

풍하중을 받는 테이퍼 고층건물의 진동변위응답 평가

The Evaluation in Displacement Response of Tapered Tall Buildings to Wind Load

조 지 은* 유 기 표** 김 종 수*** 김 영 문****
Cho, Ji Eun You, Ki-Pyo Kim, Jong-Soo Kim, Young-Moon

요 약

고층건물의 진동응답을 저감시키기 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다. 이들 진동응답의 저감 연구는 건물의 외관을 변화시키는 방법과 건물에 부가감쇠장치를 설치하는 방법들이 있는데 본 논문에서는 고층 건물의 형태의 변화에 따른 진동변위응답의 특성을 파악하고자 한다. 고층건물의 형태변화중에서도 외관에 테이퍼를 주는 방법을 사용하였다. 기류의 특성은 도심 및 교외지역을 중심으로 풍동실험을 실시하였다.

Abstract

The investigations for mitigating wind-induced excitations of tall buildings have been carried out. The aerodynamic modification of a building shape changing the cross-section with height through tapering, which alters the flow pattern around the building, could reduce wind induced excitations of tall buildings. The fact that a tapered tall building might spread the vortex-shedding over a broad range of frequencies makes more effective for reducing acrosswind responses has been established. In this paper, to investigate the tapering effect for reducing wind-induced responses of a tapered tall building, high-frequency force-balance test was conducted. The six types of building models which have different taper ratio of 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15% and one basic building model of a square cross-section were tested under the two typical boundary layers representing suburban and urban flow environment. The effect of wind direction was also considered.

키워드 : 테이퍼를, 풍력실험, 변위응답

Keywords : taper ratio, high-frequency force balance test, displacement response

1 서 론

최근에 건설되어 지고 있는 대부분의 초고층 건물들은 다양한 평면과 입면으로 건설되고 있다. 이와 같이 건물이 초고층화 될수록 지진 하중에 의한 진동의 영향보다는 풍하중에 의한 진동 영향이 커질 수 있다는 사실은 이미 잘 알려져 있다. 바람에 의한 구조물의 진동에 대해서 다양한 조정방법이 연구되어지고 있는데, 구조시스템의 조정, 공력학적인 조정, 능동적, 또는 수동적인 제어기술 방법 등

이 있다. 구조시스템의 변경은 구조물의 동적 특성인 강성, 감쇠, 질량의 재배치에 있다. 공력학적인 변경은 건축물 주변의 기류 형태에 변화를 주어 건축물의 공역학적인 힘이나 모멘트를 줄이는 방법으로, 이러한 방법은 Bailey(1987), Kwok(1987, 1988) 등에 의해서 많은 연구가 이루어 졌으며, 공력학적인 장치인 스폴리나 베인등을 첨부하는 방법의 연구 또한 Kwok(1988)에 의해서 많이 이루어졌다.

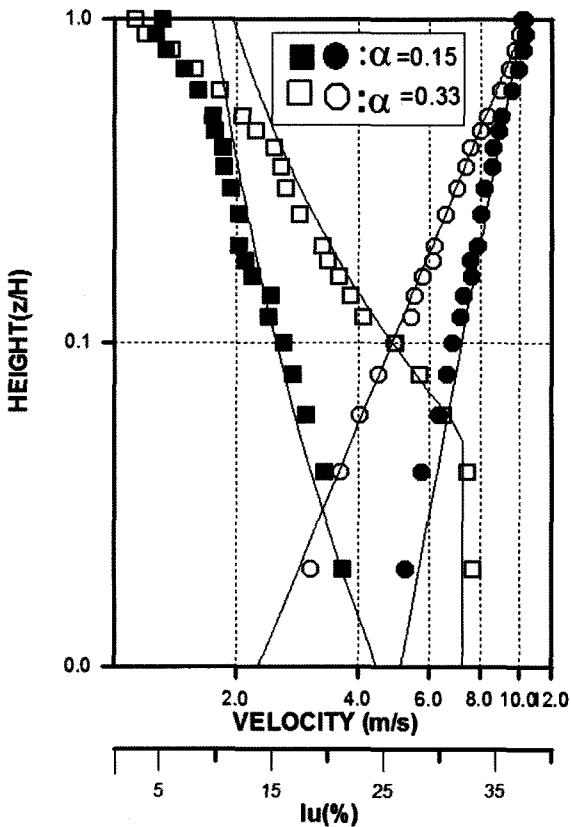
또 다른 공력학적인 조정방법으로 다양한 단면형태에 대해서 높이에 따라 테이퍼를 주어 바람에 의한 응답을 감소하는 방법이 소개되었다.^{11,12,13,14} 이러한 테이퍼(taper)의 경우 John Hancock Building에 적용된 바가 있고 수평변위가 10%정도 감소한 것으로 보고되고 있다. 그리고 Melbourne과 Cheung

* 전북대학교 건축·도시공학부 박사수료, 공업기술연구센터
** 전북대학교 건축·도시공학부 전임강사, 공업기술연구센터
*** 회장, (주) CS 엔지니어링 대표이사
**** 정회원, 전북대학교 건축·도시공학부 교수, 공업기술연구센터
Tel : 063-270-2284 Fax : 063-272-84092
E-mail : kym@moak.chonbuk.ac.kr

(1988)의 테이퍼건물과 모따기한 건물을 그렇지 않은 건물과 비교를 하고 있다. 본 논문은 최상층의 최대변위응답 $H/500$ 과 실험에서 구한 최대변위응답을 비교하여 테이퍼율에 따른 최대변위응답에 대한 효과를 알아보려고 한다. 실험은 테이퍼 된 5가지 모형과 기본모형(테이퍼이 되어 있지 않은것)을 비교하였다. 실험에 사용된 기류는 교외지역(BL1, $\alpha=0.15$)와 도심지역 (BL2, $\alpha=0.33$)에 대해서 풍향각은 0° 와 45° 에서 실시하였다.

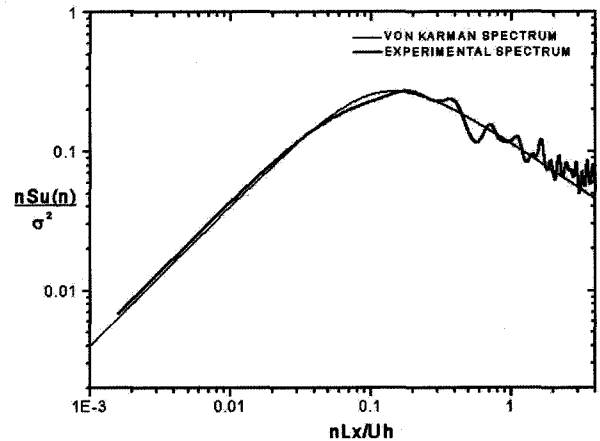
2. 풍동실험

풍동실험은 전북대학교 풍동실험실에서 보유하고 있는 측정부 $1.5\text{m}(\text{폭}) \times 1.2\text{m}(\text{높이}) \times 12\text{m}(\text{길이})$ 의 개방형 풍동장치에서 이루어졌다. 측정에 사용된 풍동내 기류는 모델높이에서 난류강도가 10%인 교외지역(BL1)과 난류강도가 15%인 도심지역(BL2)인 2개 지역이다. <그림 1>은 풍동내에 형성된 BL1과 BL2 기류의 높이별 평균풍속의 분포와 난류강도의 분포를 나타내고 있다. <그림 2>는 조도구분별 풍속스펙트럼

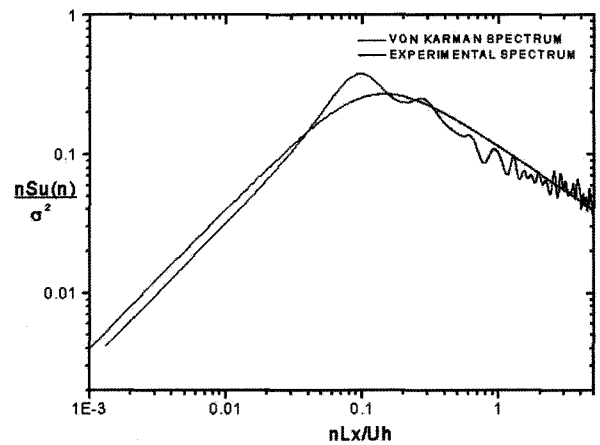


<그림 1> 평균풍속과 난류강도의 수직분포

펙트럼으로 모형높이 40cm에서 측정된 값들이다. <그림 3>은 측정모형의 높이(H)와 밑면의 크기, 상부의 크기를 나타내고 있으며, 밑면의 크기는 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 으로 일정하게 하였으며, 테이퍼은 상부의 크기를 9cm, 8cm, 7cm, 6cm, 4cm로 하여 테이퍼율이 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15%가 되도록 하였다. 모형

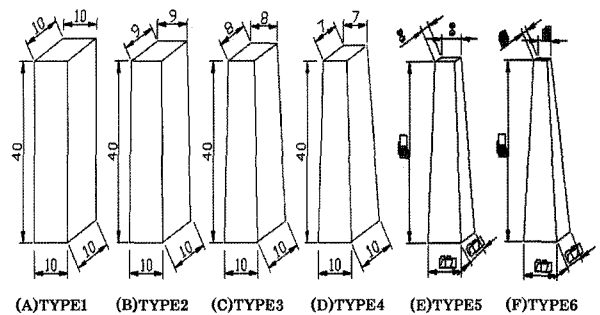


(a) BL1



(a) BL2

<그림 2> 조도구분별 풍속스펙트럼



<그림 3> 실험모형

<표 1> 풍력실험에 사용된 상사법칙

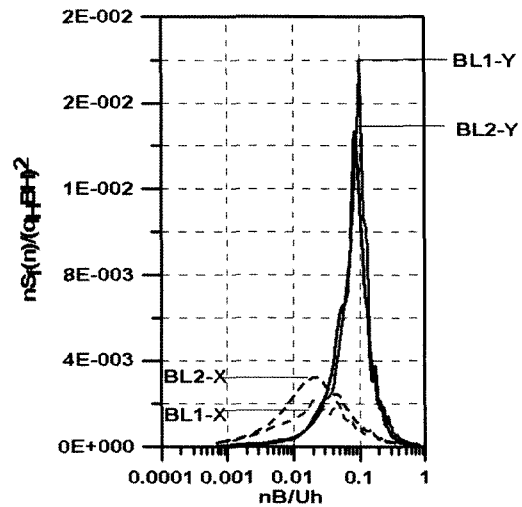
모형스케일	1/400	
조도구분	II ($\alpha=0.15$) BL1	IV ($\alpha=0.33$) BL2
기본풍속(m/s)	40	40
설계풍속(m/s)	60.8	46.96
풍동풍속(m/s)	9.02	6.97
풍속스케일	6.74	6.74
시간스케일	58.5	58.5
샘플링주파수	200Hz	
관측시간	10.24sec->실시간 10분평균	
양상불평균	5회평균	

의 축적은 1/400로 만들었으며, 모형의 대표 길이 B는 모든 실험 모형에서 높이 H/2에 해당하는 위치에서의 길이를 B로 사용하여 각모형별 B는 40cm, 38cm, 36cm, 34cm, 32cm, 28cm가 되었다. 각 모형의 높이는 40cm로 일정하게 하였으며 실제구조물로는 160m의 높이이면 층수로는 40층으로 가정하였다. 강제모형은 발사재로 제작하였으며, 모형의 고유진동수는 50Hz 이상이 나올 수 있도록 제작하였다. 설계풍속은 BL1(교외지역)을 40m/sec로 BL2(도심지역)를 35m/s로 가정하였으며, 이에 따른 풍동내 모형 최상층 높이에서 실험풍속은 상사법칙에 따라 BL1은 7.4m/s로 BL2은 6.3m/s로 하였다. 풍력실험에 사용된 계측기는 6분력계(KYOWA, LAT-10KA-1)로 Fx, Fy, Mx, My, Mz방향에 대해서 동시에 계측을 하였으며, 샘플링 주파수는 200Hz이고 5회 평균하여 구하였다. <표 1>은 풍력실험에 사용한 각 모형에 대한 상사법칙을 나타내고 있다.

3. 실험결과 및 분석

3.1. 풍력스펙트럼

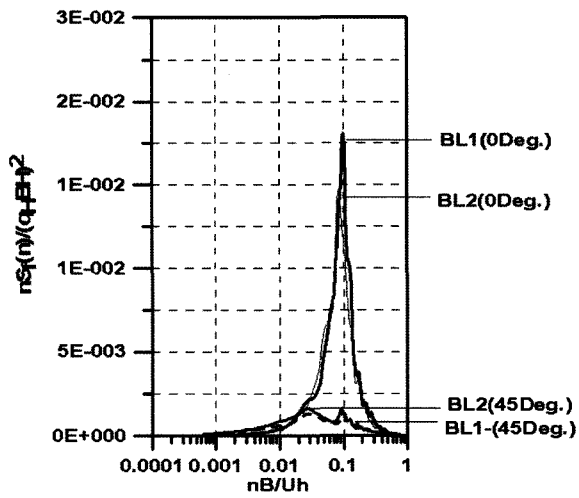
변위응답을 구하기전에 각실험 TYPE별 풍력스펙트럼을 구하였다. 실험결과분석은 풍향각 0도를 기준으로 하여 조도구분별 특성에 대해서 알아보았다. <그림 4>는 기본모형(TYPE 1)에 대한 조도구분과 방향별 풍력스펙트럼을 나타내고 있다. 여기서 X는 평균류 방향을 Y는 풍직각 방향을 의미한다. 각 방향별 피크의 형상을 분석해 보면 평균류 방향의 경우는 광대역 피크가 나타나고 있으며, 풍직각 방향의 경우는 협



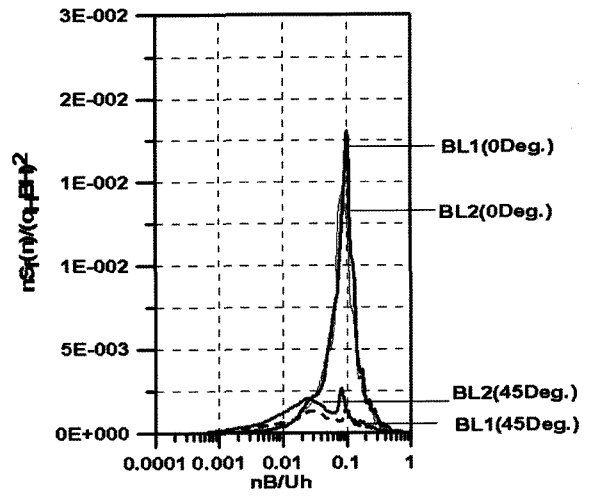
<그림 4> 조도구분과 방향별 풍력스펙트럼

대역 피크가 나타나고 있다. 그리고 풍직각 방향의 풍력스펙트럼이 매우 크게 나타나며, 특히 풍직각 방향의 피크의 위치는 스트라울 수 0.1부근에서 나타나고 있다. 조도구분별 특징에서는 평균류 방향의 경우는 BL2(도심지역)이 BL1(교외지역)보다 크게 나타나고 있지만 풍직각 방향의 경우는 BL1(교외지역)이 BL2(도심지역)보다 큰 풍력스펙트럼이 나타나고 있다. 풍직각 방향의 경우 측면모서리에서 박리하는 와류(vortex)가 난류성분이 많이 발생하는 도심지역(BL2)보다는 난류성분이 적은 교외지역(BL1)에서 주기적인 특성을 가지고 있기 때문에 교외지역의 풍직각 방향의 풍력스펙트럼이 크게 나타나고 있는 것이다.

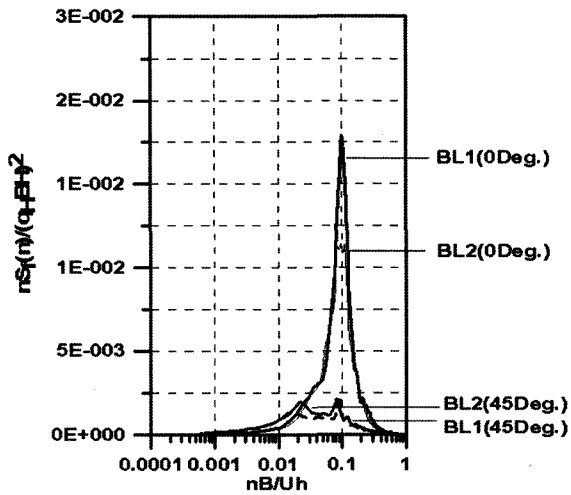
<그림 5>는 각 TYPE별 풍직각 방향의 풍력스펙트럼을 조도구분과 같이 나타내고 있다. 건물의 테이퍼 특징과 풍향각에 따른 풍직각 방향의 풍력스펙트럼 변화 및 특징을 중심으로 해석을 하고자 한다. 실험 TYPE별 풍력스펙트럼에서는 풍향각 0도가 풍향각 45도 보다 큰 풍력스펙트럼 결과를 보이고 있다. 풍향각 0도에서는 실험 TYPE별 피크의 크기가 TYPE 5>TYPE 4>TYPE 1=TYPE 2=TYPE 3>TYPE 6의 순서로 나타나고 있다. 풍향각 0도의 경우는 테이퍼율 5%까지는 큰 변화가 없다가 TYPE 4(테이퍼율 7.5%)부터 증가를 하다가 TYPE 5(테이퍼율 10%)까지 TYPE 1을 기준으로 하여 최대피크의 크기가 12%까지 증가를 하였다. TYPE 6(테이퍼율 15%)에서는 TYPE 1을 중심으로 하여 최대피크의 크기가 57%의



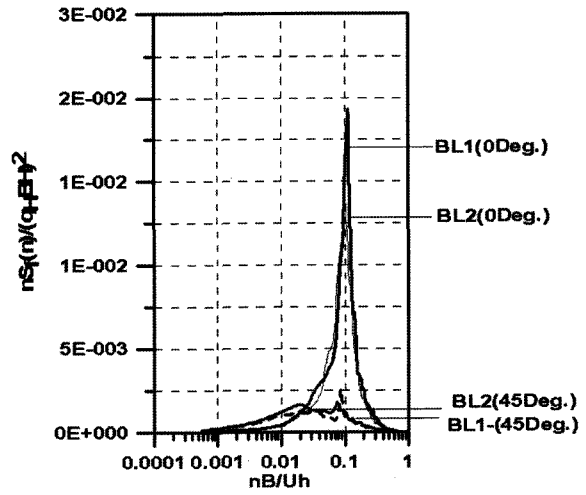
(a) TYPE 1(테이퍼율 0%)



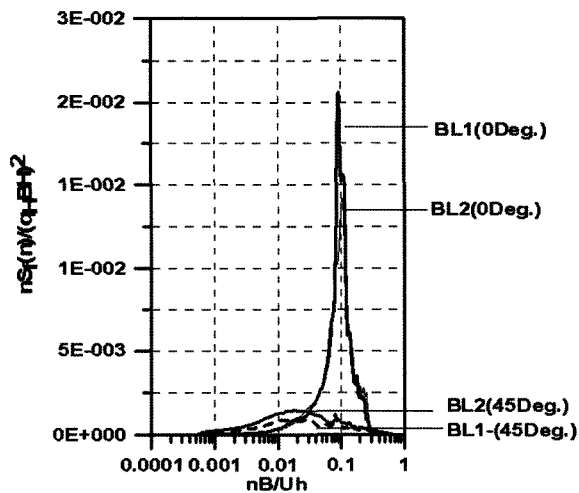
(b) TYPE 2(테이퍼율 2.5%)



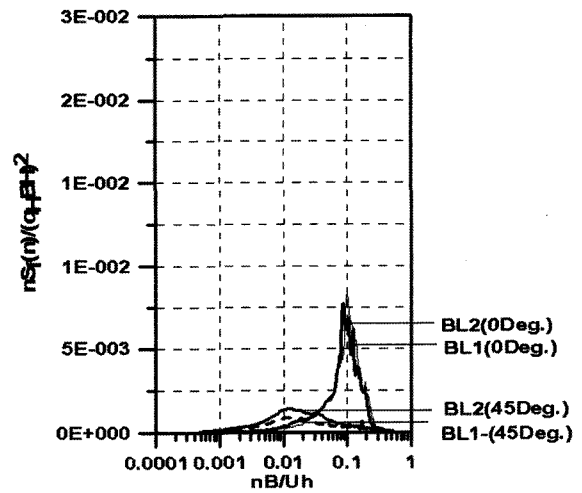
(c) TYPE 3(테이퍼율 5%)



(d) TYPE 4(테이퍼율 7.5%)



(e) TYPE 5(테이퍼율 10%)



(f) TYPE 6(테이퍼율 15%)

〈그림 5〉 테이퍼율에 따른 풍직각 방향의 풍력스펙트럼

<표 2> 해석건물의 동적특성

Model	TYPE1	TYPE2	TYPE3
Natural Frequency(Hz)	0.3	0.3130	0.3283
Dimension(m) (bottom×top×height)	40×40×160	40×36×160	40×32×160
Generalized Mass(kg)	1638400	1474600	1351700
B(m)	40	38	36
Model	TYPE4	TYPE5	TYPE6
Natural Frequency(Hz)	0.3464	0.3683	0.4274
Dimension(m) (bottom×top×height)	40×28×160	40×24×160	40×16×160
Generalized Mass(kg)	1187800	1070421	851968
B(m)	34	32	28
Building Density	192 kgf/m ³		
Damping Ratio	0.01		

감소효과를 보이고 있다. 풍향각 45도의 경우는 피크의 크기가 풍향각 0도와 비교하여 최대 90%이상 감소를 하지만 TYPE 형태별의 피크 크기의 차이가 크게 나타나고 있지는 않았다.

3.2. 변위응답

변위응답을 구하기 위한 고층건물의 동적특성은 <표 2>와 같다. TYPE별 고유진동수는 수치해석결과를 이용하여 구하였다. 건물의 동적특성에서 감쇠율은 1%로 가정 하였다.

일반화 변위에 관한 다음의 운동방정식이 얻어진다.

$$M_1 \ddot{x}_1(t) + C_1 \dot{x}_1(t) + K_1 x_1(t) = F_1(t) \quad (1)$$

여기서

$M_1 = \int_0^H m(z) \mu_1(z)^2 dz$: 1차 모우드의 일반화 질량

C_1 : 1차 모우드의 일반화 감쇠

$K_1 = (2\pi n_0)^2 M_1$: 1차 모우드의 일반화 강성

$F_1 = \int_0^H f(z,t) \mu_1(z) dz$: 1차 모우드의 일반화 외력

n_0 : 1차 고유 진동수

이러한 경우, 운동방정식은 1질점계와 동일한 형태로서 일반화 변위의 파워스펙트럼을 식(2)와 같이 일반화 외력의 파워스펙트럼과 역학적 Admittance의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$S_{x1}(n) = |H_1(n)|^2 \cdot S_{f1}(n) \quad (2)$$

여기서

$S_{f1}(n)$: 일반화 변위의 파워스펙트럼

$$|H_1(n)|^2 = \frac{1}{K_1^2 [\{1 - (n/n_0)^2\}^2 + 4\zeta^2 \cdot (n/n_0)^2]}$$

: 역학적 Admittance

n_0, ζ_1 : 1차의 고유진동수, 1차의 감쇠정수

$S_{f1}(n)$: 1차 모우드의 일반화 외력의 파워스펙트럼

여기서 일반화 외력의 파워스펙트럼 $S_{f1}(n)$ 은 전도모멘트의 스펙트럼 $S_M(n)$ 을 이용해서 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{f1}(n) = \frac{1}{H^2} S_M(n) \quad (3)$$

기본모드에 대한 일반화변위의 분산은 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \left[(1/H)^2 \cdot \int_0^\infty |x_1(n)|^2 S_{f1}(n) dn \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{1}{\{(2\pi n_0)^2 M_1\}^2} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\{1 - (n/n_0)^2\}^2 + 4\eta^2 (n/n_0)^2} \right. \\ &\quad \left. \times \frac{S_M(n)}{H^2} dn \right]^{1/2} \quad (4) \end{aligned}$$

한편 감쇠정수가 작은 경우, 일반화 변위의 스펙트럼은 고유진동수 부근에서 예리한 피크를 가진 형태가 되므로 상기의 응답변위의 표준편차의 적분은 고유진동수 부근의 공진부분(A_R)과 비공진부분(A_B)으로 구분하여 근사적으로 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (A_B + A_R)^{1/2} \\ &= \left[\frac{\sigma_M^2}{\{(2\pi n_0)^2 M_1\}^2} + \frac{\pi n_0 \cdot S_M(n_0)}{4\eta_1 \cdot \{(2\pi n_0)^2 M_1\}^2 \cdot H^2} \right]^{1/2} \\ &= \frac{\sigma_M}{(2\pi n_0)^2 M_1 \cdot H} \left(1 + \frac{\pi}{4\eta_1} \cdot \frac{n_0 S_M(n_0)}{\sigma_M^2} \right)^{1/2} \quad (5) \end{aligned}$$

여기서 σ_M : 전도 모멘트의 표준편차

변동변위의 피크값(최대진폭)과 분산의 평방근(표준편차)의 비 (peak factor : g_x)는 변동풍력을 정규정상 확률과정으로 가정해서 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

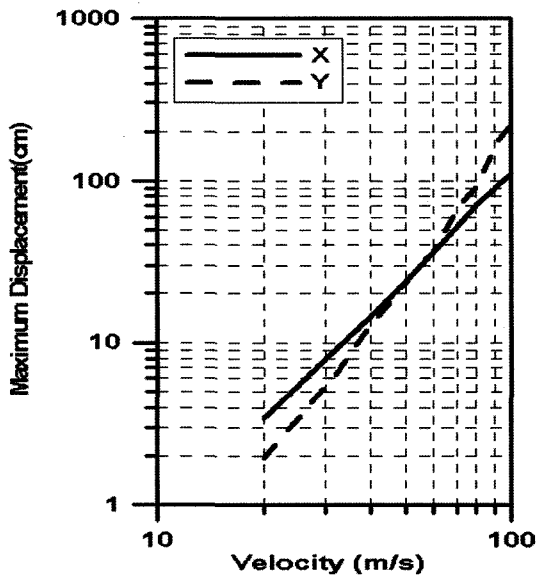
$$g_x = \sqrt{2 \ln(v_x T) + 0.577} / \sqrt{2 \ln(v_x T)} \quad (6)$$

여기서 T는 평가시간으로서 통상 600초(10분)을 사용한다.

구조물의 최대순간변위는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

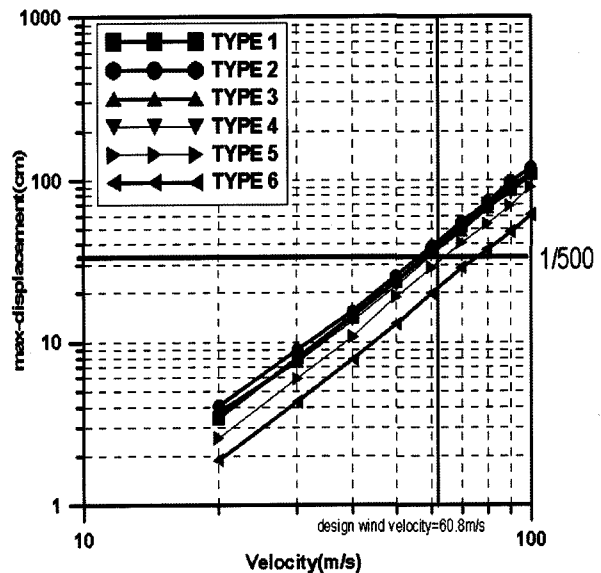
$$X_{max} = \bar{X} + g \cdot \sigma \quad (7)$$

<그림 6>은 기본모형(TYPE 1)에 대한 각방향별 최대변위를 나타내고 있다. 고유진동수가 0.3Hz이며 감쇠율이 1%인 기본모형(TYPE 1)에 대한 풍속 20m/s-100m/s범위 안에서의 최대 변위값의 분포에서 50m/s까지는 평균류 방향(X방향)의 최대변위 응답이 크게 나타나지만 풍속 50m/s 이상부터는 풍직각 방향(Y방향)의 최대변위 응답이 크게 나타나고 있다. 실제 고층건물설계풍속은 50m/s 이상이므로 풍직각 방향의 최대변위 응답에 대한 평가가 매우 중요하다. <그림 7>은 풍향각 0도에서의 조도구분 변화와 풍속변화에 따른 방향별 최대변위 응답을 나타내고 있다. 조도구분별 설계풍속에서 교외지역(BL1)의

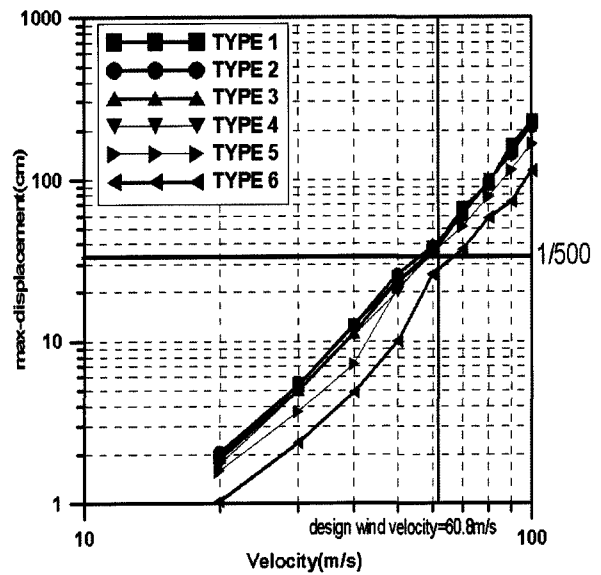


<그림 6> TYPE1(기본모형)에 대한 각 방향별 최대변위

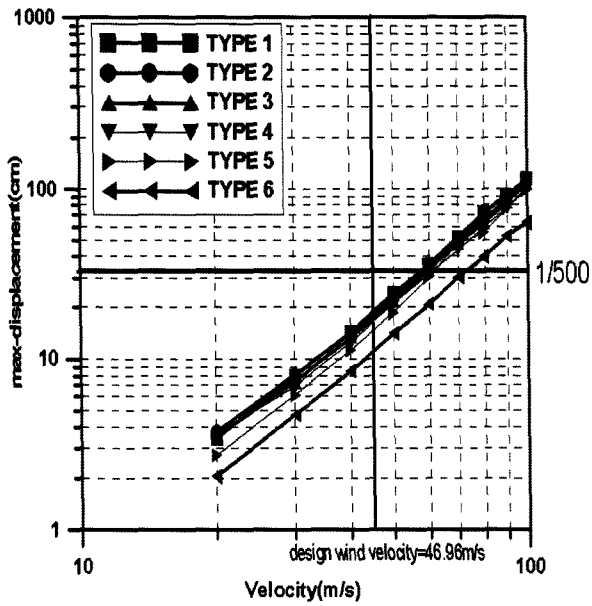
경우는 60.8m/s, 도심지역(BL2)은 46.96m/s로 하였다. 고층건물의 횡하중에 대한 최대허용범위의 1/300-1/600 범위 안에 들도록 하고 있다. 본 논문에서는 최대허용변위를 1/500로 하였다. 조도구분별 설계풍속의 이상에서는 풍직각 방향의 최대 변위가 평균류 방향의 최대변위보다 크게 나타나고 있다. 형태별 변화에 따른 변위응답의 감소효과는 TYPE 6 > TYPE 5 > TYPE 4 = TYPE 3 = TYPE 2 = TYPE 1 순으로 테이퍼율이 가장 큰 TYPE 6 이 가장 큰 변위응답의 감소효과가 있었다. 그리고 TYPE 1-TYPE 3의 경우는 거의 모든 풍속범위 내에서 차이가 없이 일정하게



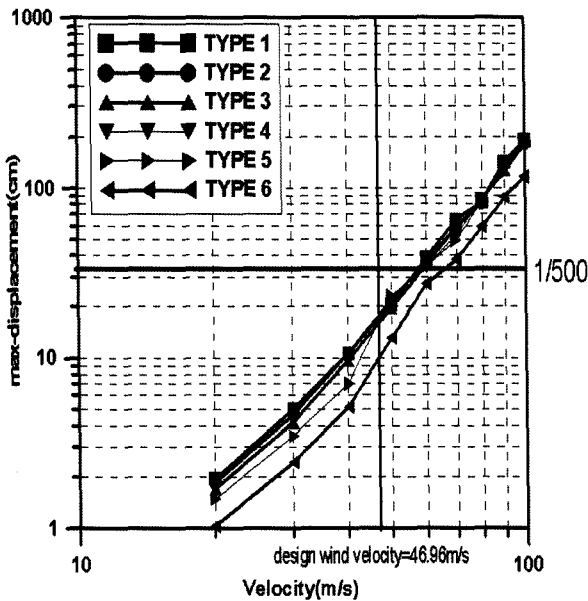
(a) BL1-평균류방향(X)



(b) BL1 -풍직각방향(Y)



(c) BL2-평균류방향(X)



(d) BL2-풍직각방향(Y)

(그림 7) 테이퍼률에 따른 각 방향별 변위응답(풍향각0도)

분포를 하고 있다. 교외지역의 평균류 방향의 경우는 TYPE 5(테이퍼율 10%이상)와 TYPE 6(테이퍼율 15%)이상만 최대변위기준(1/500)을 만족하고 다른 형태의 경우는 기준을 통과 하지 못하고 있다. 교외 지역의 풍직각 방향의 경우는 TYPE 6(테이퍼율 15%)만 최대 허용기준을 만족하고 있었다. 도심지역의 경우는 평균류 방향과 풍직각 방향 모두 최대변

위 허용기준을 모두 만족하고 있었다.

4. 결 론

풍하중을 받는 테이퍼 고층건물의 변위응답해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

고층건물의 테이퍼율에 따른 풍력스펙트럼 해석 결과에서는 테이퍼율 2.5-5%까지는 피크의 크기 및 형태의 변화가 크게 나타나고 있지 않다가 테이퍼율 7.5-10%범위에서 피크의 크기가 증가를 하고 있었다. 테이퍼율 15%에선 피크의 크기가 60%이상 감소하는 효과를 나타내고 있다. 최대 변위응답의 감소효과는 풍향각 0도에서 가장 크게 나타나고 있었다. 테이퍼율 15%에서 가장 큰 감소효과를 보이고 있었다. 테이퍼율 2.5%-7.5%까지는 변위응답의 감소효과는 크게 나타나고 있지 않았다. 조도구분별 효과에서는 난류강도가 적은 BL1(교외지역)에서 더 효과적인 변위응답감소를 보이고 있다.

감사의 글

이 논문은 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술 연구센터 지원에 의해 이루어졌습니다

참고문헌

1. A. Kareem. *Mitigation of wind Induced motion of tall building*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol.11, pp. 273~284, 1983
2. A. Kareem, T. Kijewski, *Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications*, Wind and Structures, Vol.2, No.3 pp.201~251, 1999
3. A. Kareem, *Fluctuating wind loads on buildings*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.108, EM6 pp.1086~1102, 1982
4. A. Kareem, *Acrosswind response of buildings*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, ST4, pp.869~887, 1982

5. B.J. Vickery, N. Isyumov, A.G. Davenport, *The role of damping, mass and stiffness in the reduction of wind effects on structures.*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol.11 pp. 285~294, 1983
6. N. Isyumov, R. Dutton, A.G. Davenport., *Aerodynamic methods for mitigating wind-induced building motions structural design, analyze and testing*, ASCE. pp.462~470, 1989
7. P.V. Banavalkar, *Structural systems to improve wind induced dynamic performance of high rise building*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 36 pp.213~224, 1990
8. Y. Tamura, *Application of damping devices to suppress wind-induced response of buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.74~76, pp.49~72, 1998
9. K.C.S. Kwok, P.A. Bailey, *Aerodynamic devices for tall building and structures*, Journal. of Engineering Mechanics, ASCE ,Vol.103, No.3 349~365 ,1987
10. K.C.S. Kwok , *Effect of Building Shape on Wind-Induced Response of Tall Building*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.28, pp.381~390, 1988
11. Y.M. Kim, H. Kawai, *Aerodynamic methods for reducing bending and torsional vibrations of tall building*, Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen, Denmark p.p673~677, 1999
12. Tanagi Yugo et al. *Experimental study on wind response of tapered tall buildings Part1, Force measurement*, Proceedings of AIJ,, p.p.33~34 (In Japanese), 1999
13. Nakayama M. Tanaka H, Tanaka K, Yamamoto K, Sasaki Y, Tamagi Y and Hirasama M, *An Aeroelastic study on a super-tall building with tapered section(In Japanese)*, Proceedings. 11th National Symposium on Wind Engineering. pp.249~254. Tokyo, Dec. 1992
14. Daniel Schiff, *Dynamic analysis and failure modes of simple structures*, John Wiley & Sons., pp.705~725, 1990
15. 김영문 역 「실무자를 위한 건축물 풍동실험 가이드북」, 한국풍공학회, 1998
16. 김영문 외 2인 역, 「건축물의 내풍설계」, 한림원, 2002