

나선형 형상의 초고층건물의 공력감쇠의 특성

김원술* · 이진학** · 타무라 유키오***

Kim, Wonsul*, Yi, Jin-Hak**, Tamura, Yukio***

Characteristics of Aerodynamic Damping on Helical-Shaped Super Tall Building

ABSTRACT

Characteristics of aerodynamic damping ratios of a helical 180° model which shows better aerodynamic behavior in both along-wind and across-wind responses on a super tall building was investigated by an aeroelastic model test. The aerodynamic damping ratio was evaluated from the wind-induced responses of the model by using Random Decrement (RD) technique. Further, various triggering levels in evaluation of aerodynamic damping ratios using RD technique were also examined. As a result, it was found that when at least 2000 segments were used for evaluating aerodynamic damping ratio for ensemble averaging, the aerodynamic damping ratio can be obtained more consistently with lower irregular fluctuations. This is good agreement with those of previous studies. Another notable observation was that for square and helical 180° models, the aerodynamic damping ratios in along-wind direction showed similar linear trends with reduced wind speeds regarding of building shapes. On the other hand, for the helical 180° model, the aerodynamic damping ratio in across-wind direction showed quite different trends with those of the square model. In addition, the aerodynamic damping ratios of the helical 180° model showed very similar trends with respect to the change of wind direction, and showed gradually increasing trends having small fluctuations with reduced wind speeds. Another observation was that in definition of triggering levels in RD technique on aerodynamic damping ratios, it may be possible to adopt the triggering levels of “standard deviation” or “ $\sqrt{2}$ times of the standard deviation” of the response time history if RD functions have a large number of triggering points. Further, these triggering levels may result in similar values and distributions with reduced wind speeds and either may be acceptable.

Key words : Aerodynamic damping, Structural damping, Random decrement technique, Super tall building, Aeroelastic model test, Wind tunnel test

초 록

본 연구에서는 범위 및 가속도 응답의 저감 효과에 있어서, 유리한 형상인 180° 나선형(Helical 180°) 초고층건물을 대상으로 공력진동실험 수행하여 나선형 초고층건물의 공력감쇠율의 특성을 조사하였다. 공력감쇠율은 RD법(Random decrement technique)을 이용하여 평가하였다. 또한 RD법에서 부분 샘플의 개수와 초기 조건 값의 변화가 공력감쇠율에 어떤 영향을 미치는지 조사하였다. 실험 결과, 최소 2000개 이상의 부분 샘플을 이용하여 앙상블 평균을 적용하면 공력감쇠율의 불규칙한 변동의 폭을 줄일 수 있음을 검증했고, 기존 연구들과도 잘 부합되는 것을 알 수 있었다. 정방향 모형과 180° 나선형 모형의 공력감쇠율의 결과를 살펴보면, 풍방향 공력감쇠율은 건물의 형상이 다름에도 불구하고 무차원 풍속에 따른 공력감쇠율은 매우 유사한 경향을 보였다. 한편, 정방향 모형에 대한 풍직각방향의 공력감쇠율은 180° 나선형모형의 공력감쇠율의 특성과는 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있었다. 특히 풍향 변화에 따른 180° 나선형 모형의 Y방향에 대한 공력감쇠율은 풍향의 변화와 상관 없이, 전반적으로 0에 가까운 값을 갖는 경향이 나타났고, 무차원 풍속의 증가와 함께 변동의 폭은 작지만 점진적으로 증가하는 경향을 보였

* 정회원 · 교신저자 · 한국해양과학기술원 연안개발연구센터 연수연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Ocean Science Technology · kwsblue@gmail.com)

** 종신회원 · 한국해양과학기술원 연안개발연구센터 책임연구원 (Korea Institute of Ocean Science Technology · yjih@kiost.ac.kr)

*** 북경교통대학 토목공학과 교수 (Beijing Jiaotong University · yukio@arch.t.kougei.ac.jp)

Received March 2, 2016/ revised June 10, 2016/ accepted December 26, 2016

다. 초기 조건 값의 변화에 따른 공력감쇠율을 평가한 결과, 초기 조건 값을 “응답의 표준편차” 또는 RD 함수에 대한 최적화 “ $\sqrt{2}$ × 응답의 표준편차”를 적용하여 평가한 공력감쇠율은 매우 유사한 결과 값과 분포를 보이는 것으로 나타났다.

검색어 : 공력감쇠, 구조감쇠, Random Decrement Technique, 초고층건물, 공력진동실험, 풍동실험

1. 서론

다년간의 경제 불황에도 불구하고, 우리나라를 포함한 세계 여러 도시들은 도시 경쟁력 강화와 이미지 향상을 위해 초고층 건물을 지속적으로 건설하고 있다. 이러한 초고층건물의 경우, 풍방향 응답보다 풍직각방향 응답이 지배적이라는 사실은 이미 널리 알려진 사실로, 초고층 프로젝트에 있어서 최우선적으로 검토해야 할 인자라고 할 수 있다(Tanaka et al., 2012). Tanaka et al. (2012)는 다양한 형상을 가진 스몰여덟개의 초고층건물에 대해 풍력실험과 풍압실험을 수행하여 풍력(평균 및 변동풍력계수, 스펙트럼 등)과 풍압분포의 특성에 대해 비교·분석 하였다. 실험결과 나선형(Helical shape)과 복합형(Composite shape)의 초고층건물이 평균풍하중뿐만 아니라 변동풍하중의 저감 효과에 있어 매우 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 Tanaka et al. (2011)의 연구결과에 의하면 복합형 초고층건물의 경우, 비록 풍하중 및 변위응답은 정방적인 정방형 초고층건물에 비해 작게 평가될지라도, 거주성능 관점에서 중요한 인자인 가속도 응답은 정방형 건물의 가속도 응답과 비교해 높게 평가되었다. 한편, 초고층건물의 풍직각방향 응답 평가에 있어, 공력감쇠(Aerodynamic damping)는 매우 중요한 인자 중에 하나이다(Marukawa et al., 1996). 특히 정방형 초고층건물의 경우, 무차원풍속이 증가함에 따라, 공력감쇠는 음(-)의 값을 갖게 되며, 구조물의 전체감쇠가 작아지면서 풍직각방향의 응답이 급격히 커지는 현상이 발생한다. 몇몇 선행 연구에서는 풍진동실험(Aeroelastic model test)을 이용하여 공력감쇠의 특성

에 관한 연구도 있지만 대부분은 정형적인 정방형/장방형 또는 테이퍼형(Tapered shape) 초고층건물 또는 장대교량을 대상으로 연구가 진행되었다(Huang et al., 2013; Lee et al., 2016; Marukawa et al., 1996; Quan et al., 2005; Watanabe et al., 1997). 그러나 복잡한 형상을 갖는 초고층건물의 공력감쇠에 관한 연구는 찾아보기 힘들며, 또한 형상비($H/(BD)^{0.5}$)가 8이상의 초고층건물에 대한 공력감쇠에 관한 연구는 극히 드물다(Kim, 2014; Kim et al., 2016).

특히, Kim et al. (2016)의 연구에서도 180° 나선형(Helical 180°) 초고층건물의 공력감쇠 특성에 대해 조사하였지만 전반적인 내용은 초고층건물의 공력불안정성 진동 특성을 다루고 있다. 따라서 본 논문에서는 Kim et al. (2016)의 연구내용을 토대로 180° 나선형 초고층건물의 공력감쇠 특성을 면밀히 분석하고자 하며, 공력감쇠를 추정할 때 사용된 RD법(Random decrement technique)의 적용 방법과 RD 파형을 추정함에 있어 사용되는 부분 샘플 수 및 초기 조건 값의 변화가 공력감쇠에 어떤 영향을 미치는지 조사하였다. 또한 공력진동실험과 풍력실험에서 얻은 변동변위 응답 특성을 비교하여 부가적 공기력이 공력감쇠에 어떤 영향을 미치는지 조사하였다.

2. 풍동실험

2.1 자연풍의 모사 및 실험개요

풍동실험은 일본 동경공예대학 풍공학연구소에 소재한 대형정계층풍동(폭 2.2 m × 높이 1.8 m, 길이 19 m)에서 수행되었다.

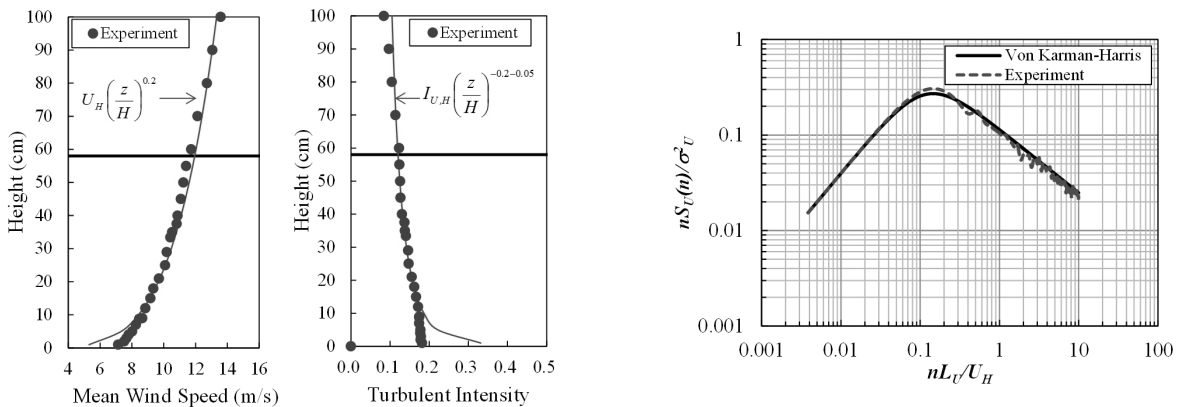


Fig. 1. Simulated Wind Parameters

풍동 내 기류의 평균풍속과 난류강도의 연직분포 및 풍속의 파워스펙트럼밀도는 Fig. 1에 나타내었다. 건물 높이에서의 평균풍속 및 난류강도는 각각 11.4 m/s와 12%이다(Fig. 1(a)). 실험에서 제작된 변동풍속의 파워스펙트럼은 칼만 스펙트럼(Karman-Harris spectrum)과 잘 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 1(b)). 즉, 불규칙적인 난류의 주기와 길이가 일치하는 것을 의미하기 때문에 풍동 내에서 자연풍의 모사가 잘 되었음을 알 수 있다.

2.2 풍력실험(High-Frequency Force Balance Test)

180° 나선형모형(이하, Helical 180 모형)과 정방형모형(이하, Square 모형)의 진동에 의해 발생하는 부가적 공기력이 공력감쇠에 어떤 영향을 미치는지 조사하기 위하여 풍력실험과 공력진동모형 실험을 수행하였다. 풍력실험시 실험풍향은 0°만을 고려하였고, 샘플링 주파수는 1 kHz이다. 변동풍력에 대한 변동변위 응답은 Eq. (1)의 스펙트럼 모드 해석(Spectral modal analysis)을 이용하여 구하였다.

$$\sigma_{x(y)} = \sqrt{\int_0^\infty S_{x(y)}(n)dn} = \frac{1}{k} \sqrt{\int_0^\infty |H(n)|^2 S_{f_x(y)}(n)dn} \tag{1a}$$

$$\approx \sigma_{f_x(y)} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4} \frac{1}{\zeta} \frac{\chi_0 S_{f_x(y)}(\chi_0)}{\sigma_{f_x(y)}^2}} \tag{1b}$$

여기서, ζ 는 구조감쇠비, $\chi_0 S_{f_x(y)}(\chi_0) / \sigma_{f_x(y)}^2$ 는 풍력의 무차원 파워스펙트럼밀도(Power spectral density), $\sigma_{f_x(y)}$ 는 풍력의 표준편차, $|H(n)|$ 는 기계적 어미드턴스(Mechanical admittance)이며, Eq. (2)와 같다.

$$|H(n)|^2 = \frac{1}{[1 - (n/n_0)^2]^2 + (2\zeta n/n_0)^2} \tag{2}$$

$\chi_0 = n_0 B / \bar{U}_H$ 는 무차원 진동수, B 는 건물의 폭, \bar{U}_H 는 건물의 최상부에서의 평균풍속이다. 무차원 진동수에 역수를 취하면, Eq.(3)과 같이 무차원 풍속으로 나타낼 수 있다.

$$U^* = \frac{1}{\chi_0} = \frac{U_H}{n_0 B} \tag{3}$$

다시 말해, Eq. (1)은 무차원 진동수의 값에 의존됨을 알 수 있고, 무차원 진동수에 역을 취하면 무차원 풍속에 따른 변동 변위 응답을 얻을 수 있다. 따라서 해석시 변동 변위 응답은 무차원

풍속 6에서 18까지 고려하여 평가하였다(Figs. 9 and 10 참조). 풍력해석시 건물의 1차모드의 고유진동수는 0.1 Hz, 전체감쇠율은 0.5%와 2.0%를 적용하였고, 진동모드형상은 $\phi = z/H$ 로 가정하였다.

2.3 공력진동실험(Rocking Vibration Model Test)

구조물의 공력감쇠를 평가하기 위해 공력진동실험을 수행하였다. 공력진동실험시 상사조건으로 질량비($M_j / (\rho B^2 H)$), 무차원진동수($n_j B / U$), 감쇠비(ζ_j)를 만족하도록 하였다. 여기서 M_j , n_j , ζ_j 는 각각 j 차모드의 일반화질량, 고유진동수, 감쇠비이며, ρ , U , B , H 는 각각 공기밀도, 평균풍속, 건물의 폭, 건물의 높이이다. Table 1은 공력진동실험 모형의 제원을 나타낸 것이다.

실험모형의 축척은 1/694, 풍속 축척은 1/7으로 설정하였으며, 건물의 질량비는 짐발(Gimbal)을 회전중심으로 하는 관성모멘트를 이용하여 구하였다($I / \rho B^2 H^3$; 여기서 I : 회전관성모멘트, ρ : 공기 밀도, B : 건물의 폭, H : 건물의 높이). 일반적으로 구조감쇠율은 건물의 높이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며, 150 m 이상인 건물의 경우, 구조감쇠율은 1%미만이라고 보고된 바 있다 (Damping in building, 2000). 따라서 본 연구에서는 건물의 구조감쇠율을 0.5%로 고려하였고 실험모형의 구조감쇠율은 짐발 하부에 설치된 마그네틱의 높이를 조절하여 상사시켰다(Kim et al., 2016). Fig. 2는 풍동 내 설치된 모형 전경을 나타낸 것이다.

실험풍속은 모형 정상부에서의 평균풍속으로 6.0~12.8 m/s (실규모 풍속: 42~90 m/s) 범위를 0.34 m/s 간격으로 증가시키면서 실험을 수행하였다. 실험풍향은 모형의 대칭성을 고려하여 Helical 180의 경우, 풍향 0~45° 범위에서 5° 간격으로 고려하였다. Square의 경우, 풍응답이 가장 크게 관측되는 0°와 작게 관측되는 45°만 고려하였다. 일반적으로 Square 형상을 갖는 초고층건물의 경우, 풍향의 효과는 미비하고 풍향이 변함에 따라 공력감쇠 또한 0에 근접하거나 음의 값을 갖기 때문에 2개 풍향만을 고려하였다. 측정 시간은 RD법을 이용하여 공력감쇠율을 평가하기 위해 샘플링 주파수 300 Hz로 240초(실규모 10분 자료 40개에 해당) 동안 측정하였다.

Table 1. Specification of Rocking Vibration Model

	Prototype	Rocking vibration model	
		Square	Helical 180
Moment of inertia, $I_{x,y}$ (kg·m ²)	9.03×1012	0.0556	0.0607
Mass ratio ($I_{x,y} / \rho B^2 H^3$)	47.03	44.56	48.64
Natural frequency (Hz)	0.1	10.25	10.21
Structural damping ratio (%)	0.5	0.5	
Model scale, λ_m	1/1	1/694	
Velocity scale, λ_v	1/1	1/7	

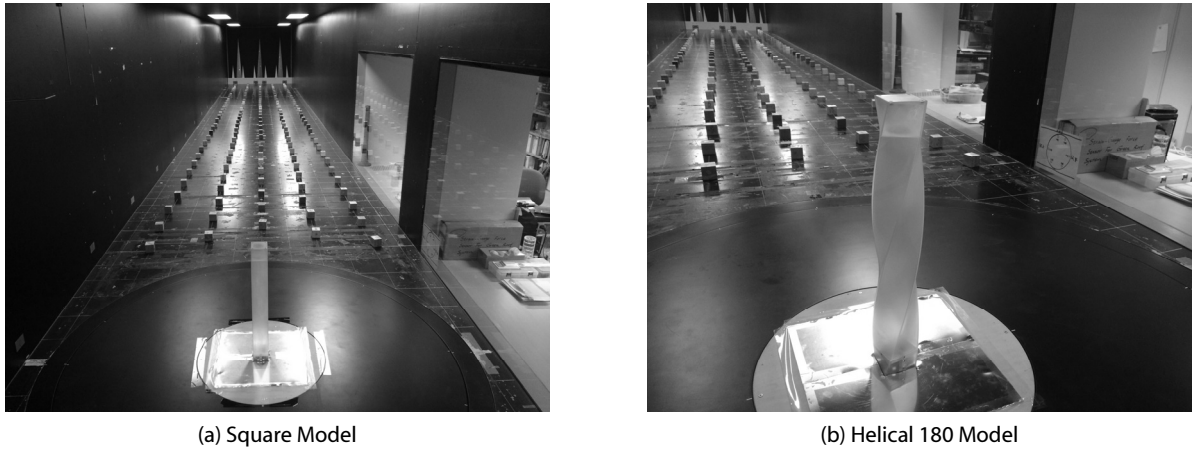


Fig. 2. Experimental Models in Wind Tunnel

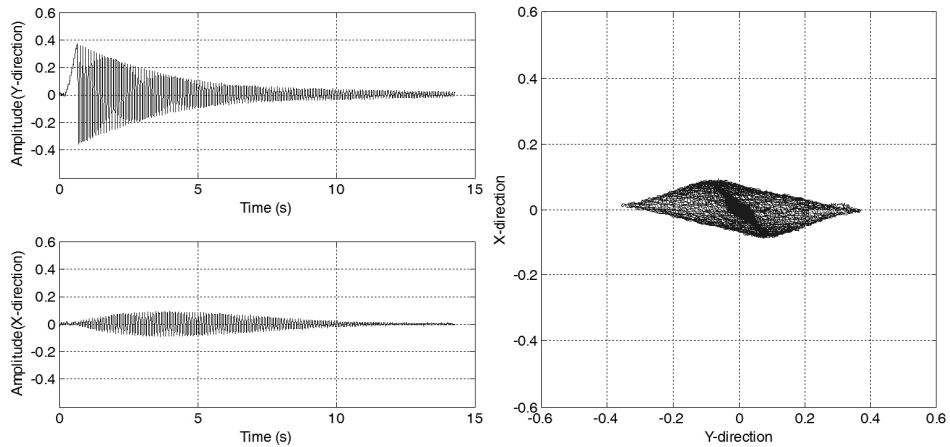


Fig. 3. Example of Free Vibration Test for Square Model ($\zeta_s = 0.5\%$)

2.4 구조물의 동특성 평가

구조감쇠율을 평가하기 위해서 Square와 Helical 180 모형에 대해 자유진동실험을 수행하였다. 자유진동과형으로부터 10개 주기의 피크치를 이용하여 구조감쇠율을 구하였으며, 총 5회의 자유진동실험을 수행하여 구조감쇠율을 구한 후, 앙상블 평균을 통해 최종적으로 구하고자 하는 구조감쇠율을 평가하였다. Square의 X, Y방향에 대한 자유진동과형 및 궤적에 대한 예를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 4는 무차원 변위 응답(σ/H)에 따른 구조감쇠율의 진폭 의존성의 예를 나타낸 것이다. X, Y방향 모두 무차원 응답이 약 0.00135 부근까지 구조감쇠율이 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 무차원 응답에 따른 구조감쇠율은 목표 구조감쇠율과 비교해서 X, Y방향에 대해 평균적으로 4%, 6% 이내에 분포하는 것을 알 수 있다. 따라서 공력진동실험을 통한 공력감쇠율을 평가함에 있어 구조감쇠율은 자유진동과형으로부터 구한 구조감쇠율을 적용하였다.

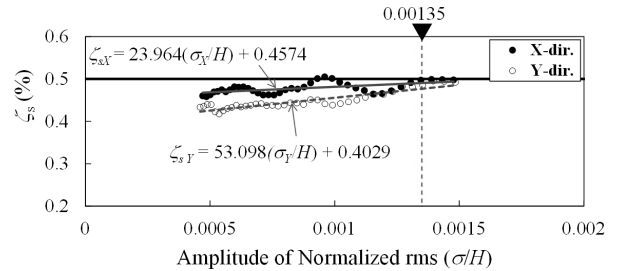


Fig. 4. Dependency of Structural Damping Ratio with Vibration Amplitude for Square Model

2.5 공력감쇠의 평가

불규칙 응답으로부터 구조물의 감쇠를 추정하는 방법에는 주로 시간영역에서의 자유진동과형을 추정하여 감쇠를 평가하는 방법(자기상관함수법, RD법 등)과 주파수영역에서 주파수응답 데이터를 이용하여 감쇠를 평가하는 방법($1/\sqrt{2}$ 법, 하프파워법, 위상구

배법 등이 있다. 본 연구에서는 전자의 자유진동파형을 Eq. (4)의 RD법으로 추정하여 공력감쇠율을 평가하였다(Kim et al., 2016; Tamura and Suganuma, 1996).

$$a(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w(t_i) x(t_i + \tau) |c \quad (4)$$

여기서, N은 초기 조건을 만족하는 부분 샘플의 개수, $w(t)$ 는 가중치(Weight coefficient), c는 부분샘플을 특정하기 위한 초기 조건(Triggering condition)이다.

Fig. 5는 Square 모형을 대상으로 RD법의 기본개념을 도식적으로 표현한 것이다. 본 연구에서는 구조물 고유진동수의 $\pm 30\%$ 구간에 대한 대역필터(Band-pass filter)를 적용하고 초기 조건 c의 값은 변위응답의 표준편차를 적용하였다. 다음으로 Fig. 5(a)의 응답의 시간이력에서 변위응답의 표준편차가 발생하는 지점들에서 부분 샘플을 추출한 후, 앙상블 평균을 통해 하나의 자유진동파형을

구할 수 있다(Fig. 5(b)).

한편, 1차 모드의 전체감쇠율(1st mode total damping ratio, ζ_1)은 변위 응답의 진폭 의존성을 고려하여 자유진동파형에서 처음 다섯 개 사이클을 이용하여 구하였다. 이렇게 구한 시스템의 1차 모드의 전체감쇠율은 구조감쇠율(ζ_s)과 공력감쇠율(ζ_a)으로 구분하여, $\zeta_1 = \zeta_a + \zeta_s$ 으로 나타낼 수 있다(ESDU 83009, 2012). 따라서 초고층건물의 공력감쇠율은 Eq. (5)에 의해 구할 수 있다.

$$\zeta_a = \zeta_1 - \zeta_s \quad (5)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 RD법 적용을 위한 부분 샘플수의 영향

RD법에 있어서 중요한 것 중에 하나는 응답의 시간이력으로부터 추출된 부분샘플(Time segment)의 적절한 길이와 앙상블 평균을 위한 부분 샘플 수가 중요하다(Rodrigues and Brincker, 2005).

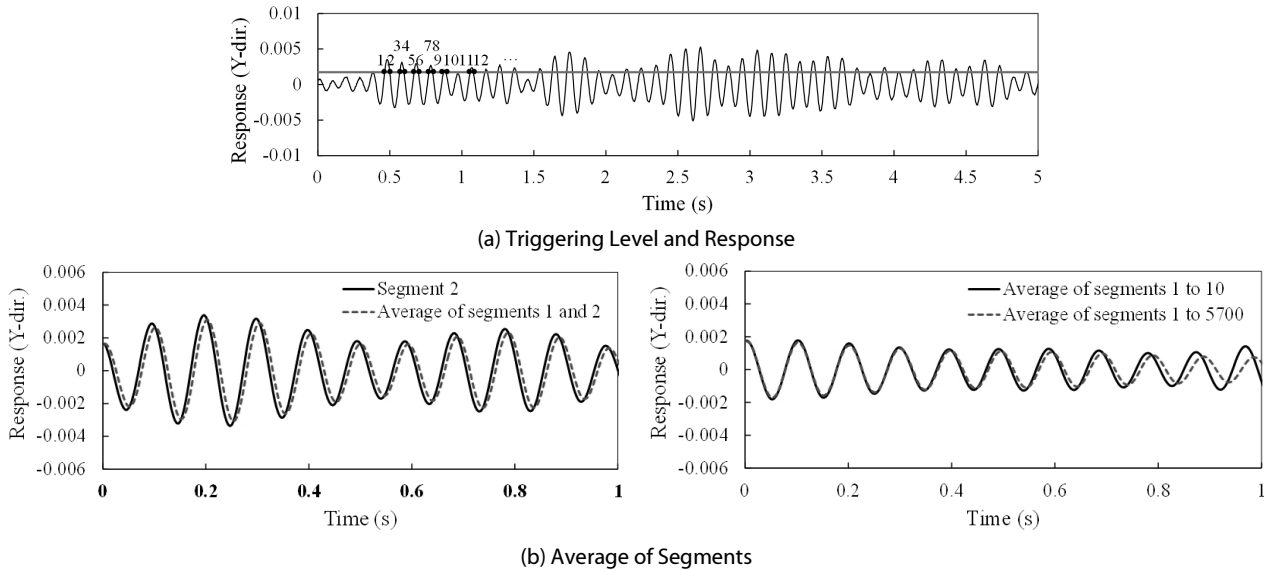


Fig. 5. Basic Concept of RD Technique (Square Model)

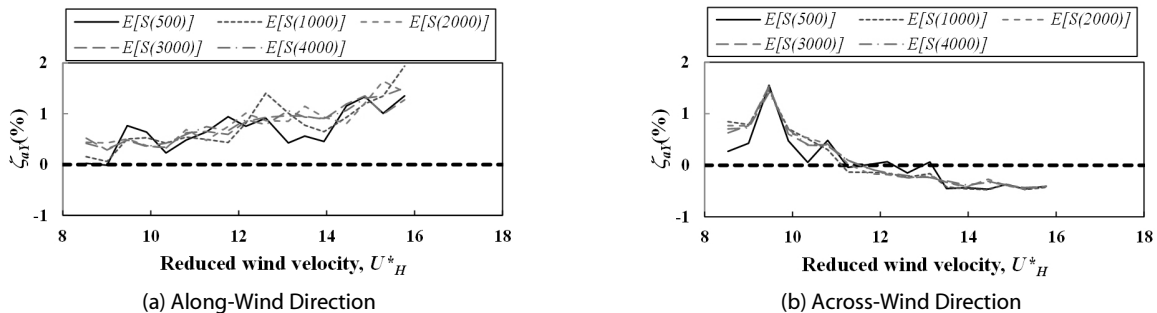


Fig. 6. Effect of Time Segments for Estimating Aerodynamic Damping Ratio of Square Model

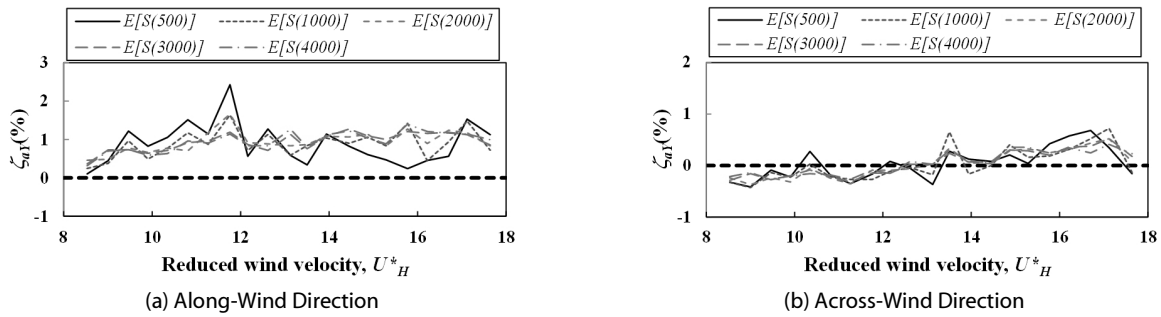


Fig. 7. Effect of Time Segments for Estimating Aerodynamic Damping Ratio of Helical 180 Model

Table 2. Number of Time Segments for Previous Studies

Kim (2014)	Marukawa et al. (1996)	Tamura and Suganuma (1996)	Tamura et al. (1993)
2,000 or more	2200-4300	2,000 or more	5000

그러나 명확하게 몇 개 정도의 부분 샘플이 필요한지에 대한 연구는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 공력감쇠 평가에 있어서 RD법 적용을 위한 부분 샘플 수의 영향 및 건물의 형상이 부분 샘플 수에 어떤 영향을 미치는지 조사하였다. Figs. 6 and 7은 Square 모형과 Helical 180 모형에 대한 공력감쇠율 평가시 사용된 부분 샘플수의 영향을 나타낸 것이다. Figs. 6 and 7에서 나타낸 바와 같이 무차원풍속에 따른 공력감쇠율은 풍향 및 풍직각방향에 상관없이 전체적인 경향은 유사하지만, 부분 샘플 수가 적은 경우 변동의 폭이 크며 부분 샘플 수가 많아질수록 일정한 공력감쇠율에 수렴하는 것을 알 수 있다. 그러나 부분 샘플 수 이외 건물의 형상, 풍향 등은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Table 2는 기존문헌에서 RD법을 이용한 공력감쇠율 평가함에 있어 사용한 부분 샘플 수를 나타낸 것이다. 따라서 부분 샘플 수가 많을수록 일관성 있는 공력감쇠율을 구할 수 있다고 가정한다면, 적어도

2,000개 이상의 부분 샘플을 얻을 수 있는 데이터가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서도 정확한 공력감쇠율을 평가하기 위한 부분 샘플 수는 모든 경우에 있어서 5,000개 이상을 고려하였다.

3.2 공력감쇠율의 풍향의 영향

Square와 Helical 180 모형에 작용하는 공력감쇠율의 풍향의 특성을 Fig. 8에 나타냈다. 풍향 0°일 때, X방향에 대한 Helical 180 모형의 공력감쇠율의 변화를 살펴보면 Square 모형의 결과와 유사한 경향을 보였다(Fig. 8(a)). 즉, 건물의 형상변화는 풍방향의 공력감쇠율에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 또한 풍향이 증가하면서 Helical 180모형의 공력감쇠율도 작아지고 0에 가까운 값을 갖게 되며, 무차원풍속 12 이상에서 공력감쇠율이 점점 커지는 경향이 나타났다.

반면, Y방향의 경우, Helical 180 모형의 공력감쇠율은 Square 모형의 공력감쇠율과는 상반된 경향을 보였다(Fig. 8(b)). Helical 180 모형의 풍직각방향 변동변위 응답 특성은 풍방향 변동변위 응답 특성과 유사한 분포를 보이고 무차원 풍속이 커짐에 따라 추가적인 공기력이 건물의 응답을 제어를 하면서 정(+)의 공력감쇠력이 되기 때문인 것으로 판단된다. 즉, Helical 180의 Y방향에

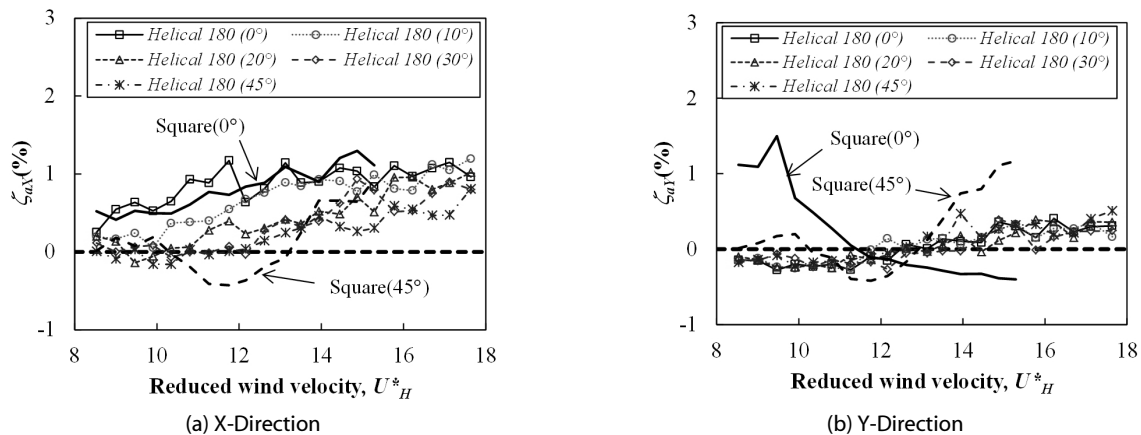


Fig. 8. Effect of Wind Directions on Aerodynamic Damping Ratio of Square Model (Kim et al., 2016)

대한 변위응답에 있어서 공력감쇠율의 영향은 미비한 것을 알 수 있으며, Kim et al. (2016)에 의해 보고된 바 있다. Square 모형의 경우, 무차원 풍속 9.5에서 공력감쇠율이 최대 1.5%까지 증가하는 경향을 보였으며 무차원 풍속의 증가와 함께 공력감쇠율도 급격히 줄어드는 경향을 보였다. 무차원 풍속이 11보다 큰 구간에서는 음의 공력감쇠율을 보였다. 이와 같은 현상은 와류 방출 주파수와 Square 모형의 고유진동수가 일치되는 Lock-in 현상에 의해 공력감쇠율이 음의 값을 갖게 되어 풍직각방향의 변동변위가 급격히 증가하는 현상과도 잘 부합한다(Fig. 9(b) 참조).

3.3 변동변위 응답 특성

Figs. 9 and 10은 Square와 Helical 180의 무차원 풍속에 따른 무차원 변동변위 응답을 나타낸 것이다. 그림에서 직선 및 점선은 풍력실험을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 스펙트럼모드해석을 수행하여 평가된 무차원 변동변위 응답 이다. 이때 적용된 구조감쇠율은 0.5%와 2.0%이다. 공력진동실험에 의한 Square와 Helical

180의 풍방향 무차원 변동변위 응답은 풍력실험의 구조감쇠율 2.0%의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다(Figs. 9(a) and 10(a)). 즉, 버페팅 진동시 정(+)의 공력감쇠력이 무차원 풍속과 함께 점진적으로 증가하기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 8(a) 참조). Fig. 9(b)에서 Square의 풍직각방향 무차원 변동 변위 응답은 무차원 풍속이 11 이하일 때는 풍력실험의 구조감쇠율 2%의 해석 결과와 유사한 경향을 보이다가 무차원 풍속 12(실물 풍속 60 m/s)를 초과하면서 구조감쇠율 0.5%의 해석 결과를 상회하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 와류진동(Vortex shedding vibration)이 발생하면서 음(-)의 공력감쇠가 발생하기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 8(b) 참조). 한편 Fig. 10(b)의 Helical 180의 풍직각방향 무차원 변동변위 응답은 어느 정도의 변동 폭은 있지만, 평균적으로는 구조감쇠율 0.5%의 해석 결과에 대응하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 무차원 풍속이 증가함에도 불구하고 공력감쇠율이 0에 가까운 값을 보이기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 8(b)).

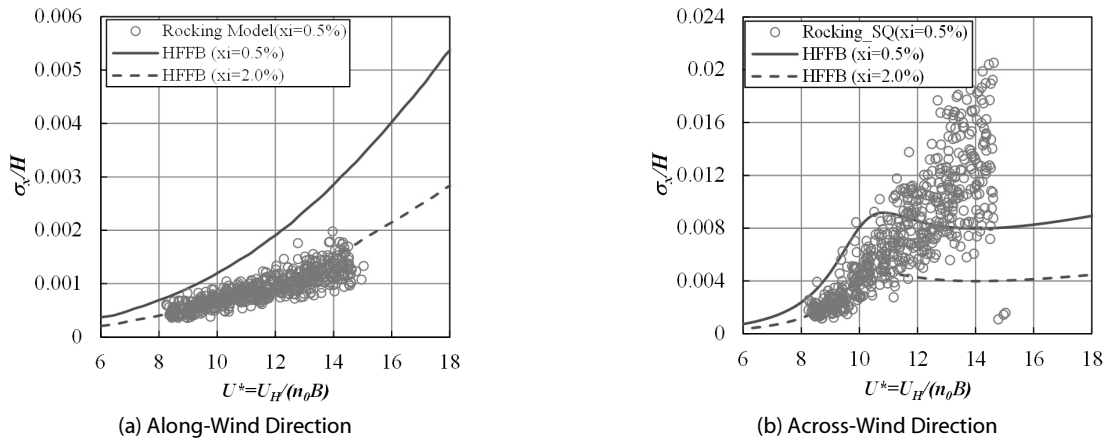


Fig. 9. Normalized RMS Responses of Square Model with Reduced Wind Velocity

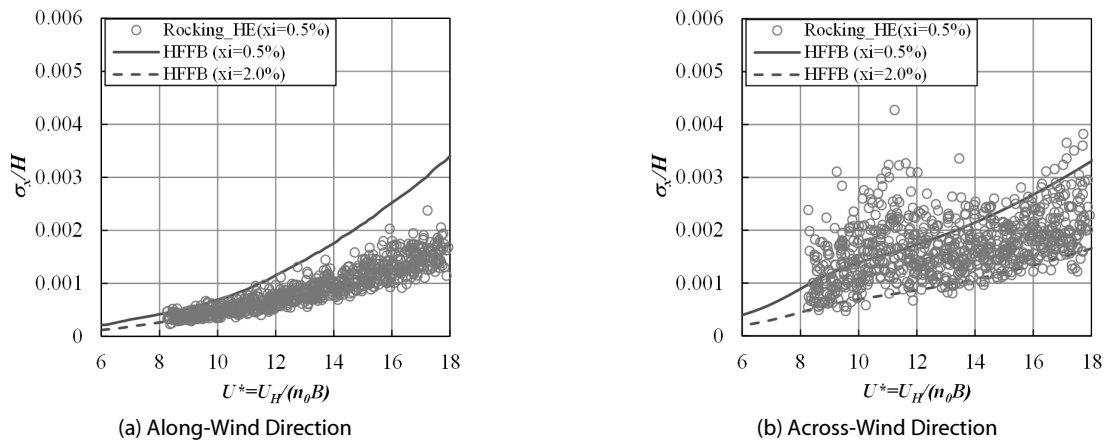


Fig. 10. Normalized RMS Responses of Helical 180 Model with Reduced Wind Velocity

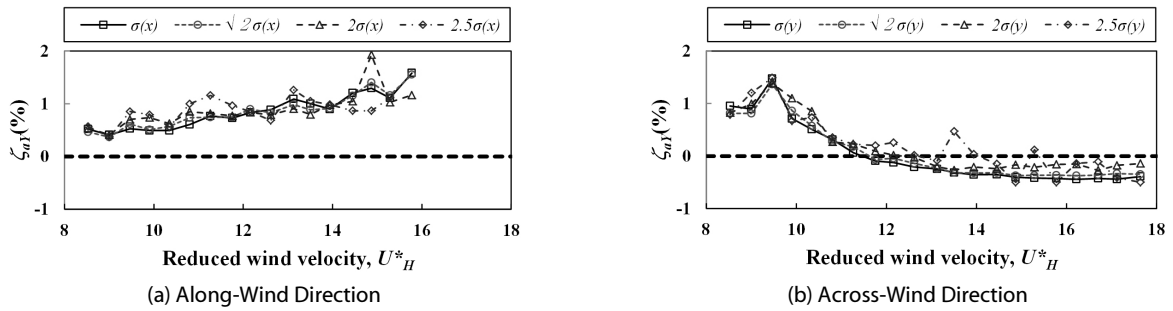


Fig. 11. Aerodynamic Damping Ratio of Square Model with Different Triggering Levels

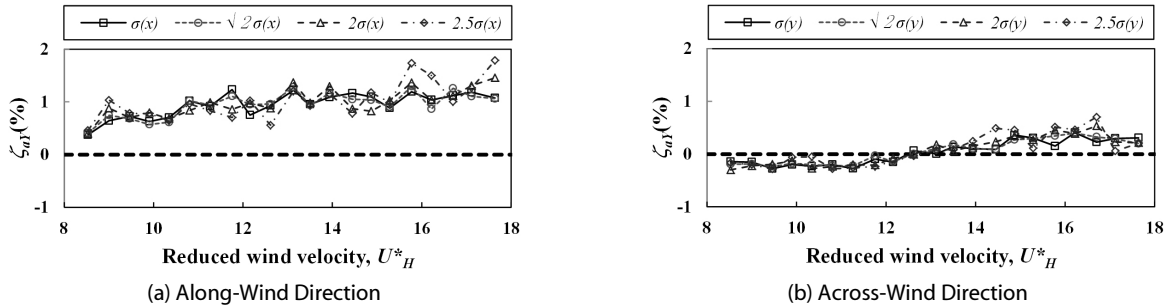


Fig. 12. Aerodynamic Damping Ratio of Helical 180 Model with Different Triggering Levels

3.4 초기 조건 변화에 따른 공력감쇠율의 특성

RD법에 의한 공력감쇠의 평가에 있어 다른 중요한 요소는 초기 조건 값(또는 레벨)을 설정하는 것이다. 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 응답의 시간이력에서 변위응답의 표준편차(σ_x)을 초기 조건 값으로 설정하여 공력감쇠율을 평가하였다. 한편, Asmussen (1997)은 공력감쇠율의 평가에 있어서 RD 함수에 대한 변동의 최소화 또는 최적화를 위한 초기 조건값(Triggering level)으로 $\sqrt{2}\sigma_x$ 를 적용할 수 있다고 제안하였다. 본 연구에서의 초기 조건 값 변화가 공력감쇠율에 미치는 영향을 알아보기 위해, 초기 조건 값 $x^* = \sigma_x, \sqrt{2}\sigma_x, 2\sigma_x, 2.5\sigma_x$ 로 하여 공력감쇠율을 구하였다. Figs. 11 and 12는 Square와 Helical 180의 초기 조건 값에 따른 공력감쇠율을 나타낸 것이다. Figs. 11 and 12에서 $x^* = \sigma_x$ 와 $\sqrt{2}\sigma_x$ 일 때의 풍방향 및 풍직각방향의 무차원 풍속에 따른 공력감쇠율은 비슷한 값과 분포를 갖는 것을 알 수 있었다. 그러나 응답의 표준편차가 2배 이상일 경우에는 응답의 표준편차를 이용하여 구한 공력감쇠율과는 다소 다른 경향을 보였다. 즉, Table 3과 같이 초기 조건 값이 커짐에 따라 양상별 평균을 위한 부분 샘플수가 줄어들어 공력감쇠율의 변동의 폭이 커지는 것으로 판단된다. 따라서 어느 초기 조건 값이 적절한가에 대해서는 명확하게 규정할 수 없지만 만약 충분히 긴 시간동안 계측된 데이터가 있다면, RD법을 이용한 고층건물의 공력감쇠율을 평가함에 있어 초기 조건 값 “응답의 표준편차” 또는 “ $\sqrt{2}$ × 응답의 표준편차”

Table 3. Approximate Number of Time Segments with Different Triggering Levels

Triggering level (x^*)	Square		Helical 180	
	Helical 180	Y-direction	X-direction	Y-direction
σ_x	5000	5500	5300	5000
$\sqrt{2}\sigma_x$	3600	3500	3400	3500
$2\sigma_x$	1100	1300	1300	1200
$2.5\sigma_x$	420	330	420	400

중 어느 것을 사용하더라도 비슷한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 공력진동실험을 통해 정방형과 180° 나선형 형상을 갖는 초고층건물의 공력감쇠 특성을 조사하였다. 또한 불규칙 응답을 갖는 시스템의 감쇠율을 평가하는데 주로 이용하는 RD법을 적용하는데 있어 부분 샘플 수 및 초기 조건 값 변화에 따른 초고층건물의 공력감쇠율의 특성을 조사하였다. 실험결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) RD법을 이용하여 공력감쇠율을 평가하는 경우, 기존 문헌

및 본 연구에서 검증된 것과 같이 부분 샘플을 최소 2,000개 이상을 추출해서 앙상블 평균을 적용해야만 불규칙한 공력감쇠율의 변동의 폭이 줄고 일정한 공력감쇠율을 구할 수 있는 것을 알 수 있었다.

- (2) Helical 180 모형에 대한 풍방향의 공력감쇠율의 특성을 살펴보면, 건물의 형상이 다름에도 불구하고, 정방향 모형의 공력감쇠율과 유사한 경향이 나타났다. 즉, 건물의 형상은 풍방향 공력감쇠에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 한편, 정방향 모형의 Y방향에 대한 공력감쇠율은 180° 나선형 모형의 공력감쇠율의 특성과는 매우 다른 분포를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 풍향 변화에 따른 180° 나선형 모형의 Y방향에 대한 공력감쇠율은 풍향의 변화와 상관없이 전반적으로 비슷한 값을 보였고, 무차원 풍속의 증가와 함께 변동의 폭은 작지만 점진적으로 증가하는 경향을 보였다.
- (4) 초기 조건 값 변화에 따른 공력감쇠율을 살펴보면, 초기 조건 값 “응답의 표준편차” 또는 “ $\sqrt{2}$ × 응답의 표준편차”를 적용하여 평가된 공력감쇠율은 매우 유사한 분포 및 결과 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험 데이터와 같이 충분히 긴 데이터를 확보한 경우에는 응답의 표준편차 또는 RD함수의 최적화에 근거한 값 중 어느 것을 사용하더라도 비슷한 결과를 얻을 것으로 판단된다.

마지막으로 초고층건물에 작용하는 변위응답과 공력감쇠력은 매우 밀접한 상관을 갖고 있으며, 풍속의 크기와 건물의 형상에 따라 풍직각방향의 공력감쇠의 특성도 매우 다르게 나타났다. 따라서 초고층건물의 형상변화에 따른 응답특성이 공력감쇠율과 어떠한 상관관계를 갖는지 정확한 이해와 평가가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 일본 문부과학성 공동이용-공동거점의 동경공예대학 풍공학 연구거점(The Joint Usage / Research Center of Wind Engineering, Tokyo Polytechnic University)의 연구비 지원 및 한국해양과학기술원의 주요연구사업(과제번호 PE9944D)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Architectural Institute of Japan (2000). Damping in Building. Maruzen Inc. (in Japanese).
 Architectural Institute of Korea (2009). *Korean Building Code and*

Commentary (KBC 2009), Kimoondang Publishing Co. Ltd. (in Korean).
 Asmussen, J. C. (1997). *Modal analysis based on the random decrement technique - application to civil engineering structures*, Ph.D. Thesis, University of Aalborg, Denmark.
 ESDU 83009 (2012). “Damping of structures, Part 1: Tall Buildings.” *ESDU International plc*, 27 Corsham Street, London N1 6UA.
 Huang, P., Quan, Y. and Gu, M. (2013). “Experimental study of aerodynamic damping of typical tall buildings.” *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-9.
 Kim, W., Yoshida, A., Tamura, Y. and Yi, J. H. (2016). “A study on aerodynamic damping and aeroelastic instability of helical-shaped super tall building.” *Journal Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, Vol. 29, No. 1, pp. 95-103 (in Korean).
 Kim, Y. C. (2014). “Aerodynamic damping ratio of super-tall buildings.” *Journal Archit. Inst. Korea*, Vol. 30, No. 8, pp. 29-36 (in Korean).
 Lee, D. K., Kong, M. J. and You, D. W. (2016). “A study on buffeting responses of a in-service steel cable-stayed bridge using full-scale measurements.” *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 3, pp. 349-359 (in Korean).
 Marukawa, H., Kato, N., Fujii, K. and Tamura, Y. (1996). “Experimental evaluation of aerodynamic damping of tall building.” *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 59, pp. 177-190.
 Quan, Y., Gu, M. and Tamura, Y. (2005). “Experimental evaluation of aerodynamic damping of square super high-rise buildings.” *Wind and Structures*, Vol. 8, No. 5, pp. 309-324.
 Rodrigues, J. and Brincker, R. (2005). “Application of the random decrement technique in operational modal analysis.” *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, pp. 191-200.
 Tamura, Y. and Suganuma, S. Y. (1996). “Evaluation of amplitude-dependent damping and natural frequency of buildings during strong winds.” *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 59, pp. 179-191.
 Tamura, Y., Shimada, K. and Hibi, K. (1993). “Wind response of a tower (Typhoon observation at Nagasaki Huis Ten Bosch Domtoren).” *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 50, pp. 309-318.
 Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M. and Kim, Y. C. (2011). “Wind force characteristics of tall buildings with unconventional configurations (part 4) aerodynamic and response characteristics of buildings with composite configurations.” *Annual Meeting of Architectural Institute of Japan*, pp. 41-42 (in Japanese).
 Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M. and Kim, Y. C. (2012). “Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations.” *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 107-108, pp. 179-191.
 Watanabe, Y., Isyumov, N. and Davenport, A. G. (1997). “Empirical aerodynamic damping function for tall building.” *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 72, pp. 313-321.