

iFLASH 시스템의 진동특성 연구

Vibration Characteristics of iFLASH System

이종호*
Lee, Jong-Ho

임도성**
Lim, Do-Sung

주영규***
Ju, Young K.

윤성원****
Yoon, Sung-Won

Abstract

With the recent trend to construct high-rise and large buildings, the steel structure system is widely used, but there are not enough studies on the vibration characteristics of the iFLASH system on the buildings. Therefore, in this study, we performed a vibration measurement of the natural frequency and damping ratio in the stage of iFLASH panel, composite, frame completion and cladding completion. The result findings suggest that the damping ratio after the cladding completion has a greater effect on the reduction of the damping ratio, than the stage after the frame completion.

Keywords : iFLASH, Natural frequency, Damping ratio, Vibration characteristics

1. 서론

바닥슬래브 진동에 대한 사용성검토를 위한 해외의 기준은 일본의 거주성능 평가지침¹⁾, GSA²⁾, CSA³⁾, 수정Meister⁴⁾ 등이 있다. 이 기준에서는 바닥슬래브의 진동평가 시 슬래브의 감쇠율을 고려하고 있으며, 감쇠율이 커짐에 따라 진동허용치를 크게 규정하고 있다. AISC 설계지침⁵⁾에서는 철골조 바닥슬래브의 감쇠율(Damping ratio)로서 2~5% 사이를 제안하고 있다⁶⁾.

그러나 미국, 호주 등지에서 시작된 두께 1.0 mm 전후의 표면처리 경량형강을 이용한 스틸하우스는 일반적으로 사무소 철골조 건물과는 달리 천장 높

이까지 연결되어 있는 칸막이 벽의 양이 비교적 많고, 용접이나 고력볼트 대신에 나사를 사용하고 있다. 이러한 이유 등으로 인하여 스틸하우스의 감쇠율은 1인 보행진동시 감쇠율은 9.14%로서 일반 철골조 사무소의 감쇠율인 2~5%보다 매우 높은 감쇠율을 보이고 있다. 이와 같이 철골조 시스템에 따라서 감쇠율은 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다⁶⁾.

최근 강판사이에 고분사 소재의 일종인 특수나노 소재를 충전한 합성 패널로 구성되는 슬래브 시스템(이하 iFLASH 시스템)이 기존 철골조의 데크플레이트 슬래브를 대신하여 사용하는 시도가 되고 있다. 이 시스템은 기존에 사용되던 데크플레이트 슬래브에 비하여 공기 및 시공성 측면에서 많은 장점을 가지고 있으며, 경제성 검토를 통하여 구조물량을 약 10%, 공사기간을 약 25% 줄임으로써 공사비를 저감할 수 있는 것으로 알려져있다⁷⁾.

그러나 이 새로운 시스템의 부재단위의 감쇠율은 1.26%로 알려져 있으나⁷⁾, 실제 철골조건물에 적용 시 감쇠율은 아직 밝혀지지 않았으며, 기존 철골조 건물의 감쇠율인 2~5%와 비교하여 어느 정도의 감쇠율이 있는지 알려져 있지 않은 실정이다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해, 이 논문

* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과 석사과정
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology.

** 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과 석사과정
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology.

*** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, 공학박사
School of CEAE, Korea University, Prof.

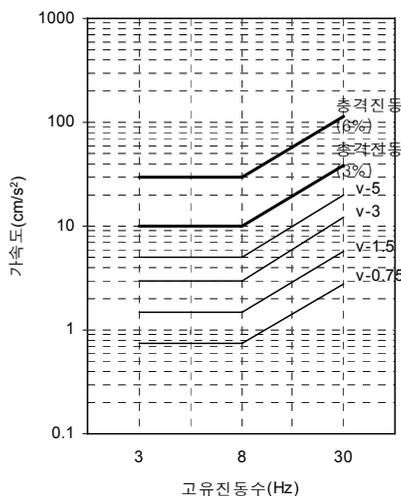
**** 교신저자, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, Prof.
Tel: 02-970-6587 Fax: 02-979-6563
E-mail: swyoon@seoultech.ac.kr

서는 기존에 사용되어 왔던 상·하부 얇은 강판 사이에 특수 나노소재를 충전한 iFLASH System을 사용하였으며, 바닥재의 감쇠율을 파악하기 위해서 iFLASH System이 적용된 현장에서 시공단계별 진동 특성을 단일부재, 합성부재, 골조 완공 후, 마감 완공 후로 분석하였다. 기존의 데크플레이트를 사용한 철 골조의 감쇠율과 비교하여 보행하중에 대한 사용성 평가의 기본 자료로 제시하고자 한다.

2. 진동기준 및 감쇠율 평가법

2.1 진동기준

일본의 거주성능 평가지침, CSA, GSA, 수정 Meister에서는 바닥슬래브의 진동평가지침 슬래브의 감쇠율을 고려하고 있다. 이 진동허용치를 <Fig. 1>의 일본 거주성능 평가지침을 예로 들어 설명하면 충격하중의 경우 감쇠율이 3%에서 6%로 증가하면 3Hz~30Hz 진동수영역에서 허용가속도가 3배가 됨을 알 수 있다. 또한 CSA기준에서도 비슷한 방법으로 보행진동시의 진동평가곡선을 연속진동보다 진동허용치를 크게 하면서, 감쇠율 3%, 6%, 12% 세 가지를 제시하고 있다^{3),6)}.



<Fig. 1> Japanese guideline¹⁾

2.2 감쇠율 산정법

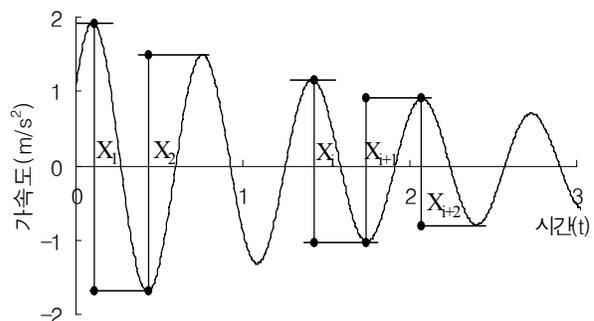
자유진동 파형의 감쇠율 산정은 대수감소법 (Logarithmic decrement method)이 일반적으로 사용된다. 감쇠율을 산정할 때에 가속도 진폭을 읽는 방법은 편진폭과 양진폭을 읽는 두 가지가 있다. 그러나 편진폭의 경우는 파형의 零線의 설정에 특히 주의할 필요가 있다. 이 零線의 측정오차는 측정파형이 전반적으로 작거나 진폭이 작게 되는 파형의 후반부에 오차가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 오차를 줄이기 위하여 양진폭을 사용하였다⁸⁾. 양진폭을 사용하는 경우의 감쇠율 산정식은 식(1)과 같다. 식 (1)을 사용하여 감쇠율을 구하는 경우에는 되도록 많은 진폭의 X_i 를 <Fig. 2>와 같이 순차적으로 읽었다⁶⁾.

$$\xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{X_i}{X_{i+2n}} \times 100 \quad (1)$$

ξ : 1차감쇠율(%)

X_i : 반주기 마다의 양진폭

n : 주기



<Fig. 2> Evaluation of damping ratio^{6),8)}

3. iFLASH System의 이론적 고찰⁹⁾

3.1 iFLASH System의 개요

iFLASH(Innovative Fire-proof Light-weighted Shallow Hybrid) System은 강판사이에 고분사 소재의 일종인 특수나노소재를 충전한 합성 패널로 구성되는 슬래브 시스템으로서, 세장한 두께와 경량

성으로 구조적 효율성을 도모할 수 있는 혁신적인 바닥구조 시스템이다. 충전재로 사용된 특수나노소재는 iFLASH System을 실현하기 위하여 개발된 신소재로서 강재와 높은 부착력을 발휘하며, 경량이므로 자중을 저감시킨다.

3.2 iFLASH System의 특징

iFLASH System에 사용된 특수나노소재는 높은 구조성능 뿐 아니라 높은 열저항 성능을 가지는 물질이다. 이를 통해서 iFLASH System은 높은 내화 성능 및 단열성능을 발휘 할 수 있다.

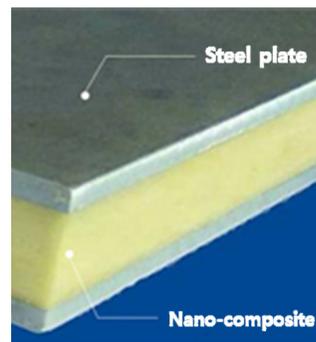
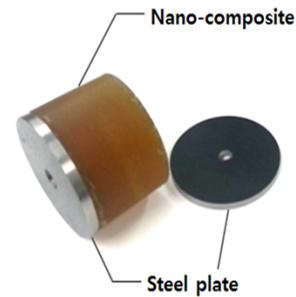
또한, 특수나노소재는 고분자계열의 탄성중합체로서 높은 충격 흡수 성능을 통하여 방폭 및 진동저항 성능도 확보하였다. 특히 iFLASH System은 기존에 사용되던 데크플레이트 슬래브에 비하여 공기 및 시공성 측면에서 많은 장점을 가지고 있으며, 경제성 검토를 통하여 구조물량을 약 10%, 공사기간을 약 25% 줄임으로써 공사비를 저감할 수 있다는 것이 검증되었다⁷⁾.

4. 부재단위 진동실험⁷⁾

4.1 실험적용 형상 및 종류

진동계측 실험의 iFLASH System 크기는 단일부재는 길이가 6,000mm, 너비가 750mm, 두께는 59mm인 규격을 사용하였다. 상·하부에 위치한 강판(SS400)의 두께는 4.5mm이다⁷⁾. 현장에 실제로 설치된 iFLASH는 건물내부에 2,180mm의 스패에 5,220mm의 폭을 설치하였으며, A모듈 10개와 B모듈 2개를 설치하였다.

A모듈은 2,180*450*25이며, B모듈은 2,180*360*25의 크기이다. A, B 모듈 모두 #4(Ø5.8-150*150)의 와이어메쉬를 하부 강판에 설치하였다¹⁰⁾. 그리고 Slab에서 실험을 하였으며, 현장에 적용한 결과는 <Fig. 3>과 같다.



(a) iFLASH components

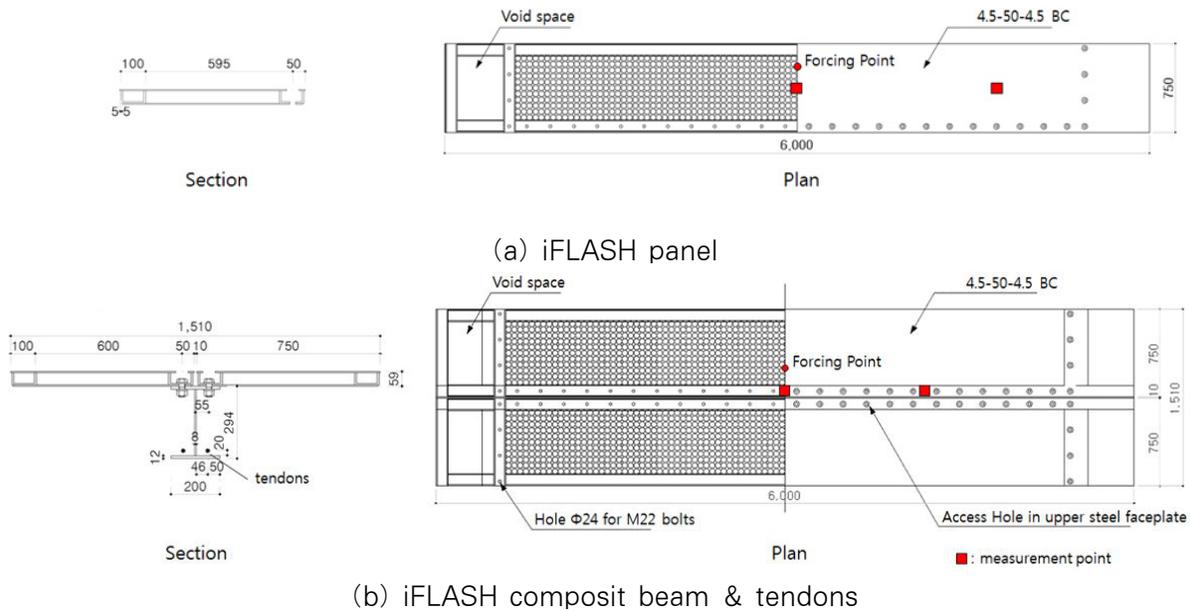


(b) iFLASH shape

<Fig. 3> iFLASH components and shape⁷⁾

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

또한 iFLASH 합성보의 휨강도 및 강성을 증진시키기 위한 목적으로 강재보 웹 좌우 측면, 하부플랜지 상단으로부터 20mm 떨어진 지점에 공칭직경 15.2mm인 강연선을 설치한 실험체를 별도로 제작하였다. 강연선에 도입된 장력의 크기는 강연선 하나당 약 26.8kN으로 해당 값은 강재보와 iFLASH 패널의 자중에 의한 처짐을 상쇄할 수 있을 정도의 긴장력에 해당된다. 각 실험체별 상세 및 일람을 <Fig. 4>와 <Table 1>에 나타냈다⁷⁾.



(b) iFLASH composite beam & tendons

<Fig. 4> Plan & section of specimens⁷⁾

<Table 1> Details of specimens⁷⁾

Specimens	iFLASH			Steel Beam (SM490)	Tendons (SWPC7BN)	
	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)		Diameter	Pre-stressed force
iFLASH panel	6000	750	4.5 - 59 - 4.5	-	-	-
iFLASH composite	6000	750	4.5 - 59 - 4.5	H-294x200x8x12	-	-
iFLASH composite beam with post-tensioned tendons	6000	750 x 2	4.5 - 59 - 4.5	H-294x200x8x12	15.2	26.8kN per tendon

4.2 실험체 Setup 및 계측계획

각 실험체별로 바닥 상단에서 굴절운동을 통해 자유진동을 발생시켰으며, 이를 통해 구조물의 고유진동수와 감쇠율을 평가하였다. <Fig. 4>에 굴절운동 지점 및 가속도 계측점을 표기하였다. 계측 위치는 구조물의 동적 특성을 대표할 수 있는 위치를 선정하였으며, 굴절운동은 계측 위치로부터 20cm 이내에서 가진하였다. <Table 2>는 진동가속도 계측에 사용된 장비 사양이다⁷⁾.

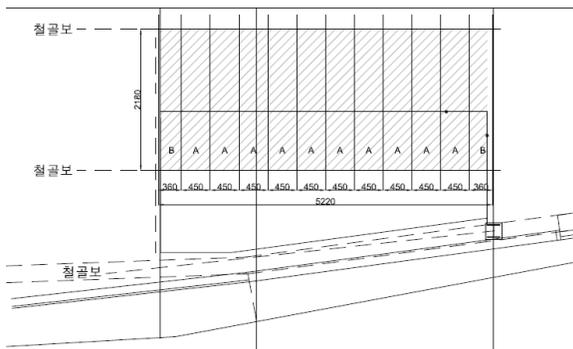
iFLASH System의 현장적용 사진과 도면은 다음 <Fig. 5>와 같다.

<Table 2> Measurement equipments⁷⁾

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



(a) iFLASH installation view



(b) iFLASH installation plan¹⁰⁾

〈Fig. 5〉 iFLASH System installation

5. 현장 적용 후 진동실험

5.1 계측계획 및 실험종류

진동원은 충격하중과 보행하중 두 가지로 실험의 종류를 선정하였다. 충격하중은 자유진동실험으로서 뒤꿈치 충격을 사용하여 고유진동수와 감쇠율을 분석하였다.

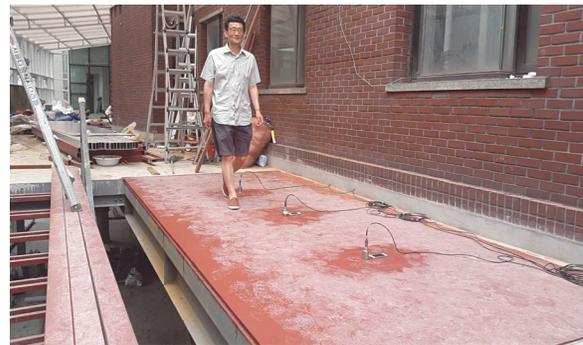
시공단계별 진동특성을 분석하기 위해 단일부재, 합성부재, 골조 완공 후, 마감 완공 후 실험을 통하여 부재의 부착과 마감재 등이 고유진동수와 감쇠율의 변화에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다¹¹⁾.

5.2 실험방법

바닥판의 응답 측정은 하중이 바닥판 중앙부에 위치할 때 응답이 가장 커지므로 센서는 슬래브의 중앙을 포함한 3곳의 위치에 센서를 설치하였고, 센서가 설치된 곳으로 보행을 실시하여 가진하였다.

가진 시 센서의 움직임을 방지하기 위하여 센서와 연결케이블을 견고히 바닥슬래브에 부착하였다.

시공단계별 진동특성을 분석하기 위해 보행하중 실험으로 몸무게 70Kg의 사람이 진동수 2Hz를 유지하여 센서에서 수평방향으로 30cm 떨어진 곳을 중심으로 왕복 이동하며 바닥판에 보행하중을 가진하였다. 보행하중은 <Fig. 6>과 같이 1인 보행하중을 사용하였다¹²⁾.



〈Fig. 6〉 Vibration test¹³⁾

이와 같은 실험을 단일부재, Slab 설치 후, Slab 마감 후 별로 수행하였고, 모든 실험은 3회씩 수행하여 평균값으로 평가하였다. 실험에 있어서 각 시공단계는 <Table 3>과 같다.

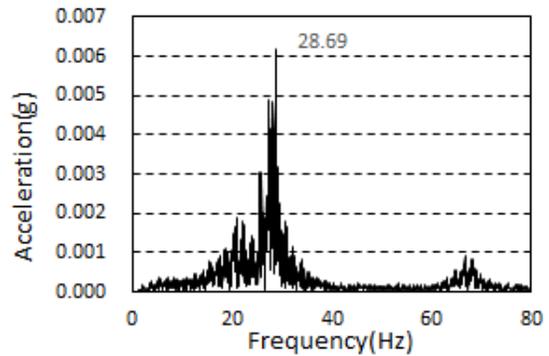
〈Table 3〉 Construction Phase

Construction phase	Experiment
First	iFLASH beam
Second	Composit beam
Third	Frame completion
Fourth	Cladding completion

제작된 iFLASH System의 적용은 <Fig. 7>과 같이 철골보 위에 실시하였으며, 해당 Slab에 단순히 지지하였다. 실험을 위해서 ICP Type 계측장비를 통하여 계측을 진행하였고, 계측 위치는 구조물의 동적 특성을 대표할 수 있는 3곳의 지점에서 계측을 진행하였다.



〈Fig. 7〉 Measurement point



〈Fig. 8〉 Power spectrum of frame completed stage¹³⁾

6. 실험 결과

6.1 고유진동수

iFLASH의 골조 완공 후, 마감 완공 후의 슬래브에 대한 파워스펙트럼은 각각 3회씩 실험을 실시하여 얻어진 값을 <Table 4>에 평균값을 나타냈다.

〈Table 4〉 Natural frequency¹³⁾

Construction phase	Natural frequency (Hz)
	Experimental value, E
Frame completion	27.6
Cladding completion	28.5

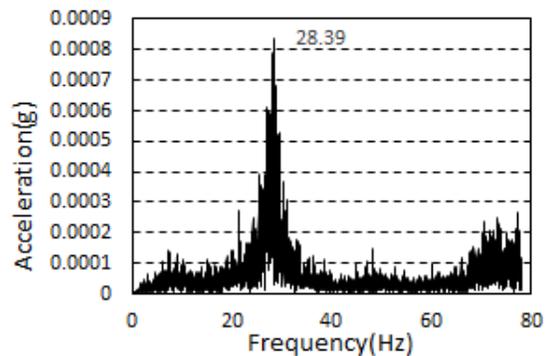
iFLASH의 골조 완공 후의 고유진동수 평균값은 27.6Hz로 나타났고, 마감 완공 후의 슬래브에 고유진동수의 평균값은 28.5Hz로 3.26%의 차이를 보이고 있다.

iFLASH의 골조 완공 후 그리고 마감 완공 후의 평균을 구하기 위한 각각의 실험으로부터 얻은 고유진동수는 <Table 5>에 나타냈다.

<Figs. 8~9>는 골조 완공 후, 마감 완공 후의 파워스펙트럼 중 일부를 나타냈다.

〈Table 5〉 Natural frequency of specimens

Construction phase	Natural frequency(Hz)			
	1st	2nd	3rd	Average
Frame completion	28.69	27.18	26.86	27.6
Cladding completion	28.39	28.63	28.41	28.5



〈Fig. 9〉 Power spectrum of cladding completed stage¹³⁾

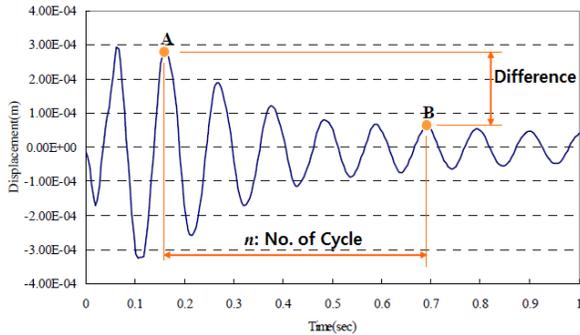
6.2 감쇠율

이 연구에서는 계측된 진동 데이터로부터 해당 시스템의 감쇠율을 계산하기 위해 대수감소법을 적용하였다. 대수감소율(對數減衰率)은 감쇠 자유 진동하는 물체의 진폭(Amplitude)이 감소하는 정도를 나타내는 값으로 식 (2)와 같이 n개의 주기가 지난 시점에서의 진폭의 감소비를 자연대수를 취해 구한 것이다.

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

여기서 A와 B는 진폭의 크기이며, n은 주기 횟수를 나타내며, <Fig. 10>과 같다.

각 실험체별 감쇠율을 산정하기 위해서 시계열 파형 중 1차 모드 자유진동파형을 이용하여 <Figs. 12~15>와 같은 자유진동파형을 얻었으며, 각각 2~3회씩 실험으로부터 얻어진 값은 <Table 6>에 평균값을 나타냈다.

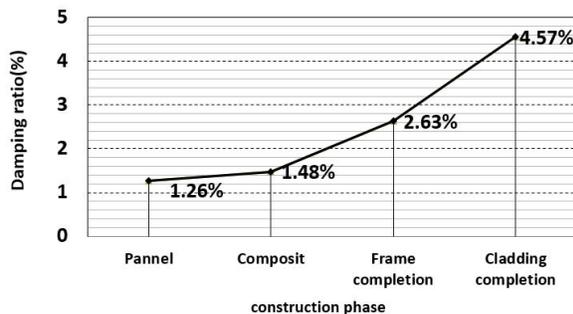


〈Fig. 10〉 Logarithmic decrement⁷⁾

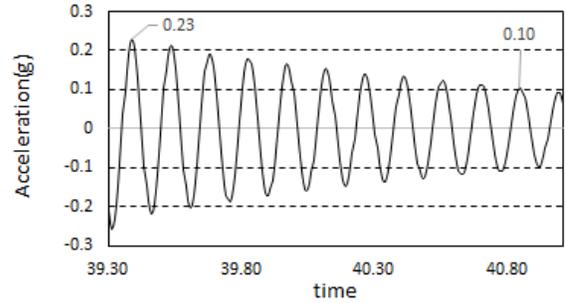
〈Table 6〉 Damping ratio of specimens

Specimens	Damping ratio (%)
iFLASH panel	1.26
iFLASH composite panel	1.48
Frame completion	2.63
Cladding completion	4.57

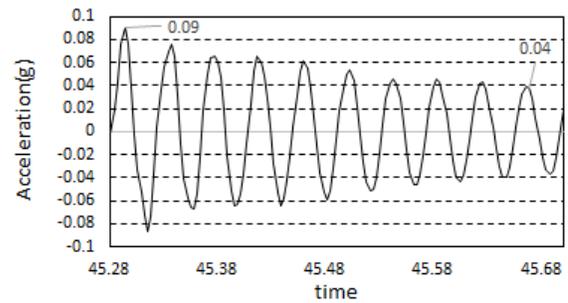
iFLASH 단일부재와 iFLASH 합성부재의 경우, 계측된 감쇠율이 각각 1.26%와 1.48%로 2.2%의 오차율로 근소한 차이를 보이고 있다. 또한, 골조가 완공된 감쇠율은 2.63%로 나타났으며, 마감까지 완공된 경우의 4.57%의 감쇠율을 나타내고 있다. iFLASH 단일부재와의 오차율은 3.09%의 감쇠율 차이를 나타내고 있다. 이를 <Fig. 11>의 감쇠율의 그래프를 통해 나타냈다. 또한 기존의 데크플레이트를 사용한 철골조 바닥슬래브의 감쇠율이 2~5% 사이에 있는 점을 감안할 때, iFLASH 바닥 패널의 감쇠율은 기존의 철골조와 동등한 감쇠율 성능을 가지고 있음을 확인하였다.



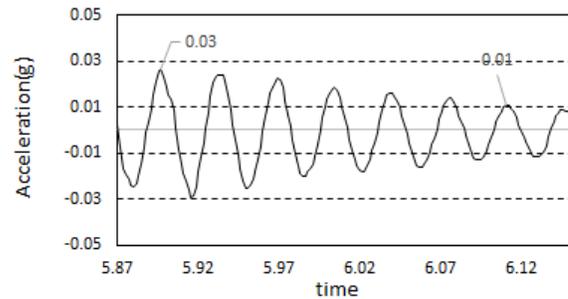
〈Fig. 11〉 Damping ratio graph



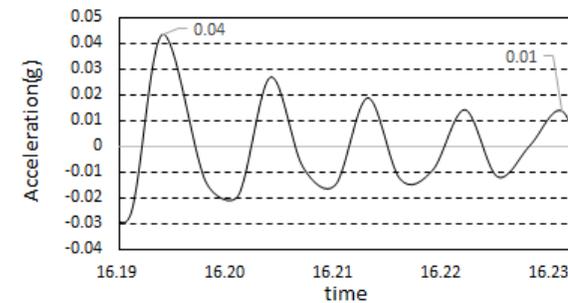
〈Fig. 12〉 Damping ratio of iFLASH panel



〈Fig. 13〉 Damping ratio of iFLASH composite panel



〈Fig. 14〉 Damping ratio of frame¹³⁾



〈Fig. 15〉 Damping ratio of cladding completion¹³⁾

iFLASH 단일부재, iFLASH 합성부재, 골조 완공 후 그리고 마감 완공 후의 감쇠율 평균을 구하기 위한 각각의 실험으로부터 발췌한 그래프를 식 (2)에 의한 대수감소법 계산 결과로부터 얻은 값을 <Table 7>에 나타냈다.

<Table 7> Natural frequency of specimens

Construction phase	Damping ratio(%)			
	1st	2nd	3rd	Average
iFlash panel	NA			1.26
iFlash composite panel	1.52	1.44	NA	1.48
Frame completion	2.52	3.09	2.28	2.63
Cladding completion	4.46	4.79	4.44	4.57

7. 결론

iFLASH System은 강관사이에 고분사 소재의 일종인 특수나노소재를 충전한 합성 패널로 구성된다. 본 시스템에 대한 동적 특성을 평가하기 위해 진동 계측을 실시하였으며, 이를 통해 고유진동수 및 감쇠율을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

계측된 시계열 파형으로부터 대수감소법에 의해 분석된 평균 감쇠율의 값은 iFLASH 바닥 패널의 감쇠율은 1.26%, iFLASH 합성부재의 감쇠율은 1.48%, 골조 완공 후가 2.63% 그리고 마감 완공 후가 4.57%로 시공 단계별로 감쇠율이 증가되는 경향을 파악하였다. 또한 기존의 테크플레이트를 사용한 철골조 바닥슬래브의 감쇠율이 2~5% 사이에 있는 점을 감안할 때, iFLASH 바닥 패널의 감쇠율은 기존의 철골조와 동등한 감쇠율 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2013R1A2A2A01067872)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration, the Architectural Institute of Japan pp 1 - 34, 1991
- GSA, General Services Administration, Washington, U.S.A.
- CSA, Canadian Standard CAN3-S16. 1-M89, Steel Structures for Buildings, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, 1989
- Murray, T. M., Design to Prevent Floor Vibration, AISC Engineering Journal, Vol. 12, No. 3, pp 82-87, 1975
- Murray, T.M. Allen, D. E., Ungar, E. E., Floor Vibration Due to Human Activity, Design Guide Series II, AISC, Chicago, IL., 1997
- S.W. Yoon, Damping Ratio of Light Gauge Steel-Framed Floors, Journal of the architectural institute of Korea, pp 19-26, 2000
- J.H.Ryu, Y.K.Kyu, S.W.Yoon Dynamic Characteristic of Composite Beam using the Sandwich Plate System, Journal of the Korean Association for Spatial Structures Vol. 14, No.4, pp.65~72, December, 2014
- Vibration test of building, Architectural Institute of Japan, pp 44 - 49, 1978
- Y.Y.Kim Flexural capacity of nano-composite infilled iFLASH system, Thesis of Korea university, 2016

10. M.J.Park, Y.Y.Kim, J.H.Ryu, J.S.Kim, B.H. Do, Y.K.Ju, Application of iFLASH System for Nambuk Church, Journal of the architectural institute of Korea, Vol. 35, No. 2, PP389~390
October, 2015
11. S.W.Yoon, Dynamic Characteristic of post-tensioned Void Slab, Journal of the Korean Association for Spatial Structures Vol. 12, No. 3, PP.89~95, 2012
12. Y.K.Lee, Y.K.Ju, S.W.Yoon, D.H.Kim, S.D.Kim Study on the Vibration Characteristics of Slab With iTECH Composite System for Each Construction Step Vol. 21, No. 3, pp.19~27. March, 2005
13. J.H.Lee, Y.K.Ju, S.W.Yoon, Study on the Vibration Characteristics of iFLASH System, Proceedings of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 12, No. 1, May, 2016

- Received : June 15, 2016
- Revised : August 08, 2016
- Accepted : August 19, 2016