

실내의 바닥진동에 의한 음향방사해석

최 석 주
삼성종합건설(주)기술연구소

Analysis of sound radiation by floor vibration in the closed sound field

Seokjoo Choi
Institute of Technology, Samsung Eng. & Const. Co.

요약

실내 바닥슬래브의 횡진동에 의한 음향방사문제에 대하여 유한요소법을 적용하여 검토하였다. 단순한 형상의 판이 횡진동하여 자유공간에 음을 방사하는 문제에 대해서는 이론적인 해를 구할 수 있으나, 임의형상의 판이 횡진동하여 실내에 음을 방사하는 문제에 대해서는 검토되지 않았다. 따라서 본연구에서는 이와같은 문제를 단순화한 해석법으로서 먼저 유한요소법을 이용하여 판의 횡진동에 대한 고유모드의 상대변위를 구하고, 다음 상대변위를 진동속도로 변환한 결과를 입력조건으로 하여 유한요소법에 의한 3차원 음장해석을 하였다. 그 결과 실내 바닥슬래브의 횡진동에 의한 음향방사파워는 슬래브의 진동모드, 실내음향모드 및 벽흡음율 등의 조건에 따라 크게 변화된다는 것을 확인하였다.

1. 서론

건물내 소음문제의 하나로서 교통기관과 각종 기계류에서 발생된 진동이 건물에 전달되어, 실내에서 음으로 방사되는 문제가 있다. 이 문제를 효율적으로 방지 혹은 저감시키기 위해서는 판진동과 실내방사음과의 관계를 정확하게 파악할 필요가 있다.

종래, 무한판 혹은 형상이 단순한 평판진동에 의한 자유공간으로의 음향방사에 대해서는 Westphal¹⁾, Maidanik²⁾, Wallace³⁾ 등의 연구에 의하여 그 예측이 가능하게 되었다. 또한 Bhattacharya⁴⁾는 직방체이며 진동면(판넬)을 제외한 전벽면이 음향적으로 완전반사하는 조건의 음향방사에 대하여 판넬의 고유진동모드와 실내음향모드와의 연성(coupling)관계로서 이론해를 구하고 있다. 그러나, 이들 방법은 실내의 형상이나 경계벽의 흡음조건 등이 복잡한 경우에는 적용하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 실내의 바닥진동에 따르는 음향방사의 메카니즘(이하 음향방사효율)을 규명하기 위한 하나의 방법으로서 유한요소법을 적용하여 기초적인 검토를 하였다. 즉, 바닥판이 저차모드로 횡진동하는 경우, 실내음향모드와 벽흡음율에 따른 음향방사효율의 변화에 대하여 검토하였다.

2. 음향방사효율의 정의

무한대의 평판이 평균속도 V_0 로 피스톤 진동하는 경우, K.Gosele⁵⁾가 도입한 식(1)의 음향방사효율 κ 는 횡진동하는 판으로부터의 음향방사파워를 다루는데 매우 유용하다.

$$\kappa = \frac{W}{\rho c S \langle V_0 \rangle^2} \quad (1)$$

단, ρc : 공기중의 특성임피던스(kg/m²·sec)
S : 진동면의 면적(m²)
 $\langle V_0 \rangle^2$: 진동면의 2승평균속도(m²/sec²)
W : 음향방사파워

그러나, 감쇠가 매우 빠른 구조체를 접 가진할 경우나 판의 진폭, 위상관계가 복잡한 경우에는 평균속도 V_0 를 정의할 수 없기 때문에 그에 대응되는 음향방사효율을 구할 수 없다. 따라서 여기서는 식(1)의 수정안으로서 진동면을 잘게 분할하여 분할면 하나에 대응되는 진동과 음향방사파워와의 관계를 고려할 수 있는 식을 다음과 같이 정의하여 본문제에 적용하였다.

$$\kappa = \frac{W}{\rho c \sum S_i \langle v_{0,i} \rangle^2} \quad (1)'$$

단, S_i : i번째 진동면의 면적(m²)
 $\langle v_{0,i} \rangle^2$: i번째 진동면의 2승평균속도(m²/sec²)
i = 1, 2, ..., n (n은 분할면의 수)

3. 수치해석에

3.1 바닥슬래브의 고유진동모드

그림-1 에 나타난 철근콘크리트모델의 바닥슬래브를 대상으로 고유주파수·고유진동모드에 대한 수치계산을 하였다. 계산방법으로는 그림-2 에 나타난 바와 같이 9절점 사각형요소를 이용하여 요소분할은 48요소, 221 절점으로 하였으며, 슬래브의 주변지지조건은 단순 및 고정지지 두조건을 설정하였다. 이 경우 총자유도수는 단순지지 551, 주변고정인 경우 495가 된다.

또한 수치계산치를 실험치와 비교하기 위하여 그림-3 에 나타난 간단한 장치를 이용하여 수음점과 가진점간의 전달함수를 측정하였다. 이때 전달함수의 진폭이 peak가 되는 주파수를 고유주파수라 하였으며, 수치계산과 측정 에 사용된 구조물의 물성치는 다음과 같다.

- 판두께 : $h = 0.03$ (m)
- 영율 : $E = 2.02 \times 10^{10}$ (N/m²)
- 포아송비 : $\nu = 0.19$

표-1 에 슬래브주변이 단순지지인 경우의 수치계산결과와 식(2)에 의한 계산치, 표-2 에는 슬래브주변이 고정지지인 경우의 수치계산결과와 근사식(3)의 및 실험결과를 비교하여 나타낸다. 두조건 모두 유한요소법에 의하여 구한 고유주파수와 실험치 혹은 엄밀해와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

$$f_{mn} = \frac{k}{2\pi ab} (D/N)^{1/2} \quad (2)$$

$$f_{mn} = \frac{k}{2\pi ab} (D/N)^{1/2} \left[\left(\frac{\alpha}{a}\right)^4 + \left(\frac{\beta}{b}\right)^4 + 2 \left(\frac{\alpha\beta}{ab}\right)^2 P_m P_n \right]^{1/2} \quad (3)$$

단, a, b : x, y 방향의 변길이(m)
 M : 면질도 $\rho_p h$ (kg/m²)

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad k = \frac{(m\pi)^2}{(a/b)} + \frac{(n\pi)^2}{(b/a)}$$

$$\alpha = m + 0.5 \quad \beta = n + 0.5$$

$$P_m = 1 - (2/\pi\alpha) \quad P_n = n - (2/\pi\beta)$$

$m, n = 1, 2, \dots$

3.2 2차원 음장내의 음향인텐시티계산

2차원 직방체모델을 대상으로 유한요소법에 의한 복소음향인텐시티의 수치계산을 하였다. 이 모델은 주위벽체에 약간의 흡음율을 가정하면 근사적으로 해를 구할 수 있는 모델로서 수치계산결과의 타당성 검증은 위하여 해석모델로 채택하였다. 계산방법으로는 9절점 사각형요소를 사용하여 요소분할은 등간격으로 875절점, 204요소로 하였다. 또한 경계조건은 근사이론치와 비교하기 위하여 주위벽이 약간 흡음하는 조건, 즉 음압반사율 0.98

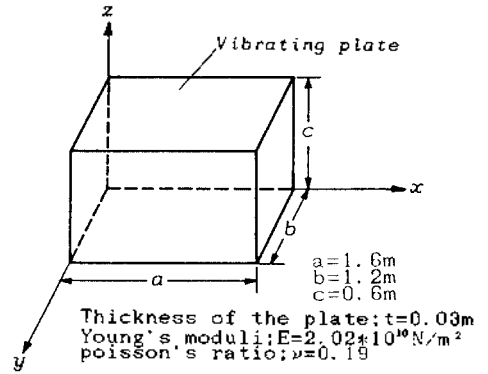


그림-1 해석모델의 개요

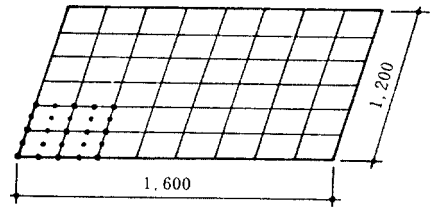


그림-2 바닥슬래브의 요소분할

표-1 콘크리트판의 고유주파수 비교(단순지지)

Mode	by FEM(Hz)	by Theory(Hz)
(1,1)	43.1	42.4
(2,1)	89.6	89.1
(1,2)	126.4	127.3
(3,1)	167.6	167.6
(2,2)	171.9	173.9
(3,2)	248.6	252.4
(1,3)	266.5	265.1
(4,1)	277.9	277.9
(2,3)	310.9	313.9
(4,2)	357.6	362.7

표-2 콘크리트판의 고유주파수 비교(주변고정)

Mode	by FEM (Hz)	by Theory (Hz)	by Experiment (Hz)
(1,1)	80.8	81.6	80.5
(2,1)	135.3	137.4	135.0
(1,2)	190.0	192.3	-
(3,1)	225.4	228.7	-
(2,2)	239.6	243.1	232.5
(3,2)	323.9	328.2	-
(4,1)	350.4	353.3	352.5
(1,3)	358.9	360.0	-
(2,3)	405.8	409.3	407.5
(4,2)	443.8	450.1	-

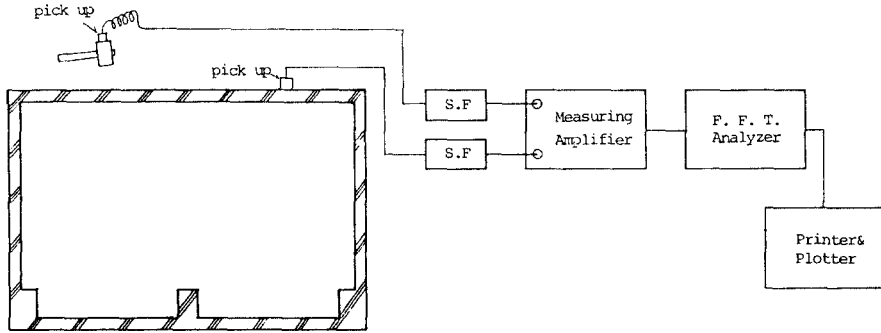


그림-3 고유모드 측정장치의 개요

에 상당하는 음향임피던스(실수)를 설정하였다. 음원은 그림에 나타낸 검음원이 630Hz로 진동하는 조건으로 하였다.

복소음향인텐시티의 수치계산결과를 근사이론치⁷⁾와 비교하여 그림-4에 나타낸다. 계산결과와 근사이론치가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 후술하는 바닥슬래브의 진동에 의한 음향방사파워의 산출시에는 음향인텐시티법을 이용하였다.

3.3 바닥슬래브의 진동에 의한 음향방사

해석모델은 그림-1의 바닥슬래브가 각각의 고유모드 (1,1), (2,2), (2,3), (4,2)로 진동하여 3차원 실내에 음향방사하는 조건을 설정하였다.

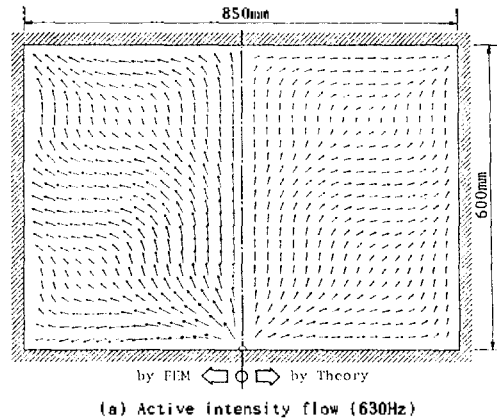
계산방법으로서는 8절점 6면체요소 사용하였으며, 요소분할은 전모델에 대하여 990요소, 1344절점으로 하였다. 이 경우, 바닥슬래브의 진동속도분포는 진출한 고유진동모드의 상대편위로 부터 구하였다. 또한 바닥슬래브를 제외한 천장과 벽의 경계조건은 후술하는 흡음율에 상당하는 음향임피던스를 적용시켰다.

바닥슬래브에서 방사되는 음향출력의 평가시에는 식 (1)의 무차원화한 음향방사효율을 적용하였다. 실내에 방사되는 음향방사파워의 계산은 50Hz에서 500Hz까지를 대상으로 하였으며, 진동면에서 방사되는 음향인텐시티의 수직방향성분을 적분하여 구하였다.

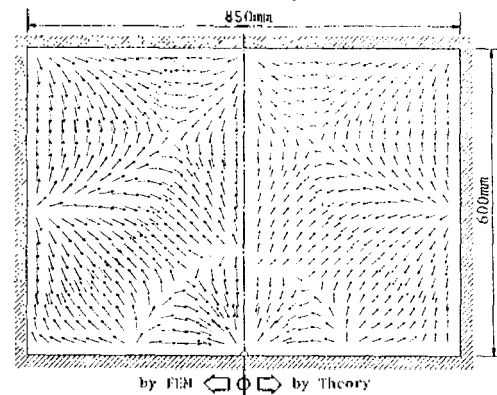
3.4 계산결과 및 그 검토

그림-5는 벽, 천장의 흡음율을 0.8 일정하게 한 경우, 바닥슬래브의 고유모드별 음향방사효율을 비교한 것이다. 슬래브의 진동모드에 따라 방사효율의 peak 위치가 변화되는 것을 알 수 있다.

그림-6는 바닥슬래브가 (1,1)모드도 진동하는 상태에서 천장의 흡음율을 0.1에서 0.51까지 4단계로 변화시켰을



(a) Active intensity flow (630Hz)



(b) Reactive intensity flow (630Hz)

그림-4 수치계산결과와 근사이론치의 비교

을 경우의 음향방사효율을 비교한 것이다. peak의 위치는 변하지 않으나 흡음율이 많이질 수록 peak와 deep의 차가 적어져 부드러운 곡선이 되는 것을 알 수 있다.

그림-7은 바닥슬래브의 모드(2,2)와 벽, 천장의 흡음율을 고정하고 실내의 층고를 4단계로 변화시켰을 경우

의 음향방사효율을 비교한 것이다. 이 결과를 보면, 200Hz부근의 peak의 위치는 변하지 않으나 다른 peak의 위치는 변화되고 있다. 이것은 실내음향모드가 음향방사 효율에 크게 영향을 미친다는 것을 의미한다.

4. 결론

바닥슬래브가 저차의 고유모드로 진동하여 실내에 음을 방사시키는 경우, 방사파워는 바닥슬래브의 진동모드, 실내의 음향모드 및 벽면 흡음율 등의 조건에 따라 크게 변화한다는 것을 확인하였다. 즉, 바닥슬래브의 진동에 의한 실내음향방사를 계산하는 경우에는 이들 파라미터를 동시에 고려할 필요가 있다.

[참고문헌]

- 1) W. Westphal, "Zur Schallabstrahlung einer zu Biegeschwingungen angeregten Wand," *Acustica*, Vol. 4, pp. 603-610(1954).
- 2) G. Maidanik, "Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 34(6), PP. 809-826(1962).
- 3) C. E. Wallace, "Radiation resistance of a rectangular panel," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 51(3), PP. 946-952(1972).
- 4) M. C. Bhattacharya and M. J. Crocker, "Forced vibration of a panel and radiation of sound into a room," *Acustica*, Vol. 22, pp. 275-294 (1969).
- 5) Gosele, "Schallabstrahlung von platten die zu biegeschwingungen angeregt sind," *Acustica*, Vol. 3, pp. 243-248(1953).
- 6) E. Szechenyi, "Approximate methods for the determination of the natural frequencies of stiffened and curved plates," *J. Sound and Vib.*, Vol. 14(3), pp. 401-418(1971).
- 7) 安久司郎, 日高新人, 矢野博夫, 横秀樹, "複素音響インテンシティによる音場解析," *日本音響學會誌*, Vol. 43(12), pp. 994-1000(1987).

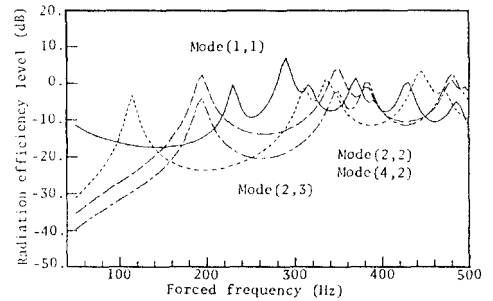


그림-5 바닥슬래브의 모드별 음향방사효율의 비교

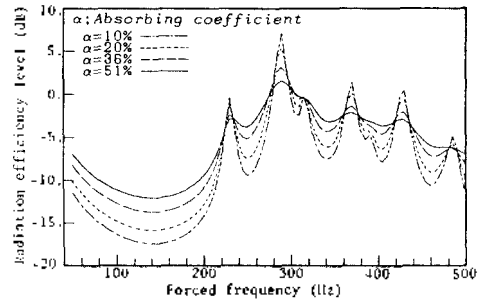


그림-6 천장 흡음율을 변화시킨 경우, 음향방사효율의 변화 (바닥슬래브 모드 (1,1))

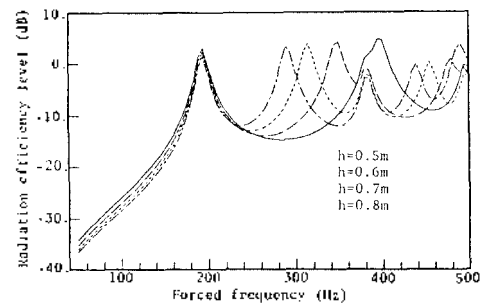


그림-7 천장 높이를 변화시킨 경우, 음향방사효율의 변화 (바닥슬래브 모드 (2,2))