



04

해외의 진동관련 기준 소개 3 : 유럽

Introduction of European Standards for Structural Vibration



신 동 현 Shin, Dong Hyeon
서울시립대학교,
건축공학과 박사과정
donghyeon_shin@uos.ac.kr



김 형 준 Kim, Hyung Joon
서울시립대학교,
건축공학과 부교수
hyungjoonkim@uos.ac.kr

머리말

바닥슬래브의 수직진동 평가시에는 진동원과 구조물의 상황뿐만 아니라 재실자의 인지정도를 포괄하여 고려한 후 이에 적합한 기준을 사용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 이를 고려하여 유럽 각 국가에서는 국가별 특징을 고려한 진동관련 기준을 수립하여 활용하고 있으며, 최근 들어 유로코드에서는 이를 통합하여 설계기준상에 제시하고 있다. 대부분의 유럽 국가에 대한 진동기준은 국가별로 건축물 내에서 발생하는 진동에 대해 측정법과 평가 절차를 규정하고 있으나 진동의 평가척도와 진동 규제 범위에 있어서 약간의 차이를 내포하고 있다.

본 고에서는 유럽 주요국가 중에서 독일, 영국, 이탈리아 등의 국가별 진동기준의 특징을 소개하고 이

를 통합하여 제정된 유로코드의 주요구성 및 조항에 대해서 소개하고자 한다.

각 국가별 진동관련 기준

2.1 독일의 진동기준 : DIN 4150

독일에서는 1930년 이후 계속하여 진동실험 및 실제사례를 연구·분석하였으며 이를 토대로하여 Structural Vibration in Building를 국가기준으로 제정하여 적용하고 있다. 독일의 진동기준인 DIN^{Deutsche Industries Norman} 4150에서는 주파수 대역 1-80Hz에서 건물내에의 바닥을 통해 인체에 도달되는 진동을 평가범위로 고려하며 평가를 위해 진동을 느끼게 되는 요인들을 정량화 시킨 KB값을 사용하였

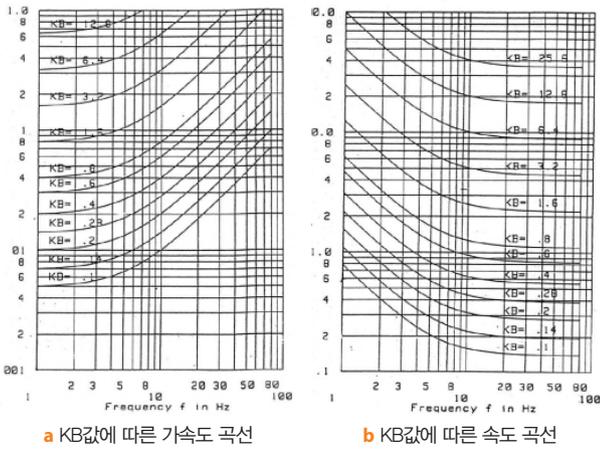


Fig. 1 DIN 4150의 진동평가곡선

다. KB값은 진폭과 주파수를 매개변수로 하는 진동 환산식을 이용하여 얻어진 일종의 무차원 진동척도로서 이 값이 KB허용치보다 클 때 불쾌감을 느낀다고 보고하고 있으나, KB의 물리적 의미 등의 파악은 대단히 어려운 편이다. KB허용치란 지속시간, 방향 등에 따라 객관적으로 분류된 값으로서 심리적 영향에 대한 기준치로 다음의 식과 같다.

$$KB = a \frac{\alpha}{\sqrt{2+(f/f_a)^2}} = v \frac{\beta f}{\sqrt{1+(f/f_a)^2}}$$

여기서, a : 가속도(m/s²), v : 속도(mm/s), f : 가진 주파수(Hz), f_0 : 기준 주파수(5.6Hz), β : 0.13 s²/mm, α : 20.2 s²/m이다.

KB곡선은 건물내의 사람이 거주하기위한 조건을 평가하는데 척도가 되며 다음의 그림과 같이 제시된다. Fig. 1(a)의 KB값에 따른 가속도 곡선은 1-2Hz에서 KB값은 일정하여 가속도가 커질수록 KB값도 증가하며, 일정 KB값에서 주파수 8Hz 이상부터는 주파수가 클수록 가속도가 증가한다. Fig. 1(b)의 KB값에 따른 속도곡선은 8Hz이상에서 KB값은 일정하며 속도가 클수록 KB값이 증가하는 경향을 나타내었다. 특징적으로 DIN 4150에서는 건축지역별로 사람이 심한 불쾌감을 느끼지 않을 정도의 KB허용치를 Table

2와 같이 제시하고 있으며, 지속진동을 고려한 평가를 제시하고 있다. 여기서, 지속시간이란 잠깐의 멈춤에 상관없이 반복되어 2시간 이상 지속되는 진동을 의미한다 (낮 시간 : 06:00~22:00, 밤 시간 : 22:00~06:00).

2.2 영국의 진동기준

2.2.1 British Standard

British Standard Institution에서 제정한 BS British Standard 중 BS8110-2는 철근콘크리트 구조에 대한 한계상태 설계기준으로서 사용성 한계상태를 규정하는 3.2절에서, 사람이나 기계로 인하여 거주자에게 불쾌

건축지역 분류		시간	
		지속진동	충격진동
보통의 주택가나 주말 별장지 혹은 도시 변두리	낮	0.2	4
	밤	0.15	0.15
대단위 마을, 혼합지역	낮	0.3	8
	밤	0.2	0.02
상업지역	낮	0.4	12
	밤	0.3	0.3
산업지역	낮	0.6	12
	밤	0.4	0.4
용도종류별 특수지역	낮	0.1 - 0.6	4 - 12
	밤	0.01 - 0.4	0.15 - 0.4

Table. 1 건축지역별 실내에서의 KB 허용치 (DIN 4150)

장소	시간	활증계수	
		연속진동 주간 16시간, 야간 8시간 기준	순간진동 impulsive vibration or transient vibration
중요 작업장 (병원 응급실, 실험실 등)	주간	1	1
	야간	1	1
거주주택	주간	2~4	60-90
	야간	1.4	20
사무실	주간	4	128
	야간	4	128
Workshop	주간	8	128
	야간	8	128

Table. 2 진동발생 위치에 따른 활증계수 (Multiplying factor)

수직진동 (Vertical vibration)		수평진동 (Horizontal vibration)	
5 Hz 이하	K=25Af ²	2 Hz 이하	K=50Af ²
5 Hz - 40 c/s	K=125Af	2 Hz - 25 c/s	K=100Af
40 Hz 이상	K=500A	25 Hz 이상	K=2500A

Table. 3 Dieckmann의 K-value와 진동영향

※ A : 단위 인치(inch)당 증폭, f : 진동수 (Hz)

인체의 지각	K 값
느끼지 못함	< 0.1
느끼기 시작	0.1
거의 인식하지 못함	0.25
인식 가능	0.63
쉽게 인식	1.6
강하게 인식	4
매우 강하게 인식	10

Table. 4 BRE Digest 278의 K값과 인체의 진동에 대한 지각정도

감이나 관심을 불러일으키는 과도한 진동이 발생하지 않도록 해야 한다고 규정하고 있다. BS6399-1은 하중기준에 관한 것으로서 동적하중에 대하여 9장 전체에서 자세한 설명을 규정하고 있다. 큰 동적하중이 우려되는 경우에 엔지니어는 동적하중으로 인한 진동을 수용할 수 있을 정도로 경감시켜야 하고, 심각한 공명효과가 발생하지 않도록 설계해야 한다고 정하고 있다. 그리고 진동인지와 공진효과를 고려한 설계에 대하여 9.2.2절, 9.2.3절 및 부록Dynamic loads for dancing and jumping을 통하여 구체적인 설계지침을 제시하고 있다. BS 8110-2에서는 S3. Serviceability Calculations의 3.2 Serviceability Limit States절에서 다음의 항목을 통해 진동관련 조항을 명시하고 있다.

‘3.2.3 Excessive Vibration : Excessive vibration due to fluctuating loads that may cause discomfort or alarm to occupants, either from people or machinery, should be avoided.’

또한, BS 6399-1에서는 9. Dynamic Loading의 9.2절 Synchronized Dynamic Crowd Loads절에

서 다음과 같은 항목을 통해 진동관련 조항을 명시하고 있다.

‘9.2.1 General : the structure should be designed either (1) to withstand the anticipated dynamic loads, (2) by avoiding significant resonance effects 이하 생략’

BS에서 다루고 있는 인체의 진동 범위는 1~80Hz이며 ISO2631-2와 전반적으로 동일하게 고유진동수와 진동응답을 구하여 진동평가곡선에 대입하여서 진동수준을 평가하는 방법을 제시하고 있다. 특징적으로, ISO2631-2에서는 진동의 허용한계를 정하는 할증계수별 평가곡선을 부록 A에 기술하였고, X, Y, Z 축에 대한 혼합곡선으로 평가곡선을 도시하고 있는데, BS의 건축물 용도 및 진동종류별 할증계수는 ISO와 거의 유사하나 충격진동에 대한 할증계수가 약간의 차이가 존재한다 (표 2).

2.2.2 BRE Digest 278

영국의 BRE(Building Research Establishment)에서 제정한 BRE Digest 278에서는 독일의 DIN 4150에서 제시하는 KB값으로부터 도입한 K값을 사용하고 있으며 이는 다음의 식을 통해 계산할 수 있다.

$$K = d \frac{f^2}{\sqrt{1+0.032f^2}}$$

여기서, K값은 Dieckmann의 K값 산출식과 같이 변위와 진동수의 함수식이며 Dieckmann은 진동 허용도에 따른 진동에 노출된 시간을 고려하였다. 허용도는 K-value로 나타내며 적용 주파수 영역은 0.1-100Hz로서 Reiber-Mesister 기준의 적용범위보다 넓다. 따라서 비교적 저주파수 영역을 가지는 구조물의 수평방향 진동에 대해서도 적용 가능하다. 이는 Table 3에서 제시하는 K값으로 정의한다. Table 4에서는 K값에 따라 인체의 진동 감지 정도를 나타내었

건물 분류	시간	허용 K값		
		지속적인 진동	순간적인 진동	간헐적인 진동
병원	낮	0.1	0.1	2.5
	밤			0.1
주거지역	낮	0.1	0.2 (0.1)	4
	밤		0.1	0.1
도시 주거지역과 상업지역 (사무실 지역포함)	낮	0.3 (0.15)	0.63 (0.3)	8
	밤	0.1	0.1	0.1
공업지역	낮	0.63 (0.3)	0.8 (0.4)	12
	밤	0.63 (0.3)	0.8 (0.4)	12

Table. 5 BRE Digest의 건물종류와 노출시간에 따른 허용 K값

※ 괄호내의 값은 15Hz 이하의 진동수 영역에서 적용된다.

건축물 용도	수직 방향 (z-축)		수평 방향 (x,y-축)	
	$a_w(mm/s^2)$	$L_{aw}(dbre10^6mm/s^2)$	$a_w(mm/s^2)$	$L_{aw}(dbre10^6mm/s^2)$
중요 지역	5.0	74	3.6	71
주거(밤 22h-7h)	7.0	77	5.0	74
주거(낮 7h-22h)	10.0	80	7.2	77
사무실	20.0	86	14.4	83
상업시설	40.0	92	28.8	89

Table. 6 이탈리아 UNI 9614에 따른 가중된 가속도 제한치

건축물 분류	오전, 오후(7h-23h)			밤(23h-7h)		
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
의료, 주거시설	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
교육시설, 사무실, 공공기관	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
중요 산업시설	0.1	0.1	-	0.1	0.1	-

Table. 7 신축 건축물에 대한 진동평가 기준치 (네덜란드)

건축물 분류	오전, 오후(7h-23h)			밤(23h-7h)		
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
의료, 주거시설	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
교육시설, 사무실, 공공기관	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
중요 산업시설	0.1	0.1	-	0.1	0.1	-

Table. 8 기존 건축물에 대한 진동평가 기준치 (네덜란드)

으며, Table 5에서는 건물의 종류와 진동 노출 시간에 따른 건물내의 허용 K값을 표시하고 있다.

기타 국가의 진동기준

3.1 이탈리아의 진동기준 : UNI 9614

이탈리아의 진동기준 UNI 9614는 건축물의 용도에 따른 진동의 제한치 (주파수 가중치에 따른 가속도, a_w)를 수직과 수평으로 구분하여 Table 6과 같이 제시하고 있다. 진동 발생 시간에 따른 제한치는 주거용 건축물에 대해서만 낮과 밤으로 구분하고 있으며, 또한 UNI 9614에서는 국제기준 ISO 2631-2에서 제시하는 가속도 가중치를 인체의 인식범위 (횡방향 진동 : $3.6mm/s^2$, 축방향 진동 : $5.0mm/s^2$)에 따라 적용하고 있다.

3.2 네덜란드의 진동기준 : SBR 2002

네덜란드의 진동기준 SBR 2002는 Building Research Foundation^{BRF}에 의해 제정되었으며, 해당 기준은 독일의 진동기준인 DIN과 매우 흡사한 조항을 가지고 있다. 진동 평가지표로서 독일의 진동평가 지표로서 활용되는 KB_{Fmax} 와 KB_{FTI} 를 V_{max} 와 V_{per} 로 각각 대체하고 있으며, Table 7과 8에서 제시하는 바와 같이 건축물의 분류와 진동의 발생시간에 따라 A₁, A₂, A₃로 평가기준치를 제시하고 있다. 진동은 다음과 같은 두 단계에 의해 평가된다.

- ① 1 단계 : $V_{max} < A_1$ 일 경우 기준을 만족하고 $V_{max} \geq A_1$ 일 경우 기준을 만족하지 못함
- ② 2 단계 : $V_{max} < A_2$ 일 경우, $V_{per} \leq A_3$ 일 경우만 기준을 만족함

유로코드상의 진동관련 조항

유럽의 Eurocode에서는 철근콘크리트조의 한계상태기준을 정하고 있는 EC2에는 진동에 관한 조항이 포함되어 있지 않으며, 철골조의 한계상태설계기준을

Construction	δ_{max}	δ_2
Roofs generally	l/200	l/250
Roofs frequently carrying personnel other than for maintenance	l/250	l/300
Floors generally	l/250	l/300
Floors and roofs supporting plaster or other brittle finish or non-flexible partitions	l/250	l/350
Floors supporting columns (unless the deflection has been included in the global analysis for the ultimate limit state)	l/250	l/500

Table. 9 Eurocode에서의 처짐제한

정하고 있는 EC3의 사용성 한계상태에 관한 기준에서 진동에 관한 설계기준을 구체적으로 정하고 있다. 4.1절의 기본조항 부분에서 진동은 거주자의 쾌적성이나 건물의 내용물에 손상을 주어서는 안되며, 마감재나 비구조재에 손상을 야기하지 않도록 해야한다고 정하고 있다. 또한 4.3절의 동적효과에 대한 설계기준에서 구조물의 고유진동수는 가진진동수와 충분히 이격되게 설정되어야 한다고 규정하면서, 그 예로 일반 보행바닥구조의 고유진동수를 3Hz 이상 (또는 전체 처짐이 28mm 이하)으로 해야 한다 혹은 울동가진을 받는 바닥구조는 5Hz (또는 전체 처짐이 10mm 이하) 이상으로 해야한다는 구체적인 제한을 본문기준에서 규정하고 있다. 본문에서 규정하고 있는 한계값은 바닥구조에 감쇠 요인이 많은 경우에는 그 값을 완화할 수 있다고 함께 설명하고 있다.

SRC조의 한계상태기준을 정하고 있는 EC4에서는 진동과 같은 기타의 사용성 한계상태도 중요하지만 이에 대해서는 EC4에서 포함하지 않는다고 본문으로 명시하고 있다. Eurocode에서는 진동으로 인한 문제를 사용성 한계상태Serviceability limit state로 판단하고 있으며, 이와 같은 사용성 한계를 방지하기 위해서 설계단계시에 처짐deflection 및 변형deformation 등을 일정범위 이하로 제한하는 조항을 두어 허용한계수준 이하로 진동수준을 제한하는 방법을 고려하고 있다. Eurocode에서 전체처짐, δ_{max} 의 계산은 다음의 식과 같이 영구적인 하중에 의한 처짐permanent loads, δ_1 과 시간의존적 변형time dependent deformation으로 발생한 하중

에 따른 처짐, δ_2 과 하중 비재하시의 치올림pre-camber, δ_0 를 통해 계산하며 Table 9와 같은 처짐에 대한 한계치를 제시하고 있다.

$$\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$$

이상과 같이 처짐 허용한계값에 더불어 EC3에서는 바닥구조의 고유진동수가 최소한 3Hz 또는 5Hz 이상이 되도록 정하고 있는데, 이는 보행가진 또는 울동가진에 의해 바닥구조가 공진하는 것을 피하기 위해 결정한 최소고유진동수에 해당하며, 이와 같은 최소진동수는 인간의 진동인지감각에 대한 사용성 평가를 위한 것이라기보다는 단순히 가진원의 진동원으로부터 공진을 피하기 위해 바닥구조의 고유진동수를 제한 한다는데 의의가 있다.

맺음말

유럽 주요 국가들의 진동에 관한 기준은 각 국가별 특성을 반영하여 제정되었으며, 인체가 인식할 수 있는 범위에 따라 결정되는 것이 아닌 객관적으로 수용할 수 있는 불쾌감의 정도에 근거하거나 진동의 정도와 인체가 인식하는 진동사이의 관계에 따라 허용진동수준을 정하고 있다. 이 때 진동의 제한치는 최대값 혹은 진동원과 동등한 값을 사용하여 평가하고 있으며, 대표적으로 독일 DIN에서는 주파수대역 1~80Hz

에서 건물내부의 바닥을 통해 인체에 도달하는 진동을 평가의 범위로 고려하여 정량화시킨 KB값을 사용하고 있다. 또한 영국 BS에서는 ISO2631-2와 전반적으로 동일하게 고유진동수와 진동응답을 구하여 진동평가곡선에 대입하여서 진동수준을 평가하는 방법을 제시하고 있다. 각 국가별 진동관련 기준을 종합한

유로코드에서는 진동을 평가하기 위한 특별한 방법을 제시하고 있지 않으며, 진동을 고려하여 구조설계를 수행해야 한다는 선언적 조항을 통해 진동관련 내용을 포함하고 있다. 또한 설계수준에서 진동을 제한하기 위한 수단으로 처짐을 제한을 고려하고 있다. ❧