

국내 고층건물의 RD법에 의한 감쇠율의 진폭의존성

Amplitude dependent damping ratio of domestic tall building by RD method

윤성원*
Yoon, Sung-Worr

Abstract

The measured damping ratio was analysed to obtain amplitude dependence. Wind-induced vibration of 20 story steel-framed building was measured to investigate amplitude dependence by RD method. Micro-tremor vibrations of 20 RC bearing wall typed buildings were performed to analysis the amplitude dependence by formula proposed by Tamura and ESDU. Amplitude dependent damping in 17 story steel-framed building was showed clearly in the increasing rate of 9%. But Amplitude dependent damping of 17 RC bearing wall typed buildings was very low in the increasing rate of 2.5%. 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, RD Method, Amplitude Dependence, Serviceability

1. 서론

최근의 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)} 이러한 사용성의 문제는 철골조 고층건물은 물론이고 철근콘크리트조 아파트에서도 발생하고 있다. 국내에서 2003년 9월 12일 태풍 매미는 부산 지역에서 강풍으로 인한 건물의 진동으로 인하여 거주자의 사용성문제가 발생하였다.

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. 감쇠율이 건물의 높이, 고유진동수, 진폭레벨 등에 따라 달라지므로 Euro Code³⁾에서는

감쇠율의 예측식을 고유진동수의 함수로 표현하고 있다. ESDU⁴⁾, Jeary⁵⁾ 등은 감쇠율 예측식을 감쇠율의 예측식을 고유진동수 의존항과 건물높이와 진폭레벨을 고려한 진폭의존항의 합으로 표현하고 있다.

감쇠율의 진폭의존성을 검토하기 위해서는 건물의 자유진동파형을 얻은 후에 대수 감소법으로 각 파형마다 감쇠율을 산정하여 감쇠율의 진폭의존성을 검토할 수 있다. 이 자유진동파형을 얻기 위해서 본 논문에서는 풍응답계측 데이터에서 Random Decrement Method(이하 RD법이라 한다.)를 사용하여 감쇠율의 진폭의존성을 검토하였다. 풍응답 계측은 철골조 20층 고층건물을 대상으로 계절풍시에 풍속, 풍향, 장변가속도, 단변가속도의 동시계측을 통하여 데이터를 취득하였다. 또한 17동의 철근콘크리트조의 상시진동계측의 데이터에서 고유진동수를 산정한 후에 기존의 Tamura와 ESDU의 감쇠율 제안식에서 감쇠율의 진폭의존성을 검토하였다. 본 논문의 감쇠율의 진폭의존성은 국내 고층건물의 사용성 감쇠율의 산정 시 활용할 수 있으리라 판단된다.

* 정회원, 서울산업대 건축학부 조교수, 공학박사

2. RD법의 개요

RD법은 자기상관함수 추정법의 첫째 방법이다. RD법에서는 응답 $x(t)$ 에서 조건에 반응하는 부분 샘플을 다수로 나누어 이것들을 평균하여 RD파형 $a(\tau)$ 를 식 (1)에서 구한다.

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

여기서 N : 샘플수

$\omega(t)$: 중량계수

C : 부분샘플을 측정하기 위한 조건

조건 C 와 계수 $\omega(t)$ 의 조합에 의해 다양한 RD법이 고려된다. 대표적인 조항의 예를 표 1에 정리하였다. 표 1의 조합을 이용한 RD파형은 모두 자기상관함수의 추정치로 나타나는 것으로 알려져 있다.

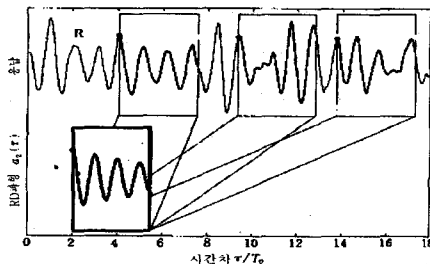
<표 1> 대표적인 조건과 계수의 조합

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

표 1의 조합 (2) 및 (3)에서는 진폭을 한정된 경우에 의해, 시스템의 동특성이 있는 진폭 의존성의 평가가 가능하다. 그림 1은 조합 (2)를 예로 들어 RD법에 대한 조건부 평균의 개념을 보이고 있다. 본 논문에서는 표 1의 조합 (2)를 사용하였다.



<그림 1> RD법에 있어서 조건부 평균의 개념

3. 해외의 감쇠율 예측식

3.1 고유진동수 의존형

(1) EURO CODE

EURO CODE³⁾에는 풍하중에 대한 응답을 평가할 때, 1차 모드의 구조 감쇠율을 식(2)와 같이 사용하고 있다.

$$\zeta_s = a_1 \cdot f + b_1 \geq \zeta_{\min} \quad (2)$$

여기서 ζ_s : 감쇠율

f : 고유진동수(Hz)

a_1, b_1 : 변수(각각 0.0072, 0.008)

ζ_{\min} : 최소 감쇠율 (0.016)

3.2 고유진동수 의존형+진폭의존형

(1) Engineering Sciences Data Unit (ESDU)

ESDU⁴⁾의 풍하중에 대한 감쇠율은 식 (3)과 같다. 극소 진폭시의 구조감쇠율 및 진폭의 증가에 따른 구조감쇠율의 증가는 표2와 같이 규정하고 있다. 또한 구조감쇠율 ζ_s 에 대해서는 상한치로서 식 (4)를 규정하고 있다. 표 2는 ESDU에서 극소진폭 시 감쇠율의 최빈치와 하한치이다.

$$\zeta_s = \zeta_{s0} + \zeta'_s \cdot (x/H) \quad (3)$$

$$\zeta_s \leq \frac{60}{100H} + 0.013 \quad (4)$$

여기서 x : 건물 정상에서의 rms 변위 진폭(m)

H : 건물 높이(m)

ζ_{s0} : 극소진폭시의 구조감쇠율

ζ'_s : 진폭 증가에 따른 구조감쇠율의 증가분

D : 건물 진동방향의 평면길이(m)

<표 2> ESDU에서 ζ_{s0} 와 ζ'_s

	최빈치	하한치
ζ_{s0}	$f/100$	$f/250$
ζ'_s	$10^{\sqrt{D}/2}$	$10^{\sqrt{D}/2}$

(2) Jeary

Jeary⁵⁾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(5)로서, 표 1에서와 같이 ESDU의 최빈치와 동일한 식이다.

$$\zeta_s = f/100 + 10 \sqrt{D}/2 \quad (5)$$

여기서 D : 건물 진동 방향의 폭(m)

(3) Tamura

Tamura⁹⁾는 11동의 10.8m~97.2m 범위의 철근콘크리트조를 대상으로 하였다. 미소진폭 데이터에 근거하여 감쇠율식을 식 (6)으로 제안하였다.

$$\zeta_s = 0.014f + 470 \frac{x}{H} - 0.00018 \quad (6)$$

여기서 H : 건물의 높이(m)

x : 건물 정상에서의 rms 변위(m)

4. 진동계측

4.1 계측 건물

(1) 철골조

속초에 있는 20층 건물로서 높이는 76m이다. 구조시스템은 철골조이고 코어는 콘크리트조 전단벽으로 설계되었다. 이 건물은 1988년에 준공되었다. 그림 2는 계측건물의 전경으로서 팔각형 평면이다. 한 변의 길이는 33m로서 높이 대 평면길이의 비인 중형비는 2.3이다.



<그림 2> 계측건물

(2) 철근콘크리트조

대상건축물은 서울에 있는 장방형 벽식 철근콘크리트조 민영아파트 17개동이다. 평면 형태는 데이터의 일관성을 위하여 모든 층의 평면이 장방형인 건물만을 대상으로 하였다. 또한 내진 설계된 동일한 조건의 건물을 선택하기 위하여 1988년도 이후에 건설된 아파트만을 대상으로 하였다.

표 3은 계측 건물의 개요이다. 아파트의 소재는

서울에서 건설된 아파트를 대상으로 하였다. 층수는 9층~25층의 범위이고, 건물높이는 24.4m~67m 범위이다.

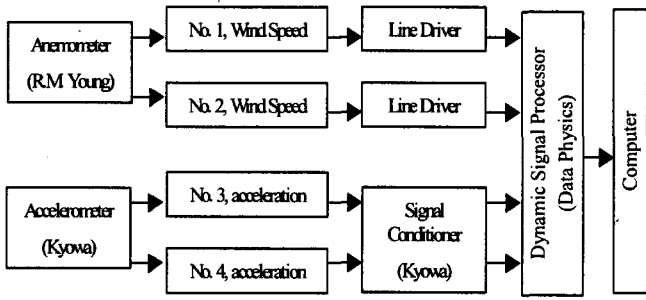
<표 3> 계측건축물 개요

건물 번호	층 수	높이 (m)	평면 길이(m)		변장비	인력 가진	소재지
			단변	장변			
1	11	28.5	12.0	70.0	5.83	○	중계동
2	12	32.2	11.0	118.0	10.73	○	공룡동
3	12	32.2	10.0	57.0	5.70	-	중계동
4	15	40.0	11.8	98.1	8.31	-	하계동
5	15	40.0	11.8	77.3	6.55	-	"
6	15	40.0	11.0	58.7	5.34	-	"
7	16	42.7	11.0	54.0	4.91	○	창동
8	18	47.1	10.0	54.0	5.40	○	하계동
9	18	48.1	10.0	42.0	4.20	○	하계동
10	18	48.1	10.0	63.0	6.30	○	하계동
11	19	50.8	11.0	41.0	3.73	○	창동
12	20	53.5	11.0	34.0	3.09	○	창동
13	21	56.2	11.8	62.0	5.25	○	창동
14	24	64.3	11.7	45.5	5.42	-	상계동
15	23	60.6	12.7	29	2.28	○	석관동
16	25	67	12.7	29	2.28	-	석관동
17	25	67	12.7	34	2.67	-	석관동

4.2 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)⁹⁾를 가급적 평면 중앙에 가까이 위치한 18층의 객실에 설치하였다. 서보가속도계의 가속도의 크기와 주파수의 유효 측정범위는 각각 0-1000 cm/s²과 0-500Hz이다.

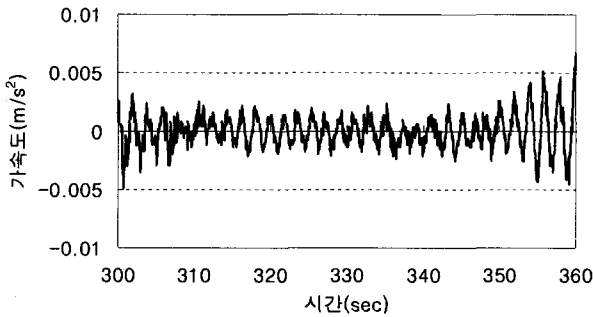
총 4개의 채널은 signal conditioner⁶⁾와 line driver를 통하여 PC로 연결되었다. 채널 1과 2는 풍향과 풍속으로 지정되었고, 채널 3과 4는 장변과 단변의 가속도로 지정되었다. 4채널의 아날로그 신호는 데이터 계측시스템⁷⁾에 의하여 20Hz로 계측되었다. 디지털신호는 PC의 하드디스크로 저장하였다. 그림 3은 계측시스템이다. 철근콘크리트조의 상시진동 계측 시에는 풍향풍속계는 없이 가속도계만을 설치하여 계측하였다.



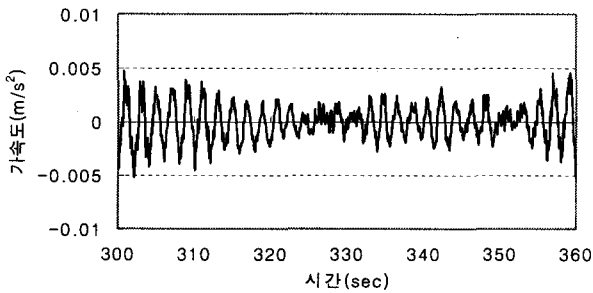
<그림 3> 계측시스템

4.3 계측 데이터

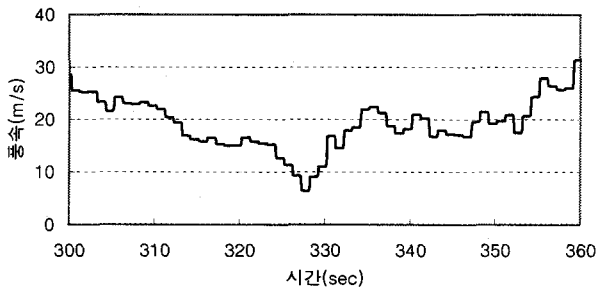
장변가속도, 단변가속도, 풍향, 풍속의 4개 채널을 동시에 계측하였다. 그림 4는 철골조건물의 1분간의 시계열 파형의 한 예이다.



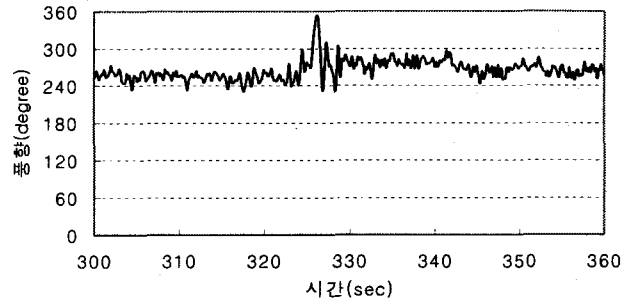
(a) 장변가속도



(b) 단변가속도

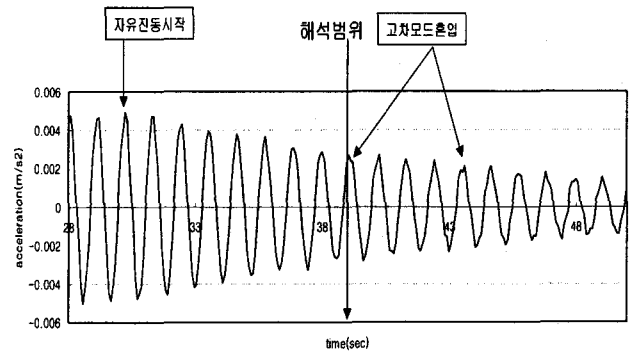


(c) 풍속

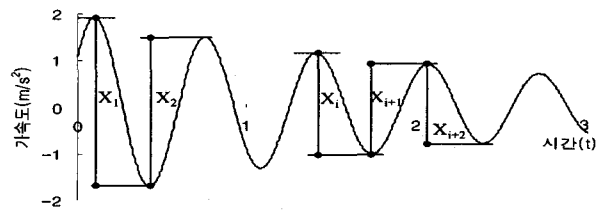


(d) 풍향

<그림 4> 철골조 계측데이터의 예



<그림 5> 철근콘크리트조 계측데이터의 예



$$\zeta_n = \frac{1}{2m} \ln \left(\frac{X_n}{X_{n+2}} \right) \times 100$$

<그림 6> 대수 감소법에 의한 평가 방법

5. 결과 분석

RD법에 의하여 감쇠율과 고유진동수를 산정한 후에, 감쇠율과 고유진동수의 진폭의존성을 검토하였다.

5.1 철골조

진폭의존성을 검토하기 위하여 표4와 같이 10개의 진폭영역으로 R1에서 R10까지 설정하였다. 표 4는 설정한 진폭영역으로서 0.001m/s² ~ 0.018

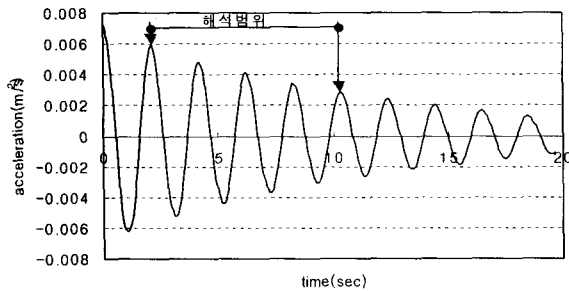
m/s² 사이를 10개의 구간으로 나누어서 적용하였다.

X방향과 Y방향의 각각 10개의 구간 총 20개 구간을 이용하였다. 감쇠율 해석방법은 대수감소법을 사용하였고, 사용 cycle은 그림 6-(a)와 같이 4주기를 사용하였다. 그러나 X방향과 같이 고차모드가 일찍 나타나는 경우에는 그림 6-(b)와 같이 2주기를 해석범위로 사용하였다. 이와 같이 1차 모드만의 파형이 명료하게 얻어진 것은 X방향에서는 R5, R7, R8의 세 경우이고, Y방향은 R2에서 R10까지 아홉 경우이다.

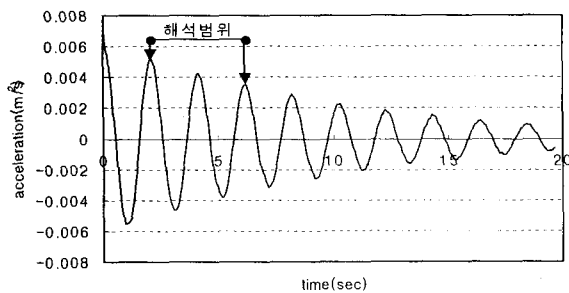
그림 7은 각 진폭에서의 감쇠율로서 R2에서 2.93%의 감쇠율이 진폭이 증가함에 따라 최대 3.19%로서 9% 증가하는 진폭의존성을 명확히 확인할 수 있었다.

<표 4> 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

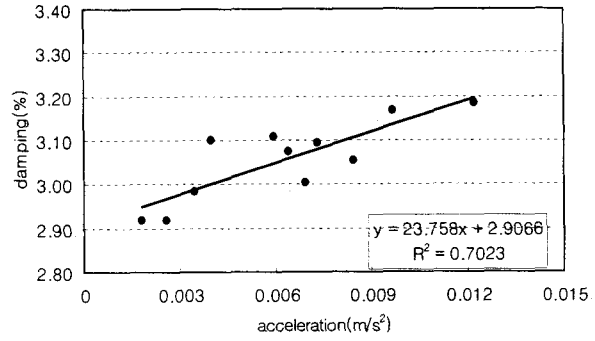


(a) Y방향(R6의 경우)



(b) X방향(R6의 경우)

<그림 6> RD법에 의한 자유진동파형의 예



<그림 7> 감쇠율의 진폭의존성

5.2 철근콘크리트조

(1) 진폭의존향

계축 건물의 높이 분포는 28.5m~67.0m의 범위이다. 이 높이의 철근콘크리트조 아파트의 진폭의존성을 검토하기 위하여 일본거주성능평가지침서의 표준성능랭크 H2의 고유진동수 0.2Hz 이상 영역에서 최대가속도 A(cm/s²)는 진동수 함수로서 식 (7)로 나타낼 수 있다.

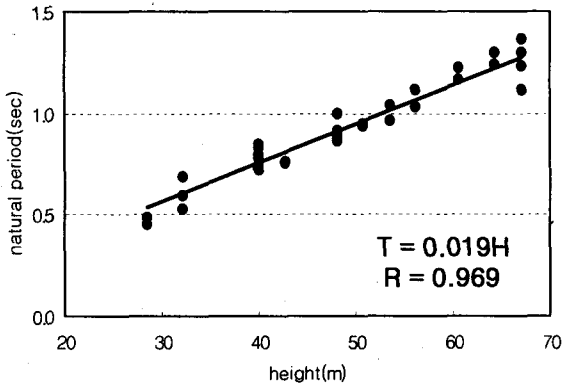
$$A = 1.52f^{0.431} \quad (7)$$

일반적으로 고유진동수와 건물 응답가속도는 식 (7)보다 작은 것을 목표로 안전측으로 설정하였다. 정상상태에서 가속도 A와 최대진폭 X는 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$A = (2\pi f)^2 X \quad (8)$$

계축 건물의 고유진동수는 그림 8과 같이 1/(0.019H)로 근사할 수 있으므로 H-2의 최대가속도의 풍응답에서의 피크 팩터 ($g = \sqrt{1.2 + 2\ln(600f)}$)로 나누어서 rms 무차원 변위 x/H를 구하면 식 (12)와 같다.

$$x/H = 2.15 \cdot 10^{-8} \quad (9)$$



<그림 8> 계층건물의 고유주기

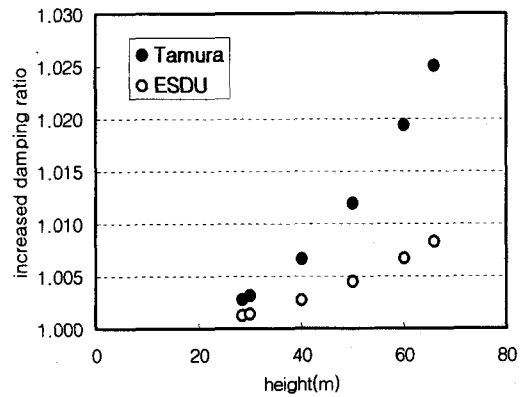
건물 높이마다 성능랭크 H-2에 대한 식(9)의 무차원 rms변위 x/H 에 대응하는 감쇠율을 ESDU⁵⁾, Jeary⁶⁾, Tamura⁷⁾의 제안식을 이용하여 산정하였다. 다만 ESDU의 제안식 (4)에서 최빈식을 사용하면 Jeary식과 동일하므로, 본 논문에서는 ESDU/Jeary 식(5)와 Tamura의 식(6)을 사용하였다.

진동 계층건물의 높이인 28.5m~67.0m의 범위에서 Tamura와 ESDU/Jeary에 의한 감쇠율은 표 5와 같다. 표 5와 같이 일본 거주성능평가지침서에는 1Hz이상의 진동수 영역에서는 표기되어 있지 않다. 인간의 수평진동에 대한 지각은 1Hz~2Hz에 걸쳐서 가장 민감하지만, 1Hz~2Hz까지는 거주성능평가지침의 1Hz의 값으로 일정한 것으로 하였다. 2Hz 이상의 경우에는 진동수가 커짐에 따라서 진동지각영역도 상승하여 안전측이 된다.

표 5에서 Tamura⁷⁾와 ESDU/Jeary^{5),6)}의 H-2 무차원변위 x/H 일 때의 감쇠율의 증가율은 진폭이 0인 경우에 비하여 매우 작은 것을 알 수 있다. 진폭의존항에 의한 감쇠율의 증가율이 그림 9이다. H-2일때 진폭이 0인 경우에 대한 감쇠율 증가율은 Tamura와 ESDU 경우에 각각 0.3%~2.5%, 0.1~0.8로 매우 작은 것을 알 수 있다. 따라서 건물높이 28.5m~67.0m의 범위의 철근콘크리트조 감쇠율에 대한 진폭의존성은 무시할 수 있을 만큼 작은 것을 알 수 있다.

<표 5> 해외 감쇠율식에 의한 감쇠율

height (m)	진폭 0		아파트의 표준 H-2		
	Tamura	ESDU/Jeary	x/H	Tamura	ESDU/Jeary
28.5	0.0241	0.0170	1.41E-07	0.0241	0.0171
30	0.0228	0.0163	1.53E-07	0.0228	0.0164
40	0.0166	0.0130	2.35E-07	0.0167	0.0130
50	0.0129	0.0110	3.29E-07	0.0131	0.0110
60	0.0105	0.0097	4.32E-07	0.0107	0.0097
66	0.0094	0.0091	4.99E-07	0.0096	0.0091



<그림 9> H-2 진폭시 감쇠율의 증가율

6. 결론

풍응답계측 데이터에서 감쇠율과 고유진동수의 가속도 진폭의존성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 20층 철골조 고층건물의 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) 28.5m~67.0m 범위의 철근콘크리트조 벽식 아파트의 강풍에 대한 사용성설계용 감쇠율에 미치는 진폭의존항의 영향은 Tamura와 ESDU/Jeary 제안식에서 각각 0.3%~2.5%와 0.1%~0.8%로서 진폭의존성을 무시할 만큼 작은 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 [2002년도 건교부 산학연 공동연구 개발 사업]으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

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. Chen, P. W., and Robertson, L. E., "Human Perception Thresholds of Horizontal Motion", Journal of Structural Division., ASCE, Aug., 1972.
3. Euro Code1, Basis of Design and Actions on Structures, Part 2-4, 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. (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
7. (株)共和電業, 取扱説明書 VAQ-500A, 1996, pp 1 ~ 18
8. Difa Measuring system B. V., "APB200 Getting Started Manual", 1994, pp 8-1~8-15
9. 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