2.1 풍동기류의 작성

풍력실험에 사용된 지표면의 상태는 고층건물이 밀집한 지역에 해당하는 노풍도 A부터 해안가의 평탄지형에 해당하는 노풍도 D까지 풍동바닥면에 재현하였다. 본 실험에 사용한 풍속의 연직분포지수 α 는 노풍도 A인 경우는 0.337, 노풍도 B인 경우는 0.222, 노풍도 C인 경우는 0.150, 노풍도 D인 경우는 0.10으로 재현하여 각각의 노풍도 A, B, C, D에 근사시켰다.

2.2 실험모형

본 연구에서는 모형의 축척율을 자연풍과 풍동풍의 난류적분 스케일로부터 1/400로 하였다. 모형의 형상은 형상비 $H/\sqrt{BD} = 4, 5, 6, 8$ 인 4종류의 사각형 단면을 가진 각주에 변장비를 변화시켜 설계하였다. 변장비 변화는 모형의 밀면적을

1. 서론

세계적으로 사회의 발전과 인구의 도시 집중으로 인한 도심 내의 토지 이용의 극대화를 위하여 건물은 점점 고층화 되어가고 있다. 또한 구조시스템의 발전, 컴퓨터에 의한 설계계산의 촉진, 재료의 경량화 및 고강도화, 여러 가지 시공공법 개발 등 건설기술의 발전이 건물의 고층화를 가능하게 하였다. 최근에는 우리나라도 서울뿐만 아니라 지방의 대도시에까지 30층 이상의 초고층 건물들이 건설되고 있다. 이와 같이 점점 늘어나고 있는 고층건축물은 지진하중 및 풍하중과 같은 수평하중에 매우 취약하게 된다. 특히 건축물이 일정규모 이상이 되면 지진하중보다는 풍하중이 구조설계와 거주성(사용성)을 결정짓는 중요한 인자가 되고 있다. 세계 각국에서 이 문제를 해결하기 위해 정량적인 해석방법을 찾아 많은 노력을 기울여 스펙트럼모드해석법(spectral modal analysis)을 통한 풍방향응답의 평가는 가능하게 되었으며, 또한 현재 풍직각방향의 진동응답의 특성은 많은 실험과 연구를 통하여 경험식이 제안되었다. 그러나 아직까지도 비틀림방향의 진동응답을 적절하게 평가하기 위한 일반화된 해석적 방법은 없으며, 선행연구 또한 미흡한 실정이다.

따라서, 본 논문은 형상비 $H/\sqrt{BD} = 4, 5, 6, 8$ 인 4종류의 사각형 단면을 가진 각주에 모형의 밀면적을 $B \times D = 64 \text{ cm}^2$ 로 고정된 후, 변장비 $B : D$ 를 5 : 1, 4 : 1, 3 : 1, 2 : 1, 1.5 : 1, 1.25 : 1, 1 : 1, 1 : 1.25, 1 : 1.5, 1 : 2, 1 : 3,

* 금오공과대학교 건축학부, ycha@kumoh.ac.kr

** 금오공과대학교 건설기술연구원, wind9858@kumoh.ac.kr

*** 금오공과대학교 건축공학과 대학원, yongsiki@kumoh.ac.kr

이 연구는 “건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것임”

Table 1. Experimental Model


면태	형상비 변화	변장비 변화
	$H/\sqrt{BD} = 4$ (H=32 cm)	· D/B=1/5 · D/B=1.25/1 · D/B=1/4 · D/B=1.5/1
	$H/\sqrt{BD} = 5$ (H=40 cm)	· D/B=1/3 · D/B=2/1
	$H/\sqrt{BD} = 6$ (H=48 cm)	· D/B=1/2 · D/B=3/1
	$H/\sqrt{BD} = 8$ (H=64 cm)	· D/B=1/1.5 · D/B=4/1 · D/B=1/1.25 · D/B=5/1
		· D/B=1/1

Table 2. Data Measurement

모형스케일 ; L_m/L_f	1/400
풍속스케일 ; V_m/V_f	1/4
시간스케일 ; T_m/T_f	1/100 (평가시간 : 10.24 초, 실물환산시간 : 1024 초)
측정횟수	8회
Sampling Frequency	200 (Hz)
Low Pass Filter	100 (Hz)
실험풍향	0° ~ 45° / 0°

$B \times D = 64 \text{ cm}^2$ 로 고정한 후 변장비 $B:D$ 를 5:1, 4:1, 3:1, 2:1, 1.5:1, 1.25:1, 1:1, 1:1.25, 1:1.5, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5로 변화시킨 총 52개의 모형을 대상으로 풍력 실험을 하였다. 실험모형은 강성이 크고 가벼운 발사로 Rocking 모형으로 제작하였다. 실험모형의 형태와 변장비 및 형상비 변화를 Table 1.에 나타내었다.

2.3 실험데이터 측정방법

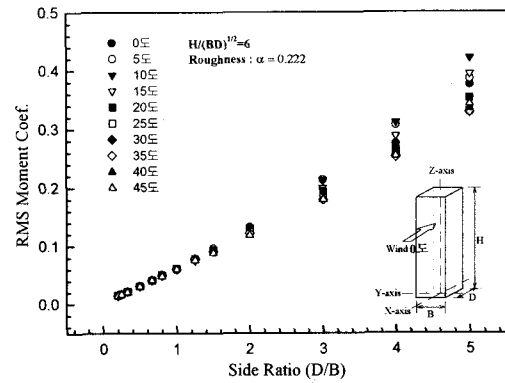
풍력실험은 6-분력계(Six-component Force Balance)를 사용하여 실시하였고, 데이터 측정방법은 Table 2.에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

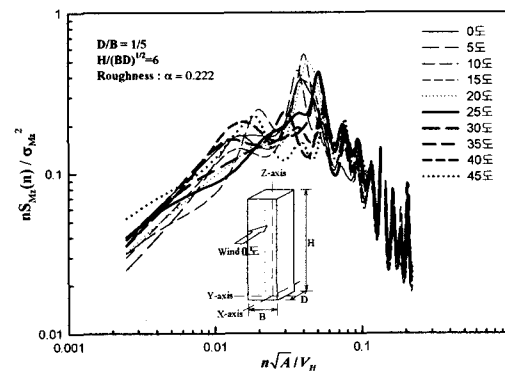
3.1 풍향 변화에 따른 비틀림모멘트계수 및 파워스펙트럼밀도

Figure 1.은 형상비가 6인 각주의 풍향 변화에 따른 비틀림방향 변동비틀림모멘트계수와 파워스펙트럼밀도를 나타낸 그래프이다.

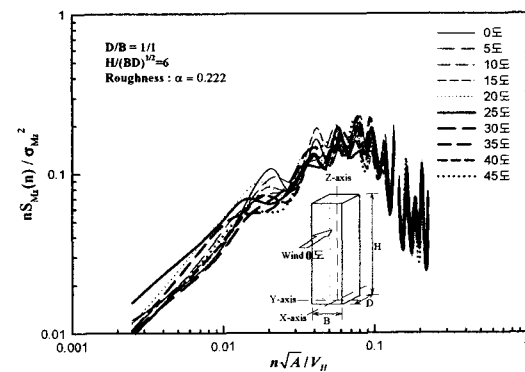
먼저 Figure 1.의 (a)를 보면 변장비 $1/5 \leq D/B \leq 5/1$ 의 모든 변장비에서 풍향이 0도에서 45도까지 변화여도 비틀림방향의 변동비틀림모멘트계수 C_{Mz} '는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 특히 풍방향으로 폭이 넓은 형상인 변장비 $1/5 \leq D/B \leq 2/1$ 의 경우는 변동비틀림모멘트계수가 거의 같은 값을 나타내고 있다. Figure 1.의 (b), (c), (d)는 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도를 나타낸 그래프로써, 모든 변장비(13가지)에서 비슷한 스펙트럼의 특성을 보여 대표적인 변장비 $D/B=1/5$, $D/B=1/1$, $D/B=5/1$ 만 나타냈다. 모든 변장비의 그래프에서 스펙트럼은 풍향이 0도에서 45도까지 변화여도 특별한 경향은 나타나지 않고, 무차원진동수 $n\sqrt{A}/V_H = 0.01 \sim 0.1$ 사이에서 여러 개의 피크를 가지는 매우 불규칙적이고 복잡한 형상을 나타내고 있다. 이에 변동비틀림모멘트계수 및 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도는 풍향에는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.



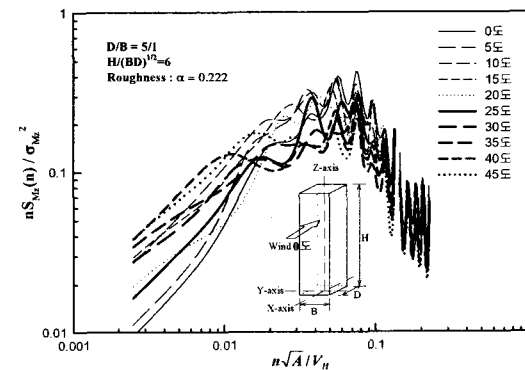
(a) fluctuating torsional moment coefficient



(b) side ratio (D/B = 1/5)



(c) side ratio (D/B = 1/1)



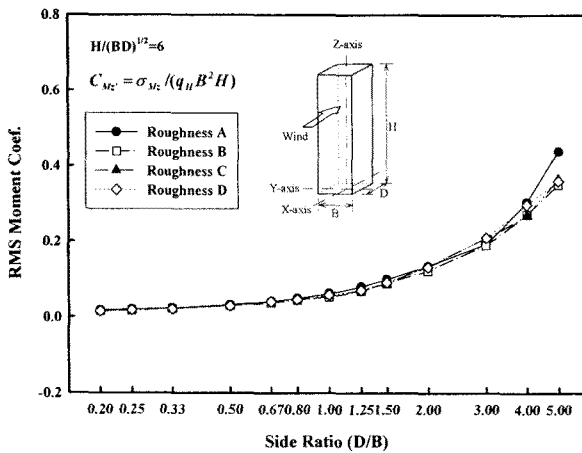
(d) side ratio (D/B = 5/1)

Figure 1. Fluctuating torsional moment coefficient and power spectral density with the direction of wind

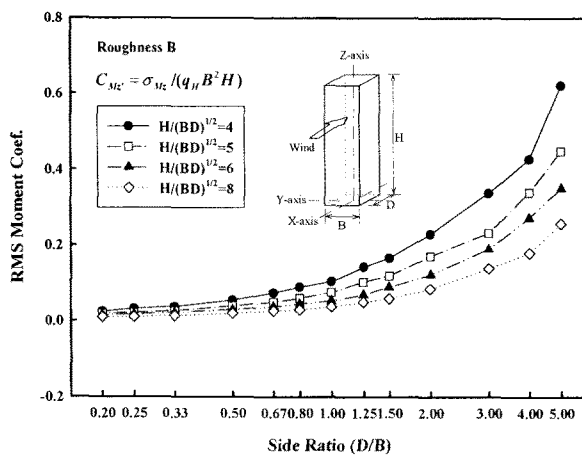
3.2 변동비틀림모멘트계수

Figure 2.는 풍력실험을 통해 측정된 노풍도 및 형상비별 변장비 변화에 따른 변동비틀림모멘트계수 (C_{Mz})를 나타내 그래프이다.

먼저 Figure 2.에서 (a)노풍도별 변동비틀림모멘트계수 (C_{Mz})를 살펴보면 모든 변장비에서 계수 값의 차이가 거의 없으며 변장비 $D/B=5/1$ 에서만 약간의 차이는 있지만 그 값은 미소하다. 형상비 4, 5, 8의 노풍도별 변동비틀림모멘트계수 그래프 모두 같은 경향을 나타내고 있다. 따라서 변동비틀림모멘트계수는 노풍도에 대해서는 특성이 나타나지 않는다. Figure 2.의 (b)형상비별 변동비틀림모멘트계수(C_{Mz})를 살펴보면 모든 변장비에서 계수 값이 $H/\sqrt{BD} = 4 > H/\sqrt{BD} = 5 > H/\sqrt{BD} = 6 > H/\sqrt{BD} = 8$ 의 순서로 나타났다. 특히 변장비가 $D/B=1/5$ 에서 $D/B=5/1$ 로 갈수록(풍방향으로 폭이 좁아질수록) 변동비틀림모멘트계수(C_{Mz})값의 차이가 커지고 있다. 노풍도 A, C, D의 형상비별 변동비틀림모멘트계수 그래프 모두 같은 경향을 나타내고 있다. 변장비별 변동비틀림모멘트계수(C_{Mz})를 살펴보면 변장비가 커질수록 변동비틀림모멘트계수 또한 증가한다. 특히 변장비 $D/B=2/1$ 이하는 계수 값이 완만하게 증가하다가 $D/B=2/1$ 이상인 경우에는 계수 값의 증가폭이 커지는데, 이는 $D/B=2/1$ 이상부터 접근류의 난류성분 뿐만 아니라 풍상측 모서리에서 박리하여 모형측면에서 박리류의 재부착에 의해 계수 값의 증가폭이 커지는 것이다.



(a) roughness



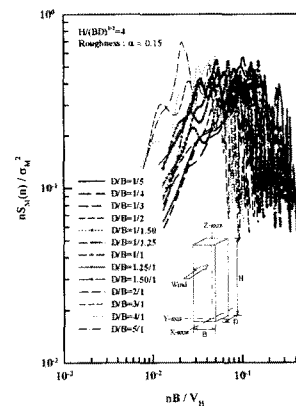
(b) aspect ratio

Figure 2. Fluctuating torsional moment coefficient

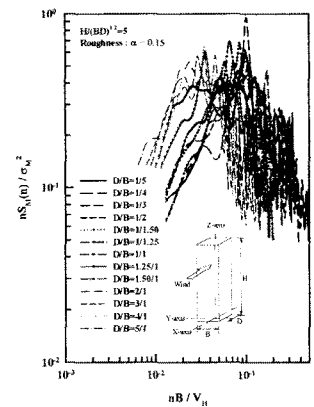
3.3 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도

Figure 3.은 노풍도가 C인 각 형상비별 변장비 변화에 따른 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도를 나타내었다. 먼저 그림 3의 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도를 보면 모든 형상비에서 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도의 형상이 비슷한 형태를 나타내고 있으며, 피크는 무차원진동수 $n\sqrt{A}/V_H = 0.01 \sim 0.3$ 사이에서 여러 개의 피크를 가지는 매우 불규칙적이고 복잡한 형상을 나타내고 있다. 변장비 변화에 따른 특성을 살펴보면 풍방향으로 폭이 넓은 단면형태인 $D/B=1/1.25$ 이하의 경우에는 무차원진동수 $n\sqrt{A}/V_H = 0.05 \sim 0.2$ 의 범위에서 여러 개의 불규칙적인 피크를 가지며, 특히 형상비 6, 8의 경우에는 무차원진동수 $n\sqrt{A}/V_H = 0.1$ 부근의 피크가 나타난다. 이는 풍상측 모서리에서의 박리류가 측면에 재부착하지 않고 후류역으로 흘러감에 따라 후류역의 교번적인 와류가 형성되어 와류의 발생주파수에서 탁월한 피크를 나타내기 때문이다. 반면에 풍직각방향으로 폭이 넓은 단면형태인 $D/B=1.25/1$ 이상의 경우에는 무차원진동수 $n\sqrt{A}/V_H = 0.01 \sim 0.07$ 의 범위에서 여러 개의 불규칙적인 피크를 나타내는데 이는 풍상측 모서리에서의 박리류가 모형측면에 재부착하여 또 다른 와류를 형성시키기 때문에 여러 개의 피크를 나타내는 것이다. 노풍도 A, B, D의 그래프도 같은 경향을 나타내고 있다.

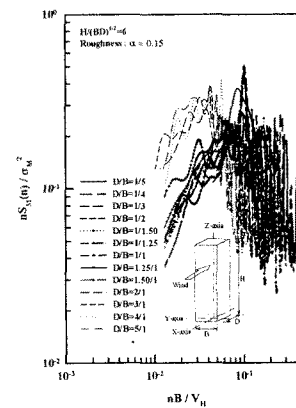
Figure 4.는 변장비별 노풍도 변화에 따른 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도를 나타낸 그래프이고, Figure 5.는 변장비별 형상비 변화에 따른 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도를 나타낸 그래프이다. 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도의 경우



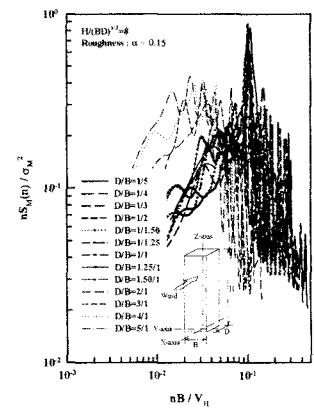
(a) aspect ratio 4



(b) aspect ratio 5



(c) aspect ratio 6



(d) aspect ratio 8

Figure 3. Fluctuating torsional moment power spectral density with various side ratios

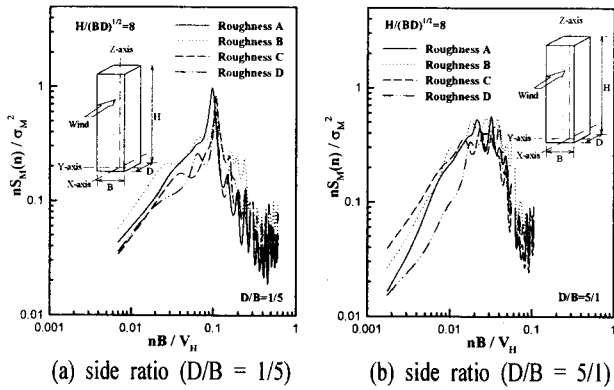


Figure 4. Fluctuating torsional moment power spectral density with various roughness.

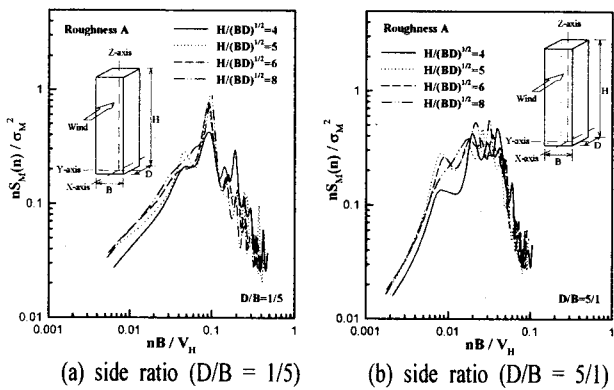


Figure 5. Fluctuating torsional moment power spectral density with various aspect ratios.

노풍도 변화 및 형상비 변화 모두 모든 변장비(13가지)에서 비슷한 특성을 보여 대표적인 변장비 $D/B=1/5$ 과, $D/B=5/1$ 2가지만을 나타내었다. 노풍도 및 형상비 변화에 따른 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도는 Figure 4.와 Figure 5.에서 보는 바와 같이 변장비가 같을 때는 노풍도와 변장비가 변하더라도 비슷한 형상을 나타내고 있으며, 피크 값도 크게 차이가 나지 않는다. 그러므로 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도는 노풍도 및 형상비에 따라서는 특별한 특성은 나타나지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

본 실험은 형상비 $H/\sqrt{BD} = 4, 5, 6, 8$ 인 사각형 단면을 가진 각주와 각 형상비에 대한 변장비 $B:D = 5:1, 4:1, 3:1, 2:1, 1.5:1, 1.25:1, 1:1, 1:1.25, 1:1.5, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5$ 로 변화시킨 52개의 모형을 제작하여 노풍도 A, B, C, D에 대하여 풍동실험을 실시하였다. 풍동실험에 의한 비틀림방향의 변동비틀림모멘트계수와 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도 특성을 비교·분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 변동비틀림모멘트계수(C_{M_z}') 값과 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도는 풍향 변화에 대해서는 크게 영향을 받지 않는다.

(2) 변동비틀림모멘트계수는 노풍도에 따라서는 크게 영향이 없으며, 형상비에 따라서는 계수 값이 $H/\sqrt{BD} = 4 > H/\sqrt{BD} = 5 > H/\sqrt{BD} = 6 > H/\sqrt{BD} = 8$ 의 순서로 나타났다. 변장비별 변동비틀림모멘트계수를 살펴보면 변장비가 커질수록

변동비틀림모멘트계수 또한 증가한다. 특히 변장비 $D/B=2/1$ 이하의 완만하게 증가하다가 $D/B=2/1$ 이상인 경우에는 계수 값의 증가폭이 커진다.

(3) 변장비 변화에 따른 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도는 풍방향으로 폭이 넓은 단면형태인 $D/B=1/1.25$ 이하의 경우에는 무차원진동수 $n\sqrt{A}/V_H = 0.05 \sim 0.2$ 의 범위에서 여러 개의 불규칙적인 피크를 가지며, 특히 형상비 6, 8의 경우에는 무차원진동수 $n\sqrt{A}/V_H = 0.1$ 부근의 피크가 나타난다.

(4) 노풍도 및 형상비에 따른 변동비틀림모멘트의 파워스펙트럼밀도는 특별한 특성은 나타나지 않았다.

참고문헌

- [1] 대한건축학회, 건설교통부고시 건축구조설계기준, 2005
- [2] A.G. Davenport (1962) 'The response of slender line-like structures to a gusty wind', Proc. I.C.E., Vol.23, pp.449-472
- [3] B.J. Vickery (1966) 'On the assessment of wind effects on elastic structures', C. E. Trans., Inst. Aust. pp.183-192
- [4] 日本建築學會, 建築物 荷重指針同解説, 1993
- [5] National Building Code of Canada, 1995
- [6] W.H. Melbourne (1975) 'Tall rectangular building response to cross-wind excitation' 4th. Int. Conf. on Wind Effects on Buildings & Structures, London.
- [7] H. Kareem, "Fluctuation wind loads on buildings", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 108, pp.1086-1102, 1989
- [8] Vickery. B.J, "Lift or across-wind response of tapered stacks", Proceedings of the ASCE, ST1, pp1-20, 1972
- [9] Shugo Liang, Q.S.Li, Shengchun Liu, Liangliang Zhang, Ming Gu, "Torsional dynamic wind loads on rectangular tall buildings" Engineering Structures 26, p129-137, 2004
- [10] 하영철, 이정환, 김동우, "고층건축물의 모서리 형상 변화에 따른 풍진동 저감효과에 관한 연구", 대한건축학회논문집(구조계), 17권, 7호, 2001. 7, pp.3-10
- [11] 하영철, 김동우, 정필선, '풍응답에 효과적인 초고층건물의 기본형상에 관한 풍동실험 연구' 대한건축학회논문집(구조계), 18권, 9호, pp.93-100, 2002. 9
- [12] 하영철, 김동우, '초고층건축물의 풍하중 저감을 위한 공역학적 방법', 대한건축학회논문집(구조계), 20권, 11호, pp.3-10, 2004. 11
- [13] 하영철, 길용식, 김동우, "고층건축물의 풍직각방향 변동풍력 평가를 위한 경험식 제안" 대한건축학회논문집(구조계), 22권, 2호, pp.83-90, 2006. 2