

초고층 빌딩 스포츠 센터의 충격성 진동으로 기인하는 소음진동 영향성 평가 및 저감대책

A Study on the Noise and Vibration Reduction at Sport Center on a Tall Building Apartment

○ 박해동* · 김강부* · 강현승*, 이홍기*

Park Hae Dong, Kim Kang Boo and Kang Hyun Seung, Lee Hong Ki

Key Words : Noise Criteria(소음허용치), Running Machine(런닝머신), Human Body Motion(신체운동), Sport Center(운동시설)

ABSTRACT

철골조 초고층아파트 내부의 스포츠 시설 운영시 이를 사용하는 시설의 종류와 운동양상에 따라 아파트 상하부층에 소음진동의 민원문제를 유발하게 된다. 초고층 아파트 내부에 스포츠 시설의 배치는 이를 이용하는 사용자에게 편리성의 주지만 철골조의 특성상 충격성 진동원이 발생하는 스포츠 시설은 상하부층인 아파트에 소음진동의 연향으로 인해 이를 방지하는 설계가 요구된다. 일반적인 아파트의 층간 소음진동문제는 이를 발생시키는 상부거주자의 예철과 층간 소음진동 저감기술이지만 아파트 내부의 동일층을 경계로 위치한 스포츠 시설은 시설의 사용성에 반해 하부층에 미치는 영향을 기술적으로 저감하여야 한다. 입주한 초고층아파트에 발생하는 소음진동문제를 풀기 위하여 스포츠 시설 하부층 아파트의 소음진동 기준을 선정하고 스포츠 시설의 주된 진동원인 런닝머신의 하중식을 산정하고 층간 소음진동 저감을 위한 대책을 제시하였다.

1. 서 론

공동주택의 소음문제는 주로 상하간 또는 세대간의 생활소음에 의해 유발되고 있다. 이들 소음의 유형은 주로 아이들이 뛰거나 물건을 떨어뜨려서 발생하는 충격진동이나 음향기구나 악기등에 의한 소음이 인접 세대에 전파하여 소음진동 피해를 유발시키고 있다. 하지만 공동주택의 고층화나 대형화에 따른 거주자의 편리성을 위해 모든 생활시설을 공동주택 내부에 설치할 경우 소음진동을 유발하는 스쿼시, 에어로빅, 체력단련장등 스포츠시설은 이들 시설의 배치가 소음진동 해결에 최우선의 문제이다. 공동주택에서 문제시 되고 있는 층간소음은 보편적인 관점에서 이미 익숙한 환경으로 상호 주의와 법적 기준 제정등을 통해 소음을 개선하고 있으나 공동주택내부의 스포츠 시설에 의해 발생하는 소음진동은 기존에

익숙한 생활소음이 아니라 생활의 리듬을 변화하고 예측 불가능한 소음문제로 나타나고 있어 주거자에게 새로운 불만요인으로 나타나고 있다. 즉 이러한 시설에서 발생하는 소음진동이 인접 아파트 거주자에 미치는 피해는 소음진동의 크기에 관계없이 단지 느낌만으로도 불쾌하게 여기게 된다. 또한 스포츠 시설의 가동이 중단되지 않고는 소음진동에 항상 노출된다는 관념이 더 큰 불만을 야기하고 있어 스포츠 시설의 원활한 사용성과 인접 혹은 세대간 아파트거주자의 소음진동 피해를 최소화하기 위해서는 공동주택 설계시 소음진동 유발시설의 배치와 주변 아파트 거주자에서 피해를 방지하는 근원적인 대책을 수립하여야 한다.

본 논문은 완공된 공동주택 내부에 위치한 스포츠 센터 가동시 발생하는 진동에 의해 하부층 아파트에 미치는 소음진동 영향을 스포츠시설의 운동기구별 소음진동영향을 평가하였다. 측정결과 스포츠시설에서 발생하는 소음진동이 하부층 아파트에 미치는 주

* 알엠에스 테크놀러지(주)

E-mail : rmstech@rmstech.co.kr

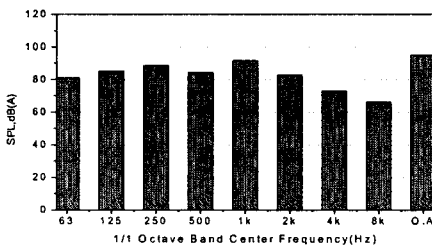
Tel : (041) 556-76, Fax : (041) 556-7038

된 진동원은 연속적인 가동에 의한 응답을 보이는 런닝머신이 주된 소음 진동원으로 나타났다. 따라서 소음진동 저감을 위한 소음설계기준을 미국 공조냉동냉방 기술자협회(ASHRAE)의 아파트 기준을 적용하였으며 진동설계기준은 ISO 2631 주거지 밤기준을 적용하였다. 소음원은 측정결과를 사용하였으며 진동원인 가진력의 특성은 런닝머신을 사용하는 사람의 평균 체중 70kg으로 하는 Bachmann의 하중합수를 사용하였고, 진동 전달 특성은 측정 및 해석을 통하여 주파수 전달합수를 계산하였다.

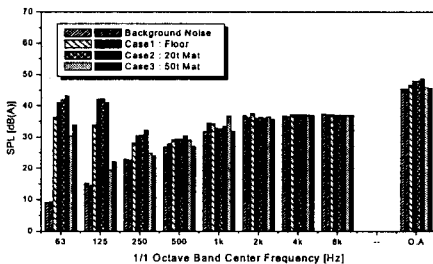
2. 스포츠 시설에 의한 소음진동

2.1 소음원의 결정

스포츠시설에서 발생하는 소음과 하부층 아파트 내부에서 측정된 소음특성은 그림 1과 같다. 스포츠 시설 내부의 소음은 최대 95dB(A)이며 하부층 아파트의 소음은 런닝머신 4대가동시 52dB(A)정도로 나타나고 있다. 아파트 내부의 주파수별 소음 특성을 보면 소음이 문제가 되는 영역은 주로 125Hz이하의 저주파수 소음으로 나타났다.



(a) 스포츠 시설의 소음레벨



(b) 스포츠 시설 하부층의 소음(1인 가동)

그림 1. 소음측정 결과

2.2 진동원의 결정

진동 대책을 위한 방법으로 스포츠 시설에서 진동원으로 가능한 200kg의 웨이트 기구와 런닝머신을 가동시 아파트 바닥에서 진동을 측정하였다. 그림 2의 측정결과 런닝머신 4대 가동시 진동치가 최대 6.87gal(rms)이며 웨이트기구는 사용자의 실수에 의한 최대높이에서 낙하시 진동측정 결과 최대 1.4gal(rms)로 아파트의 진동응답에 런닝머신이 주된 영향을 미치고 있다.

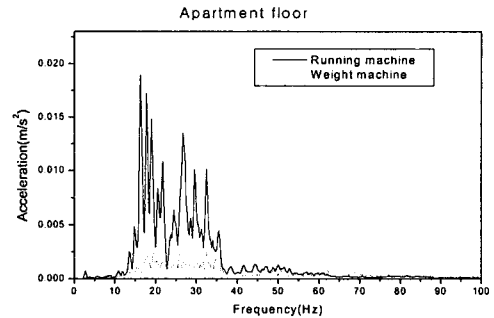


그림 2. 하부층의 진동측정 결과

그림 3은 스포츠 시설의 웨이트 기구를 인위적으로 낙하시킬 경우 스포츠 시설 바닥에서 측정된 진동응답으로 17.5Hz의 주파수 응답이 나타나고 있어 충격가진특성을 감안하면 스포츠 센터 바닥의 진동응답은 1차 모드(1st bending mode)의 공진응답이 지배적으로 판단된다.

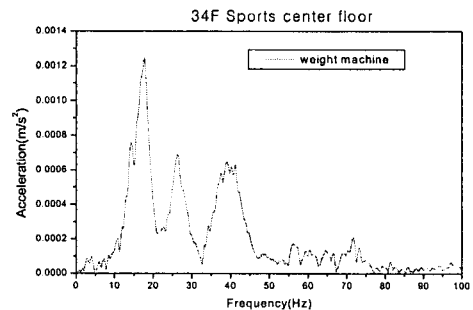


그림 3. 스포츠 시설 바닥의 충격응답

2.3 런닝머신의 진동원

스포츠 시설의 진동원 중 하부층의 아파트에 미치는 진동응답을 보면 런닝머신 사용시 연속적인 주기의 가진 원에 따라 정상상태 진동응답을 야기시키고 있어 주된 진동원은 런닝머신으로 나타났다. 스포츠 시설 내부의 다양한 진동특성에서 사람의 보행보다 런닝이 비교적 바닥에 큰 동적 하중을 가하게 된다. 사람의 런닝에 의해 바닥에 가해지는 충격하중은 자기 체중의 2~3배 정도로 알려져 있으며 도약(jumping)시 발행하는 충격하중은 런닝시보다 10~20%정도 크게 된다. 이러한 진동원의 모델링 단순화를 위해 모든 사람이 동일한 운동으로 바닥에 전달되어지는 것으로 가정하여 동적하중은 사람의 수에 배수로 가정하였다. 사람의 반복적인 활동형태에 시간이력 하중은 주파수상에서 기본주파수의 조화성분으로 나타나며 기본주파수에서 대부분의 제일 큰 하중을 나타내고 있다³⁾.

사람의 반복적인 활동에 의해 발생하는 정규화된 동적 하중함수는 자중과 푸리에 계수로 식(1)과 같이 표현할 수 있으며 이에 대한 계수는 표1과 같다.

표 1. Coefficients of normalized dynamic forces

Representative type of activity	Activity rate (1/s)	Fourier coefficient and phase lag					Design density (persons/m ²)	
		α_1	α_2	α_3	α_4	α_5		
"walking"	vertical	2.0	0.4	0.1	$\pi/2$	0.1	$\pi/2$	-1
	forward	2.4	0.5	0.2				
	lateral	2.0	$\alpha_{12} = 0.1$ $\alpha_{12} = 0.1$	$\alpha_{22} = 0.1$				
"running"	2.0 to 3.0	1.6	0.7		0.2		-	
"jumping"	normal	2.0	1.8	1.3	*)	0.7	*)	in fitness training -0.25 (in extreme cases up to 0.5)
		3.0	1.7	1.1	*)	0.5	*)	
		2.0	1.9	1.6	*)	1.1	*)	
		3.0	1.8	1.3	*)	0.8	*)	
"dancing"	2.0 to 3.0	0.5	0.15		0.1		-4 (in extreme cases up to 6)	
"hand clapping with body bouncing while standing"	1.6	0.17	0.10		0.04		no fixed seating -4	
	2.4	0.38	0.12		0.02		(in extreme cases up to -6) with fixed seating -2 to 3	
"hand clapping"	normal	1.6	0.024	0.010		0.009	-2 to 3	
	intensive	2.4	0.047	0.024		0.015		
"lateral body swaying"	seated	0.6	$\alpha_{12} = 0.4$	-		-	-3 to 4	
	standing	0.6	$\alpha_{12} = 0.5$	-		-		

$$F_p(t) = G + \sum_{i=1}^n G_i \cdot \alpha_i \sin(2\pi i f_p t - \phi_i) \quad (1)$$

여기서 G=사람의 자중, α_i =푸리에 계수, f_p =반복주파수,

ϕ_i =1차 하모닉에 대한 i 번째 하모닉의 위상차,

t_p = 도약시 바닥과의 접촉시간

스포츠 시설에서 런닝머신이 인접에 위치하고 있어 모든 동적하중을 집중하중으로 가정하였으며 대책을 위한 검증은 스포츠 시설의 단위하중 입력시 하부층의 바닥에 대한 주파수별 진동응답인 compliance를 계산하였다. 대책에 따라 진동허용치와 하중함수를 각각 계산하고 안전율을 적용하여 하부층의 진동기준에 만족하는 계산을 수행하였다.

표 1의 런닝에 의한 계수를 사용하고 접촉시간을 0.16sec로 사람의 무게를 700N(70kgf)로 푸리에 계수와 시간이력 동하중을 아래 그림 4, 5에 나타내었으며 1인당 런닝에 의한 시간이력 최대 동하중은 자중의 약3배인 212kgf를 스포츠 시설의 진동원으로 입력되었으며 해석상 진동원은 주파수상의 그림 4로 계산하였다.

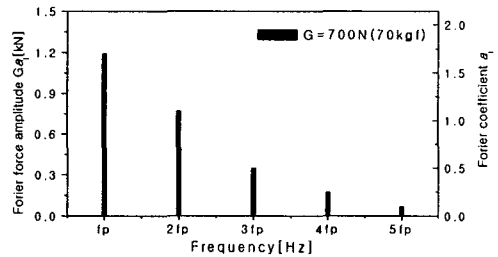


그림 4. Discrete Fourier amplitude spectrum for the forcing function from jumping(jazz dance training, 1.8<fp<3.5)

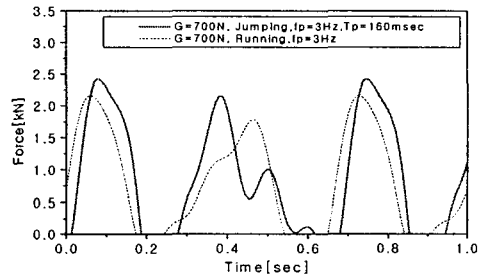


그림 5. Forcing function from jumping on the spot at jumping rate of 3Hz

2.4 소음진동 기준산정

스포츠 시설에서 발생하는 충격성 진동에 의한 소음은 직접음과 건물구조인 기둥 및 벽체의 진동으로 기인하는

고체음이 아파트와 인접시설에 영향을 주고 있다. 구조음은 전적으로 진동으로 전달되기 때문에 건물의 구조적인 특성에 의하여 방사 소음이 결정된다. 그러나 이러한 방사 소음도 진동이 특정 수준에 이르러야만 문제가 될 수 있는 소음으로 형성된다. 즉, 진동의 설계기준치를 만족하더라도 소음 문제는 발생할 수 있다는 것을 의미하고 있다. 소음허용규제치를 결정하기 위해서는 진동허용규제치와 관련하여 결정할 필요가 있으며 여기서는 표 2의 미국 공조, 냉동, 냉방 기술자 협회(ASHRAE)에서 제시하는 아파트 수준인 40dB(A)로 설계치로 산정하였다.

표 2 미국 공조·냉동·냉방 기술자 협회(ASHRAE)기준

실명	NC치	dB(A)	실명	NC치	dB(A)
개인주택	25-30	35	호텔의 서비스	40-45	55
아파트먼트	30-35	40	극장	25-30	35
중역실, 회의실	25-30	35	음악당	20-25	30
개인 사무실	30-35	40	녹음 스튜디오	15-25	25-30
일반 사무실	35-40	45	레스토랑	35-45	45-50
전산실, 현관로비	40-45	50	카페테리아	40-50	50-55
개인병실, 수술실	25-30	35	백화점	35-45	40-50
일반병실, 검사실	30-35	40	백화점 1층, 지하층	40-50	50-55
병원 대합실	35-40	45	수영장	40-55	50-60
교회	25-30	35	체육관	30-40	40-45
학교, 교실	25-30	35	호텔객실	30-35	40
도서관	30-35	40	호텔, 연회장	30-35	40
영화관	30-35	40	호텔로비, 복도	35-40	45

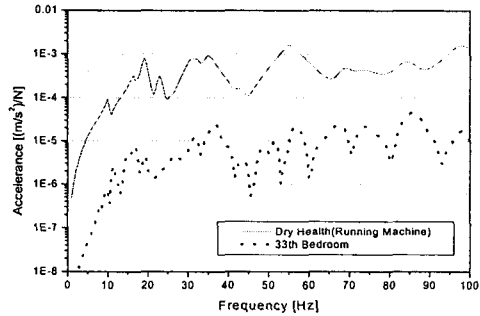
표 3 사용 용도별 ISO 2631-2 진동기준(rms)

지역	시간	연속진동(dB)	충격진동(dB)
병원의 수술실, 정숙을 요하는 지역		51 (3.5mm/s ²)	54 (5.0mm/s ²)
주거지	낮 밤	57 (7.0mm/s ²) 54 (5.0mm/s ²)	60 (10.0mm/s ²)
사무실		63 (14.1mm/s ²)	66 (19.9mm/s ²)
공장, 작업장		69 (28.2mm/s ²)	72 (39.8mm/s ²)

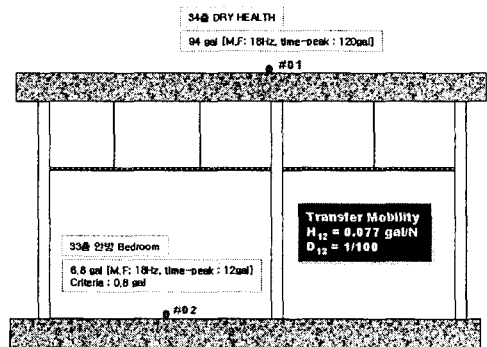
3. 소음진동 저감대책

스포츠 시설 바닥과 하부층 아파트 바닥의 진동전파 특성은 동일 구조체인 주기동에 의해 진동이 전파하게 된다. 스포츠 시설과 하부층을 모델링한 후 스포츠 시설에서 단위하중에 의한 상부층의 응답비는 그림 6과 같

이 약 1/100정도로 나타나고 있으나, 웨이트 기구의 충격하중에 대한 진동응답비는 약 1/10정도로 나타나고 있어 상하부층 모델링시 반영하지 못하는 비구조체 벽면을 통한 진동전달의 영향으로 나타나고 있어 해석결과와 응답에 대한 영향을 고려하여야 한다.



<그림 6> Point & Transfer FRF (Receptance)

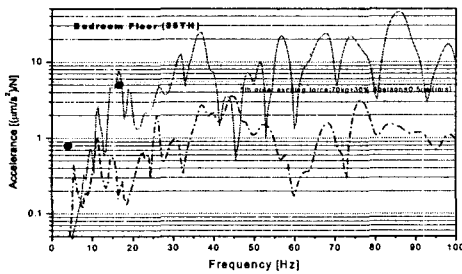


<그림 7> 충격하중에 의한 진동측정결과

아파트 바닥의 주된응답은 16Hz 성분이며 스포츠 시설 바닥은 17.5Hz로 런닝시 발생하는 조화하중은 약 5차 성분의 진동원이 건물에 진동응답을 유발하게 된다. 5차성분의 진동원에 대한 가진력은 체중에 약 10%의 해당하며 총 6명 운동할 경우 가진진폭은 42kgf로 스포츠 시설 바닥에 대한 하부층 아파트바닥의 모빌리티가 $1 \times 10^{-4} (m/s^2)/N$ 이므로 아파트 바닥의 예상응답은 4.2gal정도가 되어 아파트의 용도(0.5gal, rms)에 적합치 않는 진동 수준이 된다.

3.1 소음진동 저감 설계

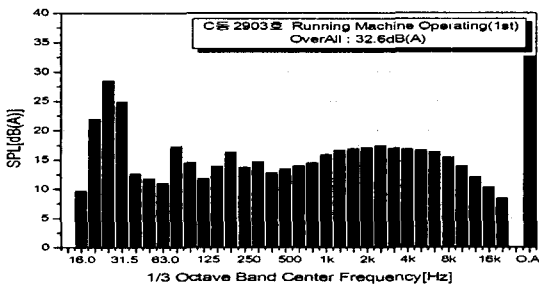
현재 상태에서 측정된 아파트 바닥의 진동수준은 6.8gal로 진동허용규제치보다 약 10배 정도 큰 진동수준을 나타내고 있다. 대책으로는 스포츠 시설의 동적 구조 변경(강성 및 질량보강)이 아파트 바닥의 구조 변경보다 유리하므로 스포츠 시설 바닥의 고유진동수를 증가시키거나 바닥의 모빌리티를 약10배 정도 개선하여야 한다. 이와 더불어 거주파수의 소음에 대한 대책수립이 요구되므로 스포츠 시설 바닥을 강성보강한 후 문제시 되는 16Hz 주파수에 방진효과가 있는 뜬바닥 구조를 채택하였다.



<그림 8> 대책 전/후 아파트바닥 모빌리티 비교

3.2 대책후 소음진동 측정 결과

Running Machine에 대한 소음진동 저감을 위한 대책수립에 따른 시공후 모든 런닝머신 가동시와 설계하중 이상의 체중을 가진 사람의 인위적인 충격을 발생한 운동시 스포츠시설 하부 아파트 바닥과 실내에서의 소음과 진동을 측정하였다. 시험운영시 진동수준은 0.3~0.6gal(rms), 소음수준은 26~34dB(A)로 나타났다. 설계하중이상의 가동조건에서 측정된 아파트에서는 시험 운영시 약 27dB(A)의 소음이 33dB(A)로 약 6dB정도 증가한 소음이 나타났다.

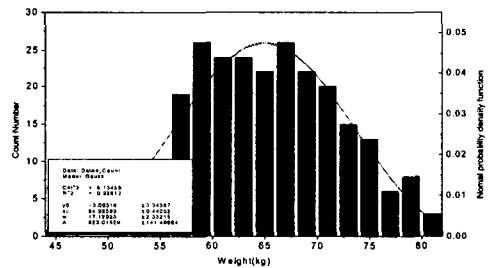


<그림 9> 대책 후 소음 측정 결과

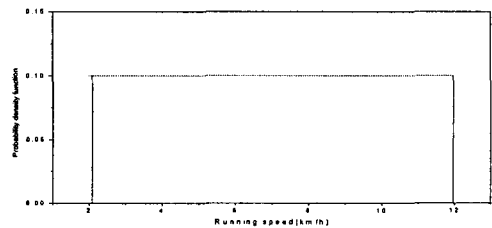
3.3 런닝머신 가동조건에 따른 소음

스포츠 시설의 런닝머신을 사용하는 사용조건에 따라 소음레벨이 다르게 된다. 기술적인 소음설계기준과 이에 영향을 받는 아파트 거주자의 입장차이는 얼마의 소음기준이 합리적인가를 결정하여야 하며 또한 기술적으로 해결이 가능한가를 검토하여야 한다. 설계자의 입장으로는 사용조건이 가장 가혹한 경우에 대해서도 하부층에 소음을 느끼지 못하는 설계기준을 제시하여야 한다. 하지만 동일 구조체인 공동주택의 특성상 가장 가혹한 사용조건에서 설계기준을 만족하는 방법은 소음진동원의 이동 또는 런닝머신의 사용방법 개선이 요구되며 기술적인 방법의 대책에는 한계가 있다.

설계한 진동원은 체중 70kg인 사람이 약 10km/h로 달릴시 발생하는 하중에 대한 소음진동 기준으로, 이보다 큰 진동원에 대해서는 소음진동이 설계치를 초과하게 된다. 즉 보편적인 기준적용시 소음진동기준과 과격한 하중시 설계기준은 공동주택의 특성, 비용, 기술적인 문제로 인해, 현재상태의 설계기준에 대해 이를 초과하는 확률이 얼마인지를 제시하였다.



(a) 표준체중표의 정규분포(w)



(b) 주행속도의 직각분포(s)

그림 10 런닝머신의 사용조건에 따른 분포곡선 이러한 기준초과의 원인에 대한 변수를 고려하기 위해 체중과 런닝속도를 변수로 하고, 평가의 단순화

를 위해 사람의 런닝특성은 동일하며 체중은 한국 표준체중표에서 평균체중을 65kg로 하는 정규분포특성을 사용하기로 하며, 사용자의 남녀비율은 동일하고 모든 연령대의 사용자수가 동일한 조건에서, 주행속도는 2~12km/h로 가지는 직각분포를 가질 경우 런닝머신을 사용하는 조건에 따라 설계기준을 초과하는 확률을 계산하였다. 확률계산 조건은 체중이 과대한 사람이 드라이 헬스장을 사용할 빈도, 런닝속도의 분포, 각 런닝머신의 가동조건, 사용자의 성비, 연령, 운동방법등을 배제하고 체중은 정규분포를 가지고 런닝속도가 직각분포의 상호 변수에 상관성이 없는 조건으로 가정하였다. 그림 10 a)에는 한국인의 남녀 표준체중표에 따른 정규 분포도를 b)에는 주행속도를 직각분포로 나타내었다.

그림 10과 같은 조건에서 런닝머신의 가동조건인 70kg을 초과하는 사람이 10km/h이상으로 가동할 확률은 다음과 같다.

(1) 70kg이상의 체중을 가진사람이 운동할 확률

$$P(w) = 28.1\%$$

(2) 런닝속도가 10km/h를 초과할 확률

$$P(s)=20\%$$

(3) 70kg을 초과한 사람이 10km/h를 초과하여 런닝머신을 사용할 경우의 확률

$$P(w,s)=P(w) \times P(s)=5.62\%$$

따라서 보편적인 사용조건에서 70kg, 10km/h이하의 가동조건은 확률상 약 94%정도이며 70kg이상의 체중을 가진 사람이 10km/h이상으로 사용할 확률은 5.62%로 이 조건에서는 하부층의 소음이 설계기준을 초과하게 된다.

4. 결 론

공동주택 내부에 위치한 스포츠 시설의 소음진동을 저감하기 위한 대책제시와 시공후 소음진동을 측정평가 하였다. 층간 아파트의 대부분 소음원과 달리 스포츠시설에 의해 발생하는 소음은 익숙한 생활소음이 아니라 소음진동 저감대책을 위한 소음진동 기준 선정과 이를 만족하는 기술적 방법에 따라 상당히 유의하여야 할 사항이다.

스포츠 시설의 시설별 가동시 하부층에 미치는 소음진동의 영향은 주로 연속적인 운동을 하는 런닝머신이 지배적으로 나타났으며 이를 위한 대책으로 스포츠 시설 바닥을 강성보강하였으며 방진효과가 있는 뜬바닥 구조로 대책을 수립하였다.

대책후 하부층에서 측정된 소음진동수준은 요즘 법제화 할려는 층간 소음기준보다 아주 낮은 설계기준을 만족하고 있으나 스포츠 시설의 특성상 사용자 사용조건에 따라 하부층 거주자의 불만이 대두되었다. 즉 어떠한 사용조건에서도 소음진동에 노출하지 않게 하는 요구는 공동주택의 특성상 기술적 해결의 한계가 있어 런닝머신을 사용하는 사용자의 조건을 제약하기 위한 설계기준을 초과하는 확률을 검토하였다.

참 고 문 헌

- (1) 이흥기, 김두훈, 권형오, 반도체 공장에서 미진동제어를 위한 격자보의 동적 설계에 관한 연구, 한국소음진동공학회, '94 추계학술대회 논문집 pp. 52~57, 1994.
- (2) 이흥기, 박해동, 최현, 배기선, 김두훈. 정밀 장비의 미진동제어 기술에 관한 연구(HDD CELL진동 제어), '95 춘계학술대회 논문집 p233-239, 1995.
- (3) 김기철, 최근호, 이동근. 바닥판 진동해석을 위한 보행하중의 모형화, 한국전산구조공학회, pp173-187, 2002
- (4) Hugo Bachmann, Vibration Problems in Structure, Birkhauser Verlag Basel, Boston, Berlin, 1995.
- (5) 이흥기, 김두훈, 김사수, 주파수응답함수를 이용한 고정밀 장비의 진동허용규제치 결정기법에 관한 연구, 한국소음진동공학회지, 제6권, 제3호, pp. 363~373, 1996.
- (6) Hong-Ki Lee, Hae-Dong Park, Hyun Choi, Doo-Hoon Kim, Sa-soo Kim, A New Method of Determining Vibration Criteria for a Vibration Sensitive Equipment Using Frequency Response Function, INTER-NOISE 96, Proceeding Book 3 pp.1253~1262, August, 1996.
- (7) C. G Gordon, Vibration prediction and control in microelectronics facilities, INTER-NOISE 96, Proceeding Book 1 pp.149~154, August 1996.
- (7) Eric E. Ungar, Vibration control design of high technology facilities, sound and vibration, July, 1990.