

진동의 표현과 진동기준

김 문 겸*

우리나라와 같이 협소한 국토에서 건설되는 교통수단들은 점차 대형화 및 고속화되어 가고 있으며 이를 만족시키기 위해서는 인구가 밀집되어 있는 상업지역이나 주거지역에서의 빈번한 운행이 요구된다. 이에 따라 부수적으로 환경진동문제가 발생되어질 것이 예상되어지며 이 진동문제는 특히 지속적이고 반복적으로 발생하기 때문에 진동의 영향을 받는 사람들은 심리적인 압박감은 물론 불쾌감과 생리적인 영향까지 받게 되는 것이 사실이다. 또한 허용치 이상의 과도한 진동이 인접구조물로 전파될 경우에는 건물도 손상을 입게 된다. 선진각국에서는 진동문제를 해결하기 위해서 인체 및 구조물에 대한 진동기준을 마련하여 적용하고 있으며 이에 대한 연구가 계속되고 있다.

진동수준의 산정을 위해서는 진동에 대한 정량화가 필요하며 국외에서는 진동변위(단위: μ , mm, cm), 진동속도(단위: mm/s, cm/s (kine)), 진동가속도(단위: mm/s², cm/s² (gal), g(=980cm/s²)) 등의 척도를 사용하여 진동의 크기를 나타내고 있으나 나라마다 지반조건 및 사회적 특성이 다르기 때문에 진동기준 및 진동을 표현하는 단위들이 다른 실정이므로 본 기사에서는 각국의 진동기준들과 기존의 진동 기준 연구결과를 검토하고 각기 다른 기준들을 같은 단위로 나타내기 위하여 조합하였다.

1. 진동의 표현단위

일반적인 진동계측은 계측점의 변위, 속도, 또는 가속도 등의 결과로 표현하게 된다. 진동현상으로서 변위 u , 속도 v , 가속도 a 를 변위진폭 U , 진동수 f 인 정현파에 대해 나타낸다면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u &= U\sin\omega t = U\sin 2\pi ft \\ v &= \omega U\cos\omega t = 2\pi f U\cos 2\pi ft \\ a &= -\omega^2 U\sin\omega t = -(2\pi f)^2 U\sin 2\pi ft \end{aligned} \quad (1)$$

u , v , a 사이의 위상은 차례대로 $\pi/2$ rad씩 앞서 있어, 변위의 최대최소점에서 속도는 0이고, 속도의 최대최소점에서는 가속도가 0이 된다. 속도는 fU 에 비례하고, 가속도 a 는 f^2U 에 비례한다. 인체의 진동 감지 특징은 연직운동의 경우, 2 Hz와 8 Hz의 사이에서는 가속도에 비례하고, 8 Hz 이상의 진동수에서는 속도에 비례한다. 기본단위로서 변위는 m, 속도는 m/sec, 가속도는 m/sec²를 사용하나 가속도의 경우에는 이외에 Gal(1 Gal=1cm/sec²)과 중력가속도 g 역시 자주 사용되고 있다.

2. 변위로 표현되는 진동기준

진동의 강도를 나타내는 단위중에 하나는 응답점에서 발생하는 변위이다. Postlethwaite¹⁾는 기

* 연세대학교 토목공학과 교수

존의 진동감지에 대한 연구들을 검토하여, 진동에 의한 변위의 크기가 인체에 불쾌감을 일으킨다는 가정하에 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$u = 76(1 + \frac{194}{f^2}) \times 10^{-3} \text{ (mm)} \quad (2)$$

여기서, f 는 진동수 (Hz) 이다.

이와 비슷하게 Oehler²⁾는 교량의 진동에 관해서 다음 식을 제안하였다.

$$u = \frac{51}{f^2} \text{ (진동수범위 : 1~6Hz)} \quad (3)$$

$$= \frac{84}{f^2} \text{ (진동수범위 : 6~20Hz)}$$

이와 관련된 다른 표현으로 Diekmann³⁾은 진동평가를 위해 K 값이라는 변위와 관련된 개념을 결정하여 인체에 대한 진동감지를 연구하였다. 이를 위의 결과와 비교하기 위하여 K 값이 10에 이를때는 불쾌감을 느끼는 기준점이라고 한다면 비슷한 형태의 경험식을 도출할 수 있다.

$$u = 70(1 + \frac{190}{f^2}) \times 10^{-3} \text{ (mm)} \quad (4)$$

경험식에 의한 이 세가지 값을 조합하여, Richter와 Meier⁴⁾, 독일의 DIN 4150⁵⁾ 등이 인체에 대하여 규정한 변위 기준값들과 함께 그림 1에서

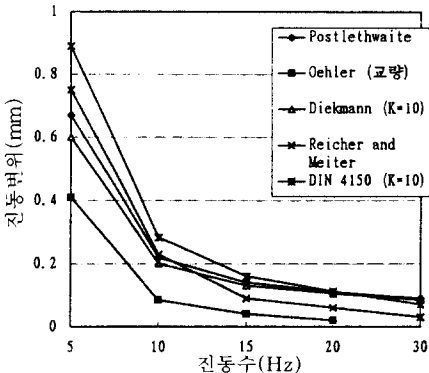


그림 1 변위로 나타낸 인체 및 건물에 대한 진동기준

비교하였다. 이 그림을 보면 Postlethwaite와 Diekmann의 값은 별차이가 없지만, 교량을 대상으로 하고 있는 Oehler의 값은 고진동수 영역으로 갈수록 다른 값과의 차이가 커진다는 것을 알 수 있다.

3. 속도로 표현되는 진동기준

응답점의 진동속도에 관해서는 여러 연구기관에서 다루고 있다. 이를테면, 독일의 DIN 4150에서는 작용진동을 일시적 진동과 지속적 진동으로 나누어 건물에 대한 피해정도를 나타내고 있으며, 스위스는 국가규준으로 Standard SN 640312⁶⁾을 제정하여 교통 및 산업진동이 건물에 미치는 영향을 진동수에 따른 진동속도로 나타내고 있다.

진동이 건물에 미치는 영향을 진동속도로 표현한 여러 연구기관들의 연구결과를 모아서 비교한다면 표 1과 같다. 이 표를 살펴보면 인체에 대한 진동기준은 제안자에 따라 크게 다르지 않지만 건물에 대한 기준은 조금씩 차이나는 것을 알 수 있

표 1 진동속도로 표현한 각 진동기준안

진동 속도 (mm/s)	Langefors ⁶⁾ (스웨덴)	Edwards ⁷⁾ (캐나다)	Banik (독일)	미광무국 (USBM)	미국토목학회 (ASCE)
50	큰 균열이 발생			큰 피해와 균열이 발생	구조물 위험
10	균열이 발생	피해 발생	큰 피해	벽체의 흙이 떨어짐	10Hz, 35Hz 구조물 주의
5	미세한 균열	요주의	피해 발생	가벼운 피해	
1	요주의	안전	극히 가벼운 피해	요주의	10Hz, 30Hz 기계의 안전 한계
0.5	눈에 보이는 피해는 없다		안전	안전	
0.1			요주의		
0.05	인체에는 잘 느껴지나 구조물에 피해는 없다				
0.01	일반적으로 많은 사람이 진동을 느낀다				
0.005	대단히 민감한 사람만이 진동을 느낀다				
	인체에 감각이 없다				

다. 많은 연구기관에서는 건물에 대한 진동기준을 건물의 용도에 규정하고 있기도 하지만 제안기관에 따라 건물의 분류기준이 상당한 차이를 보이고 있기 때문에 함께 비교하기는 어렵다.

4. 가속도로 표현되는 진동기준

진동가속도로 나타내는 진동기준은 속도항에 비해서 적은 편이다. 표 2에서 비교하고 있는 값들은 ISO(국제표준화기구)⁸⁾와 프랑스의 고속철도⁹⁾에서 건물의 성격에 따른 진동기준안을 마련한 것으로 두 기관은 거의 유사한 기준으로 대상건물을 분류하고 있다. 표를 보면 ISO는 진동의 작용시간을 주간과 야간으로 나누어 진동기준을 적용하고 있으며 연속진동과 충격진동에 따라 각각의 변수를 가지고 표현하고 있음을 알 수 있다.

연속진동에 대한 기준에서 ISO가 사용하고 있는 t 는 진동노출시간(sec)이다. 100초까지는 노출시간을 사용하며 t 가 100초를 초과할 경우에는 100을 계속 사용하게 된다. 충격진동에 대한 기준에서 사용하고 있는 변수 n 은 충격의 횟수로서 노출시간의 경우와 유사하게 100이 넘는 경우는 100을 사용하게 된다.

표 2 진동가속도로 나타난 건물에 대한 진동기준

(기준 : mm/sec²)

각 기관	ISO		프랑스의 고속철도
	연속진동 가속도	충격진동 가속도	
병원 등 중요한 지역	3.6	5(주간)	4.905
	3.6	5(주간)	
주거지	$72/\sqrt{t}$	100/n	9.81~19.62(주간)
	5	1	6.867(야간)
사무실	$140\sqrt{t}$	200/n	19.62
공장 및 작업장	$280\sqrt{t}$	400/n	39.24

5. 진동수준으로 표현되는 진동기준

진동이 미치는 영향을 측정하고 정량화하기란 그리 쉬운 일은 아니다. 왜냐하면 작용하는 진동의 크기나 진동수 이외에도 진동방향과 진동이 발생하는 장소에서 대상의 움직임, 그리고 지속적인

진동과 일시적인 진동의 구분 등 여러가지 인자가 진동응답에 상당한 영향을 미치기 때문이다. 기본적으로 진동크기를 나타내는 척도가 되는 물리량은 변위, 속도, 가속도 등이지만 이 값들을 공통적으로 비교하기 위해 도입된 개념이 무차원양인 진동수준이다. 진동수준은 데시벨(dB) 단위를 가지고 있으며 다음과 같은 기본식으로 계산되어진다.

$$dB=20 \log(X/X_0) \quad (5)$$

여기서 변위, 속도, 가속도에 따라 기준이 되는 X_0 을 표 3에 나타내었다.

표 3 표준 기준량

구분	정의	주 기준량 (SI 단위)	기타의 기준량
음압수준	$L_p=20 \log_{10}(p/p_0)$	$p_0=20\mu\text{N/m}^2$ $=2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$	-
동력수준	$L_w=10 \log_{10}(w/w_0)$	$w_0=1 \text{pw}$ $=1 \times 10^{-12} \text{watt}$	-
진동수준	가속도	$L_a=20 \log_{10}(a/a_0)$	$a_0=1g$ $=39.4 \times 10^{-5} \text{in/sec}^2$
	속도	$L_v=20 \log_{10}(v/v_0)$	$v_0=5 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ $v_0=10^{-6} \text{in/sec}^2$
	변위	$L_u=20 \log_{10}(u/u_0)$	$u_0=10^{-11} \text{m}$ $u_0=10^{-10} \text{in}$
	힘	$L_f=20 \log_{10}(F/F_0)$	$F_0=1 \mu\text{N}=10^{-6} \text{N}$

이제, 앞서 언급한 진동기준을 포함하여 인체에 대한 여러 진동기준 제안을 진동수준으로 나타낸다면 제시된 단위에 관계없이 표 4와 같은 비교가

표 4 각 제안자(제안국)에 따른 인체의 지각정도에 대한 진동수준

제안자(제안국)	진동 레벨(dB)	
	지각의 시점	불쾌감을 느끼는 시점
Reiter and Meier ⁴⁾	90	108
Diekmann ³⁾	82	122
Steffens ¹¹⁾	82	102
Gierke and Goldman ¹²⁾	72	94
Bachmann and Ammann ¹³⁾	60	100
DIN 4150	98	122
ANSI S3.29	82	
ISO 2631		80
일본 환경청	60	

표 5 건물 피해에 대한 진동기준

제안자(제안국)	건물 피해 시점(dB)
USBM(미광무국)	134
CHAVA	128
DIN 4150	114
BRE(영국)	116
SN 640312(스위스)	118
ISO 2361	115

가능하다. 또한 각 제안자들이 제시하고 있는 건물에 대한 피해를 단순화시켜 피해를 입히기 시작한다고 판단되는 시점을 비교한다면 표 5와 같이 나타낼 수 있다. 이 표들에서 나타나고 있는 진동수준의 크기를 비교한다면 진동수준이 표시하고 있는 진동의 크기를 대략적으로 이해할 수 있을 것이라고 사료된다.

6. 결론

앞에서 살펴본 바와 같이 진동을 정량화하기 위해서는 진동변위, 진동속도, 진동가속도 등의 척도를 사용하여 진동의 크기를 나타내고 있다. 또한 각 국가별로 기반조건 및 사회적 특성에 따라 진동척도의 단위가 통일되지 않았고, 각 단위에 대한 진동기준도 다양하게 설정되어있는 실정이다. 본 기사에서는 진동변위, 진동속도, 진동가속도로 표현된 진동기준을 국외에서 연구 제시된 자료를 중심으로 고찰하였으며 각기 다른 척도 및 단위로 표현된 기준들을 통일된 단위인 진동수준으로 표현하였다.

국내에서도 점차 진동문제에 대한 인식이 늘어감에 따라 진동기준에 대한 필요성이 증가하고 있는 시점에서 국내 실정에 적합하게 진동문제를 효과적으로 표현할 수 있으며 현장에서 계측하고 평가하기에 편리한 진동 표현방법의 기준설정 등에 대한 기초적인 준비가 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

[1] Postlethwaite, F., "Vibration Susceptibility to Vibration," *Journal of Engineering*, 157 (4072), 1944, pp.61-63.

[2] Oeler, L.T., "Vibration Susceptibilities of Various Highway Bridge Types," *Proc. ASCE*, 83, ST4, Paper No.1318, 1958.

[3] Diekmann, D., "A Study of the Influence of Vibration on Man," *Journal of Ergonomics*, 1 (4), 1958, pp.347-355.

[4] Reiter, H. and Meiter, F.H., "Die Empfindlichkeit der Menschen Gagen Ershutterungen," *Forschungs Gebiete Ingenieurwesen*, 2, 11, 1931, pp.381-386.

[5] German Inst. for Standards DIN 4150, *Vibration in Civil Engineering*, 1975.

[6] Building Research Establishment, BRE Digest 278, *Vibrations : Building and Human Response*, Building Research Station, Garston Watford, 1983.

[7] Langefors, U., "Ground Vibrations in Blasting," *Parts 1-3, Water Power*, 11(2-4), 1958, pp.335-338, 390-395, 421-424.

[8] Edwards, A.T. and Northwood, T.D., "Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures," *Engineer*, 210(5462), 1960, pp.538-546.

[9] International Standard Organization, ISO 2631, "Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration," *ISO Standards Handbook 4 : Acoustic, Vibration and Shock*, 1st ed., ISO Secretariat, Geneva, 1980, pp.493-507.

[10] 교통개발연구원, *경부고속전철기술조사 최종보고서(제2권)*, 철도청, 1991.

[11] Steffens, R.J., *Structural Vibration and Damage*, Department of the Environment, Building Research Establishment, 1974.

[12] von Gierke, H.E. and Goldman, D.E., "Effects on Shock and Vibration on Man," *Shock and Vibration Handbook*, edited by Harris, C.M. and Crede, C.E., 2nd ed., McGraw Hill Int., 1976.

[13] Bachmann, H. and Amman, W., "Vibrations in Structures Induced by Man and Machines," *Structural Engineering Document*, 3rd ed., *Int. Association for Bridge and Structural Engineering*, 1987.