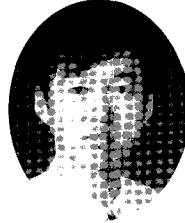


진동저감을 위한 중공 슬래브 시스템의 적용

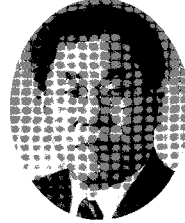
An Application of Void Slab System for Vibration Reduction



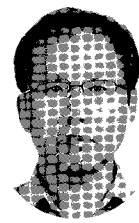
김 태 호*
Kim, Tae-Ho



김 옥 종**
Kim, Ook-Jong



이 도 범***
Lee, Do-Bum



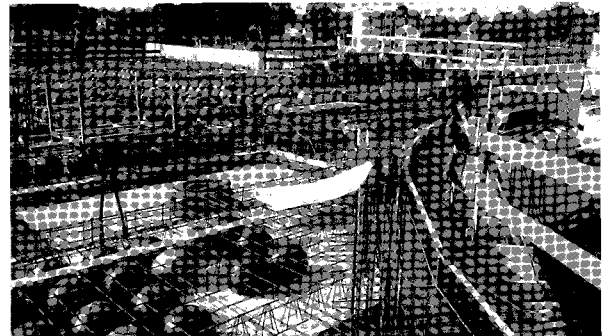
박 창 희****
Park, Chang-Hee

1. 적용 배경

최근 건축물의 슬래브는 재료 및 구조기술의 발달에 따라 장경간으로 자주 설계되며 처짐 등을 줄이기 위한 목적으로 PC 슬래브를 제작하여 적용하거나 현장에서 포스트텐션을 도입하여 해결하는 경우가 많다. 또 다른 방식으로는 장경간 구성에 따른 기술적 문제(처짐, 진동 등)의 해결을 위하여 자중을 줄이는 공법이 적용될 수 있다. 이 경우는 슬래브 내에 원형 파이프, 경량의 중공 등을 삽입하여 구조체의 자중을 줄이고 동일두께의 슬래브에 비하여 휨저항 성능이 큰 차이를 보이지 않는 반면 처짐 및 진동저항성능을 크게 개선할 수 있게 해준다.

이러한 중공슬래브는 인건비 및 재료비가 비싼 유럽지역에서 경간 8m이상의 플랫 슬래브를 위주로 경제성을 갖추어 많이 사용되고 있다. 본 기사의 중공슬래브 적용대상은 경기도 용인소재의 A사 연구소 건물이며 슬래브 시스템의 원설계안은 두께 150mm의 일반 데크 슬래브였으나 이 설계안이 설계검토단계에

서 진동에 대한 사용성 문제가 발생될 것으로 우려되어 사용성 평가를 수행하게 되었고 최종적으로 중공슬래브의 적용이 결정되었다. 현재 이 현장의 중공슬래브의 공사를 포함한 골조공사는 완료된 상태이다.



〈그림 1〉 중공슬래브의 적용에

2. 슬래브의 사용성 평가

2.1 적용현장개요

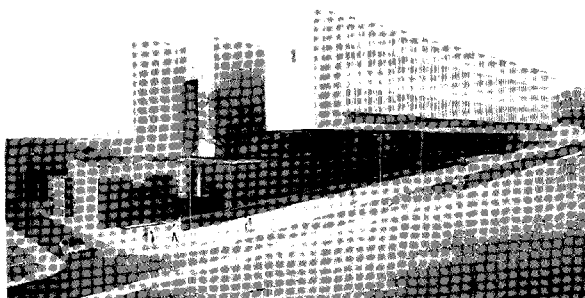
중공슬래브 공법이 적용된 현장의 개요를 간단히 살펴보면 표 1과 같으며 그림 2와 같은 건물이다. 이 건물은 주 거더의 경간이 30M에 이르며 주 거더를 지지부로 하여 6M이상의 캔틸레버 구조물이 다수를 차지하여 진동에 취약할 것으로 예상되는 반면 건물의

* 정희원 · 대림산업(주) 기술연구소 주임연구원
** 대림산업(주) 기술연구소 책임연구원
** 대림산업(주) 기술연구소 수석연구원
** 대림산업(주) 건축사업본부 부장

용도가 연구 및 실험실이 주를 이루어 상대적으로 우수한 진동저항성능을 요구하는 현장으로 설계 최종단계에서 진동부분에 대한 사용성을 평가하게 되었다.

〈표 1〉 현장개요

대상위치	경기도 용인시 기흥구 보라동 314-1번지
구조	철골 및 철근콘크리트 구조
건축면적	6,577.46㎡
설계자	ALVARO SIZA 주 건축사무소 M.A.R.U
감리자	주 한미파슨스
공기	2008.09.18~2010.05.02 [20개월]
면적	26,029.19㎡
건축규모	지하2층, 지상3층 1개동
건물용도	연구 및 실험실



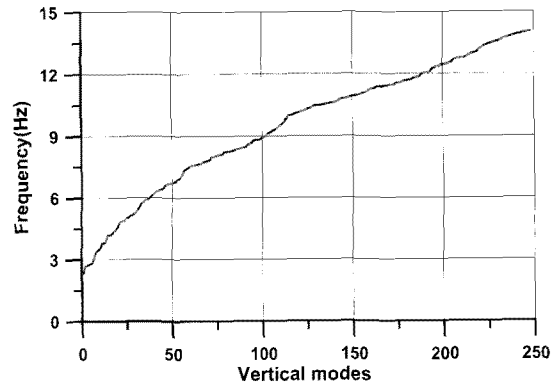
〈그림 2〉 적용대상건물 조감도

2.2 고유치 해석

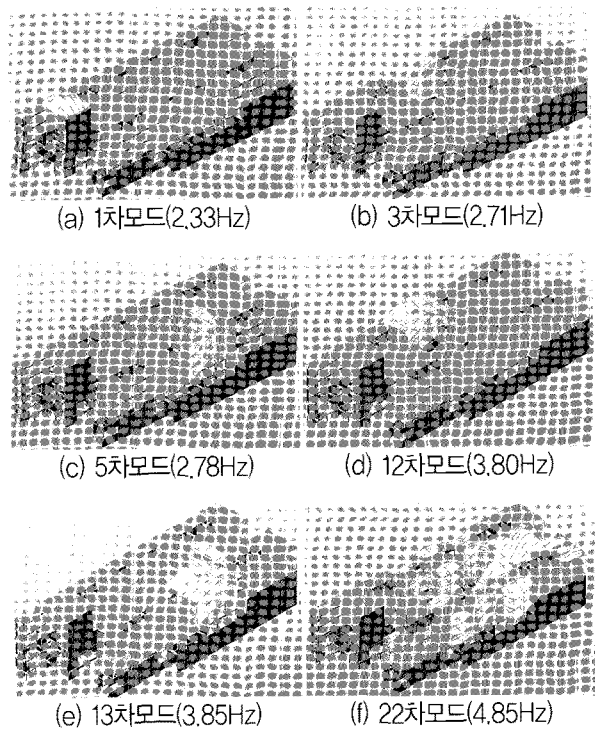
우선 이 구조물의 연직진동 모드들이 분포하는 주요 진동수 대역을 파악하여 보았으며 이는 그림 3에 나타내었다. 250여개의 연직모드를 분석한 그림 3의 결과를 보면 이들이 15Hz이하에 분포하는 것으로 나타났다으며 이는 인체의 운동에 의한 진동이 발생할 수 있음을 의미한다.

이 구조물의 연직진동 발생가능성이 있는 위치를 파악하기 위하여 각 모드형상을 파악하여 보았으며 보행이나 뛰 등의 운동에 의하여 진동문제를 발생시

킬 수 있는 모드들의 일부를 그림 4에 나타내었다.



〈그림 3〉 대상 구조물의 주요 연직모드별 진동수 분포

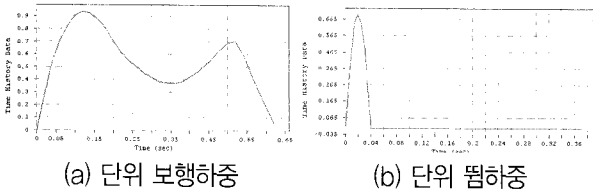


〈그림 4〉 대상 구조물의 주요 연직모드

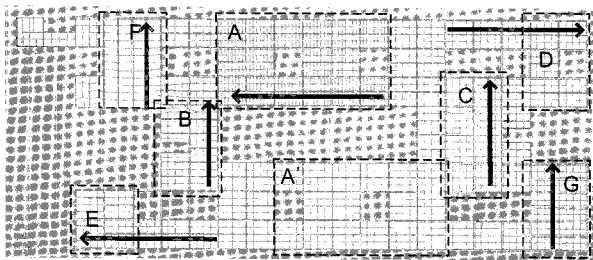
2.3 사용성 평가

이 건물에 주로 작용할 것으로 예상되는 동적하중은 보행, 뛰, 점핑 또는 발뒷꿈치 충격하중 등 사람에 의한 하중이다. 구조물에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 보행 진동수나 뛰에 의한 진동수는 각각 1.9Hz(보행 진동수의 2차 동적성분과 구조물의 12차 모드 동조), 2.7Hz(뛰 진동수의 1차 동적성분과 구조물의 3차 모드 동조)로 판단되며 이에 의하여 다음 그림 5와 같은 동적하중을 작성하였다. 동적하중은 기존 연구결과에

의하여 1m²당 1인이 보행하며 체중 0.7kN으로 균일한 것으로 가정하였으며 하중모델은 단위보행하중은 Bachmann모델을 적용하였고 뛰하중의 경우에는 일본건축학회의 모델을 사용하였다.



〈그림 5〉 적용하중모형



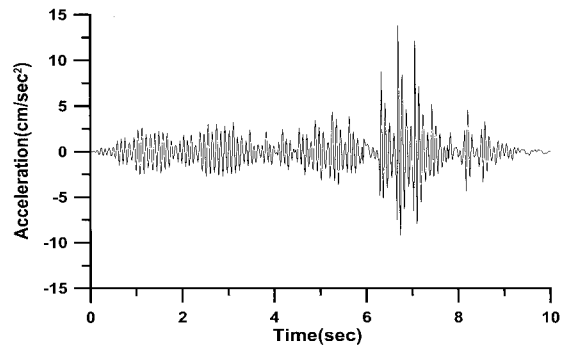
〈그림 6〉 재하경로

적용하중의 이동위치는 바닥판의 진동모드를 잘 발생시킬 것으로 예상되는 위치로 그림 6과 같으며 보행의 경우는 1.5m간격으로 3인이 보폭 75cm로 무리보행하는 것으로 가정하고 뛰는 경우는 1인이 보폭 1.5m로 진행하는 것으로 하였다. A구간과 A'구간은 구조형식 및 동적특성이 거의 동일하여 좀 더 불리할 것으로 예상되는 A구간에 대해서만 해석을 수행하였으며 나머지 구간은 뛰하중에 대해서만 분석하였다.

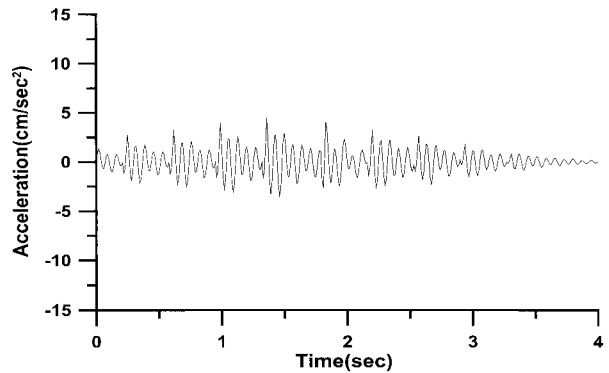
위에 나타난 재하경로에 따른 구간별 가속도응답 시간이력들을 그림 7에 일부 나타내었으며 이를 이용하여 ISO 2631-2에 의한 1/3 옥타브 밴드 평가를 한 것을 그림 8에 나타내었다. 현재의 가속도 응답의 수준이 대부분 사무용도로는 적합한 것으로 나타났으나 현재 이 정도의 사용성능은 이 건물의 용도(연구소)를 벗어나는 것으로 볼 수 있으며 이에 따라 사용성 개선이 필요한 것으로 파악되었다.

3. 슬래브 시스템의 사용성 개선

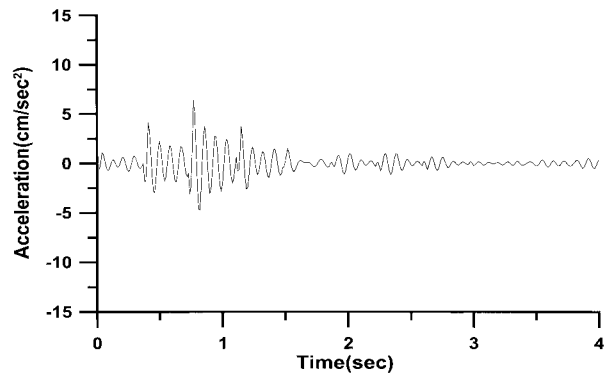
앞서 검토된 바와 같이 해당 구조물에 대하여 진동에 대한 사용성 보완이 필요하여 표 2와 같은 4가지 안을 기준으로 검토를 수행하였다. 조건 1과 2의 경우는 5~10%정도의 강성증대효과를 가질 것으로 기대되나 진동수를 상승시키는 효과는 미미할 것으로



(a) A부분

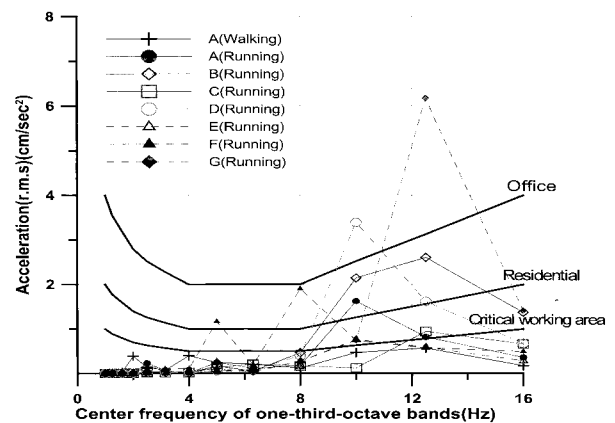


(b) C부분



(c) E부분

〈그림 7〉 재하경로에 따른 구간별 가속도응답



〈그림 8〉 설계안에 대한 연속진동 평가

예상되었으며 슬래브 두께를 180mm로 증가할 경우에는 70%정도의 강성증대를 통하여 정적처짐을 줄일 수 있어 진동수 증가가 크지 않더라도 어느 정도 효과가 있을 것으로 예상되었다. 단 이 경우는 주요부재의 재설계가 필요한 문제점을 가진다. 마지막 조건 4는 중량의 증가없이 강성을 2.4배 증가시켜 정적처짐 및 진동수 증가효과가 있을 것으로 예상되며 주요부재의 설계검토도 불필요한 장점을 가진다.

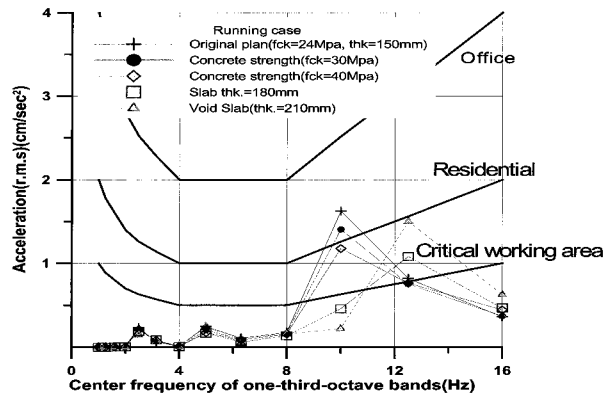
〈표 2〉 진동저감방안

조건	진동저감방안
1	콘크리트 강도 $f_{ck}=30\text{MPa}$ 로 조정
2	콘크리트 강도 $f_{ck}=40\text{MPa}$ 로 조정
3	슬래브 두께 180mm적용
4	중공슬래브 두께 210mm적용

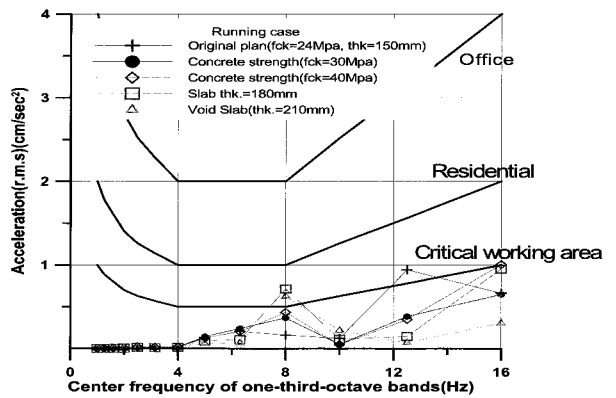
표 2의 방안을 적용하여 해석을 수행하였으며 구간 A, C, E에서의 뒹하중에 대한 1/3 옥타브 밴드 응답을 그림 9에 제시하였다. 그림 9의 각 구간별 응답을 살펴보면 콘크리트의 강도를 증진시켜 탄성계수를 다소 높이는 방안은 효과가 크게 없는 것으로 파악되었다. 슬래브 두께를 180mm로 증대시키는 방안은 진동저감효과는 있는 것으로 파악되었으나 두께의 증가에 의한 질량 증가에 의하여 구조물 주요 골조부재의 설계검토를 수행하여야 하는 문제를 가졌다. 마지막으로 슬래브 내에 경량재를 삽입하여 중량을 줄인 중공 슬래브의 경우는 강성을 증대시켜 1차 진동수를 높이는 특성으로 구조체의 진동을 줄이는 효과를 나타내었다. 이 밖에 바닥시스템을 구성하는 일부 구조체의 경계조건 및 부재 사이즈의 증대 등의 추가방안을 도입하여 그림 10과 같은 결과를 얻었다.

4. 현장적용

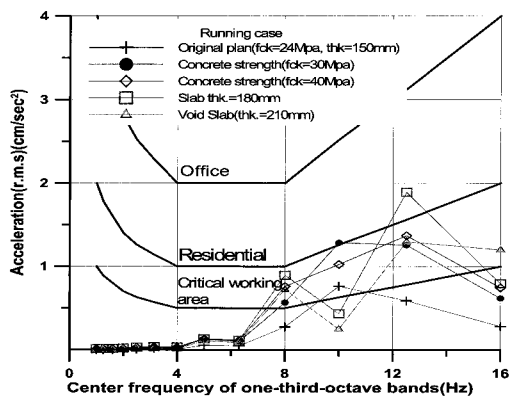
경기도 용인 A 연구소 건물은 2009년 6월에서 7월 사이에 2층과 3층 대부분에 중공슬래브를 적용하였으며 현재는 마감공사가 진행중이다. 그림 11은 해당 건물의 슬래브 시공과정을 나타낸 것이다.



(a) 구간 A

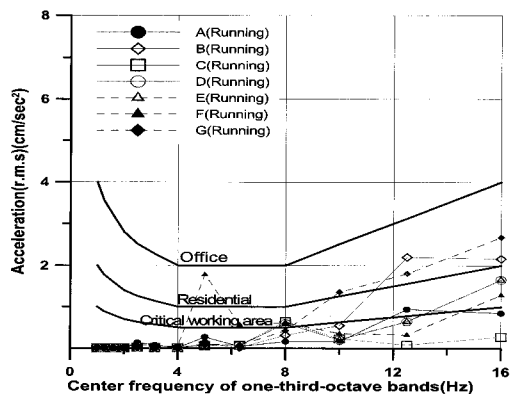


(b) 구간 C



(c) 구간 E

〈그림 9〉 진동저감 방안에 따른 구간별 1/3 옥타브 밴드 응답

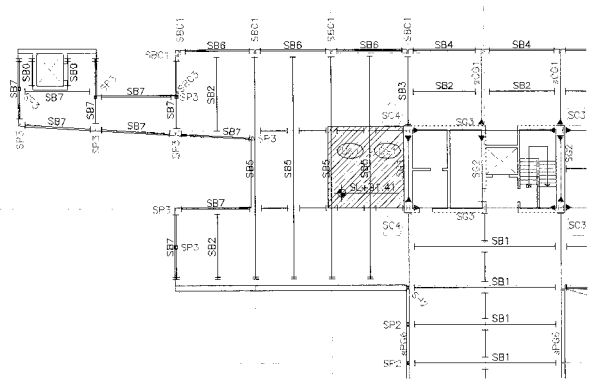


〈그림 10〉 진동저감 방안에 의한 예상응답

5. 진동계측 및 기타구조검토

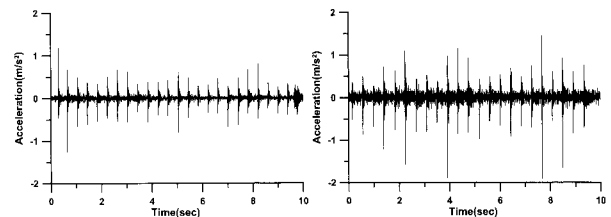
5.1 진동계측

중공 슬래브를 적용한 부분 및 적용하지 않은 부분에 대한 계측위치는 그림 12에 나타내었으며 압전형 가속도계를 이용하여 0.005초의 시간간격으로 측정하였다. 장비운용의 한계상 각 계측위치에서 응답은 개별적으로 측정되었다. 발뽀꿈치 충격을 이용하여 동적특성을 파악하였으며, 공간의 한계상 제자리 뽀꿈치를 적용하여 구조물의 사용성을 평가하였다.



〈그림 12〉 계측 위치

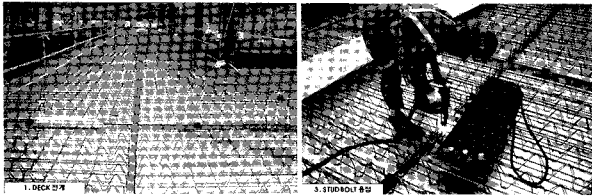
계측결과 보로 구획되어 있지만 해석결과와 동일하게 보를 포함한 큰 판 전체가 진동하여 중공슬래브와 일반슬래브의 기본 진동수가 거의 동일하게 5.3Hz 대역에서 나타났다. 제자리 뽀꿈치에 의한 가속도응답은 그림 13에 나타내었으며 최대 응답 및 RMS 응답 모두 1.5배 정도 중공슬래브가 낮게 평가되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 판전체가 진동하는 구간이라도 강성제어방식이 해당 바닥판의 진동응답에 직접적인 영향을 줄 수 있음을 파악할 수 있다.



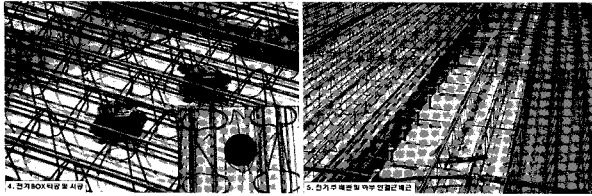
(a) 중공 슬래브 (b) 일반 슬래브

〈그림 13〉 뽀꿈치에 의한 가속도 응답

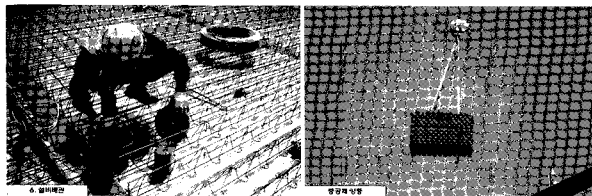
계측결과 중 사람의 가속도 주인지범위에 해당한다고 할 수 있는 15Hz 이내의 응답은 그림 14에 나타



(a) 데크플레이트 전개 (b) 스타드 볼트 용접



(c) 전기박스 타공 및 시공 (d) 전기배관 및 하부연결근 배근



(e) 설비배관 (f) 중공체 양중



(g) 중공체 시공 (h) 상부철근 배근

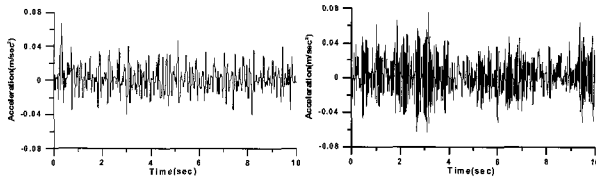


(i) 콘크리트 타설

〈그림 11〉 중공 슬래브 시공과정

데크 슬래브에 적용된 중공슬래브의 시공은 중공체 시공전에 전기/설비 배관의 매립 후 중공체의 시공을 수행하고 이후 상부철근배근 및 콘크리트 타설의 순으로 이루어졌다. 현장적용당시 검토된 주요 기술적 사항은 중공체의 부상방지 방안의 적절성, 전기배관 작업으로 인한 중공체 배치 문제, 배관과 중공체로 인한 피복두께 확보 문제, 배관 슬리브 설치위치와 중공체의 간섭 등이다.

내었으며 이 경우에도 약 50%의 응답차가 발생하는 것을 알 수 있다.



(a) 중공 슬래브 (b) 일반 슬래브
 <그림 14> 뒀하중에 의한 가속도 응답(15Hz이내)

5.2 중공슬래브의 내화성능 검토

내화 측면에서는 중공재의 재료가 PE로 유럽 등의 법규 및 실험결과 등을 검토한 결과 사용에 문제가 없는 것으로 파악되었다. 그러나 폴리스티렌 계열의 중공재는 화재시 슬래브에 폭발현상이 보고되어 중공재에서 발생하는 가스를 배출할 수 있는 설계가 요구되는 것으로 나타났다.

6. 맺음말

최근 국내에서도 중공재를 적용한 중공슬래브의 시공이 점차 증가하고 있으며 이 시스템의 경우 진동 저감성능이 우수한 것으로 파악되었으며 특히 콘크리트 및 철근량을 줄일 수 있어 현재 전세계적으로 논의되고 있는 탄소저감정책에 부응하는 공법임은 틀림없다. 다만 이 슬래브 시스템이 활성화되기 위해서는 국내시장에 알맞은 경제적인 중공시스템 제공이 우선되어야 하며 각 제품들의 효율적인 시공법, 다른 공정과의 간섭문제 및 내화성능 등을 파악하여야 할 것으로 생각된다.

이 밖에도 중공슬래브 시스템의 해석 및 실험결과 등을 바탕으로 하여 검토한 결과 일반 슬래브에 비하여 동일두께의 중공슬래브가 고유진동수를 일정 비율로 높게 하여 진동저감 성능 뿐만 아니라 중량 소음과 같은 구조기인 소음의 제어에도 효과가 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 강구조 한계상태 설계기준 및 해설, 대한건축학회, 1998.
2. Allen D.E. & T.M. Murray, "Design Criterion for Vibration Due to Walking", AISC, Engineering Journal, 4th Qtr., 1993
3. (주)신화엔지니어링, 슬라프: 초경량 중공형 무량판 바닥구조시스템, (주)신화엔지니어링, 2008.
4. 김태호, 김옥중, 이도범, 고창현, "중공형 바닥시스템을 이용한 바닥판 진동 사용성 개선", 대한건축학회 학술발표회, 2009
5. Hugo Bachmann. et al., Vibration Problems in Structures, BIRKH?USER, 1995.
6. Hugo Bachmann., Walter Ammann., Vibration in Structures, IABSE-AIPC-IVBH, 1987.
7. 김민균, 박헌재, 이동근, 황현식, 김현수, "보행하중에 대한 2방향 중공슬래브의 진동성능평가", 지진공학회 논문집, 제 13권 5호., 2009