한국소음진동공학회 2005년도 추계학술대회논문집, pp. 381~384.

표준실험동에서 중량충격음의 방사 특성

Radiation Characteristics of Heavy-weight Floor Impact Sounds in a Standard Test Building

유 승 엽† · 정 영* · 전 진 용**

Yoo Seung-Yup, Jeong Young and Jeon Jin-Yong

Key Words : Heavy-weight Floor Impact Noise (중량충격음), Standard Test Building (표준실험동), Radiation Characteristic (방사특성)

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a prediction model for evaluating heavy-weight floor impact sounds in a test building. Three rooms in the test building (slab thickness 180 and 240mm), which consist of frame concrete structures were tested and modeled. First, the SPL distribution in the receiving room was analyzed by measuring SPL at 90 positions using a bang machine. Then, a vibration model using finite element method is proposed considering the material properties and boundary conditions. In addition, the result of transient analysis was compared with field measurements using a standard heavy-weight impact source. Through a vibro-acoustic simulation program, an acoustic model evaluating the building elements (reflected wall, floor, window and door) was proposed. Finally, validation of the prediction model was conducted by vibro-acoustic analysis with field measurements of noise radiation characteristics in receiving rooms.

1. 서 론

주거환경에서 소음문제는 대개 외부환경요인으로 인해 발생하는 배경소음과 건물내부에서 발생하는 인위적인 소음에 기인한다. 특히, 대부분의 국내 공동주거가 고층의 내력벽 구조이기 때문에, 상하층 세대간 고체 전달음에 의해 발생하는 층간소음 문제는 공동주택에서 필연적인 당면과제가 되고 있다. 신발을 벗고 생활하는 주거문화에서 현재 바닥충격음 문제해결을 위해 정부에서는 충격음에 대한 규제기준을 마련하였으나 아직까지 거주자들이 만족할만한 효과적인 중량충격음 저감기술을 개발하지 못하고 있는 실정이다.

국내에서 바닥충격음 문제해결을 위한 연구는 복사난방 형태인 온돌바닥구조의 습식시공으로 바닥층 내부에 소음전달을 방지하는 재료를 삽입하거나 건식, 반건식 구조를 개발하여 적용하는 방법이 몇 가지 제시되고 있다. 그러나 바닥구조가 복잡해지고 슬래브 두께가 늘어나면 시공성과 경제성 및 하자 측면의 문제가 발생된다. 또한, 현장 시공시, 바닥충격음 저감효과가 실험실 결과와 상이한 경우가 있기 때문에 현재 많은 시행착오를 겪게 된다. 이러한 문제점에 대한 해결방안의 일환으로 고체 전달음에 기인한 층간소음 해석 및 예측연구들이 진행되고 있다. 유한요소해석법(FEA) 또는 통계적에너지해석법(SEA)과 같은 전산해석법과 임피던스 예측방법, 확산도법과 같은 방법으로 소음을 예측하는 방법들이 도입되고 있다[1]. 한편, 저감안의 적용 및 성능 평가에 이르는 시간을 단축하기 위해 실제 시공 환경이 반영된 표준 실험동이 인정평가에 대한 필요성의 증대와 더불어 활용되고 있다.

본 연구에서는 바닥충격음 예측을 위한 선행작업의 일환으로 바닥충격음 표준실험동에 대한 소음 및 진동측정, 그리고 전산해석을 통하여 수음실에서의 음압레벨분포를 분석하여 표준실험동에서 구조체의 중량충격 소음의 방사특성에 대하여 고찰해보았다.

2. 실험동에서의 바닥충격음 방사특성

2.1 바닥충격음 실험동 개요

본 연구에 활용된 바닥충격음 실험동은 기존에 건설된 한국건설기술연구원과 대한주택공사의 실험동과 유사하다. 실제 주거환경의 일반적인 거실환경을 반영하여 바닥면적과 높이를 계획하였고, 발코니와 같은 구조 부재요소의 영향도 반영되었다[2]. 그리고 같은 층에 슬래브 두께가 같은 3개실을 연속 배치하여 슬래브 두께가 변화함에 따른 하부

† 한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정
E-mail : syrus@ihanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-1795, Fax : (02) 2291-1793

* 한양대학교 대학원 건축공학과 박사과정

** 한양대학교 건축대학 건축공학부 부교수

Table 1. Details of the standard test building

구 분	내 용
슬래브 두께	150, 180, 210, 240 mm (각 3개실)
바닥면적	4.7m × 5.3m (25m^2) : 30평형대 거실면적
층 고	2800 [mm]
콘크리트 물성	압축강도 210 [kg/cm^2], 밀도 2300 [kg/m^3]

층 전달기여율 변화요인을 최소화하였으며, 양쪽 벽을 다른 실과 공유하는 실과 한쪽 벽을 공유하는 실 간의 바닥충격음 전파양상 차이를 비교할 수 있도록 설계하였다.

2.2 실험동의 바닥충격음 측정

각각 180 및 240mm 슬래브 두께를 가진 3개씩의 실험실을 대상으로 현장측정과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 경계조건이 다른 각 실에 대한 방사특성을 고찰하였다. 먼저 측정을 통하여 표준중량충격원(뱅머신)에 대한 진동 및 소음데이터를 확보하고 이를 통해 실험동의 특성을 반영하는 해석모델을 구축하였다.

대상실 바닥구조는 본연구가 구체의 경계조건과 물성만을 고려하여 구조 전달음의 전파양상을 조사하는 단계이기 때문에 마감이 되지 않은 맨바닥슬래브 상태만을 측정 및 해석 대상으로 하였다.

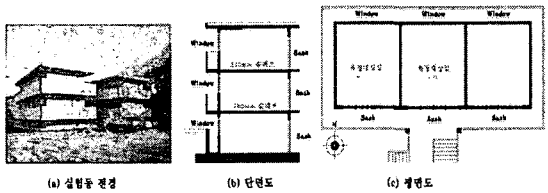


Fig. 1. Pictures of the standard test building

(1) 소음/진동 측정방법

소음원의 전달경로와 더불어 수음실의 음향특성을 측정하기 위해 음압레벨 분포를 함께 측정하였다. 측정방법은 Table 2와 같이 90개 지점의 그리드를 구성하여 KS 2810-2를 기본으로 3채널의 마이크로폰을 통하여 동시에 수음하였고, 충격음 레벨은 뱅머신을 통해 수음실 상부 슬래브의 중앙지점에서 3회 가진에 따른 1/3 옥타브밴드로 측정된 소음데이터를 평균하여 분석하였다. 한편, 진동측정은 수음실 천장중앙에서 남쪽으로 30cm 이격하여 진동가속도계를 부착하여 측정하였으며 저주파대역(40Hz이하)에서 일정한 충격력 폭로레벨을 보이고 있는 뱅머신의 가진 특성으로 인해 바닥 가진 시, 1차 고유주파수로 추정할 수 있는 바닥의 동적특성을 유추하였다. 또한 시간스펙트럼을 통해 감쇠비(damping ratio)를 추정하였다.

Table 2. Details for measuring SPL in a receiving room

구 분	내 용
측정개소	총 90 개소 (장변방향 10개소씩, 단변방향 9개소씩)
마이크로폰 간격	장변방향: 45cm 단변방향: 40cm
벽과 마이크로폰의 이격거리	장변방향: 10cm 단변방향: 25cm
마이크로폰 높이	120cm
수음채널	1회 3채널 동시수음
측정장비	주파수분석기: B&K Pulse System 마이크로폰 : B&K Type 4189 가속도계 : Endevco Isotron 751-10 가진원 : Satsuki Kizai Bang Machine (JIS A 1418)

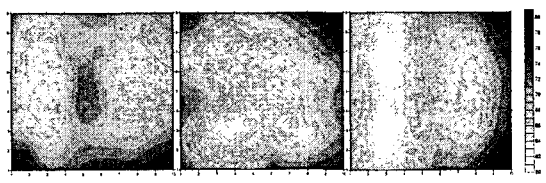
(2) 측정결과

각 슬래브의 바닥충격음 차음성능에 대한 단일평가수치($L_{i,Fmax,AW}$; KS 2863-2) 측정결과는 Table 3과 같이 180슬래브와 240슬래브에서 각각 54dB와 47dB를 나타내고 있다. 특히, 250Hz이하의 저주파 대역에서는 슬래브 두께에 의해 6 dB 이상의 차이를 보이고 있다.

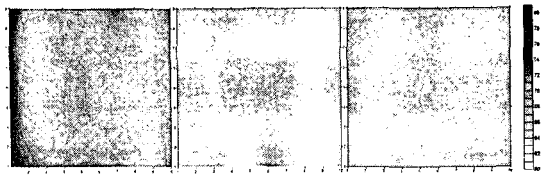
Table 3. Floor impact sound levels of 180 & 240mm bare slabs

슬래브 구분	주파수 대역별 음압레벨 (dB)					
	63	125	250	500	1000	$L_{i,Fmax,AW}$
180mm측면	75	69	65	53	49	54
240mm측면	66	63	53	50	45	47
240mm중앙	66	64	54	50	44	47

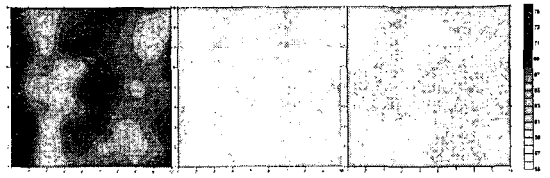
Fig 2 (a)-(f)에서와 같이 저주파 대역일수록 공간에 따른 음압레벨 분포양상이 분명하게 구분되며, Fig 2 (g)-(l)에서와 같이 벽면에 비해 개구부의 면적이 작은 창문 쪽보다는 개구부 면적이 큰 샤시쪽에서 더 높은 레벨이 나타나고 있다. 이것은 북쪽벽체(창문설치 벽체)가 구조적 진동소음 전달의 가교로서 역할을 하고 있으나 샤시가 설치된 벽체의 경우, 충격진동이 창호구조에 직접 전달되지 않아, 저주파에서 특히 더 낮은 레벨분포를 보이고 있다. 이와 같은 실의 구조벽체 배치에 의해 실험동의 바닥충격음 전달에 있어서 단변보다 장변방향으로의 진동전달이 음압레벨분포에 더 큰 영향을 미치고 있다고 사료된다. 또한 룸모드(room mode)에 따른 음압레벨 분포양상이 특정주파수 대역에서 뚜렷하게 나타났다.



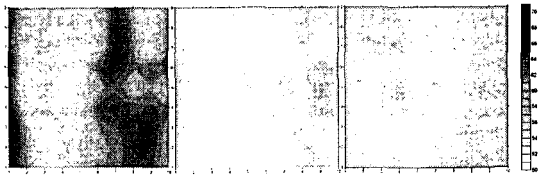
(a) 180mm 측면실 63Hz (b) 240mm 측면실 63Hz (c) 240mm 중앙실 63Hz



(d) 180mm 측면실 125Hz (e) 240mm 측면실 125Hz (f) 240mm 중앙실 125Hz



(g) 180mm 측면실 250Hz (h) 240mm 측면실 250Hz (i) 240mm 중앙실 250Hz

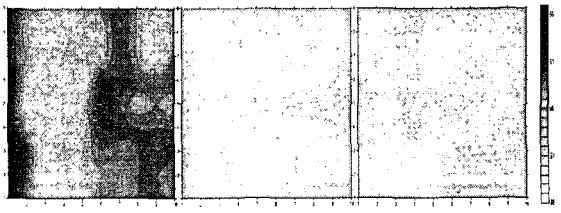


(j) 180mm 측면실 500Hz (k) 240mm 측면실 500Hz (l) 240mm 중앙실 500Hz

* x=1 : 창문방향(북쪽) , x=10 : 새시방향(남쪽)
** y=1 : 모서리측벽 , y= 9 : 중앙 내력벽

Fig. 2. SPL contour in each frequency band

Fig 3은 각 지점에 대한 역 A 평가지수 분포를 나타내고 있으며, 이는 63, 125, 250, 500 Hz 대역에서 보이는 음장특성들을 반영하여 나타낸 그림이다.



(a) 180mm 측면실 슬래브 (b) 240mm 측면실 슬래브 (c) 240mm 중앙실 슬래브

*x=1 : 창문방향(북쪽), x=10 : 새시방향(남쪽)
**y=1 : 모서리측벽 , y= 9 : 중앙 내력벽

Fig 3. Overall SPL contour using single number rating values

Fig 3에서와 같이 수음실 음압레벨이 중앙 가진시, 중앙에서 최대가 되지 않는 반면 벽체 또는 중앙부에서 더 높은 레벨을 형성하고 있다. 이를 통해서, 현 KS 기준에 따른 수음점 개수 및 위치선정에 있어서 실의 경계조건, 특히 구조벽체의 지지조건이 중요한 요인으로 작용될 수 있기 때문에 실의 특성을 반영한 바닥충격음 측정 및 대표값 산정이 필요하다. 구조내력벽체의 모서리 부분과 수음실 중앙부분은 물론 음압레벨이 급격하게 줄어드는 새시주변 등에 대해 고려가 평가에 반영되어야 할 것으로 사료된다.

2.3 바닥충격음 전산해석

전산해석을 이용하여 실험동의 소음레벨분포를 해석하기 위하여 경계요소법(BEM)에 기반을 둔 상용해석프로그램(LMS SYSNOISE 5.6)을 활용하였다. 실제 공간의 형상과 경계조건 등의 실험동 측정실의 조건을 모델링하여 해석한 결과를 측정결과와 비교하였다.

(1) 진동해석 모델링

상용해석프로그램인 ANSYS를 통해 모델링한 유한요소 해석모델의 물성치는 실제 시공시 사용되었던 재료들을 참고로 하여 입력하였다. 또한, 사람이 뛰거나 걸을 때 발생되는 바닥충격음은 비교적 충격력이 작고, 구체의 진동 지속시간이 짧기 때문에 물성에 대하여 선형조건으로 가정하여 해석하였다[3]. 입력된 물성 데이터 및 경계조건은 Table 4에 나타낸 바와 같으며, 수음실 전체를 3차원으로 모델링하였다. Table 5에는 모드해석에 의한 슬래브의 고유주파수와 현장측정에서 뱅머신 가진 시 슬래브 하단에 위치한 센서에서의 최대 공진주파수를 비교한 결과를 나타내었다.

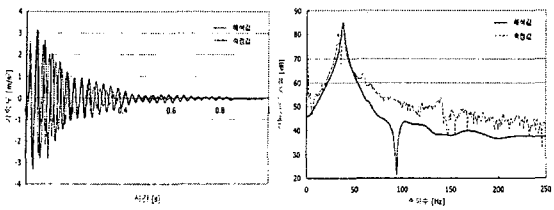
Table 4. Input parameters in the finite element model

구 분	내 용	
물성 (콘크리트)	영계수	$2.152\times E^{10}$ [N/m^2]
	포아송비	0.185
	밀도	2300 [kg/m^3]
	감쇠비	0.003
해석요소	shell 93	
입력치수	. 도면상의 치수사용	
경계조건	주변 벽체 및 슬래브 연결부위 : 6 DOF 구속 새시설치 벽체부위 : 수직방향 자유도 구속해지 (free) 180mm 슬래브 : 수음실 바닥면이 지면에 구속 240mm 슬래브 : 수음실 바닥면의 4변이 지면에 고정	

Table 5. Comparison of FEA with experimental results

모 드	180mm 측면실 슬래브			240mm 측면실 슬래브		
	FEA[Hz]	실험[Hz]	오차[%]	FEA[Hz]	실험[Hz]	오차[%]
1 st	31.3	33	5.2	32.1	36	10.8
2 nd	58.5	-	-	60.5	-	-
3 rd	72.2	-	-	64.3	-	-

Fig 4는 180mm 측면실 슬래브에서 중앙점을 가진했을 때, 과도해석(transient analysis)한 결과와 실제 현장에서의 뱅머신으로 동일지점을 가진했을 때의 진동 측정한 결과를 시간이력으로 나타낸 것이다. Fig 4 (a)에서는 가진 후 1초 동안의 가속도 값과 감쇠비가 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다. Fig 4 (b)에서는 주파수 도메인에 대해서도 가속도 레벨값이 피크공진주파수와 일치하고 있으며 레벨값도 대체로 일치하고 있는 것을 나타내고 있다. 이와 같은 방법으로 해석과 측정값을 비교하여 해석모델의 유효성을 판단하였다.



(a) 타임 도메인 결과비교 (b) 주파수 도메인 결과비교

Fig 4. Verification of the finite analysis model using transient analysis

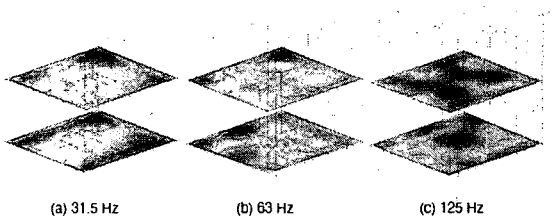
(2) 음향해석 모델링

SYSNOISE는 헬름홀츠 방정식(Eq. 1)을 통해 구조진동에 의해 발생하는 음장을 해석하는 프로그램으로 슬래브가 충격력에 의해 가진이 되었을 경우, 발생되는 구조체의 진동에 의해 방사되는 소음을 해석하기 위해 사용하였다[4].

$$\begin{bmatrix} K_S - \omega^2 M_S & C^t \\ C & K_F - \omega^2 M_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_S \\ F_A \end{Bmatrix} \quad \text{(Eq. 1)}$$

K_S and M_S : 구조 강성 및 중량 매트릭스 ; C : 연성 매트릭스
K_F and M_F : 음향 강성 및 중량 매트릭스 ; u : 노드변위 백터
F_S and F_A : 구조 및 음향 하중백터 ; p : 노드음압 백터

우선, ANSYS에서 각 주파수에 대하여 224N의 충격력으로 슬래브 중앙지점을 가진하였을 때에 1~250Hz까지의 구조체 진동에 대한 하모닉 해석을 실행하였다. 해석 데이터와 메쉬 데이터를 SYSNOISE로 옮겨와 진동모델과 음향모델을 각각 형성하고 BEM Indirect 방법으로 해석하였다. 수음면의 높이는 1.2m로 설정하여 현장측정에서 음압분포 결과와 비교하였다.



(a) 31.5 Hz (b) 63 Hz (c) 125 Hz

Fig 5. SPL contour using SYSNOISE, vibro-acoustic simulation program (upper : results from driving on the 240 mm slab ; lower : 180 mm slab)

Fig 5는 180 및 240mm 측면실 슬래브에서 가진했을 경우를 모델링하여 해석한 결과이다. 해석결과를 보면, 바닥면 전체를 구속시킨 180mm 슬래브에서 저주파 대역, 즉 (a), (b)의 그림에서와 같이 측벽부위에 대하여 더 높은 음압레벨 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 또한 125Hz 대역에서 중앙부에서의 음압레벨분포 차이를 보이고 있다. 즉, 실의 지지조건에 따른 음압레벨의 분포 차이가 해석상에서는 큰 차이를 보여주고 있음을 나타내고 있으나, 창호부위에 대한 모델링에 있어서 Cavity 상태에 대한 영향은 반영되지 못하고 있는 것으로 사료된다. 종합적으로 Fig 6에서는 해석결과와 측정결과간에 20dB정도의 레벨오차를 보이고 있다. 이러한 오차는 주파수 대역 및 각 수음실에 대하여 선형적인 관계를 가지고 있는 것으로 보아 주파수별 충격레벨을 최대레벨(224N)로 일괄적으로 입력하였기 때문으로 사료된다.

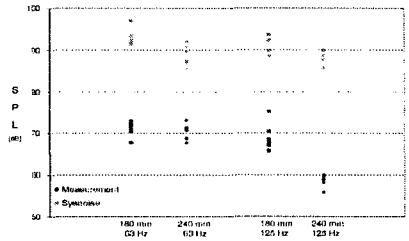


Fig 6. Difference between measurement and sysnoise

3. 결 론

실험동과 같이 동일한 실의 형태와 재료를 사용하는 경우라 하더라도 실의 경계조건과 슬래브 두께에 따라 수음실에서의 음압레벨 분포양상이 달라지는 것을 현장측정 및 전산해석적인 방법으로 검증하였다. 따라서 실험동을 통한 바닥충격음에 대한 예측기술을 개발하는데 있어서 각 실의 경계조건 및 실내음향 특성을 파악하고 이를 바탕으로 실환경을 제어할 수 있는 기술이 필요하다. 이러한 기술개발을 위해 해석모델을 모달테스트 등을 통해 검증하고, 창호나 벽체재료, 복합바닥층 등에 대한 유효해석 모델을 개발하며 가진원의 위치, 방법에 따른 다양한 영향들을 검토함으로써 해석 및 제어기술이 개선될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 환경부 "차세대 핵심 환경 기술 개발 사업" (과제번호 : 2005-11002-0003-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) 서상호, 전진용, 2005, "유한 요소법을 이용한 나 슬래브의 2차원 바닥 충격진동 해석", 한국소음진동공학회 논문집, 제15권 제5호, pp.604-611.

(2) 김경우, 최경석, 이승언, 양관섭, 2004, "바닥충격음 실험동 개요 및 성능평가", 대한건축학회 춘계학술대회 논문집, 제24권 제1호, pp.629-632.

(3) Aleksandar Pavic, Paul Reynolds, Peter Waldron, Kevin Bennett, 2001, "Dynamic modelling of post-tensioned concrete floors using finite element analysis", Finite Elements in Analysis and Design, 37, pp.305-323.

(4) LMS International N.V., 2003. SYSNOISE Revision 5.6 User's Manual, Leuven.