

초고층 건물의 사용성 평가

송 화 철*

Evaluation of Serviceability for Tall Building Structures

Song, Hwa Cheol*

Abstract

The structural systems for tall buildings are more often controlled by the need to restrict response to wind action at serviceability levels than the need to provide resistance at ultimate limit-state conditions.

This paper presents a comparative study of current methods for the calculation of along-wind and cross-wind response of tall buildings. The methods used in the analysis are based on the National Building Code of Canada, Australian Code, Japanese Code and procedures devised by Solari, Saunders & Melbourne.

In this paper, two 100-story tall buildings of different lateral resisting structural systems are analyzed and the along-wind and cross-wind acceleration responses are evaluated. Comparison with different methods shows discrepancies of results, and especially along-wind responses are underestimated or overestimated.

1. 서 론

초고층 건물의 설계시에는 하중조건에 따라 구조물이 붕괴되지 않도록 안전성을 확보하는 것 뿐만 아니라 태풍이나 계절풍 등 강풍으로 인한 건물의 진동에 따라 거주자가 불편감을 느끼지 않도록 한다는 사용성능도 중요하다. 초고층 건물의 경우 횡변위 조건은 만족하더라도 진동에 의해 사용자가 두통이나 어지러움을 느끼는 사용성 문제가 대두되고 있다. 따라서 초고층 건물을 설계할 때에는 건설예정지에 산정되는 바람에 대해서 건물의 용도에 따른 거주성능을 만족하도록 검토해야 한다.

초고층 건물의 풍하중에 대한 응답은 풍방향 가속도응답 뿐만 아니라 풍직각방향 가속도응답도 크게 나타나기 때문에 2 방향에 대한 응답을 구하여 평가하여야 한다. 국내에는 풍응답평가기법이

* 한국해양대학교 건축학부 전임강사

(1) Solari Method

Solari의 간편계산법에 의한 최대가속도 산정방법은 다음과 같다.

1. 밀면길이(D), 밀면가로길이(B), 건물높이(H)중 최소값을 Δ 로 정한다.
2. 건물의 단위길이당 질량 m(z)와 공기밀도 ρ를 계산한다.
3. 모드 질량 M₁ = m/3을 계산한다.
4. 건물의 고유주기와 감쇠비를 결정한다.
5. 풍상면 풍압계수 C1과 풍하면 풍압계수 C2를 결정하여 건물의 풍력계수 Cd(=C1+C2)를 구한다.
6. 지면조도계수 z₀를 정한다.
7. fastest 10분 풍속 V₁₀을 구한다. 풍속이 10분 평균속도보다 작을 경우에는 10분 평균으로 치환한다.
8. 마찰속도 V*를 다음 식 (2)에 의해 구한다.

$$V(z) = \frac{1}{\kappa} V_* \ln \frac{z}{z_0} \dots\dots\dots (2)$$

표 2 Solari법에 이용되는 계수치

$F_1 = 2(\ln \frac{H}{z_0}) - 1$ $F_2 = \frac{n_1 H}{V_* F_1}$ $F_3 = 0.78 F_1^2$ $F_4 = \frac{6.71 F_1^2}{1 + 0.26(B/H)}$ $F_5 = 12.32 \frac{F_2 \Delta}{H}$ $F_6 = 3.55 F_2$ $F_7 = \frac{1}{F_5} - \frac{1}{2 F_5^2} [1 - \exp(-2 F_5)]$ $F_8 = \frac{1}{F_6} - \frac{1}{2 F_6^2} [1 - \exp(-2 F_6)]$ $F_9 = C_1^2 + 2 C_1 C_2 F_7 + C_2^2$ $F_{10} = \frac{0.59 F_1^2 F_2^{-2/3} F_8 F_9}{\zeta C_D^2 [1 + 3.95 (F_2 B/H)]}$	$\bar{X} = \frac{C_D B H q_* F_3}{M_1 (2\pi n_1)^2}$ $X_{rms} = \bar{X} \left(\frac{\sqrt{F_4 + F_{10}}}{F_3} \right)$ $R = n_1 \sqrt{\frac{F_{10}}{F_4 + F_{10}}}$ $g = \sqrt{1.175 + 2 \ln(RT)} \quad (T=600)$ $G = 1 + g \frac{X_{rms}}{\bar{X}}$ $\hat{X} = G \bar{X}$ $\hat{X}_{rms} = \frac{C_D B H q_*}{M_1} \sqrt{F_{10}}$ $g_a = \sqrt{1.175 + 2 \ln(n_1 T)} \quad (T=600)$ $\hat{X} = g_a \hat{X}_{rms}$
--	---

여기서 V(z)는 10분 평균풍속이며, κ는 Karman 계수로서 근사적으로 0.4이며 z는 10m이다. 마찰속도를 구한후 풍압력 q = ρV*²/2을 구한다.

9. 표 2 에 의하여 F1-F10 계수값을 구한후 건물최상층에서의 평균진동(\bar{X})과 평균제곱근(rms) 진동(X_{rms})을 구하며, R(주응답주파수), 최대계수(g), 가스트계수(G), 최대진동(\hat{X}), 평균제곱근가속도(\ddot{X}_{rms}), 최대가속도계수(g_a), 최대가속도(\hat{X}) 등을 차례로 구한다.

(2) NBCC90(캐나다규준)

Davenport의 연구에 근거한 캐나다 규준인 NBCC90에 의한 풍방향 최대가속도는 다음과 같이 계산된다. NBCC 매개변수는 대부분 그래프에 의해서 결정된다.

1. 건물의 높이와 위치에 따른 조도계수(roughness factor) r 을 그래프를 이용하여 구한다.
2. 건물 높이와 형상계수(W/H)에 따라 비공진난류계수(background turbulence factor) B 를 그래프를 이용하여 구한다.
3. 감소주파수(Reduced frequency) $n_0 \frac{H}{V_H}$ 에 따른 규모감소계수(size reduction factor) S 와 역진폭(Inverse wavelength) n_0/V_H 에 따른 가스트 에너지비(gust energy ratio) F 를 구한다.
4. 공진난류계수(Resonant turbulence factor)를 계산한다. $R=S \cdot F/\beta$
5. 평균변동율(average fluctuation rate) $v = \frac{n_0}{\sqrt{1+B/R}}$ 을 구하고 이 값에 따라 최대계수(peak factor) g_p 를 그래프를 이용하여 구한다.
6. 가스트계수는 $G = 1 + g_p r \sqrt{B+R}$ 을 이용하여 구하며 최대 가속도는 식 (3)에 의해 구해진다.

$$a_D = 4\pi^2 \cdot n_0^2 \cdot g_p r \sqrt{R} \left(\frac{\Delta}{G} \right) \dots\dots\dots (3)$$

여기서, Δ 는 풍하중에 의한 최대 최상층변위를 나타낸다.

(3) 일본 건축물하중지침

일본 건축물하중지침에 의한 최대가속도는 다음 식 (4)에 의해 구해진다.

$$\ddot{x}_{max} = g_a \sigma_{x'} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, $g_a = \sqrt{2 \ln(600n_0) + 1.2}$ (최대변위계수)

$$\sigma_{x'} = \frac{X_{max}}{G_f} (2\pi n_0)^2 r_f \sqrt{R_f} \text{ (가속도표준평균치)}$$

이며, 가스트계수는 산정법 II에 의해 다음 식 (5)와 같다.

$$G_f = 1 + g_f r_f \sqrt{B_f + R_f} \dots\dots\dots (5)$$

위식에서 사용되는 계수치는 표 3에 나타내었다.

표 3 최대가속도 계산을 위한 계수(일본 건축물하중지침)

난류강도 $I_H = 0.1 \left(\frac{H}{Z_G}\right)^{-\alpha-0.05}$,	풍속변동계수 $r_f = \frac{3+3\alpha}{2+\alpha} I_H$
난류스케일 $L_H = 100 \left(\frac{H}{30}\right)^{0.5}$,	풍력스펙트럼계수 $F = \frac{4(n_0 L_H / U_H)}{[1 + 71(n_0 L_H / U_H)^2]^{5/6}}$
규모계수 $S_f = \frac{0.84}{(1 + 2.1(n_0 H / U_H)) (1 + 2.1(n_0 B / U_H))}$	
비공진계수 $B_f = 1 - \frac{1}{[1 + 5.1(L_H / \sqrt{HB})^{1.3} (B/H)^{0.33}]^{1/3}}$	
공진계수 $R_f = \frac{\pi}{4\eta_f} S_f F$,	최대계수 $g_f = \sqrt{2 \ln(600v_f)} + 1.2$
레벨상관계수 $v_f = n_0 \sqrt{\frac{R_f}{B_f + R_f}}$ (Hz)	

H : 기준높이(m), Z_G : 기준경도풍고도(m), α : 풍속의 고도분포지수, n_0 : 고유주파수(Hz),
 U_H : 설계풍속(m/s), B : 건물폭(m), η_f : 감쇠정수, X_{max} : 최대변위

3.2 풍직각방향(Cross-Wind) 가속도 응답

고층건물의 풍직각방향 진동은 와류(vortex shedding)에 의해 발생한다. 와류현상의 경우, 풍속이 작을때는 건물측면에서 동시에 바람이 작용하여 풍직각방향 진동이 발생하지 않지만 고층건물의 상층부에서처럼 풍속이 클때는 바람이 좌우로 순차적으로 작용하여 진동을 유발하게 된다. 와류에 의해 발생하는 풍직각방향 진동 주파수는 다음 식 (6)과 같다.

$$f = \frac{V \times S}{D} \dots\dots\dots (6)$$

- V = 건물최상층에서 평균풍속(m/sec)
- S = Strouhal number에 의한 매개변수(장방형: 0.15, 실린더형: 0.2)
- D = 건물폭(m)

이 주파수가 건물주파수와 근사하게 되면 공진이 일어나며 설계시 고려된 변위를 초과하는 과도한 변위가 발생하게 된다. 또한 일단 공진이 발생하면 풍속이 어느정도 증가하여도 와류 주파수는 변하지 않으며 공진상태가 지속되는 록인(lock-in) 현상이 일어난다.

정확한 풍직각방향응답을 산정하기 위해서는 탄성모델에 의한 풍동실험을 수행해야 하며 근사해석법으로는 Saunders & Melbourne 또는 Vickery 등의 제안식이 이용된다. 다음에는 풍직각가속도응답을 구하기 위한 3가지 계산법(Saunders & Melbourne, NBCC90, SAA83)에 대하여 설명한다.

(1) Saunders & Melbourne Method

먼저, 풍직각변위 스펙트럼을 이용하여 풍하중스펙트럼은 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_F(n) = \frac{(2\pi n_0)^4 m^2 S_y(n)}{H^2(n)} \dots\dots\dots (7)$$

여기서, $S_y(n)$ = 건물최상부에서 풍직각방향의 변위에 대한 스펙트럼

n_0 = 일차모드의 주파수

m = 모드 질량

$H^2(n)$ = 전달함수 = $1/\{[1 - (n/n_0)^2]^2 + 4\zeta(n/n_0)^2\}$

ζ = 임계감쇠비

변위의 표준편차는 $\sigma_y = \left| \frac{m_0 S_F(n)}{(2m_0)^4 m^2 4\zeta} \right|^{1/2}$ 으로 나타내며 가속도 표준편차는 $\sigma_{\dot{y}} = \sigma_y (2\pi n_0)^2$ 이 된다. 풍하중스펙트럼을 무차원화하여 나타내면 식 (8)에서와 같다.

$$C_{FS} = \frac{n_0 S_F(n)}{(1/2 \rho \bar{V}_h^2 b h)^2} \dots\dots\dots (8)$$

여기서, h = 건물높이, b = 풍직각방향의 건물폭, \bar{V}_h = 건물최상부 평균풍속, ρ = 공기밀도 이고, 위의 계수를 포함하여 가속도의 표준편차를 나타내면 다음 식 (9)와 같다.

$$\sigma_{\dot{y}} = \frac{\rho \bar{V}_h^2 b h}{4m} \sqrt{\frac{\pi C_{FS}}{\zeta}} \dots\dots\dots (9)$$

위 식의 m 은 선형모드의 경우, $m = \frac{1}{3} \rho_s b d h$ (ρ_s : 건물밀도, d : 건물폭)이다.

위의 식들을 정리하여 건물최상부의 최대가속도는 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y} = \frac{3}{4} \frac{g \rho \bar{V}_h^2}{\rho_s d} \sqrt{\frac{\pi C_{FS}}{\zeta}} \dots\dots\dots (10)$$

비선형모드를 고려하기 위하여 최대가속도에 Holmes(1987)의 모드형상보정계수 (0.76+0.24k)를 곱한다. k 는 모드형상지수로 선형모드 1.0, 캔틸레버모드 1.5를 적용하며 튜브구조의 경우 2.0을 사용한다.

(2) NBCC90(캐나다 기준)

풍동실험을 근거로 한 NBCC의 기준에 의하면 건물 최상층의 최대가속도는 다음 식 (11)에 의해 계산된다.

$$\text{최대가속도 } a_w = n_0^2 g_p [WD]^{1/2} \left(\frac{a_r}{\rho * 9.81 \sqrt{\beta}} \right) \dots\dots\dots (11)$$

여기서, $a_r = 78.5 * 10^{-3} (V_H/n_0 \sqrt{WD})^{3.3}$

n_0 = 고유주파수, g_p = 최대계수, W = 건물폭, D = 건물층, ρ = 평균건물밀도(kg/m³)

β = 감쇠비, V_H = 건물최상층 평균풍속

(3) SAA83(호주 기준)

호주기준에서는 풍직각 가속도응답을 구하기 위한 약산식을 제안하고 있다. 먼저 평균제곱근 변위응답은 다음 식 (12)에 의해 결정된다.

$$Y_{rms} = 0.00015 \frac{\rho}{\rho_b} \sqrt{\frac{A}{\zeta_1}} \left(\frac{V_H}{n_1 \sqrt{A}} \right)^{3.5} \dots\dots\dots (12)$$

여기서, ρ = 공기밀도, ρ_b = 건물밀도, A = 건물의 단면적, ζ_1 = 감쇠비, V_H = 최상층 1시간 평균풍속, n_1 = 풍직각방향의 건물고유주파수를 각각 나타낸다.

그리고 평균제곱근 가속도응답은 $\ddot{Y}_{rms} = (2\pi n_1)^2 Y_{rms}$ 이며, 최종적으로 최대가속도는 근사적으로 평균제곱근 가속도응답의 4배로 다음 식 (13)에서 구한다.

$$\hat{Y}_{rms} = 4 \ddot{Y}_{rms} \dots\dots\dots (13)$$

4. 적용 예

4.1 적용 초고층건물 개요

본 연구에서의 적용 초고층 건물은 100층 규모이며 건물의 위치는 서울근교의 도시계획구역내로 가정하였으며, 건물의 용도는 사무실건물로 하였다. 기준층의 층고는 3.85m이며 25층, 50층, 80층, 100층에 위치한 기계층의 층고는 4.5m로, 최하층 3개층은 5m로 건물의 전체높이는 391.05m이다. 2가지 모델의 구조시스템의 특징은 다음과 같다.

(1) 모델 A

모델건물 A는 풍하중의 영향을 최소화하기 위하여 3가지 기본 평면을 45° 회전시켰으며 상부로 갈수록 셋백(set-back)되는 형상을 가진다(그림 2). 중앙부 철근콘트리트 전단벽과 외

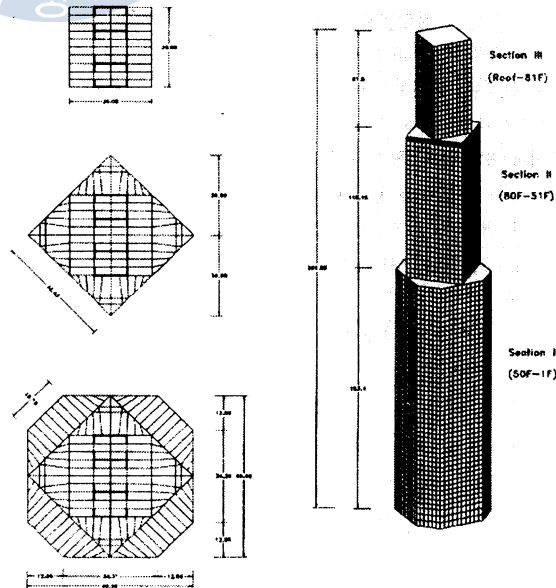


그림 2 모델 A 초고층건물 평면 및 아이소메트릭

부 철골 튜브구조가 횡력을 지지하는 Tube in Tube 구조시스템이다. 80-81층에는 아웃리거 및 벨트트러스로 보강하여 횡변위를 최소화하였다. 건물의 최대평면치수는 60m×60m로서 세장비는 6.5이다.

(2) 모델 B

모델건물 B는 네 개의 모듈화된 팔각형 튜브를 중앙부 코어를 중심으로 결합한 Bundled Tube 구조시스템이다(그림 3). 모듈화된 철골 튜브의 기둥간격은 3.5m이며 내부에는 철근콘크리트조의 코어가 배치되어 횡력을 지지한다. 건물의 최대평면치수는 63m×63m로서 세장비는 6.2이며, 대각선방향으로는 74m이다.

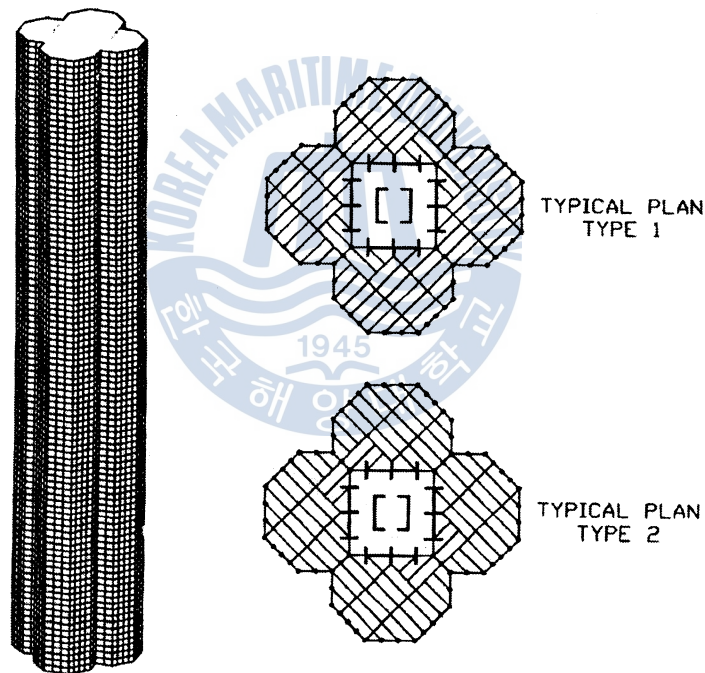


그림 3 모델 B 초고층건물의 평면 및 아이소메트릭

적용 초고층 건물에 작용하는 풍하중은 ANSI/ASCE 7-88 기준에 준하여 산정하였으며 모델 A와 B의 최대횡변위는 각각 0.98m(H/399), 1.33m(H/349)이다. 횡변위에 대한 기준치는 정해져 있지 않으며 캐나다 기준에서는 H/250-H/1000을 권장하고 있다. 최근에는 초고층 철골건물의 경우, 횡변위를 일반적으로 H/500 이내로 설계하고 있으며, 이를 적용하게 되면 모델건물의 변위가 과도하기 때문에 횡변위를 제어하기 위하여 횡강성을 증가시켜야 한다.

4.2 적용 매개변수

설계풍속은 기상청자료에 의한 100년 재현주기 서울지역의 최대평균풍속을 25m/sec로 정하고 사용성평가를 위해서는 10년 재현주기로 치환하여야 한다. 일본 건축물하중지침에 의한 약산식을 이용하여 r년 재현기대치 풍속 $U(r)$ 은 100년 재현기대치 풍속 $U(100)$ 에 재현기간 환산계수 $R(0.54 + 0.1 \ln(r))$ 을 곱하여 구한다. 따라서, 10년 재현주기 설계풍속은 19.25m/sec이며, 최상층 풍속은 고도에 따른 풍속 산정식에 적용하여 계산하면 31m/sec이 산정된다.

모델건물 A, B의 풍가속도응답을 구하기 위한 적용매개변수인 건물형상, 고유주파수, 최대변위값, 건물밀도, 공기밀도, 감쇠비는 표 4에 나타내었다.

표 4 가속도응답계산을 위한 매개변수

모델명	건물형상	고유주파수 (고유주기)	최대변위값	건물밀도	공기밀도	감쇠비
A	H=391.05m, B=D=60m	$n_0 = 0.1517\text{Hz}$ (T=6.593초)	$\Delta = 0.98\text{m}$	161 kg/m^3	1.25 kg/m^3	0.01(1%)
B	H=391.05m, B=D=74m	$n_0 = 0.1065\text{Hz}$ (T=9.386초)	$\Delta = 1.13\text{m}$	189 kg/m^3	1.25 kg/m^3	0.01(1%)

4.3 가속도 응답

모델 A, B에 대한 가속도응답 계산값은 표 5에 나타나 있다.

먼저, 풍방향가속도응답에 대한 3가지 계산결과는 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 표 6의 매개변수 계산결과를 보면 NBCC90에 의한 최대가속도계수값이 다른 두가지 계산법에 비하여 크며 이로 인하여 가속도응답이 큰 결과값을 가진다.

표 5 풍가속도응답 결과값 및 가속도기준

	계산방법	모델 A (mg)	모델 B (mg)
풍방향 가속도응답 (mg)	Solari	8.25	7.20
	NBCC90	37.28	26.12
	일본기준	23.36	16.08
풍직각방향 가속도응답 (mg) 가속도기준 (mg)	Saunders & Melbourne	13.49	10.00
	NBCC90	14.49	11.74
	SAA83	18.50	15.87
	Melbroune	19.3	21.4
	설계가속도	27.0	27.0

표 6 매개변수(최대가속도계수 및 평균제곱근) 계산결과

모델	매개변수	풍방향 가속도응답 계산법			풍직각방향 가속도응답 계산법		
		Solari	NBCC90	일본규준	Saunders & Melbourne	NBCC90	SAA83
모델 A	최대가속도 계수	3.19	3.7	3.2	3.0	3.7	4.0
	평균제곱근	0.0259	0.0872	0.0730	0.0497	0.0392	0.0462
모델 B	최대가속도 계수	3.08	3.6	3.08	2.88	3.6	4.0
	평균제곱근	0.0234	0.0726	0.0521	0.0347	0.0326	0.0397

한편 Solari법의 경우에는 평균제곱근값이 다른 두가지 계산법의 결과에 비하여 현저히 작음을 알 수 있다. Solari법은 중·고층의 경우에는 적용에 문제가 없지만 초고층건물처럼 최상부 풍속이 클 경우에는 과소평가되는 문제가 있다. 일본규준을 기준으로 하여 Solari법은 과소평가되고 반면 NBCC90에 의한 결과값은 과대평가되는 경향이 있기 때문에 가속도평가를 위하여 적용시에는 이와 같은 문제점을 충분히 고려하여야 한다.

풍직각방향가속도응답에 대한 3가지 계산결과(표 5)는 풍방향가속도응답의 결과보다는 계산값의 차이가 크지 않음을 알 수 있다. Saunders & Melbourne법의 가속도응답치와 NBCC90의 가속도응답치는 유사한 결과값을 나타낸다. SAA83의 경우 최대가속도응답 계산시 평균제곱근을 4배로 하며 이는 다른 계산법에서 적용되는 최대계수값보다 큰 값이므로 결과적으로 큰 가속도응답값을 나타낸다.

적용 모델의 사용성능을 평가하기 위한 가속도기준치의 경우, 표 5에서의 Melbourne에 의한 기준치는 모델 A와 모델 B가 각각 19.3mg, 21.4mg이며, 본 가상건물 설계시에는 비교적 큰 가속도응답을 허용하는 캐나다기준의 최대값인 27mg를 기준으로 하였다. 모델 A는 모델 B에 비하여 풍방향 및 풍직각방향 가속도응답 결과값이 모두 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 가속도응답값은 설계기준가속도 27mg보다 작은 값을 나타내어 사용성을 만족하는 것으로 평가할 수 있다. 하지만 모델 A의 NBCC90에 의한 풍방향 가속도응답값은 37.28mg로 기준치를 크게 상회하며 이는 앞서 언급하였듯이 과대평가된 결과이다.

5. 결론

본 논문에서는 가상의 100층 규모의 초고층건물에 적용하여 풍방향 및 풍직각방향에 대한 가속도응답을 기존의 여러 평가기법을 이용하여 구한 결과값을 상호비교하고, 평가기법의 특징을 고찰하였으며 적용 초고층건물 사용성능의 적합성을 기존의 평가기법을 이용하여 검토하였다.

초고층 예제 건물의 풍방향 및 풍직각방향 가속도응답 평가결과는 다음과 같다.

- 1) 풍방향가속도응답 계산법인 Solari법의 경우에는 중·고층의 경우에는 적용에 문제가 없지만 초고층건물처럼 최상부 풍속이 클 경우에는 평균제곱근값이 다른 계산법의 결과에 비하여 현저히 작기 때문에 과소평가되는 문제가 있다.
- 2) NBCC90에 의한 풍방향가속도응답은 과대평가되는데 이는 최대가속도계수값이 다른 계산법에 비하여 크기 때문인 것으로 사료된다. 국내의 고층건물 설계시 적용되는 캐나다 기준은 가속도응답치를 과대평가하기 때문에 이 값을 기준치에 만족하도록 할 경우 과도한 물량증가가 예상된다.
- 3) 풍직각방향 가속도응답의 3가지 계산법은 적용 예제의 경우 결과값의 차이가 크지 않으며 캐나다규준이 적용하기에 타당한 것으로 사료된다.
- 4) 본 연구에서 적용한 평가기법에 따라 최대가속도계수와 평균제곱근값의 차이가 나는 것은 적용한 풍속스펙트럼과 가정된 모드형상이 다르기 때문이며 이에 대한 향후 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] Chen, P.W. and Robertson, L.E., "Human Perception Thresholds of Horizontal Motion", J. Struct. Div. ASCE, Vol. 98, ST8, 1972
- [2] Council on Tall Buildings and Urban Habitat, "Structural Systems for Tall Buildings", McGraw-Hill Inc., 1995
- [3] Jesien, W., et. al, "Dynamic Along-Wind Response of Buildings: Comparative Study", J. Struct. Eng. ASCE, Vol. 119, No. 5, 1993
- [4] Hansen, R. J., Reed, J. W., and Vanmarcke, E. H., "Human Response to Wind-Induced Motion of Buildings", J. Struct. Div. ASCE, Vol. 99, ST7, 1973
- [5] Solari, G., "Alongwind Response Estimation: Closed Form Solution" J. Struct. Div. ASCE, Vol. 108, No. ST1, 1982
- [6] Liu, H., "Wind Engineering - A Book for Structural Engineers", Prentice-Hall, Inc., 1991
- [7] 송화철 외 4인, "초고층 건물의 해석 및 설계에 관한 연구", 연구보고서 DEP-007-96, 1996
- [8] National Building Code of Canada, "Part 4 Design Section 4.1", National Research Council of Canada, 1990