

프리캐스트 콘크리트 바닥판의 수직진동 허용치 평가

Performance Evaluation of Vertical Vibration of Precast Concrete Slabs

허석재* · 이상현† · 조승호* · 정란* · 김성배** · 박성순***

Seok-Jae Heo , Sang-Hyun Lee, Seung-Ho Cho, Lan Chung , Sung-Bae Kim , Sung-Soon Park

Key Words : Waffle slab(WAS 슬래브), Double-tee slab(더블티 슬래브), vertical vibration(수직 진동), serviceability(사용성)

ABSTRACT

In this study, the serviceability of Waffle shaped(WAS) and Double-Tee(DT) precast concrete slabs was evaluated and compared based on the vertical acceleration magnitude induced by walking and heel drop loads. Tests were conducted for practical building structures (a shopping mall in Hanam) of which floor systems used WAS and DT slabs. Natural frequencies of the slabs were similar to those obtained by using analytical models. The measured acceleration level was evaluated by vertical floor acceleration criteria presented by ISO-2631, AIJ(1991, Japan), and a previous study regarding floor vibration limit. Test results showed that both WAS and DT slabs satisfied all the criteria and the maximum acceleration level of WAS slabs was lower than that of DT slabs.

1. 서론

최근 건축 구조물은 사용자들의 다양한 요구와 구조재료 및 시공기술의 발달에 따라 장스팬화, 경량화가 되어가고 있다. 또한 이러한 경향은 구조물의 진동수 및 감쇠비를 감소시키고 있다. 건축물의 바닥판은 사람의 보행과 같은 작은 하중에도 바닥진동이 발생하여 사용자들의 불쾌감을 초래할 수 있다.

국제 표준화 기구(ISO)에서는 ISO2631-2⁽⁴⁾를 설정하여 보행하중(heel-drop load)에 의해 발생하는 진동 가속도에 대한 인간의 감지도를 측정하여 최저기준으로 정하고, 여기에 사무실이나 주거영역에는 10, 쇼핑몰에는 30, 교량에는 100 등의 계수를 적용한 진동의 기준치를 최대가속도로 제한하였다. 또한 일본건축학회(AIJ)에서는 건축물의 진동에 관한 거주성능 평가지침·동해설⁽⁵⁾(1991)을 두어 건축물의 바닥에서 발생하는 연직진동을 평가하는 경우에 적용하였다. 여기서 대상 건축물의 바닥용도는 주거, 사무소 및 이와 유사한 바닥이다. 평가방법으로는 진동종별 및 건축물의

용도별 성능평가 구분을 사용하여 진동종별 1은 연속 진동 및 간헐적으로 반복되는 진동을 받는 바닥, 진동종별 2는 충격진동을 받는 감쇠성이 낮은 바닥, 진동종별 3은 충격진동을 받는 감쇠성이 높은 바닥으로 구분되어있다. 등급2는 표준적인 판단근거로 사용되며, 등급3은 제한치이다.

Table 1 Japan vibration criteria⁽⁵⁾

Vibration`s service		Vibration 1			Vibration 2	Vibration 3
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 3	Class 3
house	bed-sitting room	V-0.75	V-1.5	V-3	V-5	V-10
office	conference room	V-1.5	V-3	V-5	V-10	V-30
	general room	V-3	V-5	V-5	V-10	V-30

국내의 진동에 관한 사용성 기준은 1999년 발표된 소음진동 규제법 시행규칙이 있으나, 해외기준을 그대로 적용한 것이다. 합성테크 바닥구조 설계기준에서는 슬래브의 경계 조건에 따라 고유진동수 계산식을 제시하고 있으며 고유진동수가 15 Hz 이상이 되도록 요구하고 있다. 또한 철근콘크리트 구조 설계기준⁽⁶⁾에서는 5 ~ 8 Hz 이상이 되도록 요구하고 있다. 또한 냉간성형강 구조설계 기준⁽⁷⁾에서는 바닥 구조의 고유진동수 목표치를 목조 15 Hz, 철근콘크리트조

† 교신저자; 단국대학교 건축공학과
E-mail : lshyun00@dankook.ac.kr
Tel : (031) 8005-3735, Fax : (031) 8005-2643

* 정회원, 단국대학교 건축공학과

** (주)원구조연구소 연구소장

*** 신세계건설(주) 기술팀 과장

20 Hz 이상을 요구하고 있다. 마지막으로 강구조 한계상태 설계기준⁽⁸⁾에는 “바닥구조는 바닥판, 바닥보, 천장 및 칸막이벽의 상하진동으로 불쾌감을 유발하지 않도록 바닥구조의 강성, 고유진동수 및 감쇠효과 등을 고려한 설계를 한다.”라고 명시되어 있다. 그리고 사람들의 진동감지성을 반영하기 위하여 국내 논문에서 제안된 인지곡선이 있다⁽¹³⁾.

대형할인매장과 같이 모듈화되고, 장스팬을 요구하는 건축물에서는 바닥판을 PC부재로 사용하여 공사의 효율성을 높이는 것이 유리하다. 최근에 시공되는 대형할인매장에서는 PC부재인 더블티 슬래브를 바닥판을 주로 사용한다. 하지만 조립식 구조의 단점인 접합부 균열, 누수 등의 문제로 WAS 슬래브라는 새로운 형상의 PC부재^(9,10,11)가 더블티 슬래브의 대안으로 개발되었다. WAS 슬래브의 구조적 성능 검증은 선행연구에서 수행하였고, 이 논문에서는 PC부재의 수직진동 사용성 평가를 위하여 하남시 대형할인매장 시공에 사용된 더블티 와 WAS 슬래브의 수직진동 가속도를 실험을 통해 측정하였으며, 가속도 시간이력과 FFT를 통한 바닥판의 고유진동수 분석을 통해 DTS와 WAS의 사용성을 국내의 규준에 맞추어 평가하고 비교한다.

2. 진동 측정 실험

2.1 바닥진동 측정 대상 및 실험 개요

바닥진동 측정 대상은 6층 바닥의 WAS 부재를 사용한 슬래브와 7층 바닥의 DTS 부재를 사용한 슬래브로 2가지이다. 또한 가진원은 충격하중과 보행하중으로 구분하여 총 4가지의 경우의 실험이 이루어졌다. 실험은 각 3회씩 실시되었으며, 각 하중에 대한 바닥판의 응답을 이용하여 수직진동 평가에 필요한 고유진동수와 각 하중에 대한 최대가속도값을 구하였고, 이 결과를 바탕으로 바닥진동 인지곡선과 비교 평가하였다.

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3은 하남시 대형할인매장의 바닥시공에 사용된 WAS와 DTS의 사진과 단면도를 나타내고 있다.

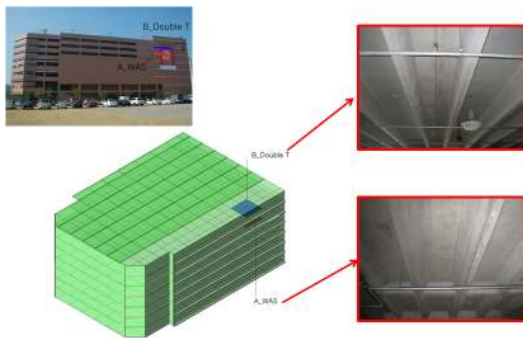


Fig. 1 Building and location of experimental installation

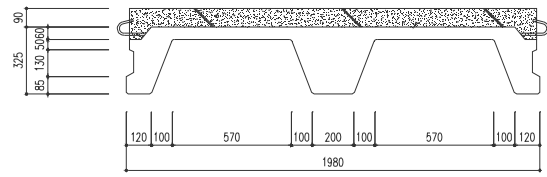


Fig. 2 WAS section detail

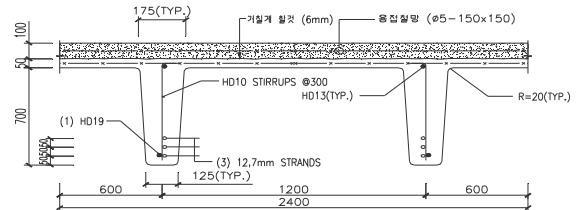


Fig. 3 DTS section detail

2.2 진동 측정 장비

바닥판 수직진동 측정에 사용된 주요 장비는 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 A와 B는 가속도 센서와 MDS 2000이며 C는 NI-DAQ card 그리고 D는 MDS 2000 소프트웨어가 설치된 노트북이다. 여기서 가속도 센서는 바닥의 동적 특성을 모니터링하기 위해 처짐이 많이 발생하는 측정 바닥판의 중앙부에 부착되었다. 그리고 이 센서는 최고 2g (19.61m/s²) 까지 측정가능하며 1축의 진동을 측정하는 스트레인 타입 가속도계이다.

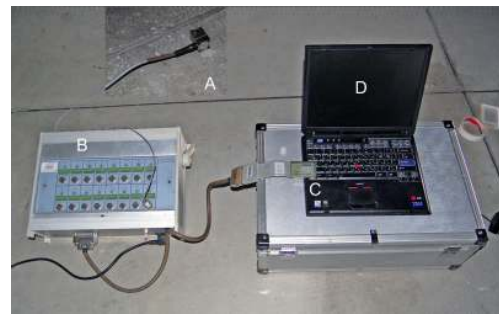


Fig. 4 Vibration Measurement Equipment

2.3 가력 및 데이터 수집 방법

(1) 발 뒤꿈치 가진(Heel drop)

표준적인 발 뒤꿈치 가진은 (750N)의 한 사람이 발 뒤꿈치를 바닥면에서 5cm 정도 들어올렸다가 아래로 내려가면서 충격을 가하는 것이다. 본 연구에서는 연구원 1인 (700N)의 발 뒤꿈치 가진을 실시하였다.

(2) 보행 가진 (Walking)

인간의 보행을 가진원으로 고려한 경우 AISC 기준에서는 보행자의 체중을 700N일 경우로 하여 진동에 대해 고려하도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 약 700N의 몸무

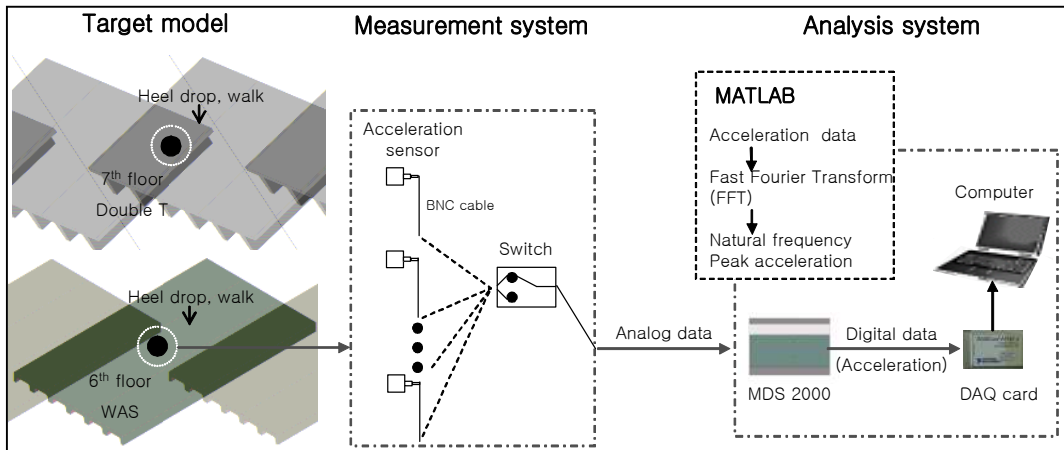


Fig. 5 Experimental setup for test

계를 가진 사람이 2Hz의 일정한 간격으로 중앙부에 설치된 센서를 바라보며 걸어가는 방식으로 가진하였다.

(3) 데이터 수집

데이터 수집은 계산오차를 최소화하기 위하여 샘플데이터 수집환경을 1,000 Hz 환경으로 조성하여 1 초에 1,000 개의 데이터를 수집하였으며 얻어진 데이터는 Matlab 을 이용하여 바닥의 최대가속도와 고유진동수를 분석하였다. Fig. 5 는 가진으로부터 아날로그 데이터가 디지털 데이터로 변경되어 저장된 데이터가 Matlab 을 통해 바닥진동을 분석하는 실험 전체의 시스템을 보여주고 있다.

0.43 ~0.875 % g 로 나타났고, 보행 하중 최대가속도값도 마찬가지로 9.965Hz와 9.52Hz에서 0.373~0.442%g와 0.218 ~0.286 %g로 나타나 결론적으로는 WAS의 고유진동수와 최대가속도가 DTS보다 낮게 측정되어 국제 표준화 기구(ISO)에서 제한하고 있는 쇼핑몰 제한치에는 보다 유리한 것으로 나타났다.

3. 실험결과 분석

3.1 고유진동수 및 최대가속도 산정

먼저 유한요소해석 프로그램의 모드해석을 수행하여 실험대상 바닥판의 고유진동수를 계산하였다. 해석결과 WAS 바닥판의 1차 모드 고유 진동수는 9.87 Hz, DTS 바닥판은 10.86 Hz로 나타났다. Fig. 7은 모드해석결과를 바탕으로 1~100 Hz까지 1 Hz 단위로 Harmonic analysis를 수행하여 나타는 그래프로 고유진동수는 모드해석과 같은 수치로 계산되었다. 해석으로 예측한 고유진동수는 실제 측정된 진동수와 거의 유사한 수치를 나타내었다.

뒤꿈치 하중과 보행 하중에 의한 바닥판 고유진동수와 모드별 고유진동수의 최대가속도값은 각각 주파수 응답함수를 이용하여 구하였다. Fig. 8은 각 실험별 WAS와 DTS 바닥판의 가속도 시력이력 응답을 보여주고 있다.

Fig. 9는 가속도 시간이력 데이터를 고속푸리에변환(FFT)하여 진동수 영역을 나타낸 것이며 이 그래프를 통해 바닥의 모드별 진동수에서의 최대가속도값을 알아낼 수 있다. DTS 와 WAS 의 1 차 모드의 뒤꿈치 하중 최대가속도값은 10.498 Hz와 10.254 Hz에서 각각 약 1.00~1.08 % g 와



(a) Walking (b) heel drop
Fig. 6 Test Loading

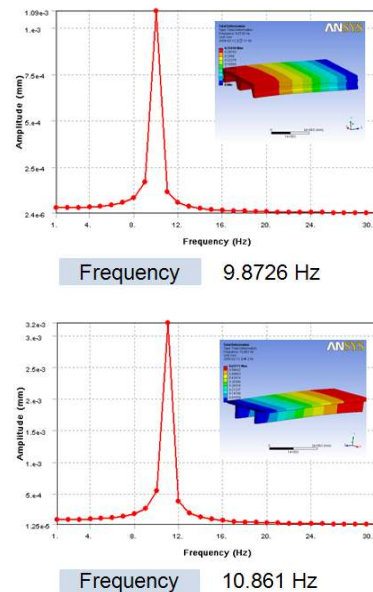
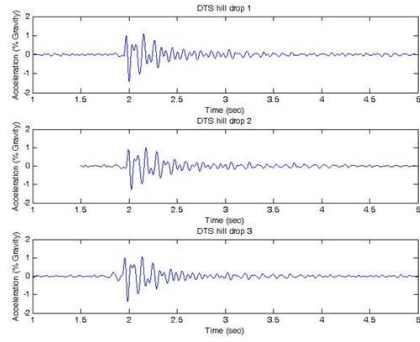
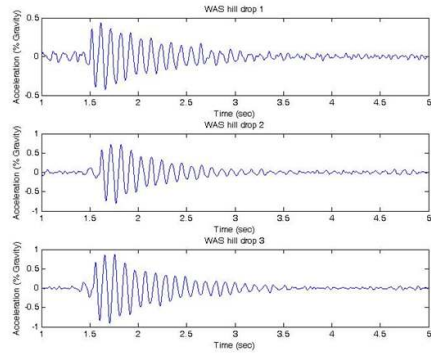


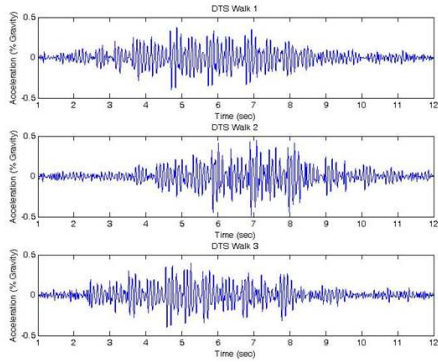
Fig. 7 Finite element analysis result



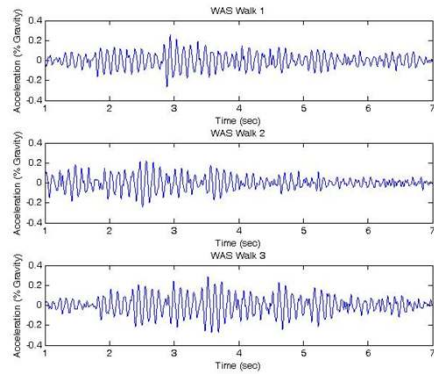
(a) DTS Hill Drop



(b) WAS Hill Drop

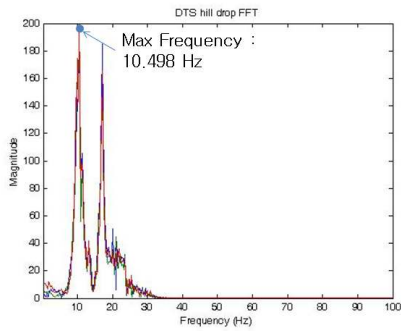


(c) DTS Walk

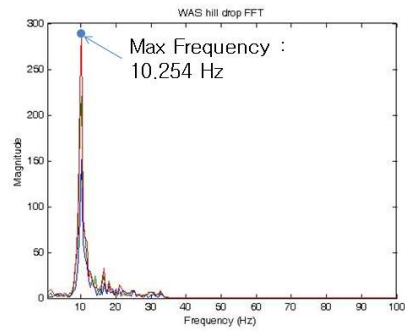


(d) WAS Walk

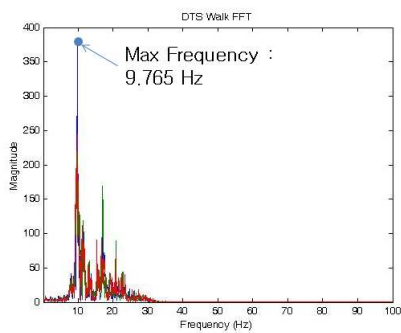
Fig. 8 Time history of acceleration response of the test structures



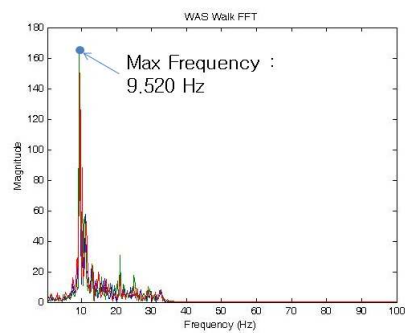
(a) DTS Hill Drop



(b) WAS Hill Drop



(c) DTS Walk



(d) WAS Walk

Fig. 9 Frequency response(FFT)

3.2 국내외 바닥 진동에 관한 기준 및 제한

Fig. 10은 WAS와 DTS의 고유진동수에서의 최대가속도값을 ISO 기준 그래프에 도시화한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 모든 실험결과 값이 쇼핑몰 규준에 만족하는 것으로 나타났고, WAS가 충격하중과 보행하중 모두 DTS보다 아래에 위치해 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig 11은 일본건축학회 규준으로 진동종별로 사무소나 이와 유사한 바닥에 대한 평가는 뒤꿈치하중의 경우 V-10, 보행하중은 V-3을 사용한다. 본 연구의 바닥판 용도는 쇼핑몰이므로 이와 같은 규준을 적용하였다. 뒤꿈치 충격하중에 대하여 두 바닥판 모두 규준에 만족하였으나, 보행하중에 대해서는 WAS는 규준을 만족하나 DTS가 V-3을 약간 초과하여 사용자들이 진동을 인지하고 불편을 느낄 가능성이 있다고 판단된다.

Fig. 12는 진동대 가진실험을 통해 사람이 감지하는 수직진동의 크기를 4영역으로 구분 정리한 수직진동 인지그래프(김도훈, 2003)에 본 진동실험을 통해 얻어진 WAS와 DTS의 고유진동수에서 최대가속도값을 표시한 것이다. 이 기준선은 뒤꿈치 하중에 의한 WAS와 DTS의 수직진동인지를 평가하기 위한 그래프이다. DTS와 WAS는 두 실험체 동일하게 뒤꿈치 하중에 대하여 ‘약하게 인지’라는 평가를 받았다. 하지만 보행 하중의 경우 WAS는 ‘인지하지 못함’이라는 평가를 받은 반면 DTS는 ‘인지하지 못함’과 ‘약하게 인지’사이에 걸쳐있어 두 바닥판을 비교한다면 WAS가 사용성 측면에서 높은 평가를 받을 것으로 판단된다.

Table 2 Test result

test	Hill drop Max acceleration(%g)		Walking Max acceleration(%g)	
	DTS	WAS	DTS	WAS
1st	1.08	0.875	0.442	0.285
2nd	1.07	0.71	0.395	0.266
3rd	1.005	0.43	0.373	0.218
Natural frequency (Hz)				
Experiment	10.498	10.254	9.765	9.52
FEA analysis	10.861	9.872	-	

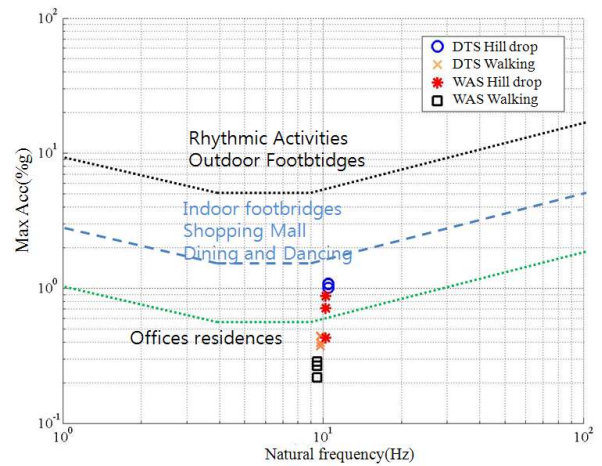


Fig. 10 ISO 2631 standards(1989)

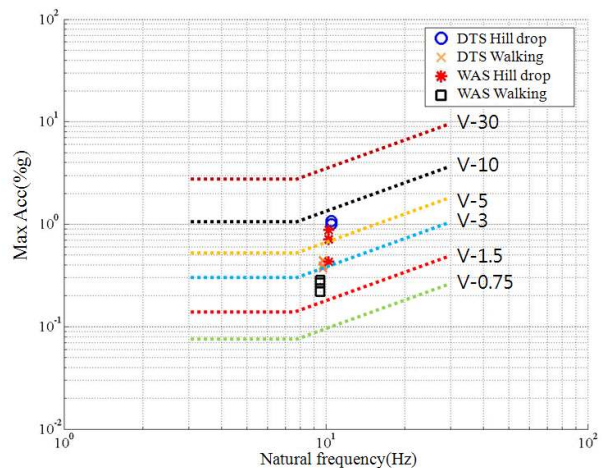


Fig. 11 AJJ criteria (Japan, 1991)

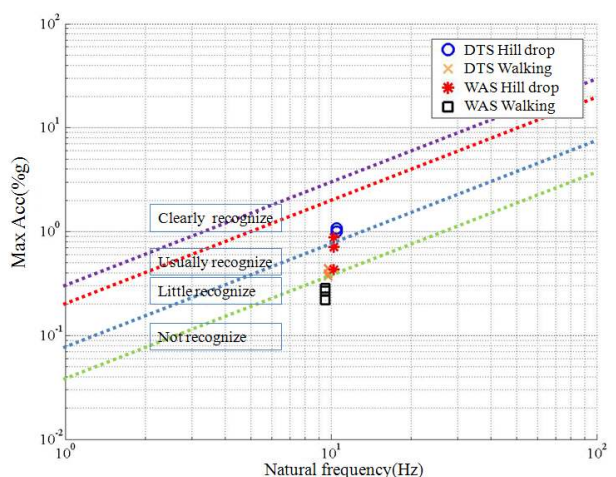


Fig. 12 Korea criteria developed in the previous study (2003)⁽¹²⁾

4. 결 론

경기도 하남시 소재 대형할인매장에 부분적으로 설치된 와플형상의 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 슬래브의 사용성 평가를 위해 기존에 사용되었던 더블티 슬래브와 함께 바닥진동 실험 및 평가를 실시하였다.

- (1) WAS와 DTS의 고유진동수는 각각 9.765~10.498 Hz 와 9.52~10.254 Hz 범위로 국내 철근콘크리트 구조에서 제안한 바닥진동 고유진동수 제한값 최소고유진동수인 8Hz 보다 크게 측정되어 제한값을 만족시켰다.
- (2) 가속도 측면에서는 DTS가 1.005~1.08 %g로 국제 표준화 기구(ISO)에서 정한 쇼핑몰의 바닥 진동수에 따른 최대가속도값 1.5 %g 에 근접하였으나 WAS는 보다 여유있게 0.43~0.875 %g 로 평가되었다.
- (3) 일본건축학회 표준으로 뒤꿈치 충격하중에 대하여 두 바닥판 모두 규준에 만족하였다. 하지만 보행하중에 대해서는 WAS는 규준을 만족하나 DTS가 V-3을 약간 초과하여 사용자들이 진동을 인지하고 불편을 느낄 가능성이 있다고 판단된다.
- (3) 진동 인지그래프와의 비교를 통한 평가에서도 WAS가 보행하중과 뒤꿈치 충격하중에서 각각 '인지 못함'과 '약하게 인지'라는 평가를 받아 모두 '약하게 인지'의 평가를 받은 DTS보다 사용성 측면에서 높은 평가를 받았다.

감사의 글

이 논문은 신세계건설(주), 삼환까뮤, (주)센구조연구소의 도움으로 연구되었으며, 또한 본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업(과제번호: 05건설핵심D6)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Allen, D. E., 1990, "Building Vibration form Human Activities." Concrete International: Design and Construction, 12(6), pp.66-73.
- (2) Allen, D. E. and Murray., 1993, "Desing Criterion for vibrations Due to Walking." Engineering Journal, 4th Qtr, American Institute of Steel Construction, pp. 117-129.
- (3) Ellingwrod, B. and Tallin, A., 1984, "structural Serviceability: Floor Vibrations." Journal of Structural Engineering, Vol. 110, No. 2, ASCE.
- (4) International Standards Organization, 1989, "Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration - Part 2 : Human Exposure to Continuous and

Shock-Induced Vibration in Buildings(1Hz to 80Hz)." International Standard ISO 2631-2.

- (5) 일본건축학회, "건축물의 진동에 관한 주거성능평가지침, 동해설", 1991
- (6) 대한건축학회, *철골·철근콘크리트 구조설계기준 및 해설*, 2000.
- (7) 대한건축학회, *냉간성형강 구조설계 기준 및 해설*, 2001.
- (8) 대한건축학회, *강구조 한계상태 설계기준 및 해설*.
- (9) 허석재, 조승호, 박성순, 이 경우, 이원록, 2007, "WAS 공법을 이용한 부재의 휨성능에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회보학술발표회논문집, Vol. 19, No. 1 pp.99-102.
- (10) 허석재, 조승호, 박성순, 이 경우, 이원록, 2007, "WAS 공법을 이용한 부재의 휨성능에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회보학술발표회논문집, Vol. 19, No. 1 pp.95-98.
- (11) 윤주영, 허석재, 조승호, 정란, 2007, "WAS 이용한 프리캐스트 콘크리트 부재의 접합성능", 한국콘크리트학회가을학술발표회논문집, Vol. 19, No. 2 pp.169-192.
- (12) 강수민 외, 2006, "PC 공법의 국내의 현황분석", 대림산업기술연구소, pp.28-38.
- (13) 김도훈, 2003, "진동대 실험을 통한 바닥판의 수직진동 허용치 제안", 한양대 대학원 석사학위 논문.