

선하역사의 슬래브 진동에 의한 소음방사 특성에 관한 연구

김진호¹, 장동두^{1*}, 지용수²

¹한국철도기술연구원 스마트역사연구팀, ²(주)에스코알티에스 기술연구소

A Study of Noise Characteristics Induced by Slab Vibration for the Elevated Railway Station

Jin-Ho Kim¹, Dongdoo Jang^{1*}, Yong-Soo Ji²

¹Smart Station Rearch Team, Korea Railroad Research Institute

²Department of Engineering Research, ESCO RTS Co., Ltd.

요약 궤도가 역사의 상부에서 연결되는 선하역사 형식의 경우 일반 역사 구조형식과 달리 진동이 직접 전달되는 구조적 특성으로 인하여 진동 및 소음레벨이 타 형식의 역사와 대비하여 상대적으로 높은 상황이다. 따라서 구조물 진동과 이로 인해 발생하는 구조물 기인 소음에 대한 특성 파악과 그 결과를 활용한 저감 방안의 수립이 필요하다. 본 연구에서는 기존 슬래브와 진동을 절연시키는 구조형식의 플로팅 슬래브에 대하여 외력에 의한 가진 시 발생하는 구조적 진동과 이로 인한 구조물 기인 소음의 상관성을 고찰하고자 실험과 해석을 수행하였다. 표준형 및 플로팅 슬래브를 제작하여 가진함으로써 진동응답과 소음을 계측하였고, 수치해석, 유한요소법과 SEA 기법을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다, 실험 및 해석을 통하여 슬래브의 동적 구조적 특성, 구조물 진동과 소음의 상관성, 플로팅 슬래브의 저감 효과 등에 관한 결과를 도출하였다.

Abstract In the case of elevated railway station in which railway is connected with superstructure of station, vibration and noise level is relatively higher than those of general structure type station due to structural characteristic which transmits vibration directly. Therefore, characteristic understanding of structural vibration and accompanying structure cause noise and establishment of reduction plan through the results are in need. Test and analysis are performed in this research to consider correlativity between structural vibration and accompanying structure cause noise when external forces are applied on standard slab and floating slab which is able to isolate vibration. By producing and loading on standard and floating slab, vibration and noise response are measured while simulation using numerical analysis, finite element method and SEA method is performed. The results about structural dynamic behavior of slab, correlativity between structural vibration and noise, reduction performance of floating slab is deduced through the analysis of tests.

Key Words : Floating slab, Slab vibration, Statistical energy analysis, Structural borne noise

1. 서론

철도의 운행으로 인하여 발생하는 소음 및 진동에 대한 민원의 증가는 철도의 신설을 통한 철도교통의 활성화에 걸림돌이 되고 있다. 대부분의 철도 소음 및 진동에 대한 민원은 철도 연변의 환경소음 또는 지반진동으로

인한 인체의 생리적 고통이나 구조물의 경미한 손상에 기인하고 있으나, 역사, 승강장, 차량 내 등에서 이용객이 직접 체감하는 소음 및 진동에 대한 불만도 늘어가는 상황이다. 특히 궤도가 역사의 상부에서 연결되는 선하역사 형식의 경우 일반 역사 구조형식과 달리 진동이 직접 전달되는 구조적 특성으로 인하여 진동 및 소음레벨

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(14RTRP-B072484-02)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Dongdoo Jang(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5740 email: ddjang@krii.re.kr

Received March 5, 2015

Revised April 3 2015

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

이 상대적으로 높은 상황이다. 일반적으로 구조물 진동은 구조물 기인 소음(structural borne noise)으로 이어지므로 진동 크기나 특성이 변함에 따라 방사되는 소음도 영향을 받게 된다. 특히 선하역사의 슬래브, 기둥, 벽 등과 같은 주요 구조체가 외부 가진력에 의하여 저주파 대역의 진동을 발생하고 이로 인한 구조물 기인 소음은 청각적 불편뿐 아니라 신체축압이나 척추에 자극을 주게 되며, 따라서 선하역사의 이용객 뿐 아니라 거주자의 경우 이로 인한 피해가 클 것으로 판단된다. 이에 선하역사의 구조물 진동과 구조물 기인 소음을 저감하기 위하여 국내·외 저감 방안이 민원 현장에 적용되고 있으며, 진동 발생원인 케도시스템에 적용하는 플로팅 슬래브 케도공법의 효율이 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나 플로팅 슬래브 케도공법의 경우 설계와 시공의 난이도, 과도한 비용 소요로 인하여 경제적이며 효율적인 대안이 시급히 요구되고 있다.

구조물을 구성하는 부재에서 슬래브의 진동과 구조물 기인 소음을 저감하기 위한 기존의 국내 연구는 대부분 방진재료의 적층 또는 슬래브 두께의 증가 등에 초점을 맞추어 수행되었다 [1,2,3]. 그러나 슬래브에서 발생하는 저주파 대역 진동에 대해서 방진재의 적층으로 인한 감쇄효율은 충분치 않은 것으로 보고되고 있으며, 슬래브 두께의 증가는 사용공간의 축소와 하중증가로 인한 공사비가 늘어나는 등의 문제가 될 수 있다. 따라서 구조물 진동과 이로 인해 발생하는 구조물 기인 소음에 대한 특성 파악과 그 결과를 활용한 저감 방안의 수립이 필요하다.

본 연구는 선하역사에서 열차운행, 이용객 하중, 기기 하중 등과 같은 다양한 외력에 의하여 가진되는 기존 슬

래브의 진동에 따른 구조물 기인 소음을 고찰하고, 구조물 진동을 줄이기 위한 뜯 바닥 형식의 슬래브에 대하여 실험과 유한요소 모델링 및 SEA(Statistical Energy Analysis)기법을 활용한 시뮬레이션을 수행하여 결과를 분석하였다. 도출된 결과는 슬래브 진동 및 구조물 기인 소음에 대한 저감방안의 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 구조물 진동과 구조물 기인 소음

2.1 슬래브 진동과 소음

Fig. 1(a)는 외부 하중으로 인하여 슬래브가 가진되고 이로 인한 진동과 소음이 방사되는 구조적 전달시스템의 개념도를 나타내고 있다. 이와 같은 구조계 전달 시스템에서는 4가지 구성요소를 고려하며, 구성요소는 슬래브의 동적 구조계, 슬래브의 힘의 전달체계, 슬래브의 진동, 구조물 기인 소음방사이다 [4]. 또한 선하역사와 같은 복합구조물에 외력에 의한 진동의 전달과 구조물 기인 소음에 이르는 전달체계 다이어그램을 Fig. 1(b)에 나타냈다.

가진되는 슬래브는 선형 구조적 진동 전달체계를 형성하면서 구조물 기인 소음을 전달하게 된다. 따라서 슬래브 진동은 두께, 질량, 지지조건 등에 의해 좌우되고 구조물 기인 소음은 슬래브의 진동속도, 구조물 표면적 등에 크게 좌우됨을 예측할 수 있다 [5]. 기존 연구결과에 따르면 슬래브의 진동은 진동 모드가 중요한 요소가 되고 최저 고유진동수 30Hz 대역 이하의 탄성영역, 고유진동 모드 영역, 80Hz 보다 높은 증폭 진동영역으로 고려할 수 있다 [6].

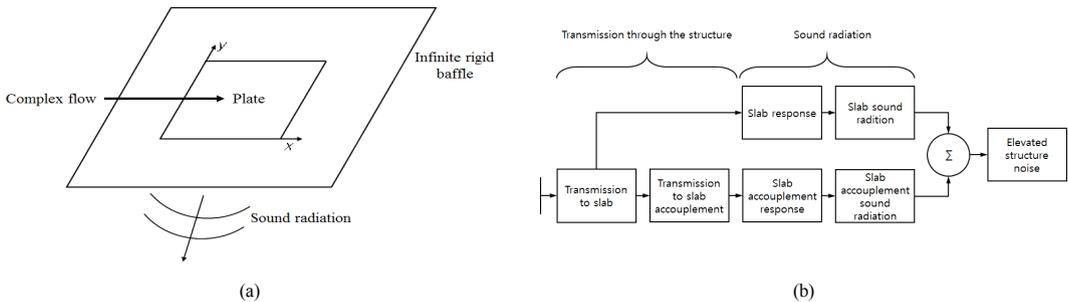


Fig. 1. Flow diagram of slab vibration and sound radiation
 (a) Conceptual diagram of sound radiation caused by slab vibration
 (b) Structural vibration and sound radiation pathway

2.2 슬래브 진동에 의한 소음방사의 수치 해석

진동에너지가 슬래브와 연결재에 전달되면 진동에너지는 감쇄에 의한 소산 또는 음향으로 방사하게 된다. 선하역사는 크고 복잡한 복합구조계이며 관심 주파수 대역에서 많은 진동모드를 갖게 된다. 입사된 진동에너지에 의해 구조물 진동이 발생하고 이로 인해 방사되는 소음을 예측하기 위하여 유한요소 모델과 통계적 에너지 해석법(Statistical Energy Analysis, SEA)을 이용하여 해석하였다 [7,8,9]. SEA 기법에서는 구조계의 하위 2개 부재 에너지 흐름은 평균 모드에너지의 차이에 비례하는 것으로 가정한다 [2, 10]. 두 부재사이의 에너지 평형을 설정하고 각각의 에너지를 구함으로써 진동속도를 산출할 수 있다.

1개의 슬래브에 대하여, 에너지 평형식은 식 (1)과 같다.

$$W_{IN} = W_{diss} + W_{rad} \quad (1)$$

여기서, W_{IN} = 입력 에너지,

W_{diss} = 소산된 진동에너지

W_{rad} = 방사된 음향에너지

소산된 진동에너지는 식 (2)와 같으며, 식 (1)과 식 (2)로부터 슬래브의 음장공간에서 평균 속도제곱 $[\overline{v^2}]$ 은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 E 는 슬래브의 진동에너지이며, η 은 댐핑계수, M 은 슬래브의 질량을 나타낸다.

$$W_{diss} = \omega \eta E = \omega \eta M [\overline{v^2}] \quad (2)$$

$$[\overline{v^2}] = \frac{W_{IN}}{\omega \eta M} \quad (3)$$

외부에 의한 진동이 없는 연결재가 슬래브와 연결되어서 발생하는 순 진동에너지가 연결부재에 전량 전달되는 것으로 가정하여 식 (4)로부터 슬래브 n 의 공간에서 평균 속도제곱 값을 구할 수 있다. 여기서 S 는 표면적, h 는 두께를 나타내며 평균 속도제곱 값은 시스템의 입사된 음향파워 값으로 표현할 수 있다.

$$[\overline{v^2}] = \frac{W_{IN}}{\omega \eta \rho_s h_n^2 \sum_j (S_j / h_j)} \quad (4)$$

가진되는 슬래브의 방사된 음향파워는 식 (5)와 같다. 여기서 ρ_o 는 공기의 밀도, c_o 는 음속, S 는 슬래브의 표면적, σ 는 방사계수이다.

$$W_{rad} = \rho_o c_o \sigma S (\overline{v^2}) \quad (5)$$

슬래브의 음향 방사계수는 단순 지지된 슬래브에 대하여 점근선 식을 활용하여 식 (6)과 같이 유도할 수 있으며 [11] $f_{1,1}$ 은 슬래브의 고유진동수로 식 (7)과 같다.

$$\sigma = \frac{4S}{c_o^2} f^2 \quad \text{for } f < f_{1,1} \quad (6)$$

$$f_{1,1} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (7)$$

여기서 $S = a \times b$ 는 표면적, $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ 는 슬래브의 휨강성이다. 여러 부속재로 이루어진 시스템의 경우 σ_n 은 부재 n 의 방사계수가 되며 전체 방사된 음향은 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$W_{rad} = \rho_o c_o \sum_n \sigma_n S_n (\overline{v_n^2}) \quad (8)$$

3. 실험계획 및 결과

3.1 시험체 및 가진 실험계획

현재 선하역사에 사용되고 있는 표준형 슬래브의 진동과 구조물 기인 소음의 저감의 방안으로 슬래브의 매스를 하부 연결재와의 진동절연을 목적으로 하는 플로팅 슬래브를 제안하고, 각각 2개의 시험체를 제작하였다. Fig. 2 (a)와 (b)는 기존 사용되고 있는 표준형 슬래브와 플로팅 슬래브를 나타내고 있다. 플로팅 슬래브는 표준형 슬래브와 동일한 구조슬래브위에 \square 형태의 높이 20mm의 우레탄 받침을 배치하고 사이사이에 경량콘크리트 채움을 하였으며, 그 위에 Γ 형태의 목재틀을 끼워넣는 방식으로 고정하였고 연속된 목재틀 위에 마감몰탈을 타설하여 시험체를 완성하였다. 슬래브의 두께는 원형 대비 축소비율과 배근을 고려하여 120mm로 하였고 마감층의 마감몰탈 및 경량 콘크리트층은 시험체 제작 및 진동시험 충격하중 작용시 파손방지를 위해 각 20mm 두께를 적용하였다. 제작한 표준형 및 플로팅 슬

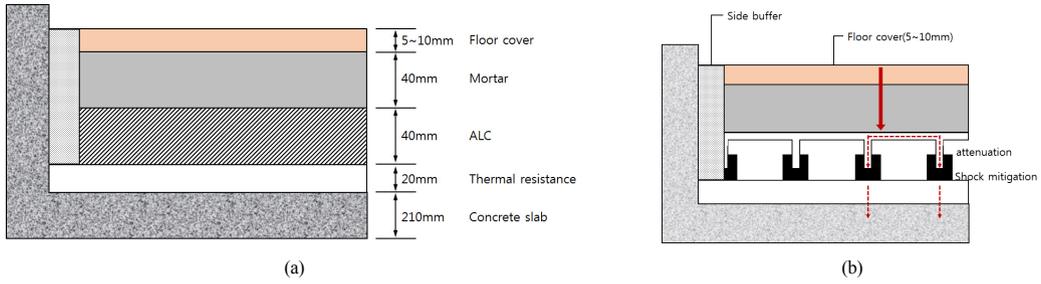


Fig. 2. Concept diagram of standard and floating slab
(a)Standard slab (b)Floating slab

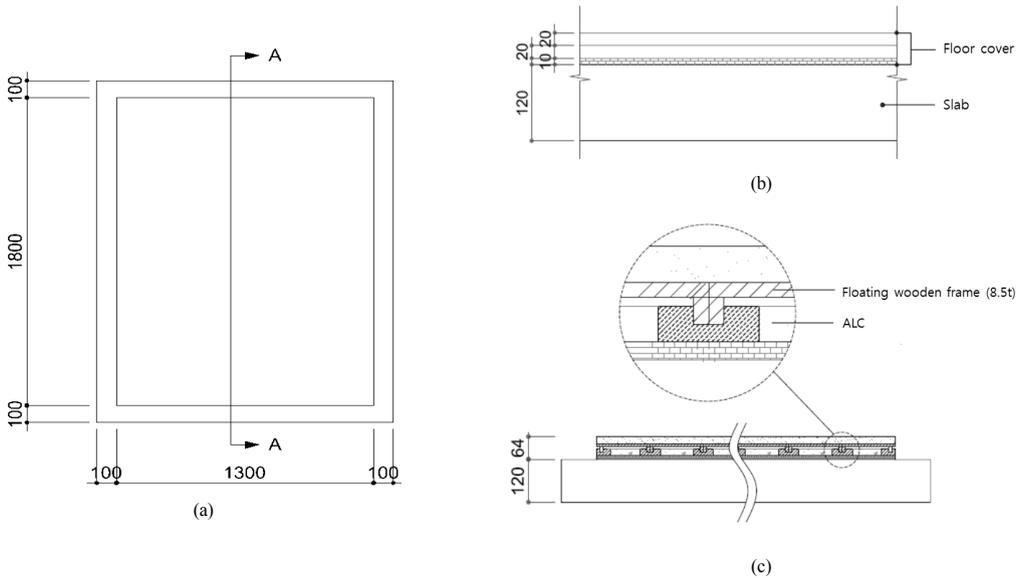


Fig. 3. Drawing of slab specimen
(a)Top view (b)A-A section of standard slab (c)A-A section of floating slab

래브의 시험체 형상은 Fig. 3과 같으며 Table 1과 Table 2에 각각 시험체의 재원과 물성치를 각각 정리하였다. Fig. 4는 표준형과 플로팅 슬래브의 제작 과정을 보여주고 있다. 또한 시험체에 동일한 경계조건과 안정적인 진동시험/계측이 가능하도록 슬래브 진동시험용 시험대를 별도로 제작하였다. 각 시험체는 경계조건을 위하여 네변에 총 24개의 고정구를 두어 시험장치와 볼트체결을 통해 견고하게 고정할 수 있도록 하였다.

Table 1. Specimen dimensions

	fck	Size	Thickness(mm)		
			slab	cover	total
Standard	21	2.0m×	120	50	170
Floating	MPa	1.5m	120	63.5	183.5

Table 2. Specimen material properties

material	modulus of elasticity (N/m ²)	density (kg/m ³)	poissonratio	damping ratio
Concrete	2.25×1010	2,400	0.167	0.02
Mortar	1.96×1010	2,300	0.167	0.02
Rubber	1.99×109	2,100	0.5	0.2
Wood	9.00×106	800	0.34	0.35

플로팅 슬래브의 진동 및 구조물 기인 소음의 특성을 표준형 슬래브와 상대적으로 비교하기 위해, 슬래브 가진 실험은 KS F 2810-2 (2001)을 준용하였고 주변 배경 소음이 발생하지 않는 시간에 실시하였다. Fig. 5(a)는 슬래브의 가진 위치를 나타내고 있으며, 슬래브의 진동 전달특성 파악을 위해 시험체 상부의 중앙부, 외측부와

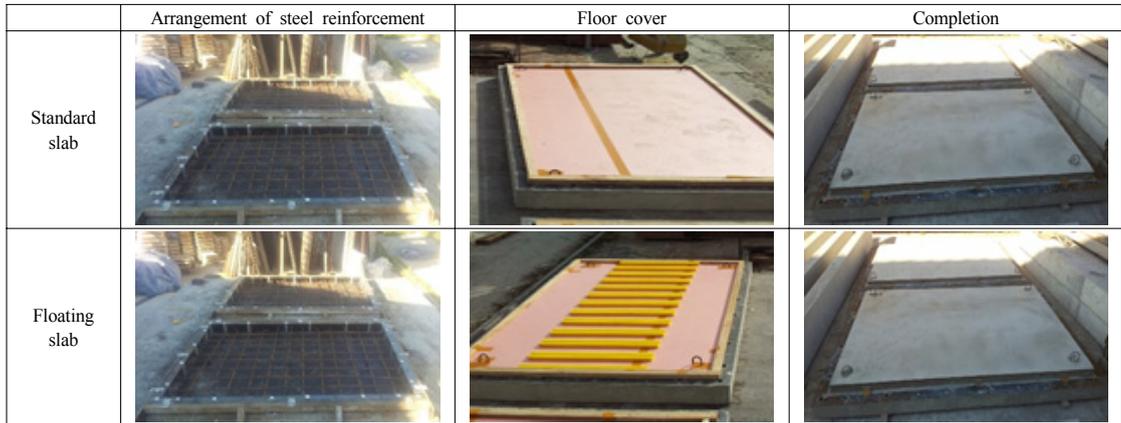


Fig. 4. Manufacturing procedure of slab specimen

슬래브 하면까지 3개의 위치에 계측센서를 설치하였다. Fig. 5(b)는 슬래브 시험체를 제작된 시험대에 설치하고, 시험체의 상부에 충격장치와 시험대 하부 중앙에 소음계가 설치된 것을 보여주고 있다.

3.2 실험 결과

Fig. 6. (a), (b)는 슬래브 실험체를 대상으로 중앙부와 외측에서 측정된 진동 응답특성을 주파수 대역별로 나타내고 있다. 슬래브의 진동응답은 외측 보다 중앙부에서 크게 나타났고, 또한 플로팅 슬래브가 표준형 슬래브와 비교하여 진동레벨이 낮은 것으로 나타남으로써 진동 전달의 감쇄가 있었음을 알 수 있다. 또한 표준형과 플로팅

슬래브 모두 25 ~ 35Hz 저주파 대역이 진동응답의 지배 주파수 대역인 것으로 나타났다. Fig. 7 (a), (b)는 슬래브의 진동으로 인하여 발생한 구조물 기인 소음의 측정값을 나타내고 있다. 플로팅 슬래브가 표준형 슬래브에 비하여 저주파 대역의 소음저감 효과가 큼을 알 수 있으며, overall 값은 약 2.5 dB(A)까지 감소시키는 것으로 나타났다. 슬래브의 진동응답 결과와 같이 소음의 경우에도 유사대역인 30Hz 대역에서 최대 소음이 발생하였으나 진동레벨의 크고 작음이 소음레벨의 크기와 일치하지는 않았다.

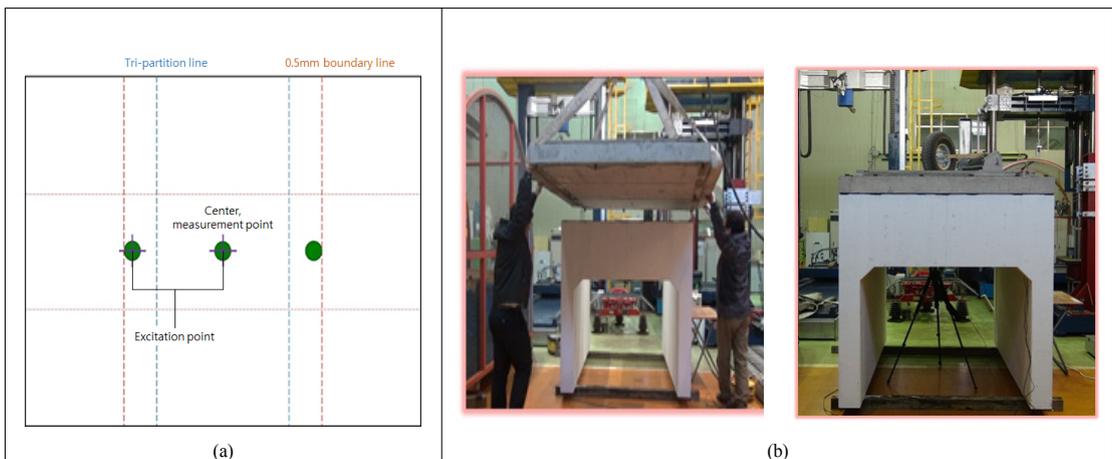


Fig. 5. Measurement locations and experimental setup
 (a) Measurement locations (b) Experimental setup

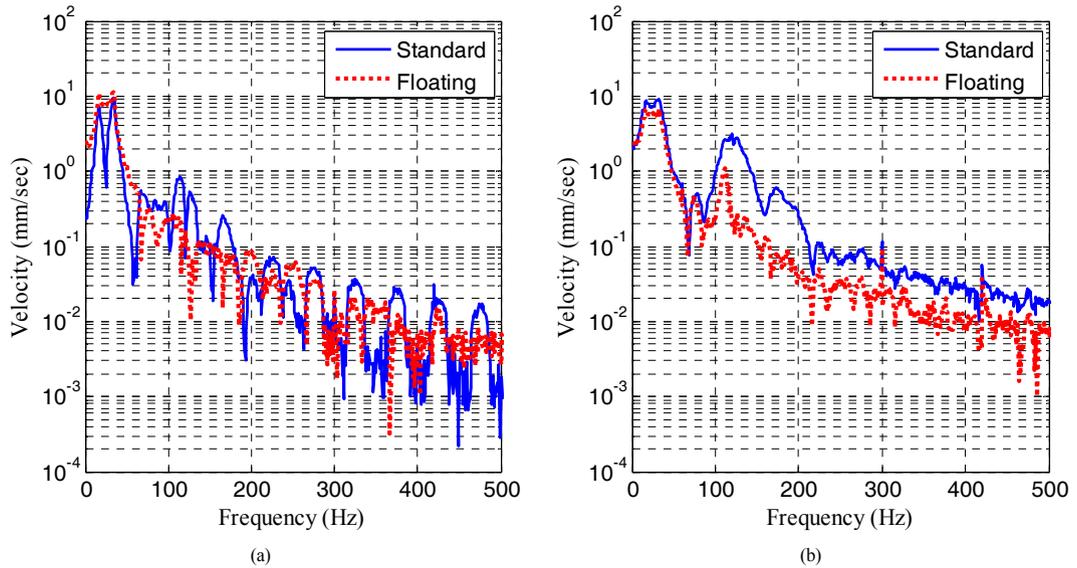


Fig. 6. Experimental frequency response of the slab velocity
(a) Center excitation (b) Side excitation

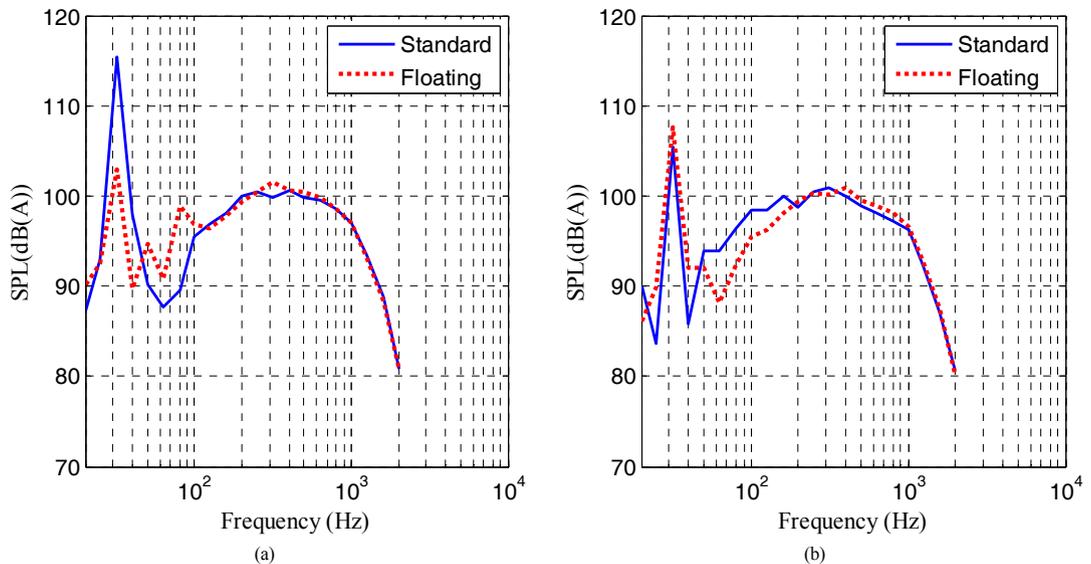


Fig. 7. Experimental frequency response of the structure-borne-noise
(a) Center excitation (b) Side excitation

4. 해석 결과 및 실험과의 비교 분석

4.1 해석 및 결과

슬래브의 구조에 따라 진동과 소음에 미치는 영향을

분석하기 위하여 유한요소법과 SEA(Statistical Energy Analysis) 해석을 수행하였다. 소음이 전달되는 매질을 모델링 하여 주파수 대역에서의 음향모드를 구하기 쉬우므로 유한요소법을 사용하였다. 슬래브는 쉘요소로 모델

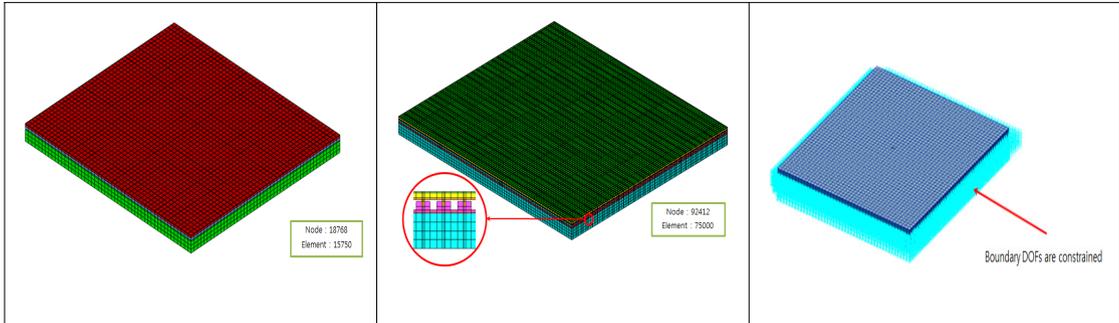


Fig. 8. FE model of slab and boundary condition

링 하였으며 진동의 진폭을 고려하여 경계조건은 실험과 동일하게 4변 단순지지로 하였고 실험과 동일한 슬래브의 물성치를 사용하였다. Fig. 8은 슬래브의 유한요소 모델과 경계조건을 보여주고 있다.

가진된 슬래브의 주요 진동 모드형상과 고유진동수를 Fig. 9와 Fig. 10에서 보여주고 있다. Fig. 11는 표준형 및 플로팅 슬래브의 진동응답의 해석결과를 보여주고 있다. 진동모드 해석결과는 실험결과와 유사하게 30Hz 대역에서 동일한 1차 진동모드가 형성되었고 플로팅 슬래브의 고유진동수가 전체적으로 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 표준형 슬래브 비교하여 플로팅 슬래브의 동적 특성이 변화됨에 따라 주파수 대역의 이동으로 나타난 것으로 판단된다 [8]. 또한 100Hz 대역 이하에서 표준형 슬래브보다 플로팅 슬래브의 진동 응답이 낮은 것으로 해석되었다.

Fig. 11은 진동으로 인한 슬래브 중앙지점에서의 진

동으로 인한 방사소음의 해석결과를 나타내고 있다. 플로팅 슬래브의 overall 값이 약 2dB(A) 낮게 나타났으며 저주파 대역 내 피크 주파수에서 실험결과와 비교하여 음압레벨이 차이가 크지 않음을 보여주고 있다. 또한 가청 주파수 대역인 50Hz 이상의 대역에서 플로팅 슬래브가 저감효과를 보여주고 있다. 방사된 소음은 진동응답 속도와 상관성을 보이며 슬래브의 거동과 유사하므로 진동속도가 빠른 소리의 증폭도 커짐을 예측할 수 있으며, 진동모드 해석결과와 음압분포를 동시에 고려시 소음방사가 최대가 될 때 진동속도가 최대가 되는 부분에 위치하게 된다 [7]. 따라서 슬래브의 진동하는 표면과 음압레벨과의 상관성은 밀접하며 30 Hz 대역의 진동응답과 음압레벨로부터 유추할 수 있다. 이로 인하여 음압분포와 진동모드가 유사한 형태로 나타나는 것으로 보인다 [6]. 이와 같은 구조물 진동과 방사소음의 결과는 슬래브의 동적 구조특성에 기인하며, 이러한 차이가 저주파 대

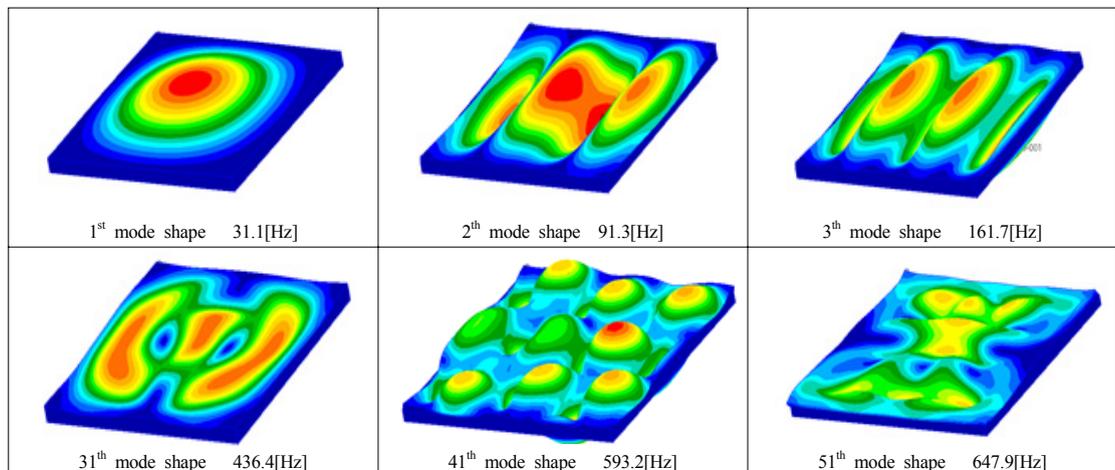


Fig. 9. Mode shape of standard slab

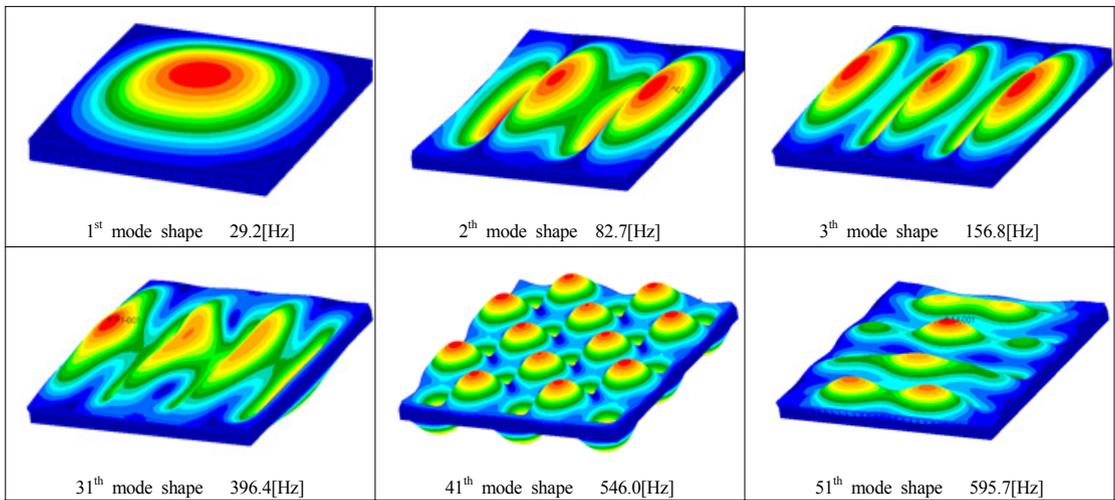


Fig. 10. Mode shape of floating slab

역에서 진동과 소음에 큰 영향을 미치는 것임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 기존 슬래브와 진동을 절연시키는 구조형식의 플로팅 슬래브에 대하여 외력에 의한 가진 시 발생하는 구조적 진동과 이로 인한 구조물 기인 소음의 특성과 상관성을 고찰하고자 실험과 해석을 수행하였다. 표

준형 및 플로팅 슬래브를 제작하여 가진함으로써 진동 응답과 소음을 계측하였고, 수치해석, 유한요소법과 SEA 기법을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다, 실험결과 및 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 표준형 및 플로팅 슬래브에 대한 가진 실험으로부터 진동응답은 저주파 대역인 30Hz 범위에서 피크 진동이 발생하였으며 방사소음도 거의 일치하였다. 그러나 중·고주파 대역에서는 진동응답 분포가 방사소음의 음압분포와 조금씩 차이가 있는 유사한 경향은 보였다. 또한 플로팅 슬래브가 표준형과 비교하여 진동은

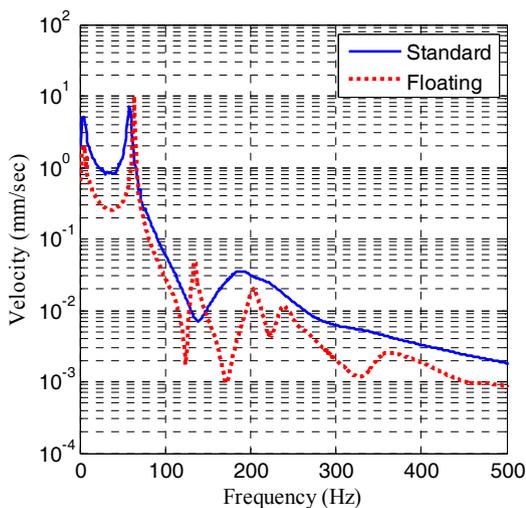


Fig. 11. Numerical frequency response of slab velocity

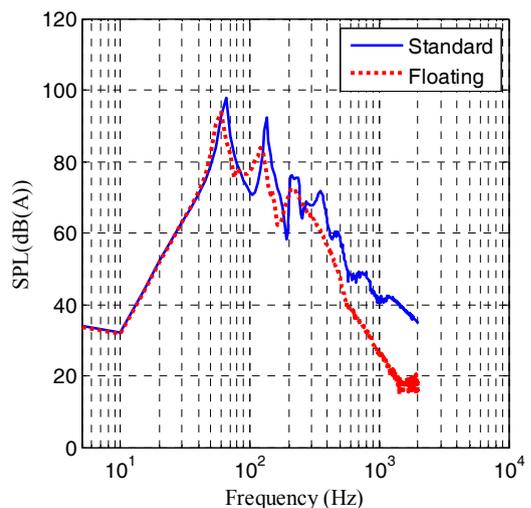


Fig. 12. Numerical frequency response of the structure-borne-noise

3.5dB(V), 소음은 2.5dB(A)가 낮은 것으로 나타났다. 이는 가진으로 인한 진동이 슬래브 하면에서 플로팅 구조에 의해 일부 절연효과를 보인 것으로 예측되며, 또한 이와 같이 진동전달이 낮아짐으로 인하여 소음의 방사량도 줄었음을 알 수 있었다.

(2) 해석결과에 의하면 진동응답은 표준형 및 플로팅 슬래브의 진동응답은 55Hz 대역에서 방사소음은 65 Hz 대역에서 높게 나타남으로써 실험치와는 일부 차이를 보였으나, 플로팅 슬래브에서의 저감능과 두 종류의 슬래브에서의 전체적인 진동응답 및 방사소음의 특성이 실험결과와 매우 유사하게 나타났다. 이는 해석에 사용한 조화하중이 실제 실험에 의한 하중과 차이에 기인한 것으로 판단되나, 본 연구의 수치해석 및 활용된 시뮬레이션 기법은 슬래브의 진동응답과 방사소음 예측에 유용한 수단임을 알 수 있었다.

(3) 실험과 해석결과로부터 구조물 진동과 이로 인한 구조물 기인 소음은 50Hz 이하의 저주파 대역에서 밀접한 상관성을 보였으며, 이는 슬래브의 동적 구조특성에 의한 진동응답 특성에 우선함에 따라 특정 주파수 대역의 진동의 조절이 가능한 저감대책이 가장 효율적임을 알 수 있었다.

References

- [1] Korean Standards Association KS F 2810, Field measurement of impact sound insulation of floors-part 2 : method using standard heavy impact sources, 2001
- [2] S. H. Seo, H. S. Song, J. Y. Jeon, "Noise and Vibration Characteristics of Concrete Floor Structures Using Resilient Materials Driven by Standard Heavy Impact Source", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14. No. 8, pp. 661 ~ 667, 2004
- [3] C. C. Sung, J. T. Jan, "The Response of and Sound Power Radiated by a Clamped Rectangular Plate", Journal of Sound and Vibration, Vol. 207, No. 3, pp. 301 ~ 317, 1997
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1997.1125>
- [4] S. H. Seo and J. Y. Jeon, "2-Dimensional Floor Impact Vibration Analysis in Bare Reinforced Concrete Slab Using Finite Element Method", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 604 ~ 611, 2005
- [5] J. S. Hwang, G. H. Hong and H. G. Park, "Vibration and Noise Control of the Simply Supported Slab Using the Multi-tuned Mass Damper", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 1006 ~ 1013, 2008
- [6] Mees P, Vermeir G, Structure-borne sound transmission at elastically connected plates, J Sound Vib 166, pp. 55 ~ 76, 1993
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1993.1283>
- [7] N. Trompette, M. Guerich, "An experimental validation of vibro-acoustic prediction by the use of simplified methods", Applied Acoustics, Vol. 66, pp. 427 ~ 445, 2005
- [8] P. J. Shorter, R. S. Langley, Vibro-acoustic analysis of complex systems, Journal of Sound and Vibration 288 (3), pp. 669 ~ 699, 2005
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2005.07.010>
- [9] R. S. Langley, J. A. Cordoli, Hybrid deterministic-statistical analysis of vibro-acoustic systems with domain couplings on statistical components, Journal of Sound and Vibration 321 (3-5), pp. 893 ~ 912, 2009
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2008.10.007>
- [10] Sakagami K, Michishita K, Morimoto and M, Kitamura Y, Sound radiation from a baffled elastic plate strip of infinite length with various concentrated excitation forces, Appl Acoust 55, pp. 181 ~ 202, 1998
- [11] J. D. Kim, S. Y. Hong, J. H. Song, "Development of Power Flow Boundary Element Method for 3-dimensional Multi-domain Noise Analysis", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 10, pp. 967 ~ 974, 2011
DOI: <http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2011.21.10.967>

김진호(Jin-Ho Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울시립대학교 대학원 구조공학 (공학석사)
- 2003년 9월 : UC Davis 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 5월 ~ 2003년 2월 : California D.O.T. 연구원
- 2003년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도토목, 소음·진동

장 동 두(Dongdoo Jang)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사
- 2003년 3월 ~ 2007년 7월 : (주)티이솔루션 연구원
- 2013년 2월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사
- 2014년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

케도토목, 진동제어

지 용 수(Yong-Soo Ji)

[정회원]



- 2000년 2월 : 인천대학교 일반대학원 토목공학과 석사
- 2000년 3월 ~ 2001년 2월 : 동아건설산업(주) 연구원
- 2013년 3월 ~ 2013년 12월 : 부천대학교 토목과 겸임교수
- 2002년 3월 ~ 현재 : (주)에스코알티에스 기술연구소 부소장

<관심분야>

내진설계, 진동제어