

# TSC 합성보가 적용된 14.7m 장경간 실험실의 바닥진동성능

Vibration Performance of Laboratory Floor with 14.7m Span Using TSC Composite Beam



**김 동 관** Kim, Dong-Kwan  
 정회원, (주)센구조연구소 연구팀장  
 R&D Team Leader, SEN Structural Engineers  
 dkkim@senkuzo.com

## 머리말

최근 구조물의 안전 및 사용성에 대한 인식이 높아짐에 따라 건축물도 이에 대한 성능을 만족시키는 것이 요구되고 있다. 특히 건물의 바닥진동은 거주자의 사용성 및 주거환경에 큰 영향을 미치기 때문에 엄밀하게 진동수준을 예측하고, 시공하여야 한다.

당사에서 최근에 설계 및 시공한 OO연구소 실험실은 약간의 바닥진동도 실험에 큰 영향을 미치기 때문에 바닥진동제어가 매우 중요한 건물이다. 또한 해당건물은 기둥과 기둥사이가 14.7m의 장경간으로 이루어져 있기 때문에 일반적인 건물에 비해 진동에 더욱 취약하다.

본 프로젝트 리포트는 동일한 평면을 갖는 두 개의 건물이지만, 바닥조체가 서로 다른 두 개의 건물에서 각각의 진동수준을 실측하고 비교한 결과이다.

## ISO 10137의 실험실 진동기준

건물의 바닥진동을 평가하는 기준으로 ISO 10137에서는 그림 1과 같이 규정하고 있다. ISO의 진동수준 평가그래프에서 X축은 1/3 옥타브 밴드 중심주파수(octave band center frequency)이고, Y축은 RMS 가속도이다. 1초에 1번 진동하는 1Hz에 대해서는 0.01m/s<sup>2</sup>의 RMS 가속도를 허용하고 있으며, 바닥구조물의 주된 고유주파수 영역인 4~8Hz에서는 0.005m/s<sup>2</sup>의 RMS 가속도가 허용되고 있다. 이보다 큰 진동수 영역에서는 허용 RMS 가속도가 점진적으로 증가하고 있으나, 이는 사람이 유발하거나 인식하기 힘든 수준의 영역이다.

해당 바닥구조의 진동수준을 ISO와 동일하게 측정하기 위해서는 다음과 같은 절차를 따른다.

- 1) 2인 보행에 대한 바닥진동 측정
- 2) 시간이력 진동기록을 주파수 영역으로 변환
- 3) 하나의 중심주파수(center frequency)에 대하여 1/3 옥타브 밴드에 대한 주파수 범위를 설정하고, 이 구간에서 RMS(Root Mean Square) 가속도를 구한다.
- 4) 각 중심주파수에 대한 RMS 값을 도시하여 ISO 그래프와 비교

## 동일한 평면을 갖는 두 바닥시스템의 개요

본 프로젝트 리포트에서는 그림 2와 같이 동일한 평면이면서도 바닥시스템이 서로 다른 2개의 건물에서 각각 진동을 측정하고, 그 결과를 비교하고자 한다. 두 개의 바닥시스템은 그림 2와 같이 건물의 기둥 배열은 가로

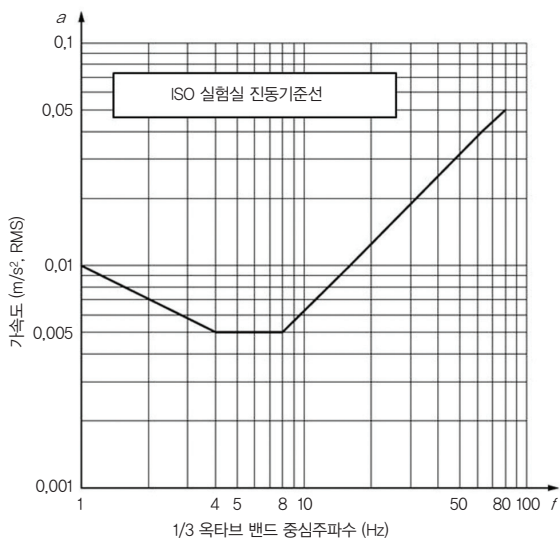


그림 1. ISO 10137의 실험실 진동기준

6.6m×세로 14.7m의 모듈로 되어 있으며, 하나는 철골보로 바닥이 지지되어 있고, 다른 하나는 TSC 합성보로 지지되어 있다. 철골보로 구성된 바닥은 가로 6.6m의 경간을 3등분하여 H-582×300×12×17을 2개씩 배열하였고, 슬래브의 두께는 135mm로서 슬래브 상단부터 철골보 하단까지 바닥구조의 총 두께는 717mm 이다. TSC 합성보로 구성된 바닥은 가로 6.6m의 경간을 2등분 하여 TSC-500×270×9(TSC보의 깊이×폭×강판의 두께)를 1개 배열하였으며, 슬래브 두께는 150mm를 포함한 총 두께는 650mm로 보가 1개 더 많은 철골보 시스템에 비해 바닥구조의 두께는 67mm, 약 10% 감소되었다.

### 바닥진동 측정

ISO 기준과 같이 2인 보행시 바닥에 유발된 진동을 측정하였다. 0.00001~1g까지 측정할 수 있는 정밀한 가속도계를 사용하였으며, 2개의 가속도계에서 측정된 기록을 평균하여 자료의 신뢰성을 높였다. 해당 실험실의 장비에 의해 유발되는 진동수준을 평가하기 위하여 약 200초간 상시진동을 측정하였고, 60초간 보행진동을 측정하였다. 또한 바닥시스템별 고유주파수와 감쇠비를 도출하기 위하여 3회의 충격진동을 가하여 고유주파수와 감쇠비를 도출하였다.

### 바닥진동측정 결과 및 비교

측정된 바닥진동과 ISO 기준에 따른 분석결과는 그림 3과 같다. 2개의 가속도계로부터 200초 동안의 상시진동, 60초 동안의 보행진동이 계측되었고, 1/3 옥타브 밴드 주

파수(octave band frequency)에서 RMS 가속도가 도출되어 ISO의 실험실 기준과 비교되었다.

그림 3의 왼쪽은 철골보가 적용된 바닥시스템의 진동 기록으로 상시진동수준은 시간영역에서 RMS 가속도로 0.0034m/s<sup>2</sup>과 0.0040m/s<sup>2</sup>가 측정되었으며, 이를 1/3 옥타브 밴드 주파수에서 분석하면 2개의 가속도계 기록의 평균으로 약 7.1Hz에서 0.0022m/s<sup>2</sup>의 RMS 가속도가 도출되어 ISO 기준을 만족하였다.

하지만, 60초간 보행진동에 대해서는 진동수준이 크게 증가하여 시간영역에서 RMS 가속도로 0.0092m/s<sup>2</sup>과 0.0069m/s<sup>2</sup>가 측정되었으며, 이를 1/3 옥타브 밴드 주파수에서 분석하면 2개의 가속도계 기록의 평균으로 약 6.9Hz에서 0.0055m/s<sup>2</sup>의 RMS 가속도가 도출되어 ISO 기준을 초과하였다. 철골보가 적용된 해당 건물은 ISO 기준 초과와 유사한 경향으로 실험실 연구원들에 의해 바닥진동에 대해 지속적인 민원이 제기되는 등 사용성에 큰 불편이 있었으므로 보강공사가 수행되었다.

그림 3의 오른쪽은 TSC 합성보가 적용된 바닥시스템의 진동기록으로 상시진동수준은 시간영역에서 RMS 가속도로 0.0087m/s<sup>2</sup>과 0.0075m/s<sup>2</sup>가 측정되었다. 이는 철골보가 적용된 바닥의 상시진동수준 보다 2배정도 크지만, 이를 1/3 옥타브 밴드 주파수에서 분석하면 2개의 가속도계 기록의 평균으로 약 7.3Hz에서 0.0038m/s<sup>2</sup>의 RMS 가속도가 도출되어 ISO 기준을 만족하였다. 주파수영역에서 분석된 자료를 비교하면, TSC 합성보가 적용된 바닥시스템의 10Hz 이상의 진동수준이 철골보가 적용된 바닥시스템의 진동수준 보다 높다. 이는 실험실 장비에 의한 진동으로 인하여 TSC 합성보가 적용된 바닥시스템의 상시진동수준이 컸던 것으로 판단된다.

60초간 보행진동에 대해서는 시간영역에서 RMS 가속도로 0.0098m/s<sup>2</sup>과 0.0082m/s<sup>2</sup>가 측정되었으나, 이를 1/3

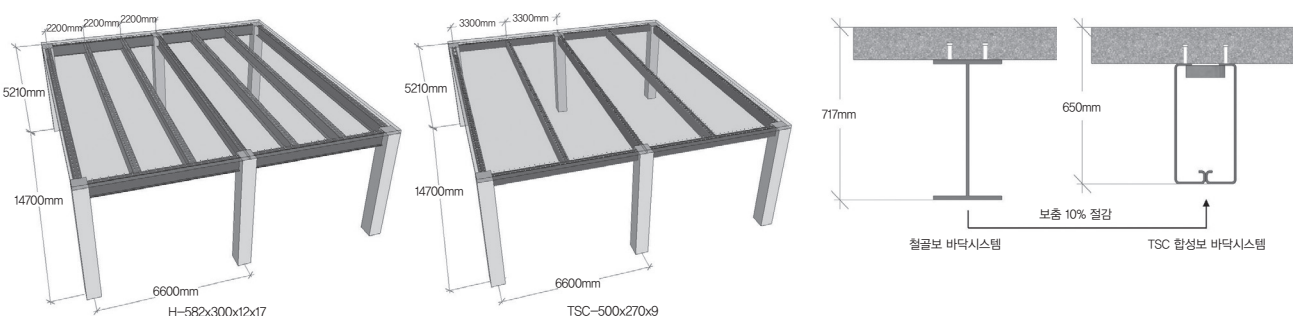


그림 2. 철골보와 TSC 합성보 바닥시스템 개요

옥타브 밴드 주파수에서 분석하면 2개의 가속도계 기록의 평균으로 약 6.7Hz에서 0.0046m/s<sup>2</sup>의 RMS 가속도가 도출되어 ISO 기준을 만족하였다.

전술한 바와 같이, TSC 합성보가 적용된 바닥시스템의 상시진동수준은 실험장비로 인하여 철골보가 적용된 바닥시스템의 상시진동수준보다 약 2배 컸지만, 보행진동에 대해서는 진동수준이 약간 증가되어, ISO 기준을 만족시켰다. 이는 이후 기술될 바닥시스템의 질량, 감쇠 등의 영향으로 TSC 합성보가 적용된 바닥시스템이 진동에 좀 더 유리한 것으로 판단된다.

각 바닥시스템별 3개의 실에서 측정된 진동수준을 비교하면 표 1과 같다. 철골보가 적용된 바닥시스템은 2개의 실에서 상시 및 보행진동시 ISO 기준을 초과하였다. TSC 합성보가 적용된 바닥시스템은 3개의 실 모두 상시 및 보행진동에 대하여 ISC 기준을 만족하였다.

또한 그림 2의 결과와 같이 진동측정시 실험장비에 의한 진동이 바닥진동수준 평가에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 측정된 진동의 전체적인 수준인 시간이력 RMS 가속도로부터 각 실별 진동수준을 보정하여 철골보와 TSC 합성보가 적용된 바닥시스템의 진동성능을 상대적으로 비

교한 결과, 평균적으로 TSC 합성보가 적용된 바닥시스템의 진동수준이 철골보가 적용된 바닥시스템의 70% 정도인 것으로 판단된다.

### 바닥시스템의 질량, 강성, 감쇠의 비교

진동에 대한 바닥시스템의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 충격진동으로부터 고유진동수(natural frequency)와 감쇠비(damping ratio)를 측정하고 비교하였다.

충격진동으로부터 도출된 고유진동수와 감쇠비는 그림 4와 같다. 철골보 바닥시스템의 감쇠비 평균은 0.048이었고, 고유진동수의 평균( $f_s$ )은 6.38Hz 였다. TSC 합성보 바닥시스템의 감쇠비 평균은 0.60이었고, 고유진동수의 평균( $f_T$ )은 6.47 Hz 였다.

각 바닥시스템의 질량은 다음과 같다.

철골보 바닥시스템 ( $m_s$ ) = 38.9 ton

TSC 합성보 바닥시스템 ( $m_T$ ) = 51.8 ton

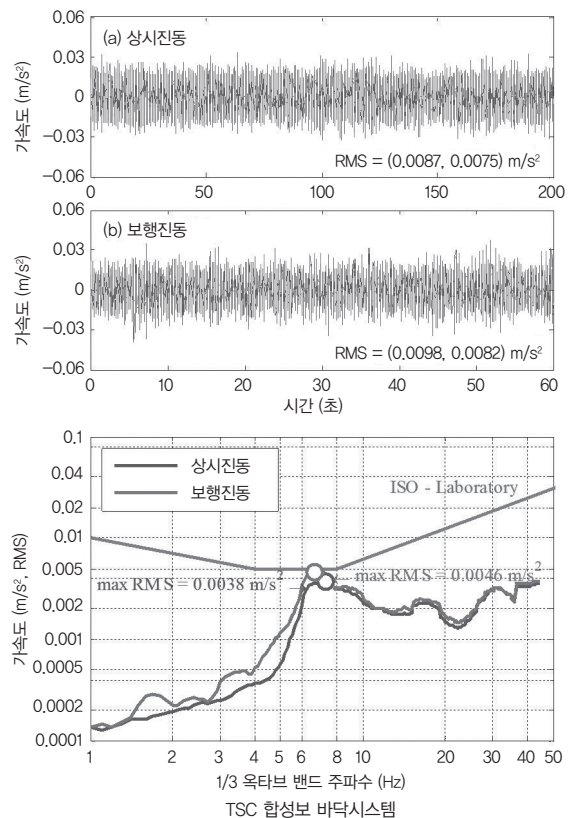
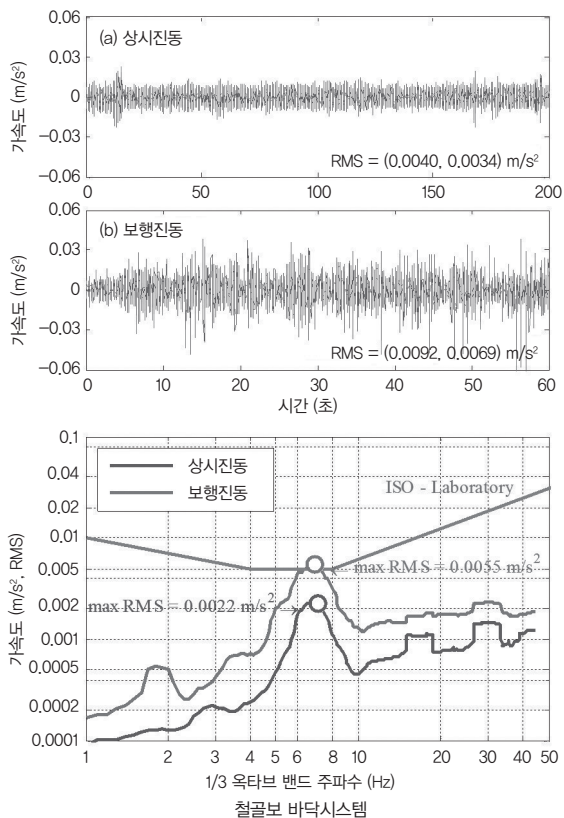


그림 3. 진동측정 결과

표 1. 철골보와 TSC 합성보 바닥시스템 진동수준 비교

(단위: m/s<sup>2</sup>)

시스템	호실	시간이력 RMS	1/3 옥타브 밴드 RMS	ISO 평가	시스템	호실	시간이력 RMS	1/3 옥타브 밴드 RMS	ISO 평가		
철골보	S1	상시	0.0042	0.0018	OK	TSC 합성보	T1	상시	0.0044	0.0011	OK
		보행	0.0066	0.0040	OK			보행	0.0056	0.0030	OK
	S2	상시	0.0094	0.0083	NG		T2	상시	0.0057	0.0029	OK
		보행	0.0121	0.0108	NG			보행	0.0067	0.0036	OK
	S3	상시	0.0037	0.0022	OK		T3	상시	0.0081	0.0038	OK
		보행	0.0081	0.0055	NG			보행	0.0090	0.0046	OK

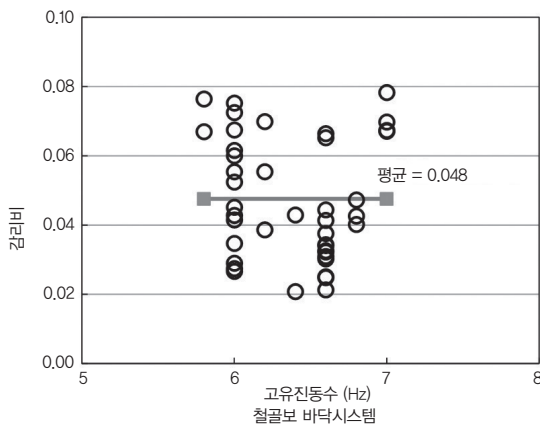
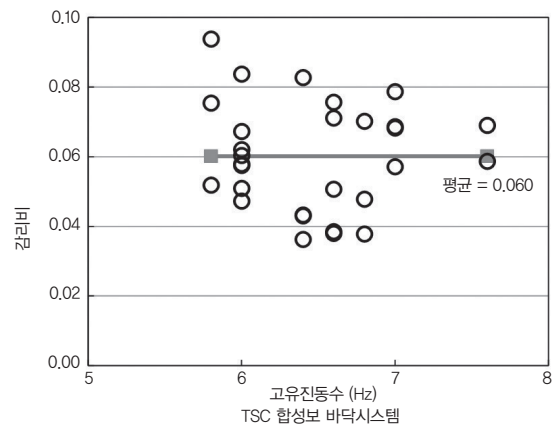


그림 4. 고유진동수와 감쇠비 비교



1차모드가 동일하다고 가정하면, 다음과 같은 관계식으로 두 바닥시스템 강성의 비( $k_T / k_S$ )를 도출할 수 있다.

$$(k_T / k_S) = (f_T / f_S)^2 \times (m_T / f_S) = 1.37$$

이로부터 TSC 합성보 바닥시스템은 철골보 바닥시스템에 비해 강성이 37% 큰 것으로 판단된다.

또한 TSC 합성보 바닥시스템의 평균 감쇠비는 6%로서 일반적으로 가정하는 합성보 바닥시스템의 3%보다 큰 감쇠비로 진동을 저감시키고 있다.

구조동역학적인 측면에서 TSC 합성보가 적용된 바닥시스템은 철골보가 적용된 바닥시스템에 비해 보다 큰 질량과 강성, 그리고 감쇠비로 외부 보행진동이나 충격하중에 대해 저항하고 있으므로 이에 대한 진동응답이 철골보가 적용된 바닥시스템보다 작은 것으로 판단된다.

### 맺음말

동일한 평면을 갖는 두 개의 건물에 바닥판을 구성하는

구조체에 따른 진동특성을 측정하고 분석하였다. 14.7m × 6.6m 바닥판에 대하여 하나의 건물에는 일반적인 철골보가 2.2m 간격으로 2개 배치되었고, 또 다른 건물에는 TSC 합성보가 1개 배치되었으며, 보춤은 67mm(약 10%) 감소되었다.

각각 3개의 실험실에서 상시 및 보행진동 수준을 측정된 결과, 철골보가 적용된 바닥시스템은 2개의 실험실에서 ISO 기준을 초과하였으며, TSC 합성보가 적용된 바닥시스템은 3개의 실험실 모두 ISO 기준을 만족하였다.

실험실 내 장비에 의한 진동을 고려하여, 보정계수를 도출하고 구조체에 따른 상대적 진동수준을 비교한 결과 TSC 보가 적용된 바닥시스템의 진동수준이 철골보가 적용된 바닥시스템의 진동수준의 70%이었다.

이는 TSC 보가 적용된 바닥시스템의 보의 개수와 보춤이 감소하였지만, 큰 질량과 강성, 그리고 감쇠비로 외부 보행진동이나 충격하중에 대해 저항하고 있으므로 이에 대한 진동응답이 철골보가 적용된 바닥시스템보다 작은 것으로 나타났다.

또한 일반적인 합성보 바닥시스템의 감쇠비가 3%인데 반해 TSC 합성보 바닥시스템의 감쇠비는 6%로서 진동을 감소시키는 성능이 매우 우수한 것으로 판단된다.□