한국전산구조공학회
2004년도 가을 학술발표회 논문집

# 주기 조절을 이용한 고층 건물의 풍응답 조절 설계
# Wind Induced Vibration Design for High-rise buildings through Control of Natural Period

김 지 은* 차 성 희** 서 지 현*** 박 효 선****
Kim, Ji Eun Cha, Sung Hee, Seo, Ji Hyun, Park, Hyo Seon

## Abstract

As the slenderness ratio of a high-rise building increases, the lateral load resisting system for the building is more often determined by serviceability design criteria. In serviceability design, the maximum drift and the level of vibration are controlled not to exceed the design criteria. 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. Development of practical design method for wind induced vibration is required. Generally, wind induced acceleration responses are depending on several variables such as the weight density of a building, damping ratio, the natural period, and etc.. All parameters except the natural period or frequency are usually out of reach for structural engineers, then the wind acceleration response may be proportioned to the natural period.

Therefore, in this paper, a wind induced vibration design method based on frequency control technique for high-rise is proposed. The method is applied to vibration design of a 25-story office building for performance evaluation.

키 워 드 : 고층 건물, 풍가속도응답, 재분배 기법, 고유주기조절,
Key-word : high-rise building, wind-induced vibration, resizing technique, natural period control

## 1. 서 론

최근 건축물의 고층화에 따라 풍하중에 의한 수평 변위와 수평 진동 등의 강성 평가 지표가 설계 시 주요한 문제로 부각되고 있다. 따라서 고층건물은 강풍에 대한 풍응답과 최대변위가 각국의 기준이나 건물주의 요구에 의한 한도를 초과 하지 않도록 설계, 시공되고 있다. 그 중 수평 변위 조절기법은 구조최적화, 재분배 기법 등의 형식으로 다양하게 연구 개발되어 왔으며 특히 최근 재분배기법은 실무에서 그 적용성이 점차 확대되고 있다.[2), 3), 4), 5), 6), 7)] 그러나 고층건물 구조설계의 경우 횡변위에 대한 제한을 만족해도 과도한 진동이 발생할 수 있으며 건물의 사용자나 거주자에게 신체적 심리적인 불쾌감을 주는 사용성 (serviceability)을 개선하지는 못 할 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히 경량 간막이벽 및 무거운 외장재의 사용감소 등으로 인한 건물 밀도의 경량화 (144kg/㎥~192kg/㎥) 그리고 셋백 (set back), 용접구조물의 증가, 새로운 건축재료의 개발 등에 의한 감쇠율 감소는 풍하중에 의한 수평 진동 조절의 중요성을 더욱 부각시키고 있다.

* 연세대학교, 건축도시공학부, 석사과정(exelly@yonsei.ac.kr)
** 연세대학교, 건축도시공학부, 석사과정(shsy1008@empal.com)
*** 연세대학교, 건축도시공학부, 박사과정(seojh@yonsei.ac.kr)
**** 연세대학교, 건축도시공학부, 부교수(hspark@yonsei.ac.kr)

이러한 구조물 수평 진동에 대한 사용성은 사용자가 진동을 인지하는 정도 또는 불편하게 느끼는 정도로 나타내게 되며 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 필요성은 오랫동안 지적되어 왔다.

본 논문에서는 초기 설계 단계에서 적용할 수 있는 풍응답 설계법을 개발하고자 한다. 우선 다양한 약식 평가기법을 살펴보고 평가식에서 정의된 풍가속도응답을 설계자가 조절 할 수 있는 고유주기의 함수로 나타낸 후 고유 주기 조절기법을 적용하는 풍가속도 응답 설계법을 개발하고자 한다. 개발된 설계법은 25층 가새-철골 사무소 건물을 적용하여 그 성능을 평가하고자 한다.

## 2. 풍응답 설계 평가식

### 2.1 각 국의 풍응답 가속도 평가 기준

일본 건축학회의 주거성능 평가지침 (AIJ)과 ISO 기준, 그리고 캐나다 기준 (NBCC 90)에 제시되어 있는 사용성 평가에 대한 값들을 간단히 비교 하였다. 각 국의 풍응답 가속도 평가 기준은 모두 거주자의 감각을 규범으로 설정근거로 하고 있다. 그러므로 표 1과 같이 사용성에 대한 평가는 응답 가속도를 기준으로 한다.

표 1 사용성 평가 기준

| 기준 | 응답 가속도 | 평가시간 | 풍속재현기대치 | 건축물 구분 | 평가 |
|---|---|---|---|---|---|
| AIJ | 최대값 | 10분 | 1년 | 주거용도/사무용도 | 4단계 |
| ISO | rms 값 | 10분 | 5년 | 통상건축물/해양/정밀작업지 | 5단계 |
| NBCC 90 | 최대값 | 1시간 | 10년 | 주거/사무소 | |

#### 2.1.1 일본 건축 학회

일본 건축학회의 기준은 거주환경으로서의 성능을 유지하는 관점에서 강풍에 의해 건축물에 발생하는 1초~10초 (0.1Hz~1.0Hz) 사이의 수평진동을 대상으로 한다. 대상건축물은 주거용도와 사무용도로 나뉘어 있고 평가 진동레벨은 재현주기 1년의 10분 평균풍속을 대상으로 한 최대 가속도 값이다. 일본의 경우는 "거주환경에 있어서 진동을 느끼지 않을 것"을 전제로 한 지각영역을 기반으로 평가가 이루어지고 있다.

#### 2.1.2 ISO 기준

ISO 기준은 고유진동수 1초~15.9초 (0.063Hz~1Hz)를 대상으로 하고 가속도의 rms값으로 평가한다. 일반적으로 폭풍과 연관되어 10분 이하로 지속되는 경우 인간의 기억에 강하게 각인되지 않으므로 이 기준은 10분을 초과하여 지속되는 경우에 대하여 나와 있다. 1년 재현주기에 대한 기준은 시험적으로 5년 재현주기 기준에 0.72를 곱한 값을 적용할 수 있다. 진동 평가 시 사용되는 기준은 C1F1, C2F1, C1F2, C2F2의 4가지로 구분된다. C1F1는 일반적 용도의 건물에서 드물게 발생하는 진동에 대한 평가이고, C2F1는 고정해상구조물에서 드물게 발생하는 진동에 대한 평가이며, C1F2와 C2F2는 각각 특수한 목적의 구조물에서 자주 발생하는 진동에 대한 평가 중 명백히 움직임이 없어야 할 환경과 반복적인 정밀 작업이 수행되는 건물에 대한 평가

이다. 고층건물의 경우, 건축물의 용도에 따른 별개의 평가곡선을 설정하고 있고, 일반적 용도에는 고정레벨, 명확하게 진동이 발생해서는 아니 되는 건축물에는 최소지각한계, 정밀작업을 행하는 용도에는 평균지각한계로 설정 근거를 하고 있다.

2.1.3 캐나다 기준

캐나다 기준은 중력가속도 g를 이용한 가속도응답을 나타내고, 1시간 평균풍속을 기준으로 한다. 일본기준과는 달리 단순히 느끼는 정도가 아닌 불만의 비율을 기반으로 한 기준이다. 예를 들어 주거자가 진동을 지각하는 기회를 10년에 1회로 정하고 있으며, 허용응답가속도를 아파트의 경우 0.01g등으로 정하고 있다.

2.1.4 각 국의 풍응답가속도 기준 그래프

일본기준, ISO 기준, 캐나다 기준을 재현주기 1년 10분 평균풍속으로 치환하여 나타내었으며, 캐나다 기준의 경우 식(1)의 보정계수를 이용하여 10분 평균풍속, 재현주기 1년의 기준으로 변환하였다.

$$\{(ln(1yr)+5.6)/(ln(10yr)+5.6)\}^2 \tag{1}$$

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

2.2 풍가속도응답 평가 기법

풍가속도응답 평가는 풍방향과 풍직각방향의 가속도응답을 구하고, 그 중의 큰 값에 대한 가속도응답이 만족하도록 하게 된다. 본 논문에서는 풍방향 가속도응답 평가식으로는 Solari Method[10]을, 풍직각방향 가속도응답 평가식으로는 호주기준을 이용해서 풍응답가속도를 평가해 보았다.

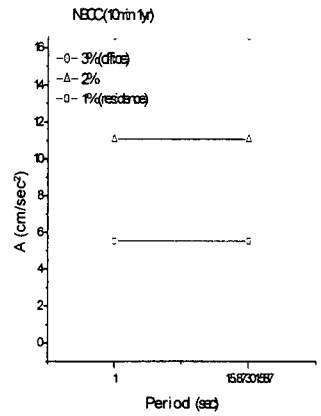


그림 1-a) 캐나다 기준

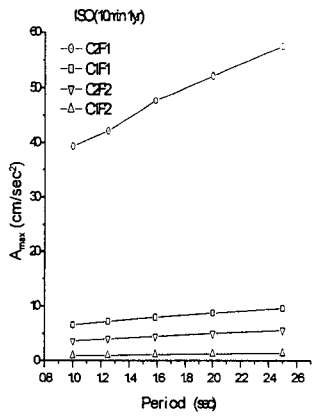


그림 1-b) ISO 기준

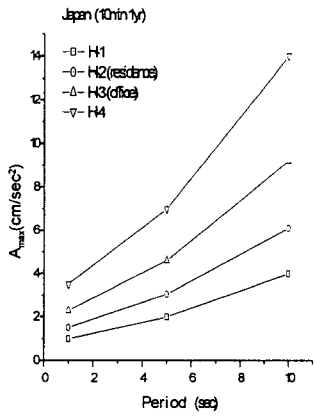


그림 1-c) 일본 기준

그림 1 각 국의 풍응답가속도 기준 그래프

2.2.1 풍방향 (Along-wind) 가속도 응답

1) Solari Method

밑면길이(D), 밑면가로길이(B), 건물높이(H)중 최소값을 $\Delta$로 정한다. 건물의 단위길이당 질량 m(z)과 공기밀도 $\rho$를 계산한다. 모드질량 M1= m/3을 계산한다. 건물의 고유주기와 감쇠비를 결정하고 풍상면 풍압계수 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 (2)에 의해 구한다.

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

위의 값들을 결정한 후 Solari Method[10]를 이용하여 계수값들을 구한 후, 다음 식 (3)으로 최상층에서의 최대가속도를 구한다.

$$\hat{\ddot{X}} = g_a \ddot{X}_s \tag{3}$$

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

2.2.2 풍직각방향 (Across-wind) 가속도 응답

고층건물의 풍직각방향 진동은 와류(Vortex Shedding)에 의해 발생한다. 와류에 의해 발생하는 풍직각방향의 진동 주파수는 다음 식 (4)와 같다.

$$f = \frac{V \times S}{D} \tag{4}$$

V=건물최상층에서 평균풍속(m/sec)

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

D=건물폭(m)

1) SAA 83 (호주 기준)

호주기준에서는 풍직각 가속도응답을 구하기 위한 약산식을 제안하고 있다. 먼저 평균제곱근 변위 응답은 다음 식 (5)에 의해 결정된다.

$$Y_{rms} = 0.00015 \frac{\rho}{\rho_b} \sqrt{\frac{A}{\xi_1}} \left( \frac{V_H}{n_1 \sqrt{A}} \right)^{3.5} \tag{5}$$

여기서, $\rho$ : 공기밀도 $\rho_b$ : 건물밀도 $A$ : 건물의 단면적 $\xi_1$ : 감쇠비
$V_H$ : 최상층 1시간 평균풍속 $n_1$ : 풍직각방향의 건물 고유주파수

그리고 평균제곱근 가속도 응답은 $\ddot{Y}_{rms} = (2\pi n_1)^2 Y_{rms}$이며, 최종적으로 최대가속도는 근사적으로 평균제곱근 가속도응답의 4배로 다음 식 (6)에서 구한다.

$$\hat{\ddot{Y}}_{rms} = 4 \ddot{Y}_{rms} \tag{6}$$

## 3. 주기 제어 방법

### 3.1 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 (7)과 같이 동적 변위기여도로 정의한다.

$$\begin{aligned}\delta_t &= \sum_{i=1}^{m} \delta_{(i)} \\ &= \sum_{i=1}^{m} \left\{ \int_0^l \frac{N_i^L N_i^U}{EA_i}\,dx + \int_0^l \frac{M_i^L M_i^U}{EI_i}\,dx + \alpha \int_0^l \frac{V_i^L V_i^U}{GA_i}\,dx \right\}\end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $\delta_t$ 는 제어하고자 하는 구조물 지진하중에 대한 최상층의 변위이며, $\delta_i$는 $i$번째 부재의 동적변위기여도를 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. $A_i$ $I_i$는 각각 $i$ 번째 부재의 단면적, 단면 2차모멘트이며, $E$, $G$, $\alpha$는 탄성계수, 전단 탄성계수, 전단에 관한 단면형상에 따른 계수이고, $m$은 구조물을 구성하는 전체 부재의 수이다.

### 3.2 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 (8), (9)과 같이 표현하였다.

$$\text{Minimize} \quad \delta_t = \sum_{i=1}^{m} \frac{\delta_i}{\beta_i} \tag{8}$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i=1}^{m} \beta_i \rho_i A_i L_i = \sum_{i=1}^{m} \rho_i A_i L_i \tag{9}$$

여기서, $A_i$, $L_i$는 각각 부재 $i$의 단면과 길이이고, $\rho_i$는 밀도이며, $\beta_i$는 부재 $i$의 동적 단면수정계수이며, $m$은 총 부재수 이다. 이러한 정식화는 Lagrange Multiplier($\lambda_L$)를 이용한 무제약 최소화 문제로 치환하게 되며, Kuhn-Tucker 조건을 이용한 동적 단면수정계수는 다음 식 (10)과 같이 구하게 된다.

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\delta_i}{\rho_i A_i L_i}} \frac{\sum_{i=1}^{m} \rho_i A_i L_i}{\sum_{i=1}^{m} \sqrt{\delta_i \rho_i A_i L_i}} \qquad (i = 1, m) \tag{10}$$

각 부재의 단면 성능을 식 (14)에서 구한 $\beta_i$의 값에 의하여 변화시킴으로써, 제약조건 식 (13)과 같이 구조물 전체의 중량을 변화시키지 않고, 제어하고자 하는 해당 변위 $\delta_t$를 식 (12)에 의한 값으로 최소화하여 예측할 수 있다. 앞에서 제시한 재분배 기법에 의해 주기를 제어하는 방법을 다음의 flow chart로 표현하였다

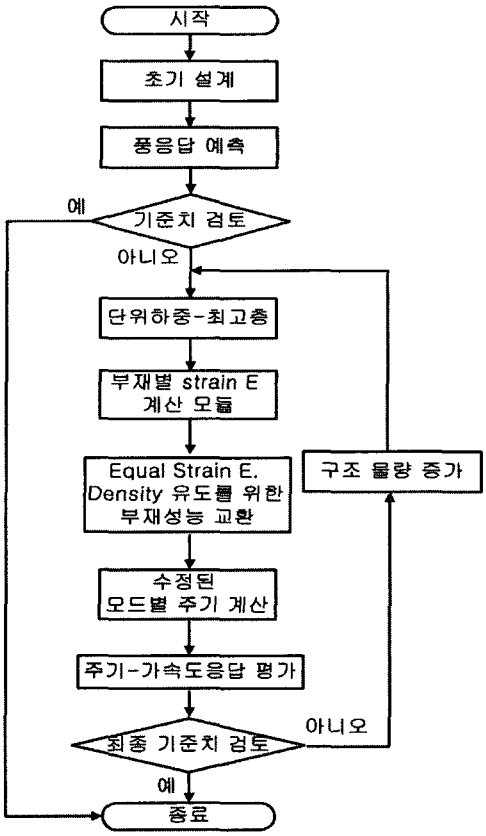


그림 2 Flow Chart

## 4. 적용 예제

예제 구조물은 그림 1과 같이 25층 철골 가새골조 구조물로써, 전체 층고는 107.3m 이다. 거더는 SWS41 (Fy=2400kg/cm$^2$)을 사용하였으며, 기둥은 SWS50 (Fy=3300kg/cm$^2$)을 사용하였다. 가속도 응답을 평가하기 위한 Solari Method (along-wind)를 위한 변수값은 다음 표 와 같고, 호주규준 (across-wind)에 의한 평가는 본 논문의 2.2.2장 약산식으로 계산하였다.

표 2 Solari Method를 위한 변수값

| | |
|---|---|
| 건물의 높이 H (m) | 107.7 |
| 건물의 폭 B (m) | 28 |
| 최소값 delta (m) | 0.98 |
| 건물 밀도 (kg/m^3) | 161 |
| 공기 밀도 (kg/m^3) | 1.25 |
| 감쇠비 | 0.05 |

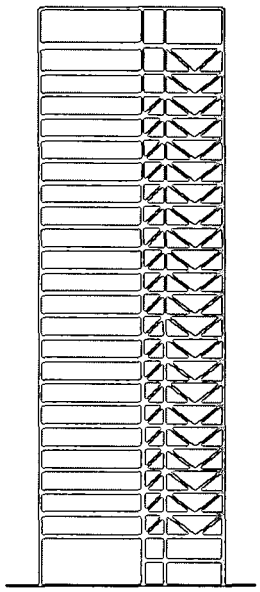

그림3 예제 건물의 입면

표 3 재분배 전후의 각 모드 별 주기 변화

| 모드 | 분배전 | 분배후 | 변화율 (%) |
|---|---|---|---|
| 1차 mode | 2.97552 | 2.44713 | -17.76 |
| 2차 mode | 0.96446 | 0.81390 | -15.61 |
| 3차 mode | 0.57324 | 0.46563 | -18.77 |
| 4차 mode | 0.38257 | 0.33189 | -13.25 |
| 5차 mode | 0.23950 | 0.23378 | -2.39 |

표 4 주기 변화에 따른 가속도응답의 변화

| | 분배전 | 분배후 | 변화율 (%) |
|---|---|---|---|
| Along-Wind Solari Method (m/s^2) | 0.15535 | 0.12448 | -19.87 |
| Across-Wind SAA 83 (호주 기준) | 0.23867 | 0.17801 | -25.42 |

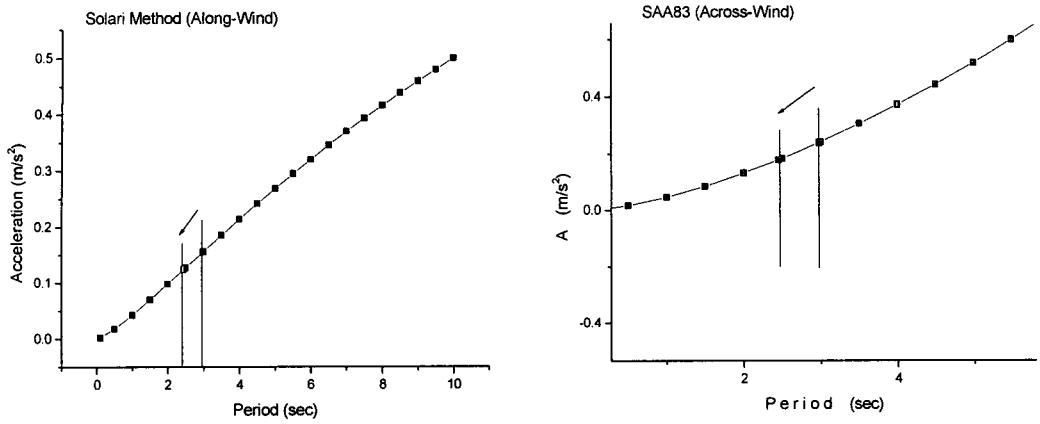


그림 4 25층 가새-철골 건물의 풍응답 가속도 그래프

## 5. 결 론

25층 철골 가새 프레임 2차원 모델을 대상으로 했을 때 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 재분배 기법을 이용했을 때, 전체 물량의 변화 없이 고유주기 뿐 아니라 1차부터 5차까지의 주기를 모두 줄어듦을 확인하였다.

2) 예제 모델을 통해 주기와 풍가속도응답 관계가 비례관계임을 확인하였다.

3) 따라서 초기 설계단계에서 재분배 기법을 이용하여 고유주기를 줄여줌으로써 풍가속도응답을 줄여줄 수 있었다.

철골을 사용함에 따라 감쇠비가 줄어들고, 건물이 경량화되면서 건물 중량 밀도도 줄어드는 경향을 보인다. 본 연구는 감쇠비와 건물 밀도를 초기 설계단계에서 고정시켜놓고 물량의 재분배만을 통해서 건물의 고유주기를 감소시킴으로써 건물의 가속도응답을 줄여주게 된다. 즉, 풍동실험등을 거치지 않고 초기 모델링 만을 통해서 가속도응답을 제어할 수 있으므로 경제적인 설계에 도움이 될 수 있을 것이다.

## 6. 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C103A1040001-03A0204-00210)의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Forrest-Brown, G. and Samali, B., "Practical Optimization of Framed Structures Using Virtual Work Principals,", Tall Buildings,, CTBUH, 1990, pp.1019-1029.
2. 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
3. Park, H. S., Hong K., and Seo, J. H., "Drift design of steel-frame shear-wall systems for tall

buildings", The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 11, 2002, pp.35-49
4. Park HS and Ahn SA "Resizing methods for drift control of tall steel structures." , Structural Steel PSSC'98, Vol. 2, pp.1017-1022
5. 서지현, 박효선 "철골 프레임 시스템의 강도설계를 고려한 재분배 기법의 개발", 대한 강구조학회 학술발표대회 논문집 , 2003, pp.409-414
6. 서지현, 박효선(2003). 부재력 특성을 고려한 변위조절설계법개발, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집 제16원 제2집, pp 123-129.
7. 김준희, 박효선 "지진하중을 받는 철골 구조물의 재분배 기법을 이용한 변위제어기법 개발", 대한 건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 2003, pp83-86
8. 이영치 "건축의 내진·내풍 입문", 공간출판사, 2004, p.139
9. Song, Hwa Cheol "Evaluation of Serviceability for Tall Building Structures", Journal of the Industrial Technology Research Institute, Vol 17. 1999.
10. Giovanni Solari "Alongwind Response Estimation : Closed From Solution", Journal of the Structural Division, Vol. 108. No. January, 1982.
11. 윤성원, 박수용 "국내 철골조건물의 강풍에 대한 사용성곡선", 대한건축학회 논문집, 17권9호, 2001
12. Yin Zhou, Tracy Kijewski, Ahsan Kareem, "Along-Wind Load Effects on Tall Buildings : Comparative Study of Major International Codes and Standards, Journal of Structural Engineering, June 2002.
13. Wojtec Jesien, Theodore Stathopoulos, H. Kinh Ha, "Dynamic Along-Wind Response of Buildings : Comparative Study", Journal of Structural Engineering, Vol. 119, N0. 5, May, 1993.
14, National Building Code of Canada : 1990 Part4 Structural Design 4
15. ISO 6897 : 1984 Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed Structure, especially buildings and off-shore structures, to low frequency horizontal motion
16. 日本建築學會 : 건축물 하중지침 및 설계