

고층건물 현장계측을 통한 거스트 계수 제안

Suggestion of Gust Factor through Field Measurements of High-Rise Buildings

윤성원*
Yoon, Sung-Won

김도현**
Kim, Do-Hyun

김동원***
Kim, Dong-Won

김영문****
Kim, Young-Moon

요약

건물에 설치된 모니터링 시스템으로부터 기록된 바람과 구조물의 반응으로부터 평균풍속, 풍향, 난류강도, 거스트팩터를 산정하였다. 계측된 건물은 각각 속초와 부산에 위치한다. 거스트 계수와 난류강도사이의 관계를 이용하여 계측된 데이터로부터 이들 간의 상관관계식을 제안하였다. 계측된 데이터로부터 얻은 거스트 계수 관계식은 풍동실험과 고층건물설계의 타당성에 유용한 자료로 이용될 수 있다.

Abstract

The wind monitoring systems are installed in high-rise buildings to record wind response data. The measured buildings are located in Busan and Sokcho. The measured wind data are analysed in this paper to obtain the mean wind speed and direction, turbulence intensity and gust factor. By using the correlation between gust factor and turbulence intensity, the expression for gust factor based on wind data measured from the building is suggested. The field measurement data obtained here are useful for the validation of wind tunnel tests and the future design of tall building.

키워드 : 거스트 계수, 난류강도, 사용성, 노풍도, 강풍계측

Keywords : Gust Factor, Turbulence Intensity, Serviceability, Wind Exposure, Wind Measurement

1. 서론

최근의 철골조 고층건물은 중량, 감쇠율의 감소로 인하여 풍하중에 의해 예민하게 진동한다. 따라서 강풍에 의하여 건물 최상층에서의 가속도가 일정한 크기 이상이 되면 거주자가 불쾌감을 느끼는 사용성(serviceability) 문제가 발생한다^{1),2)}. 특히 국내에서는 철골조 고층아파트와 주상복합의 건설이 확대됨에 따라 강풍에 의한 사용성에 관한 관심이 고조되고 있다.

국내의 사용성설계는 국내의 사용성기준이 없는 관계로 ISO 6897¹⁾, NBCC²⁾, 일본³⁾ 등 국외의 사용성기준에 의존하고 있다. 국외 기준 중에서 ISO 6897과 일본의 사용성기준은 국내의 풍하중기준과 동일하게

10분 평균풍속을 사용하므로 평균풍속의 특별한 환산없이 바로 사용할 수 있다. 반면에 NBCC는 1시간 평균풍속을 사용하므로 10분 평균풍속을 1시간 평균풍속으로 환산해야 한다. 이러한 평균풍속의 환산을 위하여 최대순간풍속(maximum gust velocity)과 평균풍속의 비로 정의되는 거스트 계수(gust factor)를 활용할 수 있다.

1960년 Durst⁶⁾와 1965년 Deacon⁷⁾는 10m 높이에서의 풍속 계측 데이터를 통하여 거스트 계수를 순간 최대풍속에 대한 1시간 평균풍속의 비로 표현하였다. 그러나 이 식은 임의 높이에서의 거스트 계수를 직접적으로 산정할 수 없는 제약이 있다. 또한 지표면 조도장(surface roughness length, z_0)이 2.5cm인 지역까지만 적용할 수 있으므로, 저층건물이 있는 도외지나 고층건물이 운집한 대도시 지역의 거스트 계수에 직접적으로 적용하기에는 다소 불편한 점이 있다. 또한 1983년 Ishizaki와 Choi⁸⁾는 각각 거스트 계수 산정식에 풍속의 평균시간 뿐만 아니라 난류강도를 고려

* 정회원 · 서울산업대학교 건축학부 부교수, 공학박사

** 정회원 · 동양구조안전기술, 연구원

*** 교신저자, 정회원 · 고려대학교 건축공학과 공학석사
Tel : 02-970-6587 Fax : 02-979-6587

E-mail : interkul@korea.ac.kr

**** 정회원 · 전북대학교 건축도시공학부 교수, 공학박사

하였다. 그러나 이 두가지 식도 임의 높이에 대한 난류강도 값을 모르면, 최상층에서의 평균풍속을 사용하는 사용성평가에 사용하기에 다소 불편함 점이 있다. 따라서 국내 건물의 사용성평가를 위해서는 각 노풍도별 임의높이에 대한 거스트 계수의 식이 필요하다.

KS 풍하중기준의 노풍도 A, B, C, D에 대한 임의 높이에 있어서의 거스트 계수 식을 제안하기 위하여, 부산의 32층 건물과 속초의 20층 건물의 옥상에 풍향 풍속계를 설치하여 풍속계측을 실시하였다. 강풍계측을 통하여 강풍특성인 평균풍속, 평균풍향, 최대풍속, 난류강도 등의 기본풍속데이터를 분석하여 임의 높이에 대하여 일반화된 거스트 계수 식을 작성하였다. 거스트 계수 식에 난류강도를 고려하기 위하여 일본의 풍하중기준의 난류강도 식을 인용하였다. 작성된 산정식은 기존의 국외식과도 비교를 하였다.

2. 거스트 계수에 대한 해외 연구사례 및 제안값

1960년 Durst⁶⁾와 1965년 Deacon⁷⁾은 거스트의 크기는 평균시간에 따라서 달라지는 점에 착안하여, 10분 평균풍속에 대한 거스트 계수로서 수목이 거의 없는 전원지대에서는 1.45, 시가지에서는 1.96를 제안하였다. 또한 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$G(t) = 1 + \frac{\beta^{1/2} c(t)}{2.5 \ln(z/z_0)} \quad (1)$$

여기서 $\beta, c(t)$ 는 풍속기록의 통계해석에 근거한 값이다.

1983년 Ishizaki는 일본의 태풍 계측에 근거하여 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$G(t) = 1 + 0.5 I_u \ln(T/t) \quad (2)$$

여기서 I_u 는 난류강도, T 는 평균풍속의 평균시간, t 는 최대순간풍속 기간이다.

1983년 Choi는 홍콩에서의 계측데이터에 근거하여 거스트 계수의 산정식을 식 (3)과 같이 제시하였다.

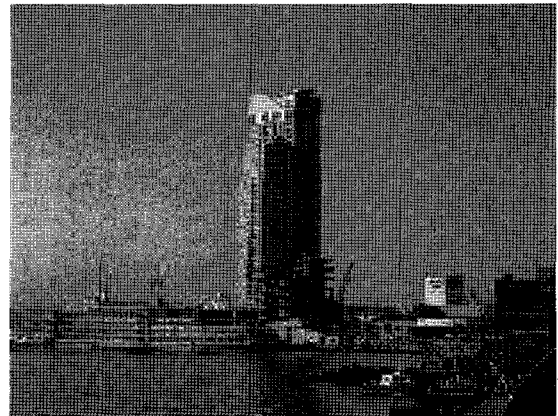
$$G(t) = 1 - 0.62 I_u^{1.27} \ln(t/3600) \quad (3)$$

1992년 Krayer와 Marshall은 미국의 태풍 계측을 통하여 식 (3)에서 난류강도 I_u 의 지수를 1.27대신에 1.55로 제안하였고, 1992년 Black은 1.66으로 제안하였다.

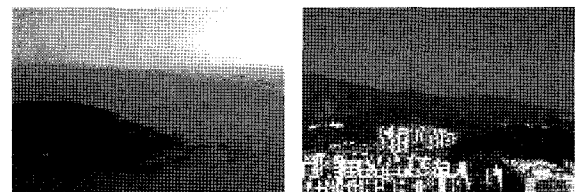
3. 풍속 계측

3.1 계측건물

계측 건물은 건물 2동을 선택하여 옥상에서 계측하였다. 건물 A는 부산시의 해안가에 소재하고 있으며, 외관상 특징은 지하 6층 지상32층 규모의 고층건물로서 건물 높이는 지표면에서 128.7m이다. <그림 1>은 계측 건물 A이다. 동서방향으로는 건물의 폭이 42.95m이며, 높이 대 건물의 폭의 비인 종횡비는 3이다. 반면에 남북방향으로는 건물의 폭이 17.6m에 비하여 건물높이가 128.7m로서 7.3으로 커서 매우 세장

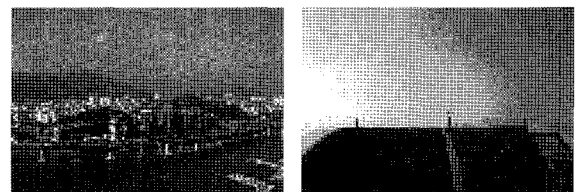


<그림 1> 건물 A 전경



(a) 동

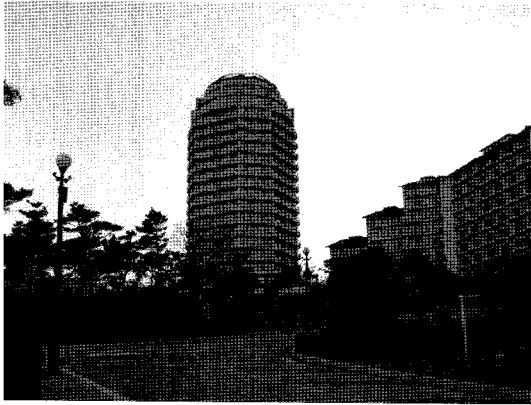
(b) 서



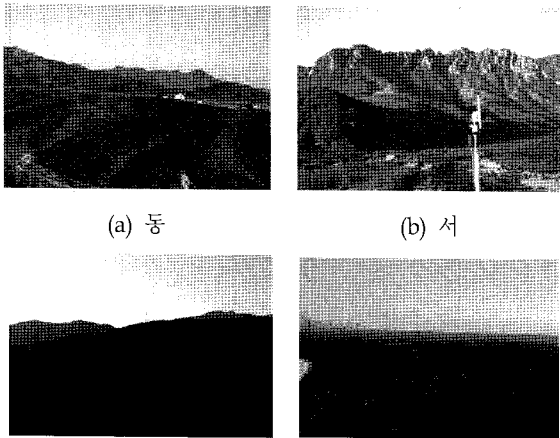
(c) 남

(d) 북

<그림 2> 건물 A 주변의 상황



〈그림 3〉 건물 B의 전경



(a) 동

(b) 서

(c) 남

(d) 북

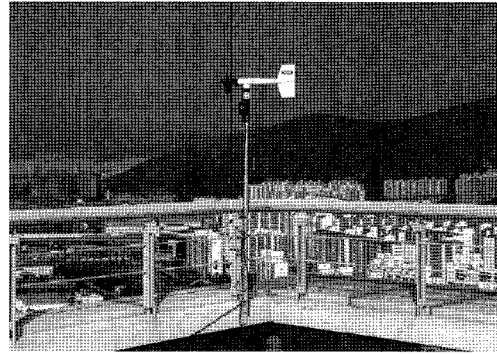
〈그림 4〉 건물 B 주변의 상황

한 특징을 나타내고 있다. 건물의 남향으로 대지경계선과 20m 도로를 사이에 두고 수영만과 인접해있다. 건물의 건물 주위의 조건은 서쪽으로는 아파트 단지가 밀집되어 있고 나머지 3면은 해안가로 둘러 쌓여 있다. <그림 2>는 건물 A의 주변상황이다.

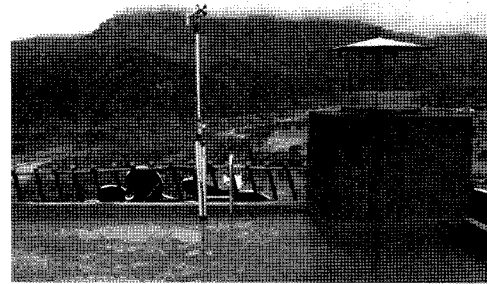
건물 B는 속초에 있는 20층 건물로서 높이는 76m이다. <그림 3>은 건물 B의 전경으로서 팔각형 평면이고, 한 변의 길이는 33m로서 높이 대 평면길이의 비인 종횡비는 2.3이다. 지형조건은 동쪽으로는 해안가를 바라보고 있으며, 서쪽으로는 미시령을 바라보고 있다. 남쪽과 북쪽으로는 골자기로 구성되어 있다. <그림 4>는 건물 B의 주변상황이다.

3.2 계측방법¹⁴⁾

건물 A의 풍향풍속계의 위치는 옥상위의 헬리패드



(a) 건물 A



(b) 건물 B

〈그림 5〉 풍향풍속계 상황

드의 가이드레일 위에 1.5m의 알루미늄 pole에 풍향풍속계를 설치하였다. <그림 5>는 풍향풍속계 설치 상황이다. 따라서 측정 위치는 지면에서 134.2m에 해당한다. 건물 B는 옥상의 핸드레일의 상부 3m의 알루미늄 pole에 설치하였고, 측정 위치는 지면에서 79m에 해당한다

풍속의 계측범위는 0~60m/s이고 거리상수는 63% recovery에 2.7m 풍향은 전압계에 의하여 조정되는 풍향풍속계의 풍향범위는 기계적으로 360°이고, 전기적으로는 355°로서 delay distance는 50% recovery에 1.3m이다. 단변과 장변방향으로 가속도를 계측하기 위하여 2개의 가속도계(Model ASQ-1BL)를 가급적 평면 중앙에 설치하였다. 서보가속도계의 가속도의 크기와 주파수의 유효측정범위는 각각 0-1000 cm/s²과 0-500Hz이다^{9),10)}. 총 4개의 채널은 signal conditioner와 line driver를 통하여 PC로 연결되었다. 채널 1과 2는 풍향과 풍속으로 지정되었고, 채널 3과 4는 장변과 단변의 가속도로 지정되었다. 4채널의 아날로그 신호는 데이터 계측시스템에 의하여 건물 A에서는 20Hz로 계측하였고, 건물 B에서는 12.5Hz로 계측하였다.

디지털신호는 PC의 하드디스크로 저장하였다¹¹⁾. 건물 A는 2002년 11월부터 12월 사이에 계측을 실시하였고, 건물 B는 2005년 5월부터 6월 사이에 계측하였다.

4. 결과 분석

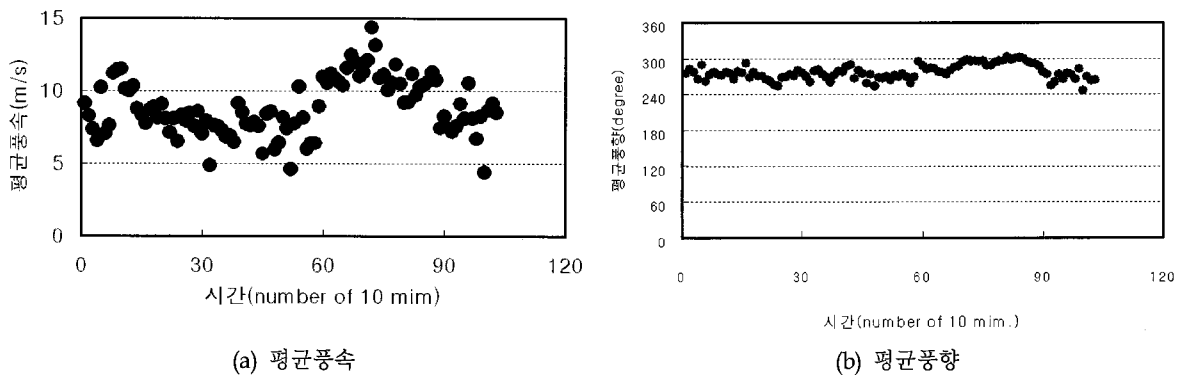
4.1 평균풍속과 평균풍향

건물 A와 B의 10분 평균풍속과 풍향은 <그림 6>, <그림 7>과 같다. 건물 A의 x축은 평균풍속이 4m/s 이상의 데이터만을 발췌한 경우이고 건물 B의 x축은 평균풍속이 10m/s이상의 데이터만을 발췌한 경우이다. 두 건물 모두 바람의 방향은 서풍으로 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 계측 건물 A에서는 10분 최대평균풍속은 14.4m/s이고 순간최대풍속은 16.9m/s까지 계측할 수 있었고, 건물 B에서는 10분 최대평균풍속은 24.45m/s이고 순간최대풍속은 32.72m/s까지 계측할 수 있었다.

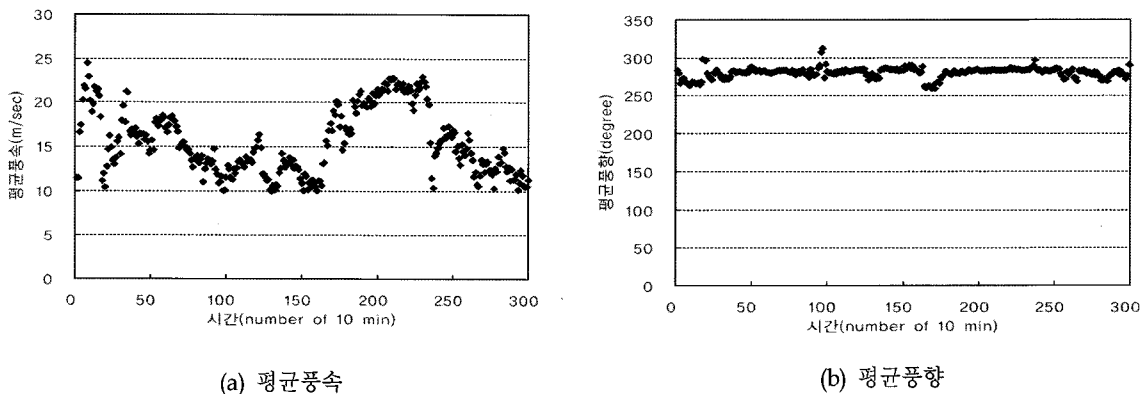
4.2 난류강도

난류강도는 풍속의 평균풍속에 대한 표준편차의 비로 정의된다. 난류강도는 고층건물의 동적응답을 결정하는데 주요한 파라미터이다. <그림 8>과 <그림 9>는 각각 건물 A와 건물 B의 평균풍속, 순간풍속, 거스트 계수의 난류강도에 대한 상관을 분석한 것이다. 건물 A의 경우 10분 평균풍속의 난류강도는 6.5%~50.7% 범위에 있었고, 건물 B의 경우에는 10분 평균의 난류강도는 3.1% ~ 21.9% 범위에 있었음을 알 수 있다.

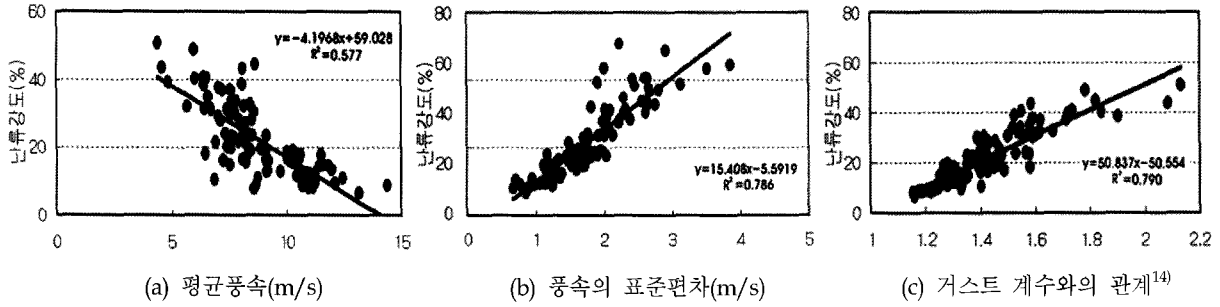
난류강도에 대한 풍속의 상관을 분석하면, 풍속이 증가함에 따라 난류강도는 <그림 8(a)>와 <그림 9(a)>와 같이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 난류강도에 대한 영향인자로서 평균풍속보다는 풍속의 표준편차 상관계수의 자승이 0.786과 0.573으로 0.577과 0.129보다 더욱 큰 것을 알 수 있다. 지금까지는 난류강도와 거스트 계수와의 영향은 크게 고



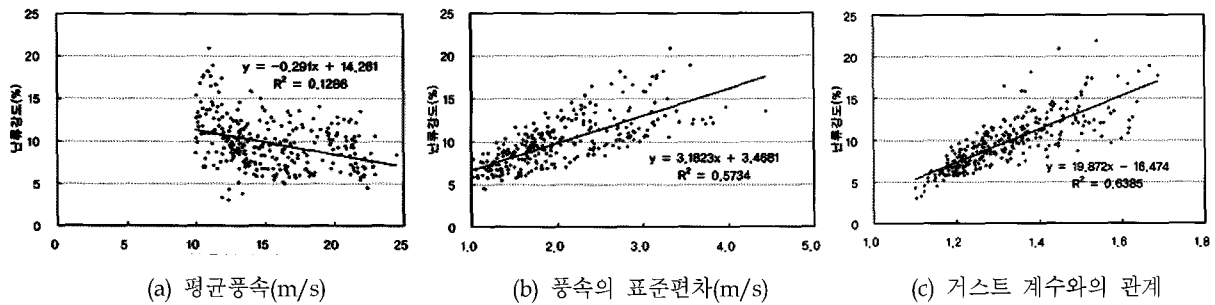
<그림 6> 건물 A의 평균풍속과 평균풍향¹⁴⁾



<그림 7> 건물 B의 평균풍속과 평균풍향



<그림 8> 건물 A의 난류강도(%)에 대한



<그림 9> 건물 B의 난류강도(%)에 대한

려되지 않았으나, <그림 8(c)>와 <그림 9(c)>에서도 알 수 있듯이 본 건물의 계측 데이터로부터 난류강도에 대한 거스트 계수의 영향은 풍속의 표준편차, 평균풍속 보다 더 큰 것으로 계측되었다. 따라서 거스트 계수의 수식의 제안시 난류강도의 영향이 고려되어야 함을 알 수 있다.

4.3 거스트 계수

4.3.1 거스트 계수의 성질

거스트 계수는 10분 평균풍속에 대한 순간최대풍속의 비이다. 거스트 계수가 높다는 것은 바람의 난류성분이 크다는 것을 의미한다. <그림 10(a)>와 <그림 11(a)>는 각각의 건물에 대하여 평균풍속의 변화에 대한 거스트 계수의 변화 경향이다. 계측 결과로부터 건물 A는 풍속이 증가함에 따라 거스트 계수가 2.2에서 1.15로 감소하는 경향을 확인할 수 있었고, 건물 B는 풍속이 증가함에 따라 거스트 계수가 1.7에서 1.1로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

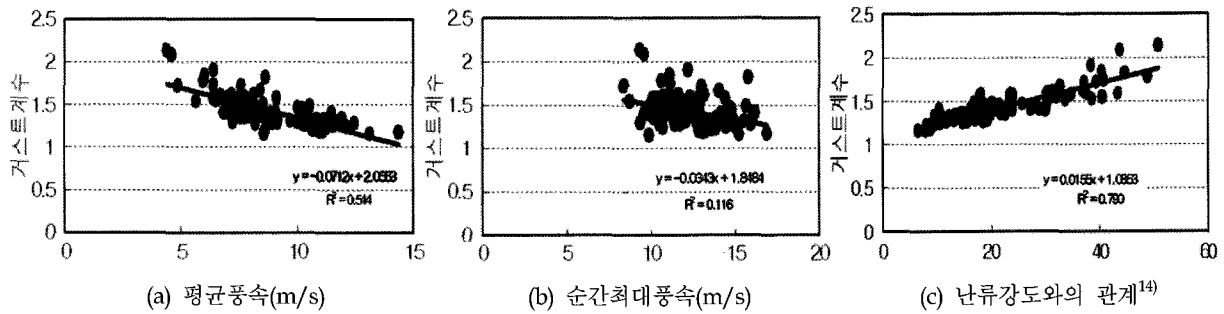
그 뿐만 아니라 <그림 10>과 <그림 11>의 (b)와

(c)에서 보는 것처럼 난류강도가 커질수록 거스트 계수는 증가함을 확인할 수 있지만, 순간최대풍속에 대해서는 일정한 경향을 보여주지는 않고 있다. 즉 거스트 계수는 평균풍속과 난류강도에 대해서는 명확한 상관관계를 보여주었지만 순간최대풍속에 대해서는 상관관계가 아주 작다는 것을 알 수 있었다.

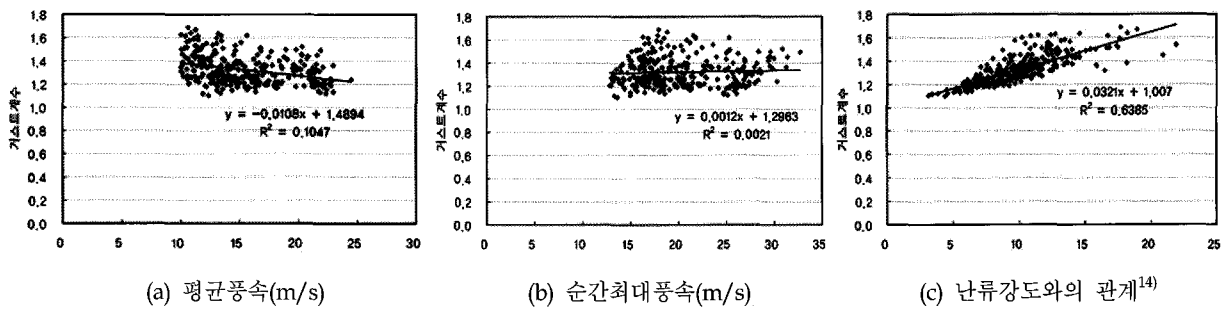
거스트 계수에 대한 상관관계의 크기는 <그림 10>과 <그림 11>에서 보는 것 처럼 난류강도, 평균풍속, 순간최대풍속 순서로 나타났다. 위의 세 가지 변수와 거스트 계수와 상관계수의 자승은 건물 A에 대하여 각각 0.790, 0.544, 0.116이고, 건물 B에 대하여 각각 0.639, 0.105, 0.002로 나타나 거스트 계수에 대한 상관성은 난류강도가 다른 변수보다 더욱 큰 것을 알 수 있었다.

4.3.2 거스트 계수의 제안식

거스트 계수의 제안식을 제시하기 위하여 기존의 1시간 평균풍속에 대한 임의의 시간 t에 대한 거스트 계수의 연구가 많이 진행되어 있는 관계로 본 논문에서는 1시간 평균풍속에 대한 거스트 계수 식을



<그림 10> 건물 A의 거스트 계수에 대한



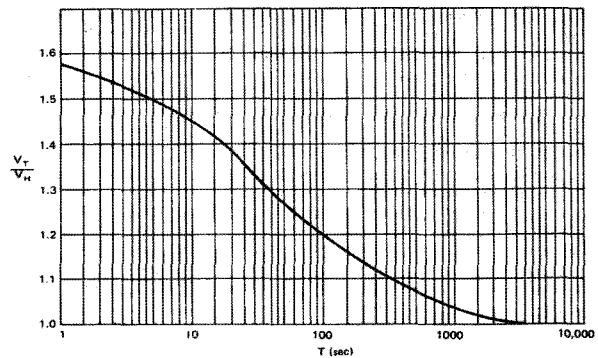
<그림 11> 건물 B의 거스트 계수에 대한

제안하고자 한다. 현재까지 거스트 계수와 평균시간과의 관계에 대한 연구는 활발히 진행되고 있고 거스트 계수와 평균시간과의 관계는 <그림 12>와 같이 S자 곡선의 관계가 있다고 알려져 있다¹²⁾.

그러나 태풍 YORK에 의한 홍콩의 Di Wang Tower의 연구 논문¹³⁾을 포함한 최근의 연구에서 거스트 계수는 평균시간뿐만 아니라 난류강도와도 깊은 관계가 있다는 주장이 제기되어 지고 있다. 특히 Di Wang Tower의 연구 논문에서는 Choi가 제안한 식 (4)를 이용해 태풍 YORK에 의한 계측 데이터에서도 거스트 계수가 난류강도와도 깊은 관계가 있음을 제안하였다¹⁴⁾.

$$G(t) = 1 - 0.62 I_u^{1.27} \ln(t/3600) \quad (4)$$

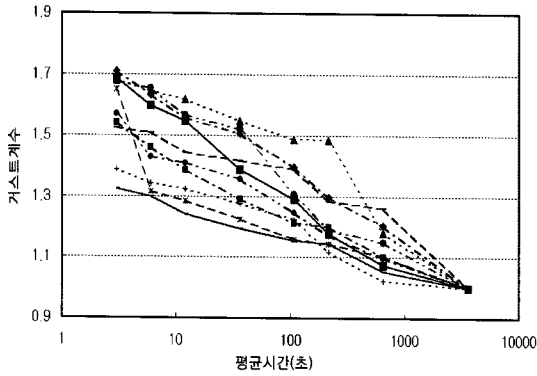
본 계측 결과에서도 앞에서 언급한 바와 같이 거스트 계수는 다른 변수들보다 난류강도와 큰 상관성이 있음을 알 수 있었다. <그림 13>은 각각의 건물에 대하여 계측된 시간동안 측정된 데이터를 사용하여 평균시간에 따른 거스트 계수의 변화를 보여주고 있다. 이 때 사용된 계측 데이터는 A건물에



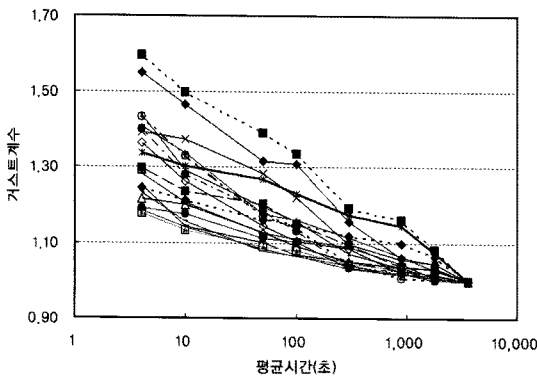
<그림 12> 평균시간에 따른 거스트 계수 변화

대하여 평균풍속 7m/s 이상의 10개의 데이터를 이용하였고, B건물에 대하여 평균풍속 15m/s 이상의 15개의 데이터를 이용하였다. <그림 13>에서 보는 바와 같이 거스트 계수 값은 난류강도의 차이에 의해서 그 편차가 심한 것을 알 수 있다.

거스트 계수 산정에 필요한 데이터는 <그림 10>과 <그림 11>의 (a)~(c)에서 알 수 있듯이 일정 평균풍속이상에서 일정한 값을 보이고, 일정한 난류강도 이하에서 일관된 성질을 보임을 알 수 있다. 따라서 데이터의 일관성을 유지하기 위해 건물 A에 대해서



(a) A 건물



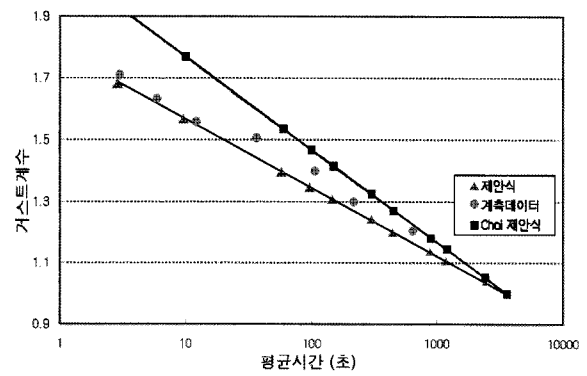
(b) B 건물

<그림 13> 평균시간에 따른 거스트 계수의 변동

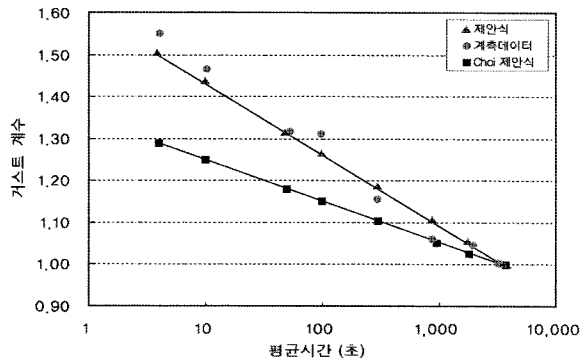
는 평균풍속이 약 7m/s 이상, 난류강도가 30% 이하의 계측 자료 중에서 발취하였고, 건물 B에 대해서는 평균풍속이 약 15m/s 이상, 난류강도가 20% 이하의 계측 자료 중에서 발취하였다. <그림 14>와 <그림 15>는 x축을 로그 스케일로 하여 각각의 건물에 대하여 거스트 계수와 평균시간과의 관계를 출력한 것으로 그림에서도 알 수 있듯이 거스트 계수는 평균시간과 거의 선형관계가 있음을 알 수 있고, 각 그래프의 기울기를 난류강도를 이용해 거스트 계수를 구하는 식을 구하면 식 (5)와 같다.14)

$$G(t) = 1 - 2.162 I_u^{1.603} \ln(t/3600) \quad (5)$$

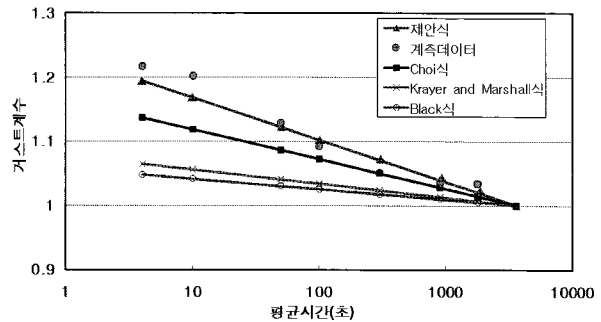
여기서 난류강도는 1시간에 대한 난류강도이고, 발취된 데이터의 난류강도는 이미 알고 있으므로 그래프의 기울기와 난류강도간의 회귀분석을 이용하여 계수 2.162와 지수 1.603을 구하였다. 위 식을 이용해 계측된 데이터와 계산된 값을 비교하면 <그림 14>와 <그림 15>와 같고 두 값은 잘 일치하고 있으나, Choi



<그림 14> 건물 A의 거스트 계수 비교



<그림 15> 건물 B의 거스트 계수 비교



<그림 16> 기존연구의 제안식과 본 연구의 제안식 비교

가 제안한 식과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

<그림 16>은 거스트 계수에 대하여 기존 해외 연구자들이 제안한 식과 본 연구에서 제안한 식을 계측데이터와 비교한 것이다. 그림에서 보는데와 같이 본 연구에서 제안한 거스트계수는 계측데이터와 잘 일치하지만 Choi식은 약간 작게 나타나고 Kraye와 Marshall이 제안한 식은 Choi의 제안식보다 더 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 이유는 해외의 계측식은 태풍의 데이터에서 얻었기 때문에 평균풍속은 높고 풍속의 표

준편차가 작아지는 관계로 난류강도와 거스트계수가 작아지는 경향이 있기 때문인 것으로 판단된다⁵⁾.

5. 결 론

강풍에 대한 특성을 분석하기 위하여 부산과 속초에 위치하고 있는 고층건물을 대상으로 풍응답계측을 하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

- (1) 각각의 건물에 대하여 난류강도는 풍속에 따라 6.5%~50.7% 범위와 3.1%~21.9% 범위에 있는 것을 알 수 있다. 난류강도는 풍속이 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 난류강도에 대한 상관은 평균풍속보다는 풍속의 표준편차 상관계수의 자승이 각각 0.786과 0.573으로 더욱 큰 것을 알 수 있다. 또한 난류강도에 대한 거스트 계수의 상관은 각각 0.790과 0.639로 풍속의 표준편차보다 더 큰 상관이 있음을 보여주었다.
- (2) 풍속의 증가에 따라 거스트 계수는 감소하는 것을 알 수 있다. 거스트 계수에 대한 상관은 난류강도, 평균풍속, 순간최대풍속의 순서로 나타났다. 세 가지 변수와 거스트 계수와 상관계수의 자승은 각각의 건물에 대하여 0.790, 0.544, 0.116과 0.639, 0.105, 0.002이다.
- (3) 거스트 계수가 난류강도와 큰 상관성이 있다는 점에 착안하여 기존에 연구된 여러 논문을 바탕으로 거스트 계수를 구하는 식을 난류강도와 평균시간을 이용하여 다음과 같이 제안할 수 있다. 단, 이 식은 실측이 이루어진 지역에서 사용을 고려하는 제안식이다.

$$G(t) = 1 - 2.162 I_u^{1.603} \ln(t/3600)$$

계측된 데이터와 본 연구에서 제안한 식은 그 결과가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있지만, 기존 몇몇 연구와는 다소 오차를 보이고 있다. 이에 대해서는 추후의 계측 및 연구를 통하여 규명해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 2006년도

건설핵심기술개발사업(06건설핵심B03)에 의한 것임.

참고문헌

1. ISO6897 : 1984 Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed Structure, especially buildings and off-shore structures, to low frequency horizontal motion (0.063-1Hz)
2. National Reserch Council of Canada, National Building Code of Canada, Ottawa, Part 4.1990
3. 日本建築學會, “建築物の振動に關する居住性能評價指針同解説”, 1991, pp 1~34
4. 日本建築學會, “建築物荷重指針同解説”, 技報堂, 1992.3
5. 建設研究振興協會, “臨海地區に建設された超高層住の強風應答に關する研究報告書”, 1992. 3, pp 24~61
6. C.S. Durst. "Wind Speeds Over Short Periods of Time," Meteorol. Mag., 89, (1960), pp 181~186
7. E.L. Deacon, "Gust Variation with Height up to 150m," J. Royal Meteorol. Soc., 91 (1955), pp 526~573
8. E.C.C. Choi, Wind Loading in Hong Kong -Commentary on the Code of Practice on Wind Effects Hong Kong - 1983, Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, 1983
9. (株)共和電業, 取扱説明書 survo型加速度變換器 ASQ-CA ·CB, 1996, pp 1 ~ 7
10. (株)共和電業, 取扱説明書 VAQ-500A, 1996, pp 1~18
11. Difa Measuring system B. V., "APB200 Getting Started Manual", 1994, pp 8-1 ~ 8-15
12. Henry Liu, "Wind Engineering A Handbook for Structural Engineers",1991, pp 47 - 49
13. Y.L. Xu, S.Zhan., "Field Measurements of Di Wang Tower during Typhoon York", Journal of Wind Engineering and Industrial Dynamics, Vol. 89, 2001, pp 73-93
14. 윤성원, 김용철, “풍속 계측을 통한 거스트 계수”, 한국풍공학회 2004년도 학술발표회 논문집 통권 제 7호 pp 21~28