

재분배기법의 고유진동수 조절 특성을 이용한 고층건물에 작용하는 풍하중 감소 방법

A Method to Reduce the Wind-Load Applied on High-Rise Buildings using the Resizing Method

최 세 운* · 박 성 우** · 박 효 선***

Choi, Se Woon · Park, Sung Woo · Park, Hyo Seon

요 약

풍력실험결과를 이용한 풍하중 산정 방법은 고층건물에 작용하는 풍하중을 산정하는 대표적인 방법이다. 일반적인 고층건물의 경우, 이 방법은 구조물의 형상에 변화가 없다면, 구조물의 고유진동수가 증가할수록 구조물에 작용하는 풍하중 크기는 감소하는 특성을 가지고 있다. 한편, 재분배기법은 단위하중법을 통해 계산되는 변위기여도를 근거로 하여 구조물의 형상은 유지하면서 각 부재 단면의 크기만을 변화시켜서 구조물의 강성을 조절하는 설계기법이다. 이 방법은 효과적인 물량 재분배를 통해 구조물의 강성을 증가시키고 이를 통해 구조물의 고유진동수를 증가시키는 특징을 가진다. 본 논문에서는 재분배기법을 이용하여 고층건물 구조설계 시 구조물에 작용하는 풍하중 크기를 합리적으로 감소시키는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 풍력실험을 실시한 실구조물에 적용한 결과 구조물에 작용하는 풍하중 크기가 감소하고, 이를 통해 구조물량을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

keywords : 고층건물, 풍하중, 고유진동수, 재분배기법

1. 서 론

고층건물에 작용하는 풍하중을 결정하는 방법에는 기준에 의해 산정하는 방법과 풍력실험을 통해 산정하는 방법 등으로 구분할 수 있다. 지역, 건물 형상 등과 같이 대상설계구조물의 설계조건이 정해지만 기준에서 제시하는 절차에 따라 구조물에 작용하는 풍하중을 산정할 수 있다. 그러나 이 방법으로 바람의 난류 특성, 바람과 구조물의 상호작용 등으로 인해 발생하는 풍직각 방향, 비틀림 방향에 작용하는 풍하중을 예측하기에는 어려움이 있다. 그래서 건축구조설계기준(KBC 2005)에서는 구조물의 풍직각 방향진동 또는 비틀림진동에 유의하기 위해서 식 (1)과 같은 조건을 가지는 구조물에 대해서는 의무적으로 풍력실험을 실시하도록 하고 있다. 여기서, h 는 건축물 높이(m), B 는 건축물의 폭(m), L 은 건축물의 깊이(m)를 의미한다.

$$\frac{h}{\sqrt{BL}} \geq 3 \quad (1)$$

* 정회원 · 연세대학교 건축공학과 박사과정 watercloud@yonsei.ac.kr

** 학생회원 · 연세대학교 건축공학과 석사과정 paksungwoo@nater.com

*** 정회원 · 연세대학교 건축공학과 교수 hspark@yonsei.ac.kr

풍력실험은 현재 바람으로 인해 고층건물에 작용하는 풍하중을 결정하는데 있어서 가장 신뢰할수 있는 방법 중의 하나이다. 이는 데이터 계측 및 처리 시스템의 향상과 더불어, 정확한 공기역학적 모형 실험이 High-Frequency Force Balance(HFFB)기술에 의해 가능해졌다. 이 기술은 가볍지만 상대적으로 강성이 큰 모형을 활용한다는 장점을 가지고 있다. 풍력실험을 통해 공기역학적 풍력스펙트럼을 얻게 되면, 이를 통해 구조설계 시 요구되는 등가정적하중이 구조물의 동특성을 이용하여 산정될 수 있다. 건물의 형상이 변하지 않는다면, 추가적인 풍력실험 과정 없이 동일한 공기역학적 풍력스펙트럼이 구조물에 작용하는 풍하중을 예측하는데 계속해서 사용될 수 있다.

풍력실험은 고층건물에 작용하는 풍하중을 정확히 예측할 수 있지만, 현재 실무에서는 풍력실험을 통해 평가된 정적풍하중을 전체 설계 과정에서 고정된 하중으로 취급하고 있다. 그러나 구조물에 작용하는 풍하중은 바람의 정적(평균)성분, 변동성분 뿐 아니라 구조물과의 상호작용에 의한 공진성분으로 이루어져 있기 때문에, 구조물의 동적성분(유효강성, 질량, 감쇠 등)이 구조변경을 통해 변경되면 이에 따라 풍하중의 공진성분이 달라져 구조물에 작용하는 풍하중 크기가 변화하게 된다. 현재 실무에서는 설계과정의 편의성 때문에 이러한 점을 고려하고 있지 않다. 구조물이 같은 형상을 가지더라도 구조물의 강성이 작거나 크냐에 따라 구조물에 작용하는 풍하중 크기는 증가하거나 감소할 수 있다는 것을 고려하지 않고 있다.

일반적인 고층건물의 1차 고유진동수 범위는 0.1-1 Hz인데, 이 범위 내에서는 고유진동수가 증가할수록 스펙트럼값은 감소하는 것을 알 수가 있다. 이것은 구조물의 강성을 증가시켜서(고유진동수 증가) 고층건물에 작용하는 풍하중을 감소시킬 수 있음을 의미한다.

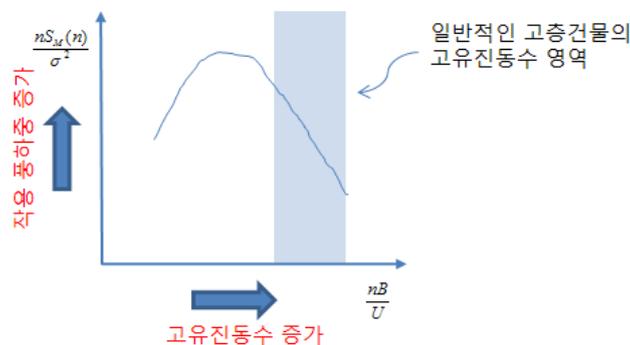


그림 1. 일반 고층건물의 풍력스펙트럼 특성

본 연구에서는 고층건물에 작용하는 풍하중 크기가 구조물의 고유진동수와 반비례하는 특성을 이용하여 고층건물에 작용하는 풍하중의 크기를 감소시키는 기법을 제안하였다. 구조물의 고유진동수를 효과적으로 증가시키기 위해서 본 연구에서는 변위기여도를 기반으로 한 재분배기법을 이용한다. 이 재분배기법은 효율적으로 부재의 단면을 재설계하여 구조물의 강성 및 고유진동수를 증가시킬 수 있음이 Seo et al.(2008)에 의해 입증되었다. 제안된 방법을 풍력실험을 실시한 실구조물에 적용하여 제안된 방법의 풍하중 감소 효과를 파악하였다.

2. 구조정식화

고층건물에 작용하는 풍하중 크기를 감소시키기 위해서는 경제성을 유지하면서 구조물의 강성을 증가시켜야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 재분배기법을 사용하였으며, 식 (2)-(3)와 같은 구조정식화를 구성하였다. 이것은 재분배 전후의 물량은 동일하게 유지하면서 구조물의 횡변위를 최소화하는 것을 의미한다. 이것을 랑그랑지 승수를 이용한 무제약 최소화 문제로 치환하여 적용하게 되면, 각 부재의 단면 크기를 결정하는 단면 조절계수 β_i 는 식 (4)에 의해 간단히 구할 수 있다. 변위기여도 δ_i 가 큰 부재는 단면조절계수 β_i 가 상대적으로 큰 값으로 결정되어 부재의 단면이 증가하게 되고, 변위기여도 δ_i 가 작은 부재는 단면조절계수 β_i 가 상대적으로 작은 값을 가지게 되어 부재의 단면은 감소하게 된다. 즉 단면조절계수 β_i 값에 의해 부재 단면 크기는 재조정되며 이를 통해 구조물의 물량은 유지하면서 구조물의 강성을 증가시킬 수 있다. 이는 구조물의 고유진동수 증가를 의미한다. 여기서, δ 는 제어하고자 하는 지점의 변위, δ_i 는 i 번째 부재의 변위 기여도, β_i 는 i 번째 부재의 단면조절계수, ρ_i 는 i 번째 부재의 밀도, L_i 는 i 번째 부재의 길이를 의미한다.

$$\text{Minimize } \delta = \sum \frac{\delta_i}{\beta_i} \quad (2)$$

$$\text{Constraint: } \sum \rho_i A_i L_i = \sum \beta_i \rho_i A_i L_i \quad (3)$$

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\delta_i}{\rho_i A_i L_i} \frac{\sum \rho_i A_i L_i}{\sum \sqrt{\delta_i \rho_i A_i L_i}}} \quad (4)$$

3. 예제

본 장에서는 풍력실험을 실시한 예제를 사용하여 2장에서 설명한 재분배 기법의 풍하중 감소 효과를 확인하였다. 여기서 재분배 기법은 구조물의 강성을 증가시켜 구조물의 고유진동수를 증가시킴으로써 구조물에 작용하는 풍하중을 감소시키기 위해 사용되었다.

예제 건물은 최고 높이 128.6m, 지상 37층의 철근 콘크리트로 만들어진 주상복합건물으로써, 지난 2000년도에 풍력실험이 실시되었다. 대상 구조물의 건설지는 서울지역으로써, 풍력실험에 적용된 기본풍속은 35m/s, 노풍도에 따른 경도풍 고도와 풍속의 고도분포지수는 각각 450m, 1/3 이며, 이에 따른 설계풍속은 37.08m/s이다. 풍력실험 모형은 실 건물의 1/400 축소모형을 제작하여 사용하였으며, 주변 모형 재현범위는 중심 반경 400m으로 하였다. 풍력실험은 10도마다 풍향을 변화시켜 가면서 실험을 진행하였으며, 이 중에서 가장 큰 밀면전단력이 발생한 풍향의 풍력실험데이터를 선택하여 구조물에 작용하는 풍하중을 산정하였다.

본 연구에서는 플랫 플레이트(Flat Plate)는 재분배 과정에서 제외시키고, 단순히 외부기둥, 아웃리거, 전단벽만 재분배 과정에서 고려하여 부재 단면 변경이 가능하도록 하였다. 본 연구에서 사용한 재분배 방법은 재분배에 의해 변동된 동특성 변화에 의해 수정된 풍하중을 구조물에 적용하여 재분배 전후의 최대 횡변위 수준을 유지하면서 구조물의 물량을 감소하도록 하였다. 여기서 재분배 전후의 횡변위 수준은 사용성 평가 기준을 만족한다고 가정하였다. 재분배기법은 구조물의 물량을 유지하면서 구조물의 횡변위를 감소시키는 효과를 가지고 있기 때문에, 이 기법을 재분배 전후의 횡변위가 동일하게 유지하도록 하면서 물량을 재분배한다면 구조물의 물량을 감소시킬 수 있다. 또한 재분배 자체의 특성뿐 아니라 구조물의 고유진동수 변동에 따른 구조물에 작용하는 풍하중의 감소에 따른 추가 물량 감소 효과를 기대할 수 있다.

제안된 방법을 예제에 적용 결과, 표 1과 같이 재분배 기법에 의한 구조물의 고유진동수 변동에 따른 구조물의 물량 감소 효과를 확인할 수 있었다.

표 1. 재분배 전후에 따른 고유진동수 및 구조물량 비교

	고유진동수(Hz)		횡변위(m)		밀면전단력(tonf)		구조물량(tonf)
	1차	2차	X방향	Y방향	X방향	Y방향	
재분배 전	0.2252	0.2572	0.254	0.135	714.09	1008.67	17086.56
재분배 후	0.2577	0.2870	0.165	0.113	723.83	852.72	16048.15

4. 결론

고층건물에 작용하는 풍하중은 일반적으로 대상 구조물의 고유진동수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 가진다. 즉, 대상구조물의 고유진동수가 달라지면 구조물에 작용하는 풍하중이 달라진다. 그러나 실무에서는 이러한 특성을 이용하지 못하고, 초기에 풍력실험을 통해 정해진 풍하중을 그대로 사용하였다. 한편 재분배 기법은 구조물의 강성을 조절하여 효과적으로 구조물의 고유진동수를 증가시키는 특성을 가진다.

이러한 점을 활용하여 본 연구에서는 고층건물에 작용하는 풍하중을 재분배 기법을 이용하여 감소시키고 이를 통해 구조물의 물량을 추가적으로 감소시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 개발된 이 방법은 풍력실험을 실시한 실 구조물 예제에 적용하여 기법의 효율성 및 적합성을 검토하였다. 적용 결과, 물량 재분배를 통해 구조물의 고유진동수는 증가되었으며, 이 변화된 동특성을 풍력실험데이터를 기반으로 한 풍하중 산정 과정에 적용한 결과 구조물에 작용하는 풍하중의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 구조 물량의 감소 효과를 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2005년 명문대학교 교내연구비 지원사업으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능케한 학교당국에 감사드립니다.

참고문헌

- 대한건축학회 (2005) 건축구조설계기준 (KBC2005), 기문당
- C. M. Chan, J. K. L. Chui and M. F. Huang (2009) Integrated aerodynamic load determination and stiffness design optimization of tall buildings, *Struct. Design Tall Spec. Build.* 18, pp.59-80
- Ji Hyun Seo, Weon-Keun Song, Yun Han Kwon, Kappyo Hong and Hyo Seon Park (2008) Drift design model for high-rise buildings based on resizing algorithm with a weight control factor, *Struct. Design Tall Spec. Build.* 17, pp.563-578
- Griffis, L. G. (1993) Serviceability limit states under wind load, *Engineering Journal AISC*, 1st Qtr 1-16