

초고층 건물의 풍가속도응답 조절 기법

Control Method of Wind Induced Vibration Level for High-rise buildings

김 지 은*
Kim, Ji Eun

서 지 현**
Seo, Ji Hyun

박 효 선***
Park, Hyo Seon

ABSTRACT

In this paper, a practical control method of wind-induced vibration of high-rise buildings is presented in the form of resizing algorithm. In the structural design process for high-rise buildings, the lateral load resisting system for the building is more often determined by serviceability design criteria including wind-induced vibration level. Even though many drift method have been developed in various forms, no practical design method for wind induced vibration has been developed so far. Structural engineers rely upon heuristic or experience in designing wind induced vibration.

The performance of the proposed method is evaluated by comparing wind-induced vibration levels estimated both from approximate techniques and wind tunnel test.

Key words : high-rise building, wind-induced vibration, resizing technique, sensitivity analysis, natural period control, wind tunnel test.

핵심 되는 말 : 고층 건물, 풍 응답 가속도, 고유주기조절, 재분배 기법, 민감도 해석, 풍동실험

1. 서 론

최근 건축물의 고층화에 따라 풍하중에 의한 수평 변위와 수평 진동 등의 강성 평가 지표가 설계 시 주요한 문제로 부각되고 있다. 고층건물 구조설계의 경우 횡변위에 대한 제한을 만족해도 과도한 진동이 발생할 수 있으며 건물의 사용자나 거주자에게 신체적 심리적인 불편감을 주는 사용성 (serviceability)을 개선하지는 못 할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 구조물 수평 진동에 대한 사용성과 관련된 지배적인 물리량은 가속도로 알려져 있다. 실무자가 초기설계 단계에서 다양한 구조 대안의 성능을 평가하고 설계할 수 있는 변위설계법과 달리 풍가속도 조절 또는 설계법은 현재까지 실용적 기법이 개발 또는 보급되어 있지 않다. 이러한 이유로 초기 설계 안이 확정된 후 풍동실험 결과에 따라 기계적 가속도 반응 조절 기법을 적용하거나 새로운 대안을 검토하게 된다. 그러나 풍동실험 후 새로운 대안을 검토하는 것은 현실적으로 여러 가지 어려움이 있다. 그러므로 초기 설계 단계에서 풍응답 조절 필요성을 판단하고 그 결과에 따라 실무자가 현실적으로 적용할 수 있는 풍응답 조절 설계법 개발의 필요성이 오랫동안 지적되어 왔다.

본 논문에서는 초기 설계 단계에서 적용할 수 있는 풍응답 설계법을 개발하고자 한다. 초기 설계 단계에서 구조변수로 도출한 고유주기를 조절함에 따라 풍응답 가속도를 조절 할 수 있게 된다. 주기제어를 통해서 풍응답을 조절하는 방법은 약식 근사법인 재분배 기법^{1,2)}과 민감도를 이용해서 직접 계산하는 방법이 있

* 삼성 엔지니어링, 사원(jieun0712.kim@samsung.com)

** 연세대학교, 건축도시공학부, 박사과정(seojh@yonsei.ac.kr)

*** 연세대학교, 건축도시공학부, 부교수(hspark@yonsei.ac.kr)

다. 풍응답은 풍방향 (along-wind) 가속도 응답으로는 Solari Method⁴⁾를 풍직각방향 (across-wind) 가속도 응답으로는 약식 계산방법인 SAA83 호주기준을 이용해서 평가하고 풍동실험의 결과와 비교해 보았다.

2. 풍응답 설계 평가식

2.1 풍가속도 인지 능력

사람들을 대상으로 한 실험을 통해서 사람이 인지할 수 있는 가속도를 분류하였다.³⁾

표 1 풍가속도 인지능력

가속도	인지정도
0.05gal 이하	사람이 인지하지 못함
5gal - 10gal	사람이 인지
10gal - 25gal	대부분의 사람이 인지
25gal - 40gal	심리적으로 매우 강한 불안감
40gal - 50gal	균형을 잃음
50gal 이상	빌딩에 재해 적용할 수 있는 한계가속도

일반적으로 설계가속도는 대체로 15~24mg정도이며 주상복합건물의 최상층이 주거시설의 경우에는 15mg를 기준으로 하였고 사무조건물에는 20mg가 일반적인 것으로 나타난다.

2.2 각 국의 풍응답가속도 기준 그래프

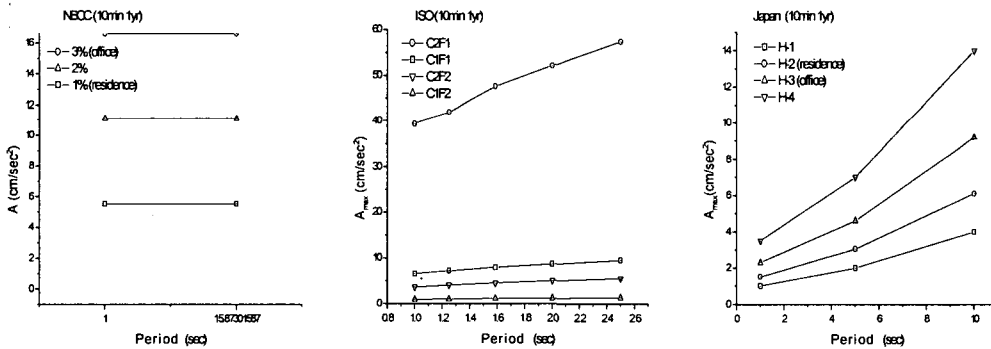


그림 1 각국의 풍응답 가속도 기준 그래프

2.3 풍가속도응답 평가 기법

풍가속도응답 평가는 풍방향과 풍직각방향의 가속도응답을 구하고, 그 중의 큰 값에 대한 가속도응답이 만족하도록 하게 된다. 본 논문에서는 풍방향 가속도응답 평가식으로는 Solari Method을, 풍직각방향 가속도응답 평가식으로는 호주기준을 이용해서 풍응답가속도를 평가해 보았다.

2.3.1 풍방향 (Along-wind) 가속도 응답 - Solari Method

밀면길이(D), 밀면가로길이(B), 건물높이(H)중 최소값을 Δ 로 정한다. 건물의 단위길이당 질량 $m(z)$ 과 공기밀도 ρ 를 계산한다. 모드질량 $M1 = m/3$ 을 계산한다. 건물의 고유주기와 감쇠비를 결정하고 풍상면 풍압계

수 C1과 풍하면 풍하계수 C2를 결정하여 건물의 풍력계수 Cd(=C1+C2)를 구한다. 지면조도계수 Z_0 를 구한다. fastest 10분 풍속 V_{10} 을 구한다. 풍속이 10분 평균속도보다 작을 경우에는 10분 평균으로 치환한다. 마찰속도 V는 다음 식 (1)에 의해 구한다.

$$V(z) = \frac{1}{x} V_* \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

위의 값들을 결정한 후 Solari Method¹⁸⁾를 이용하여 계수값들을 구한 후, 다음 식 (2)으로 최상층에서의 최대 가속도를 구한다.

$$\hat{X} = g_a \ddot{X}_s \quad (2)$$

여기서 $g_a = \sqrt{1.175 + 2 \ln(nT)}$ ($T=600$): 최대가속도계수

2.3.2 풍직각방향 (Across-wind) 가속도 응답 - SAA 83 (호주 기준)

고층건물의 풍직각방향 진동은 와류(Vortex Shedding)에 의해 발생한다. 와류에 의해 발생하는 풍직각방향의 진동 주파수는 다음 식 (3)과 같다.

$$f = \frac{V \times S}{D} \quad (3)$$

V=건물최상층에서 평균풍속(m/sec)

S=Strouhal number에 의한 매개변수 (장방형 0.15, 실린더형 0.2)

D=건물폭(m)

호주기준에서는 풍직각 가속도응답을 구하기 위한 약산식을 제안하고 있다. 먼저 평균제곱근 변위 응답은 다음 식 (4)에 의해 결정된다.

$$Y_{rms} = 0.00015 \frac{\rho}{\rho_b} \sqrt{\frac{A}{\xi_1}} \left(\frac{V_H}{n_1 \sqrt{A}} \right)^{3.5} \quad (4)$$

여기서, ρ : 공기밀도 ρ_b : 건물밀도 A : 건물의 단면적 ξ_1 : 감쇠비

V_H : 최상층 1시간 평균풍속 n_1 : 풍직각방향의 건물 고유주파수

그리고 평균제곱근 가속도 응답은 $Y_{rms}'' = (2\pi n_1)^2 Y_{rms}$ 이며, 최종적으로 최대가속도는 근사적으로 평균제곱근 가속도응답의 4배로 다음 식 (5)에서 구한다.

$$\hat{Y}_{rms}'' = 4 Y_{rms}'' \quad (5)$$

3. 풍동실험

건물이 고층화 할수록, 바람은 구조물의 안정성과 사용성에 중요한 영향을 미친다. 구조물 설계 시 바람에 의한 횡력과 외장재용 풍압을 산출하고, 구조물의 사용성을 평가하는 것은 매우 중요한 작업이다. 특히 형태가 복잡한 대 공간 구조물 등의 경우, 면에 작용하는 풍압을 산출하는 것은 일반적으로는 매우 어렵다. 이러한 목적을 위해 풍동실험은 지표면의 특성과 주변지역의 영향을 고려하면서 바람이 구조물에 미치는 영

향을 확인하기 위한 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

특히, 고층건축물이나 비정형건축물 등의 설계는 건축물 주위의 배치 및 그 형상으로 인해 건축물 주위의 유동특성이 달라짐에 따라 외장재용 풍압계수의 추정 시 경계층 풍동에 의한 풍동실험에 의존하는 경우가 많다.

3.1 풍 가속도 응답 예측식

풍동실험의 결과를 이용한 가속도 평가식은 다음과 같다.

시간이력별 데이터 ($f(n)$)의 파워 스펙트럼 ($S_f(n)$)은 각 방향의 풍향에 대해서 다음 식과 같다.

$$S_f(n) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} F(n) F(n)^* \quad (6)$$

여기서, T : 주기, $F(n)$: $f(t)$ 의 푸리에 변환,

$F(n)^*$: $F(n)$ 의 켈레 (conjugate), n : 진동수 이다.

해석은 스펙트럼 해석과 응답의 확률적 예측으로 한다. 예측되는 최대가속도응답의 평가식은 다음의 식을 이용한다.

$$\sigma_r^2 = \sqrt{A_B + A_R} = \int_0^\infty |x(n)|^2 S_f(n) dn \quad (7)$$

$$\sigma_a = (A_R)^{1/2} (2\pi n_1)^2 \quad (8)$$

여기서, σ_r : r.m.s. 응답,

A_B, A_R : 응답의 기본 (background), 공명 (resonant)부분

$|x(n)|^2$: mechanical admittance

n_1 : 각 방향에서의 1차 모드 진동수

4. 주기 제어 방법

4.1 동적 변위기여도

변위기여도는 구하고자 하는 지점의 변위에 대하여 각각의 부재가 가지는 기여도를 정량적으로 나타낸다. 그러므로, 동적 지진 하중을 받는 구조물의 구하고자 하는 지점의 변위에 대해 각각의 부재가 가지는 기여도를 식 (9)와 같이 동적 변위기여도로 정의한다.

$$\begin{aligned} \delta_i &= \sum_{j=1}^m \delta_{(i)} \\ &= \sum_{j=1}^m \left\{ \int_0^l \frac{N_j^L N_j^U}{EA_j} dx + \int_0^l \frac{M_j^L M_j^U}{EI_j} dx + a \int_0^l \frac{V_j^L V_j^U}{GA_j} dx \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 δ_i 는 제어하고자 하는 구조물 지진하중에 대한 최상층의 변위이며, $\delta_{(i)}$ 는 i 번째 부재의 동적변위기

여도를 나타낸다. N, M, V 는 각각 지진하중에 대해 반응 스펙트럼 해석법 (Response Spectrum Analysis) 을 통해 나온 부재력인 축력, 모멘트, 전단력을 나타내며, 상첨자 L 은 지진하중을, U 는 최상층에 주어진 단위하중을 나타낸다. 이와 같이 i 번째 부재의 동적 변위기여도는 축력, 전단력, 모멘트에 대한 변위기여도의 합으로 구해지며, 제어하고자 하는 구조물 최상층의 변위는 각 부재의 변위기여도의 합으로 구해진다. A_i, L_i 는 각각 i 번째 부재의 단면적, 단면 2차모멘트이며, E, G, α 는 탄성계수, 전단 탄성계수, 전단에 관한 단면 형상에 따른 계수이고, m 은 구조물을 구성하는 전체 부재의 수이다.

4.2 동적 변위기여도에 의한 재분배 기법의 정식화

앞에서 정의된 동적 변위기여도와 Kuhn-Tucker 조건에 의하여 구하게 될 동적 단면수정계수를 이용하여, 목적함수를 조절하고자 하는 절점의 변위(건물의 최상층 변위)를 최소화 하는 것으로 하였으며, 제약함수는 구조물 전체의 구조 물량을 재분배 전, 후 변화시키지 않는 것으로 하여 식 (10), (11)과 같이 표현하였다.

$$\text{Minimize } \delta_i = \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\beta_i} \quad (10)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^m \beta_i \rho_i A_i L_i = \sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i \quad (11)$$

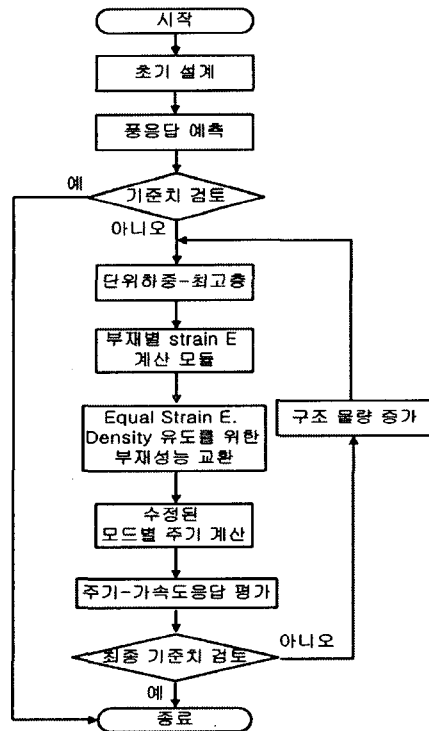


그림 2 Flow Chart

여기서, A_i, L_i 는 각각 부재 i 의 단면과 길이이고, ρ_i 는 밀도이며, β_i 는 부재 i 의 동적 단면수정계수이며, m 은 총 부재수 이다. 이러한 정식화는 Lagrange Multiplier(λ_L)를 이용한 무제약 최소화 문제로 치환하게 되

며, Kuhn-Tucker 조건을 이용한 동적 단면수정계수는 다음 식 (12)과 같이 구하게 된다.

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\delta_i}{\rho_i A_i L_i} \frac{\sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\delta_i \rho_i A_i L_i}}} \quad (i=1, m) \quad (12)$$

각 부재의 단면 성능을 식 (12)에서 구한 β_i 의 값에 의하여 변화시킴으로써, 제약조건 식 (11)과 같이 구조물 전체의 중량을 변화시키지 않고, 제어하고자 하는 해당 변위 δ_i 를 식 (10)에 의한 값으로 최소화하여 예측할 수 있다. 앞에서 제시한 재분배 기법에 의해 주기를 제어하는 방법은 그림 2와 같다.

4. 적용 예제

이 건물은 높이 지상 138m, 지하 3층 지상 42층 주상복합건물이다 (그림 3). 내부의 코어와 외부기둥은 판넬로 연결되어 있다.

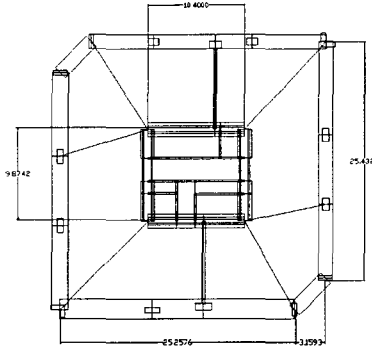


그림 3 예제 빌딩의 평면

표 2 Y빌딩의 재분배 전후의 주기 변화

Mode	재분배전 Period (sec)	재분배후 Period (sec)	변화율
1	4.83462	4.17528	-13.64
2	3.68543	3.258365	-11.59
3	2.821277	2.206017	-21.81

표 3 예제빌딩의 풍응답 가속도 값

고유주기 n(T)	최대가속도(mg) Solari Method		n1(T)	최대가속도(mg) SAA83	
	재분배전 (191.6)	재분배후 (195.7)		재분배전 (191.6)	재분배후 (195.7)
4.17528	11.0905	10.86234	3.258365	19.7791	19.3687
4.83462	12.8531	12.5886	3.68543	23.7925	23.2988

Solari Method 로 구한 풍방향 가속도응답은 1차 모드의 주기가 13.64%줄에 따라 12.85mg에서 10.86mg로 15.48% 감소하였다. 재분배 전후의 가속도 응답은 질량의 변화를 고려하여 계산하였다. 호주기준의 약산식을 이용한 풍직각방향 가속도 응답은 2차 모드의 주기가 11.59%줄에 따라 23.79mg에서 19.37mg로 18.6% 감소하였다. 역시 재분배 전후의 가속도 응답은 질량의 변화를 고려하여 계산하였다.

재분배 기법 자체가 전체 물량을 변화시키지 않는 것을 제약함수로 하는 최상층 변위 제어 기법이다. 재분배 기법을 통해서 1차 모드의 주기가 줄어드는 것은 1차 모드형상을 생각해 보면 알 수 있다. 최상층 변위를 줄여줌에 따라 1차 모드형상이 기울기가 커지고 따라서 이것이 1차주기의 감소를 가져오는 것이다. 게다가 재분배 기법을 통해 각각의 부재성능이 교환됨에 따라 전체 건물의 강성도 커지게 되어 주기를 줄여줄 수 있게 되는 것이다. 풍방향과 풍직각방향의 각각 주기변화에 따른 가속도응답의 그래프는 다음그림과 같다.

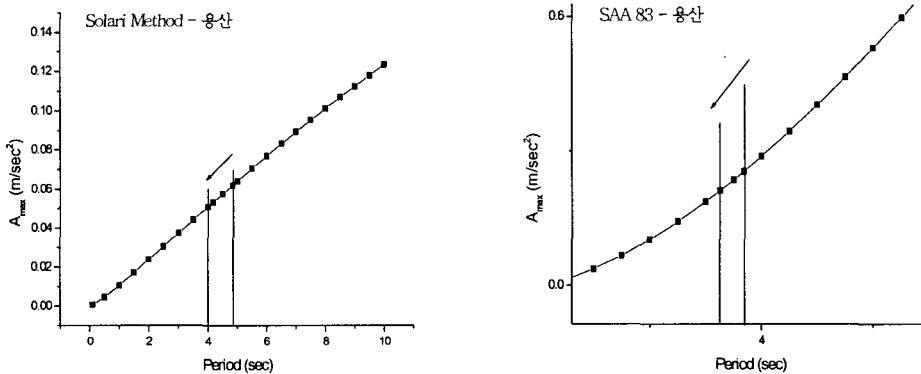


그림 4 주기 가속도 그래프

5 풍동실험 결과와의 비교

풍동실험에 사용된 주기의 변화는 재분배 기법에 의해 구해진 주기값을 적용 시켰다. Y빌딩은 높이 138m이고 폭이 30m인 정방형의 주상복합 건물이다.

재분배 전 1차 모드 주기는 4.83462초, 2차 모드 주기는 3.68543초, 질량은 4602.63 tonf/g이고, 재분배 후 1차 모드 주기는 4.17582초, 2차 모드 주기는 3.25836초, 질량은 4624.46tonf/g이다. 이 때 질량 분포에 따라 2차 모드 주기가 풍직각방향의 주기로 가정한다.

Structure	Acceleration(m/s ²)			
	Original		Redistribution	
	x-dir	y-dir	x-dir	y-dir
120	0.0607	0.0260	0.0432	0.0157
130	0.0900	0.0385	0.0640	0.0234
140	0.1166	0.0495	0.0853	0.0309
150	0.0953	0.0529	0.0684	0.0315
330	0.0701	0.0448	0.0521	0.0273
340	0.0873	0.0519	0.0619	0.0318
350	0.1148	0.0637	0.0828	0.0372
Max	0.1166	0.0637	0.0853	0.0372
%g	1.1690	0.6497	0.8696	0.3794

표4 예제빌딩의 풍동실험 결과

풍동실험은 Force Balance Test로 서울 풍속 30m/s 노풍도 B지역의 재현주기 10년 1시간 평균풍속인 29.45m/s를 사용하였다. 감쇠비는 1.5%로 하였다. 풍동실험은 전체 방향에서 10도 간격으로 풍압력을 주고 그에 대해 각각 x방향과 y방향의 응답을 구하게 된다. y방향의 응답이 더 작은 이유는 x방향에 대해 y방향은 직각방향이므로 2차 모드 주기를 가지게 되고 주기가 줄어들어 따라 상대적으로 바람의 에너지를 덜 받기 때문이다.

6. 결 론

- 1) 재분배후의 값을 적용시킨 후 1차주기는 4.83초에서 4.18초로 13.64% 감소하였다. 이 변화된 주기값을 Solari method에 적용 시켰을 때 12.85mg에서 10.86mg로 15.48% 감소하였다.
- 2) 풍직각방향의 고유주기는 질량분포를 참고하여 2차주기를 사용하였다. 2차주기는 3.69초에서 3.26초로 11.59% 감소하였고 이에 따라 호주규준 SAA83의 약산식에 적용시켰을 때 23.79mg에서 19.37mg로 18.6% 감소하였다.
- 3) 풍동실험의 결과는 재분배 전 x방향 11.89mg, y방향 6.5mg이고, 재분배 후 x방향 8.7mg y방향 3.79mg가 최대값이다. x방향은 140도, y방향은 350도에서 최대값을 가진다. 각각 73%, 58%의 감소를 보이고 있다.
- 4) Solari Method는 재현주기 10년, 10분 평균풍속을 사용한다. 호주규준 SAA83 약산식과 풍동실험은 재현주기 10년, 1시간 평균풍속을 사용하고 있다. 풍동실험의 경우 응답의 최대값이 140도와 350도에서 나왔다. 즉 Solari Method와 호주규준 SAA83 약산식에서 산정한 풍방향과 풍직각방향과는 다른 방향에서 최대값이 나오므로 풍동실험과의 차이를 보이게 된다. 또 풍동실험의 경우 주변환경에 의한 차폐도 있다. 최대응답이 나온 140도의 경우 주변에 차폐가 될 만한 것이 없기 때문이다. 호주규준 약산식의 경우 최대가속도 계수를 4로 사용하고 있는데 peak factor를 보통 3.6~3.8정도로 사용하는 것과 비교해 볼때 응답가속도가 커진 이유로 볼 수 있을 것이다.

Solari Method나 호주규준 약산식 풍동실험에 비해 풍응답값이 과대평가 되고 있지만 추가적인 구조해석 없이 주기를 조절함으로써 응답가속도를 줄여줄 수 있으므로 실무에서 간단히 사용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 특정연구개발사업 국가지정연구실(2005-01504) 사업의 연구비 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Park, H. S. and Park, C. L., "Drift Control of High-rise Buildings with Unit Load Method", The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 6, No. 1, 1997, pp.23-35
2. 서지현, 박효선 "철골 프레임 시스템의 강도설계를 고려한 재분배 기법의 개발", 대한 강구조학회 학술발표대회 논문집, 2003, pp.409-414
3. Hansen, B.J., J.W., and Vanmarcke E.H., "Human Response to Wind-Induced Motion", Journal of structural division, ASCE, 98 No. ST 7, July 1973, pp 1589-1605
4. Giovanni Solari "Alongwind Response Estimation : Closed Form Solution", Journal of the Structural Division, Vol. 108. No. January, 1982.