

샌드위치 플레이트 시스템을 이용한 합성보의 동적 특성

Dynamic Characteristic of Composite Beam using the Sandwich Plate System

류 재 호* 주 영 규** 윤 성 원***
Ryu, Jae-Ho Ju, Young-Kyu Yoon, Sung-Won

Abstract

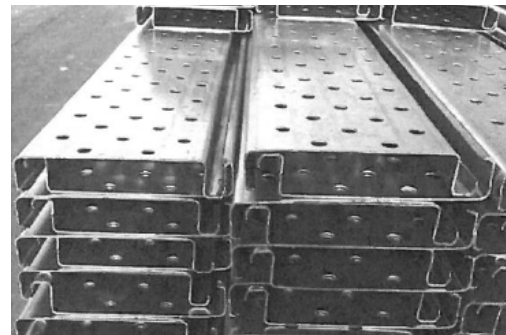
To improve the noise and vibration problems of the existing public parking systems, new floor system was proposed. This system consists of the Sandwich Plate System(SPS), steel beam and post-tensioned steel tendons. To verify the dynamic characteristics such as the natural frequency and damping ratio of the system, the free vibration test was performed. Test results showed that the natural frequency of the SPS composite beam was 23.8Hz and it was increased by 3.8% by installing the post-tensioned tendons. The damping ratio of the specimen with tendons was about 1.64%.

Keywords : Sandwich Plate System, Dynamic characteristic, Post tension, Natural Frequencies, Composite Beam

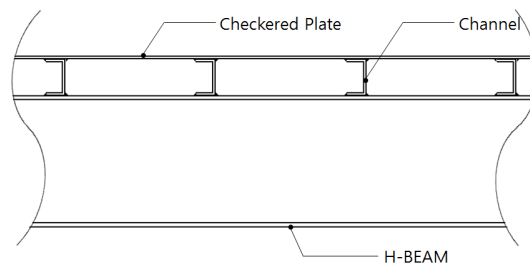
1. 서론

국내 기존 공영주차장의 경우 대부분 시공이 간편하고 공사기간을 단축할 수 있는 철골구조 시스템을 채택하고 있다. 특히 바닥재로는 경량의 시트(sheet) 강판을 절곡한 형태나, 상·하부 강판 사이에 C형강(channel)을 삽입한 단위 패널(unit panel)이 많이 사용되고 있다. 본 바닥재는 강재보 위에 설치되어 슬래브를 형성함으로써 바닥판의 경량화를 도모할 수 있으며, 이를 통해 보, 기둥 및 기초의 구조 물량을 절감할 수 있는 효과를 거둘 수 있다<Fig. 1>.

그러나 해당 기술의 경우, 바닥 강판에 형성된 다공의 개구부로 인해, 빗물 등에 노출될 경우 부식이 쉽게 발생하는 단점이 있다. 그리고 바닥재를 하부에 놓인 강재보와 스폿 용접(spot welding)을 통해 접합하기 때문에 국내와 같이 계절별 일교차가 큰 날씨에



a) Floor Deck:
profiled steel sheet type



b) Floor Plate System:
channel combined type

<Fig. 1> Structural floor systems of the existing public parking buildings

* 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부, 공학박사
School of Civil, Env. & Arch. Eng., Korea Univ.
** 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, 공학박사
School of Civil, Env. & Arch. Eng., Korea Univ.
*** 교신저자, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Seoul National University of
Science and Technology
Tel: 02-970-6587, E-mail: swyoon@seoultech.ac.kr

서는 강재의 수축·팽창으로 인한 용접부의 결합이 발생할 우려가 있다. 또한 장시간 차량에 의한 반복하중은 슬래브로 사용된 패널의 면외 변형을 진행시키며, 이는 차량 이동시 큰 소음을 발생시키는 주요 원인이 되어왔다.

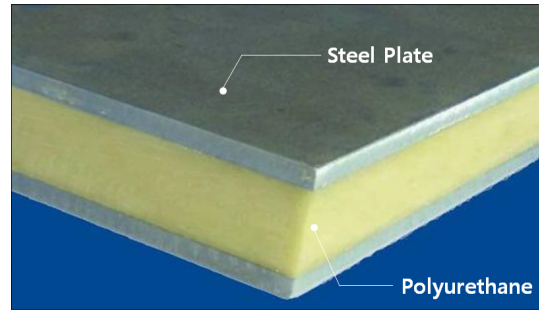
이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 기존에 사용되어 왔던 경량 강판 슬래브 시스템을 샌드위치 플레이트 시스템으로 변경하고자 하였다. 본 샌드위치 플레이트 시스템(Sandwich Plate System, 이하 SPS)은 영국 IE사에서 개발된 제품으로 상·하부 얇은 강판 사이에 고밀도 폴리우레탄을 충전한 형태를 띠고 있다.¹⁾²⁾ 상·하부에 놓인 강판은 휨거동에 있어 구조적 효율성을 높일 수 있으며, 내부에 충전된 폴리우레탄은 두 강판 사이의 간격을 유지시켜 주는 스페이서(spacer) 역할을 함은 물론 두 재료 사이의 부착력을 통해 강재의 면외 국부 좌굴을 제어하는 역할을 한다<Fig. 2>.

제안된 SPS 시스템은 기존 강구조 시스템과 결합되어 공용주차장은 물론 주거용 건물 및 오피스에도 확대 적용될 수 있는 신개념 바닥시스템이라 할 수 있다. 그러나 새로운 바닥 시스템이 이처럼 널리 확대 적용되기 위해서는 해당 시스템에 대한 내력 평가뿐만 아니라 사용성을 고려한 동적 특성에 대한 평가도 진행되어야만 한다.

이미 국내에서도 새롭게 개발된 바닥 시스템에 대해 사용성을 고려한 동적 성능평가가 많이 진행되고 있다. 2008년 주영규 외 5인³⁾은 i-TECH 합성보가 실제 적용된 건물을 대상으로 시공 단계별 바닥진동 특성을 확인하기 위한 실험을 수행하였으며, 2007년 김기철 외 1인⁴⁾과 2009년 김민균 외 4인⁵⁾은 각각 일방향 중공슬래브와 이방향 중공슬래브에 대한 진동성능평가를 수행하였다. 또한, 2012년 윤성원⁶⁾은 포스트텐션이 도입된 이방향 중공슬래브의 동적 특성을 파악하기 위한 실험적 연구를 진행한 바 있다.

그러나 바닥 진동에 대한 이러한 대부분의 연구들은 적어도 4개 기둥으로 둘러싸인 1bay 규모의 실험체를 필요로 하며, 실제 Pilot Project 등이 구현되지 않는 한 해석적인 연구에 의존해야 하는 한계점이 있다.

본 논문에서는 제안된 SPS 패널 및 SPS가 결합된



a) SPS components



b) SPS shape & application

<Fig. 2> Sandwich Plate System, SPS

합성보에 대해 양단 단순지지 조건 하에서 고유진동수 및 감쇠율을 파악하기 위한 실험적 연구를 진행하였다. 이를 통해, 차후 진행될 SPS 바닥시스템의 사용성 평가를 위한 해석적 연구의 검증 자료를 마련하고자 하였으며, 또한 해석적 연구 추진 시 고려해야 하는 실제 거동 상의 특이성을 파악하고자 하였다.

2. 휨재의 동적 특성에 대한 이론적 고찰

2.1 고유진동수

휨을 받는 보의 경우, 보의 질량과 강성 그리고 외부하중 조건에 따라 특정 위치에서의 시간에 따른 응답을 운동미분방정식으로 나타낼 수 있다. 그리고 주어진 방정식에 하중 및 경계조건을 대입하여 정리함으로써 보의 n차 모드에 대한 진동수를 산정할 수 있는 계산식을 얻을 수 있다.⁷⁾

$$f_n = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (1)$$

m: 분포 질량

EI : 보의 휨강성

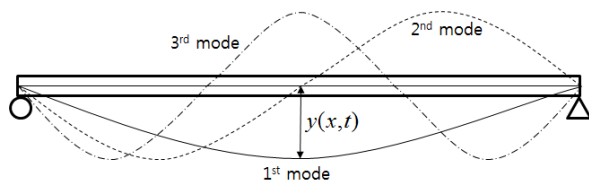
L : 보의 경간 길이

K_n : n 차 모드진동의 지점조건을 나타내는 상수

<Table 1>과 같음.

<Table 1> K_n Coefficients according to the boundary conditions

Support Conditions	K_n for n -th mode		
	$n=1$	$n=2$	$n=3$
pinned/pinned	π^2	$4\pi^2$	$9\pi^2$
fixed both ends	22.4	61.7	121
fixed/free	3.52	22	61.7



<Fig. 3> Mode shapes of a simply supported beam

식 (1)에 $n=1$ (1차 모드)일 때 단순보 지점조건에 대한 상수 K_n 을 대입하고, 보의 자중에 의한 최대 처짐을 계산하는 식을 대입하여 정리하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$f_1 = \frac{17.8}{\sqrt{\delta}} \quad (2)$$

δ : 보의 자중에 의한 최대 처짐(mm)

식 (2)에 단부조건이 다른 경우에 대응되는 상수 K_n 을 대입할 경우, 분자의 값은 18정도가 나오며, 이를 통해 다른 지점조건에 대해서도 보편적으로 식 (2)를 활용할 수 있음을 확인할 수 있다.

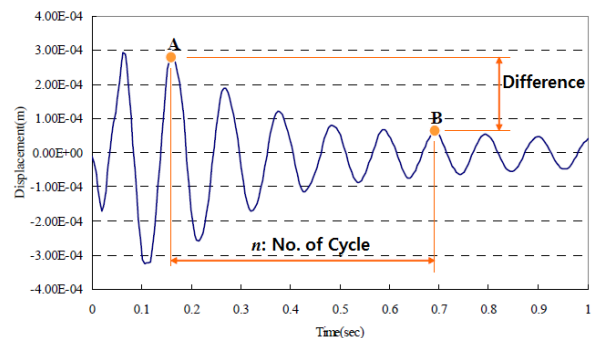
2.2 감쇠율

본 연구에서는 계속된 진동 데이터로부터 해당 시스템의 감쇠율을 계산하기 위해 대수감소법을 적

용하였다.⁸⁾ 대수감소율(對數減衰率)은 감쇠 자유 진동하는 물체의 진폭(amplitude)이 감소하는 정도를 나타내는 값으로 식 (3)과 같이 n 개의 주기가 지난 시점에서의 진폭의 감소비를 자연대수를 취해 구한 것이다.

$$\xi = \frac{\ln(A/B)}{2n\pi} \quad (3)$$

여기서 A 와 B 는 진폭의 크기이며, n 은 주기 횟수를 나타낸다<Fig. 4>.

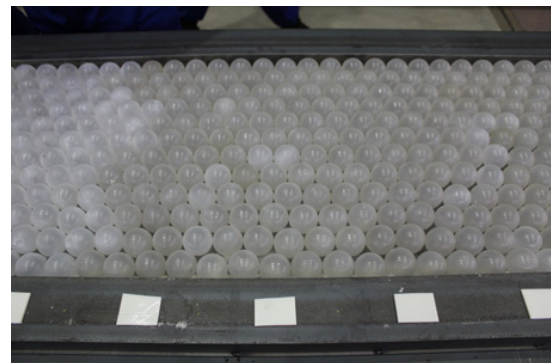


<Fig. 4> Logarithmic decrement

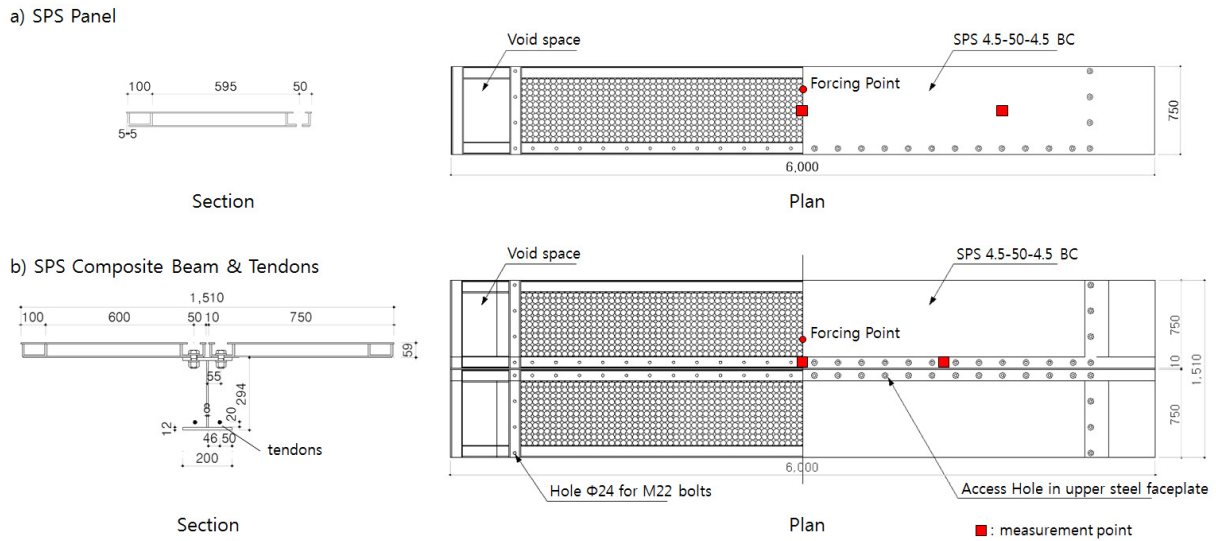
3. 실험 계획

3.1 실험체 종류 및 형상

진동계측 실험에 사용된 SPS 종류는 길이가 6,000mm, 너비가 750mm, 두께는 59mm인 규격을 사용하였다. 상·하부에 위치한 강관(SS400)의 두께는 4.5mm이며, 내부에 충전된 폴리우레탄의 두께



<Fig. 5> Bubble core

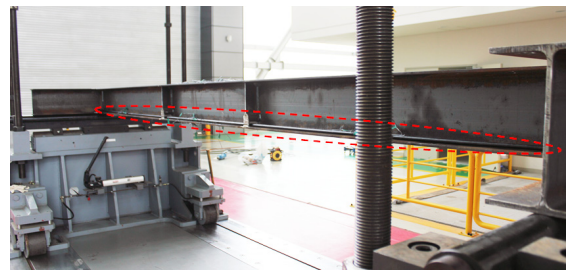


〈Fig. 6〉 Plan & section of specimens

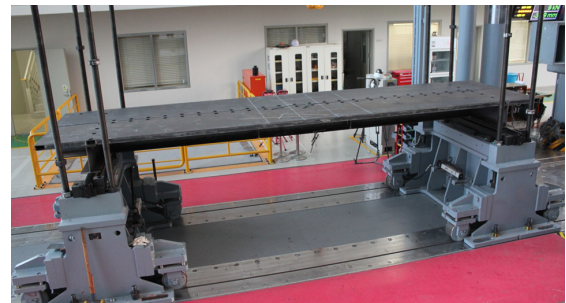
는 50mm이다. 또한 주입되는 폴리우레탄의 양을 절약하기 위해 SPS 패널 제작 단계에서 상·하부 강판 사이에 <Fig. 5>에서 보이는 바와 같이 플라스틱 구를 삽입하였다.

SPS 합성보의 경우, H-294x200x8x12 규격의 강재(SM490) 형강을 사용하였으며, 상부플랜지 상단에 상기 언급된 SPS 패널을 좌우로 볼트 집합하여 합성보를 제작하였다.

또한 SPS 합성보의 휨강도 및 강성을 증진시키기 위한 목적으로 강재보 웨브 좌우 측면, 하부플랜지 상단으로부터 20mm 떨어진 지점에 공칭직경 15.2mm인 강연선을 설치한 실험체를 별도로 제작하였다<Fig. 7>. 강연선에 도입된 장력의 크기는 강연선 하나당 약 26.8kN으로 해당 값은 강재보와 SPS 패널의 자중에 의한 처짐을 상쇄할 수 있을 정도의 긴장력에 해당된다. 각 실험체별 상세 및 일람을 <Fig. 6>과 <Table 2>에 나타냈다.



〈Fig. 7〉 Post-tensioned tendons



〈Fig. 8〉 Test setup

〈Table 2〉 Details of specimens

Specimens	SPS (SS400)			Steel Beam (SM490)	Tendons (SWPC7BN)	
	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)		Diameter	Pre-stressed force
SPS panel	6000	750	4.5/50/4.5	-	-	-
SPS composite beam	6000	750 x 2	4.5/50/4.5	H-294x200x8x12	-	-
SPS composite beam with post-tensioned tendons	6000	750 x 2	4.5/50/4.5	H-294x200x8x12	15.2	26.8kN per a tendon

<Table 3> Measurement equipments

Equipment	Item	Spec.
ICP Accelerometer (Dytran 3191A)	capacity	±1g
	output voltage	±5V
	volt sensitivity	5,000 mV/g
	transverse sensitivity	4.2%
Dynamic Analyser (Signalcalc Mobilyzer)	channel	4
	filter	90db
	acquisition	5 Hz ~ 8Hz
Metronome (SQ 10-77)	30~250 times/min	30~250 times/min

3.2 실험체 Setup 및 계측계획

제작된 실험체는 롤러지점을 이용하여 스펠거리가 5m가 되도록 단순지지하였다<Fig. 8>. 각 실험체별로 바닥 상단에서 무릎의 굽힘 운동을 통해 사람의 자중을 실험체에 전달하는 굴절운동을 수행하였으며, 이를 통해 자유진동을 발생시켜 구조물의 고유진동수와 감쇠율을 평가하였다. <Fig. 6>에 굴절운동 지점 및 가속도 계측점을 표기하였다. 계측 위치는 구조물의 동적 특성을 대표할 수 있는 위치를 선정하였으며, 굴절운동은 계측 위치로부터 20cm 이내에서 가진하였다. 진동 데이터에 대한 계측 조건은 0.003초마다 샘플 데이터를 기록하여 고유진동수 및 감쇠율을 평가에 적합하도록 하였다.

<Table 3>에 진동가속도 계측에 사용된 장비 사양을 정리하여 나타냈다.

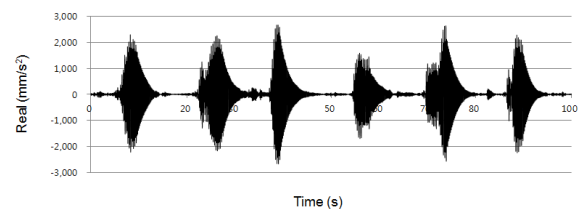
4. 실험 결과

4.1 고유진동수

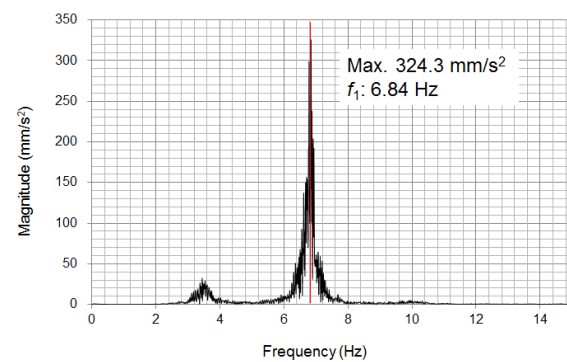
<Fig. 9> ~ <Fig. 11>에 걸쳐 SPS 패널과 SPS 합성보 그리고 강연선이 보강된 합성보에 대한 시계열 파형 및 이로부터 획득된 파워스펙트럼을 나타냈다. 또한 <Table 4>에 실험으로부터 계측된 고유진동수와 식 (2)로부터 획득한 단순지지 조건 하에서의 이론 고유진동수를 비교하여 나타냈다. 이론값

<Table 4> Natural frequency of specimens

Specimens	Natural frequency (Hz)		
	Experimental value, E	Theoretical value, T	E/T
SPS panel	6.84	6.41	1.07
SPS composite beam	23.8	29.9	0.80
SPS composite beam with post-tensioned tendons	24.7	-	-



a) Time series wave

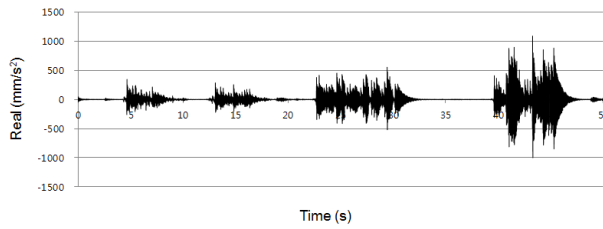


b) Power spectrum

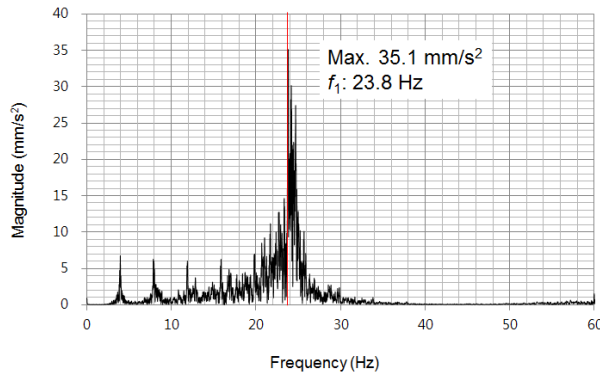
<Fig. 9> Dynamic response of SPS panel

산정 시, SPS 패널의 페리미터바(perimeter bar)로 사용된 2채널은 구조체 자중 산정에는 포함하였으나 단면의 관성모멘트 계산에는 생략하는 것으로 가정하였다. 또한 내부에 충전된 폴리우레탄의 무게는 플라스틱 구에 의해 절반가량 감소한 것으로 평가하였다.

굴절운동에 의한 자유진동 실험 결과 SPS 패널 자체의 고유진동수는 약 6.84Hz를 나타냈으며, 이 값은 이론값 6.41Hz와 거의 유사하였다. 이를 통해서 식 (2)를 활용한 SPS 패널 자체의 고유진동수 평가가 가능함을 확인할 수 있다. 그리고 해당 값은 기존 합성데크에 사용되는 일반 콘크리트 슬래브(두



a) Time series wave



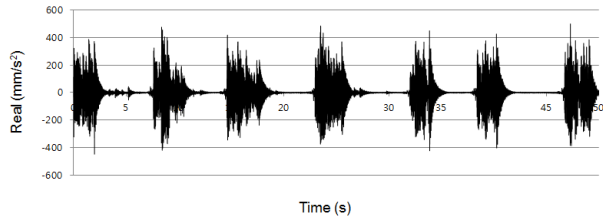
b) Power spectrum

〈Fig. 10〉 Dynamic response of SPS composite beam

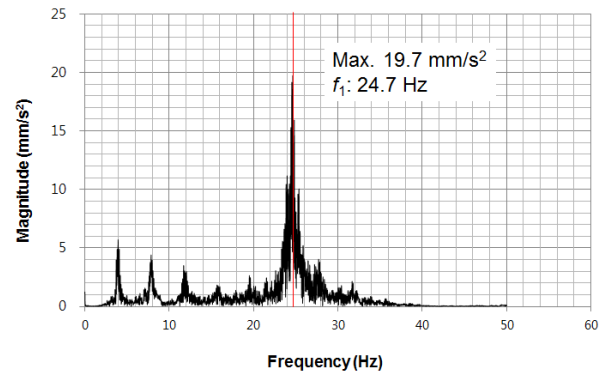
께 135mm, 설계공칭강도 24MPa)의 동일한 경계조건에서 예상되는 고유진동수(이론값) 7.58Hz와 비교하여 약 10% 가량 작은 것으로 나타났다. 이는 SPS 시스템 특성상 강재를 사용하였으나 바닥의 두께가 60mm 내외로 줄어들어 바닥재의 휨강성이 감소했기 때문이다.

한편, 바닥 진동 성능 측면에서 실험에 사용된 SPS 패널의 적정 스펠 간격을 확인하기 위해 국내 '합성데크 바닥구조 설계기준(안) 및 해설⁹⁾'을 참조하였다. 본 기준안에서는 일방향으로 사용되는 합성슬래브에 대해 고유진동수를 15Hz 이상으로 제한하고 있다. 실험에 사용된 SPS 패널(4.5-50-4.5)의 경우, 부가 고정하중(천장 및 마감재 무게)을 1kN/m²으로 가정하고, 고유진동수를 15Hz로 기준하였을 때, 단순지지되는 스펠의 순거리가 2.94m로 나타났다. 이를 통해 주어진 패널 규격의 경우, 작은 보의 중심간격을 기준으로 3m 스펠까지 적용될 수 있음을 간접적으로 평가할 수 있다.

SPS 합성보의 경우, 파워스펙트럼으로부터 획득된 고유진동수는 23.8Hz를 나타냈으며, 이는 패널



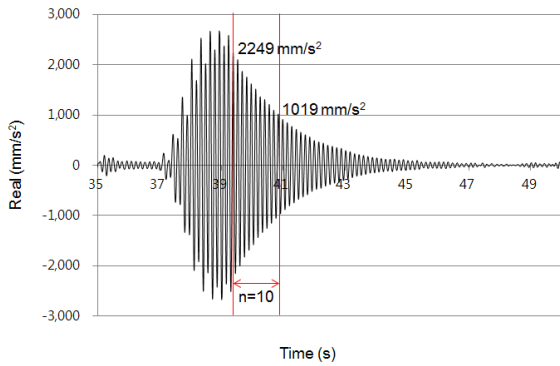
a) Time series wave



b) Power spectrum

〈Fig. 11〉 Dynamic response of SPS composite beam with post-tensioned tendons

자체의 고유진동수보다 약 3.5배 증가된 수치를 나타냈다. 본 합성보에 대한 이론 고유진동수를 구하기 위해 대입된 휨강성(EI)은 약 55320kN·m²으로 실제 휨성능 실험에서 측정한 값과 거의 유사하였다.¹⁰⁾ SPS 합성보에 대한 이론 고유진동수는 29.9Hz로 실험값보다 20% 크게 산정되었는데, 이는 SPS 합성보의 강재보와 SPS 패널 사이의 볼트 접합에 따른 합성이 진동 특성에 대해서 완전하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 즉, SPS 패널을 강재보에 고정하기 위해 M22 볼트를 200mm 간격으로 설치하였으며, 이렇게 설치된 볼트는 연속적이지 않아 수직방향으로 발생하는 진동에 대해 SPS 패널과 강재보가 따로 거동하는 것을 유발하게 된다. 이에 따라 완전합성거동에 근거한 단면2차모멘트를 적용한 이론값은 실제 거동과 비교하여 단면의 강성을 과대평가하는 문제를 발생시키는 것으로 판단된다. 실제로 측정한 SPS 합성보의 고유진동수 23.8Hz를 얻기 위해 식 (2)에 대입되어야 할 처짐량(δ)은 약 0.55mm이며, 이 값은 완전합성거동에 근거한 처짐량 0.35mm와 비합성거동(강재보만 고려)에 근거한



<Fig. 12> Damping ratio of SPS panel

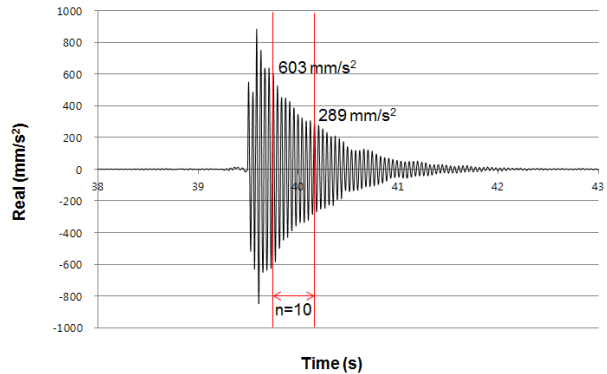
처짐량 0.8mm 사이의 중간값을 나타낸다. 따라서 볼트 접합을 실시한 SPS 합성보의 동적특성은 SPS 패널의 부분합성에 따른 진동 특성을 고려하여 평가가 이루어져야 할 것으로 판단되며, 볼트 접합 간격 등 관련 변수에 따른 차이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로, 강연선에 의해 보강된 실험체의 경우, 고유진동수가 24.7Hz로 측정되었으며, 강연선이 설치되지 않은 합성보보다 약 3.8% 가량 진동수가 상승된 것으로 나타났다. 이는 강연선 보강으로 인해 합성보 단면의 강성이 추가로 증가되었기 때문인 것으로 판단된다.

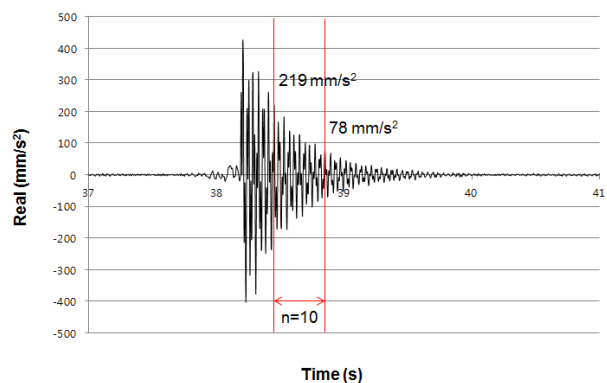
4.2 감쇠율

각 실험체별 감쇠율을 산정하기 위해서 <Fig. 12> ~ <Fig. 14>와 같이, 시계열 파형 중 자유진동에 의해 가속도의 감쇠가 명확하게 발생하는 부분을 발췌하였다. 감쇠율 산정에 사용된 주기 횟수(n)는 10으로 하였으며, 식 (3)에 의한 계산 결과를 <Table 5>에 정리하였다.

SPS 패널과 SPS 합성보의 경우, 측정된 감쇠율이 각각 1.26%와 1.17%로 거의 유사하게 나타났으며, 이는 SPS 설계 매뉴얼에서 제안하고 있는 순수 골조에 대한 감쇠비를 1%로 고려하여 설계에 반영한다는 내용과 일치하였다. 반면, 강연선을 설치한 합성보의 감쇠율은 강연선에 의한 빠른 에너지 소산으로 강연선이 없는 합성보에 비해 감쇠율이 약 38% 증가된 것으로 나타났다. 이는 설치된 강연선



<Fig. 13> Damping ratio of SPS composite beam



<Fig. 14> Damping ratio of SPS composite beam with post-tensioned tendons

<Table 5> Damping ratio of specimens

Specimens	Damping ratio (%)
SPS panel	1.26
SPS composite beam	1.17
SPS composite beam with post-tensioned tendons	1.64

이 마치 Self-Centering 기둥-보 접합부의 거동과 유사하게 보의 상하 진동을 빠르게 제어하여 제자리로 돌아올 수 있게 기능을 발현했기 때문으로 판단된다.¹¹⁾

5. 결론

SPS 패널 및 합성보에 대한 동적 특성을 평가하

기 위해 굴절운동에 의한 진동계측을 실시하였으며, 이를 통해 고유진동수 및 감쇠율을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실험을 통해 확인된 두께 59mm SPS 패널의 고유진동수는 이론값과 잘 일치하였으며, 일반 합성데크에 사용되는 콘크리트 슬래브(두께 135mm) 대비 고유진동수가 약 10% 감소하는 특징을 나타냈다.

2) SPS 패널의 경우, 국내 '합성데크 바닥구조 설계기준(안) 및 해설'에서 제안하고 있는 15Hz 이상의 고유진동수 확보 조건을 이용하여 시공 시 적합한 스펠 간격을 간접적으로 추정할 수 있다.

3) SPS 합성보의 이론 고유진동수는 29.9Hz로 실험값에 비해 20% 높은 값을 나타냈으며, 이는 볼트 접합을 한 SPS 합성보에 대해 수직 진동 운동 특성상 완전합성으로 일체거동을 하지 못했기 때문이다. 따라서 해석적 연구 진행 시 이러한 진동 특이성을 고려한 연구가 함께 진행되어야 할 것으로 판단된다.

4) 계측된 시계열 파형으로부터 대수감소법에 의해 분석된 SPS 패널과 SPS 합성보의 감쇠율은 SPS 설계 매뉴얼에서 제시된 1% 수준의 감쇠율을 나타냈으며, 강연선이 설치된 SPS 합성보의 감쇠율은 강연선에 의한 빠른 에너지 소산으로 감쇠 성능이 약 38% 증가하는 특징을 나타냈다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A2A2A01067872)

References

1. Intelligent Engineering "company profile: sandwich plate system", November, 2009
2. Intelligent Engineering "Engineering Design Guidelines for SPS Floors", October, 2010
3. Y.K. Ju, D.Y. Kim, S.D. Kim, S.W. Yoon, Y.K. Lee, and D.H. Kim "Dynamic Characteristics of the New Composite Floor System", Intern

- ational Journal of Steel Structures, Vol. 8, No. 4, p.347-356, 2008
4. G.C. Kim and K.M. Kim "A Study on the Characteristics of Vibration and Impact Sound at the Hollow Slab", Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction, Vol. 23, No. 4, p.59-69, 2007
5. M.G. Kim, H.J. Park, D.G. Lee, H.S. Hyun, and H.S. Kim "Performance Evaluation of Floor Vibration of Biaxial Hollow Slab Subjected to Walking Load", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 13, No. 5, p.11-21, 2009
6. S.W. Yoon "Dynamic Characteristic of Post-tensioned Void Slab", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 12, No. 3, p.89-95, 2012
7. A.L. Smith, S.J. Hicks, and P.J. Devine "Design of Floors for Vibration: A New Approach", SCI P354, The Steel Construction Institute, 2007, UK
8. D.E. Allen and T.M. Murray "Design criterion for vibrations due to walking", Eng. J., American Institute of Steel Construction, p.117-129, 1993
9. The Architectural Institute of Korea, "Design Guidelines & Commentary: Composite Deck Slabs", 1998
10. The Small and Medium Business Administration, "4L Parking Building System", R&D project final report, 2014
11. M. Wolski, J.M. Ricles, and R. Sause "Experimental Study of a Self-Centering Beam-Column Connection with Bottom Flange Friction Device", Journal of Structural Engineering, Vol. 135, No. 5, p.479-488, 2009

- Received : October 06, 2014
- Revised : November 12, 2014
- Accepted : November 13, 2014