

# 와플형과 더블티형 프리캐스트 콘크리트 바닥판의 수직진동 사용성 평가

## Serviceability Performance Evaluation of Vertical Vibration of Waffle Shape and Double-Tee Precast Concrete Slabs

신재상<sup>1)</sup>

Shin, Jae Sang

정란<sup>2)\*</sup>

Chung, Lan

### Abstract

In this study, the serviceability performance of Waffle Shaped(WAS) and Double-Tee(DT) precast concrete slabs were evaluated and compared based on the vertical acceleration magnitude induced by walking and heel drop loads. Tests were conducted for practical building structures 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 Peak acceleration level of WA slabs was lower than that of DT slabs.

**Keywords** : Waffle slab, Double-tee slab, Vertical vibration, Serviceability

### 1. 서론

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

국제 표준화 기구(ISO)에서는 ISO2631-2(International Standards Organization, 1989)를 설정하여 보행하중(heel-drop load)에 의해 발생하는 진동 가속도에 대한 인간의 감지도를 측정하여 최저기준으로 정하고, 여기에 사무실이나 주거영역에는 10, 쇼핑물에는 30, 교양에는 100 등의 계수를 적용한 진동의 기준치를 최대가속도로 제한하였다. 또한 일본건축학회(AIJ)에서는 건축물의 진동에 관한 거주성능 평가지침·동해설(1991)을 두어 건축물의 바닥에서 발생하는 연직진동을 Table 1과 같이, 주거, 사무소 및 이와 유사한 바닥 등으로 용도를 달리하여 평가 및 적용하고 있다. 평가방법으로는 진동종별 및 건축물의 용도별 성능평가 구분을 사용하여 진동종별 1

은 연속 진동 및 간헐적으로 반복되는 진동을 받는 바닥, 진동종별 2는 충격진동을 받는 감쇠성이 낮은 바닥, 진동종별 3은 충격진동을 받는 감쇠성이 높은 바닥으로 구분되어 있다. 등급 2는 표준적인 판단근거로 사용되며, 등급 3은 제한치이다.

국내의 진동에 관한 사용성 기준은 1999년 발표된 소음진동 규제법 시행규칙이 있으나, 해외기준을 그대로 적용한 것이다. 설계기준을 보면, 합성데크 바닥구조 설계 기준에서는 슬래브의 경계조건에 따라 고유진동수 계산식을 제시하고 고유진동수가 15 Hz 이상이 되도록 요구

Table 1 Japan vibration criteria(AIJ, 1991)

Vibration		1			2	3
		Class1	Class2	Class3	Class3	Class3
service						
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

1) 정회원, 단국대학교 건축대학 건축공학과 석사과정

2) 정회원, 단국대학교 건축대학 건축공학과 정교수

\* Corresponding author : premier0729@naver.com 031-8005-2641

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

한다. 철근콘크리트구조 설계기준(대한건축학회, 2000)에서는 5~8 Hz 이상이 되도록 요구하고, 냉간성형강 구조 설계 기준(대한건축학회, 2001)에서는 바닥구조의 고유진동수 목표치를 목조 15 Hz, 철근콘크리트조 20 Hz 이상을 요구한다. 강구조 한계상태 설계기준(대한건축학회)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.(김도훈, 2003).

대형할인매장과 같이 모듈화되고, 장스팬을 요구하는 건축물에서는 바닥판을 PC부재로 사용하여 공사의 효율성을 높이는 것이 유리하다. 최근에 시공되는 대형할인매장에서는 PC부재인 더블티 슬래브(Double-tee slab, 이하 DT)을 주로 사용하고 있다. 하지만 조립식 구조의 단점인 접합부 균열, 누수 등의 문제를 해결하기 위하여, 동일한 PC 부재인 와플형상을 갖는 슬래브(Waffle shape slab, 이하 WAS)을 개발하였다(허석재 등, 2007). 이러한 WAS에 대하여 부재와 접합부에 대한 구조적 성능 검증은 선행연구를 통해 수행하였고, 본 연구에서는 수직진동에 대한 사용성을 평가하기 위하여 DT와 WAS가 실제로 시공된 하남시에 위치한 대형할인매장을 대상으로 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 사용한 모드해석과 수직진동에 의해 발생하는 가속도 응답을 측정하는 실험을 수행하였다. 실험을 통해 예측된 가속도 응답을 사용하여 진동발생에 따른 시간이력응답과, 고속푸리에 변환해석(Fast Fourier Transform analysis, FFT)을 통해 파악된 고유진동수를 바탕으로 DT와 WAS의 사용성을 국내외 규준에 맞추어 평가하고 비교하였다.

## 2. 진동 측정 실험

### 2.1 바닥진동 측정 대상 및 실험 개요

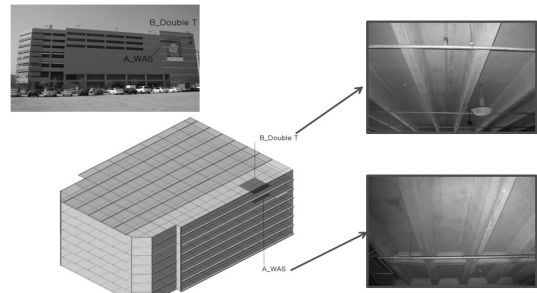
측정대상 구조물은 Photo 1의 (a)과 같이 하남시에 위치한 7층 높이의 상업시설로, 6층 바닥의 WAS부재를 사용한 슬래브와 7층 바닥의 DT부재를 사용한 슬래브로 2가지에 대하여 충격하중과 보행하중으로 구분하여, 총 4가지의 경우에 대하여 각각 3 회씩 실시하였으며, 각 하중에 대한 바닥판의 응답을 이용하여 수직진동 평가에 필요한 고유진동수와 각 하중에 대한 최대가속도값을 구하였고, 이 결과를 바탕으로 바닥진동 인지곡선과 비교 평가하였다. Fig 1은 구조물의 단위 평면도를 나타낸 것이고, Fig. 2, 3는 각 바닥판 시스템의 단면을 나타낸 것이다. 바닥판의 규모의 경우 WAS는 너비방향 1,980mm, 길이방향 10,400mm, 부재높이 325mm이고 DT는 너비

방향 2,395mm, 길이방향 10,460mm, 부재높이 600mm이다. 바닥판의 경계조건은 Photo 1의 (b)에서 보는 바와 같이 슬래브와 보의 접합은 일반적으로 역 T 형보(Inverted Tee Beams)에 단순보로 접합하고, 현장에서 덧침콘크리트를 타설하여 일체화 시키는 방법으로 단순지지로 보았다. 접합면적은 WAS 부재높이인 325 mm이며, DT 부재는 60 mm이다. 장변방향으로는 단순접합으로 덧침콘크리트를 타설하여 일체화 시키는 방법을 사용하였다.

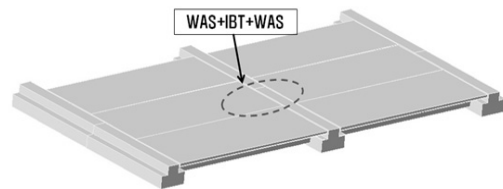
### 2.2 가력 방법

#### 2.2.1 발 뒤꿈치 가진(Heel drop)

표준적인 발 뒤꿈치 가진은 Photo 2의 (b)와 같이 평균체중 750N인 한 사람이 발뒤꿈치를 바닥면에서 5cm



(a) Building and location of experimental installation



(b) A joint part of Slab and Inverted Tee Beams

Photo 1 Outline and Joint part

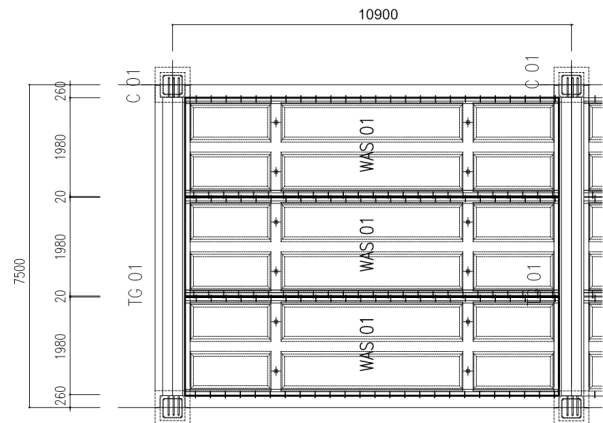


Fig. 1 A unit ground plan of a measurement object building

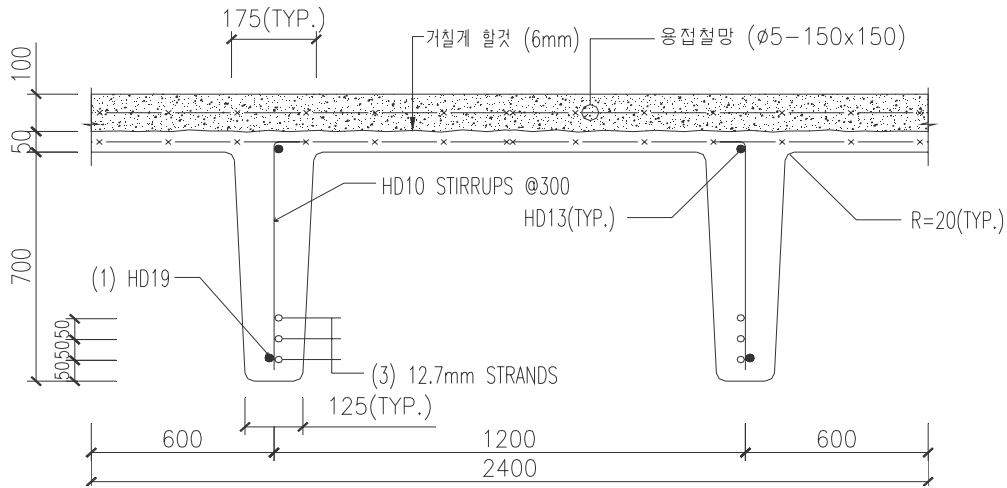


Fig. 2 DT section detail

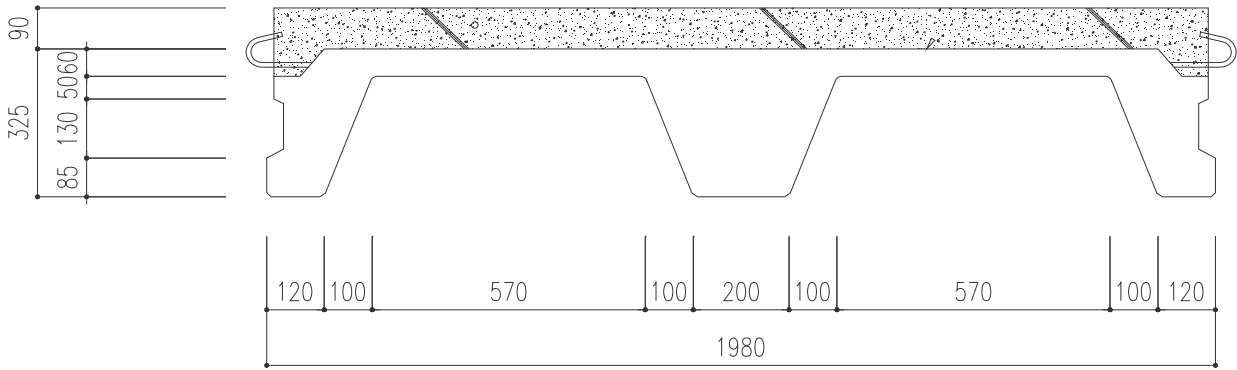


Fig. 3 WAS section detail



(a) Walking (b) heel drop

Photo 2 Test Loading

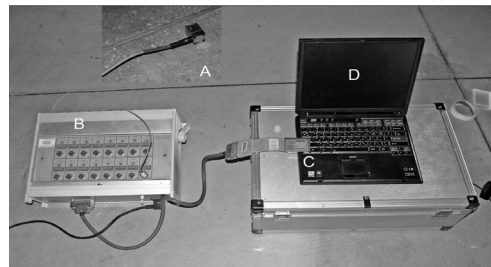


Photo 3 Vibration Measurement Equipment

정도 들어올렸다가 아래로 내려가면서 충격을 가하는 것이다. 본 연구에서는 연구원 1인(700N)의 발 뒤꿈치 가진을 실시하였다.

### 2.2.2 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 몸무게를 가진 사람이 2Hz의 일정한 간격으로 중앙부에

설치된 센서를 바라보며 걸어가는 방식으로 가진하였다.

### 2.3 진동 계측 및 수집

바닥판 수직진동 측정에 사용된 주요 장비는 Photo 3과 같이, 가속도 센서(A)를 바닥의 동적 특성을 모니터링하기 위해 처짐이 많이 발생하는 측정 바닥판의 중앙부에 부착하고, 센서를 통해 계측된 응답을 Amp(B)를 통해 변환한 후, 디지털 신호로 변환(C,D)하여 저장하였다. 본

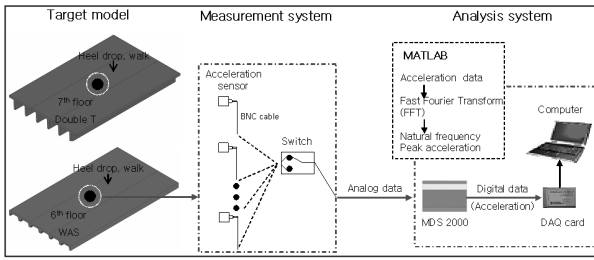


Fig. 4 Experimental setup for test

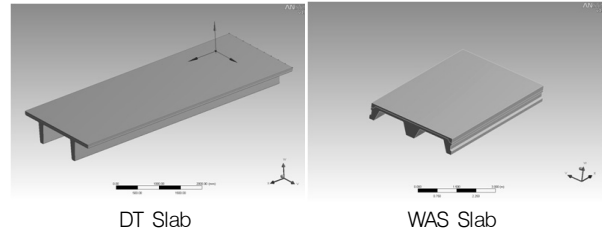
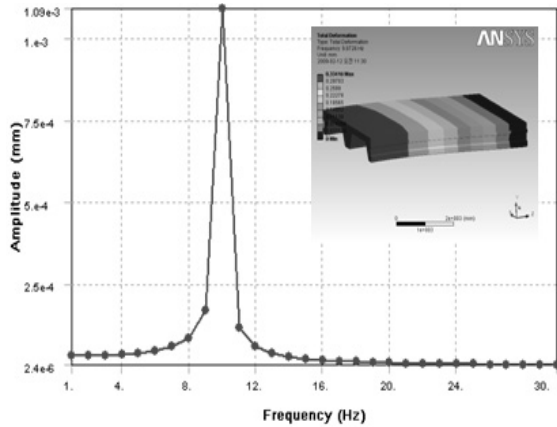
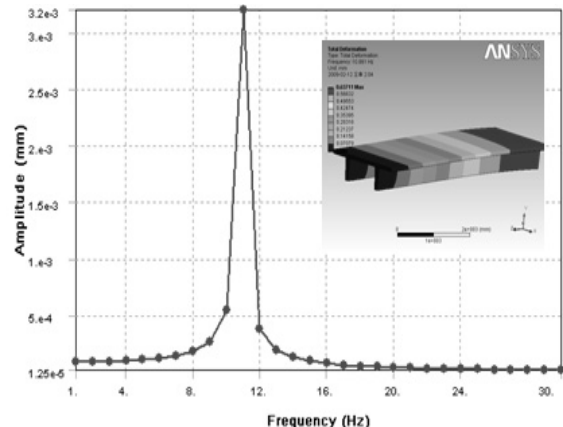


Photo 4 The measurement object floor board modeling that used ansys



(a) DT slab



(b) WAS slab

Fig. 5 Finite element analysis result

실험에 사용된 가속도 센서는 최고  $\pm 2g$  ( $19.61m/s^2$ ) 까지 측정가능하며 1 축의 진동을 측정하는 스트레인 타입 가속도계이다.

데이터 수집은 계산오차를 최소화하기 위하여 샘플데이터 수집간격을 1,000Hz로 하여, 1 초에 1,000 개의 데이터를 수집하였으며 계측된 데이터는 Matlab 을 이용하여 바닥의 최대가속도와 고유진동수를 분석하였다. Fig. 4은 가진으로부터 아날로그 데이터가 디지털 데이터로 변경되어 저장된 데이터가 Matlab 을 통해 바닥진동을 분석하는 실험 전체의 시스템을 보여주고 있다.

### 3. 실험결과 분석

#### 3.1 고유진동수 및 최대가속도 산정

실험체의 물성치는 WAS 및 DT부재에 사용된 콘크리트 배합강도는 35MPa, 철근의 강도는 SD400 ( $f_y = 400MPa$ ) 로 HD10, HD13을 사용하였다. 경계조건은 앞에 2.1절에서와 실제 시공시 접합면의 특성과 동일한 조건으로 입력하여 모델링화했다.

실험 전, Photo 4와 같이 유한요소해석 프로그램인ANSYS V.11을 사용하여 모델링화 한 후 0~30Hz의 주파수 범위를 갖는 조화하중을 1Hz 간격으로 입력하여 모드해석

를 수행하여 실험대상 바닥판의 고유진동수를 파악하였다. 해석결과 WAS의 1차 모드 고유 진동수는 10.86Hz, DT는 9.87Hz로 나타났다. Fig. 5는 모드해석결과를 바탕으로 1~100Hz까지 1Hz 단위로 조화하중 해석을 통해 파악된 진동수영역 분포 그래프로 고유진동수는 모드해석과 같은 수치로 계산되었다.

Fig. 6는 각 실험별 WAS와 D의 가속도 시력이력 응답으로, 각각 3회 측정된 결과가 동일한 응답이력을 갖는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6의 가속도 시간이력을 고속 푸리에 변환(FFT)하여 진동수 영역을 나타낸 것이며 이 그래프를 통해 바닥의 모드별 진동수에서의 최대가속도를 알아낼 수 있다. 뒤꿈치 하중에 대한 DT과 WAS의 1차 모드 고유진동수는 10.498 Hz와 10.254 Hz로 파악되었으며, 보행 하중에 대한 1차 모드 고유진동수는 9.965Hz와 9.52Hz로 파악되었다. 각 하중별 파악된 1차 모드 고유진동수는 모든 실험결과에서 동일하게 나타났으며, 이 결과는 실험 전 수행된 유한요소해석결과와 거의 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다.

이렇게 파악된 1차 모드 고유진동수에서의 최대 가속도는 발뒤꿈치 하중에서 DT가 약 1.00~1.08 % g 의 크기를 WAS가 0.43~0.875 % g 로 나타났고, 보행 하중 최대가속도값도 마찬가지로 0.373~0.442%g와 0.218~0.286%g로 나타나, 결론적으로 WAS와 DT는 고유진

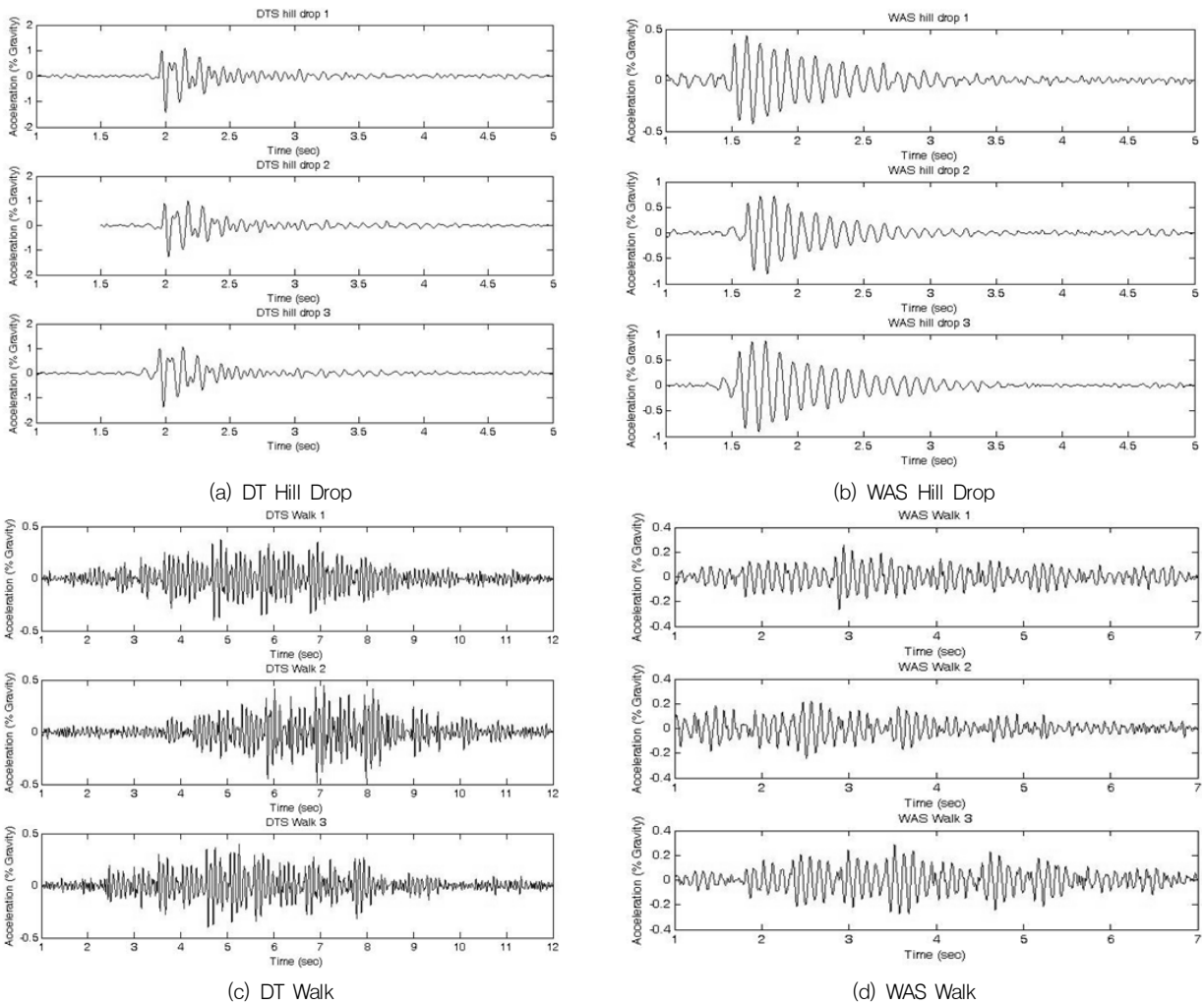


Fig. 6 Time history of acceleration response of the test structures

동수와 최대 가속도가 비슷한 성향을 갖지만 단면상으로 비교해 보았을 때, WAS가 DT에 비해 중량을 감소시키고 슬래브 두께를 감소시켜 층고의 높이를 높일 수 있는 장점이 있을 것으로 기대된다.

### 3.2 국내외 바닥 진동에 관한 기준 및 제한

Fig. 8은 실험을 통해 파악된 WAS와 DT의 고유진동수에서의 RMS(Root mean Square)값을 ISO 기준 그래프(ISO 2631-2:2003)에 도시화한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 모든 실험결과 값이 쇼핑몰 기준에 만족하는 것으로 나타났고, 두 가지 부재는 고유진동수와 RMS 값 모두 근소한 차이를 보일뿐 성능의 차이는 없는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 일본건축학회 기준으로 진동종별로 사무소나 이와 유사한 바닥에 대한 평가는 뒤꿈치하중의 경우 V-10, 보행하중은 V-3을 사용한다. 본 연구의 바닥판

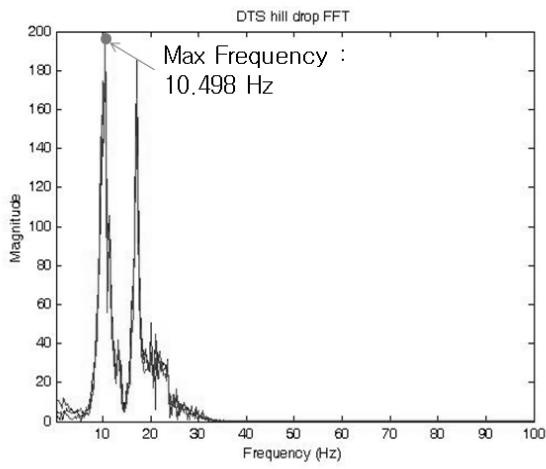
용도는 쇼핑몰이므로 이와 같은 기준을 적용하였다. 뒤꿈치 충격하중에 대하여 두 바닥판 모두 기준에 만족하였으나, 보행하중에 대해서는 WAS는 V-10, 보행하중은 V-3을 사용한다. 본 연구의 바닥판 용도는 쇼핑몰이므로 이와 같은 기준을 적용하였다. 뒤꿈치 충격하중에 대하여 두 바닥판 모두 기준에 만족하였으나, 보행하중에 대해서는 WAS는 기준을 만족하나 DT는 V-3을 약간 초과하여 사용자들이 진동을 인지하고 불편

을 느낄 가능성이 있는 것으로 나타났다.

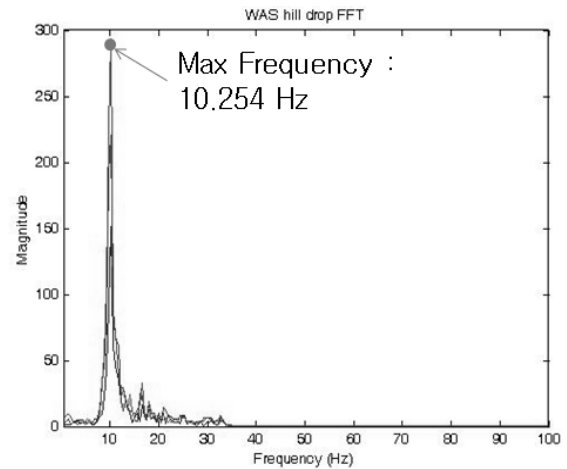
Fig. 10은 진동대 가진실험을 통해 사람이 감지하는 수직진동의 크기를 4영역으로 구분 정리한 수직진동 인지 그래프(김도훈, 2003)에 본 진동실험을 통해 얻어진 WAS와 DT의 고유진동수에서 최대가속도값을 표시한 것이다. 이 기준선은 뒤꿈치 하중에 의한 WAS와 DT의 수직진동인지를 평가하기 위한 그래프이다. DT와 WAS는 두 실험체 동일하게 뒤꿈치 하중에 대하여 ‘약하게 인지’라는 평가를 받았다. 하지만 보행 하중의 경우

WAS는 ‘인지하지 못함’이라는 평가를 받은 반면 DT는 ‘인지하지 못함’과 ‘약하게 인지’ 사이에 걸쳐있어 두 바

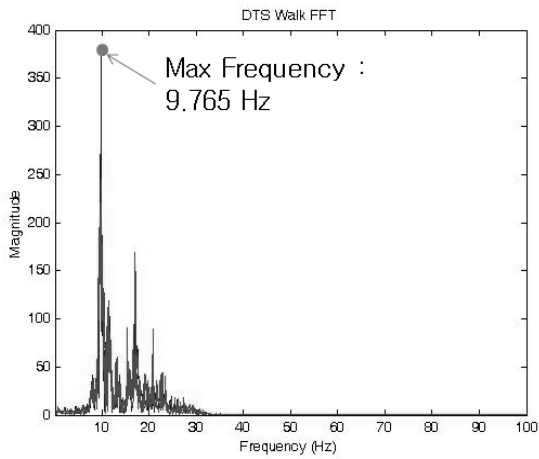
다판을 비교한다면 WAS가 사용성 측면에서 높은 평가를 받을 것으로 판단된다.



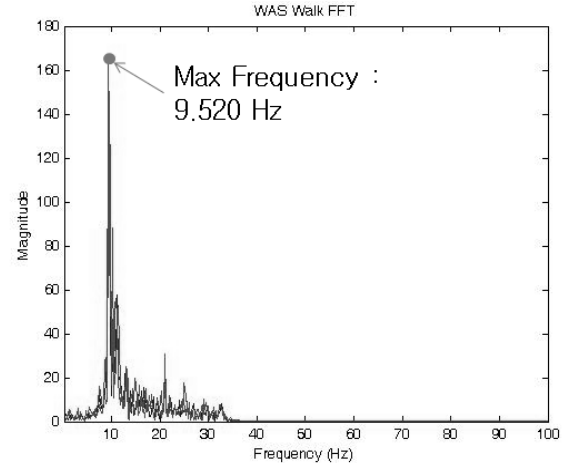
(a) DT Hill Drop



(b) WAS Hill Drop



(c) DT Walk



(d) WAS Walk

Fig. 7 Frequency response(FFT)

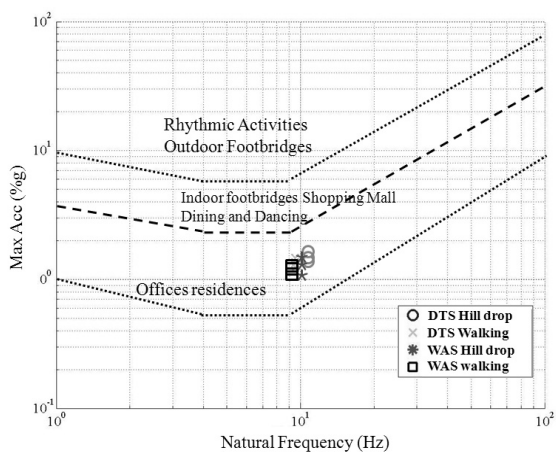


Fig. 8 Recommended peak acceleration for human comfort related to vibrations due to human activities (ISO 2631-2:2003)

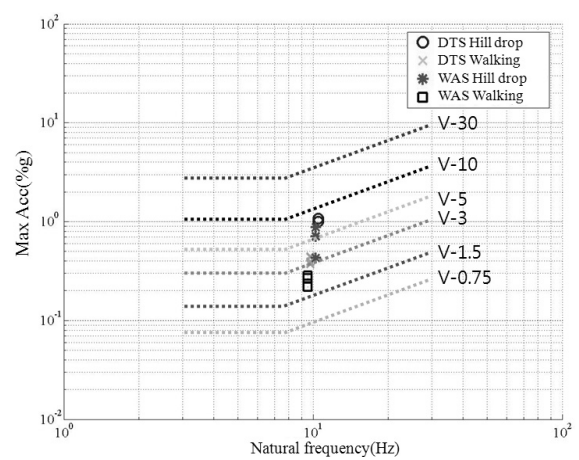


Fig. 9 AJU code (Japan, 1991)

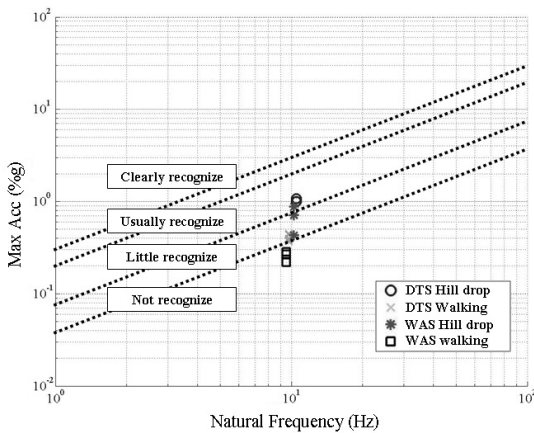


Fig. 10 Korea criteria developed in the previous study (2003)

#### 4. 결론

본 연구에서는 경기도 하남시 소재 대형할인매장에 설치된 외플형상의 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 사용성 평가를 위해 기존에 사용되었던 더블티 바닥판과 함께 바닥진동 실험 및 평가를 실시하였고, 그에 대한 결론은 다음과 같다.

1) WAS와 DT의 고유진동수는 각각 9.765~10.498Hz 와 9.52~10.254Hz 범위로 국내 철근콘크리트 구조에서 제안한 바닥진동 고유진동수 제한값 최소고유진동수인 8Hz보다 크게 측정되어 제한값을 만족시켰다.

2) 국제 표준화 기구 (ISO2531-2:2003)에서 정한 쇼핑몰의 바닥 진동에 따른 최대 R.M.S값에는 두 바닥판 모두 기준을 만족하는 것으로 실험결과 확인하였다. WAS와 DT의 R.M.S 값은 근소한 차이를 보이며 성능의 차이는 없는 것으로 판단된다.

3) 일본건축학회 기준으로 뒤꿈치 충격하중에 대하여 두 바닥판 모두 기준에 만족하였다. 하지만 보행하중에 대해서는 WAS는 기준을 만족하나 DT는 V-3을 약간 초과하여 사용자들이 진동을 인지하고 불편을 느낄 가능성이 있다고 판단된다.

4) 진동 인지그래프와의 비교를 통한 평가에서도 WAS가 보행하중과 뒤꿈치 충격하중에서 각각 '인지 못함'과 '약하게 인지'라는 평가를 받아 모두 '약하게 인지'의 평가를 받은 DT와 같이 사용성 측면에서 동일한 평가를 받았지만, 단면상으로 비교해 보았을 때, WAS가 DT에 비해 중량을 감소시키고 슬래브 두께를 감소시켜 층고의 높이를 높일 수 있는 장점이 있을 것으로 기대된다.

이 연구는 2008학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

#### 참고문헌

1. 강수민 외, "PC 공법의 국내외 현황분석", 대림산업기술연구소, 2006, pp.28-38.
2. 김도훈, "진동대 실험을 통한 바닥판의 수직진동 허용치 제안", 한양대 대학원 석사학위 논문, 2003.
3. 윤주영, 허석재, 조승호, 정 란, "WAS 이용한 프리캐스트 콘크리트 부재의 접합성능", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제19권 2호, 2007, pp.169-192.
4. 허석재, 조승호, 박성순, 이경우, 이원록, "WAS 공법을 이용한 부재의 휨성능에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제19권 1호, 2007, pp.95-98.
5. 허석재, 조승호, 박성순, 이경우, 이원록, "WAS 공법을 이용한 부재의 휨성능에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제19권 1호, 2007, pp.99-102.
6. 대한건축학회, 철골·철근콘크리트 구조설계기준 및 해설, 2000.
7. 대한건축학회, 냉간성형강 구조설계 기준 및 해설, 2001.
8. 대한건축학회, 강구조 한계상태 설계기준 및 해설.
9. 일본건축학회, "건축물의 진동에 관한 주거성능평가지침, 동 해설", 1991
10. 藪下満, 佐藤眞一郎, 堀内秀樹, 2006, "集合住宅の床振動に関する性能評価実験方法の検討", 日本 建築学会大会学術講演梗概集
11. 平松 和嗣, 横島 潤紀, 石橋 敏久, 伊積 康彦, 2007, "建築物の振動に関する居住性能a評価指針の測定方法について", 日本 建築学会大会学術講演梗概集
12. Allen, D. E., "Building Vibration form Human Activities", Concrete International: Design and Construction, 12(6), 1990, pp.66-73.
13. Allen, D. E. and Murray., "Desing Criterion for vibrations Due to Walking", Engineering Journal, 4th Qtr, American Institute of Steel Construction, 1993, pp. 117-129.
14. Ellingwwod, B. and Tallin, A., "structural Serviceability: Floor Vibrations", Journal of Structural Engineering, Vol. 110, No. 2, 1984, ASCE.
15. International Standards Organization, "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.
16. Silva, J.G.S. da, Vellasco, P.C.G. da S., Andrade, S.A.L. de, Soeiro, F.J. da C.P., and Werneck, R.N., 2003, "An Evaluation of the Dynamical Performance of Composite Slabs", Computers & Structures, 81(18-19), 1989, pp.1905-1913.

(접수일자 : 2009년 12월 7일)  
 (1차수정일자 : 2010년 4월 1일)  
 (심사완료일자 : 2010년 4월 22일)

---

## 요 지

본 연구는 PC 부재인 외플형상을 갖는 슬래브와 더블티형 슬래브에 대하여 보행 및 발뒤꿈치 가진등의 수직진동 하중을 대한 실험과 해석을 수행하여, 각각의 사용성을 비교 검토하였다. 수직진동하중에 대한 실험은 외플형 및 더블티형 슬래브가 모두 시공된 하남시에 위치한 상업시설을 대상으로 수행하였다. 실험결과에 대한 사용성 검토는 국제표준화기구의 ISO 2631-2와 일본건축학회의 건축물의 진동에 관한 거주성능 평가지침·동해설에서 제시한 기준을 바탕으로 평가하였다. 실험결과, 외플형 및 더블티형 슬래브 모두 각 기준에 제시된 상업시설 바닥진동 제한범위에 만족하는 것으로 나타나 사용성이 우수한 것으로 나타났으나, 최대가속도 응답은 외플형 슬래브가 더블티형 슬래브보다 낮게 발생하였다.

**핵심 용어** : WAS 슬래브, 더블티 슬래브, 수직 진동, 사용성

---