

초고층 건축물의 수평진동 사용성 평가기준

조강표* · 홍성일** · 정승환*** · 조수연****

Human Comfort Criterium for Horizontal Vibration of High-Rise Buildings

Kangpyo Cho*, Sungil Hong**, Seung-Hwan Jeong***, Wonsul Kim****

Keywords : Serviceability(사용성), Vibration(진동), 초고층 건축물(High-Rise Building), Natural Frequency(고유진동수), Acceleration(가속도),

Abstract

Abstract should be in This paper presents review on human comfort criteria in major codes and standards for tall buildings. In general, human comfort criteria of tall buildings have been used by magnitude of wind-induced acceleration response. Two different indexes in determination of the magnitude have been used: the peak value which occurs during a period of time and the rms value averaged over this same period. These distinctive acceleration indexes are discussed in detail and each criterium was reviewed and compared. The distinctions arisen because of the different wave forms, or acceleration signatures were addressed. It is described that which index of acceleration should be adopted in establishment of Korean human comfort criteria. In addition, some arguments from a technical standpoint that favor the use of each index are presented.

1. 서론

바람에 의한 초고층 건축물의 수평진동은 때로는 과도하게 발생되어 건축물 사용자들로 하여금 혐기증 혹은 시각차 등과 같은 불쾌감을 유발시킬 수 있다. 쾌적한 건축 환경을 제공하기 위하여 초고층 건축물의 사용자가 지각할 수 있는 진동의 크기와 이를 넘어서 일정시간 동안 진동이 계속되었을 경우의 가속도의 크기를 제한할 필요가 있다.

세계 도처에서 많은 연구진에 의해 건축물 진동의 "지각 임계점(threshold of motion perception)"에 대한 연구가 진행되어 왔다 (Soliman 1963; Chen & Robertson 1972; Chang 1973; Irwin 1978; CTBUH 1981; Kanda et al. 1994). 지각임계점에 대한 연구는 주로 실험실에서 진동대를 이용하여 진폭을 변화시키면서 사인파의 진동을 하는 조건에서 수행되었다. 실험대상 주체들이 어떤 진동크기에서 지각을 하는지 확률통계해석을 통해 임계 지각점을 정한 것이다. 최근에 Kwok et al.(2005) 초고층 건축물의 풍진동을 모사하기 위해 2축 진동대에서 0.125Hz-1.00Hz 범주의 주파수 영역에 대해 사인파가 아닌 무작위 진동(random vibration)에 대한 인간의 지각임계점과 진동사용성평가 기준에 대해 보고하였다. 건축물의 진동의 주파수가 감소함에 따라 인간의 지각 임계점이 증가한다는 결과를 보여 주었다.

본 논문에서는 각 선진 국가에서 채택하고 있는 진동사용성 평가기준을 검토하고 우리나라의 실정에 적합한 기준정립을

위한 기초자료로서 가속도의 척도에 초점을 두고 연구를 수행하였다. 초고층 건축물의 풍진동에 대한 인간의 응답은 주로 수평진동의 가속도로 평가를 한다. 건축물의 가속도를 평가함에 있어서 2가지 서로 다른 척도 즉 최대가속도와 RMS가속도를 사용하고 있다. 특히 이 각 척도의 기술적인 논거를 제시하는데 중점을 두고자 하였다.

2. 세계 주요 진동사용성 기준 검토

2.1 ISO 6897

ISO에서 규정하고 있는 진동사용성 평가시의 가속도는 10분 평균풍속의 5년 재현 기대풍속에 대한 진동가속도의 RMS값이다. ISO기준은 구조물의 고유진동수 n_0 에 따라 달라지고

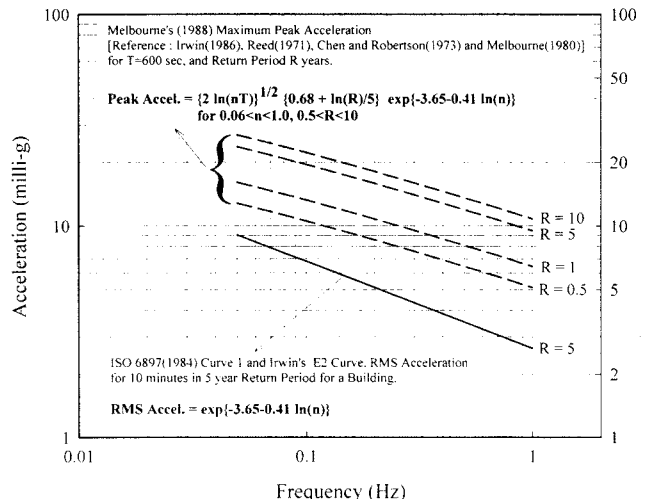


그림 1. ISO (6897) 진동사용성 기준

* 원광대학교 건축학부, kpcho@wongwang.ac.kr
** 원광대학교 공업기술개발연구소, shwjeong@hotmail.com
*** 원광대학교 공업기술개발연구소, falcon89@wongwang.ac.kr
**** 원광대학교 대학원, jo1256@wongwang.ac.kr

있으며, 재현기간 5년에 대한 RMS가속도와 재현기간 0.5년, 1년, 5년, 10년에 대한 최대가속도를 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다. 건축물의 수평진동은 거주자가 경험하는 불안(intrusion, alarm and fear)을 대상으로 하고 있고 적용되는 초고층건축물의 고유진동수 영역은 0.05 Hz-1.00 Hz 값을 두고 있다.

2.2 일본기준

일본기준은 거주환경으로써의 성능을 유지하는 관점에서, 강풍으로 인해 건축물에 발생하는 수평진동을 평가하는 경우에 적용하도록 하고 있다. 대상으로 하는 진동수의 범위는 저층부터 고층까지 건축물의 고유진동수를 포함하여 0.1Hz~5Hz 범위로 하고 있다. 바람에 의한 진동에 관한 거주 성능 평가는 목표성능을 설정하여 그림2에 표시한 성능평가 곡선에 건축물의 병진진동의 고유진동수와 재현기간 1년의 최대응답가속도를 조합하여 행하도록 하고 있다.

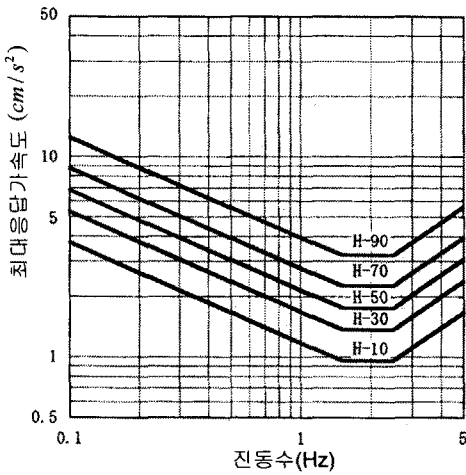


그림 2 일본기준(AIJES-V001-2004)

2-3 캐나다 기준

캐나다기준은 다양한 경계층 풍동실험결과를 통해 바람에 의해 야기되는 건축물의 수평진동을 풍방향과 풍직각방향에 대해서 최대가속도를 나타내는 경험식으로 제안하고 있다. 식(1)은 건축물 최상층에서의 풍직각방향의 최대가속도를 구하는 식이다.

$$a_w = n_w^2 g_p \sqrt{WD} \left(\frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_w}} \right) \quad (1)$$

여기에서, a_w : 풍직각방향 최대가속도 (m/s²), n_w : 풍직각방향 고유진동수 (Hz), g_p : 피크팩터, W : 풍직각방향 건물 폭(m), D : 풍방향 건물 폭(m), $a_r = 78.5 \times 10^{-3} [V_H / (n_w \sqrt{WD})]^{3.3}$ (Pa), ρ_B : 건축물의 평균밀도 (kg/m³), g : 중력가속도 (9.81 m/s²), β_w : 풍직각방향 임계감쇠정수이다.

또한, 덜 세장하고, 저 풍속인 경우, 풍방향의 최대가속도를 구하는 식(2)을 제안하고 있다.

$$a_D = 4\pi^2 n_D^2 g_p \sqrt{\frac{KsF}{C_e \beta_D}} \frac{\Delta}{C_g} \quad (2)$$

여기에서, a_D : 풍방향 최대가속도 (m/s²), n_D : 풍방향 고유진동수 (Hz), g_p : 피크팩터, K : 지표면상태에 따른 계수 (노풍도 A:0.08, B:0.1, C:0.14), s : 규모계수, F : 고유진동수에서의 파워스펙트럼 값, C_e : 풍속의 연직분포계수, β_D : 풍방향 임계감쇠정수, Δ : 건축물 최상층에서의 풍방향 최대변위 (m), C_g : 가스트영향계수이다.

가속도한계는 10년 재현 기대풍속에 대하여 중력가속도의 1%~3% 범위로 규정하고 있다. 식(1)과 식(2)에 의하여 가속도를 평가하는 경우, 주거용건물의 가속도한계는 중력가속도의 1%~3% 범위 중에 작은 쪽의 범위를 적용하고, 사무용건축물의 가속도한계는 중력가속도의 1%~3% 범위 중 큰 쪽의 범위를 적용하도록 하고 있다. 그러나 설계자가 보다 구체적이고 유효한 정보를 가진 경우에는 위의 규정을 적절하게 조정할 수 있도록 하고 있다.

표 1은 각국의 진동사용성 평가기준을 비교하여 나타낸 것이다.

3. 평가기준의 가속도 척도 - RMS or Peak 가속도

건축물의 가속도를 평가함에 있어서 2가지 서로 다른 척도 즉 최대가속도와 RMS가속도를 사용하여 왔다. 최대가속도는 일정한 시간, 말하자면 강풍이 지속되는 약 20분에서 60분 정도의 시간 동안에 발생하는 건축물의 진동 가속도의 최대값을 말하고, RMS가속도는 같은 시간 동안에 대해 평균한 RMS값을 말한다. 이와 같이 서로 다른 가속도 척도를 가지고 진동사용성 평가를 다루게 된 계기는 진동 가속도의 파형 때문일 것이다. 진동가속도의 파형은 건축물의 형상, 건축물의 동적특성, 접근류의 특성 등에 따라 다르게 나타난다.

그림3은 건축물의 형상비가 다른 경우에 있어서 동적특성에 따라 풍직각방향의 응답으로부터 피크팩터를 나타낸 것이다. 그림3에서와 같이 외부의 동적하중에 의한 건축물의 진동응답은 여러 가지의 형태의 파형을 가질 수 있다.

RMS가속도 척도는 인간은 어떤 특정한 크기의 가속도를 싫어하는 정도는 일정시간에 걸쳐 평균을 취한 효과에 의해 결정된다고 보는 것이다. 예를 들면, 지각임계점 이상의 진동 가속도 사이클 수들의 가중된 합과 그러한 사이클의 강도(진폭)가 될 것이다. 반면에 최대가속도 척도는 인간은 가장 큰 개개의 최대 가속도에 의해서만 영향을 받고 그 보다 작은 가속도 사이클에 대해서는 잊어버린다(무시한다)고 보는 경향이 있다. 엄격히 말하면, 최대가속도 척도는 정해진 시간(말하자면 20분에서 1시간)에 발생할 수 있는 진동의 가장 큰 하나의 사이클의 기대되는

표 1. 각국 진동사용성 평가기준의 비교

진동사용성 기준	실험근거	재현기간	평가지간	허용가속도의 의존성	가속도 척도
ISO 6897	moving room (정현파 진동)	5년	10분	건축물의 고유진동수	RMS가속도
캐나다기준(NBCC 1995)	moving room (정현파 진동)	10년	1시간	건축물의 용도	최대가속도
일본기준 (AIJES-V001-2004)	moving room (정현파 진동)	1년	10분	건축물의 고유진동수 목표성능	최대가속도

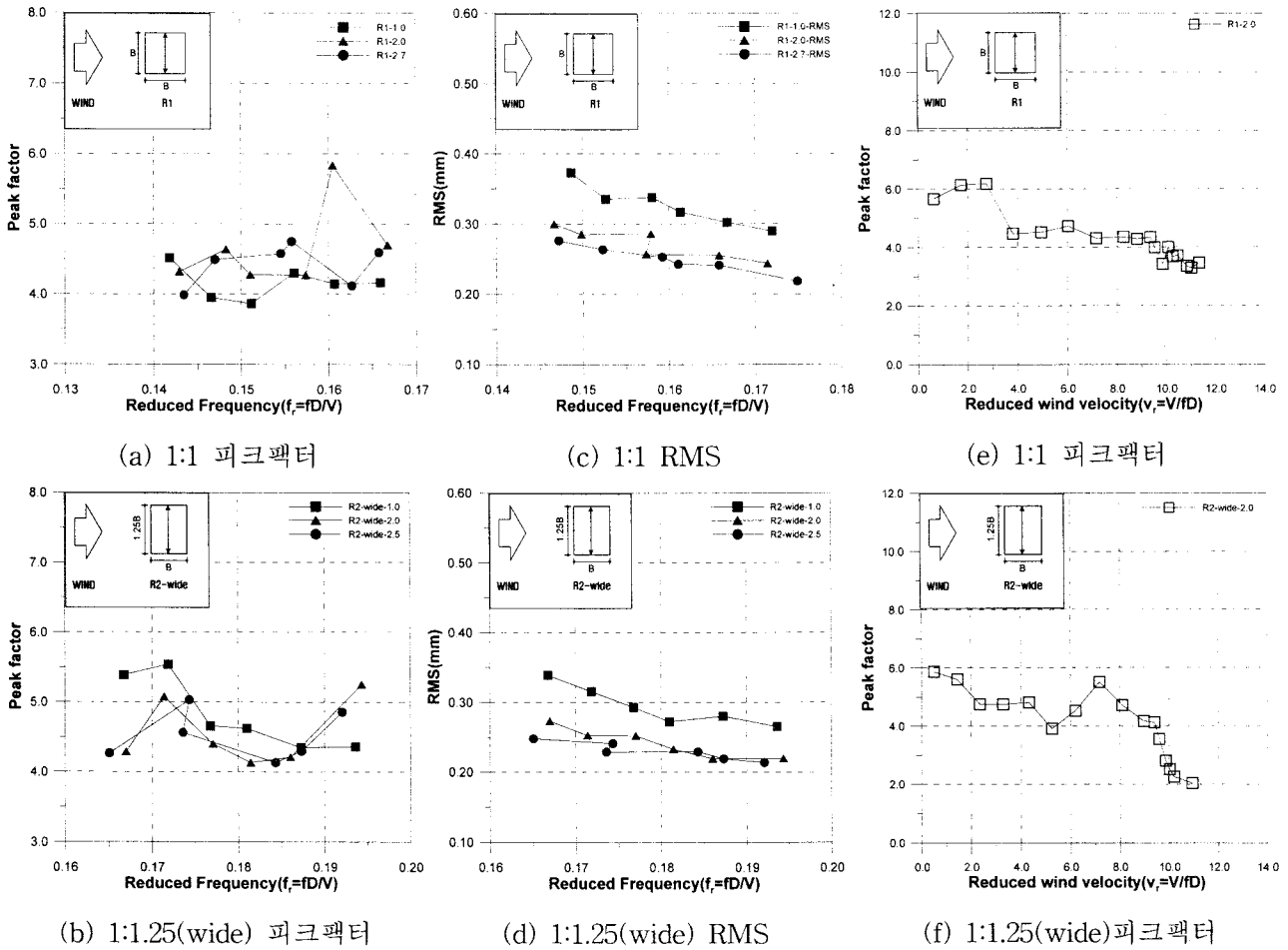


그림 3 피크팩터와 RMS 가속도

값으로 말할 수 있을 것이다.

건축물의 진동에 대한 인간의 응답에 대해 피크팩터 혹은 가속도파형의 의존성에 관하여 문서화된 연구보고 즉 적어도 고층 건축물의 수평진동에 관한 보고서는 거의 찾아 볼 수 없다. 그렇다면 적절한 가속도 척도를 어떻게 선택할 것인가? 이점에서 정성적인 측면과 실용적인 측면에서 이 문제를 다루도록 할 것이다.

건축물의 진동에 대한 인간의 반응에 대한 대부분의 기준은 RMS가속도에 근거하고 있다. 예를 들면, ISO 6897과 ISO 2631인데 여기에서 “유효한 가속도(effective acceleration)”은 RMS값이라고 정의되어 있다. 그리고 Hansen et al. 과 ANSI S3.18과 S3.29도 RMS가속도를 사용하고 있다. RMS가속도를 사용하는 이유는 문서화되어 있지 않지만 RMS가속도가 사용되어 왔다는 사실하나로 어떤 합리적인 근거가 있는 것처럼 추론되어서도 안 될 것이다. Irwin(1978)에 의하면, 제안된 RMS가속도를 넘어서는 가속도는 짧은 시간동안에 발생하고 이와 같이 높은 가속도는 폭풍에 대한 기억에 큰 기여를 한다고 생각되지 않는다고 하였다. 짧은 기간 동안의 높은 레벨의 가속도는 폭풍이 가장 심한 10분 동안에 발생할 수 있는데 이에 대한 것도 RMS가속도로 설명될 수 있다. 이와 같은 이론적인 설명은 ISO 6897에서도 다시 사용되어 왔다. Hansen et al.은 “최고조의 폭풍동안의 어느 일정한 시간에 대해 평균을 취한 진동강도는 고려해야 할 중요한 변수이고 최고조의 폭풍동안에 얻고 최고층에 대해 평균한 RMS가속도는 진동사용성에 대해 가장 잘 나타내주고 있다.” 라고 하고 있다. RMS가속도는 가속도의 크기보다는 육체적인 자극의 지속시간에 더 중요성을 두고 있다. Alexander et al.은 수직진동에 대한 메스꺼움에 대한 연구와 관

련하여 다음과 같이 기술하고 있다. ‘... 자극에 대한 강도가 아닌 자극에 대한 시간특성이 아주 중요한 요소이다. 최대가속도의 크기가 메스꺼움의 원인이 아니다. 아주 큰 수직진동을 보이는 많은 차량은 좀처럼 메스껍지 않다. ...’

건축물의 진동사용성 평가기준을 정립할 때 건축물의 진동에 대한 지각임계점은 일정 크기의 최대가속도에 의존한다는 것은 누구도 반박을 할 수 없을 것이다. 그러나 허용가속도의 크기는 일정한 시간 동안의 가속도를 평균한 RMS가속도가 더 합리적인 척도라고 할 수 있다.

RMS가속도를 선호하는 기술적인 논거는 해석적인 방법이나 풍동실험으로부터 예측 또는 측정하기가 보다 간단하다는 것이다. 그러므로 결과적으로 예측하는 기관들 사이에 일관성이 있다고 할 수 있다.

건축물의 동적응답예측은 풍동실험으로부터 풍력스펙트럼 밀도를 얻은 다음 무작위진동기법(random vibration techniques)을 이용하여 RMS가속도응답을 구한다. 아마도 대부분의 풍동실험실에서 같은 방법을 이용하여 구할 것이다. 그러나 최대가속도를 구할 때는 방법론적으로 여러 가지가 있을 수 있다. 최대가속도는 RMS가속도에다 피크팩터를 곱하여 구하는데 어떤 연구실에서는 피크팩터를 3.5로 하여 구하기도 한다. 이것은 너무나도 단순한 접근방법인데도 불구하고 흔히 쓰이고 있고 Davenport 기준과 일치하는 면도 있다. 최대가속도는 실제 구조물에서 발생하는 피크팩터보다 해석에서 다른 값을 사용하면 왜곡될 수 있다 (그림 3참조).

4. 결론

선진 국가에서 사용하는 건축물의 진동사용성 평가기준을 검토하였다. 특히 평가기준이 되는 가속도의 척도로서 RMS가속도와 최대가속도에 대해 가속도 파형의 영향을 논의하였다. 예로부터 실험실에서 사용하여 왔던 정현파와 실제구조물에서 발생하는 무작위진동(random vibration)을 연관시키기 위해서 가속도 파형의 영향을 정확히 파악해야 할 필요가 있다. 앞으로 이에 대한 정량적인 평가가 이루어지도록 추가적인 연구가 필요하다.

건축물의 진동사용성 평가기준을 정립하는 데 있어서 RMS가속도를 쓰는 최대가속도를 쓰는 건축물 사용자들의 진동사용성을 만족시켜야 한다는 것은 자명한 사실이다. 저자는 건축물의 진동사용성 평가기준에서 지각임계점을 평가할 때는 어느 특정한 크기의 가속도에 대해 인간이 반응하므로 최대가속도를 사용하는 것이 정당하나 일정 이상의 가속도를 어느 일정시간 동안 견디는 허용가속도에 대해서는 RMS가속도를 사용하는 것이 타당하다고 본다. 그리고 실무적인 측면에서 볼 때도 다음과 같은 이유를 들어 RMS가속도가 적당하다고 보는 바이다.

1. 많은 진동사용성 평가기준이 RMS가속도에 근거하고 있다.
2. 직관적으로 볼 때 일정시간 동안의 가속도 평균값이 어느 최대가속도 값보다 인간의 반응예후와 더 상관관계 있을 것으로 보인다.
3. RMS가속도는 평가하기 훨씬 쉽고 평가당사자와 상관없이 일관된 결과물을 도출할 수 있다.
4. 최대가속도 평가방법은 가속도파형에 따라 달라지므로 실제구조물에 적용할 때 비현실적인 값을 나타낼 수 있다.

후 기

본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 “이상기후 대비 시설기준 강화” 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

[1] Soliman, J.I.(1963). “Criteria for Permissible Levels of Industrial Vibrations with Regard to Their Effect on Human Beings and Buildings.” Proc. Symp. Measurement and Evaluation of Dynamic Effects and Vibrations of Constructions, The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures(RILEM), 1, 111-147.

[2] Chen, P.W., and Robertson, L.E.(1972). “Human Perception Thresholds of Horizontal Motion.” J. Struct. Div., ASCE, 98(ST8), Proc. Paper 9142, 1681-1695.

[3] Chang, F.K.(1973), “Human Response to Motions in Tall Buildings.” J. Struct. Div.,ASCE, 99(ST6), 1259-1272.

[4] Irwin, A.W.(1978). “Human Response to Dynamic Motion of Structures.” The Struct. Engr, 56A(9), 237-244.

[5] Committee 36, Council on Tall Buildings and Urban Habitat(1981). “Motion Perception and Tolerance.” Chapter PC-13, Monograph on Planning and Design of Tall Buildings, Volume PC: Planning and Environmental Criteria for Tall Buildings.

[6] Kanda, J., Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Shioya, K., and

Nakata, S.(1994). “Probabilistic Evaluation of Human Perception Threshold of Horizontal Vibration of Buildings(0.125 Hz to 6.0 Hz).” Presented at the ASCE Structures Congress and the IASS International Symposium, Atlanta.

[7] Kwok, K.C.S., Burton, M.D., and Hitchcock, P.A.(2005), “Human Perception of Tall Building Motions in Strong Wind Environments.” The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering(APCWE-IV), Seoul, Korea, September 12-14, 2005, pp.248-262.

[8] ISO 6897-1984(E). “Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion(0.063 to 1 Hz).” International Organization for Standardization, Geneva.

[9] 日本建築學會, 建築物の振動にする居住性能評價指針同解説, 2004.

[10] National Research Council of Canada, National Building Code of Canada, User's Guide-NBC 1995 Structural Commentaries(part 4).

[11] Isyumov, Nicholas(1994), "Criteria for Acceptable Wind-Induced Motions of Tall Buildings," CTBUH Conference, Rio de Janeiro.

[12] 竹内盛雄, 松井源吾, 牧野 稔, 永井亮一, 風間 了, 新谷真人 : 強風時の早大理工学部1号館の応答実測とその解析, 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集, 1970年5月.

[13] Kolousek, V., M. Pirner : Wind effects on tall buildings, Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heath-row, 1975

[14] Davenport, A.G.(1975). “Tall Buildings-An Anatomy of Wind Risks.” Construction in South Africa.

[15] Hansen, Robert J., Reed, John W., and Vanmarcke, Erik H.(1973). “Human Response to Wind-Induced Motion of Buildings.” J. Struct. Div., ASCE, 99(ST7), 1589-1605.

[16] Simiu, Emil, and Scanlan, Robert H.(1986). Wind Effects on Structures(2nd ed.). John Wiley & Sons, New York, 192-193.

[17] Wiss, John F., and Parmelee, Richard A.(1974), “Human Perception of Transient Vibrations.” J. Struct. Div., ASCE, 100(ST4), 773-787.

[18] 김동우, 하영철, 김종락(2006) “수평진동에 대한 고층건축물의 사용성 평가방법” 2006년도 한국풍공학회 학술발표회 논문집, 통권 제9호, pp.49-56.

[19] 대한건축학회, 건설교통부고시 건축구조설계기준, 2005.