

재분배기법을 이용한 고층건물의 풍응답 가속도 조절 설계기법

Design Method to Control Wind-Induced Vibration of High-Rise Buildings Using Resizing Algorithm

서 지 현† 박 호 선*
Seo, Ji-Hyun Park, Hyo-Seon

요 지

건물의 높이와 세장비가 증가함에 따라 건물의 최대 횡변위와 풍응답 가속도와 같은 사용성 요구조건을 만족시키는 것이 고층건물 구조설계에 있어서 중요한 설계요소가 되고 있다. 풍응답 가속도는 거주자에게 불쾌함을 유발시키는 직접적인 원인이 되지만, 초기 구조 설계단계에서 구조 설계자가 풍응답을 조절할 수 있는 실용적인 방법은 개발되어 있지 못하다. 본 연구에서는 재분배기법을 이용하여 건물의 강성을 조절함으로써 고층건물의 풍응답 가속도를 조절할 수 있는 방법을 제안하였다. ASCE 7-02, NBCC 95, ISO 6897 등의 설계 코드 및 기준에 의하면 고층건물의 풍응답 가속도는 1차 고유주기에 반비례한다는 사실에 근거하여 본 연구에서는 물량을 재분배하여 건물의 1차 고유주기를 조절함으로써 풍응답 가속도를 조절하는 실용적 풍응답 가속도 조절 설계법을 제안한다. 제안된 설계법은 42층 건물의 풍응답 가속도 조절 설계에 적용하여 그 적용성과 효율성을 평가하였다.

핵심용어 : 재분배기법, 풍응답 가속도, 고층건물, 구조 최적화

Abstract

As increase of height and slenderness of buildings, serviceability design criteria such as maximum lateral drift and wind-induced vibration level play an important role in structural design of high-rise buildings. Especially, wind-induced vibration is directly related to discomfort of occupants. However, no practical algorithm or design method is available for structural designers to control the acceleration level due to wind. This paper presented a control method for wind-induced vibration of high-rise buildings using the resizing algorithm. The level of vibration due to wind is calculated by well known estimation rules of ASCE 7-02, NBCC 95, SAA83, and Solari method. Based on the fact that the level of wind-induced vibration is inversely proportional to the magnitude of natural periods of buildings, in the design method, natural periods of a high-rise building are modified by redistribution of structural weight according to the resizing algorithm. The design method is applied to wind-induced vibration control design of real 42-story residential building and evaluated the efficiency and effectiveness.

Keywords : *resizing algorithm, wind-induced vibration, high-rise building, structural optimization*

1. 서 론

최근 건축물의 고층화, 세장화에 따라서 풍하중에 의한 수평 변위와 수평 진동 등과 같은 사용성 요구조건을 만족시키는 것이 고층건물 구조 설계의 중요한 요소로 부각되고 있다. 특히, 고층건물의 경우 횡변위에 대한 제한은 만족하더라도 바람에 의한 풍 가속도에 의해서 건물 사용자나 거주자에게 신체적, 심리적인 불쾌감을 줄 수 있다.

풍응답 가속도를 감소시키기 위한 연구방향은 크게 구조물 형상의 공기 역학적 설계, 감쇠비의 조절, 효과적인 구조시스템의 적용으로 나눌 수 있다.

건물의 형상을 변경하는 방법으로서의 하나로, 건물 모서리에 챔버나 슬롯을 설치하는 경우 풍 방향과 풍 직각 방향의 진동은 감소시킬 수 있으나(Kwok, 1988) 챔버나 슬롯 코너를 설치하여 건축물의 형태를 변경시키는 것은 건축 계획적인 제약에 의해서 현실적이지 못한 경우가 많다. 또, 가속도

† 책임저자, 정회원 · GS건설(주) 기술연구소 선임연구원
* 교신저자, 정회원 · 연세대학교 건축공학과 교수
Tel: 02-2123-2794 ; Fax: 02-365-4668
E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

는 감쇠 비에 반비례하므로(Tallin, 1984) 감쇠비를 조절하는 것은 이론적으로 가속도 응답을 조절할 수 있는 가장 효과적인 방법이긴 하지만 실제 구조물의 감쇠 비를 조절하는 것은 쉽지 않다. 실제로 일부, 초고층건물과 공항 관제탑 등에 댐퍼와 같은 부가적 장치가 적용되어 감쇠를 조절하여 진동을 제어하고 있으나, 높은 댐퍼 설치비용과 유지 관리 비용 및 댐퍼 장치의 장기 신뢰성 문제는 댐퍼의 적용을 어렵게 하고 있다(Kwok, 1995; Griffis, 1993).

그러므로 고층건물 계획설계단계에서 엔지니어가 고층건물의 풍응답을 조절할 수 있는 가장 실질적인 방법은 효과적인 구조시스템을 적용하는 것이다. 일반적으로 초고층건물의 고유진동수는 0.1Hz~1Hz이며, 이 영역에서 풍응답 가속도는 건물의 고유진동수에 비례하는 것으로 알려져 있다(Tallin, 1972; Griffis, 1993). Tallin과 Ellingwood(1972)는 정형 구조물을 대상으로 건물 중량의 변화없이 강성을 증가시켜 고유진동수를 0.15Hz에서 0.30Hz로 조절함으로써, 풍 직각 방향 응답 가속도를 1/3로 감소시킬 수 있다는 연구결과를 발표하였다.

일반적으로 고층건물의 풍응답 가속도는 계획 설계(Preliminary Design) 단계에서는 각 코드 및 기준에 의해서 약산으로 평가하고, 기본 설계(Design Development) 단계에서 풍동 실험을 통해 보다 정밀하게 풍응답 가속도를 평가한다. 계획 설계단계에서 풍응답 가속도를 줄이기 위한 노력은 실제 풍동 실험에서도 풍응답 가속도의 감소로 이어질 수 있음에도 많은 연구가 풍동 실험과 관련된 연구에 집중되어 있으며, 계획 설계단계에서 풍응답 가속도를 조절하기 위한 연구는 많지 않다. Chan(2005) 등이 계획 설계단계에서 풍응답 가속도를 제약하는 물량 최적화 설계방법을 소개하고 있으나, 이 방법은 민감도 해석을 수반해야 하는 단점을 가지고 있다.

그러므로 본 연구에서는 선행 연구에서 재분배기법이 풍응답 가속도 설계기법으로의 사용되기 위한 가능성을 각 설계 기준에 근거하여 검토하였고, 이를 실제 42층 주상 복합 구조물에 적용하여 제안된 방법이 고층건물 풍응답 가속도 조절 설계법으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

2. 연구 방법

일반적으로 고층건물의 1차 고유주기는 지진하중과 풍하중에 대한 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있다. 지진 하중에 대한 응답 스펙트럼 해석이나 풍하중에 대한 풍응답 가속도는 평가에서 1차 고유주기는 구조 반응에 대한 가장 중요한 영향 인자가 되고 있다. 특히, 1차 고유주기가 0.1초~ 초 범위의 초고층건물의 풍응답 가속도는 1차 고유주기에 반비

례 관계임을 알 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 재분배기법을 이용하여 건물의 강성을 조절함으로써 1차 고유주기 및 풍응답 가속도를 조절하는 방법을 제안하였다. 여기서 건물의 강성, 고유진동수, 고유주기, 풍응답 가속도의 식 (1)과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} \text{강성} &\propto 1\text{차 고유진동수} \propto \frac{1}{1\text{차 고유주기}} \quad (1) \\ &\propto \text{풍응답 가속도} \end{aligned}$$

본 연구에서 제안하는 풍응답 조절 설계법은 건물의 강성을 조절하기 위한 재분배기법과 건물의 풍응답 가속도를 평가하기 위한 약산 풍응답 가속도 평가식으로 구성된다. 본 연구에서는 재분배기법을 이용한 풍응답 가속도 조절 설계법을 42층 주상 복합 구조물의 설계에 적용하여 구조물의 강성 및 고유주기를 조절하였으며, 이를 Solari method, SAA83, ASCE 7-02, NBCC 95, ISO 6897 등의 풍응답 평가식을 이용하여 고유주기의 변화에 따른 풍응답 가속도의 변화 및 감소 효과를 분석하였다.

3. 풍응답 가속도 평가 기준

고층건물의 풍응답 가속도에 대한 허용치는 설계 기준에 따라 다르게 나타나 있다. 각 설계 기준에서는 가속도 허용치 뿐만 아니라, 평균 풍속, 재현 주기 간에 차이가 있으나, 일반적으로 바람에 의한 허용 설계 가속도는 15~24mg 정도이며, 주상복합 건물의 최상층이 거주시설일 경우에는 15mg, 사무소 건물인 경우에는 20mg 정도이다. 본 연구에서는 재분배기법 적용에 따른 고층건물의 풍응답 가속도를 평가하기 위해 Solari method, SAA83, ASCE 7-02, NBCC 95, ISO 6897 등을 사용하였다.

3.1 풍방향 응답 가속도 평가

(1) Solari method

Solari method는 풍방향의 풍응답 가속도를 평가하는 약산식으로서, 건물의 형상 치수, 질량, 1차 고유진동수, 감쇠비, 풍력 등을 이용하여 평균 제곱근 진동, 최대 진동, 평균 제곱근 가속도, 최상층 최대 가속도 등을 순차적으로 구하게 된다. 식 (2), (3)은 각각 최대 가속도 계수와 최상층 최대 가속도를 구하는 식이다.

$$g_a = \sqrt{1.175 + 2\ln(n_1 T)} \quad (2)$$

$$\hat{X} = g_a X_{rms}'' \quad (3)$$

여기서,

g_a : 최대 가속도계수

n_1 : 1차 고유진동수

X_{rms}'' : 평균 제곱근 가속도

\hat{X} : 최상층에서의 최대 가속도

$T=600$ 초

(2) ASCE 7-02

ASCE 7-02 기준에서는 건물의 높이, 폭, 감쇠비, 건물 밀도, 풍속 및 건물 1차 고유진동수를 이용하여 최대 가속도 계수 및 최대 가속도를 식 (4), 식 (5)와 같이 계산한다.

$$g_a = \sqrt{2 \ln(n_1 T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_1 T)}} \quad (4)$$

$$\hat{X} = g_a X_{rms}'' \quad (5)$$

여기서,

g_a : 최대 가속도계수

n_1 : 1차 고유진동수

X_{rms}'' : 평균 제곱근 가속도

\hat{X} : 최상층에서의 최대 가속도

$T=3600$ 초

(3) NBCC 95

NBCC 95에서 풍방향의 풍응답 가속도는 건물의 높이와 폭, 감쇠비 등의 건물 물성치와 풍속과 1차 고유진동수를 이용하여 식 (6)과 같이 계산한다.

$$a_D = 4\pi^2 n_D^2 g_p \sqrt{\frac{KsF}{C_e \beta_D}} \left(\frac{\Delta}{C_g} \right) \quad (6)$$

여기서,

a_D : 풍방향 최대 응답 가속도

g_p : 최대 가속도 계수

K, C_e : 노풍도 관련 계수

F : 거스트 에너지 비

S : 사이즈 감소계수

β_D : 풍방향 감쇠율

n_D : 풍방향 1차 고유진동수

C_g : 거스트 반응 계수(Gust response factor)

Δ : 해석에서 얻은 최상층 변위 혹은 건물 높이의 1/450

3.2 풍 직각 방향 응답 가속도 평가

(1) 호주 기준(SAA 83)

호주 기준(SAA83)에서는 고유주파수 및 건물의 단면적, 감쇠 비, 풍속 등을 이용하여 식 (7)과 같이 평균 제곱근 변위 응답을 구한다.

$$Y_{rms} = 0.00015 \frac{\rho}{\rho_b} \sqrt{\frac{A}{\xi_1}} \left(\frac{V_H}{n_1 \sqrt{A}} \right)^{3.5} \quad (7)$$

여기서,

Y_{rms} : 평균 제곱근 변위 응답

ρ : 공기밀도

ρ_b : 건물 밀도

A : 건물의 단면적

ξ_1 : 감쇠비

V_H : 최상층 1시간 평균 풍속

n_1 : 풍 직각 방향의 건물 1차 고유 주파수

식 (7)에서 얻어진 평균 제곱근 변위 응답과 고유 주파수를 이용하여 식 (8)과 같은 평균 제곱근 가속도를 구하며, 최대 가속도는 근사적으로 평균 제곱근 가속도 응답의 4배로 식 (9)와 같이 구해진다.

$$Y_{rms}'' = (2\pi n_1)^2 Y_{rms} \quad (8)$$

$$\hat{Y} = 4 Y_{rms}'' \quad (9)$$

여기서,

Y_{rms}'' : 평균 제곱근 가속도

\hat{Y} : 최대 가속도

(2) NBCC 95

NBCC 95에서 풍 직각 방향의 풍응답 가속도는 건물의 높이와 폭, 감쇠비 등의 건물 물성치와 풍속 및 1차 고유진동수를 이용하여 식 (10)과 같이 계산된다.

$$a_w = n_w^2 g_p \sqrt{WD} \left(\frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_w}} \right) \quad (10)$$

여기서,

g_p : 최대 가속도 계수

n_w : 풍 직각 방향 1차 고유진동수

W, D : 풍 직각 방향 및 풍방향 건물 치수

$$a_r = 7.85 \times 10^{-3} \left[\frac{V_H}{n_w \sqrt{WD}} \right]^{3.3}$$

V_H : 건물 최상층 풍속

ρ_B : 건물의 중량 밀도

g : 중력가속도

β_w : 풍 직각 방향 감쇠비

(3) ISO Standard 6897

ISO Standard 6897에서는 0.063~1Hz 범위의 건축물에 대한 사용자의 반응을 고유진동수만을 이용하여 평가하고 있다. ISO Standard 6897에서는 일반 건축물에 대한 평균 제공근 가속도는 식 (11)과 같이 계산하며, 최대 풍응답 가속도는 평균 제공근 가속도에 3.5배를 하여 식 (12)와 같이 계산된다.

$$\sigma_{rms}'' = \exp(-3.65 - 0.41 \ln(n)) \quad (11)$$

$$\hat{\sigma} = 3.5 \times \sigma_{rms}'' \quad (12)$$

여기서,

σ_{rms}'' : 평균 제공근 가속도

n : 고유진동수

$\hat{\sigma}$: 최대 가속도

4. 풍응답 가속도 조절 모델

풍응답 가속도 조절 모델은 기본적으로 재분배기법과 풍응답 가속도 평가식으로 구성되어 있다. 재분배기법은 물량을 분배하여 건물 강성과 1차 고유주기를 조절하며, 풍응답 가속도 평가식은 재분배기법 적용에 따른 결과를 평가한다.

4.1 변위기여도

재분배기법은 에너지 이론에 근거하여 부재의 물량을 분배함으로써 건물의 강성을 조절할 수 있다. 재분배기법에서 강성을 조절하기 위한 물량 분배의 근거는 변위기여도이며, 구조해석 결과인 부재력을 이용하여 식 (13)과 같이 계산된다.

$$\delta = \sum_{k=1}^{nm} \delta_k = \sum_{k=1}^{nm} (\delta_k^n + \delta_k^m + \delta_k^v + \delta_k^t) \quad (13)$$

$$= \sum_{k=1}^{nm} \left\{ \int_0^l \frac{N_k^L N_k^U}{EA_k} dx + \int_0^l \frac{M_k^L M_k^U}{EI_k} dx + \alpha \int_0^l \frac{V_k^L V_k^U}{GA_k} dx + \int_0^l \frac{T_k^L T_k^U}{GI_{pk}} dx \right\}$$

여기서, δ, δ_k 는 각각 건물의 최상층 변위와 k 번째 부재의 변위기여도를 나타내며, $\delta_k^n, \delta_k^m, \delta_k^v, \delta_k^t$ 는 각각 k 번째 부재의 축력, 모멘트, 전단력, 비틀림에 의한 변위기여도를 나타낸다. N, M, V, T 는 각각 축력, 모멘트, 전단력, 비틀림을 나타내며, 상첨자 L 과 U 는 각각 실제하중과 단위하중을 나타내며, nm 은 전체 부재수를 나타낸다.

4.2 정식화

1장에서 언급한 바와 같이 일반적인 초고층건물에서 건물의 강성은 1차 고유진동수에는 비례하며, 1차 고유주기 및 풍응답 가속도에는 반비례하는 경향을 가진다. 그러므로 건물의 강성이 증가하면 1차 고유주기는 감소하고 풍응답 가속도는 감소하게 된다. 이러한 관계에 근거하여 정식화는 기존 연구에서 변위를 최소화하여 강성을 증가시키는 정식화를 사용하였다(서지현 등, 2004; 2006; 김준희 등, 2004; 박효선 등, 2002).

4.3 풍응답 가속도 설계 모델

재분배기법은 물량을 분배함으로써 건물의 강성과 1차 고유진동수를 조절하며, 각 설계 기준의 풍응답 평가식에서 1차 고유진동수가 풍응답 가속도에 공통적으로 중요한 영향 인자임을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 연구에서는 재분배기법과 각 설계 기준의 풍응답 가속도 평가기법을 결합하여 고층건물 풍응답 가속도 설계 모델을 그림 1과 같이 제안하였다. 제안된 고층건물 풍응답 가속도 설계 모델의 전체적인 흐름은 다음과 같다.

Step 1) 구조해석과 강도 설계과정을 통해서 초기 구조 설계안을 결정한다.

Step 2) 약산 풍응답 가속도 식을 이용하여 풍응답 가속도를 평가한다.

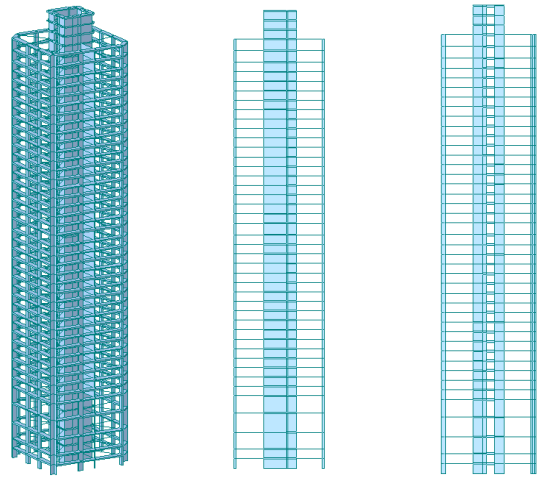
Step 3) 풍응답 가속도가 허용치를 만족하지 못할 경우, 재분배기법을 이용하여 물량을 재분배함으로써 건물의 강성 및 고유진동수를 조절한다.

Step 4) 재분배기법으로 재설계된 고층건물의 1차 고유진동수를 이용하여 풍응답 가속도를 재평가한다. 이때, 허용 가속도를 만족하지 못할 경우 물량을 증가시키고 Step 3)으로 돌아간다.

5. 예제 적용

5.1 건물 개요

예제로 사용된 Y 빌딩은 실제로 건설된 지하 3층 지상 42층 주상복합 건물로서 높이는 지상 138m, 밑변은 25.4m × 25.3m, 코어는 10.4m × 9.8m인 정방형에 가까운 건물로서 건물의 형상 및 재분배기법 적용에 사용된 2차원 모델은 그림 2와 같다. 이 구조물은 플랫 플레이트 슬래브 시스템이 적용되었으며, 플랫 플레이트 슬래브는 내부 코어와 외부 기둥을 연결하고 있다. 본 연구에서는 플랫 플레이트 슬래브는 재분배에서 제외하였으며, 전단벽 부재만을 대상으로 물량을 재분배하였다. 물량 재분배시, 전단벽의 길이는 건축 계획적 측면에서 변경이 어려우므로 전단벽의 두께를 변경시키는 방법으로 물량을 재분배하였다. X방향과 Y방향의 2차원 모델에서 풍하중은 대한건축학회 건축물 하중기준 및 해설을 적용하였으며, 지진하중은 대한건축학회 기준(KS 2000)을 따랐다(S=1.2, A=0.11, I=1.5, R=5.5). 이 예제는 대칭성을 가지고 있으므로 X방향과 Y방향으로 2차원 모델링하여



(a) 입면 (b) X방향 2D모델 (c) Y방향 2D모델

그림 2 Y 빌딩 형상

표 1 Y빌딩의 벽두께 변화

(단위: cm)

그룹 번호	층수	X방향			Y방향		
		초기	재분배후	적용	초기	재분배후	적용
1	1-2	80	99.74	100	110	165	165
2	3-7		60	60		120	120
3	8-12		60			120	
4	13-17		54.25	40		120	40
5	18-22		41.73			114	
6	23-27	40	31.01	30	80	69.90	70
7	28-32		21.67	20		40	40
8	33-37		20			40	
9	38-39		20			40	
10	40-42		20			40	

표 2 Y빌딩의 물량 변화

구분	초기	재분배후
Link Beam(kN)	111,9425	112,247
Plate(kN)	7,178	7,178
Wall(kN)	114,090	121,621
Sum(kN)	233,221	241,056
Mass(kN/g)	45,136	45,481

표 3 최대 변위 및 최대 층간변위

구분	변위		층간변위	
	X방향	Y방향	X방향	Y방향
초기	21.86	11.83	0.752	0.377
재분배 후	16.87	9.98	0.603	0.310
변화율(%)	-22.83	-15.63	-19.81	-17.77

2차원 구조물에 대해서 재분배기법을 적용하였으며, 재분배기법에 의해서 얻어진 부재 성능을 3차원 구조물에 반영하고 구조해석을 통해 변위 및 고유주기 등을 계산하였다.

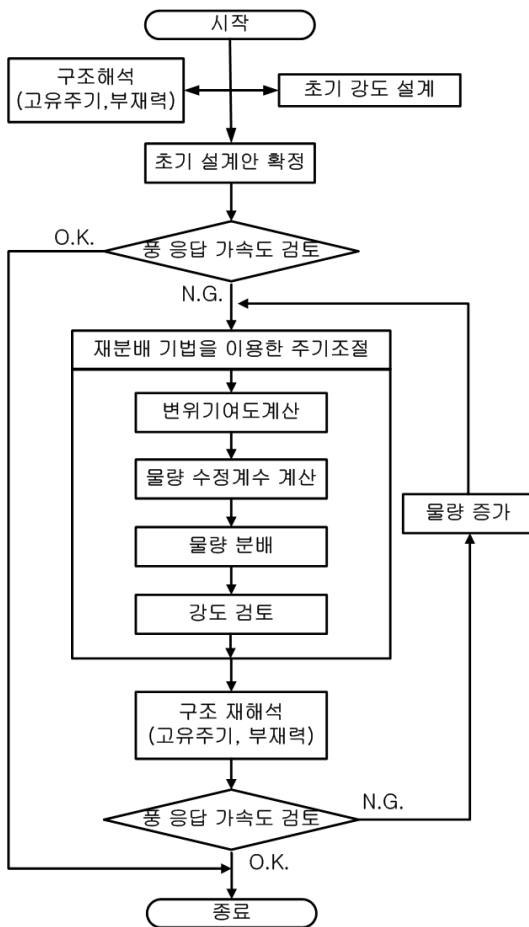


그림 1 고층건물 풍응답 가속도 설계 모델

표 4 Y빌딩의 고유 주기 (단위: sec)

Mode	초기	재분배후	변화율(%)
1	4.84	4.07	-15.91
2	3.69	3.25	-11.92
3	2.82	2.29	-18.79

표 5. Y빌딩의 모드 질량 참여율 (단위:%)

Mode	초기			재분배후		
	X-trans	Y-trans	Rotation	X-trans	Y-trans	Rotation
1st	63.75	1.88	0.00	61.37	1.95	0.00
2nd	1.86	69.25	0.34	1.95	66.41	0.14
3rd	0.01	0.26	78.16	0.00	0.12	74.43

5.2 재분배기법 적용 결과

X방향과 Y방향의 2차원 모델은 각각 10개의 그룹으로 구성되어 있으며, 초기 설계와 재분배기법 적용후의 전단벽의 두께는 표 1과 같다. 초기 설계모델에서 전단벽 두께는 X, Y방향으로 각 2개 종류의 두께로 설계되었으나, 재분배 후에는 X방향, Y방향이 각각 5개, 4개 종류로 변경되었다. 재분배 후 전단벽의 두께는 시공성을 고려하여 초기 두께의 50~150%가 되게 하였다. 그림 2(c)에서 알 수 있듯이, Y방향의 연결보(link beam)는 재분배기법 적용에 따라 물량을 변경할 때, 층고와 시공성 제약을 고려하여 보 축은 초기 설계와 동일하게 고정하고 가로폭은 Y방향의 전단벽의 두께와 동일하도록 설정하였다. 표 2는 Y빌딩의 재분배 전·후의 물량을 나타낸다. 슬래브는 재분배에서 제외되었음을 알 수 있으며, 전단벽과 연결보(link beam)보의 물량만 변동이 있음을 알 수 있다. 표 1에서 재분배기법을 통해서 얻어진 전단벽

두께는 수치적인 계산에 의해 얻어진 값이므로 실제 적용 가능한 값으로 바꾸는 단계에서 0.7%의 물량이 증가하였다. 2차원 모델을 대상으로 재분배기법을 적용한 결과를 3차원 구조물에 반영하여 구조 재해석을 수행하였다. 재분배기법 적용에 따른 변위 및 층간변위는 표 3과 같다. 재분배기법 적용 전·후의 고유주기와 모드 질량 참여율은 각각 표 4, 표 5와 같다. 본 예제에서 1차 모드의 고유주기는 X방향의 지배 고유주기이며, 2차 모드의 고유주기는 Y방향의 지배 고유주기임을 알 수 있다. 재분배기법 적용에 따라 1차 모드의 고유주기는 15.91%의 감소를 보이며, 2차 모드의 고유주기는 11.92%의 감소된 것을 알 수 있다.

5.3 기준별 재현주기와 풍속 평가 시간

현재 국내에서 사용하는 설계 풍속은 100년 재현 주기, 10분 평균 풍속을 이용하여 강도 설계 및 변위 설계가 이루어지고 있으나, 풍응답 가속도를 평가하기 위한 기준은 확립되어 있지 못하다. 그러므로 해외 설계기준을 이용하여 풍응답 가속도를 평가하기 위해서는 100년 재현주기, 10분 평균 풍속을 각 해당 설계기준에 맞는 재현주기와 평균 풍속으로 전환하여야 한다. 재현주기에 대한 보정은 일본 건축물 하중 지침에 근거하여 식 (14)와 같은 환산계수를 이용하였으며, 풍속 평균 시간에 대한 보정은 식 (15)를 이용하였다(Simiu 등, 1996).

$$U_r = U_{100} \times (0.54 + 0.1 \ln(r)) \quad (14)$$

여기서,

표 6 기준별 환산 기본 풍속

구분	KBC2005	ASCE7-02	NBCC95	Solari Method	SAA83	ISO 6897
Return period(years)	100	10	10	10	10	5
Averaging-time	10min.	3sec.	1hour	10min.	1hour	10min.
Basic wind velocity	30m/s	33.210m/s	24.648m/s	23.100m/s	24.653m/s	21.028m/s

표 7 풍응답 가속도 결과 정리

구분		지배 고유주기 (sec)	Solari method (mg)	ASCE 7-02 (mg)	NBCC 95 (mg)	SAA 83 (mg)	ISO 6897 (mg)	
X방향	풍방향	초기	4.84	17.74	14.99	13.76	-	
		변위설계후	4.07	14.49	12.33	11.52	-	
	풍직각방향	초기	3.69	-	-	15.60	22.45	15.84
		변위설계후	3.25	-	-	13.25	17.81	15.03
Y방향	풍방향	초기	3.69	13.55	11.42	10.50	-	
		변위설계후	3.25	11.50	9.68	9.07	-	
	풍직각방향	초기	4.84	-	-	22.32	33.42	17.70
		변위설계후	4.07	-	-	17.84	24.95	16.49

U_r : 재현주기 r 년의 풍속
 U_{100} : 재현주기 100년의 풍속
 r : 재현주기(year)

$$V_i(z) = V_{3600}(z) \left(1 + \frac{\beta^{1/2} c(t)}{2.5 \ln(z/z_0)} \right) \quad (15)$$

여기서,

$V_i(z)$: 임의 평균 시간 풍속
 $V_{3600}(z)$: 1시간 평균 풍속
 $c(t)$: 평균 시간에 따른 계수
 β : 조도관련 계수
 z : 10m
 z_0 : 조도장(m)

표 6은 우리나라의 설계 기본 풍속을 재현주기와 풍속 평가 시간을 고려하여 각 설계 기준에 맞게 수정한 기본 설계 풍속을 정리한 것이다.

5.4 풍응답 가속도 평가

설계 기준의 풍응답 평가식에서는 고유치 해석에서 얻어진 건물의 1차 고유 주기(고유 진동수)를 사용한다. 본 연구에서는 X, Y 두 방향에 대해서 풍응답 가속도를 평가하였으며, 풍응답 가속도 평가시, 1차, 2차 고유 주기는 풍방향 혹은 풍 직각 방향의 지배 고유주기(Fundamental natural period)로 교대로 사용하였다. 즉, X방향 풍응답 평가시에는 1차 고유주기를 풍방향의 지배 고유주기(Fundamental natural period)로 가정하고 2차 고유주기를 풍 직각 방향의 지배 고유주기로 가정하여 풍응답 가속도를 평가하였으며, Y방향에 대한 풍응답 가속도 평가에는 그 반대로 가정하였다.

풍응답 평가에 영향을 미치는 요소는 기준마다 다르지만 공통적인 주요 설계 변수는 지배 고유주기(Fundamental natural period)인 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 지배 고유주기만을 설계 변수로 하여 초기 모델과 재분배 기법 적용 후의 풍응답 가속도를 평가하였다. 일반적으로 건물의 감쇠율은 진폭과 진동수를 이용하여 평가하기도 하지만, 정확한 감쇠율을 평가하는 것은 어려우므로 사용성 평가시 감쇠율은 일반적으로 철골조인 경우 1%, 철근 콘크리트 조인 경우 1.5%, 복합구조인 경우에는 1.25%정도를 사용하고 있다. 본 연구에서 사용된 예제는 철골 콘크리트 건물이므로 감쇠율을 1.5%로 가정하였으며, 재분배기법 적용에 따른 감쇠율의 변화가 없는 것으로 가정하였다.

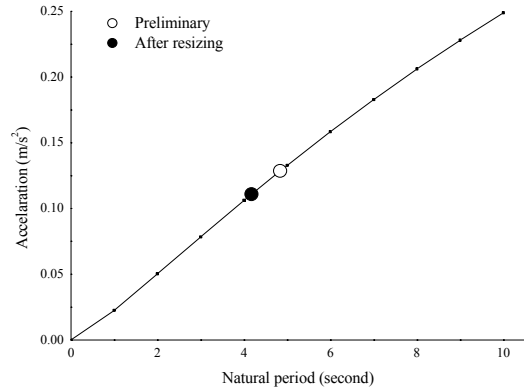


그림 3 Solari method에 의한 X방향의 풍응답 가속도

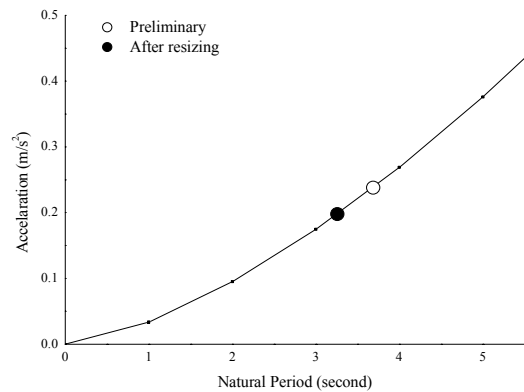


그림 4 SAS83에 의한 X방향의 풍 직각 방향 응답 가속도

Solari method에 의한 풍방향 응답 가속도 평가시, 지배 고유주기와 건물의 밀도를 제외한 나머지 변수는 변화가 없는 것으로 가정하였다. Solari method를 이용하여 풍응답 가속도를 평가하기 위해 국내 설계 풍속 30m/s를 재현주기와 풍속 평가시간(averaging-time)을 고려하여 표 6과 같이 환산된 기본 풍속(Basic wind velocity)을 이용하였다. 재분배기법 적용에 따른 X방향 지배 고유주기인 1차 고유주기가 4.84초에서 4.07초로 15.91% 감소함에 따라 풍방향 응답 가속도도 17.74mg에서 14.49mg로 18.32% 감소하게 된다. 그림 3은 Solari method에 의한 Y빌딩의 풍방향 응답 가속도의 변화를 나타낸다. ASCE 7-02 기준에서는 노풍도(Exposure category)를 B로 가정하였으며, 풍응답 평가를 위한 기본 풍속은 표 6의 환산 기본 풍속을 사용하였다. 재분배기법 적용에 따라 ASCE 7-02 기준에 의한 X방향 풍응답 가속도는 14.99mg에서 12.33mg로 17.75% 감소하게 된다.

NBCC 95 기준에서는 노풍도를 B로 가정하였으며, 표 6의 환산 기본 풍속을 이용하였다. NBCC 95 기준에서는 풍방향

과 풍 직각 방향의 풍응답 가속도 평가식을 모두 제안하고 있다. 본 연구에서 X방향의 풍응답 가속도 평가식에는 1차 고유주기를 사용하였으며, 풍 직각 방향에 대해서는 2차 고유주기를 사용하였다. 재분배기법 적용에 따라 X방향 풍응답 가속도는 13.76mg에서 11.52mg로 16.28% 감소하였으며, 풍 직각 방향 응답 가속도는 15.60mg에서 13.25mg로 15.06% 감소하였다.

SAA 83 기준은 풍 직각 방향의 풍응답 가속도를 평가하는 식으로써 X방향에 대한 풍 직각 방향의 풍응답 가속평가를 위해서 2차 고유주기와 표 6의 환산 기본 풍속을 사용하였다. 재분배기법 적용에 따라 SAA 83 기준에 의한 풍 직각 방향 응답 가속도는 22.45mg에서 17.81mg로 20.67% 감소하게 된다. 그림 4는 SAA83에 의한 Y빌딩의 풍 방향 응답 가속도의 변화를 나타낸다. ISO 6897 기준은 풍 직각 방향 응답 가속도를 평가하는 식으로서, 고유진동수만을 변수로 하여 풍응답 가속도를 평가한다. ISO 6897에서는 평균 제곱근 가속도를 계산한 후 여기에 3.5배를 곱하여 최대 응답 가속도를 구하게 된다. 본 연구에서도 평균 제곱근 가속도에 3.5배를 곱한 최대 응답 가속도를 사용하였다. 재분배기법 적용에 따라 ISO 6897 기준에 의한 X방향에 대한 풍 직각 방향 응답 가속도는 15.84mg에서 15.03mg로 5.11% 감소하게 된다. Y방향에 대한 풍응답 가속도 평가는 풍방향과 풍 직각 방향의 지배 고유주기가 바뀌는 것을 제외하고는 X방향에 대한 풍응답 가속도 평가법과 동일하다.

6. 결 론

본 연구에서는 재분배기법과 약산 풍응답 가속도 평가식을 결합한 고층건물 풍응답 가속도 설계 모델을 제안하였다. 제안된 풍응답 가속도 설계 모델을 42층 주상 복합 건물에 적용한 결과, 전체 구조물량의 변경없이 풍 하중에 대한 변위와 층간 변위를 각각 최대 22.83%, 19.81%까지 감소시킬 수 있었으며, 1차 고유주기와 2차 고유주기를 15.91%, 11.92% 감소시킬 수 있었다. 재분배기법 적용으로 결과를 반영하여 풍방향과 풍 직각 방향의 풍응답 가속도를 평가한 결과, 풍방향 응답 가속도와 풍 직각 방향 응답 가속도는 각각 최대 18.32%, 25.34%정도 감소하였다.

이상과 같은 결과를 통해 재분배기법은 고층건물의 변위 설계 뿐만 아니라 풍응답 가속도 설계 기법에 효과적으로 사용될 수 있음을 알았다. 초기 설계단계에서 구조 설계자가 풍응답을 조절할 수 있는 효과적인 설계방법이 없는 현실을 비추어 볼 때, 재분배기법을 이용한 풍응답 가속도 설계 모델은 초기 구조설계단계에서 구조 설계자가 풍동 실험없이

풍응답 가속도를 제어할 수 있는 실용적인 방법으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발사업(과제번호 : 09CHUD-A052272-01)의 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김준희, 서지현, 박효선 (2004) 지진하중을 받는 철골 구조물의 재분배기법을 이용한 변위조절기법 개발, 대한건축학회 논문집 구조계, 20(6), pp.3~10.
- 서지현, 박효선 (2004) 횡하중과 연직하중을 받는 고층건물의 변위설계를 위한 재분배기법 개발, 한국전산구조공학회 논문집, 17(1), pp.49~58.
- 서지현, 박효선 (2006) 부재그룹핑과 하중조합을 고려한 고층 건물 변위 조절 설계법, 한국전산구조공학회 논문집, 18(4), pp.357~367.
- 日本建築學會 건축물 하중지침 및 설계.
- AIK (2005) Standard Design Loads for Buildings, Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea.
- ASCE 7-02 Standrad (2002) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structure.
- Bickery B.J., Isyumov N, Davenport AG. (1983) The Role of Damping, Mass and Stiffness in the Reduction of Wind Effects on Structures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 11, pp.285~294.
- Bungle S. Taranath (2005) Wind and Earthquake Resistant Buildings, Structural Analysis and Design, Marcel dekker, New york, USA.
- Chan, C.M., Chui, J.K.L. (2005) Wind-Induced Response and Serviceability Design Optimization of Tall Steel Buildings, *Engineering Structures*, 28, pp.503~513.
- Griffis, L.G. (1993) Serviceability Limit States Under Wind Load, *Engineering Journal AISC*, 1st Qtr, pp.1~16.
- ISO Standard 6897 (1994) Guidelines for the Evaluation of the Response of Occupants of Fixed Structure to Low Frequency Horizontal Motion (0.063 to 1Hz), International Organization of Standardization.

- Kwok KCS** (1988) Effect of Building Shape on Wind-Induced Response of Tall Buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 28, pp.381~390.
- Kwok KCS, Bailey P.A.** (1987) Aerodynamic Devices for Tall Buildings and Structures, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 113, pp.349~365.
- Kwok KCS, Samali B.** (1995) Performance of Tuned Mass Dampers Under Wind Loads, *Engineering Structures*, 17, pp.655~667.
- National Building Code of Canada** (1995) National Research Council Canada, Ottawa.
- Park, H.S., Hong, K.P., Seo, J.H.** (2002) Drift Design of Steel-Frame Shear-Wall Systems for Tall Buildings, *The Structural Design of Tall Buildings*, 11, pp.35~49.
- SAA** (1973) Rules for Minimum Design Loads on Structures, AS1170 Part II(wind forces).
- Seo, J.H., Park, H.S.** (2004) Drift Design Method for High-Rise Buildings Using Dynamic Resizing Algorithm, Proceedings of the CTBUH 2004 Seoul Conference, 2, pp.1052~1056.
- Simiu, E., Scanlan, R.H.** (1996) Wind effects on structures, *John Wiley & Sons, INC, NY, USA.*
- Solari G.** (1982) Alongwind Response Estimation : Closed Form Solution, *Journal of the Structural Division*, 108(ST1), pp.225~244.
- Tallin A., Ellingwood B.** (1972) Serviceability Limit States: Wind Induced Vibration, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 110(1), pp.2424~2437.
- Yukio Tamura** (1996) Evaluation of Amplitude Dependent Damping and Natural Frequency of Buildings During Strong Winds, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp.15~130.

- 논문접수일 2009년 11월 24일
- 논문심사일
1차 2009년 12월 24일
2차 2010년 7월 23일
- 게재확정일 2010년 7월 24일