

풍하중을 받는 구조물의 풍방향 동적응답해석

Dynamic Alongwind Response of the Structure under the Wind Load

도혜경* 권택진**

Do, Hye-Kyeong Kwun, Taek-Jin

ABSTRACT

The structural dynamic responses by wind load consist of alongwind, acrosswind and torsional behavior. Specially, dynamic alongwind response can be obtained from theoretical approach presented by Davenport, Vellozzi and Cohen. Generally the structural dynamic alongwind response can be obtained using the approximate analysis, under the condition that only the first mode shape of the structure is considered and the mode shape is assumed to be a linear function. In this paper, the dynamic alongwind responses are performed by using spectrum of longitudinal velocity fluctuations presented by Davenport and Kaimal, respectively.

1. 서론

최근 간막이 벽 및 무거운 외장재 사용의 감소 등으로 인하여 구조물이 경량화·고층화되고 있다. 그러나 재료의 강도와 연성이 높아지고 세장비가 커짐에 따라 구조물의 응답이 커지므로 여러 선진국에서는 1960년대부터 풍하중에 의한 진동문제를 연구하고 있다. 풍하중에 의한 구조물의 응답은 풍방향, 풍직각방향, 비틀림방향으로 나타나며 이 가운데 풍방향 응답은 Davenport, Vellozzi 그리고 Cohen 등에 연구되어 이론적인 접근이 가능하다.^{(1),(5)} 일반적으로 구조물의 풍방향 동적응답을 구하고자 할 때는 구조물의 1차 모드의 진동만을 고려하며 모드 형상은 선형으로 가정하여 근사해석을 한다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 그러므로 본 논문에서는 Davenport와 Kaimal이 제안한 변동풍속스펙트럼을 이용하여 구조물의 풍방향 동적응답을 구하고 이를 비교함으로써 두 변동풍속스펙트럼의 특성을 알아보려고 한다. 또한 풍하중의 고주파수영역이 구조물의 응답에 미치는 영향을 알아보기 위해서 풍하중의 주파수영역을 구조물의 고유진동수보다 작거나 같은 경우와 고유진동수보다 큰 영역까지 포함한 경우의 풍방향 동적응답을 살펴보기로 한다.

2. 풍하중의 개요

2.1 풍속의 특성

바람은 대개경계층(atmosphere boundary layer) 내의 온도와 압력의 차이에 의해서 발생하는 공기의 흐름이다.

* 성균관대학교 건축학과 석사과정

** 정회원 · 성균관대학교 건축학과 교수, 공학박사

바람이 가지는 중요한 특성 중의 하나는 대기경계층 내에서 지표면으로부터의 높이가 증가함에 따라 풍속이 증가하는 것으로 주로 지표면의 조도(surface roughness)의 상태에 따라 변화하는 것이다. 즉, 지표면의 조도가 작은 경우는 풍속의 변화가 작지만 대도시와 같이 지표면의 조도가 큰 경우는 풍속의 변화가 크다. 이와 같은 대기경계층 내의 임의의 높이 z 에서의 풍속의 분포를 알기 위해서는 일반적으로 지표면의 조도상태를 고려한 대수법칙(logarithmic law)과 지수법칙(power law)을 이용한다. 먼저 대수법칙은 지표면의 조도와 공기의 점성을 고려한 것으로 다음 식과 같이 나타난다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽¹¹⁾

$$U(z) = \frac{1}{0.4} u_* \ln \frac{z - z_d}{z_0} \quad (2.1)$$

다만, u_* : 마찰속도(friction velocity), z_0 : 조도장(roughness length), z_d : 영면변위(zero plane displacement)

또한 지표면의 조도만을 고려한 지수법칙은 다음 식과 같이 나타난다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

$$U(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

다만, z_{ref} : 기준높이로써 일반적으로 10m, U_{ref} : 기준높이에서의 풍속, α : 지표면 조도에 따른 멱지수

2.2 풍하중에 의한 구조물의 풍방향 진동

바람의 작용과 이에 따른 구조물의 진동은 풍속의 각 방향 요소에 따라 풍방향, 풍직각방향 그리고 비틀림방향으로 나타난다. 그러나 풍직각방향과 비틀림방향의 진동은 이론적 접근 방법이 확립되지 않아 주로 경계층 풍동실험에 의존하고 있기 때문에 풍방향 진동만이 이론적 접근이 가능하다.

풍방향 응답은 대기경계층의 난류성분에 의해 발생하며 Davenport(1961,1967), Vellozzi와 Cohen(1968) 그리고 Simiu(1973,1980) 등에 의해 연구되고 있다. 또한 이러한 연구를 바탕으로 Solari(1982)가 구조물의 1차 모드의 진동을 평가하기 위한 closed-form을 개발하였다.⁽⁷⁾⁽¹³⁾ 구조물의 풍방향 진동은 평균바람(mean wind)에 의해서 발생하는 평균요소(mean component)와 난류(turbulent)에 의해 발생하는 변동요소(fluctuating component)로 구성된다.

3. 구조물의 동적응답해석

3.1 기본 가정

구조물의 풍방향의 동적 해석과정을 간단하게 하기 위해서 다음의 두가지 가정을 이용한다.⁽²⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

첫째, 구조물은 선형탄성거동을 한다.

둘째, 구조물의 진동은 1차 모드에 의해 지배적인 영향을 받으며 지반으로부터 높이에 대한 선형함수로써 나타난다. 즉, 높이가 H 인 구조물의 1차 모드 형상함수는 $\phi_1(z) = z/H$ 이다. 단, 두 번째 가정을 이용하기 위해서는 1차 모드의 영향이 2차 이상의 고차 모드의 영향보다 충분히 크다고 판단되어야 한다.

3.2 평균류방향의 변동풍속스펙트럼

변동풍하중에 의한 구조물의 풍방향 동적응답해석에 영향을 미치는 주원인은 대기경계층 내의 난류성분인 변동풍속이다. 난류운동의 에너지는 변동풍속스펙트럼으로 나타낼 수 있으며 이러한 변동풍속스펙트럼 중

에서 구조물 설계용으로 가장 보편적으로 사용되고 있는 것이 Davenport가 제안한 식이며 다음과 같다.⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾

$$\frac{nS(z, n)}{u_*^2} = 4.0 \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \quad (3.1)$$

다만, $x = \frac{1200 \times n}{U_{10}}$, u_* 는 마찰속도로 $u_* = kU(z)/\ln(z/z_0)$, k : Karman 상수

또한 Kaimal은 변동풍속스펙트럼을 나타내기 위해 다음과 같은 식을 제안하였다.⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾

$$\frac{nS(z, n)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (3.2)$$

다만, $f = f(z, n) = n \cdot z/U(z)$

위 식은 높이 z 와 진동수 n 에 따라 변하며, $\bar{u}^2 = 6u_*^2$ 의 관계를 만족시킨다. 식(3.1)과 식(3.2)를 이용하여 아래의 특성을 가진 풍하중을 높이 194m에서의 변동풍속스펙트럼으로 나타내면 아래의 그림과 같다. 적용되는 풍하중은 지반으로부터 10m높이에서의 풍속은 15.65m/s이고 노풍도에 따른 먹지수는 0.33이며 마찰속도 u_* 는 3.02인 특성을 가진다.

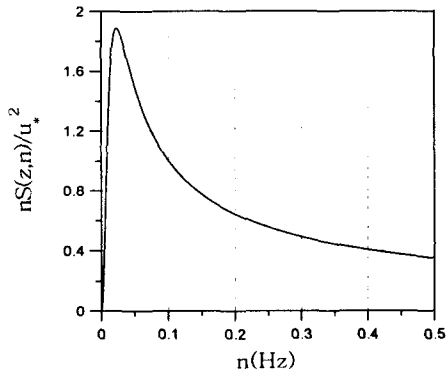


그림1. Davenport의 변동풍속스펙트럼

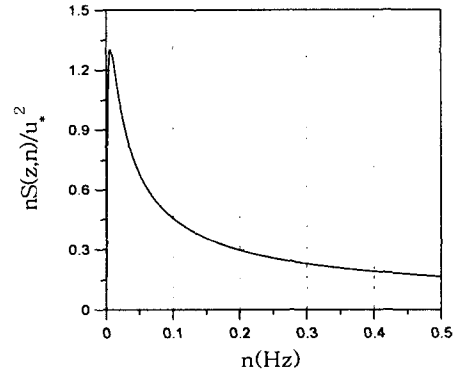


그림2. Kaimal의 변동풍속 스펙트럼

3.3 평균변위

지표면으로부터 높이 z 인 지점에서의 일반적인 변위 $x(z, t)$ 는 각 모드의 합으로써 다음 식과 같다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾

$$x(z, t) = \sum_i q_i(t) \phi_i(z) \quad (3.3)$$

본 논문에서는 변위 $x(z, t)$ 에 대해서 1차 모드만을 고려하면 다음 식과 같이 나타난다.

$$x(z, t) = q_1(t) \phi_1(z) \quad (3.4)$$

따라서, q_1 은 1차 모드의 일반화 변위(generalized displacement)이며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_1 = \frac{Q_1}{K_1}, \quad K_1 = (2\pi n_1)^2 M_1 \quad (3.5)$$

다만, Q_1 : 일반화 힘(generalized force), K_1 : 일반화 강성(generalized stiffness),

M_1 : 일반화 질량(generalized mass), n_1 : 고유진동수(natural frequency)

즉, 식(3.5)를 이용하여 구조물의 높이 z 에서의 평균변위 $\bar{x}(z)$ 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{x}(z) = \frac{Q_1}{K_1} \phi_1(z) \quad (3.6)$$

3.4 RMS 응답

1차 모드만을 고려한 RMS(σ_x)변위인 $x(z)$ 는 스펙트럼 밀도(spectral density)인 $S_x(n)$ 과 역학적 증폭 계수(mechanical magnification factor)인 $H_1(n)$ 을 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty S_x(n) dn \quad (3.7)$$

$$S_x(n) = |H_1(n)|^2 S_Q(n) \quad (3.8)$$

1차 모드에 대한 역학적증폭계수는 풍하중의 주파수에 대하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$H_1(n) = \frac{1}{4\pi^2 n_1^2 M_1^2 \sqrt{\left[1 - \left(\frac{n}{n_1}\right)^2\right]^2 + 4\zeta_1^2 \left(\frac{n}{n_1}\right)^2}} \quad (3.9)$$

다만, ζ_1 은 1차 모드의 감쇠율

식(3.7)에서 나타나는 RMS 변위는 오른쪽의 그림과 같이 구조물의 고유진동수 주변에 날카로운 부분을 지닌다. 따라서 Davenport의 제안과 같이 풍하중의 주파수가 구조물의 고유진동수와 같은 부분인 공진응답(resonant response: $\sigma_{x,B}$, (1)부분)과 공진응답을 제외한 주파수 부분인 비공진응답(non-resonant response: $\sigma_{x,D}$, (2)부분)으로 나누어 다음 식과 같이 표현할 수 있다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾

$$\sigma_x^2 = \sigma_{x,B}^2 + \sigma_{x,D}^2 \quad (3.10)$$

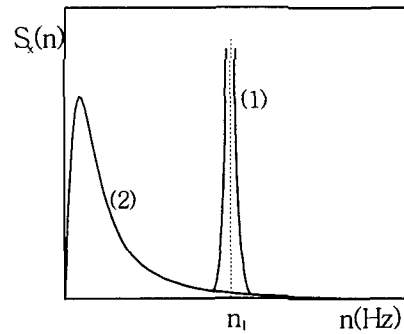


그림3. 변위에 대한 스펙트럼 밀도

변위에 대한 스펙트럼 밀도를 구하기 위해서 우선 풍력에 대한 스펙트럼 밀도를 다음과 같이 구한다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹²⁾

$$S_Q(n) = (\rho C_D B)^2 \kappa^2(n) \int_0^H \int_0^H \bar{U}(z_1) \bar{U}(z_2) \phi_1(z_1) \phi_2(z_2) S(z_1, n)^{1/2} S(z_2, n)^{1/2} \gamma(z_1, z_2, n) dz_1 dz_2 \quad (3.11)$$

다만, $\kappa(n) = \frac{1}{1 + \left[\frac{2n\sqrt{A}}{U(z)} \right]^{4/3}}$

식(3.11)을 포함한 변위에 대한 스펙트럼 밀도인 식(3.7)에 구조물의 고유진동수를 대입하므로써 $\sigma_{x,B}^2$ 를 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$\sigma_{x,B}^2 = |H(n_1)|^2 S_Q(n_1) \quad (3.12)$$

또한 식(3.11)의 풍력에 대한 스펙트럼 밀도를 식(3.10)에 대입하여 구조물의 고유진동수를 제외한 주파수부분에 대하여 수치적분함으로써 $\sigma_{x,D}^2$ 를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{x,D}^2 = \int_0^{n_1 - \Delta n} |H_1(n)|^2 S_Q(n) dn + \int_{n_1 + \Delta n}^{\infty} |H_1(n)|^2 S_Q(n) dn, \quad \Delta n \rightarrow 0 \quad (3.13)$$

이상에서 구한 식(3.12)의 $\sigma_{x,B}^2$ 과 식(3.13)의 $\sigma_{x,D}^2$ 을 가지고 식(3.10)를 이용하여 구조물의 RMS 변위인 σ_x 를 구할 수 있다. 또한 RMS 가속도($\sigma_{\dot{x}}$)는 다음과 식과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{\dot{x}} = (2\pi n_1)^2 \sigma_x \quad (3.14)$$

2.5 변위의 최대값

구조물의 임의의 점에서 변위의 최대값은 바람의 정적성분에 의한 평균변위와 동적성분, 즉 변동성분에 의한 RMS 변위를 모두 고려하여 나타낸다. 그러므로 변위의 최대값은 피크팩터(peak factor)를 이용하여 다음 식과 같이 나타낸다.⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

$$x_{peak} = \bar{x} + g\sigma_x = \bar{x} + \sqrt{(g_B\sigma_B)^2 + (g_D\sigma_D)^2} \quad (3.15)$$

다만, g 는 피크팩터

여기서 비공진부분의 응답에 대한 피크팩터인 g_B 는 3.5이고, 공진부분의 응답에 대한 피크팩터 g_D 는 아래의 식에서 $\nu = n_1$ 일 때의 값으로 다음 식과 같다.⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

$$g_D = \sqrt{[2 \ln(\nu T_0)]} + \frac{0.557}{\sqrt{[2 \ln(\nu T_0)]}} \quad (3.16)$$

3. 해석예제 및 결과분석

3.1 해석모델

해석모델은 아래의 그림에서 보이는 장방형의 구조물로서 동적특성은 표1과 같고⁽³⁾ 이때 구조물에 작용하는 풍하중은 그림에서 보이는 것과 같은 방향으로 작용한다. 풍하중은 노풍도가 A, B 그리고 C인 지역의 관

측소에서 측정된 평균풍속의 값을 이용하며 그 특성을 기준높이인 10m에 대해서 나타내면 표2와 같다.

표1. 구조물의 특성

B	D	H	damping ratio	first natural frequency
24m	18m	60m	0.02	0.463Hz

표2. 풍하중의 특성

	풍속	u_z	α	항력계수	공기밀도
노풍도 A지역	15.65m/s	2.35	0.33	1.3	1.2kg/m ³
노풍도 B지역	18.78m/s	2.14	0.22		
노풍도 C지역	20.83m/s	1.43	0.14		

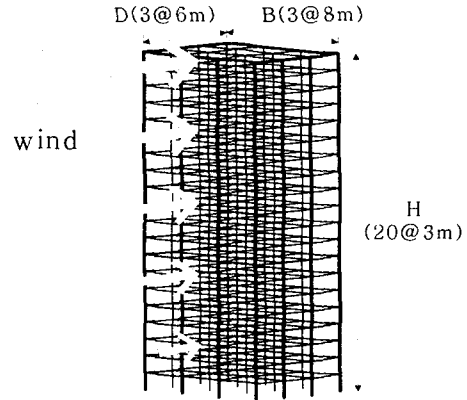


그림4. 해석모델

3.2 해석 결과

풍방향 동적응답을 구하기 위해서 Davenport가 제안한 것과 같이 공진응답과 비공진응답으로 나누어 전 체응답을 구하는 방법을 이용하였다. 또한 지상에서의 임의의 높이에 대한 풍속을 구하기 위해서 영면변위를 고려한 지수법칙을 이용하였다. 이상의 조건에서, Davenport와 Kaimal이 제안한 풍방향 변동풍속스펙트럼을 이용하여 응답을 구하였다. 또한 풍하중의 고주파수영역이 구조물에 미치는 영향을 알아보기 위해서 풍하중의 주파수 영역을 구조물의 고유진동수보다 작거나 같은 경우(case 1)와 고유진동수보다 큰 영역까지 포함한 경우(case 2)로 나누어 살펴본다. 이 때 case 2에서는 고유진동수의 3배영역까지의 풍하중을 고려한다. 다만 변위의 단위는 10⁻²m이고 가속도의 단위는 10⁻²m/s²이다. 아래의 그림은 해당 지역의 노풍도와 이용되는 변동풍속스펙트럼에 따른 비공진 응답을 나타낸 것이다.

표3. 구조물의 응답(Davenport의 풍방향 변동풍속스펙트럼 이용)

	case 1			case 2			gust factor
	변위		가속도	변위		가속도	
	RMS	최대값	RMS	RMS	최대값	RMS	
노풍도A지역	0.71	4.34	5.97	0.71	4.34	5.97	2.37
노풍도B지역	0.66	4.30	5.60	0.66	4.30	5.60	2.23
노풍도C지역	0.44	3.48	3.71	0.44	3.48	3.71	1.82

표4. 구조물의 응답(Kaimal의 풍방향 변동풍속스펙트럼 이용)

	case 1			case 2			gust factor
	변위		가속도	변위		가속도	
	RMS	최대값	RMS	RMS	최대값	RMS	
노풍도A지역	0.73	4.44	6.20	0.73	4.44	6.20	2.43
노풍도B지역	0.70	4.41	5.88	0.70	4.41	5.88	2.28
노풍도C지역	0.46	3.56	3.92	0.46	3.56	3.92	1.87

3.3 해석 결과의 비교 및 분석

본 논문에서는 노풍도 A~C인 지역에서 측정된 풍하중에 의한 구조물의 풍방향 동적응답을 구하여 지표면의 조도에 따른 응답을 분석하였다. 또한 해석 수행 시 풍하중의 고주파수영역이 응답에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 해석결과를 비교 및 분석하면 다음과 같다.

첫째, A지역에서 C지역으로 갈수록 기준높이에서의 평균 풍속은 작으나 응답은 커진다. 이것은 지표면의 조도가 거칠수록 변동풍속성분이 커지기 때문으로 사료되며 풍하중의 평균성분보다는 난류성분이 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

둘째, Davenport와 Kaimal의 변동풍속스펙트럼을 이용한 응답을 살펴보면 Kaimal의 식을 이용하였을 때가 응답이 크게 나타난다. 이는 그림1~2와 그림5~7에서 보이듯이 Kaimal의 식이 풍하중의 저주파수에 대해 더 크게 나타나기 때문으로 사료된다.

마지막으로 풍하중의 고주파수 영역이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위해서 case 1과 case 2의 경우를 고려하였다. 오른쪽의 그래프에서 주파수가 커질수록 비공진응답의 값이 거의 0가 되어가는 것이 보여지며 표3, 표4에서도 두 경우가 거의 차이가 없었다. 따라서 풍하중의 고주파수 영역은 구조물의 응답에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

4. 결론 및 추후연구과제

평균풍속보다 변동풍속이 구조물의 응답에 더 많은 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한 Kaimal의 변동풍속스펙트럼이 Davenport의 변동풍속스펙트럼보다 응답을 더 크게 평가하고, 풍하중의 성분 중 고차원의 주파수를 갖는 영역은 구조물에 거의 영향을 미치지 않았다. 추후에는 이론적 접근이 얼마만큼의 정확성을 갖는지를 판단하기 위해서 실측한 데이터와 비교해 보고자 한다.

감사의 글

이 연구는 2001년도 BK21 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

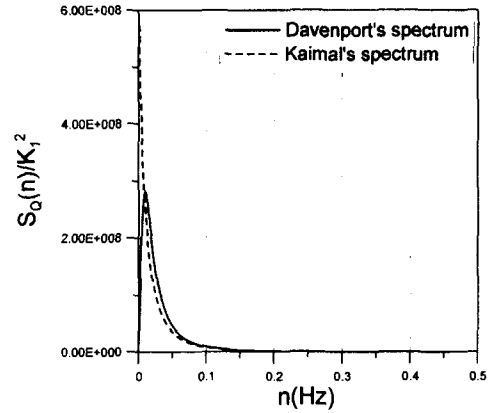


그림5. 비공진응답(노풍도A지역)

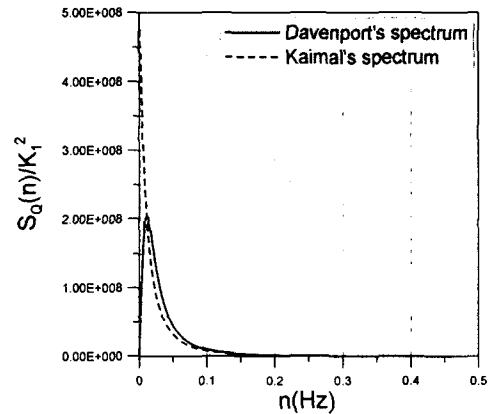


그림6. 비공진응답(노풍도B지역)

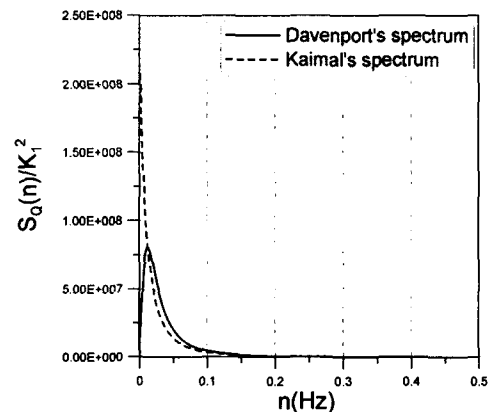


그림7. 비공진응답(노풍도C지역)

참고문헌

1. 김영문, 황재승, 건축구조물의 내풍설계, 제18회 전산구조공학회 기술강습회, 한국전산구조공학회, 1998.
2. 한국풍공학회, 건축물 풍동실험 가이드북, 한림원, 1998.
3. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설(2000), 태림문화사, 2000. 6, pp.169~239.
4. 김영문, 박병용, “풍하중을 받는 고층건물의 평균류방향의 동적응답해석,” 대한건축학회논문집, 4권1호(통권15호), 1988, pp.231~239.
5. Cho, Kang-Pyo, *Passive Viscoelastic Damping Systems for Buildings*, Colorado State University, 1998.
6. Simiu, Emil and Scanlan, H. Robert, *Wind Effects on Structures*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1996.
7. Balendra, T., *Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads*, Springer-Verlag, 1993.
8. Davenport, Alan G., “Gust Loading Factors,” *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.93, No.ST3, 1967, pp.11~34.
9. Vellozzi, Joseph and Cohen, Edward, “Gust Response Factors,” *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.94, No. ST6, 1968, pp.1295~1313.
10. Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Izumi, Y. and Cote, O. R., “Spectral Characteristics of Surface-Layer Turbulence,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.98, No.417, 1972, pp.563~589.
11. Simiu, Emil, “Equivalent Static Wind Loads For Tall Building Design,” *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 100, No.ST9, 1982, pp.719~737.
12. Simiu, Emil, “Wind Spectra and Dynamic Alongwind Response,” *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.100, No. ST9, 1982, pp.1897~1910.
13. Solari, Giovanni, “Alongwind Response Estimation Closed Form Solution,” *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.108, No.ST1, 1982, pp.225~244.
14. Solari, Giovanni, “Gust Buffeting I: Peak Wind Velocity and Equivalent Pressure,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.119, No.2, 1993, pp.365~382.
15. Solari, Giovanni, “Gust Buffeting II: Dynamic Alongwind Response,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.119, No.2, 1993, pp.383~398.