

비정형 초고층 건물의 바람에 의한 편심응답 특성

Characteristics of wind-Induced Coupled Motion of Tapered and Setback Tall Buildings

김 용 철*
Kim, Yong-Chul

칸다 준**
Kanda, Jun

타무라 유키오***
Tamura, Yukio

Abstract

For most of recent tall buildings, one characteristic is that their building shapes vary with height such as taper and setback, and this implies that the distribution of their structural components may also vary with height. Because of these structural variations, although the sectional shapes of these buildings are symmetric, it is difficult to say whether or not they are structurally symmetric. The acceleration responses of structurally asymmetric tall buildings are larger than those of non-eccentric buildings, thus raising the possibility of problems during strong winds and typhoons. This paper describes wind tunnel tests carried out using building models with height variations and acceleration response analyses, and discusses the resulting response characteristics. For tapered and setback buildings, although the across-wind accelerations are larger than those of a square building, the total root-mean-square accelerations remain small because of smaller along-wind and torsional rms accelerations. And it was found that the effects of statistical couplings between along-wind force and other two forces are negligible.

Keywords : Wind-induced coupled motion, Tapered tall building, Setback tall building, eccentricity, acceleration

1. 서 론

건물이 고층화 될수록 횡하중이 커지게 되어, 수직하중과 함께 횡하중을 고려하여 구조설계가 이루어진다. 특히 초고층 프로젝트에 있어서 바람에 의한 동적응답을 예측하는 것은 대단히 중요한 것으로, 1000m가 넘는 초고층 프로젝트가 제안되고 있는 현실을 고려해보면, 풍하중의 중요성은 점점 더 커지고 있다. 또 최근 초고층 건물의 하나의 특징은

높이방향으로 건물의 형상이 변화한다는 것으로, 이러한 높이방향으로의 형상변화는 풍하중을 크게 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

하지만, 높이방향으로의 형상변화로 인해 전단벽이나 브레이스와 같은 구조부재가 불규칙적으로 배치될 수 있고, 이러한 불규칙적인 구조부재의 배치로 인해 단면형상이 대칭이라고 하더라도, 구조적으로는 비대칭이 되어 편심이 발생 할 수 있다. 그리고 편심 초고층 건물의 가속도응답은 구조적으로 대칭인 초고층 건물의 가속도응답에 비해 일반적으로 커지게 되므로¹⁾, 강풍이나 태풍이 발생할 경우에는 거주자에게 구토나 현기증과 같은 문제를 일으킬 수 있다. 즉, 구조적으로 비대칭인 초고층 건물의 경우에는 건물에 작용하는 외력간의 상관과 편심에 의한 기계적인 상관을 고려한 세심한 응답해석이 이루어져야 한다.

지금까지 편심응답에 관한 많은 연구¹⁾²⁾가 있지만, 통상적인 정방형 형상의 초고층 건물만을 대상

* 교신저자, 동경공예대학, 풍공학 연구센터, GCOE준교수.
Tokyo Polytechnic University, Wind Engineering
Research Center, GCOE Associate Professor.
Tel: +81-46-242-9927 Fax:+81-46-242-9927
E-mail : kimyc@t-kougei.ac.jp,

** 정회원, 일본대학, 건축학과, 특임교수.
Nihon University, Department of Architecture
Professor.

*** 정회원, 동경공예대학, 풍공학 연구센터, 교수.
Tokyo Polytechnic University, Wind Engineering
Research Center, Professor.

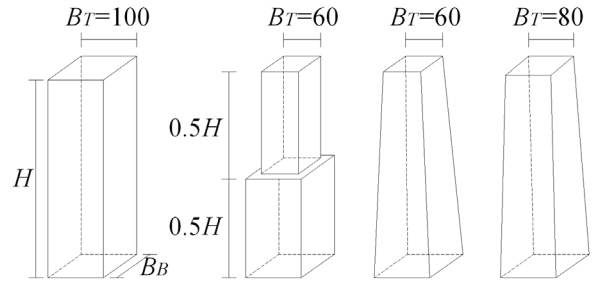
으로 하고 있고, 비정형 초고층 건물에 대한 연구는 거의 없다고 할 수 있다. 본 연구에서는 비정형 초고층 건물의 바람에 의한 편심응답 특성을 알아보는 것을 주요 목적으로, 풍동실험을 통해 얻은 전도모멘트의 파워스펙트럼과 random vibration theory를 이용하여 다양한 편심거리와 방향에 대한 응답 해석을 수행하였다. 또, 풍방향 하중과 다른 두 하중과의 상관성이 응답에 미치는 영향에 대해서도 조사하였다. 본 연구에서는 다양한 편심에 대한 전체 가속도응답의 모형별 비교에 초점을 두었고, 각 편심거리가 건물의 고유진동수에 미치는 영향에 대해서는 고려하지 않았다.

2. 풍동실험개요

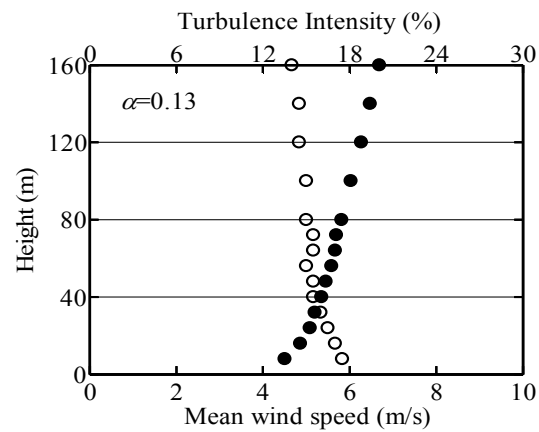
풍동실험은 동경대학교 소유의 Effel-type 풍동실험실에서 행하였다. 풍동실험실은 폭이 1.8m, 높이가 1.8m, 길이가 12.5m로 약 0.5m/s에서 13m/s까지 측정 가능하다 (난류강도 0.5%미만). <Fig. 1>에 본 연구에서 사용한 모형과 전도모멘트의 정의를 나타내었다. 실험 모형의 높이 (H)와 밑면 (B_B)은 각각 400mm와 100mm이고, 윗면 (B_T)은 모형별로 60mm에서 100mm이다. 테이퍼 (이하, TP1 혹은 TP2) 및 셋백 (이하, SB) 모형의 유효 폭 (B_{EQ})은 Tamura et al.³⁾과 같은 방법으로, 테이퍼와 셋백모형의 체적과 같은 체적을 가진 정방형 모형의 단면 폭을 유효 폭 (B_{EQ})으로 정의하였다. 즉, 정방형 모형 (이하, SQ)의 유효 폭은 $B_{SQ}=100\text{mm}$, SB의 유효 폭은 $B_{SB}=82\text{mm}$, TP1의 유효 폭은 $B_{TP1}=81\text{mm}$, TP2의 유효 폭은 $B_{TP2}=90\text{mm}$ 이다. 모형은 balsa로 되도록 가볍게 제작하였고, 전도모멘트는 모형 밑면에 설치된 5분력계 (Nissho LMC-5510-50N)로 측정하였다. 샘플링 주파수는 1,000Hz로 하여 실시간 10분의 시간이력 데이터가 42개가 되도록 계측시간을 조정하였다. 실험기류의 난류적분스케일과 모형의 크기를 고려하여 풍동실험의 길이 스케일은 1/400, 속도 스케일은 1/5.7로 가정하였다.

<Fig. 2>에 본 연구에서 사용된 평균풍속과 난류강도의 연직분포를 나타내었다. 교외지역에 상당한 난류계층 ($\alpha=0.13$)으로, 모형 높이에서의 평균풍

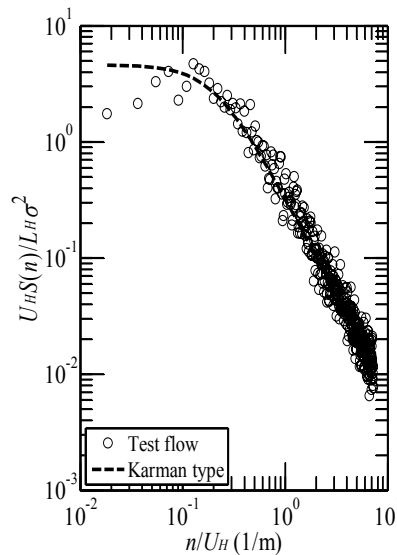
속은 $U_H=6.5\text{m/s}$, 난류강도는 $I_{u,H}=15\%$ 이다.



<Fig. 1> Experimental model.



<Fig. 2> Profiles of mean wind speed and turbulence intensity.

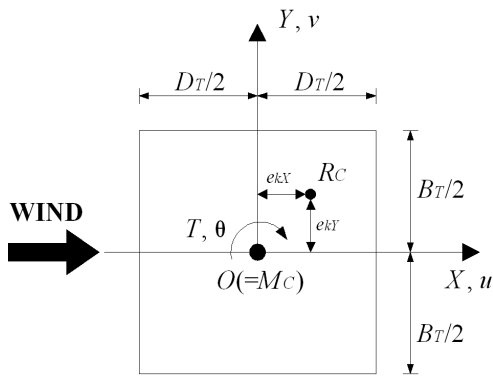


<Fig. 3> Power spectra of test flow.

<Fig. 3>은 모형 정상부에서의 변동풍속의 파워스펙트럼으로, 실험 기류는 Karman형 파워스펙트럼과 잘 일치함을 알 수 있다. 모형의 폭과 모형 높이에서의 평균풍속으로 정의된 레이놀즈 수는

45,000이고, 모형에 의한 폐쇄율은 1.2%로, 폐쇄율에 대한 실험 데이터의 보정은 실시하지 않았다.

<Fig. 4>에 본 논문에서 사용된 기호와 좌표의 정의를 나타내었다. O 는 단면중심, R_C 는 강성중심, M_C 는 질량중심으로 질량중심은 단면중심과 일치한다고 가정하였고, 강성중심만 X 축과 Y 축 방향으로 변화하는 경우만 고려하였다 (각각, e_{kX} 와 e_{kY}). 건물의 전체 가속도응답은 최상층 코너부 ($\pm B_T/2$, $\pm D_T/2$)에서 구하였고, 풍향은 바람이 건물에 수직으로 작용하는 경우만 고려하였다.



<Fig. 4> Generalized coordinate system.

3. 운동방정식

편심을 가진 초고층 건물은 풍방향 하중, 풍직각 방향 하중과 비틀림 모멘트가 coupled되어 복잡한 응답형상을 보인다. 본 연구에서는 편심응답의 해석 방법으로 단순화된 Rayleigh-Ritz method¹⁾를 사용하였다. 이 방법은 건물전체의 자유도를 중요한 몇 개의 자유도로 줄여서 운동방정식을 푸는 것으로, 편심의 영향은 식 (1)에서와 같이 질량, 감쇠 그리고 강성 매트릭스에 반영된다. 대부분의 초고층 건물에 있어서 세 방향의 모드형상은 거의 같고, 바람에 의한 응답은 저차 모드만 고려해도 충분하므로¹⁾, 응답 해석에 있어서 각 방향의 1차 모드만 고려하였다. 즉, N 층의 초고층 건물의 자유도는 $3N$ 이지만, 위 가정으로부터 초고층 건물의 자유도는 3으로 줄어들게 된다. 모드형상은 벤딩형 모드형상으로 가정하였다 ($\phi_i(h)=(h/H)^{1.3}$, $i=u, v$ 와 θ). 또 각 층의 강성중심은 같은 위치에 일직선상에 있고, 각 층의 회전강성은 같다고 가정하였다. 그러므로 바람에 의한

초고층 건물의 최상층 전체 rms가속도응답은 3자유도계 (u, v 와 θ)의 탄성 시스템으로 모델링하여 구할 수 있다. 가속도의 공분산은 random vibration theory로 구할 수 있고, 전체 rms가속도응답은 공분산의 요소들로부터 구할 수 있다.

위의 가정을 바탕으로 연성된 3자유도계의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M\ddot{\mathbf{d}} + C\dot{\mathbf{d}} + K\mathbf{d} = \mathbf{f} \quad (1)$$

여기서,

$$\mathbf{d} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \theta \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & -e_{mY}m \\ 0 & m & e_{mX}m \\ -e_{mY}m & e_{mX}m & I \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{XX} & 0 & -e_{cY}c_{XT} \\ 0 & c_{YY} & e_{cX}c_{YT} \\ -e_{cY}c_{XT} & e_{cX}c_{YT} & c_{TT} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{XX} & 0 & -e_{kY}k_{XT} \\ 0 & k_{YY} & e_{kX}k_{YT} \\ -e_{kY}k_{XT} & e_{kX}k_{YT} & k_{TT} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{Bmatrix} f_X \\ f_Y \\ f_T \end{Bmatrix}$$

\mathbf{d} 는 각 방향의 응답 벡터, \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} 는 각각 원점 O 에 대한 질량, 감쇠, 강성 행렬, \mathbf{f} 는 바람에 의한 외력 벡터이다. 연성 3자유도계의 운동방정식은 식 (2)와 같이 모드 μ 와 모드좌표 \mathbf{p} 를 사용하여 비연성 운동방정식으로 나타낼 수 있고,

$$\mathbf{d} = \mu\mathbf{p} \quad (2a)$$

$$\hat{\mathbf{f}} = \mu^T \mathbf{f} \quad (2b)$$

여기서, μ 는 각 열이 $\mu^T \mathbf{M} \mu = 1$ 이 되도록 무차원화 된 행렬 $\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}$ 의 고유벡터인 행렬이고, 또 \mathbf{C} 가 $\mu^T \mathbf{C} \mu = \text{diag}[4\pi\hat{\zeta}\hat{n}]$ 를 만족한다고 가정하면 식 (1)은 \mathbf{p} 를 이용하여 식 (3)와 같이 비연성 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\ddot{p}_i + 4\pi\hat{\zeta}_i\hat{n}_i\dot{p}_i + (2\pi\hat{n}_i)^2 p_i = \hat{f}_i \quad (3)$$

여기서 \hat{f}_i 는 i 차 모드의 외력으로, random vibration theory의 표준적인 spectral analysis를 이

용하여 rms가속도응답을 구할 수 있다. 주파수 영역에 있어서 i 차 모드의 외력의 파워스펙트럼 행렬 $S_f(\mathbf{n})$ 과 모드좌표 행렬 $S_p(\mathbf{n})$ 은 다음과 같은 관계가 있다.

$$S_{\ddot{p}}(\mathbf{n}) = \mathbf{H}(\mathbf{n})S_f(\mathbf{n})\mathbf{H}^*(\mathbf{n}) \quad (4a)$$

$$H_j(\mathbf{n}) = \frac{n^2}{\hat{m}_j^2 \hat{m}_j [(1 - n/\hat{n}_j)^2 + \Omega \zeta_j^2 n/\hat{n}_j]} \quad (4b)$$

여기서 $\mathbf{H}(\mathbf{n})$ 은 j 차 모드의 외력과 가속도응답에 대한 주파수 응답함수이고, \hat{m}_j 는 j 차 모드의 질량이다. 또, j 차 모드의 외력의 파워스펙트럼 행렬 $S_f(\mathbf{n})$ 과 풍동실험으로부터 구한 외력의 파워스펙트럼 행렬 $S_r(\mathbf{n})$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$S_f(\mathbf{n}) = \boldsymbol{\mu}^T S_r(\mathbf{n}) \boldsymbol{\mu} \quad (5)$$

$$S_r(\mathbf{n}) = \begin{bmatrix} \eta_X^2 S_{MY}/H^2 & \eta_X \eta_Y S_{MYMX}/H^2 & \eta_X \eta_T S_{MYMT}/H \\ \eta_Y \eta_X S_{MYMX}^*/H^2 & \eta_Y^2 S_{MX}/H^2 & \eta_Y \eta_T S_{MXMT}/H \\ \eta_T \eta_X S_{MYMT}^*/H & \eta_T \eta_Y S_{MXMT}^*/H & \eta_T^2 S_{MT} \end{bmatrix}$$

여기서, η_X , η_Y 와 η_Z 는 모드 보정계수⁴⁾ (<Table 1>)이고, S_{MY} , S_{MX} , S_{MT} 는 풍동실험으로부터 구한 전도모멘트의 파워스펙트럼, S_{MYMX} , S_{MYMT} 와 S_{MXMT} 는 전도모멘트의 크로스스펙트럼, *는 공액복소수행렬을 의미한다.

가속도의 공분산 $\Gamma_{\ddot{p}}$ 는 다음 식으로부터 구할 수 있고,

$$\Gamma_{\ddot{p}} = \int_0^{2\pi} \text{Re}[S_{\ddot{p}}(\mathbf{n})] d\mathbf{n} \quad (6)$$

건물 최상층의 가속도 응답의 공분산 $\Gamma_{\ddot{a}}$ 는

$$\Gamma_{\ddot{a}} = \boldsymbol{\mu} \Gamma_{\ddot{p}} \boldsymbol{\mu}^T = \boldsymbol{\mu} \mathbf{H}(\mathbf{n}) \boldsymbol{\mu}^T S_f(\mathbf{n}) \boldsymbol{\mu} \mathbf{H}^*(\mathbf{n}) \boldsymbol{\mu}^T \quad (7)$$

로부터 구할 수 있다. 따라서 건물 최상층에서의 rms가속도응답은 $\Gamma_{\ddot{a}}$ 의 각 요소를 이용하여 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$E(a_{Total}^2) = \sigma_{\ddot{u}}^2 + \sigma_{\ddot{v}}^2 + (B_T^2 + D_T^2)/4\sigma_{\ddot{\theta}}^2 + B_T |\sigma_{\ddot{u}\ddot{\theta}}| + D_T |\sigma_{\ddot{v}\ddot{\theta}}| \quad (8)$$

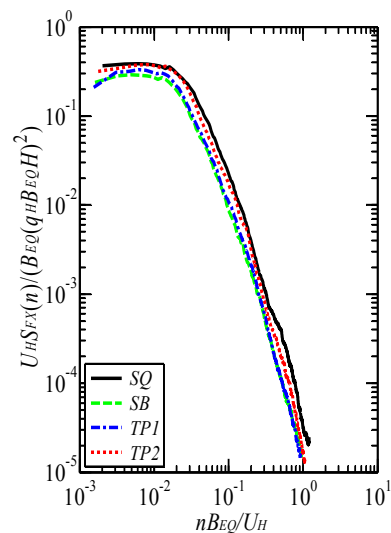
여기서, $\sigma_{\ddot{u}}$, $\sigma_{\ddot{v}}$ 와 $\sigma_{\ddot{\theta}}$ 는 공분산 $\Gamma_{\ddot{a}}$ 의 대각요소, $\sigma_{\ddot{u}\ddot{\theta}}$ 와 $\sigma_{\ddot{v}\ddot{\theta}}$ 는 공분산 $\Gamma_{\ddot{a}}$ 의 비대각요소이다.

4. 수치해석 결과

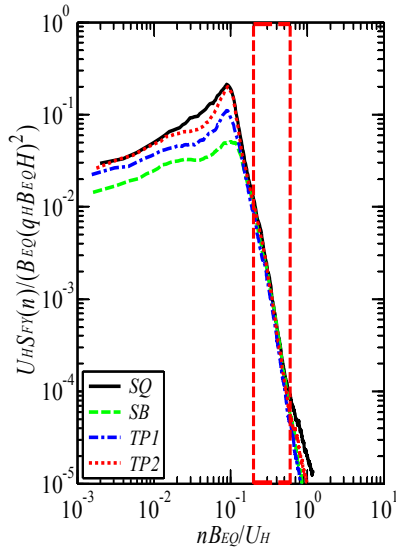
4.1 전도모멘트의 파워스펙트럼

풍방향, 풍직각방향 그리고 비틀림 모멘트의 파워스펙트럼을 <Fig. 5>부터 <Fig. 7>까지 나타내었다. X축은 무차원 주파수, Y축은 무차원 파워스펙트럼으로, 주파수 범위는 0.002에서 1.05Hz로 풍하중이 0.1에서 1.0Hz의 주파수 영역에 주로 분포되어 있다는 것을 고려할 경우⁵⁾, 풍응답 해석에 필요한 주파수 영역을 모두 포함하고 있다고 할 수 있다.

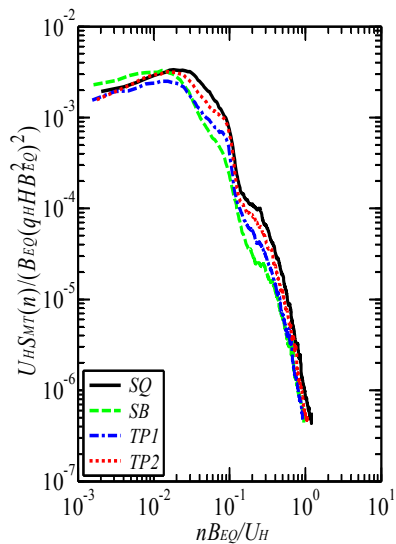
<Fig. 5>의 풍방향 파워스펙트럼 형상의 모형별 차이는 없지만, 파워의 차이는 명확히 나타나고 있다. 풍방향의 변동하중은 주로 접근류의 난류강도로부터 기인하기 때문으로, SB, TP1, TP2 그리고 SQ 순으로 파워가 커짐을 알 수 있다. 응답해석과 관련이 깊은 고주파수 영역에 있어서 파워스펙트럼이 감소하는 비율은 모형에 상관없이 $n^{-(8/3)}$ 이다.



<Fig. 5> Along-wind power spectra.



<Fig. 6> Cross-wind power spectra.



<Fig. 7> Torsional moment power spectra.

<Fig. 6>에 나타난 풍직각방향 파워스펙트럼에 있어서는 모형별 차이가 명확하게 나타남을 알 수 있다. 테이퍼와 셋백으로 인해 풍직각방향 변동풍력이, 특히 저주파수 영역에서, 크게 감소함을 알 수 있고, 무차원 주파수 0.1부근의 피크도 크게 감소함을 알 수 있다. 비슷한 체적과 단면적을 가진 SB와 TP1을 비교할 경우, SB의 감소가 더 큼을 알 수 있다. 그러나, 응답해석과 관련이 깊은 주파수 영역(빨간 점선 부분, $0.2 < n B_{EQ} / U_H < 0.6$) 영역에서의 파워를 비교해 보면, SB, TP1과 TP2의 파워는 SQ의 파

위와 거의 같거나 약간 큼을 알 수 있다. 이는 테이퍼나 셋백과 같은 형상변화는 대략 300년에서 500년 재현주기 풍속이 사용되는 안전성 설계에 있어서는 우수한 반면, 1년 ($n B_{EQ} / U_H \approx 0.2$)에서 10년 ($n B_{EQ} / U_H \approx 0.6$) 재현주기 풍속이 사용되는 사용성 설계에 있어서는 주의를 기울여야 함을 의미하고, Tamura et al.³⁾도 이러한 경향을 보고하였다.

비틀림 모멘트의 파워스펙트럼 (<Fig. 7>)에 있어서도 모형별 차이는 명확하게 나타났지만, 고주파수 영역에서의 차이는 거의 비슷한 것처럼 보인다.

4.2 편심 가속도응답 해석

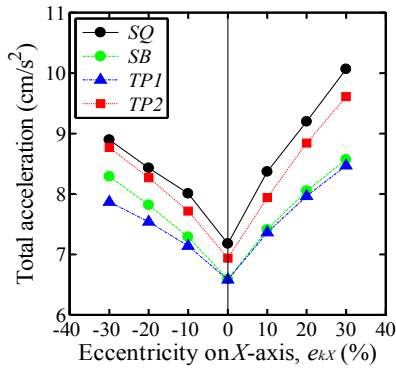
편심응답해석에 필요한 구조물의 동적특성을 <Table 1>에 나타내었다. SQ모델의 X축과 Y축의 고유진동수는 철골 건물의 높이와 고유진동수와의 관계로부터 구하였다⁶⁾. 테이퍼 모형의 고유진동수는 수치해석결과⁷⁾로부터 SQ의 고유진동수와의 비율로 구하였고, SB의 고유진동수는 비슷한 체적을 가진 TP1과 같다고 가정하였다. 또, T축의 고유진동수는 X와 Y축의 고유진동수보다 1/0.85배로 구하였다¹⁾. 편심거리로 X축으로 ($\pm 30, 0$), Y축으로 ($0, \pm 30$)까지 고려하였고, 편심거리는 각 모형의 유효 폭의 반 ($B_{EQ}/2$)에 대한 비율로 정의하였다.

<Table 1> Structural properties of tall buildings

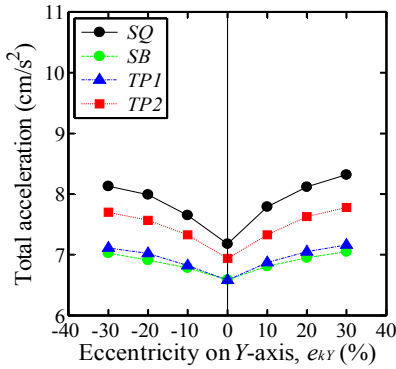
	SQ	SB	TP1	TP2
B_B (m)	40	24	24	32
B_T (m)	40			
B_{EQ} (m)	40	32.8	32.4	36
H (m)	160			
η	X, Y	0.9		
	T	0.53		
n_X, n_Y (Hz)	0.25	0.31	0.31	0.28
n_T (Hz) ($n_X/0.85$)	0.294	0.365	0.365	0.329
ζ	0.01			
ρ_B (kg/m ³)	180			
U_{H1} (m/s ²)	30			

<Fig. 8>에 전체 가속도응답 (a_{Total})의 변화를 나타내었다. SQ의 전체 가속도응답이 제일 크고, 편심

거리 및 방향에 대한 변화는 Islam¹⁾의 결과와 비슷하였다. 모형별 차이는 편심거리가 커질수록 더 커짐을 알 수 있다. 강성중심이 X축에 있을 경우, 편심이 +X축에 있는 경우의 전체 가속도응답이 더 큰 비대칭 형상을 하고 있음을 알 수 있다. 강성중심이 Y축에 있을 경우, 전체 가속도응답은 편심거리와 함께 증가하지만, 응답의 증가율이 감소함을 알 수 있다. 강성중심이 X축에 있는 경우와 마찬가지로 +Y축에 있는 경우의 전체 가속도응답이 크지만, 그 차이는 매우 작음을 알 수 있다. 가속도응답에 있어서 이러한 비대칭구조는 식 (5)의 비대각 요소에 의한 것으로 외력간의 크로스스펙트럼에 의한 것이다.



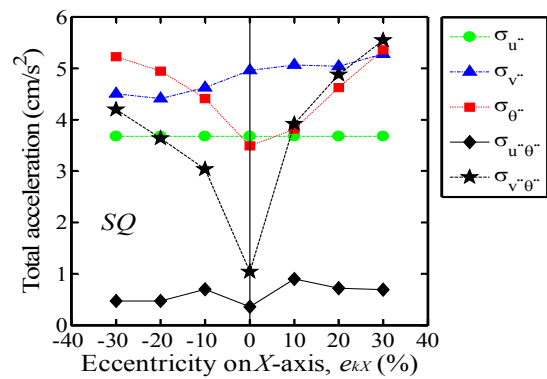
(a) Eccentricity on X-axis



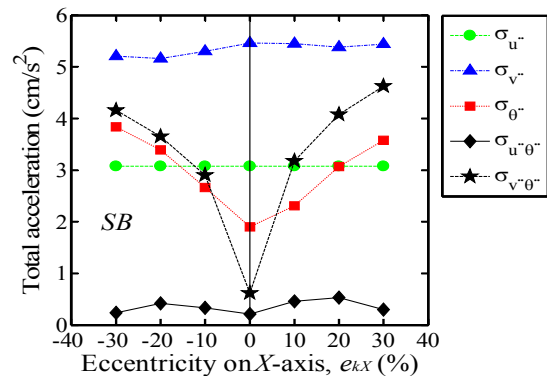
(b) Eccentricity on Y-axis
 <Fig. 8> Comparison of total accelerations.

편심이 X축에 있을 경우 전체 가속도응답의 성분별 편심거리에 대한 변화를 <Fig. 9>에 나타내었다. 풍방향 가속도 (σ_u)의 변화는 편심거리에 상관없이 0이고, 풍직각방향 가속도 (σ_v)는 편심거리가 -X축에서 +X축으로 변함에 따라 천천히 증가함을 알 수 있다. 반면에 비틀림 가속도 (σ_θ)와 공분산 ($\sigma_{v\theta}$)은

단면중심을 경계로 편심거리가 증가함에 따라 급격하게 커짐을 알 수 있고, 특히 공분산 ($\sigma_{v\theta}$)의 증가가 더 큼을 알 수 있다. 이는 풍직각방향 가속도와 비틀림 가속도의 연성이 편심거리의 증가와 함께 급격하게 커지기 때문으로, 비틀림 가속도는 편심거리의 방향에 관계없이 편심거리와 함께 커지지만, 풍직각방향 가속도는 편심거리가 -X축에 있는 경우 편심이 없는 경우의 풍직각방향 가속도와 반대방향으로 작용하는 가속도가 생기므로¹⁾ 풍직각방향 가속도는 단면중심을 경계로 증가하지 않고, 편심의 방향이 -X축에서 +X축으로 바뀌에 따라 천천히 변화하는 형상으로 바뀌게 된다. 또 공분산 ($\sigma_{u\theta}$)도 편심으로 인해 다소 증가하지만, 다른 성분에 비해 1/4에서 1/5의 값이고, 편심의 방향에 따라 비대칭적으로 변화한다.



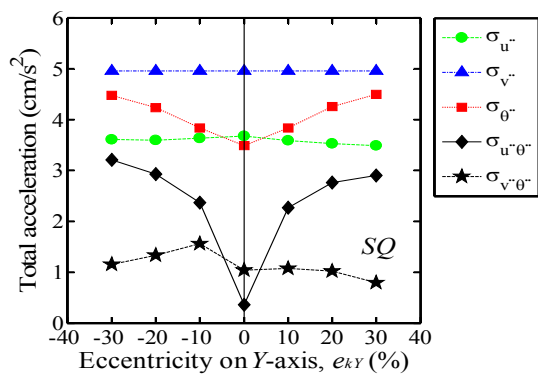
(a) SQ



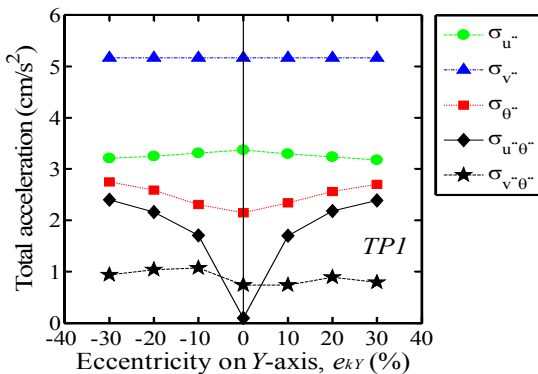
(b) SB

<Fig. 9> Variation of acceleration components for eccentricity on X-axis.

<Fig. 10>의 편심거리가 Y축에 있는 경우 풍직각 방향의 가속도 ($\sigma_{\dot{v}}$)는 편심거리에 상관없이 일정하지만, 풍방향 가속도 ($\sigma_{\ddot{u}}$)는 편심거리가 증가함에 따라 천천히 감소함을 알 수 있다. 비틀림 가속도 ($\sigma_{\ddot{\theta}}$)는 편심거리와 함께 증가하지만, <Fig. 9>와 같은 급격한 변화는 보이지 않는다. <Fig. 9>와 다른 점은 공분산 ($\sigma_{\ddot{u}\ddot{\theta}}$)은 편심거리와 함께 커지지만, 공분산 ($\sigma_{\dot{v}\ddot{\theta}}$)는 편심거리에 상관없이 거의 일정한 값을 보이고 있다는 점이다.



(a) SQ

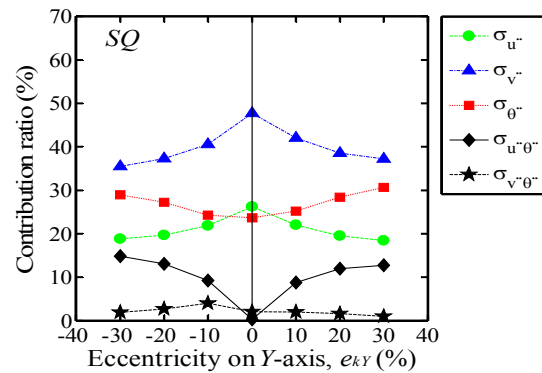


b) TP1

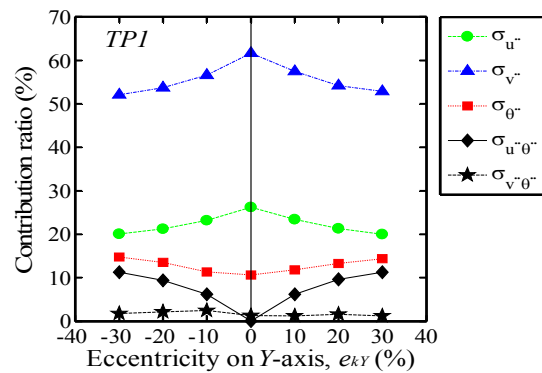
<Fig. 10> Variation of acceleration components for eccentricity on Y-axis.

<Fig. 9>와 <Fig. 10>에 있어서 모형별 차이점으로 주목할 점은 풍직각방향의 가속도 ($\sigma_{\dot{v}}$)와 비틀림 가속도 ($\sigma_{\ddot{\theta}}$)의 다른 가속도 성분에 대한 상대적인 크기이다. 예를 들어 편심거리가 (-30, 0)에서의 SQ의 경우 (<Fig. 9> (a)), 풍직각방향 가속도는 공분산 ($\sigma_{\dot{v}\ddot{\theta}}$)보다 크고 비틀림 가속도보다 작지만, 편심거리가 (30, 0)에서는 세 가속도의 값이 거의 비슷해진다. 하지만, <Fig. 9> (b)의 TP1의 경우, 풍직

각방향 가속도는 편심거리에 상관없이 다른 가속도 성분보다 크고, 비틀림 가속도도 편심거리에 따라 공분산 ($\sigma_{\dot{v}\ddot{\theta}}$)보다 작은 값을 보인다. <Fig. 10>에서는 풍방향 가속도와 비틀림 가속도의 모형별 변화가 명확함을 알 수 있다.



(a) SQ



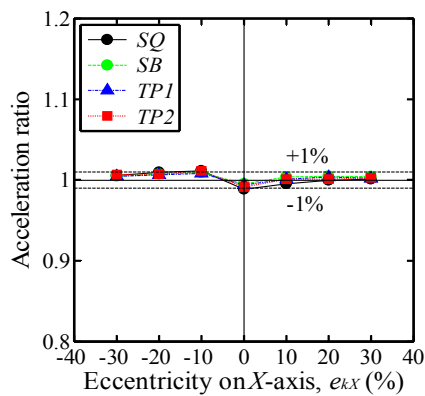
(b) TP1

<Fig. 11> Contribution ratio of each component to total accelerations.

<Fig. 10>의 결과에 대한 각 가속도 성분의 전체 가속도응답에 대한 기여도를 <Fig. 11>에 나타내었다. 편심이 없는 경우, 풍직각방향의 기여도는 SQ의 경우 약 50%, TP1의 경우 약 60%로 다른 가속도 성분에 비해 큼을 알 수 있다. 하지만 편심거리가 커짐에 따라 풍직각방향 가속도의 기여도는 감소하고 비틀림 가속도 및 공분산 ($\sigma_{\ddot{u}\ddot{\theta}}$)의 기여도가 증가한다. 풍방향 가속도로 기여도도 편심이 없는 경우가 제일 크고, 편심거리가 커짐에 따라서 기여도가 감소한다. 편심이 X축에 있는 경우도 마찬가지로 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도의 기여도는 편심거리와 함께 감소하고, 비틀림 모멘트와 공분산

($\sigma_{\dot{\theta}}$)의 기여도는 편심거리와 함께 커진다.

지금까지의 응답해석에 있어서 외력간의 모든 상관 (S_{MYMX} , S_{MYMT} 와 S_{MXMT})을 고려하였다. 하지만, 풍방향 힘과 다른 두 방향의 힘과의 상관관계가 작기 때문에 응답해석에서는 무시되는 경우가 있다. 따라서 풍방향 힘과 다른 두 방향의 힘과의 상관관계가 응답해석에 미치는 영향을 알아보기 위해서, 풍직각방향 힘과 비틀림 모멘트와의 상관 (S_{MXMT})만 고려해서 구한 전체 가속도응답 ($a_{Total,simplified}$)을 모든 상관을 고려해 구한 전체 가속도응답 (a_{Total})과의 비율 ($a_{Total,simplified}/a_{Total}$)을 구하여 <Fig. 12>에 나타내었다. 가속도응답의 비율은 거의 편심거리와 방향에 상관없이 $\pm 1\%$ 내에 있음을 알 수 있고, 풍방향 힘과 다른 두 방향의 힘과의 상관관계는 무시하여도 응답해석에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.



<Fig. 12> Comparisons of total acceleration ratio.

5. 결론

비정형 초고층 건물의 편심응답 특성을 알아보기 위해 응답해석을 수행하였다. 정방형 모형 (SQ)의 전체 가속도응답이 제일 크고, 다음으로 테이퍼 모형 (TP2와 TP1), 셋백 모형 (SB)순으로 응답은 작아졌다. 테이퍼 및 셋백 모형의 경우, 풍직각방향 가속도는 정방형 모형보다 크고, 전체 가속도응답에 대한 기여도도 정방형 모형보다 컸다. 하지만, 풍방향 및 비틀림 가속도가 정방형 모형보다 작아 전체 가속도는 정방형 모형보다 작았다. 또, 풍방향 힘과 다른 두 방향의 힘과의 상관관계는 무시하여도 응답해석에는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 일본의 문부과학성 글로벌 COE프로그램 (풍공학, 교육연구의 뉴 프론티어, 동경공예대학교)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부입니다.

참고문헌

- Islam, M. (1992), Wind-induced response of structurally asymmetric high-rise buildings, *Journal of Structural Engineering* 118(1), 207-222.
- Huang, M.F. (2009), Cross correlation of modal responses of tall buildings in wind-induced lateral-torsional motion, *Journal of Engineering Mechanics* 135(8), 802-812.
- Tamura, Y. 외 4인 (2010), Aerodynamic characteristics of tall building models with various unconventional configurations, *Structures Congress*, 3104-3113.
- Holmes, J.D., Rofail, A., Aurelius, L. (2003), High frequency base balance methodologies for tall buildings with torsional and coupled resonant modes, *Proceedings of 11th International Conference on Wind Engineering*, 2381-2388.
- Simiu, E., Lozier, P.W. (1975), Buffeting of tall structures by strong winds, *National Bureau of Standards, Building Science Series* 74, 17-18.
- Kim, Y.C., Kanda, J. (2008), Wind response characteristics for habitability of tall buildings in Japan, *Structural Design of Tall and Special Buildings* 17(3), 683-718.
- Mabie, H.H., Rogers, C.B.(1972), Transverse vibrations of double-tapered cantilever beams, *Journal of the Acoustical Society of America* 51, 1771-1774.

(접수일자 : 2012년 11월 30일)
 (심사완료일자 : 2013년 02월 25일)
 (게재확정일자 : 2013년 02월 28일)