

## 건물의 바닥진동에 대한 구조설계기준의 고찰



홍 갑 표\*



이 성 수\*\*

### 1. 서 론

건물의 바닥구조에서 발생하는 진동에 대한 구조설계와 진동평가에 관한 지침은 “진동설계기준”과 “진동평가지침(방법)”으로 구분해 볼 수 있다. “진동설계기준”이라 함은 강구조한계상태설계기준 또는 철골철근콘크리트 구조설계기준과 같은 공식적인 구조설계기준에서 “진동을 고려한 설계를 하여야 한다.” 등의 포괄적인 표현으로 선언적으로 명시되어 있는 기준 조항을 의미한다. 그리고, “진동평가지침(방법)”은 구조설계기준의 해설부분 또는 BS6472 또는 DIN4150과 같은 각국의 표준과 그 외의 평가지침서, 기술서 등에 제시되어 있는 바와 같이, 구체적인 평가방법, 제한치, 표, 수식 등을 이용하여 대상건물의 진동수준을 평가하는 기술지침 또는 방법을 의미한다.

본 원고에서는 국내외의 공식적인 구조관련 법규와 설계기준에 명시되어 있는 “진동설계기준”의 조항을 살펴보고, 국내의 기준에서 진동에 관한 기준 조항을 어떻게 구성할 것인가에 대하여 의견을 제시하고자 한다.

### 2. 국내 법규와 기준에서의 진동설계기준

본 연구에서 검토한 국내의 구조관련 법규와 설계기준은 표 1과 같다. 콘크리트구조설계기준<sup>4)</sup>과 강관구조설계기준(안)<sup>10)</sup>에서는 진동에 관한 조항이 전혀 언급되어

있지 않으며, 건축법규<sup>1)</sup>를 위시한 나머지 8가지 법규 및 기준에서는 건물을 구조설계 함에 있어서 진동을 고려하여 설계하여야 한다는 진동관련 조항을 포함하고 있다.

표 1의 국내 법규 및 설계기준 중에서 진동에 관련한 조항을 명시하고 있는 사항을 정리하면 표 2와 같다.

먼저, 건물의 구조설계에서 가장 상위법인 건축법규<sup>1)</sup>를 살펴보면, 법률로 정한 건축법 제5장 38조에서 “진동에 대하여 안전한 구조”로 하여야 한다고 명시하고 있고, 건설교통부령으로 정한 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙<sup>1,2)</sup>에서는 진동에 대하여 구조내력상 안전한 설계를 하도록 하고 있고, 건물의 사용상에도 지장이 없도록 충분한 강성을 갖게 하도록 하여야 한다고 명시하고 있다. 그리고, 건설교통부의 고시로 발표한 건축물의 구조내력에 관한 기준<sup>1,3)</sup>에서 철골보는 진동으로 인한 장애가 발생하지 않도록 설계하여야 한다고 정하고 있다. 즉, 건축법규·령 등에서는 진동에 대한 건물의 구조적 안전뿐만 아니라 사용성의 문제까지 조문(條文)으로 정하고 있다.

한편, 건물의 구조설계에 관한 여러 가지 설계기준은 건설교통부의 권한과 위임을 받아 주로 대한건축학회에서 제정되었는데, 기준에 제시되어 있는 진동관련 설계기준은 모두 사용성설계를 언급하는 부분에서 처짐과 함께 다루어지고 있다. 강구조 한계상태설계기준,<sup>6)</sup> 강구조 허용응력설계기준,<sup>5)</sup> 철골철근콘크리트 구조계산규준<sup>7)</sup>에서는 불쾌한 진동이 유발되지 않도록 설계해야 한다는 선언적 문구로 기술되어 있고 구체적인 진

\* 연세대학교 건축·도시공학부 건축전공 교수

\*\* 군산대학교 건축공학과 전임강사

동설계 제한사항 또는 지침에 대해서는 해설에서 다루고 있다. 합성테크 바닥구조 설계기준<sup>8)</sup>에서도 “진동장에는 보의 강성부족에 기인하는 경우가 많으므로 주의할 필요가 있다.”로 명시하고 있다. 한편, 냉간성형강 구조설계기준(안) 및 해설<sup>9)</sup>에서는 본문에서 처짐에 관한 조항만 언급할 뿐 진동에 대해서는 전혀 언급되어

있지 않으나, 해설에서 “진동장애의 유무에 대해서도 특히 주의”해야 한다는 설명과 함께 바닥구조의 고유진동수 목표치를 15Hz 또는 20Hz 이상으로 설정하고 있다.

이와 같이, 국내 기준은 모두 포괄적인 선언적 문구로 진동관련 조항을 정하고 있으며, 구조설계에 필요한

표 1 국내 법규 및 구조설계기준에서의 진동관련 조항 여부

참고문헌 Index No.	기 준 명	제정기관	발표년도	진동조항 유무
1	건축법규 제 5장 “건축물의 구조와 재료 ”	법률(국회)	2002 개정	○
2	건축법규 “건축물의 구조기준 등에 관한 규칙”	건설교통부령	2000 개정	○
3	건축법규 “건축물의 구조내력에 관한 기준”	건설교통부 고시	1997 개정	○
4	콘크리트 구조설계기준	한국콘크리트학회	1999	×
5	강구조 허용응력 설계기준(안)	대한건축학회	2000	○
6	강구조한계상태설계기준 및 해설	대한건축학회	1998	○
7	철골·철근콘크리트 구조계산규준	대한건축학회	2000	○
8	합성테크 바닥구조설계기준 및 해설	대한건축학회	1998	○
9	냉간성형강 구조설계기준(안) 및 해설	대한건축학회	1998	△(해설에 언급)
10	강관구조 설계규준(안) 및 시공지침	대한건축학회	1997	×

표 2 국내 법규 및 구조설계기준에 명시된 진동관련 조항원문의 발췌

기 준 명	장·절	진동관련 조항
건축법규	제5장 건축물의 구조 및 재료 제38조 【구조내력 등】	① 건축물은 고정하중·중략·, 기타의 진동 및 충격 등에 대하여 안전한 구조를 가져야 한다.
건축법규 : 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙	제1장 총칙 제4조 【구조설계의 원칙】	① 건축물의 구조설계에 있어서는 …중략… 기타 진동 또는 충격에 대하여 구조내력상 안전하여야 한다.
	제5조 【구조부재의 강성 및 내구성】	① 건축물의 내력부분에는 사용에 지장이 되는 변형이나 진동이 생기지 아니하도록 필요한 강성을 확보하여야 하며, …이하 생략
건축법규 : 건축물의 구조내력에 관한 기준	제2장 하중 및 외력 제9조 【하중 및 외력의 종류】	② 건축물의 구조계한을 할 때에는 …중략…진동· 충격 등에 의한 …중략…영향을 고려하여야 한다.
	제6장 철골구조 제52조 【보】	① 형강보 및 조립보는 …중략… 처짐이나 진동 등의 장애가 생기지 아니하도록 충분한 강성을 확보하여야 한다.
강구조한계상태설계기준	제 2 장 사용성 한계상태 2.4절 처짐, 진동 및 수평변위 2.4.2 진동	(가) 바닥구조는 바다판, 바닥보, 천장 및 칸막이벽의 상하진동으로 불쾌감을 유발하지 않도록 바닥구조의 강성, 고유진동수 및 감쇠효과 등을 고려한 설계를 한다.
강구조 허용응력 설계기준(안)	제 2장 사용성 설계 2.4 처짐, 진동 및 수평변위 2.4.2	(가) 바닥구조는 바다판, 바닥보, 천장 및 칸막이벽의 상하진동으로 불쾌감이 유발되지 않도록 강성, 고유진동수 및 감쇠효과 등을 고려하여 설계한다.
철골철근콘크리트 구조설계기준	제 5장 5.3.4 처짐과 진동	합성슬래브의 처짐과 진동은 건물의 용도에 따라서 적절히 고려하여야 한다.
합성테크 바닥구조 설계기준	제 3장 구조해석 3.5 처짐 및 고유진동수	철골구조의 보가 지지하는 바다판에서 문제시되는 처짐 및 진동장애는 보의 강성부족에 기인하는 경우가 많으므로 주의할 필요가 있다.
냉간성형강 구조설계기준(안) 및 해설	해설 3장 부재설계 해설 3.4 휨재 해설 3.4.5 휨재의 처짐	중략…인간의 주행이나 물품의 반송에 따른 충격에 의한 바닥의 진동장애의 유무에 대해서도 특히 주의해야만 한다. …이하 생략

구체적 제한사항이나 진동설계지침은 해설을 통하여 설명하고 있다.

### 3. 해외 기준에서의 진동설계기준

표 3은 해외의 구조설계기준들 중에서 진동설계기준의 포함여부와 이에 대한 조항을 검토한 해외기준을 정리한 것이다. 구조설계에 관련한 해외 기준은 수 백여 종이 있겠으나, 이중 우리나라에서도 종종 참조되고 있거나, 국제적인 기준으로서 연구과정에서 확보가 용이한 것을 대상으로 하였다.

철근콘크리트조의 극한강도설계법을 다루고 있는 미국의 ACI318 Building Code<sup>11)</sup>와 유럽의 EC2<sup>16)</sup>를 제외하고는 모두 건물의 진동에 관련한 조항을 기준에 포함하고 있다.

각각의 해외 기준에 포함되어 있는 진동관련 조항은 국내 기준에서의 것보다 좀더 구체적인 사항을 본문 조항으로 기술하고 있음을 확인할 수 있는데, 본 원고에는 조항의 원문을 간략히 발췌하여 표 4와 같이 정리하였고, 이에 대한 개괄적인 설명은 다음과 같다. 각 기준의 전문은 해당 자료를 참고하기 바란다.

- ASD<sup>12)</sup>와 LRFD<sup>13)</sup> : 동일한 기관(AISC)에서 제정한 것으로서 유사한 구성과 문구로 작성되어 있다. 보행 또는 다른 진동요소로 인하여 수용하기 어려운 과도한 진동이 유발되는 큰 공간의 보와 거더에 대해서는 진동에 대한 검토가 필요하다고 명시하고 있다.

- UBC<sup>14)</sup> : 본문에는 Deflection(처짐)에 대한 조항만 기술되어 있는데, 이에 대한 HANDBOOK에서 본문 조항에서의 Deflection은 진동에 대한 사용성까지 고려하는 기준이라고 설명을 하고 있다.
- NBC<sup>15)</sup> : “Part 3 Structural Design”에서 바닥진동으로 인하여 사용성에 장애가 없도록 설계해야 한다는 조항과, 기계류나 설비에 의한 지속적인 진동으로 공명과 피로가 우려되는 경우에는 동해석을 해야 한다는 조항을 포함하고 있다.
- EC2,<sup>16)</sup> EC3,<sup>17)</sup> EC4<sup>18)</sup> : 유럽의 Eurocode를 살펴보면 철근콘크리트조의 한계상태설계기준을 정하고 있는 EC2에는 진동에 관련한 조항을 살펴볼 수 없고, 철골조의 한계상태설계기준을 정하고 있는 EC3(BS5950과 동일)의 사용성 한계상태에 관한 기준에서 진동에 관한 설계기준을 다른 기준보다 구체적으로 정하고 있다. 4.1절의 기본조항 부분에서 진동은 거주자의 쾌적성이나 건물의 내용물에 손상을 주어서는 안되며, 마감재나 비구조체에 손상을 야기하지 않도록 해야 한다고 정하고 있다. 그리고, 4.3절의 동적효과에 대한 설계기준에서 구조물의 고유진동수는 가진진동수와 충분히 이격되게 설계되어야 한다고 규정하면서, 그 예로 일반 보행 바닥구조의 고유진동수를 3Hz이상(또는 전체 처짐이 28mm이하)으로 해야 한다거나, 울동가진을 받는 바닥구조는 5Hz(또는 전체 처짐이 10mm이하) 이상으로 해야 한다는 구체적인 제한을 본문기준에서 규정하고 있다. 그리고, 이러한 한계값은 바닥구조에 감쇠 요인이 많은 경우에는 그 값을 완화할 수

표 3 해외 구조설계기준에서의 진동관련 조항 유무

참고문헌 Index No.	국 가	기 준 명	제정기관	발표년도	진동조항 유무
11	미 국	ACI 318-02	ACI	2002	×
12	미 국	ASD	AISC	1989	○
13	미 국	LRFD	AISC		○
14	미 국	UBC	SEA	1997	△(Handbook)
15	캐나다	NBC Part4	NRCC	1995	○
16	유 럽	EC2 (RC 한계상태 설계기준)	CEN	1992	×
17	유 럽	EC3 (철골조 한계상태 설계기준) = BS5950	CEN	1992	○
18	유 럽	EC4 (합성구조의 한계상태 설계기준)	CEN	1994	△
19	영 국	BS 8110-2 : RC-USD	BSI	1985	○
20	영 국	BS 6399-1 : Loading for Buildings	BSI	1996	○
21	일 본	철근콘크리트 구조계산 규준 및 동해설	일본건축학회	1988	○
22	일 본	강구조 한계상태 설계기준	일본건축학회	2002	○

표 4 해외 구조설계기준에 명시된 진동관련 조항원문의 발취

기준명	장·절	진동관련 조항
LRFD	CH. L : Serviceability Design Considerations L3. Deflection, Vibration and Drift	2. Vibration : Vibration shall be considered in designing beams and girders supporting large areas free of partitions or other sources of damping where excessive vibration due to pedestrian traffic or other sources within the building is not acceptable.
ASD	CH. L : Serviceability Design Considerations L3. Deflection, Vibration and Drift	2. Vibration : Beams and girders supporting large open floor areas free of partitions or other sources of damping shall be designed with due regard for vibration
UBC Handbook	Section 1613 - Deflection	The UBC limits the deflections of structural members in this section for two reasons : · To limit cracking of plaster ceilings. · To provide for serviceability and usability of the floor systems 이하 생략
NBC	Part 4 : Structural Design S.4.1. Structural Loads and Procedures 4.1.1.6. Vibration	1) Floor systems susceptible to vibrations shall be designed so that there will be no significant adverse effects on the intended occupancy of the building from vibrations.
	4.1.10.5. Vibrations and Impact of Machinery and Equipment	1) Where vibration effects, such as resonance and fatigue resulting from machinery or equipment, are likely to be significant, a dynamic analysis shall be carried out.
EC3	2. Basis of Design 2.2 Definitions and Classifications 2.2.1 Limit States	(6) Serviceability limit states which may require consideration include : …중략… vibration which causes discomfort to people, damage to the building or its contents, or which limits its functional effectiveness.
	4. Serviceability Limit States 4.1 Basis	(1) Serviceability limits states for steelwork are …중략… vibration, oscillation or sway which causes discomfort to the occupants of a building or damage to its contents. …중략… vibration, oscillation or sway which causes damage to finishes or non-structural elements. …중략…
	4.3 Dynamic Effects 4.3.1 Requirements	(1) Suitable provisions shall be made in the design for the effects of imposed loads which can induce vibration, etc. (2) …중략… vibration caused by machines and oscillation caused by harmonic resonance (3) The natural frequencies of structures or parts of structures should be sufficiently different from those of the excitation source to avoid resonance.
	4.3.2 Structures open to the public	(2) In the case of floors over which people walk regularly, …중략… 3Hz. This condition will be satisfied if the instantaneous total deflection $\delta_1 + \delta_2$ is less than 28mm. This limits may be relaxed where justified by high damping values. (3) In the case of a floor which is jumped or danced …중략… 5Hz …중략… 10mm.
EC4	5. Serviceability Limit State 5.1 General	(1) 중략 … Other limit states(such as vibration) may be of importance in particular structures but these are not covered in this Part of Eurocode 4.
BS 8110-2	S3. Serviceability Calculations 3.2 Serviceability Limit States	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.
BS 6399-1	9. Dynamic Loading 9.2 Synchronized Dynamic Crowd Loads	9.2.1 General : …중략… the structure should be designed either (1) to withstand the anticipated dynamic loads(see 9.2.2), (2) by avoiding significant resonance effects(see 9.2.3) 이하 생략
일본, 철근콘크리트 구조계산 규준 및 동해설	13조 床슬라브	床슬라브의 厚さは…중략… 表8に示す値の1.1倍以上, かつ10cm以上とする.この制限に従わない場合は…중략… 振動障害を生じないことを確認する.
일본, 강구조한계상태설계기준·동해설	8.2 振 動	(1) よりはは, 床および井などの仕上材を含めて振動による不快感が生じないように, 剛性,固有振動数,減衰などを検討する.

있다고 함께 설명하고 있다. 한편, SRC조의 한계상태설계기준을 정하고 있는 EC4에서는 진동과 같은 기타의 사용성 한계상태도 중요하지만 이에 대해서는 EC4에서 포함하지 않는다고 본문으로 명시하고 있다.

- BS8110-2,<sup>19)</sup> BS6399-1,<sup>20)</sup> BS5950<sup>17)</sup> : BS8110-2는 철근콘크리트구조에 대한 한계상태설계기준으로서 사용성한계상태를 규정하는 3.2절에서, 사람이나 기계로 인하여 거주자에게 불쾌감이나 관심을 불러일으키는 과도한 진동이 발생하지 않도록 해야 한다고 규정하고 있다. BS6399-1은 하중기준에 관한 것으로서 동적하중에 대하여 9장 전체에서 자세한 설명과 규정을 하고 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 부록A(Dynamic loads for dancing and jumping)을 통하여 구체적인 설계지침을 제시하고 있다. 한편, BS5950은 EC3과 동일하다.
- 철근콘크리트 구조계산규준·동해설<sup>21)</sup> : “4章 部材の算定 : 13조 床スラブ”에서 철근경량콘크리트조 슬래브에 대해서는 규준에서 정하고 있는 값 이상의 두께로 슬래브를 설계해야 하고, 그렇지 아니한 경우는 진동장애가 생기지 않는지를 확인하여야 한다고 정하고 있다. 해설부분을 살펴보면, 최근에 들어 슬래브의 강성부족으로 인하여 처짐과 진동장애가 다수 보고되고 있고, 이러한 상황에서 이에 대한 실험연구가 다수 실시되어서, 그 결과로부터 처짐과 진동장애를 방지할 수 있는 슬래브두께의 제한치를 설정하여 기준의 조항으로 제정한 것이라고 기술하고 있다. 그리고, 슬래브의 진동장애와 이에 대한 평가방법에 대해서는 부록 11에 자세한 설명을 두고 있다.
- 일본, 강구조한계상태설계규준·동해설<sup>22)</sup> : 본문의 8.2절 (2)항에서 “보는 슬래브와 천장의 마감재를 포함하여 진동으로 인한 불쾌감이 생기지 않도록 강성, 고유진동수, 감쇠비등을 검토한다”로 명시되어 있다. 다른 기준과의 특이점은 마감재를 포함하여 검토하도록 규정하고 있다는 점이다. 해설에서 진동평가방법을 제시하고 있는데, NBC<sup>15)</sup> 기준에서의 진동평가식과 함께 감쇠비를 기준으로 한 평가식을 만족하도록 해야 한다고 설명하고 있다.

## 4. 국내외 진동설계기준의 특성 비교

### 4.1 구조설계기준의 본문 조항 비교

구조설계기준의 본문은 건물의 구조를 설계함에 있어서 기본적으로 지켜야하는 최소한의 필수적·규제적인 조항이고, 해설(Commentaries)은 본문 조항에 대한 기술적인 배경이나 정보, 또는 엔지니어의 판단과 필요에 따라 응용할 수 있는 대안기술에 해당한다.

먼저, 국내외 구조설계기준에서 진동에 관련한 본문을 비교해 보면 국내기준에서는 진동을 고려하여 설계를 하여야 한다는 일반적인 선언적 문구로 되어 있다. 해외기준의 경우에서도 우리의 것과 같은 문구로 되어 있는 것이 일반적이지만, 몇 가지 기준<sup>14),15),21)</sup>에 있어서는 처짐과 함께 연계되어서 슬래브의 두께가 기준에서 제한하는 값보다 작은 경우에는 진동장애를 고려하여야 한다는 문구로 되어 있는 경우가 있다. 해외의 이러한 기준에서는 슬래브 최소두께의 제한이 처짐과 바닥진동으로 인한 각종 문제에 대하여 다수의 연구를 시행하여 종합적인 결과로부터 처짐뿐만 아니라 진동장애까지 고려하는 값으로 정해진 것이라고 해설에서 설명하고 있다.

우리나라 기준에도 슬래브의 최소두께에 관한 기준이 있으나, 해설에서는 처짐에 관련된 것으로만 설명되고 있다. 슬래브의 최소두께를 진동기준에 까지 적용하기 위해서는 슬래브의 두께 또는 휨강성을 변수로 한 진동연구가 다수 시행되어서 신뢰할 수 있는 범위에서 바닥판의 진동특성이 검증되어야 한다. 현재, 우리나라의 경우는 바닥진동에 대한 문제가 다수 제기되고 있는 단계이기는 하지만 바닥진동에 관련한 연구가 많지는 않은 상황이다. 따라서, 기준에서 정하고 있는 슬래브의 최소두께를 진동에도 같이 적용시키기 위해서는 향후에 이에 관련한 연구가 충분히 진행되어야 할 것이다. 한편, 슬래브 두께가 기준에서의 최소값을 만족한다 하더라도 진동장애가 우려되는 특수한 경우에 있어서는 엔지니어의 판단에 의하여 바닥진동을 평가해야 하는 것은 당연한 일이다.

그리고, 해외기준에서 참조해야 할 다른 한가지는 지속적인 반복진동에 의하여 공진과 피로가 우려되는 경우에 대한 것이다. 국내기준에서는 이에 대하여 본문과 해설에서 특별한 조항이나 해설을 두고 있지 않으나 NBC,<sup>15)</sup> EC3,<sup>17)</sup> BS6399-1<sup>20)</sup>에서는 본문의 조항에서 그러한 경우에는 동해석을 수행하도록 정하고 있다. 바닥진동의 평가방법에 이미 진동의 공진 효과가 포함되

어 있다고 하여도 이는 약산 평가방법이므로 필요한 경우에는 국부적인 동해석이 필요하다고 할 수 있다.

한편, 일본의 강구조한계상태설계기준에서는 진동평가 시에 바닥과 천장의 마감재를 고려하도록 명시한 것이 다른 기준과 특이한 사항이다.

#### 4.2 구조설계기준의 해설 비교

국내외 구조설계기준에서 진동에 관련한 기준의 해설을 간략히 정리하면 표 5와 같다. 해설의 전문은 해당자료 참조 바란다.

먼저, 국내기준에서의 해설을 살펴보면 진동을 고려하는 구조설계 또는 진동평가의 대안으로 주로 바닥판의 고유진동수를 평가하는 방법을 제시하고 있다. 그런데, 각각의 해설에서 권장하고 있는 바닥판의 최소 고유진동수는 3Hz,<sup>6)</sup> 5Hz,<sup>7)</sup> 15Hz<sup>8)</sup> 또는 20Hz<sup>9)</sup>로 제각기 다른 값으로 정하고 있으며, 이에 대한 기술적 배경이 기술되어 있지 않거나 해외기준 또는 진동관련 기술서를 인용하고 있다. 합성데크 바닥구조설계기준<sup>8)</sup>과 냉간성형강 구조설계기준(안)<sup>9)</sup>에서는 해설에서 지정한 고유진동수의 출처가 기술되어 있지 않으며, 강구조한계상태기준<sup>6)</sup>에서는 CEN EC3/1<sup>17)</sup>과 Allen & Murray의 연구논문<sup>26)</sup>을 인용하고 있고, 철골철근콘크리트 구조설계기준<sup>7)</sup>에서는 캐나다의 CAN3 S16.1<sup>23)</sup>을 인용하고 있다. 한편, 국내 각 기준에서의 진동설계지침 또는 진동평가방법에서 진동평가곡선을 이용하는 방법은 CAN3 S16.1을 인용하고 있는 철골철근콘크리트 구조설계기준에만 제시되어 있고, 나머지 기준의 해설에서는 고유진동수의 제한만으로 진동을 고려한 설계를 설명하고 있다.

해외기준에서의 진동에 관련한 해설은 국내기준에서의 것보다 훨씬 구체적이고 자국의 연구결과에 기초하여 기술되어 있음을 확인할 수 있다.

일본의 철근콘크리트 구조계산 기준 및 동해설<sup>21)</sup>에서는 슬래브의 최소두께가 진동장애의 문제까지 고려된 것으로 해설하고 있으며 별도로 부록 11을 두어서 슬래브의 진동평가에 대한 구체적인 방법을 설명하고 있다. 부록 11에서는 진동평가곡선으로 진동수준을 평가하는 방법을 제시하고 있는데, 이는 ISO 2631/2-1985<sup>24)</sup>를 기본으로 하되 이에 대한 보충연구를 통하여 환경계수 1, 2, 4, 8을 설정한 평가방법이다. 환경계수는 일본의 연구진에 의하여 일본의 상황에 맞게 그 당시에는 타당한 값으로 정한 것이지만 차후의 연구에 의하

여 변경될 수 있음을 함께 기술하고 있다. 그리고, 부록 11에는 판진동식으로 바닥판의 고유진동수를 구하는 방법과 진동가속도를 구하는 방법을 설명하고 있다.

한편, 일본에서는 건물의 진동에 대하여 해외의 여러 진동평가기준을 종합적으로 연구하여서 1991년도에 자국의 조건에 맞는 “건축물의 진동에 관한 거주성능 평가지침”<sup>25)</sup>을 제정한 바 있다.

일본의 강구조한계상태설계기준<sup>22)</sup>에서는 NBC<sup>15)</sup>에서의 진동평가식과 감쇠비를 기준으로 한 평가식을 만족해야 한다고 해설에서 정하고 있다.

미국의 ASD<sup>12)</sup>에서는 진동기준에 대하여 비교적 간단한 해설을 하고 있으나 LRFD<sup>13)</sup>에서는 보다 구체적인 해설을 두고 있다. LRFD의 해설에서는 특기할 내용이 두가지 있다.

하나는, 일본의 철근콘크리트 구조계산 기준<sup>21)</sup>과 NBC<sup>15)</sup>의 해설에서는 슬래브의 최소두께 규정을 준수하면 일반적인 건물의 바닥진동도 해소될 수 있다고 설명하고 있으나, LRFD<sup>13)</sup>에서는 이러한 방법이 예전에는 가능하였으나 현재는 고강도재료와 효율적 구조계획으로 인하여 최소두께 이상의 슬래브에서도 바닥진동의 문제가 유발될 수 있다는 상반된 내용을 기술하고 있다는 것이다.

다른 하나는, 건물의 내부에 있는 칸막이벽이나 기타 시설물들로 인한 감쇠요인이 보행으로 인한 과도진동과 같은 것에 효과적인 것으로 설명하고 있다. LRFD의 “Beam and Girder Design”에서 Murray의 연구발표<sup>27)</sup>에 기초한 바닥구조의 진동평가 방법을 제시하고 있는데 이 방법은 바닥구조의 감쇠비가 계산식으로 구한 값보다 크게 되어야 한다는 것이다. 그리고, 기계류 또는 설비 등에 의하여 지속적으로 작용하는 연속진동에 대해서는 감쇠에 의한 방법보다는 근본적인 방진대책으로 설계할 것을 권하고 있다.

NBC<sup>15)</sup>는 다른 기준에 비하여 진동에 대한 해설을 자세히 다루고 있다. NBC 역시 일본의 철근콘크리트 구조계산기준<sup>21)</sup>처럼 보행이나 충격에 의한 과도진동은 일반적인 건물의 경우 치짐제한으로 조정될 수 있고, 지속적인 기계류의 진동에 대해서는 특별한 설계지침이 필요하다고 기술하고 있다. 그리고, 바닥진동의 평가기준을 거주자의 동작 상태별로 중력가속도의 0.4%~7%의 한계가속도로 정하고 있는데, 이러한 방법은 Allen의 몇가지 연구<sup>28)~30)</sup>에 기초한 것이다.

그 외로, EC2, EC3, EC4와 BS8110, BS5950에서는 해설을 두고 있지 않으므로 이들 기준에 대한 해설의 분석은 생략한다.

표 5 국내외 구조설계기준에서의 진동관련 기준과 해설 요약

설계기준	기준 본문	해설
한국 : 강구조 한계상태 설계기준	진동에 대하여 고려하여야 한다는 선언적 표현	CEN EC3/1과 Allen & Murray의 제안식을 인용하여 바닥판의 고유진동수가 최소값 이상이 되도록 함. 바닥판의 고유진동수 계산식으로 보진동식 제시.
한국 : 강구조허용응력설계기준(안)	상동	-
한국 : 철골철근콘크리트 구조설계기준	상동	바닥판의 고유진동수는 5Hz 또는 8Hz 이상 요구. 진동평가기준으로 CAN3 S16.1에서의 평가곡선을 인용하고 있음. 바닥판의 고유진동수 계산식(단순보)과 보행진동에 의한 진동가속도 예측식 제시.
한국 : 합성데크 바닥구조 설계기준	상동	합성슬래브의 고유진동수를 15Hz 이상으로 정하고, 1방향슬래브의 고유진동수 계산식으로 지지단의 종류별 보진동식을 제시함.
한국 : 냉간성형강 구조설계기준(안) 및 해설	진동에 관한 언급 없음.	바닥의 고유진동수로 15Hz(목조)와 20Hz(RC) 이상을 권함. 고유진동수 계산식으로 단순보의 진동식을 제시함.
일본 : 강구조 한계상태설계기준	바닥과 천장의 마감재를 고려하여 진동검토하도록 함.	캐나다의 NBC 기준에 소개된 진동평가식과 감쇠비를 기준으로 한 평가식을 제시함. 두 조건을 만족하도록 규정하고 있음.
일본 : 철근콘크리트 구조계산 기준 및 동해설	기준의 본문에서 정하고 있는 일정두께 이상의 슬래브가 아닌 경우에는 진동장해를 확인하도록 정하고 있음.	치짐과 진동장해를 해소할 수 있는 슬래브의 두께를 본문에서 규정하고 있고, 이 표는 일본의 누적된 연구결과를 종합하여 정한 것으로 해설함. 그 외로 진동장해가 있는 경우의 진동평가를 위하여 별도로 부록을 두어 바닥슬래브의 진동평가에 대하여 상세히 기술하고 있음. 부록의 진동평가는 ISO 2631/2-1985를 기본으로 하고, 장방형 슬래브의 진동수와 진폭 계산과정을 소개하고 있음.
미국 : ASD	칸막이벽이나 감쇠요소가 없는 대공간의 철골보는 진동을 고려하여 설계되어야 하는 것으로 기술함.	진동의 인지는 구조물의 고유진동수와 감쇠효과에 영향을 받음. 진동평가에 대해 유용한 계산적 모델(Murray-1975)이 있으나 주관적인 한계가 있다고 함. 칸막이벽이나 감쇠요소가 없는 대공간의 철골보가 보행에 의한 과도진동을 줄이기 위해서는 보춤이 스패의 1/20 이상이어야 함을 권함.
미국 : UBC	치짐	UBC에서의 치짐제한은 진동장애의 해소를 위해서도 필요하다고 해설함.
캐나다 : NBC Part4	일반사항으로 거주자가 진동으로 인하여 유해한 영향을 받지 않도록 바닥구조를 설계해야 함과 함께 다른 조항에서 기계류의 작동에 의한 공진이나 피로가 우려되는 경우는 동해석을 수행하도록 정하고 있음.	치짐에 대해서는 1쪽의 해설을 하고 있으나 진동에 대해서는 5쪽에 이르는 자세한 해설을 두고 있음. 보행이나 충격에 의한 과도진동은 일반적인 건물의 경우 치짐제한으로 조정될 수 있고, 지속적인 기계류의 진동에 대해서는 특별한 설계치짐이 필요하다고 기술하고 있음. 그리고, 인간의 여러 가지 동작으로 인한 동적하중을 제시하고 있으며, 주기적 인간동작으로 인한 진동에 대하여 거주자의 상태별로 수용할 수 있는 한계가속도를 중력가속도의 0.4~7%로 제시하고 있음. 이 값을 이용하여 바닥판의 고유진동수가 가진력의 주기보다 큰 값이 되는 지를 확인하여 진동에 대응하는 바닥설계를 하게 됨.

5. 국내 진동설계기준(안)의 개발 방향에 대한 의견

이상으로 국내의 공식적인 구조관련 법규와 설계기준에 명시되어 있는 “진동설계기준”의 조항과 해설을 살펴보고, 다음과 같은 분석의견을 제시한다.

가. 진동설계기준의 구체적 표현과 제한기준의 설정 : 진동이 우려되는 상황에 대하여 이에 대응하는 설계를 하도록 하는 설계기준이 명시되어야 하는 것은 당연하다. 현재 우리나라의 몇 가지 구조관련 법규와 기준에도 진동관련 기준이 있기는 하지만, 진동에 대하여 사용성 또는 구조내력에 위해가 없도록 설계해야 한다는 포괄적 선언문으로 규정되

어 있고, 그러한 설계를 할 수 있도록 하는 구체적인 제한기준이나 설계기준은 해외기준이나 기술지침서를 인용하여 해설부분에 제시하고 있다. 그러나, 해외기준은 기준의 적용범위나 한계값 등에 관한 구체적인 표현이 본문의 조항으로 명시되어 있는 경우가 상당수이고, 수많은 연구로부터 도출된 설계치침이나 평가방법을 해설에 수록하고 있다. 현재 우리나라에서는 건물의 진동에 관한 체계적인 연구가 충분하지 못한 상태이므로 진동설계기준을 막연히 포괄적인 선언으로 하고 있으나, 향후로는 건물의 진동에 관한 충분한 검토와 체계적인 연구의 결과를 종합한 후에 우리 조건에 맞는 구체적인 진동설계기준을 설정하여야 할 것이다.

나. 처짐제한에 의한 진동사용성의 확보 : 국내 기준에서의 최소 슬래브두께 또는 스펠비로 표시되는 처짐제한 등은 처짐에 대한 사용성을 확보하기 위한 것으로만 설정되어 있으나, 해외기준을 살펴보면 일반적인 건물의 설계에 있어서 이들 제한값 이상으로 설계하면 처짐뿐만 아니라 바닥진동에 대한 사용성까지도 확보되는 것으로 기준에서 정하고 있다. 그리고, 이는 바닥구조의 처짐과 진동에 관한 수많은 연구결과로부터 이와 같이 정한다고 해설에서 설명하고 있다. 한편, LRFD에서는 이와 반대로 예전에는 스펠비로 표시되는 처짐제한을 준수하면 진동사용성도 같이 해소될 수 있었으나 현대에 와서는 처짐제한의 준수한다 하여도 진동사용성이 해소되지 않을 수 있으므로 진동에 대한 검토가 필요하다고 해설하고 있다.

진동과 처짐은 바닥구조의 강성에 영향을 받은 것으로서 유사한 기준으로 같이 평가될 수 있는 사항이므로 이에 대한 보완연구가 수반되어 처짐과 진동의 상관관계를 보정할 수 있다면, 일반적인 건물에 있어서는 복잡한 진동해석의 과정을 거치지 않고 처짐제한이나 최소슬래브 두께의 규정으로 처짐과 진동에 관한 설계기준을 확보할 수도 있다.

다. 진동에 대한 사용성과 안전성 기준 : 건축법규에는 진동에 대하여 사용성과 안전성을 확보하여야 한다고 명시하고 있으나, 하위법에 해당하는 우리나라의 몇 가지 구조설계기준에서는 사용성에 관한 조항만을 명시하고 있는 것이 대부분이다. 충격진동 또는 주기적인 진동은 불쾌감이나 작업성 저하와 같은 사용성 외에도 내외장재의 손상, 피로에 의한 구조내력의 열화, 접합부의 이완 및 공진에 의한 구조물의 손상 등과 같은 문제를 야기할 수 있으므로 구조적 안전성에 관한 사항도 설계기준에 명시될 필요가 있다. 즉, 진동의 공진 효과에 관한 검토 또는 동적해석의 필요성 등을 기준에 명시할 필요가 있다.

라. 진동설계기준 또는 제한기준의 기술적 배경 : 진동 관련 조항을 제시하고 있는 국내 구조설계기준 중 몇 가지는 진동기준의 기술적 배경이나 참고문헌의 표기가 없는 것이 있다. 진동설계기준을 참조하고자 하는 이에게 설계지침을 제시하기 위해서는 해설을 통하여 기술적 배경을 설명하거나 관련된 참고문헌을 충분히 명시할 필요가 있다.

마. 바닥진동의 제한기준 또는 평가지침 : 현재의 국내

기준에는 해설부분에서 아무런 타당성이나 설명 없이 해외의 설계기준이나 평가지침을 소개하고 있다. 국내 조건에 대한 건물의 진동인지 연구를 통하여 바닥진동의 제한기준이나 평가곡선, 평가식 등을 설정하여 국내 조건에 맞는 바닥진동의 제한 기준 또는 평가지침을 설정하여야 한다.

바. 철근콘크리트 구조설계기준에도 진동기준 설정 : 바닥진동은 철근콘크리트조보다 철골조에서 주로 문제시 된다고 알려져 있다. 철골조는 철근콘크리트조에 비하여 슬래브의 유효두께가 얇고, 슬래브를 지지하는 보의 강성이 약하고, 스펠이 길기 때문에 진동에 취약하다고 할 수 있다. 그러나, 철골조나 철근콘크리트조 모두 슬래브는 주로 철근콘크리트로 구성되고, 철근콘크리트의 기술이 발전함에 따라 철근콘크리트조 부재의 단면이 작아지고 스펠도 길어지고 있다. 그리고, 부재의 강성이 적당히 설계되었다고 하여도 건물의 내부에서 기계 또는 사람에 의하여 반복 가진력이 작용하게 되면 진동문제는 야기될 수 밖에 없다. 따라서, 철근콘크리트조의 구조설계기준에도 진동에 관련한 조항이 포함되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- 1~10. 본문의 표 1 참조
- 11~22. 본문의 표 2 참조
23. CAN/CSA-S16.1-M89, Appendix G, "Guide for Floor Vibrations", *Limit States Design of Steel Structures*, 1989. 12
24. ISO 2631-2/1985, "Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration - Part2 : Continuous and Shock-Induced Vibration in Buildings(1 to 80 Hz)", ISO, 1985
25. 일본건축학회, "건축물의 진동에 관한 거주성능평가지침 동해설", 일본건축학회, 1991
26. D. E. Allen, T. M. Murray, "Design Criterion for Vibration Due to Walking", *AISC, Engineering Journal*, 4th Qtr., 1993
27. T. M. Murray, "Building Floor Vibrations", Proceedings of the 1991 National Steel Construction conference, AISC, Chicago, 1991
28. D. E. Allen, J. H. Rainer and G. Pernica, "Vibration Criteria for Assembly Occupancies", Canadian



*Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 3, 1985. 9  
29. D. E. Allen, "Floor Vibrations from Aerobics",  
*Can. J. Civ. Eng.*, 1990. 10

30. D. E. Allen, "Vibrations from Human Activities",  
*Concrete International - Design and Construction*,  
ACI, 1990. 6 