

# 강풍시 고층건물의 진동특성 및 사용성 평가

## Vibration Characteristics and the Serviceability Evaluation of High-rise Building during Strong Wind

윤성원\*  
Yoon, Sung-Won

김도현\*\*  
Kim, Do-Hyun

김동원\*\*\*  
Kim, Dong-Won

정석창\*\*\*\*  
Jeong, Sug-Chang

### 요약

철골조 고층건물을 대상으로 풍응답계측을 실시하여, 감쇠율과 고유진동수의 진폭의존성을 검토하였다. 진폭의존성의 검토를 위하여 RD법을 사용하였다. RD법에 의한 진동특성을 하프파워법에 의한 진동특성과 비교하여 두 방법 사이의 상관관계를 분석하였다. 또한 일본, 캐나다기준에 의한 강풍시의 사용성평가를 통하여 두가지 방법의 적용성을 검토하였다. RD법에 의하여 감쇠율의 진폭의존성을 확인하였으며, 고유진동수의 진폭의존성은 공학적인 의미에서 상대적으로 매우 작은 것을 확인하였다. 또한 계측건물은 사용성을 만족하였으며, 일본기준이 캐나다기준보다 더욱 엄격함을 확인하였다.

### Abstract

After measuring wind induced response for a high-rise steel building, the damping ratio and natural frequency were analyzed in this paper. In order to examine amplitude dependence, random decrement method was used. Two methods were analyzed by comparing dynamic properties from random decrement method and half powered-band width method. In addition, through serviceability evaluation during strong wind, compatibility of two methods to Japanese guidelines for the evaluation of habitability to building vibration and national building code of Canada was considered. The amplitude dependence of the damping ratio by RD method was shown and the amplitude dependence of the natural frequency was relatively very small in an aspect of engineering sense. Moreover, the measured building was satisfied with serviceability and Japanese guideline is stricter than NBCC code.

**키워드 :** 고층건물, 사용성 평가, 고유진동수, 감쇠율, RD법, 하프파워법

**Keywords :** High-rise building, Serviceability Evaluation, Natural frequency, Damping ratio, Random Decrement Method, Half Powered-band Width Method

## 1. 서론

철골조 고층건물은 철근콘크리트조 건물에 비하여 경량이고, 감쇠율이 작기 때문에 강풍시 진동으로 인하여 거주자가 불편함을 느끼는 사용성 문제가 발생한다. 국내에서는 설계단계에서의 사용성 검토를 고유치해석을 통하여 고유진동수를 산정하고 가정된 감쇠율을 사용하고 있다. 응답가속도는 일본

기준이나 캐나다 등의 해외기준을 이용하거나 풍동 실험을 통하여 산정하고 있다. 그러나 건물이 완공된 후에 고유진동수와 감쇠율과 같은 동적특성과 풍속에 대한 응답가속도 특성을 규명하기 위한 풍 응답계측은 잘 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

반면에 해외에서의 상시진동 등의 계측을 통한 고유진동수와 감쇠율에 대한 연구는 Suda<sup>1)</sup>, Jeary<sup>2)</sup>, Ellis<sup>3)</sup>, Lagomarsino<sup>4)</sup> 등에 의하여 광범위하게 수행되었다. 또한 캐나다<sup>5)</sup>와 일본<sup>7,8)</sup> 등의 해외기준에서는 강풍에 대한 사용성 평가를 위하여 응답가속도 산정식과 허용가속도를 제안하고 있다.

따라서 여기서는 20층 철골조 건물을 대상으로 풍응답계측을 실시하여, 감쇠율과 고유진동수의

\* 정회원 · 서울산업대학교 건축학부 부교수, 공학박사

\*\* 정회원 · 동양구조안전기술, 연구원

\*\*\* 교신저자, 고려대학교 건축공학과 석사

Tel : 02-970-6587 Fax : 02-979-6587

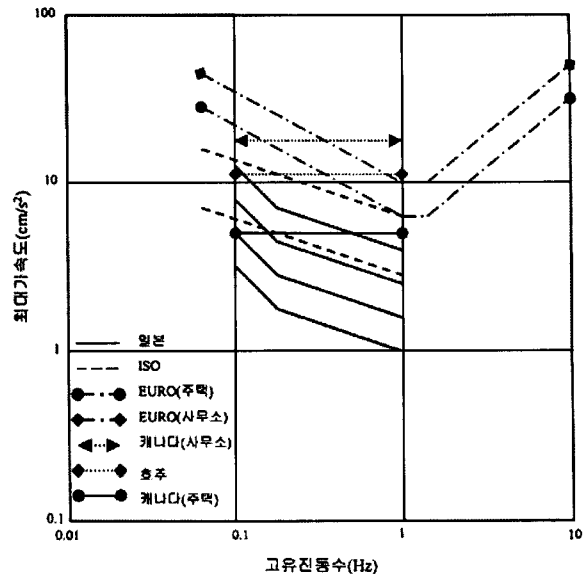
E-mail : interkul@korea.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 부천대학 건축과 조교수, 공학박사

진폭의존성을 검토하였다. Random Decrement(이하 RD)법에 의한 진동특성을 하프파워법에 의한 진동특성과 비교하여 두 방법 사이의 상관관계를 분석하였다. 또한 일본, 캐나다기준에 의한 강풍시의 사용성평가를 통하여 두가지 방법의 적용성을 검토하였다.

## 2. 해외기준분석

국외의 각 나라에서 사용하는 기준은 건축물 진동의 평가에 있어 필요한 허용레벨의 설정(평가곡선), 평가방법(평가시간, 평가감각곡선) 등에 차이가 있다. 그리고 이러한 차이는 응답가속도를 최대치로 사용하는 경우와 RMS(Root Mean Square)값을 사용하는 경우로 분류된다. 또한 설계풍속의 재현기간에 있어서도 0.5년에서 10년 사이를 사용하고 있으며, 나라마다 풍속의 평균시간도 10분, 1시간 등을 사용하고 있다. <그림 1>은 나라마다 차이가 나는 조건을 1년재현주기의 10분 평균풍속에 의한 최대가속도를 동일한 조건으로 치환한 것이다. <그림 1>에서 볼 수 있듯이, 건물의 수평 고유진동수 0.1Hz에서 1Hz사이에 거주용도와 사무소용도 중에서 가장 엄격한 진동평가 곡선은 일본의 거주성능 평가지침이라고 할 수 있다. 또한 국내에서 가장 광범위하게 사용되는 캐나다 기준과 ISO 68976)을 비



<그림 1> 국외 사용성 기준

교하면 고유진동수 약 0.15Hz를 경계로 하여 0.15Hz 이하에서는 캐나다 기준이 엄격한 평가곡선을 제시하고 있다. 그러나 0.15Hz 이상에서는 ISO 6897이 캐나다 기준보다 엄격한 평가곡선을 제시하고 있다. 그러기 위해서는 사용성 검토 시 국외기준에 대한 개괄적인 이해가 필요하며, 이를 위해서 일본의 「건축물의 진동에 관한 거주성능지침 기준」<sup>8)</sup>과 캐나다기준(NBCC)5)을 중심으로 국외기준을 비교하였다.

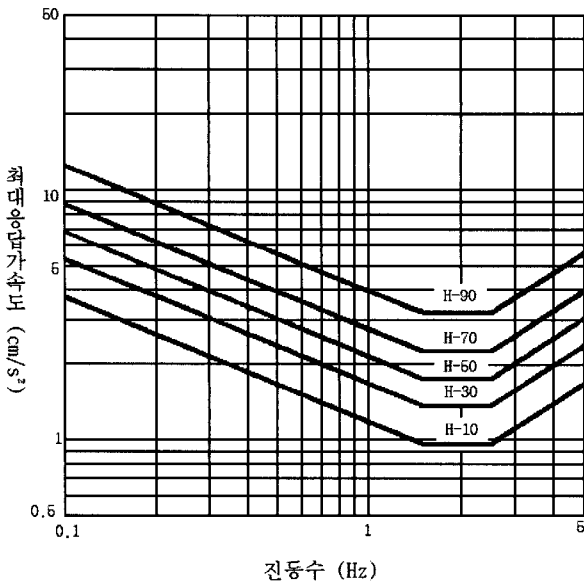
### 2.1 일본 기준

주거나 사무환경으로서의 성능을 유지하는 관점에서, 강풍에 의하여 건축물에 생기는 수평진동을 평가한다. 강풍으로 인한 진동이 문제가 되는 고층 건축물의 고유진동수를 중심으로 그 범위는 0.1Hz~5.0Hz까지로 한다. 대상이 되는 건물의 용도는 기본적으로 주거용도와 사무소 2종류이다.

건축물 수평진동의 1차 고유진동수와 재현주기 1년의 최대가속도를 성능 평가의 기준으로 하며, 비틀림 진동에 따른 회전진동지각에 미치는 영향은 고려하지 않는다. 건축물의 용도에 따라 H-10에서 H-90 까지 결정한다. H-10의 의미는 불쾌감을 느끼는 비율이 10%라는 의미이다. <그림 2>는 일본 진동평가곡선을 나타낸다.

<표 1> 국외 사용성 기준의 평가척도

기준 지침	평가 물리량 (응답가속도)	평가 시간	풍속 재현 기대치	건축물 구분
ISO 6897	RMS치	10분간	5년	통상건축물/해양/정밀작업지
캐나다 기준	최대치	1시간	10년	주거/사무소
호주 기준	최대치	1시간	10년	-
ECCS	최대치	-	0.5년	-
Euro Code	최대치	10분간	5년	주거/사무소
일본 기준	최대치	10분간	1년	주거/사무소



〈그림 2〉 일본 진동평가곡선

### 2.2 캐나다기준(NBCC)

캐나다기준(NBCC)은 강풍에 의한 진동에 대하여 풍향 방향과 풍직각 방향의 최대 가속도를 인간이 느낄 수 있는 진동 레벨로 하여 불편감을 줄 수 있는 것으로 하고 있다.

10년에 한번 정도의 가속도 한계치로서 거주용도에서는 중력가속도의 1%를 추천하고 있으며, 사무소에서는 중력가속도의 3%값을 추천하고 있다. 집합주택에는 사무소 보다 낮은 값이 적용된다.

중형비가 3.3 이상이면, 풍직각 방향의 가속도 응답이 풍방향 가속도 응답보다 큰 경향이 있는 것으로 규정되어 있다. 일반적인 평가방법은 풍직각 방향의 건물 최상부에서의 최대가속도를 식(1)을 이용하여 평가하고, 풍방향 가속도는 식(2)를 사용하여 평가한다. 식(1)과 식(2)를 통해서 얻은 값 중에서 큰 값을 대표 응답가속도로 설정한다.

$$a_D = g_p \sqrt{\frac{KsF}{C_e \beta_D}} \left( \frac{3.9}{2 + \alpha} \right) \left( \frac{C_e q}{D \rho_B} \right) \quad (1)$$

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

여기서,  $K, C_e$  : 노풍도 관련 계수  
 $n_w$  : 풍직각방향의 진동수 (Hz)

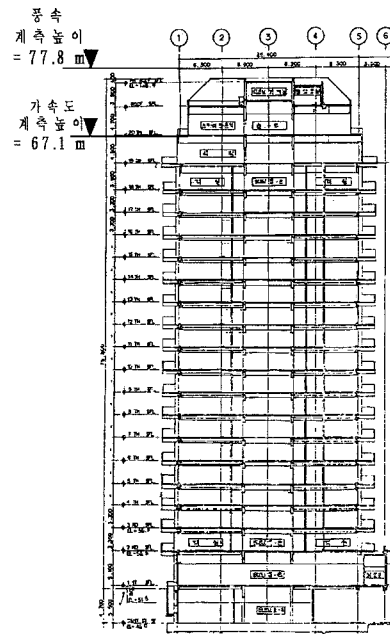
$$a_r : 78.5 \cdot 10^{-3} \left( \frac{V_H}{n_w \sqrt{WD}} \right)^{3.3}$$

- $\beta_D, \beta_w$  : 풍방향과 풍직각방향의 감쇠율
- s : 사이즈감소계수
- F : 거스트에너지비
- $g_p$  : peak 계수
- W, D : 건물의 폭과 깊이(m)
- $\rho_B$  : 건물중량 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $V_H$  : 최상층풍속(m/s)

## 3. 풍응답 계측

### 3.1 대상구조물

계측대상 구조물은 20층의 철골 구조물이고 코어는 콘크리트조 전단벽으로 설계되었으며 1988년에 준공되었다. 한변의 길이는 33m로서 높이 대 평면 길이의 비는 2.3이다.



〈그림 3〉 계측대상 건축물<sup>17)</sup>

### 3.2 계측 방법

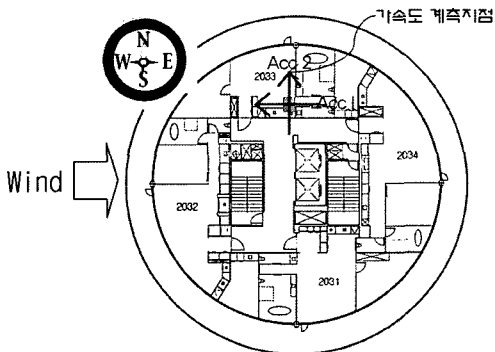
계측기는 <그림 4>와 같이 설치되었으며 가능한 코어에 가까운 지점에 설치하도록 하였다. 풍향풍속계의 위치는 옥상 위의 핸드레일 위에 1.5m의 알루미늄 pole에 풍향풍속계(R.M. Young, model 05103)

를 설치하였다. 옥상 구조물의 상부 3m에 설치하여, 측정 위치는 지면에서 79m에 해당한다.

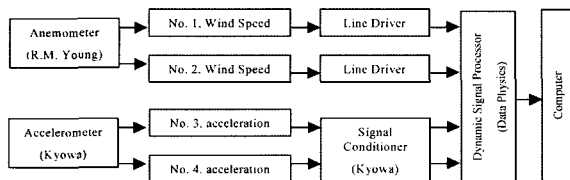
단변과 장변방향으로 가속도를 측정하기 위하여 2개의 가속도계(Model ASQ-1BL)<sup>11,13)</sup>를 가급적 평면 중앙에 가까이 위치한 18층의 객실에 설치하였다. 서보가속도계의 가속도의 크기와 주파수의 유효 측정범위는 각각 0~1000cm/s<sup>2</sup>과 0~500Hz이다.

풍속계와 가속도계의 총 4개의 채널은 signal conditioner와 line driver를 통하여 PC로 연결되었다. 채널 1과 2는 가속도로 지정되었고, 채널 3과 4는 풍속과 풍향으로 지정하였다.

4개 채널의 아날로그 신호는 데이터 측정시스템<sup>12)</sup>에 의하여 12.5Hz로 측정되었다. 디지털 신호는 PC의 하드디스크로 저장하였으며 약 6개월간 측정하였다. 측정시스템은 <그림 5>에서 보는바와 같고, <표 2>



<그림 4> 가속도계 설치위치와 풍향과의 관계<sup>17)</sup>



<그림 5> 측정 시스템<sup>15)</sup>

<표 2> 측정기기의 기본사항<sup>17)</sup>

	항목	사항
서보 가속도계 (교화)	capacity	±1g
	output voltage	±5V
	volt sensitivity	983 mV/g
	transverse sensitivity	4.2%
DYNAMIC ANALYSER (LMS DIFA)	channel	4
	filter	90db
	acquisition	5 Hz ~ 80kHz

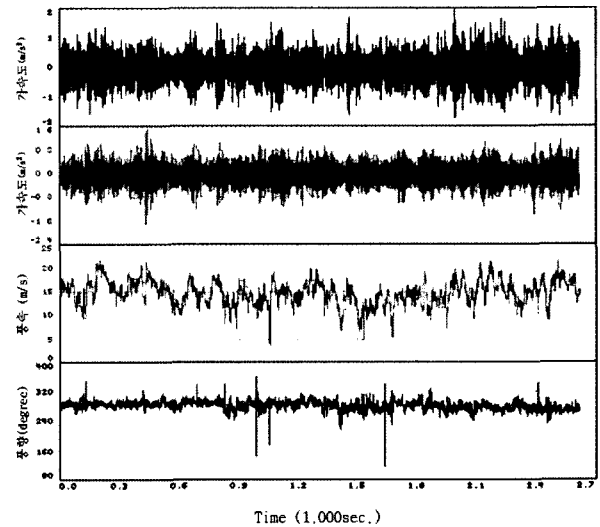
에는 측정기기의 기본사항을 나타내었다<sup>17)</sup>.

## 4. 풍응답 측정 결과

측정 결과에서 풍속과 건물의 응답관계를 유추할 수 있도록 평균풍속이 10m/s 이상이 되는 데이터를 해석범위로 하였다.

### 4.1 시계열 데이터

<그림 6>은 풍응답 측정 결과의 한 예로서, 4개의 창은 상단부터 건물의 X방향 가속도(풍방향), Y방향 가속도(풍직각방향), 풍속, 풍향을 나타낸다.



<그림 6> 풍응답 측정결과<sup>17)</sup>

### 4.2 동적 특성

사용성 평가용으로 정확한 감쇠율의 평가를 위하여 하프파워법과 RD법을 사용하였다. 하프파워법은 주파수영역에서 동적특성을 구하지만, RD법은 시간영역에서 동적특성을 구하는 면에서 차이가 있다. 우선 하프파워법에 의하여 고유진동수와 감쇠율을 산정한 후에 RD법에 의한 값과도 비교하였다.

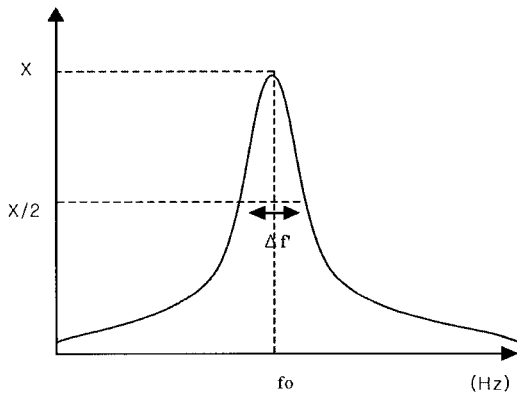
#### 4.2.1 하프파워법에 의한 동적특성<sup>16)</sup>

<그림 7>과 같이, 상시진동계측 데이터의 파워스펙트럼에서 식(3)에 의하여 감쇠율을 산정할 수 있다. 고유진동수와 감쇠율을 산정하기 위하여 시계열

파형에서 파워스펙트럼을 사용하였다. 평균과 파워스펙트럼을 사용한 이유는 1회 파워스펙트럼으로 파워스펙트럼의 근사식을 구하면 계측점과 근사곡선의 상관이 낮기 때문이다. 평균파워스펙트럼을 구하여 파워스펙트럼의 평활화를 도모한 후, 파워스펙트럼 근사곡선의 상관계수가 0.90 이상의 함수에서 식(3)의 하프파워법을 이용하여 감쇠율을 구하였다.

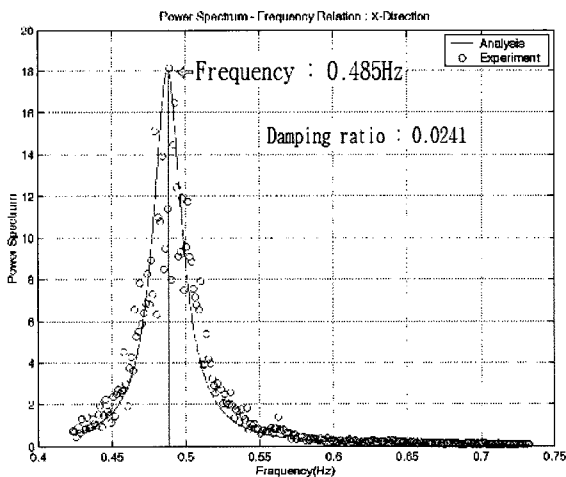
$$\zeta = \frac{\Delta f'}{2f_0} \times 100 \quad (3)$$

여기서,  $\zeta$  : 감쇠율(%)  
 $\Delta f'$  : Bandwidth (Hz)  
 $f_0$  : 고유진동수 (Hz)

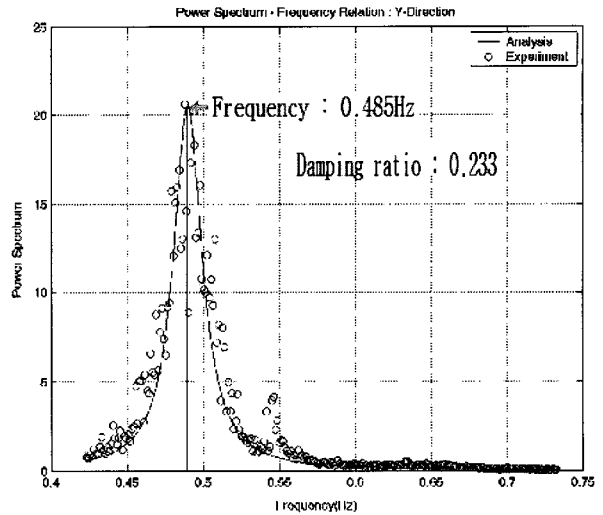


<그림 7> 하프파워법에 의한 감쇠율<sup>16)</sup>

건물의 감쇠율은 <그림 8>과 <그림 9>에서와 같이 X방향(Acc1)과 Y방향(Acc2) 각각 2.4%와 2.3%이



<그림 8> 감쇠율 - X방향



<그림 9> 감쇠율 - Y방향

다. 또한 고유진동수는 X방향과 Y방향 각각 0.485Hz이다.

#### 4.2.2 RD법에 의한 동적특성 분석<sup>15), 16)</sup>

RD법은 자기상관함수 추정법의 첫째 방법이다. RD법에서는 응답  $x(t)$ 에서 조건에 반응하는 부분 샘플을 다수로 나누어 이것들을 평균하여 RD파형  $a(\tau)$ 를 식(4)에서 구한다.

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

여기서  $N$  : 샘플수  
 $\omega(t)$  : 가중계수(weighting factor)  
 $C$  : 부분샘플을 측정하기 위한 조건

조건  $C$ 와 계수  $\omega(t)$ 의 조합에 의해 다양한 RD법이 고려된다. 대표적인 조합의 예를 <표 3>에 정리하였다. <표 3>의 조합을 이용한 RD파형은 모두 자기상관함수의 추정치로 나타나는 것으로 알려져 있다.

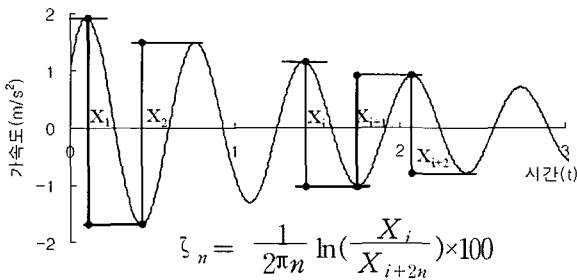
<표 3>의 조합(2) 및 (3)에서는 진폭을 한정된 경우에 의해, 시스템의 동특성이 갖는 진폭의존성의 평가가 가능하다. 본 연구에서는 <표 3>의 조합(2)를 사용하여 얻은 자유진동파형에서 <그림 10>과 같은 방법으로 감쇠율을 산정하였다. <그림 10>의  $n$ 은 파형의 사이클수를 의미한다. 가속도 진폭을

<표 3> 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

읽는 방법은 계측데이터의 영점이 완벽하지 않은 구간이 있으므로 양진폭을 사용하였다.



<그림 10> 대수감소법에 의한 평가방법<sup>16)</sup>

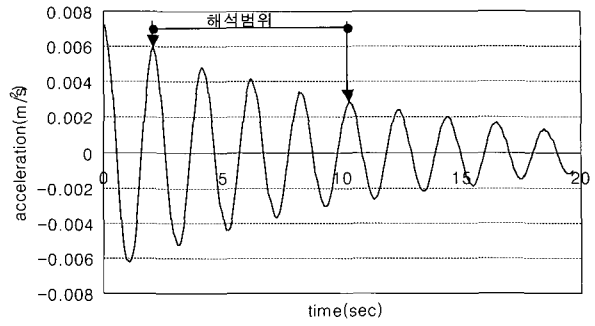
(1) 감쇠율

진폭의존성을 검토하기 위하여 <표 4>와 같이 10개의 진폭영역으로 R1에서 R10까지 설정하였다. 표 4는 설정한 진폭영역으로서  $0.001m/s^2 \sim 0.018m/s^2$  사이를 10개의 구간으로 나누어서 적용하였다.

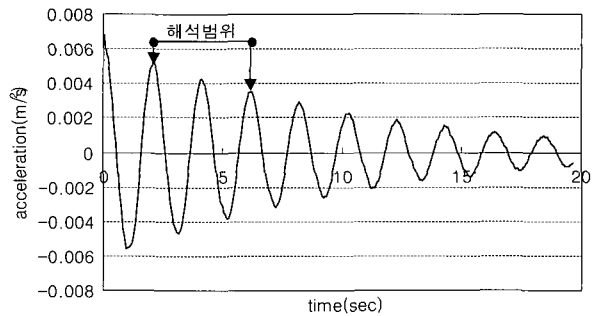
X방향과 Y방향의 각각 10개의 구간 총 20개구간을 이용하였다. 감쇠율 해석방법은 대수감소법을 사용하였고, 사용 cycle은 <그림 11(a)>와 같이 4 주기를 사용하였다. 그러나 X방향과 같이 고차모드가 일찍 나타나는 경우에는 <그림 11(b)>와 같이 2 주기를 해석범위로 사용하였다. 이와 같이 1차모드만의 파형이 명료하게 얻어진 것은 X방향에서는 R5,

<표 4> 진폭 영역<sup>15)</sup>

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

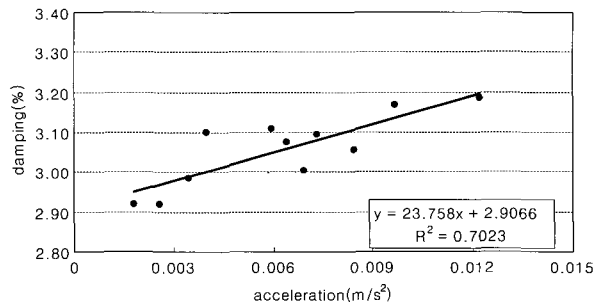


(a) Y방향(R6의 경우)



(b) X방향(R6의 경우)

<그림 11> RD법에 의한 자유진동파형의 예<sup>15)</sup>



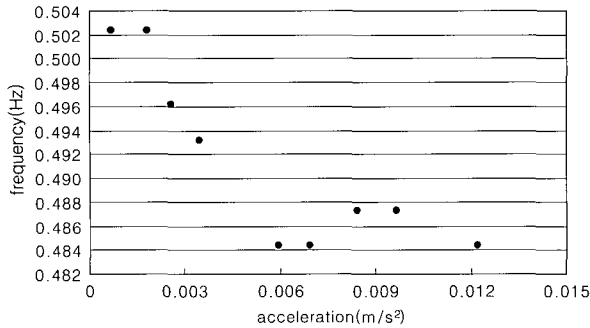
<그림 12> 감쇠율의 진폭의존성<sup>15)</sup>

R7, R8의 세 경우이고, Y방향은 R2에서 R10까지 아홉 경우이다. <그림 12>는 각 진폭에서의 감쇠율로서 R2에서 2.93%의 감쇠율이 가속도진폭이 증가함에 따라 최대 3.19%로서 9% 증가하는 진폭의존성을 명확히 확인할 수 있었다.<sup>15)</sup>

(2) 고유진동수

<그림 13>은 고유진동수의 진폭의존성에 대한 그래프이다. 계측파형이 명료한 Y방향만을 분석하였다. 진폭이 제일 작은 R1에서 고유진동수는 0.502Hz, 진폭이 제일 큰 R10에서 0.484Hz로서 진폭이 증가함에

따라 고유진동수는 약 3.6% 감소하는 것을 확인하였다. 또한 R10에서의 고유진동수 0.484Hz 값은 하프파워법에 의한 고유진동수인 0.485Hz와 거의 동일한 값을 알 수 있다.



〈그림 13〉 고유진동수의 진폭의존성<sup>15)</sup>

#### 4.2.3 하프파워법과 RD법의 비교

하프파워법으로는 진폭의 변화에 대하여 감쇠율과 고유진동수의 변화를 알 수 없으나 RD법에 의하여 감쇠율과 고유진동수의 진폭의존성을 검토하였다. 또한 하프파워법으로 정확한 값을 얻기 위해서는 데이터의 양이 많을수록 적절하게 수렴하게 된다.

〈표 5〉에서는 하프파워법과 RD법에 의해 구해진 감쇠율과 고유진동수를 정리하였다. 표에서 보는바와 같이 하프파워법에 의한 건물의 고유진동수는 X방향과 Y방향 각각 0.485Hz와 0.485Hz이다. 이 값은 진폭이 제일 큰 경우의 RD법에 의한 고유진동수 값인 0.484Hz와 거의 동일한 것을 알 수 있다. 하지만 하프파워법에 의해 산정된 감쇠율 값은 RD법에 의해 산정된 감쇠율 값보다 낮게 평가되고 있음을 알 수 있다.

〈표 5〉 감쇠율과 고유진동수 비교

	감쇠율(%)	고유진동수(Hz)
하프파워법	2.41	0.485
RD법	2.93 ~ 3.19	0.484 ~ 0.502

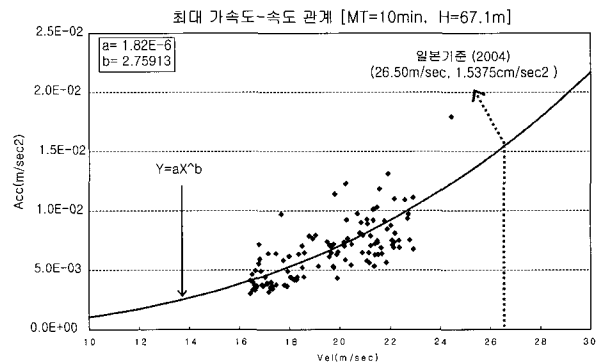
#### 4.2.4 사용성 평가

사용성 평가에 있어서 고유진동수는 하프파워법과 RD법의 값이 거의 동일하므로 하프파워법에 의한 고유진동수 0.485Hz를 사용하였다.

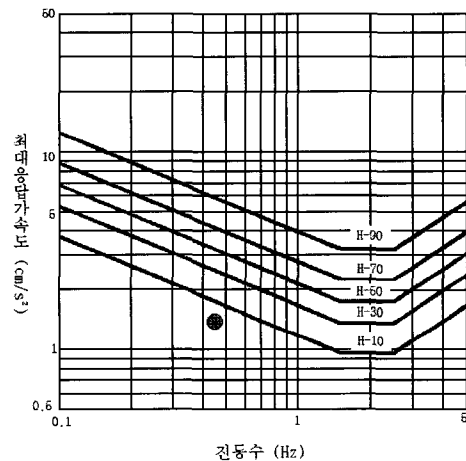
#### (1) 일본기준에 의한 평가

일본 기준에 의한 평가는 1년 재현주기에 대한 설계풍속에 대한 최상층에서의 최대가속도를 허용가속도와 비교하여 사용성 평가를 한다. 〈그림 14〉는 1년 재현주기에 대한 건물 최상층에서의 최대가속도를 계측데이터의 fitting식에 의하여 산정한 것이다.

이에 의하면 20층 높이인 67.1m에서의 1년 재현주기 설계풍속은 26.5m/s이며 이때의 응답가속도는 1.537cm/s<sup>2</sup>이다. 이를 일본기준과 비교하면 〈그림 15〉와 같이 H-10을 만족하는 것을 알 수 있다.



〈그림 14〉 1년 재현주기에 대한 최대가속도

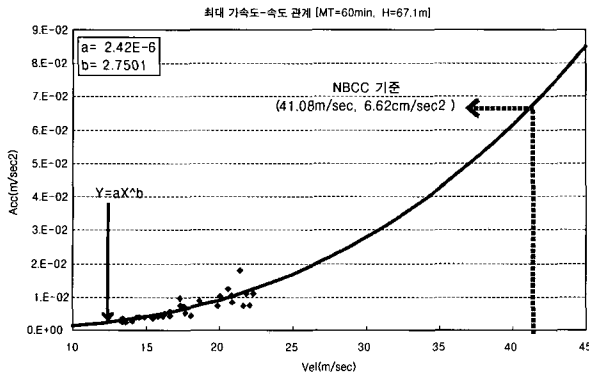


〈그림 15〉 일본 기준에 의한 사용성 평가

#### (2) NBCC에 의한 평가

NBCC에 의한 평가는 10년 재현주기에 대한 설계풍속에 대한 최상층에서의 최대가속도를 허용가속도와 비교하여 사용성 평가를 한다. 다만, 1시간 평균풍속을 사용한다. 〈그림 16〉은 10년 재현주기에 대한 건물 최상층에서의 최대가속도를 계측데이

터의 fitting식에 의하여 산정한 것이다. 10년 재현 주기에 대한 응답가속도는  $6.62 \text{ cm/s}^2$ 로 산정되었으며, 허용가속도  $10 \text{ cm/s}^2$ 를 만족하고 있다.<sup>17)</sup>



〈그림 16〉 10년 재현주기에 의한 최대가속도<sup>17)</sup>

## 5. 결 론

20층 철골조 구조물에 대한 풍응답 계측자료를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 하프파워법에 의한 건물의 고유진동수는 X방향(풍방향, Acc1)과 Y방향(풍직각방향 Acc2) 각각 0.485Hz와 0.485Hz이다. 이 값은 진폭이 제일 큰 경우의 RD법에 의한 고유진동수값인 0.484Hz와 거의 동일한 것을 알 수 있다. 따라서 고유진동수 평가 시에는 하프파워법과 RD법 어느 것을 사용해도 비슷한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) RD법에 의하여 산정된 감쇠율은 가속도진폭이 증가함에 따라 같이 증가하는 진폭의존성을 명료하게 나타냈다. 비교적 작은 진폭영역인 R2에서 감쇠율이 2.93%이었지만 R10으로 진폭이 증가함에 따라 최대 3.19%로 증가하였다. 진폭의 증가에 따라 약 9%의 감쇠율 증가율을 확인하였다. 그러나 고유진동수는 진폭의 증가에 따라 0.502Hz에서 0.484Hz로 3.6% 감소하는 것을 확인하였다.
- (3) 기록된 풍응답을 기준으로 할 때, 일본기준과 캐나다기준(NBCC) 모두를 만족하여 사용성을 만족하였지만 일본기준이 캐나다기준보다

엄격한 것을 확인하였다.

## 감사의 글

이 연구는 건설교통부 2005년도 건설핵심기술연구 개발사업(과제번호 C105A1050001-05A0505-00210)에 의한 연구의 일부임.

## 참고문헌

1. Suda Kenichi et al, Damping Properties of Buildings in Japan, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, September, pp 383~392, 1995
2. Jeary, A.P., Damping in Tall Buildings - a Mechanism and a predictor, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, pp 733~750, 1986
3. Ellis, B.R., Full-scale Measurements of Dynamic Characteristics of Buildings in the UK, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol 59, pp 365~382. 1998,
4. Lagomarsino, S., Forecast model for damping and Vibration Periods of Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp 221~239, 1998
5. National Building Code of Canada : 1990 Part4 Structural Design 4.
6. 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)
7. 日本建築學會, 建築物荷重指針同解説, 技報堂, pp 281~283. 1992.3
8. 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
9. 日本建築學會, 建築物の減衰, pp. 208~213, 2000.
10. 日本建築學會 : 動的外亂に對する設計-現狀と展望
11. (株)共和電業, 取扱説明書 서보형가속도변환



- 기 ASQ-CA:CB, 1996, pp. 1~7
12. Difa Measuring System, APB200 Manual, 1995
  13. (株)共和電業, 取扱説明書 VAQ-700A, p.p. 5~28
  14. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, p.p 169~235, 2000
  15. 윤성원, 풍응답계측시 RD법에 의한 고층건물의 동적특성의 진폭의존성, 한국공간구조학회 논문집 vol.4 no.1 pp 61~69, 2004.03
  16. 윤성원, 주영규, 신상준, 철골조 고층건물의 하프 파워법과 RD법에 의한 감쇠율 비교, 한국강구조학회 논문집 제 19권 1호 pp 107~115, 2007.02
  17. 윤성원, 김도현, 정석창, 정광량, 강풍시 고층건물의 진동특성, 한국공간구조학회 국제심포지엄 및 춘계학술발표회 논문집 vol. 4 no.1 pp 121~126, 2007.05