

풍응답계측시 RD법에 의한 고층건물의 동적특성의 진폭의존성

Amplitude Dependent Dynamic Properties of Tall Building under the Strong Wind

윤성원*
Yoon, Sung-Won

요약

풍향풍속계와 구조 모니터링 시스템을 설치하여 강풍과 거물의 동적 특성을 계측하였다. 계측건물은 속초의 산기슭에 위치하고 있다. 감쇠율과 고유진동수의 진폭 의존성을 분석하였다. 감쇠율의 진폭의존성은 9%로서, 가속도진폭이 증가함에 따라서 감쇠율이 명료하게 증가하는 경향을 보였다. 계측데이터에서 얻은 동적 특성의 경향은 사용성 평가시 건물의 동적 특성을 평가하는데 유용하게 사용되리라 기대된다.

Abstract

The wind tracker and structural monitoring system recorded wind and dynamic response data. The measured building is located in the mountain in Sokcho. The damping ratio and natural frequency were analysed in this paper to obtain amplitude dependence. Amplitude dependent damping was showed clearly in the increasing rate of 9%. The tendency of dynamic properties of building obtained here are useful for the validation of dynamic properties of buildings in the evaluation of serviceability.

keywords : Damping Ratio, Natural Frequency, Random Decrement Method, Amplitude Dependence, Serviceability

1. 서론

강풍에 대한 사용성 평가를 위해서는 건물 최상층에서 가속도응답에 대한 정확한 예측이 필요하다. 응답가속도는 감쇠율 평방근의 역수에 비례하므로, 정확한 응답가속도를 산정하기 위해서는 설계대상 건물에 적합한 감쇠율의 가정이 매우 중요하다.^[1,2] 우리나라에서는 사용성기준이 없는 관계로 관용적으로 건물의 높이에 상관없이 철골조의 경우 감쇠율로서 1%를 사용하고 있다. 반면에 감쇠율이 건물의 높이, 고유진동수, 진폭레벨 등에 따라 달라지므로 Euro Code^[3]에서는 감쇠율의 예측식을 고유진동수

의 함수로 표현하고 있다. ESDU^[4], Jeary^[5] Tamura^[6] 등은 감쇠율 예측식을 고유진동수 의존향과 건물높이와 진폭레벨을 고려한 진폭의존향의 합으로 표현하고 있다.

특히 고층건물의 감쇠율의 경우에는 건물의 응답에 영향을 크게 미치는 감쇠율이 건물의 진폭레벨에 따라 변화하는 진폭의존성(Amplitude Dependence)을 보이고 있지만, 과거에 보고된 진동실험 데이터에는 진폭레벨의 기술이 불충분하지 않은 것이 많다. 그리고 진동실험방법이나 평가방법에 의해서도 편차가 심하지만, 이러한 점을 고려한 실험데이터는 많지 않다고 할 수 있다.

강풍시 고층건물에서 감쇠율의 진폭의존성을 검토하기 위해서는 건물의 자유진동파형을 얻은 후에 대수감소법으로 각 파형마다 감쇠율을 산정하여 감

* 정희원 · 서울산업대 건축학부 조교수, 공학박사
Tel : 02-970-6587, Fax : 02-973-6587
E-mail : swyoon@duck.snut.ac.kr

최소값의 진폭의존성을 구할 수 있다. 자유진동파형을 얻기 위한 일반적인 방법으로서 풍응답계측의 시계 열과형에서 RD법(Random Decrement 은 일반적으로 사용되고 있다. 또한 RD법의 적용시에 안정적인 자유진동파형을 얻기 위한 파형의 평균횟수는 100 회~1000회 정도로 알려져 있다.^[2]

본 논문에서는 풍응답계측 데이터에서 Random Decrement Method(이하 RD법이라 한다.)를 사용하여 실제로 사용성검토시에 사용되는 재현주기 1년에서 10년 이내의 강풍시 감쇠율의 진폭의존성을 검토하였다. 또한 난류강도, 거스트계수 등의 강풍 특성을 계측하였다.

풍응답계측을 위해서 철골조 20층 고층건물을 대상으로 계절풍시에 풍속, 풍향, 장변가속도, 단변가속도의 동시계측을 통하여 데이터를 취득하였다. 본 논문의 감쇠율의 진폭의존성은 국내 고층건물의 사용성 감쇠율의 선정시에 활용할 수 있으리라 판단된다.

2. 감쇠율의 진폭의존성

ESDU^[4], Jeary^[5] Tamura^[6] 등은 감쇠율 예측식을 고유진동수 의존항과 건물높이와 진폭레벨을 고려한 진폭의존항의 합으로 표현하고 있다. 따라서 ESDU, Jeary, Tamura의 감쇠율 예측식에 대하여 서술하였다.

2.1 감쇠율 예측식

2.1.1 Engineering Sciences Data Unit (ESDU)

ESDU^[4]의 풍하중에 대한 감쇠율은 식 (1)과 같다. 구조감쇠율 ζ_s 에 대해서는 상한치로서 식 (2)를 규정하고 있다. <표 1>은 ESDU에서 극소진폭시 감쇠율의 최빈치와 하한치이다.

<표 1> ESDU에서 ζ_{so} 와 ζ'_s

	최빈치	하한치
ζ_{so}	$f/100$	$f/250$
ζ'_s	$10^{\sqrt{D}/2}$	$10^{\sqrt{D}/2}$

$$\zeta_s = \zeta_{so} + \zeta'_s \cdot (x/H) \tag{1}$$

$$\zeta_s \leq \frac{60}{100H} + 0.013 \tag{2}$$

여기서 x : 건물 정상에서의 rms 변위 진폭(m)
 H : 건물 높이(m)
 ζ_{so} : 극소진폭시의 구조감쇠율
 ζ'_s : 진폭 증가에 따른 감쇠율의 증가분
 D : 건물 진동방향의 평면길이(m)

2.1.2 Jeary

Jeary^[5]는 실험방법과 평가방법에 대한 오차를 검토하여, 충분한 신뢰성이 있는 데이터를 엄선한 후에 감쇠율식을 제안하였다. 진폭레벨을 변화시키면서 철근콘크리트조 벽식 건물 8동의 실험데이터에서 얻었으며, 감쇠율 식은 식(3)으로서, <표 1>에서와 같이 ESDU의 최빈치와 동일한 식이다.

$$\zeta_s = f/100 + 10^{\sqrt{D}/2} \tag{3}$$

여기서 D : 건물 진동 방향의 폭(m)

2.1.3 Tamura

Tamura^[6]는 미소진폭 데이터에 근거하여 철골조 건물에 대한 감쇠율식을 식 (4)로 제안하였다.

$$\zeta_s = 0.013f + 400 \frac{x}{H} - 0.00029 \tag{4}$$

여기서 H : 건물의 높이(m)
 x : 건물 정상에서의 rms 변위(m)

2.2 RD법

RD법은 자기상관함수 추정법의 첫째 방법이다. RD법에서는 응답 $x(t)$ 에서 조건에 반응하는 부분 샘플을 다수로 나누어 이것들을 평균하여 RD파형 $a(\tau)$ 를 식 (5)에서 구한다.

$$a(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \omega(t_i)x(t_{i+\tau}) \tag{5}$$

<표 2> 대표적인 조건과 계수의 조합

조합	조건 C	계수 $\omega(t)$	비고
(1)	$\dot{x}(t)=0$	$sgn(x)$	
(2)	$x(t) \in R, \dot{x}(t)=0$	$sgn(x)$	Ranked RD법
(3)	$x(t)=x_*$	1	
(4)	$x(t)=x_*, \dot{x}(t)=0$	1	
(5)	없음	$x(t)$	직접법

비고 $\dot{x}(t)$: $x(t)$ 의 시간미분, $sgn(x)$: x 의 부호
 x_* : 대상 진폭, R : 대상 진폭의 범위

여기서 N : 샘플수

$\omega(t)$: 증량계수

C : 부분샘플을 측정하기 위한 조건

조건 C와 계수 $\omega(t)$ 의 조합에 의해 다양한 RD법이 고려된다. 대표적인 조합의 예를 <표 2>에 정리하였다. <표 2>의 조합을 이용한 RD파형은 모두 자기상관함수의 추정치로 나타나는 것으로 알려져 있다.

특히 N 개의 부분샘플이 충분히 이산된 시각에서 나뉠 수 있다면, 각 부분 샘플은 서로 독립으로 고려되어 $N_e = N$ 이 된다. 식 (5)에 의해 RD파형 $a_4(\tau)$ 에서 응답의 자기상관함수 $R_{xx}(\tau)$ 를 추정할 수 있음을 알 수 있다. 정확도를 변동계수에 표시하는 경우, 식 (5)에 의해 $a_4(\tau)$ 의 변동계수 $c_a(\tau)$ 는 다음 식(6)으로 표현된다.

$$c_a^2(\tau) = \frac{R_{xx}^2(0)}{N_e R_{xx}^2(\tau) x_*^2} \left\{ R_{xx}(0) - \frac{R_{xx}^2(\tau)}{R_{xx}(0)} + \frac{R_{xx}^2(\tau)}{R_{xx}^2(0)} \right\} \quad (6)$$

이하에서 감쇠율 h 의 선형단자유도계를 대상으로 하여 RD법의 추정 정확도에 대해서 고찰하면, 임의의 정수에 n 에 대해서 $R_{xx}(nT_0) = 0$ 이기 때문에 식 (6)과 진폭감쇠율의 관계를 이용하면 다음 식이 얻어진다.

$$c_a^2(nT_0) = \frac{R_{xx}(0)}{N_e x_*^2} \left\{ \exp\left(\frac{4\pi n h}{\sqrt{1-h^2}}\right) - 1 \right\} \quad (7)$$

또한, $h \ll 1$ 로하여 1차 근사를 이용하면 아래와 같이 간략화하는 것이 가능하다.

$$c_a^2(nT_0) = \frac{4\pi n h R_{xx}(0)}{N_e x_*^2} \quad (8)$$

식 (8)을 이용하면, 감쇠율의 예측치 h 와 n 주기까지의 극치에 허용된 변동계수 $c_a(nT_0)$ 를 설정한 것에 의해 필요한 샘플수 N_e 개수를 얻을 수 있다.

3. 응용답계측

3.1 계측 건물

속초에 있는 20층 건물로서 높이는 76m이다. 구조시스템은 철골조이고 코어는 콘크리트조 전단벽으로 설계되었다. 이 건물은 1988년에 준공되었다.



<그림 1> 계측건물

<그림 1>은 계측건물의 전경으로서 팔각형 평면이다. 한변의 길이는 33m로서 높이대 평면길이의 비인 종횡비는 2.3이다.

3.2 계측 방법

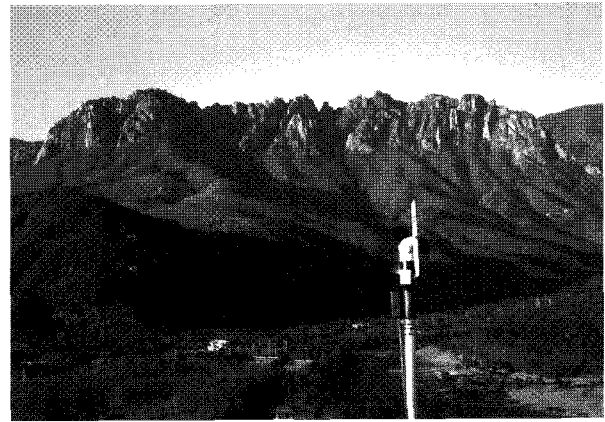
풍향풍속계의 위치는 옥상 위의 핸드레일 위에 1.5m의 알루미늄 pole에 풍향풍속계(R.M. Young, model 05103)를 설치하였다. 옥상 구조물의 상부 3m에 설치하여, 측정 위치는 지면에서 79m에 해당한다. 풍향의 계측범위는 0 - 60m/s이고 거리상수는 63% recovery에 2.7m 풍향은 전압계에 의하여 조정되는 풍향풍속계의 풍향범위는 기계적으로 360°이고, 전기적으로는 355°로서 delay distance는 50% recovery에 1.3m이다. 단변과 장변방향으로 가속도를 계측하기 위하여 2개의 가속도계(Model ASQ-1BL)^[7]를 가급적 평면 중앙에 가까이 위치한 18층의

객실에 설치하였다. 서보가속도계의 가속도의 크기와 주파수의 유효측정범위는 각각 0-1000 cm/s²과 0-500Hz이다

총 4개의 채널은 signal conditioner^[8]와 line driver를 통하여 PC로 연결되었다. 채널 1과 2는 풍향과 풍속으로 지정되었고, 채널 3과 4는 장변과 단변의 가속도로다. 4채널의 아날로그 신호는 데이터 계측시스템^[9]에 의하여 20Hz로 계측되었다. 디지털 신호는 PC의 하드디스크로 저장하였다. <그림 3>은 계측시스템이다. 계측 시기는 기상청 통계데이터에 근거하여 11월중에 강풍이 부는 시기를 선택하여 2002년 11월에 실시하였다. 지형조건은 동쪽으로는 해안가를 바라보고 있으며, 서쪽으로는 미시령을 바라보고 있다. 남쪽과 북쪽으로는 골자기로 구성되어 있다. 따라서 건축학회 조도구분으로는 동쪽은 조도구분 D에 해당하고, 서쪽은 A에 해당한다. <그림 2 참조>는 조도구분을 나타내는 사진이다.

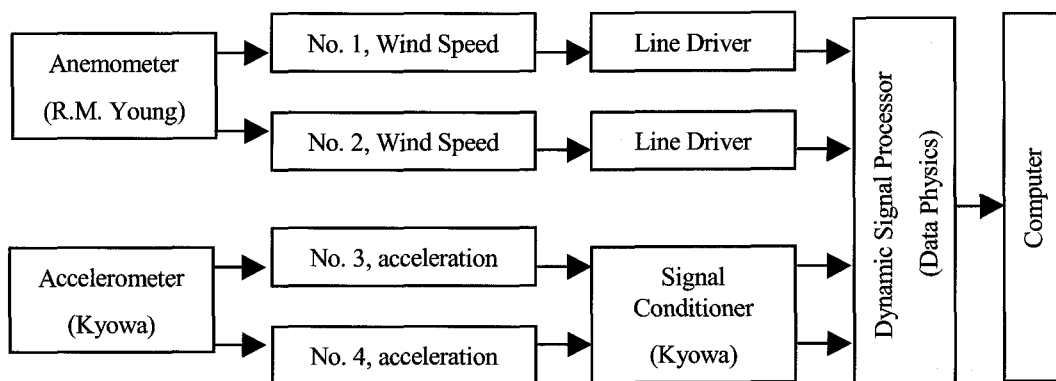


(a) 조도구분 D(동쪽, 남쪽, 북쪽)



(b) 조도구분A(서쪽)

<그림 2> 조도구분



<그림 3> 계측시스템

3.3 계측 데이터

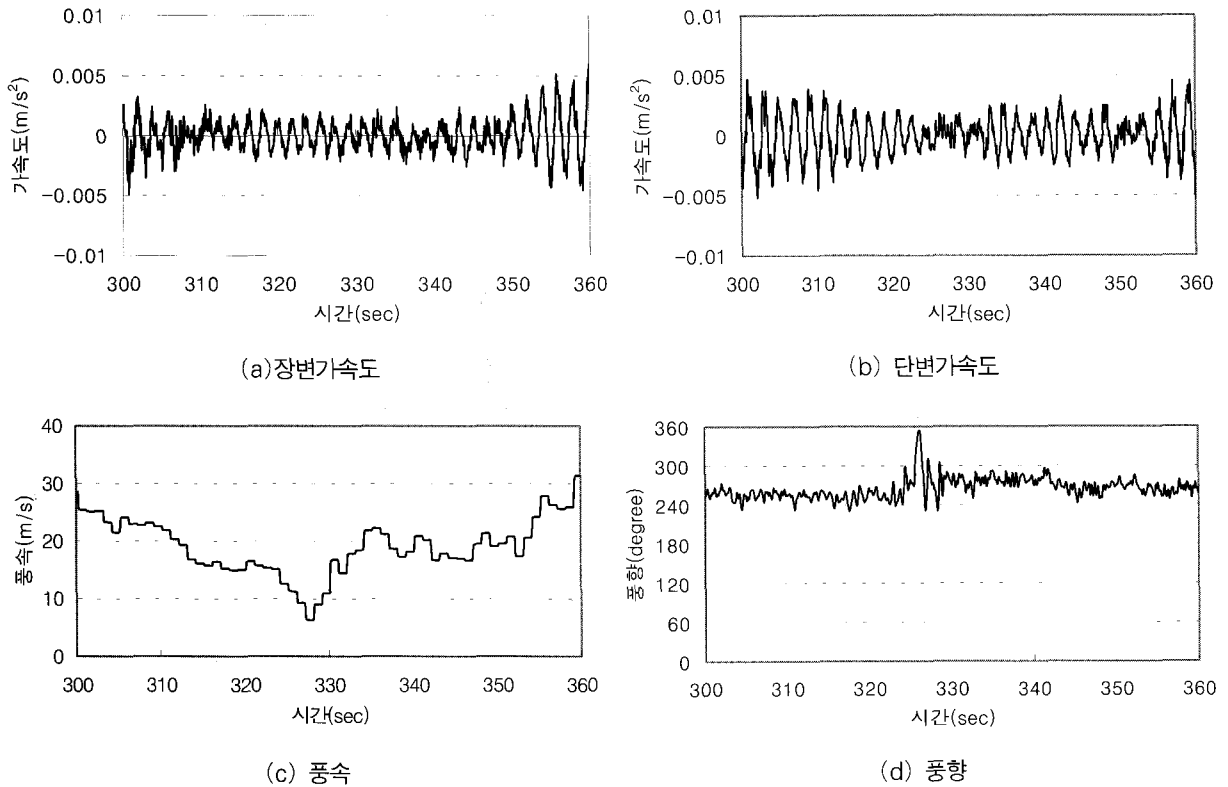
장변가속도, 단변가속도, 풍향, 풍속의 4개 채널을 동시에 계측하였다. <그림 4>는 1분간의 시계열 파형의 한 예이다.

4. 결과 분석

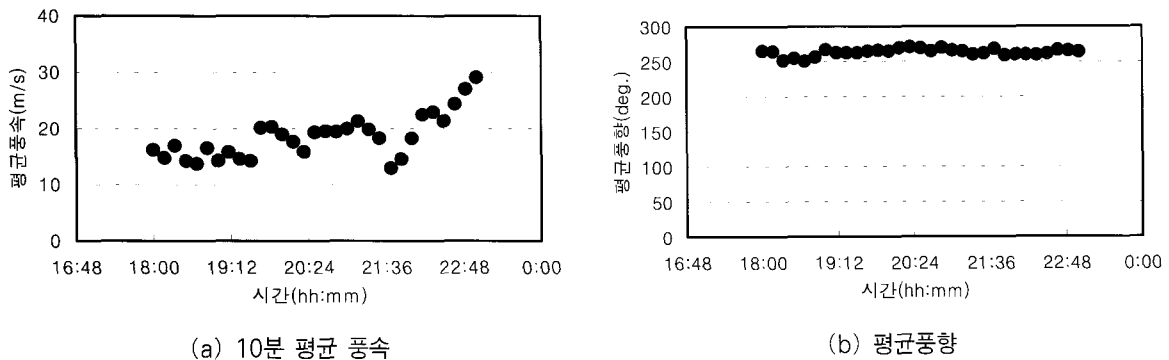
4.1 강풍 특성

4.1.1 평균풍속과 평균풍향

<그림 5>의 x축은 2002년 11월의 계측시간이고 y축은 이때의 풍속과 풍향이다. 풍향은 거의 서풍으로서 10분 최대평균풍속은 29.1m/s이고, 순간최대풍속은 48.9m/s까지 계측할 수 있었다. 그 이상의 강풍도 계측할 수 있었지만, 풍향풍속계의 바람개비가 강풍으로 인하여 파손된 관계로 이후에는 풍속과 풍향데이터는 없이 장변과 단변의 가속도 파형만을 계속 계측하였다.



<그림 4> 계측데이터의 예

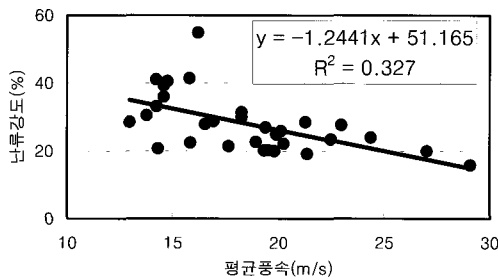


<그림 5> 평균풍속과 평균풍향

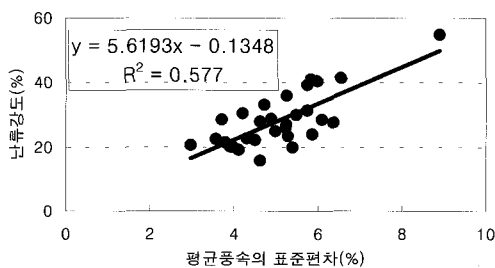
4.2 난류강도

난류강도는 풍속의 평균풍속에 대한 표준편차의 비로 정의된다. 난류강도는 고층건물의 동적응답을 결정하는데 주요한 파라미터이다. <그림 6>은 평균 풍속, 순간풍속, 거스트계수의 난류강도에 대한 상관을 분석한 것이다. 10분 평균의 난류강도는 15.9% ~54.9% 범위에 있는 것을 알 수 있다.

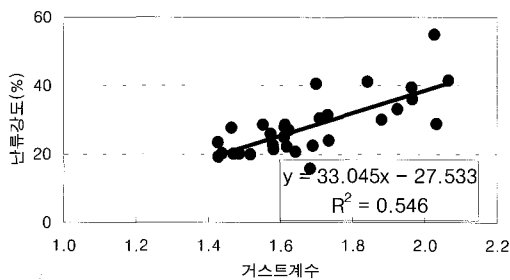
난류강도에 대한 풍속의 상관을 분석하면, 풍속이 증가함에 따라 난류강도는 그림 6(a)와 같이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 난류강도에 대한 영향인자로서 그림 6(b)에서 알 수 있듯이 평균풍속보다는 풍속의 표준편차 상관계수의 자승이 0.577로서 더욱 큰 것을 알 수 있다. 그림 6(c)에서 알 수 있듯이 난류강도에 대한 거스트계수의 영향도 풍속의 표준편차 만큼 비슷한 영향을 주는 것을 알 수 있다.



(a) 평균풍속과 난류강도



(b) 풍속표준편차와 난류강도



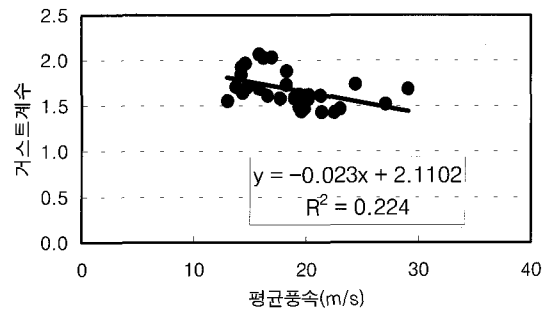
(c) 거스트계수와 난류강도

<그림 6> 난류강도

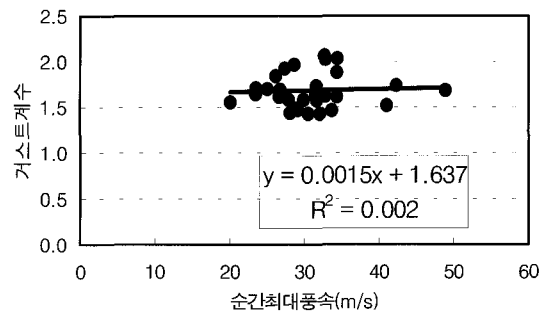
4.3 거스트계수

거스트계수는 10분 평균풍속에 대한 순간최대풍속의 비이다. 거스트계수가 높다는 것은 바람의 난류성분이 크다는 것을 의미한다. <그림 7>은 풍속의 변화에 대한 거스트계수의 변화 경향이다. 풍속의 증가에 따라 거스트계수의 감소 경향을 알 수 있었다. 풍속의 증가에 따라 거스트계수는 2.1에서 1.49로 감소함을 알 수 있다.

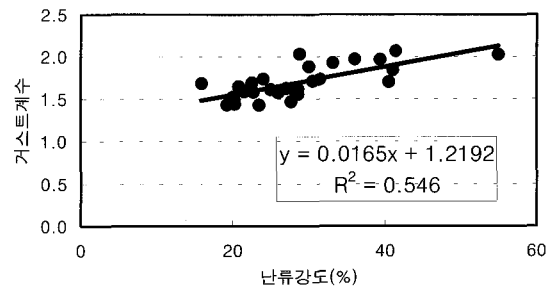
거스트계수에 대한 상관계수의 자승은 난류강도, 평균풍속, 평균풍속의 표준편차 순서로 나타났다. 이 세가지 변수와 거스트계수와 상관계수의 자승은 각각 0.546, 0.224, 0.002로서 난류강도의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다.



(a) 평균풍속과 거스트계수



(b) 순간최대풍속과 거스트계수



(c) 난류강도와 거스트계수

<그림 7> 거스트계수

4.4 동적 특성

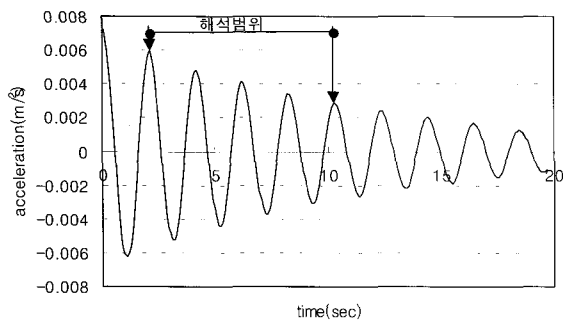
RD법에 의하여 감쇠율과 고유진동수를 산정한 후에, 감쇠율과 고유진동수의 진폭의존성을 검토하였다. 또한 RD에 의한 고유진동수와 감쇠율을 하프 파워법에 의한 값과도 비교하였다.

4.4.1 감쇠율

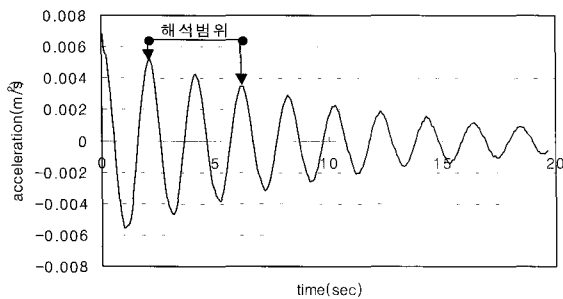
진폭의존성을 검토하기 위하여 <표 3>과 같이 10개의 진폭영역으로 R1에서 R10까지 설정하였다. <표 3>은 설정한 진폭영역으로서 0.001m/s²~0.018 m/s² 사이를 10개의 구간으로 나누어서 적용하였다.

<표 3> 진폭 영역

진폭영역	진폭(m/s ²)	진폭영역	진폭(m/s ²)
R1	0.001-0.002	R6	0.0075-0.009
R2	0.002-0.0035	R7	0.009-0.0105
R3	0.0035-0.0045	R8	0.0105-0.012
R4	0.0045-0.006	R9	0.012-0.015
R5	0.006-0.0075	R10	0.015-0.018

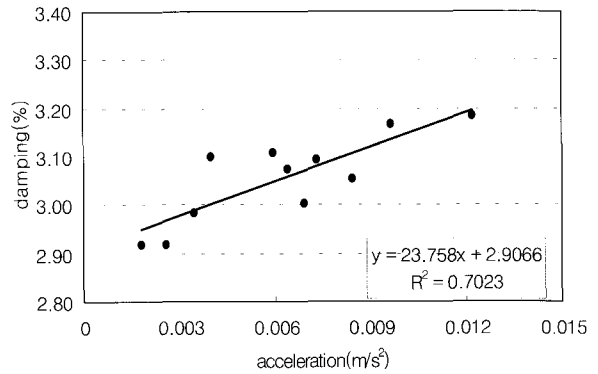


(a) Y방향(R6의 경우)



(b) X방향(R6의 경우)

<그림 8> RD법에 의한 자유진동파형의 예

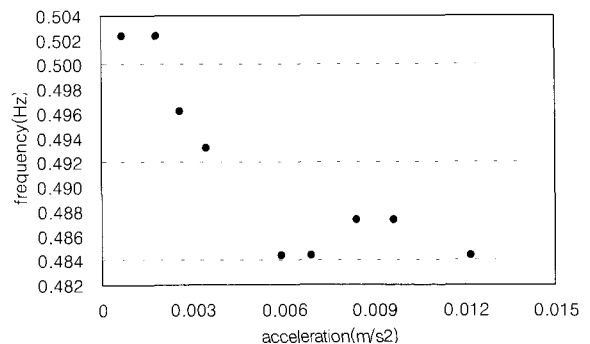


<그림 9> 감쇠율의 진폭의존성

X방향과 Y방향의 각각 10개의 구간 총 20개구간을 이용하였다. 감쇠율 해석방법은 대수감소법을 사용하였고, 사용 cycle은 그림 8-(a)와 같이 4 주기를 사용하였다. 그러나 X방향과 같이 고차모드가 일찍 나타나는 경우에는 그림 8-(b)와 같이 2주기를 해석 범위로 사용하였다. 이와 같이 1차모드만의 파형이 명료하게 얻어진 것은 X방향에서는 R5, R7, R8의 세 경우이고, Y방향은 R2에서 R10까지 아홉 경우이다. <그림 9>는 각 진폭에서의 감쇠율로서 R2에서 2.93%의 감쇠율이 가속도진폭이 증가함에 따라 최대 3.19%로서 9% 증가하는 진폭의존성을 명확히 확인할 수 있었다.

4.4.2 고유진동수

<그림 10>은 고유진동수의 진폭의존성에 대한 그래프이다. 계측파형이 명료한 Y방향만을 분석하였다. 진폭이 제일 작은 R1에서 0.502Hz, 진폭이 제일 큰 R10에서 0.484Hz로서 진폭이 증가함에 따라 고유진동수는 약 3.6% 감소하는 것을 확인하였다.



<그림 10> 고유진동수의 진폭의존성

5. 결론

풍응답계측 데이터에서 감쇠율과 고유진동수의 가속도 진폭의존성과 강풍 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 감쇠율은 가속도진폭이 증가함에 따라 같이 증가하는 진폭의존성을 명료하게 나타냈다. 비교적 작은 진폭영역인 R2에서 감쇠율이 2.93% 이었지만 R10으로 진폭이 증가함에 따라 최대 3.19% 증가하였다. 진폭의 증가에 따라 약 9%의 증가율을 확인하였다.
- (2) 진폭이 제일 작은 R1에서 0.502Hz, 진폭이 제일 큰 R10에서 0.484Hz로서 진폭이 증가함에 따라 고유진동수는 약 3.6% 감소하는 것을 확인하였다.
- (3) 난류강도는 풍속에 따라 건물 A는 15.9% ~ 54.9% 범위에 있는 것을 알 수 있다. 난류강도는 풍속이 증가함에 따라 난류강도는 감소하는 것을 알 수 있다. 난류강도에 대한 상관은 평균풍속보다는 풍속의 표준편차 상관계수의 자승이 0.577로서 더욱 큰 것을 알 수 있다. 또한 난류강도에 대한 거스트계수의 상관도 풍속의 표준편차 만큼 비슷한 상관이 있는 것을 알 수 있다.
- (4) 풍속의 증가에 따라 거스트계수는 2.1에서 1.49로 감소하는 것을 알 수 있다. 거스트계수에 대한 상관은 난류강도, 평균풍속, 평균풍속의 표준편차 순서로 나타났다. 이 세

가지 변수와 거스트계수와 상관계수의 자승은 각각 0.546, 0.224, 0.002이다.

참고 문헌

1. Chang, F. K., "Human Response to Motion in Tall Buildings", Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 98, No. ST 6, June, 1973, pp 1259 ~ 1272
2. 日本建築學會, 建築物の減衰, 丸善株式會社, p.p. 74-76, 2000.10
3. Euro Code1, Basis of Design and Actions on Structures, Part2-4, Wind Actions, CEN/TC 250/SC1, Steering Panel Draft, 1994
4. ESDU, Damping of Structures, Part 1 Tall Buildings, Data Item 83009, Engineering Sciences Data Unit, 1983
5. Jeary, "Damping in Tall Buildings- Mechanism and a Predictor, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.14, pp733~ 750, 1986
6. Yukio Tamura, Evaluation of amplitude dependent damping and natural frequency of buildings during strong winds, Journal of wind engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, pp 115~130
7. (株)共和電業, 取扱説明書 서보형가속도변환기 ASQ-CA · CB 1996, pp. 1-7
8. (株)共和電業, 取扱説明書 VAQ-700A, p.p. 5-28
9. Data Physics, Dynamic signal Processor, 2001