

바닥충격음 임피던스법에 의한 개량형 보이드 슬라브의 선정

김우택*, 오재응**

The Selection of the Improved Void Slab Applying the Impedance Method to the Floor-Impact Sound

Wootak Kim*, Jae-Eung Oh**

ABSTRACT

Recently, high story apartments are common to solve a housing problem especially in major cities. Apartments are considered as clean, sanitary and convenient to live. However, There are some problems because residents share walls, floors and ceilings with other people. Thus, the residents are often disturbed by neighbours since sound travels the building elements.

Especially, impact noise through the floors causes the many complains. And so, it has been drawn attention to isolate by the impact sound.

The purpose of this study is to analyze the characteristics of vibration response of 12-type void slabs in the improved void slab by impedance method, and is to find the best improved void slab on the 12-type void slabs.

Key Words : Improved void slab(개량형 보이드 슬라브), Impedance method(임피던스법), Impact sound(충격음)

기호설명

- B : Stiffness of floor slab
- h : Equivalent thickness of floor slab
- L_z : Impedance
- m : density of floor slab
- V_F : Impulse Force (Voltage)
- V_Y : Response Velocity (Voltage)

- Z_b : Impedance of floor slab
- ρ : Equivalent density of floor slab

1. 서론

인구의 도시집중으로 심화된 주택난을 해결하고 토지의 효율적인 이용을 위하여 건립하기 시작한 공동주택은 이제 고층화·고밀도화 되었으며,

* 2001년 6월 25일 접수

* 한양대학교 대학원 자동차공학과

** 한양대학교 기계공학과

구조계획의 합리화와 원가절감을 위해 슬래브 두께는 얇아지고 경량화되어 가고 있다.^(1~3)

그러나 이웃과 벽체 및 바닥을 공유해야 하는 공동주택의 특수성 때문에 이웃에서 발생하는 각종 소음, 특히 아이들이 쿵팡거리며 뛰노는 소리, 물건 떨어뜨린 소리, 걷는 소리 등 바닥충격음 계통의 소음이 입주자에게 큰 피해를 주고 있으며, 이제는 차음이 주거성능을 결정하는 중요한 인자로 등장하게 되었다.^(4~5) 이미 일본에서는 30여년 전부터 보이드 슬라브의 효율적인 설계 및 시공으로 공사원가를 절감하고 있다.^(6~7) 국내에서는 보이드 슬라브에 관한 연구가 활발히 진행되고 있지는 못하며, 비용절감 측면에서 곧 이 공법에 대한 연구가 추진되어야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 보이드 슬라브의 다양한 형태를 통한 임피던스의 특성과 고유진동수의 변화에 주목하여 최적의 개량형 보이드 슬라브를 선정하고자 한다.

본 연구는 2단계로 나누어 수행되었다. 먼저 1단계 연구는 표준형 보이드 슬라브의 이론적 연구로서 기본 임피던스 이론식을 통한 기본 임피던스 및 각 가진점별 임피던스 보정량의 산정을 통해 표준형 보이드 슬라브의 일반적인 특성을 분석하였다. 2단계 연구는 12-타입의 다양한 보이드 슬라브의 전달특성을 평가하기 위한 실험적 연구로서 임피던스 법을 이용하여 각 타입별 진동응답과 고유진동수 변화에 주목하여 성능이 향상된 개량형 보이드 슬라브를 선정하였다.

2. 이론

2.1 바닥충격음의 이론⁽¹⁻⁷⁾

음원에서 음이 직접 공기 중에 방사되고 이렇게 방사된 음이 체적 탄성파로서 공기를 매질로 하여 전달하는 음이 공기음(air-borne sound)이라고 하는데 비해 진동원에서의 진동이 고체를 매질로 하여 전달되다가 이것이 건물의 천장, 바닥, 벽 등을 진동시켜 공기중으로 직접 방사되어 공기전달음처럼 인식되는 음을 고체음이라 한다. 따라서 공기음과의 차이는 음원에서 방사되는 방사형태가 음형태인지 또는 진동형태인지에 따라 구분할 수 있으나, 이들 모두 청각에 의해 지각된다는 공통점을 가지고 있다. 공해진동 및 풍진동 등과는 달리 바닥충

격음을 비롯한 고체음 분야에서는 음향방사가 고려되며 일반적으로 63Hz 이상의 주파수영역에 대해 다루고 있다.

건물의 천장, 벽, 바닥은 항상 인간과 접하고 있기 때문에 각 세대가 인접해 있는 공동주택에서의 바닥충격음은 인간생활과 직접적으로 관계가 되는 소음원이라 할수 있다. 공동주택의 바닥구조체에 이용되고 있는 콘크리트는 공기전달음을 차단하는데 효과적이기 때문에 차음재로서는 우수하다고 할수 있으나, 어느 한 지점에 충격을 받게 되면 고체진동이 바닥구조체나 벽체 등을 통해 인접세대로 방사되는 특성이 있다. 바닥충격음은 충격원의 충격력 특성, 바닥 구조 및 접합부 구조, 直下室 공간의 조건에 따라 그 특성이 달라진다.^(1~2)

임피던스법은 대상 슬라브를 무한장판으로 하여 가정하여 산정한 포인트 임피던스(point impedance)를 기본량으로 슬라브 주변구속에 의한 임피던스 상승량을 보정하고 바닥의 평균적인 임피던스 특성을 구하고, 여기에 슬라브의 최대 응답진폭에 대한 등가폭에 의해 유효방사면적과 실내 흡음력 등에 대한 보정량을 계산하여 최종적으로 수음실의 바닥충격음 레벨을 예측하는 방법이다.⁽¹⁻³⁾

충격원에서 바닥충격음 발생과 관련된 요소로는 전체적인 충격에너지에 관계되는 질량과 속도에 의한 운동량, 충격력 파형에 관계되는 충격면에서의 강성계수 및 마찰저항계수 등이 있다. 표준경량충격원(tapping machine)의 충격력 특성은 헤머헤드(hammer head)가 강철로 되어 있기 때문에 헤머지름과 先端의 곡률반경, 바닥의 탄성계수, 마찰저항계수 등에 의해 달라진다. 표준중량충격원(bang machine or tire)은 경량충격원과는 달리 매우 유연한 스프링상수(약 1.7×10^5 N/m)를 가지고 있기 때문에 대체로 바닥층의 특성과는 관계없이 일정한 스펙트럼을 나타낸다.

바닥슬라브에 충격이 가해졌을 때 無限長 바닥 슬라브의 기본 임피던스는 다음에 의해 산출된다.

$$Z_b = 8\sqrt{Bm} \approx 2.31 \rho^{1/2} E^{1/2} h^2 \quad (1)$$

$$L_z = 20 \log_{10} Z_b \quad (2)$$

여기서, B : 바닥슬라브의 굽힘강성 [N/m]

m : 바닥슬라브의 면밀도 [kg/m^2]

ρ : 바닥슬라브의 등가밀도[kg/m³]
 h : 바닥슬라브의 등가두께 [m]

바닥 슬라브의 이론적 임피던스의 계산은 식(1), (2)를 통해 구해지며, Fig. 1은 이질복합체에 대한 단면을 보여주며, Fig. 2는 중공부 보이드 슬라브에 대한 단면을 보여준다. 먼저 계산대상과 바닥슬라브의 구동점 임피던스를 산정하는데 필요한 바닥판 단면의 굽힘강성을 계산하기 위해서 덮개 플레이트와 보이드 슬라브의 이질복합 바닥 단면에 대해서는 다음의 방법에 의해 등가 Young 계수 E, 등가 두께 h, 등가 밀도 ρ 를 산출한다.

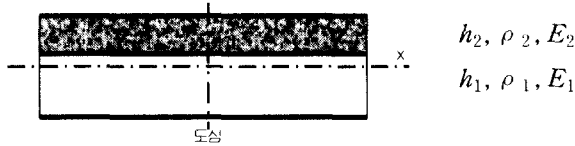


Fig. 1 Composite material



Fig. 2 Shape of the void slab

$$\rho = \rho_1 \frac{h_1}{(h_1+h_2)} + \rho_2 \frac{h_2}{(h_1+h_2)} \quad (3)$$

$$E = \frac{(E_1 I_1 + E_2 I_2)}{I_x} \quad (4)$$

$$h = h_1 + h_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (5)$$

I_x : 바닥단면 전체의 단면 2차모멘트

h : 등가 두께

위의 식 (3), (4), (5)를 통해 재료의 물성치를 구한 다음, 위의 임피던스식 (1)과 (2)에 대입하여 보이드 슬라브의 기본 임피던스를 구한다.⁽⁷⁾

Fig. 3은 슬라브 단부로부터의 거리에 따른 충격 임피던스 레벨의 상승량을 나타낸 것이다. 위의

그림에서 알 수 있듯이 바닥슬라브상의 충격원이 보나 벽의 단부에 가까울수록 임피던스 레벨이 상승하기 때문에 바닥충격음 레벨이 저하하게 된다는 것을 의미한다. 이 상승량은 충격원의 충격시간과 바닥슬라브의 굽힘과 속도 및 슬라브 단부로부터의 거리 등과 같은 주변의 구속정도에 따라 달라진다. Fig. 3은 아래의 이론식 (6), (7), (8)을 통해 구할 수 있다. 충격원의 충격주파수에 대한 굽힘파의 파장 λ_b 는 다음과 같이 표현된다.

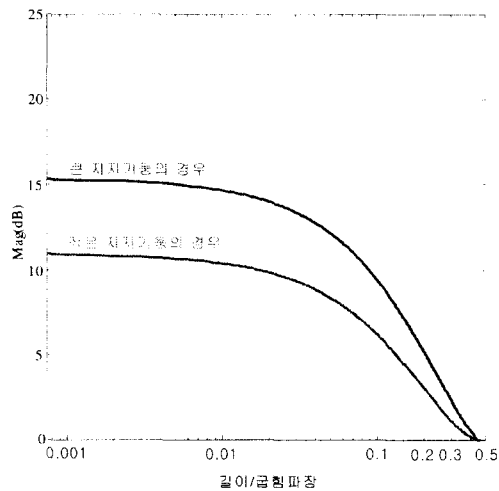


Fig. 3 Increment of the impedance level with impulse point

$$\lambda_b = (\pi c_l \frac{h}{\sqrt{3}f})^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$= (\pi \times 3362 \times \frac{h}{\sqrt{3} \times 25})^{\frac{1}{2}}$$

$$= 6.25m$$

f : impact frequency(충격주파수)

기본임피던스에 대한 임피던스 상승량을 큰 지지기둥의 경우와 작은 지지기둥의 경우로 나누어 회귀식을 구해본 결과, 다음의 식으로 표현된다.⁽⁶⁻⁷⁾

① 큰 지지기둥의 경우

$$\Delta L_z = 15.37 - 68.86 \frac{x}{\lambda_b} + 98.65 \left(\frac{x}{\lambda_b}\right)^2 - 45.36 \left(\frac{x}{\lambda_b}\right)^3 \quad (7)$$

② 작은 지지기둥의 경우

$$\Delta L_z = 10.93 - 55.86 \frac{x}{\lambda_b} + 92.57 \left(\frac{x}{\lambda_b}\right)^2 - 49.72 \left(\frac{x}{\lambda_b}\right)^3 \quad (8)$$

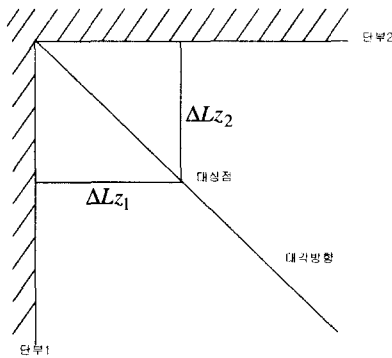


Fig. 4 The output of impedance increment in the diagonal direction

Fig. 4는 양방향 단부로부터의 구속을 받는 충격임피던스를 나타낸 그림이며, 일반적으로 대상점이 슬라브의 대각선 방향인 경우 양방향 단부로부터 구속의 영향을 동시에 받으므로, 이 경우에는 대상점에 있어서 충격임피던스 상승량의 산정방법은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 식(9)로 계산하는 것이 일반적이다.^(6~7)

$$\Delta L_z = \Delta L_{z1} + \Delta L_{z2} \quad (9)$$

따라서, 슬라브상의 어느 한점에서의 기준 임피던스 레벨은 그 점에서의 임피던스 상승량을 더해서 표현한다.

2.2 측정내용 및 방법

Fig. 5는 이번 연구에 사용된 실험 장치 구성도이다. 먼저 중공부 바닥슬라브에 8개의 측정점을

설정 후, 임펄스 해머에 의해 일정규격의 경량충격을 태핑 머신으로 발생시켜 중공부 바닥슬라브의 상면과 하면에 설치된 가속도계로 슬라브 표면의 가속도를 측정한다. 주파수 대역은 1~5,000Hz로 설정하고, 임피던스를 구한다.

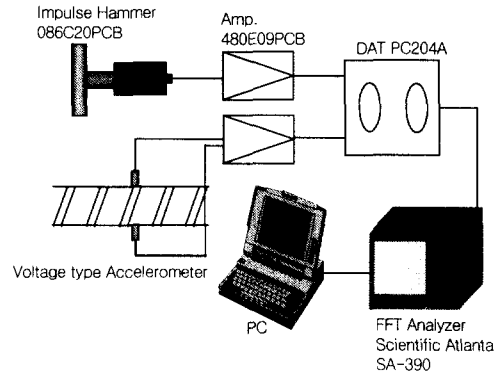


Fig. 5 Experimental setup

가진원으로 임펄스 해머 (Steel Tip) (B&K8202)를 사용하는 것은 일반적으로 가진력의 검출이 용이하며, 5kHz까지 분석이 가능하다. 또한 이번 연구를 위한 실험은 실제 실험이 아니라, 모형 실험이므로 가진원으로 임펄스 해머를 사용하였다.

아울러 가진력의 전압출력은 1.0mV/NO-P이다. 바닥충격시에 대해서 바닥슬라브의 진동특성에 대해서는 임펄스 해머의 충격가진을 이용하여 임피던스법에 의해 응답파형의 시간해석을 수행하여 각종 실험적 연구를 수행해오고 있으며, 일본에서도 널리 이용되고 있다.

Fig. 6은 다음의 Fig. 7에서의 12-타입 중 표준보이드 형의 형상 및 치수를 나타내고 있으며, Fig. 7은 각각 12-타입 보이드의 재질과 두께 및 단면적의 치수와 12-타입의 보이드 슬라브의 형태를 보여준 그림이다. 단지 리브의 형태에 따라 타입을 구분한 것이다. Fig. 7의 4분할 보이드형(No.8)은 십자형으로 40mm 두께로 리브를 보강한 것이며, 8분할 보이드형(No.12)은 똑같은 40mm 두께로 리브를 보강한 것이다.

가진력(F)을 가속도를 적분하여 얻어진 속도(V)로 나누어 얻어지는 임피던스(F/V)값을 계산

하여 텍스트 파일로 저장하고, F/V 값을 상면과 하면에 대하여 다음과 같은 실험식 식(10)과 (11)에 대입하여 임피던스 L_z 을 구하며, 그 결과를 그래프로 출력한다.

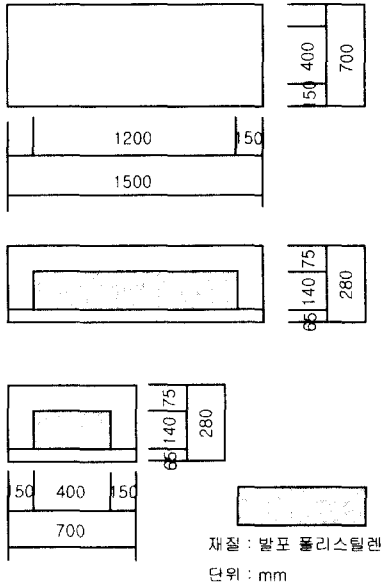


Fig. 6 Standard void slab (No.1) S=1:20

$$L_z(\text{상면}) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_F}{V_Y} \right) + 14.33 + 20 \log_{10} (2 \times \pi \times f) \quad (10)$$

$$L_z(\text{하면}) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_F}{V_Y} \right) + 14.47 + 20 \log_{10} (2 \times \pi \times f) \quad (11)$$

위의 식(10)과 (11)은 임펄스 해머의 가진력과 가속도계의 mV단위를 각각 힘의 단위인 N(Newton)과 가속도를 적분한 속도의 단위인 ms로 환산하여 얻은 식이다. 또한, 실제 모델에 대한 실험이 아닌 단순한 보이드 개량에 관한 모형 실험이므로 흡음력에 대한 보정은 고려하지 않았다.

3. 실험

3.1 임피던스 총합(Overall Value)레벨

3.1.1 가진점 4에서의 임피던스 총합레벨

Fig. 8은 가진점4에서의 중공부 보이드 상면과

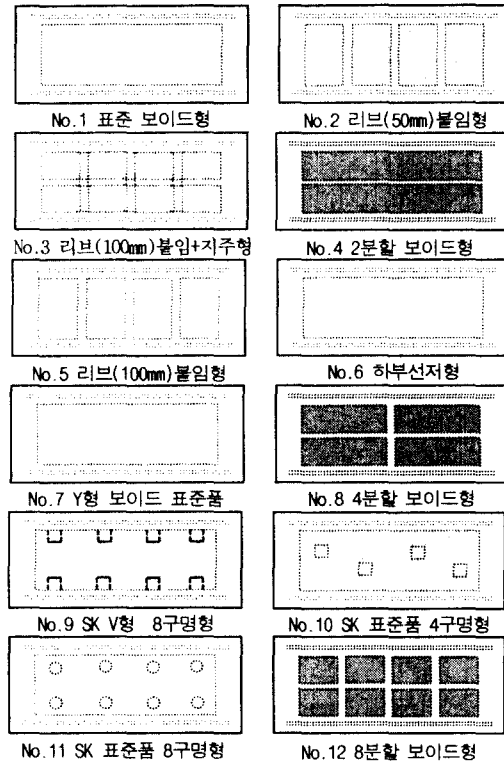


Fig. 7 12-type void slab

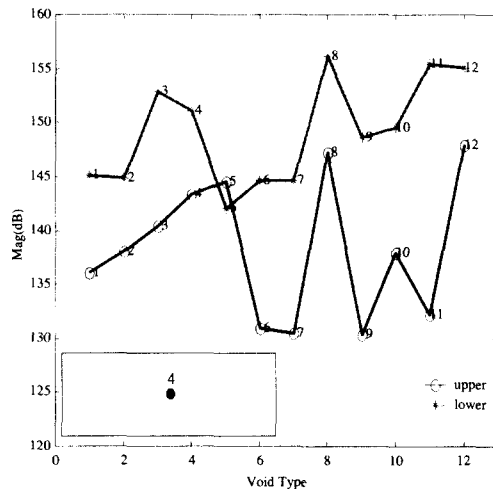


Fig. 8 Total level of impedance in the fourth impulse point

하면에서의 임피던스 총합값을 타입별로 비교함으

로써 표준형 보이드(No.1)와 개량형 보이드를 분석한 그림이다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 보이드 하면에서의 임피던스 총합 값들이 보이드 상면에서의 임피던스 총합 값보다 각 타입별로 10~15dB 정도 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 임펄스로 직접 가진되는 보이드 상면에서의 진동 속도보다 임펄스 해머의 영향을 적게 받는 보이드 하면에서의 진동속도가 상대적으로 작기 때문이다. 즉, 보이드 상면과 보이드 하면의 두께의 차이로 인한 재료의 댐핑(damping)의 영향으로 보이드 하면에서의 댐핑(damping)값이 더 크기 때문에 그 결과로 보이드 하면에서의 임피던스 총합 값이 보이드 상면에서의 임피던스 총합보다 크게 나온 것이다. 가진점 4에서 12-타입의 보이드를 비교해 보면, 8번과 12번 개량형 보이드형이 보이드 상면과 하면에서 모두 표준형 보이드(No.1)에 비해서 임피던스 총합 값이 대략 10dB 이상 커짐을 볼 수 있다. 또한, 6번과 7번, 9번 개량형 보이드 형은 표준형 보이드인 1번 보이드보다 임피던스 총합 값들이 더 작게 나오며, 나머지 개량형들은 표준형에 비해 큰 차이를 보이지 않는다.

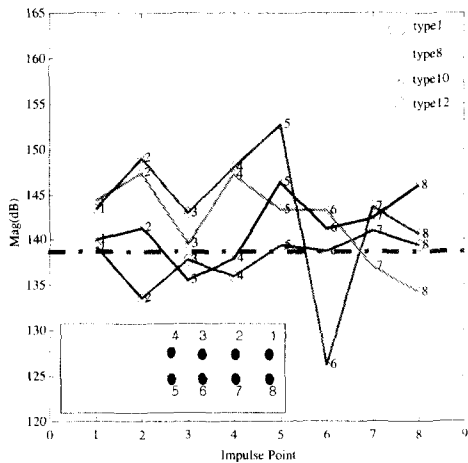


Fig. 9 Total level of impedance in the upper void slab

따라서, 보이드의 중앙부분인 가진점 4에서의 임피던스 총합 값들을 비교해 볼 때 8번과 12번 개량형이 표준형에 비해 개선되었음을 알 수 있다.

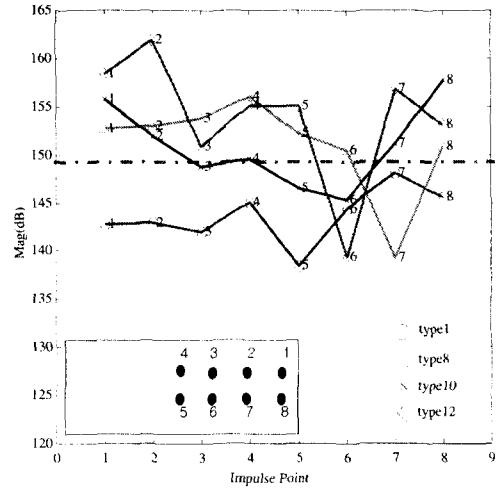


Fig. 10 Total level of impedance in the lower void slab

3.1.2 8개 가진점에서의 임피던스 총합레벨

Fig. 9 와 Fig. 10은 12-타입의 보이드형 중에서 표준형 보이드형과 개선된 것으로 보이는 8번과 10번, 그리고 12번 개량형 보이드형에 대하여 8개 가진점에서의 임피던스 총합 값들의 변화를 보여주는 그림이다. 보이드 상면의 임피던스 총합의 한계치(threshold value)는 138dB이고, 보이드 하면의 임피던스 총합 한계치(threshold value)는 148dB이다. 그림에서 보여 주듯이 보이드 상면과 하면에서는 대체로 개량형 보이드 (No.8, 10, 12)들이 한계치를 넘어서고 있다.

개량형 보이드들은 표준형에 비해 각 가진점에서 대략 5 ~ 15dB정도 더 크게 나타난다. 그러나, 12번 개량형 보이드에서는 8개 가진점 중에서 6번 가진점에서의 임피던스 총합 값이 갑자기 크게 떨어지는 현상을 보인다.

이것은 다른 가진점들이 리브부 위의 점이므로 강성이 커져서 임피던스 총합 값이 크게 증가한 데 비하여 6번 가진점과 8번 가진점은 중공부 위의 점이므로 상대적으로 임피던스 총합 값들이 떨어지게 되는 것이다. 그러나, 8번 가진점은 중공부 위의 점이지만 고정단의 영향이 상대적으로 6번 가진점보다 매우 크므로 총합 값이 크게 떨어지지 않는다. Fig. 6~Fig. 8을 통해 임피던스 총합 측면에서는 표준형에 비해 8번과 12번 개량형 보이드가 많

이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

3.2 가진점 4에서의 고유진동수의 변화

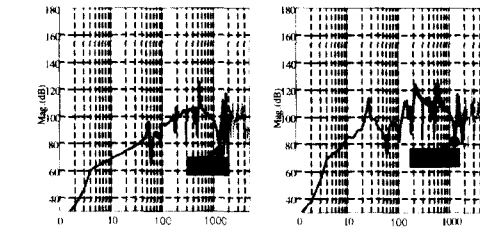
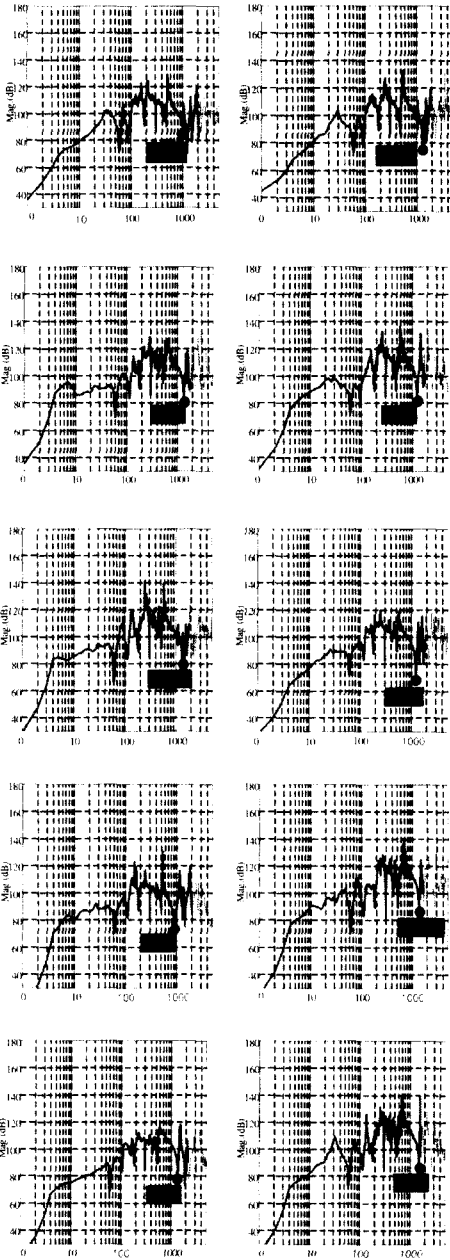


Fig. 11 Impedance of 12-type void slab in the fourth impulse point

Fig. 11 은 가진점 4에서 12-타입의 임피던스의 변화를 보여주는 그래프이다. 표준 보이드의 시험체는 No.1과 7이며, 사각형 보이드 특유의 충격음 레벨의 개시가 1kHz에서 보이고 있다. 임피던스 계측에 의한 고유진동수의 분석결과에서는 No.1이 1010Hz, No.7이 930Hz이었다.

시험체에서 비슷한 모양의 결과를 이루고 있어 비교는 1kHz 이상에서 하였다. 상부셀에 리브를 설치한 타입 No.2, No.3, No.5는 고유진동수가 각각 1,289Hz, 1,352Hz, 1,330Hz로 다소 이동되었지만, 임피던스 레벨은 표준 보이드에 비해 개선되지 않았다. 지주를 설치한 타입 No.9, No.10, No.11의 고유진동수는 각각 1,305Hz, 1,341Hz, 1,367Hz로 이동되고 있지만, 임피던스 레벨은 표준형에 비해 전혀 개선되지 않았다.

0~500Hz 대역의 임피던스 레벨은 거의 모든 보이드 슬라브를 종으로 분할한 타입 No.4, No.8, No.12는 1kHz~2kHz 대역에서 10~15dB 정도로 임피던스의 개선량이 얻어졌다. 고유진동수는 각각 1,259Hz, 1,358Hz, 1,502Hz로 되어, 고유진동수 대역에서의 임피던스의 저하도 다른 시험체보다 억제되었다.

위의 분석결과로부터 보이드를 종으로 분할한 시험체의 4분할 보이드인 No.8 및 8분할 보이드인 No.12의 성능이 우수한 것으로 판명되었다.

이는 보이드 상면 및 하면 셀을 분할, 강접한 것으로 인해 변의 고유진동수가 고역으로 이동하고 아울러 강성이 높아진 것으로 생각된다.

특히, No.12는 고유진동수가 1,02Hz로 크게 이동되어 강성이 다른 보이드에 비해 크게 향상되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 공동주택의 내부소음 중 지적율이 가장 높은 바닥충격음을 표준형 보이드 슬라브와 개량형 보이드 슬라브의 12-타입으로 나누어 비교·분석한 결과 다음을 알 수 있었다.

1) 12-타입 보이드 슬라브의 임피던스 총합레벨 (Overall Level)을 분석한 결과, 표준형 보이드에 비해 8번과 12번 개량형 보이드가 임피던스 총합이 15dB정도 높게 나옴을 알 수 있으며, 이를 근거로 임피던스 측면에서는 8번과 12번 개량형 보이드가 표준형에 비해 개선되었다.

2) 12-타입 보이드 슬라브의 임피던스 계측에 의한 고유진동수 분석 결과 1kHz 근방에서 보이드를 종으로 분할한 타입 No.8, No.12는 1kHz~2kHz 대역에서 10~15dB정도로 임피던스의 개선량이 얻어졌다. 고유진동수는 각각 1,259Hz, 1,358Hz, 1,502Hz로 되어, 고유진동수 대역에서의 임피던스의 저하도 다른 시험체보다 억제되었다.

위의 분석결과로부터 보이드를 종으로 분할한 시험체의 4분할 보이드인 No.8 및 8분할 보이드인 No.12의 성능이 우수한 것으로 판명되었다.

이는 보이드 상면 및 하면 셀을 분할, 강접한 것으로 인해 면의 고유진동수가 고역으로 이동하고 아울러 강성이 높아진 것으로 생각된다.

특히, No.12는 고유진동수가 1,502Hz로 크게 이동되어 강성이 다른 보이드에 비해 크게 향상되었음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 대한주택공사, "공동주택의 바닥충격음 저감방안에 관한 실험연구," 1987.
2. 김명준, "공동주택 바닥충격음의 부위별 전달특성 평가," 박사학위논문, 1999.
3. 오재응, 이주형, "아파트의 고체진동 저감대책에 관한 연구," 한양대학교 환경연구소, Vol. 9, pp. 73~79, 1988.
4. 김명준, 손장열, 김홍식, "콘크리트 구조체의 경량 바닥 충격음 전달특성 해석을 위한 SEA법의 적용성에 관한 실험적 연구," 대한건축학회 논문집, Vol. 14, No. 9, pp. 167~178, 1998.
5. 김선우, 손철봉, 송용식, "공동주택 바닥충격음 차음성능 개선을 위한 실험적 연구," 대한건축

- 학회 논문집 Vol. 4, No. 1, pp. 279~287, 1988.
6. 井上勝夫, 木村 翔, "임피던스법의 대형 보이드 슬라브에서의 적용 방법에 관한 검토," 일본음향학회, 1998.
 7. 일본건축학회(技報堂出版), "건물의 차음설계 재료," pp. 115~176, 1988.