한국소음진동공학회 2008년 추계학술대회논문집, pp.527~532

공동주택 모델링을 통한 중량충격음 예측에 관한 연구

The numerical analysis of heavy weight impact noise for an apartment house

황재승† · 문대호 [1] · 윤영배 [2] · 홍건호 [3] · 박홍근 [4] · 홍성걸 [5]

Jae-Seung Hwang, Dae-Ho, Moon, Young-Bae, Yoon,
Geon-Ho Hong, Hong-Gun Park, Sung-Gul, Hong

Key Words : 공동주택(apartment house), 중량충격음(heavy weight floor impact noise), 구조시스템(structural system), 소음해석(sound radiation analysis)

ABSTRACT

In this study, numerical analysis is performed to investigate the sound radiation characteristics of an apartment house according to the type of the slab system. In order to satisfy the boundary condition of the apartment house, the whole floor is modelled with FEM model for three different structural system: wall, RC, flat slab system.

From the analytical results, it is shown that heavy weight floor impact noise of wall type slab is larger than that of the other slab systems and the noise radiated from the wall have great effect on the sound pressure level. The results also show that the vibration energy of RC or flat slab system is widely distributed over the whole slab, which is main reason that the noise induced by the slab systems is reduced in comparison with wall slab system.

1. 서 론

현재 중량충격음 차단성능을 바닥슬래브의 중량 증가와 뜬바닥구조를 통해 소음의 저감을 얻으려고 하는 시도는 현재 그 성능 개선의 한계에 도달해 있다. 210mm의 슬래브 두께와 그 상부의 뜬바닥 구조로 구성되는 표준바닥구조라 할지라도 50dB을 만족하지 못하는 차단성능을 갖고 있는 경우가 상존하고 있다. 바닥충격음 차단성능을 확보하기 위해 성능기준으로서의 인정바닥구조를 사용하여 인정서를 부여받은 인정 바닥구조를 보면 경량충격음에 최우수등급인 1급을 받은 경우라 하더라도 중량충격음은 대부분 4급의 등급을 부여 받은 것으로 나타났다.

중량충격음은 슬래브 표면의 속도장에 의해 슬래브 하부에 형성된 음압분포로 나타나는데 이들은 슬래브의 물성, 동적특성, 면적 등에 영향을 받으며 지지조건, 벽체의 유무에 민감하게 변하는 특성을 가지고 있다. 특히 충격하중에 의해 형성된 단발성 진동에 의해 경량충격음과 달리 음압형성이 비정상(non-stationary)상태로 표출되기 때문에, 음압의 측정위치에 따라 달라지는 경향을 보이고 있다. 공동주택 슬래브는 평면과 벽체배치 유형이 다양하고 인접세대, 상하세대와 일체되어 있어 음압형성이 더욱 난해해 질것으로 예상되지만 중량충격음 성능평가 단계에서는 이러한 영향을 충분히 고려하고 있지 못하고 있다. [1,2] 실험에 의한 성능평가에 있어서도 바닥구조 만을 실험대상으로 한정하는 경우가 많아 세대전체와 벽체를 통해 전달되는 충격에 의한 진동에너지의 전달 및 소음 배출조건이 실제 구조물 조건과 달라지게 되어 성능시험에서의 음압예측결과가 실구조물에 적용한 바닥구조시스템의 성능과 달라지는 경우가 발생하고 있다. 이와 같이 공동주택이 가지고 있는 구조시스템의 특성을 명확히 반영하지 못하고 바닥구조에 한정하여 완충재등과 같은 단편적 구성요소에 의존하여 중량충격음 성능개선을 시도해온 것이 현재의 한계상태에 이르게 된 원인 중의 하나로 볼 수 있다.

본 연구에서는 실제 구조물의 특성을 반영하여 벽식 공동주택의 중량충격음을 예측하고 평가하기 위한 해

† 전남대학교 건축학부 교수
E-mail : jshwang@jnu.ac.kr
Tel : (062) 530-1641, Fax : (062)530-0250
1) 서울대학교 대학원 건축학과 석사과정
2) 전남대학교 대학원 건축공학과 석사과정
3) 호서대학교 건축공학과 교수
4) 서울대학교 건축학과 교수
5) 서울대학교 건축학과 교수

석방법을 제시한다. 세대를 구성하는 슬래브, 벽체를 모델링하여 실구조물에 가까운 경계조건, 동적특성을 구현하고 슬래브와 벽체에서 배출되는 소음을 예측함으로써 중량충격음의 발생 메커니즘을 고찰한다. 또한, 공동주택의 구조시스템을 플랫 슬래브나 라멘구조로 변경하였을 때 벽식구조에서 배출되는 소음과 비교함으로써 구조시스템에 따른 소음배출 특성을 평가하고자 한다.

앞서 기술한 바와 같이, 기존 연구에서 제시되고 있는 바닥충격음 차단구조는 대부분 구조체 슬래브와 마감층 사이에 완충재를 삽입하는 공법을 사용하고 있으나, 이는 경량충격음의 저감에는 효과를 발휘할 수 있는 반면 중량충격음의 저감에는 크지 않은 것으로 나타나고 있다. 현재 표준바닥구조로써 중량충격음을 저감하기 위한 방법으로 슬래브의 두께를 증가시키는 것은 건축물의 층고를 증가시키고 구조체의 자중을 증가시킴으로써 지진하중의 크기를 확대시켜 내진설계에 크게 불리하게 작용하게 됨으로써, 공사물량 및 공사비 증가의 한 요인이 될 수 있다. 기존의 중량충격음 저감 방안을 보안하는 방법으로 새로운 구조시스템을 적용하는 것을 고려할 수 있다. 구조시스템의 공구법에 따른 슬래브의 동적 특성의 변화, 지지조건에 따른 영향등 중량충격음에 영향을 미치는 인자들에 대한 소음배출특성이 검토되어야 한다. 이를 위한 전제조건으로 새로운 구조시스템에 대한 동적해석 및 소음해석과 구조시스템에 따른 중량충격음의 저감을 비교 평가할 해석적인 방법이 요구되며 그 과정에 본 연구에서 제시한 해석방법을 활용하고자 한다.

2. 해석모형의 특성

2.1 해석 대상 구조물의 형상

공동주택은 평형, 공간 계획에 따라 다양한 평면배치를 가지고 있어 정형의 평면을 선택하는 것이 용이하지 않다. 현행 법규에 의하여 중량충격음은 거실에서 계측하도록 규정되어 있으므로 일반적으로 사용하고 있는 거실의 크기에 중점을 두어 공동주택 평면을 선정하였다. 본 연구에서 선정한 구조물의 평면이 그림 1에 나타나 있다. 본 구조물은 모 업체에서 보유하고 있는 주거성능 실험동으로 상하세대간 화장실 차음 및 바닥충격음 성능을 평가하고 바닥과 천정 마감재에 따른 저감방안을 실험을 통해 검증하기 위하여 벽식구조로 건립한 것이다.

평면 구성을 보면 왼쪽에 독립된 2개의 거실(거실-1,2)이 있으며 오른편에 거실(거실-3) 과 침실 두개, 주방과 화장실로 이루어진 단위세대가 있다. 중량충격음 해석대상은 단위세대에 있는 거실(거실-3)로 평면 중앙에 위치해 있다. 거실의 크기는 가로 4,690mm 세로 5,146mm 이며 앞쪽에 발코니가 인접해 있으며 위로 주방과 연결되어 있다.

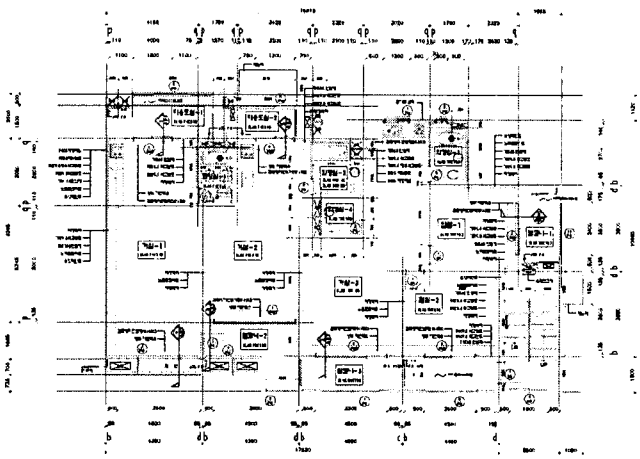

그림 1. 주거성능 실험동 평면

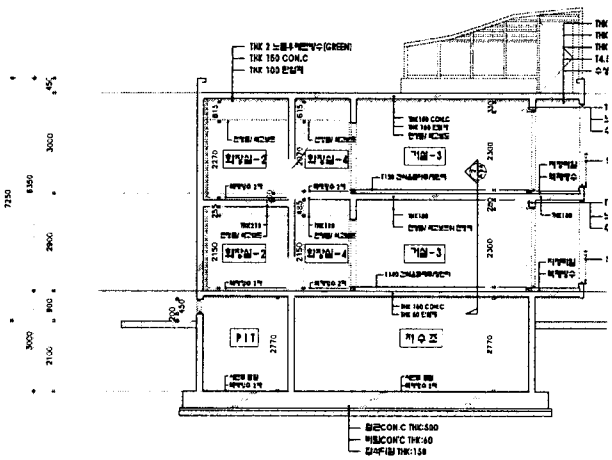

그림 2. 주거성능 실험동 단면

실험동은 3층으로 이루어져 있으며 1층은 저수조 2,3층은 동일한 평면을 가지고 있는 세대로 이루어져 있다. (그림 2 참조) 층고는 1층과 3층이 3,000mm 이며 2층은 2,900mm로 약간 작게 시공되어 있다. 2층과 3층의 층고는 100mm 정도 차이가 있으나 바닥과 천정사이의 높이는 2,300mm로 동일하게 설계하였다. 맨바닥 슬래브의 두께는 2층이 150mm 3층이 180mm이며 본 연구에서는 180mm

두께의 3층 바닥을 모델링하여 2층 거실에서 중량충격음을 평가하였다. 바닥과 천정의 마감재는 중량충격음 성능평가실험에 따라 변경, 제거할수 있도록 시공되었다.

벽체의 두께는 외벽의 경우 200mm이며 , 내부벽체의 두께는 180mm로 이루어져있다. 구조시스템의 종류와 벽체 유무에 따라 배출되는 소음을 평가하기 위하여 해석모형은 바닥과 천정 마감재가 없는 상태로 모델링하였다.

2.2 구조 타입별 해석 모델링

본 연구에서 선정한 주거성능 실험동은 벽식구조이지만, 구조시스템별 배출소음의 특성을 평가하기 위하여 벽식구조뿐만아니라 무량판 구조, 라멘구조로 모델링을 하였다. 벽식구조의 경우 벽체의 유무에 따른 소음배출 특성을 알아보기 위하여 슬래브에서만 배출되는 소음, 슬래브와 벽체에서 동시에 배출되는 소음으로 구분하여 중량충격음을 평가하였다. 거실만을 독립적으로 모델링을 하게되면 거실과 인접하고 있는 주변 슬래브에 의한 구속조건을 충분히 고려할 수 없기 때문에 거실에서 발생한 진동의 영향이 크게 미치지 못하는 거실 주변까지 모델링한 범위가 그림 3에 나타나 있다.

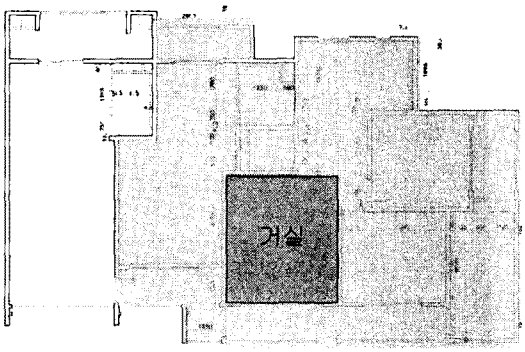

그림 3. 거실 주변 해석모델링 범위

그림 3을 보면 주거실험동의 가장 왼편에 위치한 곳을 제외하고 평면 전체를 모델링 한 것을 알수 있으며 상대적으로 짙게 표현된 거실의 면적에 비하여 해석모델링 된 부분의 면적이 더욱 큰 것을 알 수 있다. 슬래브와 벽체 모두 shell 요소를 이용하여 모델링을 하였으며 2층 3층 상하세대 벽체 모두를 유한 요소를 모델링한 것이 그림 4에 나타나 있다. 무량판 구조와 라멘구조는 벽식구조와 같이 거실주변을 동일하게 모델링하였으며, 벽체가 있는 부분을 제거한 후 기둥으로 대처하였다. 라멘구조의 경우에는 벽체가 있는 부분을 보로 치환한 후 무량판 구조와 같은 위치에 기둥을 배치하였다. 위와 같은 방법으로 무량판 구조와 라멘 구조를 모델링한 것이 각각 그림 5,6 에 나타나 있다. 모든 구조시스템의 바닥판 두께는 180mm로 동일하게 하였다.

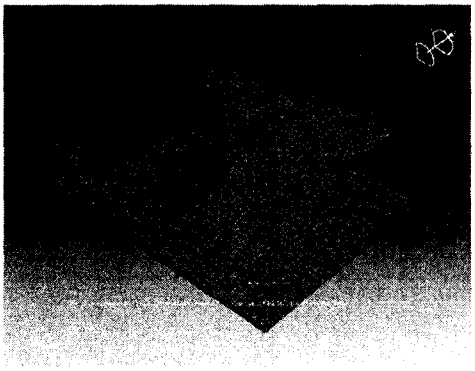

그림 4. 벽식구조 모델링

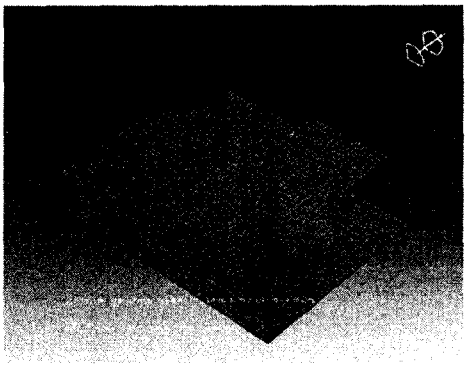

그림 5. 무량판 구조 모델링

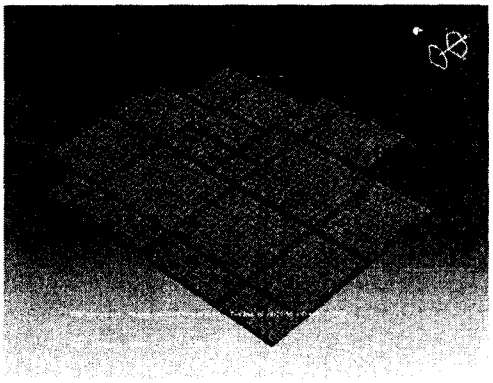

그림 6. 라멘 구조 모델링

3. 진동 및 소음해석

3.1 모드해석

구조시스템별 진동특성을 평가하기 위하여 모드해석을 수행하였다. 슬래브의 해석모델링 범위가 넓기 때문에 거실 외의 영역에서도 큰 폭의 진동모드가 나타나고 있으나 이러한 모드는 고려대상이 되는 거실하부의 음압형성에 큰 영향이 없으며, 벽식구조뿐만아니라 무량판, 라멘구조도 거실부분은 비내력벽으로 구분되기 때문에 인근 슬래브에 의해 발생된 소음이 거실로 유입되지 않는다고 가정하였다. 거실부분에 큰 영향을 미치는 모드를 1-3차 모드까지 나타낸 것이 그림 7에 각각 나타나 있다.

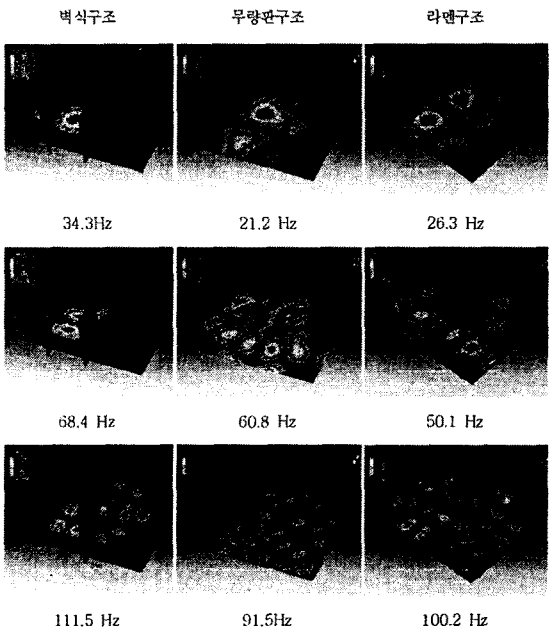

그림 7. 각 구조시스템별 진동모드

그림 7에서 보는 바와 같이 벽체에 의하여 구속이 된 벽식구조시스템이 타 구조시스템에 비하여 고유진동수가 높게나타나는 것을 알수 있으며, 기둥만으로 지지되고있는 무량판 구조가 상대적으로 작은 고유진동수를 가지고 있다. 모드형상을 보면 벽식구조의 경우 진동에서지가 거실 주변에 집중되어 있는 것을 알수 있으며 바닥판 뿐만아니라 벽체에서 진동에너지가 나타나는 것을 알 수 있다. 이에 비하여 형상에 차이가 있지만 무량판 구조나 라멘구조는 진동에너지의 분포가 슬래브 전체에 걸쳐 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 고차 모드로 갈수록 더욱 넓게 진동에너지가 분포하는 것으로 나타난다. 이러한 진동에너지 분포는 직접적으로 슬래브나 벽체로부터 배출되는 소음과 직접적인 연관성이 있으며 거실부분에 진동에너지가 집중된 벽식구조가 타 구조에 비하여 소음의 크기가 증가하는 형태로 나타날 가능성이 큰 것을 알 수 있다.

3.2 소음해석

구조물 표면에 의해 형성된 속도장으로부터 거실하부로 전달되는 소음을 수치해석을 통하여 예측하였다. 해석의 단순성을 위하여 벽체(내력벽 또는 비내력벽)에 의한 음의 반사와 거실내부에 있는 가구, 마감 소재에 의한 흡음율을 고려하지 않았다. 이와 같은 가정은 엄밀한 소음해석의 측면에서 부정확한 음압으로 나타날 가능성이 크지만 구조시스템별 배출된 소음의 상대적인 크기 비교에서는 큰 차이가 없을 것으로 판단하였기 때문이다.

바닥판의 진동에 의해서 배출된 소음의 임의의 지점(r)에서의 음압(P)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[3,4]

$$P(r) = -\frac{ik\rho c}{4\pi}\int_s G(r|r_s)\,V(r_s)\,ds(r_s) \quad (1)$$

여기서 i는 단위 복소수, r은 음장을 알고자하는 공간 내 임의의 점을 나타내는 변위벡터, k, ρ,c 는 각각 wavenumber, 공기밀도, 음속을 나타내며 r_s 는 바닥판 내 임의 점을 나타내는 변위벡터, $G(r|r_s)$는 바닥판내의 진동이 임의공간지점 r의 음압에 미치는 영향을 나타내는 Green 함수, V는 바닥판의 진동속도(속도장)를 나타낸다.

식 (1)을 이용하여 법규에서 정하고 있는 측정위치에서 구한 음압레벨이 그림 8에 나타나 있다.

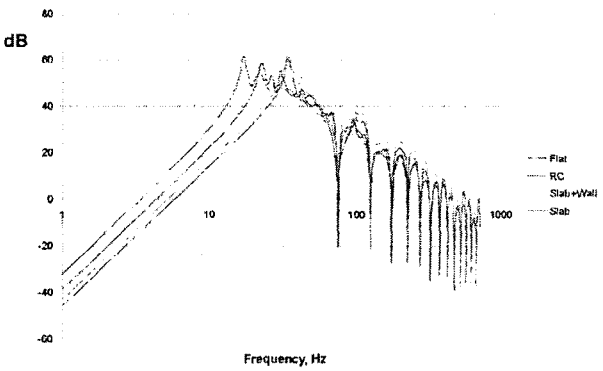

그림 8. 구조시스템별 음압레벨

그림 8에서 flat, RC는 각각 무량판 구조와 라멘구조를 나타내며 Slab+wall은 벽식구조에서 슬래브와 벽체에서 배출된 소음의 음압레벨을 나타내며 Slab는 벽체에서 배출되는을 무시하였을 때의 소음레벨을 나타내는 것이다. 그림에서와 같이 무량판 구조시스템의 1차 모드 진동모드와 그로부터 비롯된 소음이 고유진동수가 작기 때문에 왼편으로 편향된 것으로 나타나며 라멘구조, 벽식구조순으로 오른편으로 소음분포가 이동하고 있는 것을 알 수 있다. 벽식구조에서 벽체의 영향을 제외한 것은 벽체가 포함된 소음과 유사한 경향을 보이나 상대적으로 작은 음압레벨을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 벽체에서 발생하는 진동에너지로부터 배출된 소음의 양이 작아진데서 비롯된 결과라고 볼 수 있다.

그림 8의 음압레벨을 1/1 옥타브밴드로 나타낸 것이 그림 9에 나타나 있다.

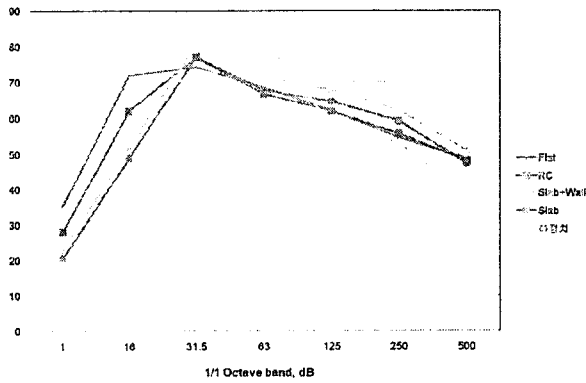

그림 9. 구조시스템별 1/1 옥타브밴드

그림 9로보면 구조시스템별 배출 소음의 크기가 더욱 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다. 무량판 구조와 라멘구조의 음압을 63 Hz 이상의 중심주파수에 유사하게 나타나는 것을 알 수 있으며 벽체를 제외한 벽식구조, 벽체를 포함한 벽식구조에서 음압이 전체 진동수 영역에서 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 벽식구조시스템은 63Hz 이하 저 진동수 영역보다 고 진동수 부분에서 소음이 크게 나타나고 있는 반면 무량판, 라멘구조의 경우에는 저 주파영역에서 소음이 크게 나타나고 있는 것이 대조적이다 이것은 구조시스템과 상관없이 구조시스템 전체가 가지고 있는 진동에너지의 크기는 같지만 그 분포가 저주파 부분에서 크게 나타나는 무량판, 라멘구조에서 63Hz 이상의 소음이 작아짐으로 상대적으로 중량충격음의 크기가 작아지는 결과로 나타나는 것으로 판단된다. 그림 9는 구조시스템별 음압레벨외에도 주거실험동에서 수행된 중량충격음 실험결과를 보여주고 있다. 실험에 의한 중량충격음 레벨은 63Hz에서 구조시스템별 수치해석에 의한 결과보다 크게 나타나고 있으며 그 이상의 중심주파수에서는 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 주거실험동에서 수행된 실험 수행시 바닥마감재로 고점성완충재를 사용한 결과에서비롯된 것이다. 완충재에 의해 뱅머신에 의한 충격에너지가 저주파영역으로 이동하고 그 결과 고주파 진동에너지가 감소하여 나타난 현상이라고 판단된다.

그림 9의 1/1 옥타브밴드 음압레벨을 역A 곡선을 이용하여 단일 평가지수로 중량충격음을 나타낸 것이 그림 10에 나타나 있다. 단일 평가지수로 나타난 결과를 보면 벽식구조에서 가장 큰 51dB의 값을 보이고 있으며 같은 벽식구조중 벽체에서 배출되는 소음을 무시한 경우가 48dB로 작게 나타나고 있다. 이것은 벽식구조에서 배출되는 소음이 슬래브뿐만아니라 벽체의 영향에 의해서 상당량의 소음이 방출되고 잇음을 나타나는 결과라고 볼 수 있다. 무량판이나 라멘구조의 중량충격음은 벽체를 무시한 벽식구조보다 더 작은 46dB로 나타나는데 이것의 원인은 앞 절에서 언급한바와 같이 진동에너지가 슬래브 전체로 분산되고 이결과 거실부분의 진동에너지량이 상대적으로 감소하고 이로부터 배출되는 소음이 작아짐으로써 나타나는 결과로 판단하고 있다. 실험에 의한 중량충격음 결과는 수치해석에 의한 결과보다 약간 큰 52dB로 나타나고 있다. 이것은 중심주파수 63Hz에서 큰 음압레벨을 가지는 값이 역 A곡선을 상회하는 잉여값으로 나타나 커지는 효과로 볼 수 있다.

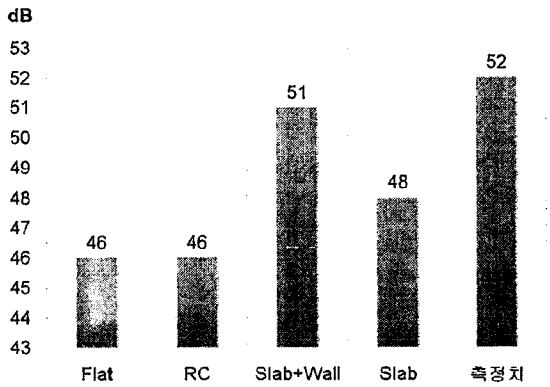

그림 10. 구조시스템별 중량충격음 레벨

이상의 수치해석 결과를 보면, 벽식구조의 경우 진동에너지의 집중에 의해 중량충격음이 크게 나타나고 있으며 벽체의 영향 또한 중량충격음에 기여하고 있는 것을 알 수 있다. 그에 비하여 무량판구조나 라멘구조의 경우에는 진동에너지가 전체 슬래브 시스템으로 전이됨으로서 평균진동에너지가 작아져 그로부터 배출되는 소음이 저감되는 것을 알

수 있다. 이러한 구조시스템별 소음배출 결과를 공동주택 설계에 반영하면 중량충격음 성능 개선을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 공동주택의 구조시스템으로 벽식구조, 무량판구조, 라멘구조를 선정하여, 실구조물과 유사한 경계조건을 가지는 유한요소로 모델링하고 구조시스템에 따른 중량충격음 배출특성을 수치해석을 통하여 평가하였다.

수치해석 결과, 벽식구조의 경우 거실부분의 진동에너지의 집중에 의해 중량충격음이 크게 나타나고 있으며 벽체의 영향 또한 중량충격음에 기여하고 있는 것을 알 수 있다. 그에 비하여 무량판구조나 라멘구조의 경우에는 진동에너지가 전체 슬래브 시스템으로 전이됨으로서 평균진동에너지가 작아져 그로부터 배출되는 소음이 저감되는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 삼성물산 건설부문 기술과제(공동주택 바닥슬래브의 충격음 저감 및 경량화를 위한 구조시스템 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) J.Y. Jeon, B.K. Lee, (2002), Evaluating the vibrational characteristics of floor impact noise in different structural elements of an apartment house., Transactions of the AIK (Planning) Vol. 18 No. 6., pp. 191-197

(2) J.R, Seo, J.S. Hwang, J.G. Song, S.W.Kim,(2004) An experimental study on the noise and vibration red uction effect depending on dynamic property of slab. Proceedings of AIK. Vol. Vol. 24. No. 1. pp. 161-16 4

(3) Gary H. Koopmann, John B. Fahnline, (1997) Designing Quiet Structure, Academic Press.

(4) C.-C. Sung and J.T.Jan (1997), The response o f and sound power radiated by a clamped rectangular plate, Journal of sound and vibration, 207(3), 301-3 17.