

TSC합성구조 바닥판의 진동에 대한 사용성 평가

Evaluation of Serviceability for Floor Vibration Using TSC Composite System

○ 김도훈* 서동기* 김성배** 김상모*** 이창남****
Kim, Do-Hoon Seo, Dong-Gee Kim, Sung-Bae Kim, Sang-Mo Lee, Chang-Nam

Abstract

Recently, Building floors are being larger and longer. This is contributed from the development of new design methods and high strength and light weight materials. However, as such longer span floor systems may provide less damping, and have longer period. Therefore, the vibration problem of buildings has become more important.

In this research, floor vibration, natural frequency and damping ratio using TSC(T-type Steel Composite beam) composite system were measured by experiments and foreign criteria for serviceability evaluations were applied with responses obtained by walking and heel drop loads.

The purpose of this study is to evaluate the serviceability for floor vibration according to the peak acceleration and natural frequency in TSC composite slabs.

키워드 : 사용성, 바닥진동, 고유진동수, 감쇠율, TSC 보

Keywords : Serviceability, Floor Vibration, Natural Frequency, Damping Ratio, TSC(T-type Steel Composite) Beam

1. 서론

1.1 실험의 목적

최근 건축 구조물은 설계기술의 발전과 고강도 재료의 발달로 바닥구조가 장스팬화, 대공간화 되고 있다. 그러나 이러한 장스팬, 대공간 구조 시스템은 감쇠비(damping), 진동수(frequency) 등의 감소를 초래하고, 인간 활동에 의한 바닥판 진동이 사용성평가 측면에서 중요한 문제로 대두되고 있다. 또한 바닥부재 설계시 구조 기준에서 규정하는 하중에 대한 강도를 기초로 하는 설계는 실무자들이 익숙하지만, 거주자의 보행 등과 같은 동적하중에 대한 사용성에 설계는 기준비율로 잘 이루어지지 않고 있다.

선진외국에는 AISC Design Guide Series11(1997), CSA(1989), ISO 2631-2(1989), BS 6472 (1984), DIN 4150/2(1975), 일본건축학회기준(1991) 등 각 국의 건설 문화적 배경과 거주자의 심리적, 감각적 특성을 고려한 규준을 마련하여 진동원의 종류나 건물의 용도별로 진동 제한치를 규정하고 있다. 국내에서는 1998년 대한건축학회에서 발간한 “강구조 한계상태 설계 및 해설”에 진동을

고려하여야 한다는 수직진동의 사용성에 관한 포괄적 개념의 기준이 도입되었다. 위 기준의 바닥진동 평가나 이를 고려한 구조설계에 관한 실무적 세부사항은 해설부분에서 유럽의 CEN EC 3/1 기준과 Allen과 Murray의 “Design Criterion for Vibration Due to Walking”(1993)을 인용하여 설명하고 있다.

최근 국내에서도 사용성문제가 이슈화 되면서 철골조 바닥판의 진동에 관한 실험과 평가가 이루어지고 있다. 그러나 이러한 평가는 기존 철골조 건축물을 대상으로 하는 것으로 복합구조 또는 합성구조에 대한 평가는 아직 없는 상태이다.

이에 본 논문에서는 합성보 개념의 TSC구조를 이용하여 설계한 건물바닥판의 고유진동수와 보행하중에 의한 응답을 측정하여 사용성을 평가하였다.

1.2 TSC구조의 개념

TSC(T-type Steel Composite beam) 합성보는 그림 1과 같이 하부 강판과 양측 면에 C, Z 등의 형태로 접은 강판이나 기성재의 형상을 용접 또는 볼트 집합하여 구성한다. 즉 시공 시 거푸집의 기능과 인장재 역할을 극대화함으로써 휨 강성을 증가시킨 보로 기존 철근콘크리트 보를 강판으로 감싼 구조형상이다.

* 정회원, (주) 센구조 연구소, 공학석사

** 정회원, (주) 센구조 연구소, 연구개발팀장, 공학박사

*** 정회원, (주) 센구조 연구소, 부장, 구조기술사

**** 정회원, (주) 센구조 연구소, 대표이사, 구조기술사

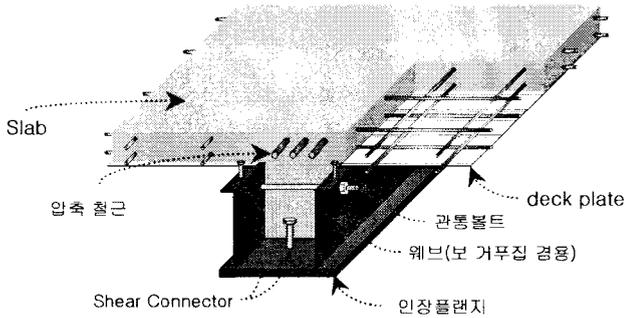


그림 1. TSC 구조의 개념

2. 진동측정

2.1 실험장비

진동측정을 위해 사용한 장비는 동적 신호 분석기와 서브 가속도계 센서이며 각 장비의 특징은 표 1과 같다.

표 1. 진동측정 장비의 제원

장비명	모델명	특징
동적 신호 분석기	EDX-1500A	동적 신호 측정 채널 : 4개 Sampling Data : 10kHz 최대 입력 Voltage : $\pm 30V$ 용량 : 40MB 하드 내장
센서	서브 가속도계	가속도계 전적출력 : 5V 응답주파수 범위 : C-100Hz 정적부하 : 1g

2.2 실험방법

보행하중에 의한 바닥판의 응답 측정은 하중이 바닥판 중앙부에 위치할 때 처짐의 영향이 가장 커지므로, 보행하중 실험은 몸무게 70kg의 사람이 중앙부에 설치된 센서를 바라보며 대각선 방향으로 이동하여 바닥판에 보행하중을 가진 하였다. 보행자는 메트로놈을 이용하여 보조를 맞추고, 보폭은 약 75cm, 속도는 1.5m/s, 진동수 2Hz를 유지하도록 하였다.

그림 2는 보행하중에 의한 실험모습이다. 뒷꿈치 충격에 의한 실험은 바닥판 감쇠율 측정을 위해 시행되었고, 뒷꿈치를 바닥에서 5cm 정도 띄운 다음 자유 낙하하여 그림 3과 같이 바닥판에 하중을 가하였다.



그림 2. 보행하중에 의한 실험전경



그림 3. 뒷꿈치 충격에 의한 실험전경

2.3 실험 대상건물의 개요

실험대상 건물은 TSC보를 이용한 지하3층~지상12층의 건물 A와 지하1층~지상15층의 건물 B, 그리고 지하1층~지상 5층의 건물 C이다.

건물 A는 기존의 철근콘크리트 건물을 증축한 것이고, 건물 B와 C는 신축건물이다. 각 건물들의 일반사항은 표 2에 나타내었고, 구조평면도는 그림 4, 5, 6과 같다. 측정 바닥판은 구조평면도에 빗금으로 표시하였다.

표 2. 대상건물의 일반사항

건물	구조 형식	f_{ck} (kgf/cm ²)	바닥판 크기 (m ²)	슬래브 측정위치	슬래브두께 (mm)
A	TSC 구조	240	13.1 × 6.0	지상 2층	120
B	TSC 구조	270	8.7 × 7.8	지상 3층	150
C	TSC 구조	240	15.3 × 5.1	지상 2층	150

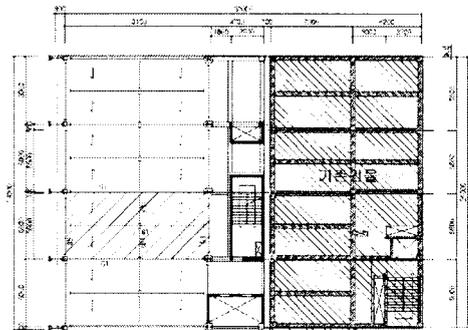


그림 4. 건물 A의 구조평면도

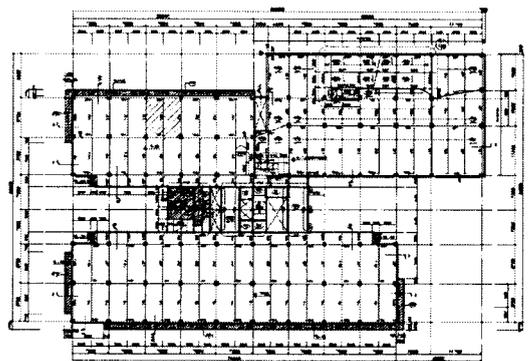


그림 5. 건물 B의 구조평면도

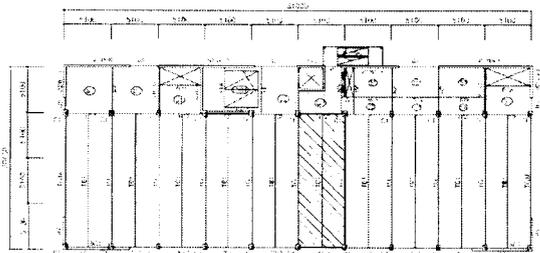


그림 6. 건물 C의 구조평면도

3. 실험결과

3.1 감쇠율 측정

바닥판의 감쇠율은 뒷꿈치 충격으로부터 얻은 바닥판 응답파의 진폭을 측정하고 일반적으로 많이 사용하는 대수 감쇠법(Logarithmic Decrement Method)에 의하여 계산하였다. 대수 감쇠법에 의한 감쇠율의 산정은 식(1)과 같다. 그러나 건축 구조물의 감쇠율(ξ)은 대부분이 0.1 미만이므로, 식(2)와 같이 근사화 시킬 수 있다. 이 때 식(2)를 이용하여 구한 건물 A, B, C의 감쇠율은 1.88, 2.38, 4.45(%)로 표 3에 기록하였다.

$$\text{대수감쇠율}(\delta) = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad \text{식(1)}$$

여기서, ξ : 감쇠율

$x_{i,(i+1)}$: 자유진동 응답 파형에서의 $i(i+1)$ 차 진폭

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} \quad \text{식(2)}$$

3.2 보행하중에 의한 응답

그림 7과 8은 보행하중에 의한 건물 A 바닥판의 가속도 응답과 FFT응답이다. 그 밖의 건물 B와 C도 이와 동일한 방법으로 응답을 통해 고유진동수, 최대가속도를 구할 수 있다. 이렇게 구한 값을 표 3에 정리하였다.

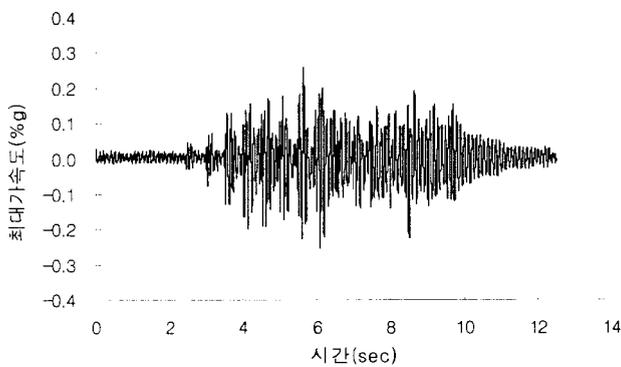


그림 7. 건물 A의 가속도 응답

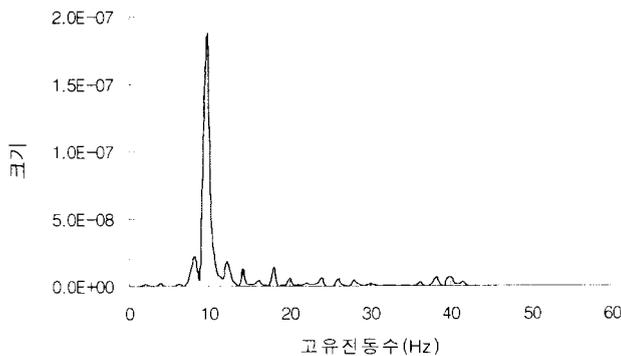


그림 8. 건물 A의 FFT응답

표 3. 각건물의 감쇠율, 고유진동수 및 최대가속도

건물	감쇠율(%)	고유진동수(Hz)	최대가속도(%g)
A	1.88	9.76	0.25
B	2.38	12.69	0.34
C	4.45	7.81	0.28

4. 수직진동에 대한 사용성평가

4.1 사용성평가 기준

수직진동에 관한 바닥판의 사용성 평가는 국내에서 가장 널리 사용되는 AISC Design Guide Series11(1997)과 일본 건축학회 기준(1991), 그리고 DIN 4150/2(1986)을 적용하였다. 각 기준의 평가방법은 다음과 같다.

(1) AISC Design Guide Series11(1997)

AISC Design Guide Series11은 철골조 바닥시스템에서 사용자의 활동에 따라 진동을 평가하는 방법이다. 평가방법은 Allen과 Murray(1997)가 충격가속도에 대한 최대 가속도의 비를 이용하여 동적기준과 9Hz가 넘는 고유진동수를 가지는 바닥판에 대해 1kN/mm의 집중하중에서 최소 강성 이상을 요구하는 기준을 제안하였다. 이는 바닥슬래브의 고유진동수가 큰 경우 보행에 의한 공진 현상보다는 반복되는 하중에 의한 정적 처짐의 영향이 크기 때문이다.

$$\text{동적기준} : \frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35f_n)}{\beta W} \leq \frac{a_0}{g} \quad \text{식(3)}$$

f_n : 구조체의 고유진동수, β : 감쇠비
 W : 바닥 시스템의 등가 질량의 중량, P_0 : 하중

$$\text{강성기준} : k_{floor} = \frac{1.0}{\Delta} > 1\text{kN/mm} \quad \text{식(4)}$$

Δ : 전체 처짐 ($= \Delta_b + \Delta_g/2$),
 Δ_b : 집중하중에 의한 작은보의 처짐
 Δ_g : 집중하중에 의한 큰보의 처짐

(2) 일본 건축학회 기준(1991)

일본 건축학회 기준(1991)은 건축물 바닥에 발생하는 수직진동을 평가하는 경우에 적용된다. 진동에 관한 거주성평가는 바닥 응답파형으로부터 구한 진동수, 진동진폭, 감쇠비를 조합하는 것으로 시행한다. 또한 진동종별 및 건축물의 용도별로 3단계의 성능평가를 하며 등급 II는 권장치로 사용되고, 등급 III은 제한치이다.

(3) DIN 4150/2(1986)

DIN 4150/2는 1~80Hz 진동수 범위의 외부 진동원이 인체에 미치는 진동영향을 평가한다. 측정된 진동량(변위, 속도, 가속도)을 이용하여 경험적으로 유도된 인지강도(KB)치를 구한다. 이 때 구한 인지강도 값을 이용하여, 건물의 용도, 진동의 발생빈도, 영향의 지속시간, 주야의

구분에 따라 규준에서 제시한 허용 값과 비교하여 판단한다. 기준은 상업지역의 경우 연속진동에 대해 낮에는 인지강도가 0.4, 밤에는 0.3을 넘지 못하도록 하고 있다.

$$KB = d \frac{0.8f^2}{\sqrt{1+0.032f^2}} = \frac{a}{(2\pi f)^2} \frac{0.8f^2}{\sqrt{1+0.032f^2}} \quad \text{식(5)}$$

여기서, d : 진동 진폭(mm), f : 진동수(Hz),
 a : 진동 가속도(m/s²)

4.2 사용성평가

건물 A, B, C의 진동 측정값은 표 3에서와 같이 최대 가속도는 0.25, 0.34, 0.28(%g)의 값을, 고유진동수는 9.76, 12.69, 7.81(Hz)를 표시한다. 이를 바탕으로 앞의 AISC(1997), 일본 건축학회(1991) 및 DIN 4150/2(1986)의 수직진동 평가기준에 적용한 결과 표 4와 그림 9에서 보는 것과 같이 건물 A, B, C 모두 기준에 만족하여 사용성에 문제가 없는 것으로 나타났다.

표 4. 각건물의 사용성평가 결과

대상건물	AISC		일본	DIN
	동적기준 (0.5%g)	강성기준 ($\Delta \leq 1 \text{KN/mm}$)	V-3(권장치) V-5(제한치)	KB=0.4(낮) KB=0.3(밤)
건물 A	0.25	0.076	V-3 만족	0.18
건물 B	0.34	0.086	V-3 만족	0.20
건물 C	0.28	-	V-3 만족	0.22

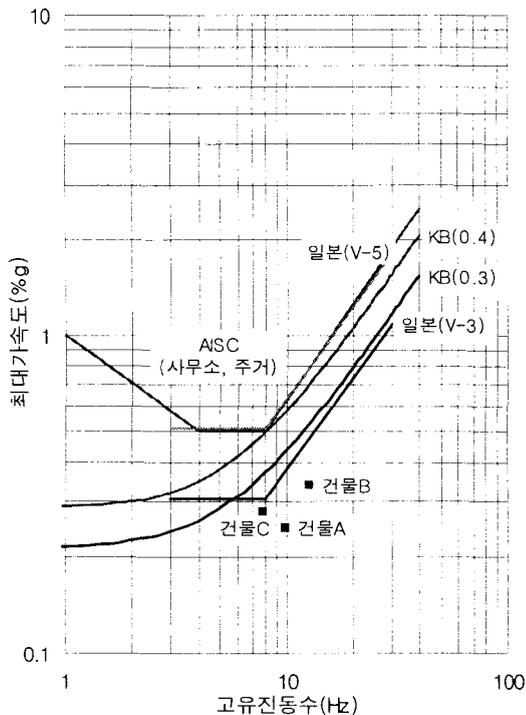


그림 9. 각건물의 국외기준에 의한 사용성평가

5. 결론

TSC구조 바닥슬래브의 보행하중에 의한 가속도응답과 FFT응답, 뒷꿈치 하중에 의한 감쇠율을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TSC구조 건물들의 수직진동에 대한 진동성능평가 결과 AISC의 동적기준인 0.5%g와 강성 기준인 $k_{floor} > 1 \text{kN/mm}$ 를 모두 만족하며, 일본건축학회 기준의 권장치 V-3, DIN 4150/2의 기준치인 $KB = 0.4$ (낮), $KB = 0.3$ (밤)을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

2. 뒷꿈치 충격에 의한 감쇠비는 건물 A와 B는 AISC에서 비구조재가 거의 없는 개방된 바닥판에서 권장되는 2%와 유사한 1.88과 2.38%의 감쇠비를 보였으며, 건물 C의 경우에는 4.45%의 감쇠비를 나타냈다.

3. TSC보를 사용한 바닥판에서 해외 진동기준을 사용하여 사용성을 평가한 결과 사용성이 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

- Murray, T. M., "Building Floor Vibrations." Engineering Journal, No. 3, 1991, pp.102-109.
- Allen, D. E. and Murray, T. M., "Design Criterion for Vibrations Due to Walking." Engineering journal, 4th Qtr, American Institute of Steel Construction, 1993, pp. 117-129.
- AISC/ CISC, "Steel Design Guide Series 11. Floor Vibration Due to Human Activity," American Institute of Steel Construction, 1997, Chicago.
- DIN 4150, Structural Vibration in Buildings, 1986
- 대한 건축학회, 강구조 한계상태 설계기준 및 해설, 1998.
- 대한 건축학회, 합성테크 받기구조 설계기준 (안) 및 해설, 1998.
- 일본 건축학회, "건축물의 진동에 관한 주거성능평가지침, 동해설", 1991.
- 박수영, 이성수, 홍갑표, "철골조 바닥구조의 수직 진동 평가기준적용성에 관한 연구", 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 2002, pp. 167-170.
- 김상모, 김규석, "T형 합성보의 내력평가에 관한 연구", 한국강구조학회 논문집, 2003. 8.