

공동주택의 건식 가변벽체 접합부 차음성능 향상을 위한 구조음장 특성 해석기법에 관한 연구

김 화 일

부산가톨릭대학교 산업보건학과

(2009년 9월 7일 접수; 2009년 9월 28일 수정; 2009년 10월 14일 채택)

Study on Structural-Acoustic Characteristics for Improving Soundproof Qualities to Changeable Wall in Apartment Buildings

Hwa-Il Kim

Department of Industrial Health, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea

(Manuscript received 7 September, 2009; revised 28 September, 2009; accepted 14 October, 2009)

Abstract

The purpose of this study was to establish structural bone noise analysing method for apartments building floor with Structural-Acoustic coupling analysis. Nowadays, noise through floor is recognized as important problem with the consequence that noise isolation technique is studied in the various fields of industry. From among noise factors, resonance sound is main reason for floor's solid noise. therefore, In this study, evaluation method for composite material slab is established and that a case study is suggested with it.

Key Words : Structure-Acoustic analysis, Composite material, Homogenization method, Coupling analysis

1. 서 론

국내의 공동주택에 대한 요구는 현재 점차 다양해져 가고, 주택의 장수명화를 위한 리모델링이 사회적인 요구로 확산되어가고 있다. 공동주택은 내구성이 높으면서도 기능적으로 진부하지 않고 장기간 지속가능하도록 건설해야 한다는 방향을 지향하고 있으며, 국가적인 차원에서 품질이 높은 양호한 주택재고를 형성하여 건전한 국가자산을 유지할 수 있어야 한다. 그러나 국내 공동주택은 공간구성과 벽식구조 방식의 확립성으로 인하여 거주자의 다양

하고 변화하는 생활양식 및 요구에 대응할 수 없고, 일체식구법의 습식공법 및 설비의 구조체 매입시공 등으로 리모델링이 거의 불가능하다. 그 결과 공동주택의 대부분이 건설 후 20년 정도의 수명으로 조기에 전면철거 재건축됨으로써 자원 및 건설에너지 낭비와 폐기물의 재활용 미흡, 환경의 파괴와 오염 등의 문제점이 노출되고 있어 공동주택의 내부벽체의 가변성 확보에 대한 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 또한 국내의 공동주택의 설계기술의 향상과 층간소음 등의 환경적인 요인으로 인한 바닥 슬래브 두께의 증가는 기존의 내력벽식 구조설계에서 무량판 구조로 공동주택의 설계방식의 변화를 촉진하고 있다. 무량판 구조는 내력벽체로 지탱되던 기존의 공동주택과는 달리 슬래브와 기둥만으로 구조

물을 지지하는 방식으로 내부에 내력벽을 요구하지 않는다. 따라서 내력벽식 구조에서 구조체로서 요구되던 내부 벽체는 장스팬의 내부공간이 가능한 무량판식구조에서 건물에 작용하는 하중으로 취급이 바뀔 때 따라 그 필요성이 크게 경감되며, 공동주택 내부 공간을 구획하는 역할만을 담당함으로써 경량화, 가변화에 유리한 환경이 조성되고 있다. 가변성의 범위에 있는 최근 분양중인 공동주택의 경우 공급시의 평면선택 및 주문의 개념이 확산되고, 공동주택 일부에 가변벽체를 채용하는 경우가 크게 늘어나고 있다. 그러나 가변수준의 한계로 인해 거주 후 융통성, 즉 개량개조, 리모델링에 대한 대응성은 확보되지 못하고 있다. 가변수준의 한계를 극복하기 위해서는 재료구성을 건식으로 하는 것이 유리하나 가변벽체의 차음성 및 가변벽체와 구조체의 접합부 소음저감 시공기법의 부재 등으로 인해 국내의 대부분의 가변벽체가 조적조 벽체와 같은 습식구조로 구성되어 있다¹⁾. 가변벽체의 차음성에 관한 연구는 이미 국내외적으로 많은 연구가 수행되고, 벽체 재료구성의 개선이 이루어지고 있으나, 공동주택의 경우 가변벽체와 철근 콘크리트 구조체의 접합부 차음의 실질적인 기술의 단계가 아직 초보적인 수준이기 때문이다. 이는 우선적으로는 그동안의 생활 소음에 대한 인식의 부재, 가변벽체와 철근 콘크리트 구조체의 접합부에 대한 적절한 차음 평가 및 소음 예측기법 도입의 부재, 차음 시공기법의 정립, 부품의 표준화, 구성재의 호환성의 미확립에 기인한다. 따라서 본 연구에서는 가변벽체와 철근 콘크리트 구조체의 접합부에 대한 차음기술 확보에 대한 기반 단계로서 구조음장해석 기법을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 기존 공동주택의 가변벽체 구성방안

가변형 공동주택이란 거주자 변화나 거주자 생활의 다양성과 변화에 대응하여 공간을 변화시킬 수 있는 가변성을 가진 주택을 의미한다. 국내의 연구에 의하면 공동주택내의 가변공간은 16가지 종류로 나누어질 수 있으며, Fig. 1과 같이 정리되었다²⁾. Fig. 1은 16가지 가변공간의 종류별 특징과 그 빈도수를 나타낸 것이다.

그러나 국내의 연구는 대부분 그 공간구성에만 치중하고 있으며, 실제 가설 벽체의 구조와 시공방법, 차음 개선방안에 대한 연구는 아직 부족하다¹⁾. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 국내의 가설공간의 연구를 토대로 각각의 가설공간을 구성하고 있는 가설벽체의 재료적인 특징과 구조 및 차음특성 등을 문헌조사와 실측을 통해 파악하도록 한다. 또한 차음특성은 소음의 주파수별로 다르게 나타날 수 있으므로 실측시에 각각의 주파수 대역별 분석을 통해 기존의 가설벽체의 차음 특성을 공동주택 내부의 발생소음의 주파수와 연관지어 분석한다.

2.2. 건식 가변벽체 재료 구성과 구조형식 조사

공동주택에서 가변형 공간을 만들기 위해 사용되는 건식가변벽체는 철근콘크리트 무량판 구조와 적절히 조합한 혼합형 구조방식을 지니게 된다. 즉 주호경계벽과 측벽에 대해서는 벽식 구조의 콘크리트 구조벽을 채택하고 주호의 내부에는 공간구성의 변화를 저해하는 내력벽을 배제하고 기둥과 슬래브만 설치해 평면계획의 자유도를 높이면서 가변형 평면의 적용이 가능하도록 적용하여야 한다. 또한 외기에 면하는 주호의 외벽부분에 대해서는 스틸스터드를 기본프레임으로 하고 내부에는 석고보드를 부착하며 외부에는 스테코(드라이버트), 콘크리트사이딩, 압출성형시멘트판 등을 부착한 건식벽체를 일반적으로 적용하고 있다. 본 연구에서는 가동성을 고려하여 Fig. 2와 같은 형태³⁾를 가지는 건식 가설벽체 형식을 대상으로 한다.

일반적으로 건식 가설벽체의 구성 재료는 다음 Fig. 3과 같으며¹⁾, 가설벽체와 철근콘크리트 구조체의 접합부는 일반적으로 현재 Fig. 4와 같이 시공되고 있다⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 위와 같이 현재 시공되고 있는 기존 건식 가설벽체의 구조 및 재료구성을 바탕으로 기성 제품에 대한 조사 및 소음관련 평가자료를 확보하고, Fig. 4와 같은 건식 가변벽체의 도입에 대해 연구한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공동주택에서 발생하는 소음의 종류

공동주택에서 발생하는 소음은 경량충격음과 중량충격음의 두 종류로 크게 나눌 수 있다. 경량충격

	<p>Variable between bedroom and living room among front 2,3,4bay. It is most frequencies types and shown from small plan to large plan (107)</p>		<p>165 m² of the front bedroom of the four bays, bedroom, living room, bedroom, all the variables in the adjacent room</p>
<p>[R/R형]</p>	<p>4 bay configuration of the front bedroom, living room, bedroom, bedroom, variable, and the front of Bay 42 in the adjacent bedroom, 3 Bay, between the bedroom and the bedroom, Variable, 4 bays of the rear bedroom, kitchen, bedroom, bedroom, bedroom in place, the bedroom variable.</p>		<p>165 m², 135 m² front 4 bay of bedroom, bedroom, living room, bedroom, variable in direction and depth of the bedroom, the bedroom of the variable</p>
	<p>4 bays of the front bedroom, bedroom, living room, bedroom, bedroom in the between batch variability, three bays of the front bedroom, bedroom, living room, bedroom in the variable.</p>		<p>135 m² of the three bays of the front bedroom, living room, bedroom, between the variable</p>
	<p>60 m², 85 m² from the rear of the three bays of the rear bedroom, kitchen, bedroom, kitchen and adjacent bedroom in place of the variable</p>		<p>165 m² to the front of four bays of the bedroom, living room, den, bedroom, living room and library in the variable</p>
	<p>More than 180 m² in front of the four bay front bedroom, living room, utility room, bedroom, living room and adjacent utility room in place of the variable</p>		<p>102 m² from the front 4 bay of bedroom, bedroom, living room, bedroom, one bedroom, bedroom, living room, bedroom, in the direction of the variable, and depth, dress room, the bedroom of the variable</p>
	<p>More than 102 m² in front of the four bay front bedroom, living room, utility room, bedroom, living room and adjacent utility room in place of the variable</p>		<p>60 m² three bays of the front bedroom, living room, bedroom, three bays of the variable, and the rear entrance of the bedroom, kitchen, one bedroom, the kitchen of the variable</p>
	<p>More than 180 m² in front of the five bay front bedroom, living room, utility room, bedroom, living room and adjacent utility room in place of the variable</p>		<p>In the front bedroom, three bays, dress room, bedroom, bedroom, placed on the back of the variability in the dress room</p>
	<p>102 m², 135 m², 165 m² from the rear of the three bays of the rear bedroom, kitchen, bedroom, kitchen and adjacent bedroom in place of the variable</p>		<p>165 m² to the front of four bays of the bedroom, living room, bedroom, bedroom, bedroom and living room of a variable, and depth in the direction of the bedroom, bedroom, kitchen, bedroom, hallway, bedroom, bedroom and hallway of the variable, the variable most places</p>

Fig. 1. Characteristics of Variable types.

음은 주로 공기층의 진동에 의해 전달되며 중량층 격음은 바닥판의 진동을 통해 음이 전달되므로 실내 내부 공기층과의 공진현상과 접합부를 통한 진동의 전달 등을 복합적으로 고려하여야 한다⁴⁾. 즉 전식 가설벽체의 차음성능을 높이기 위해서는 우선

다양한 구성 재료로 이루어진 가설벽체의 구성과, 지지조건에 따른 구조 음향 특성 및 실내 공기층과의 공진현상을 통합적으로 예측 및 평가하여야 한다. 또한 가설벽체와 구조체와의 접합부의 설계를 위해서는 구조음장에 대해 최적설계 개념을 도입할

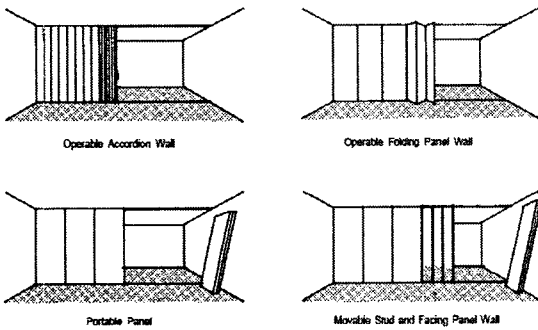


Fig. 2. Composition patterns of dry temporary wall.

Composition of layered material	Dimension (Thick)	Applied part
1) 25mm 40x40x20mm - 1개 2) 1개 단면재 3) 1개 단면재 4) 1개 단면재 5) 1개 단면재 6) 1개 단면재 7) 1개 단면재 8) 1개 단면재 9) 1개 단면재	180	Basic Exterior Wall
1) 25mm 40x40x20mm - 1개 2) 1개 단면재 3) 1개 단면재 4) 1개 단면재 5) 1개 단면재 6) 1개 단면재 7) 1개 단면재 8) 1개 단면재 9) 1개 단면재	190	Exterior Wall for Kitchen
1) 25mm 40x40x20mm - 1개 2) 1개 단면재 3) 1개 단면재 4) 1개 단면재 5) 1개 단면재 6) 1개 단면재 7) 1개 단면재 8) 1개 단면재 9) 1개 단면재	193	Exterior Wall for Cleaning Room
1) 25mm 40x40x20mm - 1개 2) 1개 단면재 3) 1개 단면재 4) 1개 단면재 5) 1개 단면재 6) 1개 단면재 7) 1개 단면재 8) 1개 단면재 9) 1개 단면재	154	Porch Wall considering to crime prevention

Fig. 3. Material Composition of exterior wall According to applied parts.

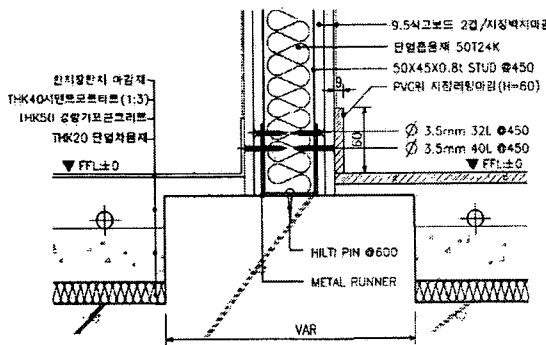


Fig. 4. Details of Dry temporary wall.

경제적분방정식에 의한 음장해석을 기하학적 연속 계수를 통해 결합하여, 공동주택의 내부를 음장 해석하고, 접합부의 구성을 최적설계에 의해 변화시켜 특정 주파수 대역 내에 고유진동수가 위치하지 않도록 접합부의 동특성을 개선하도록 한다. 이를 위해서 위상최적화(Topology Optimization)기법을 도입하여 접합부의 위상을 변화시킴으로서 다양한 제약조건하에서의 접합부의 최적위상을 결정하고, 가설벽체의 경우 미시구조(microstructure)를 도입하여 최적구조설계문제를 최적재료분포문제로 완화(relax)하여 설계하도록 한다. 최적설계에 대해서는 본 연구에서는 최적해를 구하기 위해 최적화 목적함수를 ALM(Augmented Lagrangian Multiplier)기법⁵⁾을 도입하여 비구속화 한 후, 유전자 알고리즘을 적용하여 위상 최적해를 구하도록 한다. 그 후 구축된 알고리즘을 VC++과 같은 프로그래밍 언어를 사용하여 실제 프로그램을 작성하여 현장에 적용가능한 방안을 모색한다.

3.2. 음장 해석 이론의 개요

주파수 ω 인 단순조화가진동의 경우, 시간과 무관한 파동 방정식은 식(1)과 같다⁶⁾.

$$\nabla^2 p(R) + k^2 p(R) = 0 \tag{1}$$

식(1)은 시간에 대한 파동 방정식에서 단순조화 운동을 가정하여 주파수 변환을 함으로서, 시간 변수를 생략한 Helmholtz 방정식이다. 여기서, $p(R)$ 은 점 R 에서의 음압변화량, $k = \omega/c$ 는 파동정수, $c = \sqrt{B/\rho}$ 는 음향매질에서의 소리의 전파속도를 나타낸다.

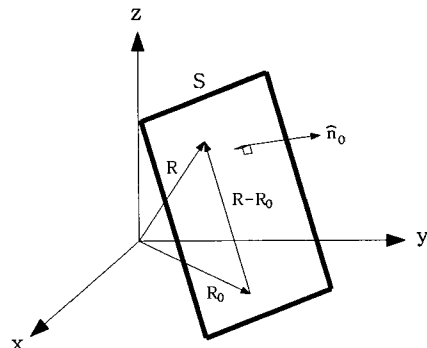


Fig. 5. surface S and a point R in acoustic field.

필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 복합적층판 유효요소에 의한 각 주파수별 진동해석과 Helmholtz

식(1)에 대한 경계적분방정식은 Helmholtz 적분 방정식으로 불리며 식(2)과 같다.

$$c \times p(R) = \int_S (p(R_0) \frac{\partial q}{\partial n_0} - g(|R-R_0|) \frac{\partial p}{\partial n_0}) dS \quad (2)$$

식(2)에서 R_0 는 경계면 S상의 한점, \hat{n}_0 는 표면에 대한 단위수직벡터이며, c는 음향매질에 따라 Table 1과 같은 값을 가진다⁷⁾.

식(2)에서 g는 비균질 Helmholtz 방정식의 해를 의미하는 free-space Green's function으로, 식(3)과 같이 정의된다. 여기서 R_0 는 경계면 S상에 위치하는 한 점을 의미한다.

$$g(|R-R_0|) = \frac{e^{-ik|R-R_0|}}{4\pi|R-R_0|} \quad (3)$$

경계면 S는 음압과 표면속도(normal velocity)에 의해 구속되어 있으며, 경계면상의 모든 점에 대해 이 두 값 중 하나는 기지값이 된다. 이 값을 경계조건이라 한다. 각각의 경계조건을 정리하면 Table 2와 같다⁷⁾.

구조음장 연성해석에서는 식 (3)의 표면속도를 구조물의 진동해석에서 구하여 경계면 S의 음압의 초기치로 활용함으로 음장해석을 수행한다.

3.3. 구조음장 연성해석(Coupling analysis)

일반적으로 수행되는 구조해석은 다른 장(field)에 의한 영향을 무시하고 수행한다. 이는 구조물의 변형에 비해 기타 장(field)의 영향이 매우 미소함으

Table 1. Sound transfer speed in acoustic materials(c)

1	1/2	$\Omega/4\pi$	0
In fluid	Homogeneous boundaries of fluid regions	Inhomogeneous boundaries of fluid regions	Outside the fluid region

* Ω : Solid Angle

Table 2. Boundary Conditions of Helmholtz Integral Equation

Applied area	S_p	S_v	S_z
Meaning	Acoustic Pressure	Speed of Surface	Acoustic Impedance
Boundary condition	p	$v = \frac{i}{\rho_0 \omega} \frac{\partial p}{\partial n_0}$	$Z = \frac{p}{v} = -i\rho_0 \omega p \frac{\partial \hat{n}_0}{\partial p} x$

로서 공학적인 유용성을 가진다⁸⁾. 그러나 바닥충격 음은 충격을 받는 구조물과 하부의 실내 음장이 결합하여 발생한다. 따라서 실내 공기층의 상태가 명확히 해석 결과에 영향을 주므로 기존의 구조물 단독의 해석으로는 불충분하다. 이와 같은 문제를 유한 요소법으로 해석하기 위해서는 연성해석(Coupling analysis)을 수행하여야 한다. 구조물과 유체간의 연성은 크게 일방 연성(Oneway coupling)과 완전 연성(Full coupling)으로 나눌 수 있다⁹⁾. 일방 연성은 구조물의 거동이 유체에 전혀 영향을 받지 않는다는 가정하에 이루어진다. 본 연구에서는 ABAQUS™를 사용하여 완전 연성해석을 수행하였다. 우선 유한 요소 방정식의 최종형태는 다음과 같다.

$$(K+i\omega C-\omega^2 M)w = F \quad (4)$$

여기서 K, M, C는 각각 판의 강성, 질량, 감쇠 행렬을 나타낸다. 식(4)의 우변의 가력 F는 구조음장 연성해석 시에 경계요소와 유한요소간의 접합면의 음압 p_a 에 의한 하중재하로 인해 식(5)와 같이 수직 하중으로 치환한다.

$$(K+i\omega C-\omega^2 M)W + L \cdot p_a = F \quad (5)$$

식(5)에서 L은 결합 행렬(Coupling Matrix)을 나타낸다. 구조물과 음장을 결합할 경우, 식 (6)과 같이 구조음장 결합행렬식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K+i\omega C-\omega^2 M & L & 0 \\ \rho_0 \omega^2 G_{11} T & H_{11} & H_{12} \\ \rho_0 \omega^2 G_{21} T & H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W \\ p_a \\ p_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ F_a \\ F_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $F_a = i\rho_0 \omega G_{12} v_b$, $F_b = i\rho_0 \omega G_{22} v_b$

본 연구에서 사용된 모델은 가변벽체와 내부의 공기층으로 이루어져 있다. 실 내부의 공기는 AC3D8R(8절점 선형 brick, hourglass control을 가지는 감차적분 적용요소)을 사용하고, 바닥판과 벽체는 S4R shell요소를 사용하였으며, 재료를 반영하기 위하여 Fig. 6과 같이 적층모델을 사용하였다⁷⁾.

실 개구부에서의 공기층의 외부방사를 고려하여 *SIMPEDANCE 키워드를 사용하여 경계조건에 반영하였다. 또한 공기와 구조체와의 연성은 *TIE 키워드를 사용하여 경계면에서의 연성을 고려하였다. 공

Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points
COMPOSIT	0.04	0	3
HEATPROOF_MATERIAL	0.02	0	3
LIGHTWEIGHT_CONCRETE	0.04	0	3

Fig. 6. Example of composition of layered materials.

기의 경우 재질은 문헌⁷⁾을 참고하여 Bulk Modulus $K_f=0.142$ MPa, 밀도 1.2 kg/m^3 를 적용하고 감쇄를 반영하기 위해 volumetric drag γ 는 1.2 Ns/m 를 지정하였다.

3.4. 균질화법을 통한 복합재료의 물성치 계산

균질화법은 복잡한 현상의 미시구조를 갖는 탄성 재료의 유효물성치를 추정하는데 사용한 이래 국·내외에서 복합재료의 물성치를 구하기 위해 활용되었다⁹⁾. 이 중 국내의 연구를 일부 살펴보면 장지현은 직물복합체의 등가물성계산에, 이진희 등은 복합재료의 열전달 해석 및 다공평판의 응력해석에, 광효경 등은 복합재료의 등가탄성물성치를 균질화법을 이용하여 제시하고 있다⁹⁾. 균질화법에서는 Fig. 7과 같이 미시구조(microstructure)와 거시구조(macrostructure)를 연결하여 등가균질체의 2변수 평형방정식을 유도하고 점근전개형의 해를 찾는다.

또한 미시구조의 도입방법에 따라 대표적으로 적층미시구조(Ranked layered Composite Microcell)와 다공미시구조(Microcells with Internal Void)의 두 종류로 나눌 수 있다⁹⁾. 이들 중 다공미시구조는 거시구조의 위상최적화 문제를 밀도최적화 문제로 바꿈으로써 변분조건을 완화하는데 주로 사용되고 있다.

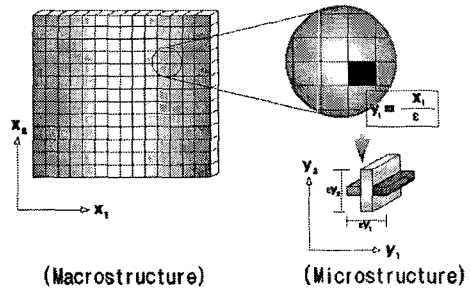


Fig. 7. Relationship between Macro and Micro structure in Homogenization.

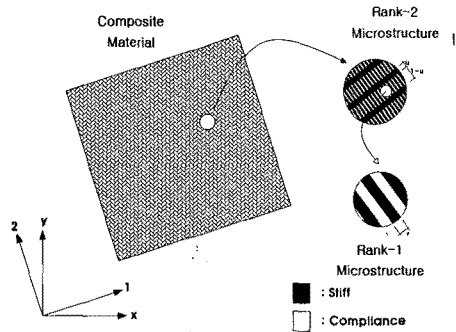


Fig. 8. Ranked layered microstructure.

이는 다공미시구조의 경우 단위셀이 복합재료의 미시형상을 충분히 고려하기 어려운데 기인한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 8과 같은 적층미시구조에 의한 균질화법을 복합판의 구조음장해석에 도입하였다. 복합재료의 등가물성치의 예시는 Table 3과

Table 3. Example of Homogenization properties of Composite materials

Dimension of Exterior Stiffened Microstructure									
Dimension of MicroStructures	h_1 (mm)	h_2 (mm)	μ^{R1}	μ^{R2}	θ^{R1} (DEG.)	θ^{R2} (DEG.)			
	2	10	0.5	0.5	0°	30°			
Exterior Stiffened Microstructure	2	10	0.5	0.5	0°	45°			
	2	10	0.5	0.5	0°	60°			
	2	10	0.5	0.5	0°	90°			
Calculation results of Homogenization properties									
θ^{R2}	D1111	D1122	D2222	D1112	D2212	D1212	D1313	D1323	D2323
30°	3686.46	2275.47	4090.6	-152.84	-265.55	1882.54	177.59	-15.27	182.92
45°	3734.7	2427.85	3734.7	-218.12	-218.12	1894.05	179.93	-16.08	179.93
60°	4090.6	2275.47	3686.46	-265.55	-152.84	1882.54	182.92	-15.27	177.59
90°	4668.12	1952.85	3836.18	-132.95	-187.99	1863.32	187.37	-10.25	177.12

같다. 최종적으로 건설교통부에서 제안한 표준바닥 구조중 일부에 대해 복합재료 완충재의 특성을 균질화법을 통해 반영한 후 해석을 수행하였다. 복합재료 완충재의 미시구조는 다공성판 미시구조로 가정하고 물성은 스티프의 물성치¹⁰⁾는 탄성계수는 15 MN/m², 밀도 10 kg/m³, 두께 20 mm로 사용하여 현재 공동주택에서 일반적으로 사용되고 있는 단열재와 유사한 물성치를 지정하였다.

4. 결 론

국내 공동주택은 공간구성과 벽식구조 방식의 획일성으로 인하여 대부분이 건설 후 20년 정도의 수명으로 조기에 전면철거 재건축됨으로써 자원 및 건설에너지 낭비와 폐기물의 재활용 미흡, 환경의 파괴와 오염 등의 문제점이 노출되고 있어 공동주택의 내부벽체의 가변성 확보에 대한 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 공동주택의 경우 가변벽체와 철근 콘크리트 구조체의 접합부 차음의 실질적인 기술의 단계가 아직 초보적인 수준이기 때문에 공동주택 건설계획 및 주거 환경정책 수립 시에 적극적으로 반영되지 못하고 있다. 따라서 본 연구의 결과물인 건식 가변벽체와 철근 콘크리트 구조체의 접합부에 대한 차음기술이 확보된다면 건설정책의 사결정시에 가설벽체 계획이 본격적으로 반영될 수 있어, 효과적인 주거환경 개선 및 건식 가설벽체 개발 연구에 긍정적인 효과를 줄 것이다.

감사의 글

이 연구는 2008년도 부산가톨릭대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) http://www.kict.re.kr/webzine/Platform/97/9710_2.htm.
- 2) 이보라, 김수암, 이현수, 2005, 국내 아파트의 가변형 평면계획 경향 및 특성에 관한 연구, 대한건축학회, 21(11), 3-12.
- 3) United States Army Write, 2007, Army Design Guide Dg 1110-3-110, United States ArmyWrite a Review.
- 4) 김기철, 최원호, 이동근, 1999, 건물 바닥판 진동의 사용성 규준에 관한 고찰, 대한건축학회 학술발표논문집, 19(1), 75-80.
- 5) Diaz A. R., R. Lipton and C. A. Soto, 1995, A new formulation of the problem of optimum reinforcement of Reissner-Mi ndlin plates, Computer methods in applied mechanics and engineering, 121-139.
- 6) ABAQUS Inc, 2006, ABAQUS/CAE User's Manual.
- 7) ABAQUS Inc, 2006, ABAQUS Example Problems Manual.
- 8) 서재관, 황재승, 송진규, 김선우, 2004, 바닥판의 동적특성에 따른 소음진동저감성능에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 24(1), 167-170.
- 9) 조종두, 노규석, 1996, 등가 탄성계수가 복합재료 구조물의 응력해석에 미치는 영향, 대한기계학회 춘추학술대회논문집, 1(1), 227-230.
- 10) 손철봉, 김재수, 김선우, 1991, 공동주택 바닥충격음 음장분포 특성에 관한 연구, 대한건축학회, 7(4), 135-146.