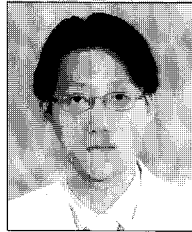
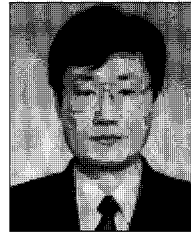


# 계측 및 해석에 의한 구조물의 진동영향평가

## Estimation of Structural Vibration by Measurement and Numerical Analysis



조경환\*



최항\*\*



윤영철\*\*\*

\* GS건설 기술본부 친환경건축연구팀 선임연구원  
 \*\* GS건설 기술본부 친환경건축연구팀 수석연구원  
 \*\*\* 명지전문대학 토목과 조교수

### 1. 서론

최근 경제성장으로 인해 생활수준이 높아지고 삶의 질이 향상됨에 따라 소음이나 진동과 같이 생활 중에 발생하는 환경문제에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 아파트와 같은 공동주택의 고층화/대형화로 인해 인구밀집 현상이 가속화됨에 따라 주변의 소음 및 진동으로 인한 분쟁이 심화되고 있다. 실제로 환경부의 2007년 소음·진동관리시책시·도별 추진실적 평가 보고서를 살펴보면 소음·진동 민원발생건수는 2007년 38,159건으로 전년보다 16% 증가하였고, 최근 5년간에는 46.1% 증가한 것으로 나타났다. 또한, 산업분야에서는 반도체, 디스플레이, 나노, 바이오

등의 첨단 고부가가치 산업분야의 발달로 인해 관련 정밀공장의 수요가 급격하게 늘어나고 있는 추세이다. 특히 이러한 첨단산업분야의 경우, 시장경쟁이 치열해 짐에 따라 생산성을 높이기 위해 더 크고 더 빠른 장비를 사용하고 있다. 이로 인해 정밀공장에서 진동에 의한 불량발생률이 늘어나고 있으며, 이를 방지하기 위해 진동제어 목표가 강화되고 있는 추세이다. 실 예로 LCD 패널을 생산하는 정밀공장의 세대별 동강성 목표(표 1)를 살펴보면 세대가 발전함에 따라 지속적으로 강화되고 있는 추세이다.

이러한 진동문제를 해결하기 위해서는 발생한 진동이 사람의 육체적 정신적 건강 및 작업능률과 장비의 정상적 운영에 미치는 영향 등을 정확하게 평가할 수 있는 진동영향평가 기술과 진동이 발생, 전달, 감지되는 시스템을 분석하여 진동을 효율적으로 저감시킬 수 있는 진동제어기술이 필요하다. 이러한 필요성에 부응하여 GS건설에서는 다양한 형태의 진동문제에 대응하기 위한 다목적 진동제

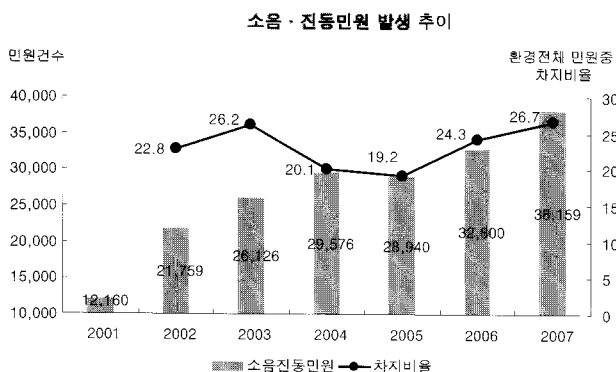


그림 1 소음진동 민원발생 추이

표 1 LCD 정밀장비(C사 노광기)의 동강성 기준변화 추이

세대	4	5	6	7	8	9이상
최대기판 Size (mm)	880×1100	1100×1250	1200×1300	1500×1850	1870×2200	2160×2400
동강성 목표 (N/m)	0.45×10 <sup>8</sup>		1.6×10 <sup>8</sup>		1.85×10 <sup>8</sup>	2.95×10 <sup>8</sup>

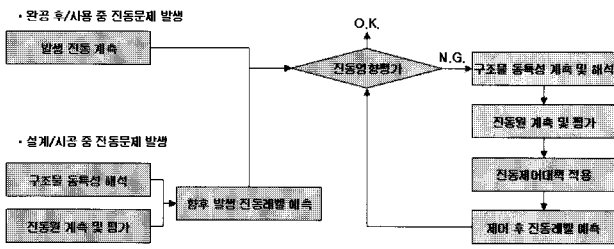


그림 2 진동영향평가 및 진동제어 과정

어 솔루션 V-Con 시스템을 구축하고 관련 연구를 수행하고 있다. 일반적으로 진동문제가 발생하였을 때의 대처과정을 살펴보면 그림 2와 같다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 정확한 진동영향평가를 위해서는 계측을 통해 현 상황을 정확하게 파악하는 것과 해석을 통해 향후의 상황을 예측하는 기술이 필요하며, 해석기술의 경우에는 진동제어 과정에서도 동일하게 적용되게 된다. 따라서, 본 기사에서는 전체 진동문제 대응과정 중에서 계측과 해석에 의한 진동영향평가 기술에 대해 소개하고자 하며 이를 위해 다양한 허용진동기준, GS건설에서 수행한 계측에 의한 진동영향평가 사례 그리고 해석에 의한 진동영향평가 기술 등을 이야기하고자 한다.

## 2. 허용 진동 기준

지속적이거나 급작스럽게 발생한 진동은 인체에 불쾌감, 멀미, 건강상의 문제를 발생시키거나 작업능률의 저하 등을 가져올 수 있으며, 생산현장에서는 장비의 오작동을 유발하는 등의 문제를 발생시키게 된다. 또한, 심할 경우 건물의 균열, 붕괴와 같은 안전성에 문제를 초래하기도 한다. 이에 따라 각국에서는 진동에 관한 허용기준을 마련하여 일정 수준 이상의 진동을 유발하지 않도록 규제하고 있다.

### 2.1 환경부, 소음진동 규제법

2002년 12월 개정된 환경부 “소음진동규제법시행규칙(환경부령 제98호) - 별표7의2 생활소음·진동의 규제기준”에서 정한 생활진동규제기준이 표 2와 같다.

표 2 환경부, 소음진동 규제법 - 생활진동규제기준(단위 : dB(V))

대상지역	시간별	
	주간 (06:00-22:00)	심야 (22:00-06:00)
주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구 및 관광·휴양개발 진흥지구, 자연환경보전지역, 그 밖의 지역안에 소재한 학교· 병원·공공도서관	65이하	60이하
그밖의 지역	70이하	65이하

비고 : ① 진동의 측정방법과 평가단위는 소음·진동 공정시험방법에서 정하는바에 따른다.

② 대상지역의 구분은 국토의계획 및 이용에 관한 법률에 의한다.

③ 규제기준치는 생활진동의 영향이 미치는 대상지역을 기준으로 하여 적용한다.

④ 공사장의 진동규제기준은 주간인 경우 특정 공사의 사전신고대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 2시간이하일 때는 +10dB을, 2시간초과 4시간이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.

⑤ 발파진동의 경우 주간에 한하여 규제기준치에 + 10dB을 보정한다.

이러한 기준에 의해 진동을 평가할 때에는 주파수 특성에 따라 인체의 반응 정도가 다르게 나타나는 것을 반영하여 계측·해석된 주파수별 진동레벨을 보정하게 된다. 일반적으로 인체는 4~8Hz의 진동, 즉 1초에 4번에서 8번 정도 흔들리는 진동에 가장 민감하게 반응하며 그 보다 더 빠르거나 느린 진동에 대해서는 점차적으로 둔감한 반응을 보이게 되므로 표 3과 같은 인체감각 보정치를 적용한다.

표 3 1/3 옥타브에서의 주파수별 인체감각 보정치

주파수 (Hz)	보정치 (dB)	주파수 (Hz)	보정치 (dB)	주파수 (Hz)	보정치 (dB)
1.0	-6	5.0	0	25.0	-10
1.25	-5	6.3	0	31.5	-12
1.6	-4	8.0	0	40.0	-14
2.0	-3	10.0	-2	50.0	-16
2.5	-2	12.5	-4	63.0	-18
3.15	-1	16.0	-6	80.0	-20
4.0	0	20.0	-8		

### 2.2 ISO 진동규준

ISO 2631 “Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2 : Continuous and Shock-induced vibration in buildings(1 to 80Hz)”는 건물 진동이 인체에 미치는 영향을 측정하는 방법과 주파수별로 인체가 진동에 반응하는 정도를 등가반응곡선으로 제시하고 있다. 또한, 건물 내 인체 진동에 대한 잠정적인 진동허용지침을 등가반응곡선에 대한 가중치로 제시하고 있으나, 주관적 감각인 진동에 대한 불쾌감을 객관적으로 정량화하기 어려우므로 몇몇 국가에서 적용하는 건물 용도별 가중치의 범위만을 제시하고 있다.

표 4는 몇몇 국가에서 사용하는 인체 응답에 대한 건물

표 4 인체응답에 대한 건물 진동의 만족스러운 진폭을 평가하기 위하여 몇몇 국가에서 사용하는 곱셈 인자의 범위

장 소	시간	연속진동 또는 간헐적인 진동	하루에 발생하는 과도진동 횟수
중요한 작업 장소 (병원, 수술실, 정밀도를 요하는 실험실 등)	낮, 밤	1	1
주거 지역	낮	2~4	30~90
	밤	1.4	1.4~20
사무실	낮, 밤	4	60~128
공장, 작업장	낮, 밤	8	90~128

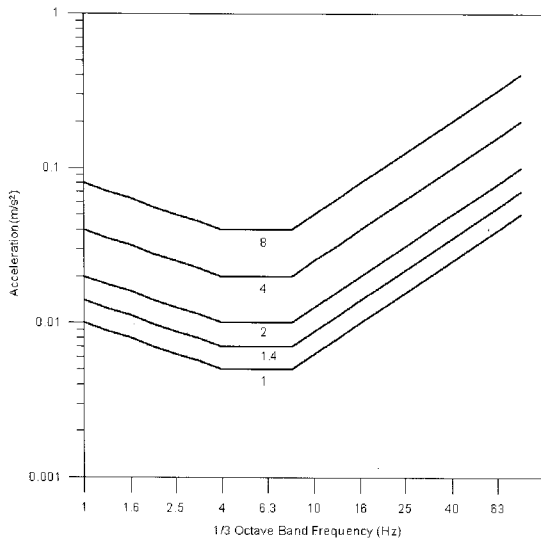


그림 3 건물에서의 연속진동 - 표 2.2의 곱셈인자를 고려한 진동 기준 곡선(ISO)

진동의 만족스러운 진폭을 평가하기 위한 곱셈 인자의 범위를 제시한 것이며 그림 3은 표 4의 가중치 중 연속진동에 관한 것을 등가반응곡선에 적용한 건물 내 진동의 가속도 기준곡선이다.

### 2.3 풍진동에 대한 진동허용기준

현재 국내에는 풍하중에 대한 가속도 평가방법 및 기준을 규정하고 있지 않으며, 외국의 경우 ISO, NBCC(캐나다), AIJ(일본) 등에서 가속도 평가기준을 제시하고 있다. 이 때 각각의 평가기준은 풍속의 재현주기와 강풍 지속시간 등을 다르게 적용하고 있으므로 적용하려는 평가기준에서 제시하는 재현주기별 풍속에 대해 진동레벨을 예측해야 한다.

#### 2.3.1 ISO 6897

ISO 6897은 고층건물과 고정식 해양구조물을 대상으로 0.063~1Hz에 해당하는 저주파수 수평진동에 대한 사용성

평가를 목표로 하고 있다. 재현주기 5년에 해당하는 풍속에 대해 진동이 가장 심한 10분 동안 사용자의 2% 이하가 불만을 표시하는 진동수준을 RMS가속도를 이용하여 진동기준으로 제시하고 있으며, 이 곡선을 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_x = \exp(-3.65 - 0.41 \ln f)$$

여기서,  $\sigma_x$  : 수평방향 RMS 가속도,  $f$  : 대상 주파수

Melbourne(1988), Irwin(1986), Reed(1971), Chen and Robertson(1973) 등은 RMS 가속도로 제시된 진동기준에 재현주기와 강풍지속시간을 변수로 가지는 피크팩터를 적용하여 다음과 같이 최대가속도로 진동기준을 제시하였다.

$$x_{\max} = \sqrt{2 \ln f T} (0.65 + \ln R / 5) \exp(-3.65 - 0.41 \ln f)$$

여기서,  $x_{\max}$  : 수평방향 최대가속도, T : 강풍지속시간(sec), R : 재현주기(년)

이상의 내용을 그림 4에 정리하였다.

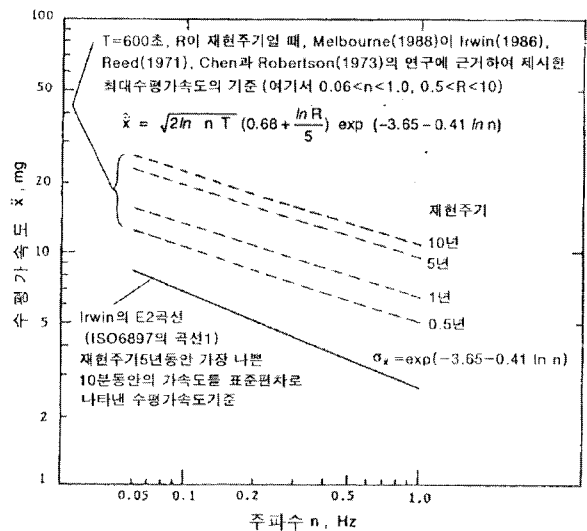


그림 4 ISO의 RMS 및 최대가속도 기준

#### 2.3.2 NBCC(캐나다)

NBCC 기준은 재현주기 10년에 해당하는 풍속으로 강풍 지속시간이 1시간인 경우에 대해 거주용 빌딩, 호텔, 사무실과 같은 구조물의 용도별로 최대가속도 진동기준을 표 5와 같이 제시하고 있다.

2.3.3 AIJ(일본건축학회)

AIJ 기준은 재현주기 1년에 해당하는 풍속으로 10분간 강풍이 지속될 때 사용자 중 몇 %가 진동을 지각하는지에 따라 그림 5와 같이 H-10~H-90까지의 진동기준을 최대가속도 형태로 제시하였다. AIJ 기준의 경우 적용하는 성능평가곡선이 구조물의 종류 등에 의해 결정되는 것이 아니라 설계단계에서 건축주와의 협의에 의해 결정하게 된다. 따라서, 본 검토에서 성능평가곡선 중 임의로 하나를 결정해서 진동기준으로 적용하기 곤란한 면이 있다. 다만, 2004년에 개정되기 이전의 AIJ 기준과 비교해 볼 때 대체적으로 주거용 건물의 경우 H-10~H-50, 사무용 건물의 경우 H-30~H-90을 성능평가곡선을 활용하고 있으므로 이를 평가의 가이드로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

표 5 NBCC의 수평방향 최대가속도 진동기준

10년 재현주기 풍속에 대한 진동기준	1시간 동안의 최대 가속도
주거용 빌딩	10~15 gal
호텔	15~20 gal
사무실	20~25 gal

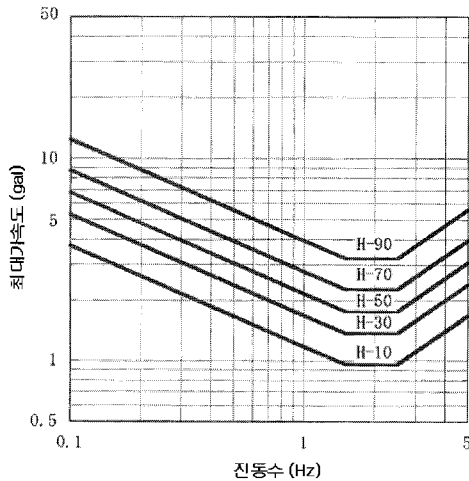


그림 5 풍진동에 대한 성능평가곡선(AIJ)

2.4 독일(DIN)의 진동허용규준

건물에 대한 진동기준은 DIN 4150 Part 3 "Structural vibration in buildings : effects on structures"에서 건물에서 발생하는 일시진동과 연속적인 정상진동에 대한 기준치를 제시하고 있다. 표 6은 최근에 개정된 진동허용 규제값을 정리한 것이다.

$$\sigma'_{max} = 1.73 \cdot \sqrt{E_{dyn} \cdot \rho} \cdot \sqrt{W_{tot} / W_{stf}} \cdot k_n \cdot v'_{max}$$

여기서,  $\sigma'_{max}$  = 공진 발생시 예상되는 최대 동적 휨응

표 6 구조물 손상 가능성 평가기준(DIN 4150 Part 3 (정상진동) 1986년 개정)

진동방향	건물등급	I	II	III
구조물 전체 - 수평방향	건물의 형식	상업, 산업용 건물:	주거용 건물:	진동에민 구조물:
	허용진동속도	5 mm/s 이하	5 mm/s 이하	-
추정위치 : 최상층의 수평진동, 진동모드 평가위해 최소 1개층 이상 동시측정 적용범위 : 기계적인 정상진동이 대부분 *5층 이상의 건물의 1차 고유진동수 $f_1=10/n$ [Hz, n:층 층수]				
구조물 부재 - 수직방향	건물(바닥) 수직방향 허용진동속도	경험적으로 10 mm/s 에서도 구조적 손상은 발생하지 않지만 미소손상 발생 <sup>(1)</sup>		

주(1) 허용치를 초과할 시에는 동적응력 레벨을 기준으로 다음 식에 의하여 평가하고 있다.

력,  $E_{dyn}$  = 재료의 동적 탄성계수,  $W_{tot}$  = 부재자중과 기타 등분포 하중,  $W_{stf}$  = 부재자중,  $k_n$  = 부재경계조건 및 진동 모드를 고려한 무차원 보정계수 (1 - 1.3),  $v'_{max}$  = 부재의 최대 입자속도

2.5 진동민감장비의 진동허용규제치

구조물의 미진동제어와 정밀장비의 진동허용규제치에 관

표 7 진동민감장비의 진동허용기준(BBN-Criterion)

등급	Facility Equipment or Use	진동허용기준치[rms]	
		가속도[4-8Hz] (변위)	속도 [8-80Hz]
일반적인 진동환경	일반 작업장	72dB [4cm/s <sup>2</sup> ] (16μz/m)	800μm/s
	사무실	65dB [2cm/s <sup>2</sup> ] (8μm)	400μm/s
	거주지 및 computer system	60dB [1cm/s <sup>2</sup> ] (4μm)	200μm/s
	100X 현미경, 로봇 수술실, Operators room, 일반 연구실 기타	55dB [0.5cm/s <sup>2</sup> ] (2μm)	100μm/s
정밀진동 Class : A	400X 현미경, 측정실 Optical or Other Balance Optical Comparators, 전자장비, 생산 설비 등 *검사, Probe Test, 생산 지원설비 및 장비	0.25cm/s <sup>2</sup> (1μm)	50μm/s
정밀진동 Class : B	400X 이상 현미경, 정밀 안과, 신경계수술실 방진설비 갖춘 광학장비, 반도체 생산설비 등 *Aligner, Stepper 등 3 μm 이상 선평노광장치	0.13cm/s <sup>2</sup> (0.5μm)	25μm/s
정밀진동 Class : C	3000X 전자현미경, Magnetic Resonance Imagers, 반도체 생산설비 *Aligner Steppers 등 1 μm 선평노광장치	0.06cm/s <sup>2</sup> (0.25μm)	12μm/s
정밀진동 Class : D	3000X 이상 전자현미경, Mass Spectrometer 세포이식 장치, 반도체 생산설비 *Aligner Steppers 등 0.5μm 선평노광장치	0.03cm/s <sup>2</sup> (0.12μm)	6μm/s
정밀진동 Class : E	Unisolated laser and Optical research System *Aligner Steppers 등 0.25μm 선평노광장치 => 64M DRAM 정도	0.015cm/s <sup>2</sup> (0.06μm)	3μm/s

한 연구는 반도체 산업이 발전한 1980~90년대 경에 전문 반도체 제조장비 및 정밀장비 제작자를 중심으로 장비의 성능 개선을 목적으로 이루어졌다. 이러한 정밀장비에 대한 진동허용규제치 및 진동제어방법은 정확한 정보를 확보하기가 어려운데, 이는 장비 개개의 진동성능시험(vibration test)과 해석을 통하여 구해지는 진동허용규제치가 장비의 구조에 대한 동적 특성과 내진 및 방진기술을 내포하고 있어 기술의 유출이 우려되기 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 알려져 있는 정밀장비 관련 진동기준은 초기 반도체 산업을 주도한 미국의 Beranek, Newman, Ungar 등에 의해서 정리된 표 7의 'BBN criterion'으로서 정밀장비의 용도나 성능별로 진동허용규제치를 제시하고 있다.

이러한 정밀장비 중 진동에 민감하면서 운영 중 진동을 유발시키는 장비의 경우에는 BBN Criterion이나 장비사별 진동허용규제치 외에 특별히 기초를 포함한 하부 구조물의 동강성 허용기준을 마련하여 운영 중 장비자체에서 발생하는 진동에 의해 문제가 발생하지 않도록 하고 있다.

### 3. 계측에 의한 진동영향평가 사례

완공된 후 또는 이미 사용 중인 구조물에서 진동과 관련한 문제가 발생한 경우 먼저 계측을 통해 현재 발생하고 있는 진동이 허용진동기준을 만족하는지 여부를 살펴보게 된다. 이 때 진동원의 종류와 특성, 진동문제가 발생한 구조물의 용도 등에 따라 적절한 허용진동기준과 계측방법을 결정하여 적용하는 것이 중요하다. 본 장에서는 풍진동에 의한 고층빌딩 진동문제, 기계진동에 의한 공장건물 내 사무공간의 진동문제를 검토한 사례를 소개하고 계측에 사용된 계측시스템을 소개하였다.

#### 3.1 진동영향평가에 사용된 계측시스템

GS건설에서는 진동관련 문제를 미연에 방지하고 관련 민원발생 시 합리적인 대응을 위해 다목적 진동제어시스템 V-Con에 관한 연구를 수행해 왔으며 계측과 관련하여 그림 6, 표 8과 같은 계측시스템을 구축하였으며, 이를 이

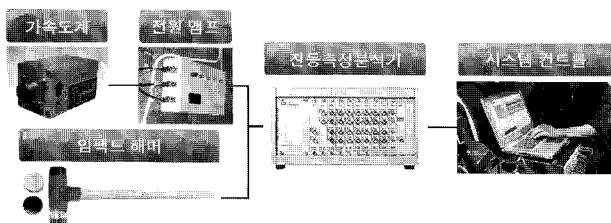
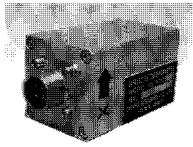
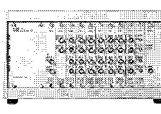



그림 6 진동영향평가에 사용된 계측시스템

표 8 계측시스템의 제원

장비	제작자 & 형식	제원
 가속도계	동경측진, AS-2500, 일본	<ul style="list-style-type: none"> <li>타입 : 서보형</li> <li>보유현황 : 33 채널</li> <li>측정주파수범위 : 0.0~400Hz</li> <li>측정진동범위 : 0.001gal ~1960gal</li> <li>전력공급을 위한 파워앰프 필요</li> </ul>
 진동측정분석기	LMS, SCADASIII 310, 벨기에	<ul style="list-style-type: none"> <li>측정채널 : 최대 32채널 (40채널까지 확장가능)</li> <li>Data 측정속도 : 200kHz/채널</li> <li>Data 송신속도 : 6MB/s</li> <li>Data Resolution : 106dB (1024)</li> </ul>
 임팩트 해머	PCB, 086D50, 미국	<ul style="list-style-type: none"> <li>가진력 : ± 22,240 N</li> <li>가진 주파수 : 0~250Hz (Super Soft Tip) 0~750Hz(Hard Tip)</li> </ul>

용하여 다양한 경우의 진동영향평가를 수행하였다.

#### 3.2 풍진동에 의한 고층건물의 진동영향 평가

대상구조물은 지하 1층, 지상 19층 규모의 철골건물로서 초속 27m/sec의 태풍 때 사용자들이 진동을 감지하는 진동문제가 발생하여 이에 대해 검토한 사례이다.

##### 3.2.1 풍진동 검토 방법

풍하중에 의해 발생하는 구조물의 수평방향 진동수준을 결정하는 방법에는 진동을 직접 계측하는 실측방법과 풍동실험 및 이론적 방법에 의한 예측방법이 있다. 이 중에서 실측을 통해 구조물에 발생하는 진동수준을 결정하는 것이 가장 정확한 방법이지만 건물에 상시계측 시스템이 갖춰져 있지 않다면 실제 문제가 되는 강풍이 발생하는 순간의 건물응답을 계측하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 풍동실험이나 이론적/해석적 방법에 의해 일정한 크기의 바람이 불었을 때의 진동수준을 예측하는 방법이 많이 사용된다. 풍동실험의 경우 비교적 정확한 결과예측이 가능한 반면 실험을 위한 준비시간과 실험비용이 많이 소요되므로 어떠한 경우에 풍동실험을 수행할 것인지를 결정하는 것이 중요하다. 풍동실험을 하지 않을 경우 Spectral Modal Analysis에 의한 이론적 방법에 의해 건물 상층부에서의 진동레벨을 예측하고, 이를 진동기준과 비교하여 사용성 평가를 수행하게 된다. 이론적 방법으로 진동레벨을 예측할 경우 고유진동수, 댐핑, 모드형상과 같은 구조

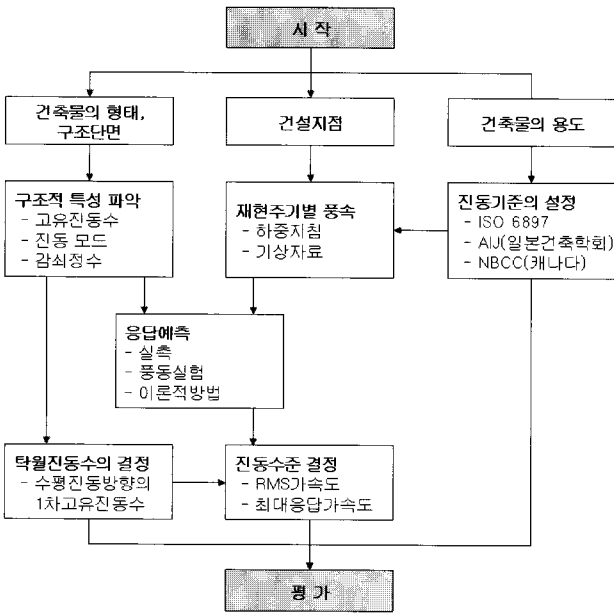


그림 7 풍하중에 의한 진동검토 절차

물의 동특성이 중요한 변수가 되며, 여러 연구를 통해 이를 산정할 수 있는 간략식이나 가정조건 등이 제시되어 있으나 보다 정확한 결과를 예측하기 위해서는 구조물의 진동계측을 통해 고유진동수, 댐핑, 모드형상을 결정하는 것이 바람직하다.

대상구조물의 진동검토에 사용된 절차는 그림 7과 같다.

### 3.2.2 건물의 동특성 계측

일반적으로 구조물의 수평 축방향 고유진동수만을 파악할 경우에는 최상층부의 수평방향 가속도만을 측정하면 되지만 본 검토에서는 각 모드별 감쇠율과 모드형상을 파악하여 진동예측에 반영하고자 3층에서 19층까지 2층간격으로 가속도계를 설치하여 층별로 계측을 수행하였다.

가속도 측정결과로부터 대상구조물의 각 수평축방향 고유진동수와 감쇠율을 분석한 결과가 표 9와 같고 각각의 모드형상은 그림 8과 같다. 풍하중에 의한 진동은 주로 주파수 대역 1Hz미만의 1차 모드 진동성분에 의해 발생하므로 본 검토에서는 표 9의 각 수평방향 1차 모드에 대한 고유진동수 및 감쇠율을 이론적 방법에 의한 진동예측에 사용하였다. 또한, 1차 모드 변형형상을  $(Z/H)^\beta$ 의 형태로 가정하여 진동예측에 사용하게 되는데 본 검토에서는 계측에 의한 모드형상을 검

표 9 구조물의 동특성 파악

모드	수평 X축 방향		수평 Y축 방향		비틀림 방향	
	고유진동수 (Hz)	감쇠율 (%)	고유진동수 (Hz)	감쇠율 (%)	고유진동수 (Hz)	감쇠율 (%)
1차	0.50	1.77	0.55	1.83	1.01	0.56
2차	2.31	1.65	2.00	1.35	2.66	1.56
3차	4.35	0.62	3.95	1.19	5.09	0.70

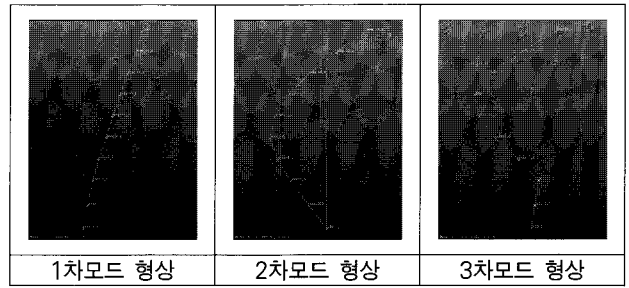
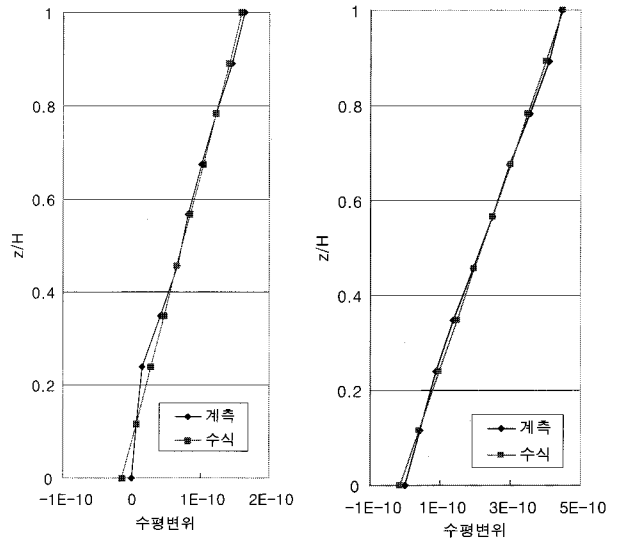


그림 8 수평 X축방향 모드형상



(a) 수평 X축 방향

(b) 수평 Y축 방향

그림 9 계측에 의한 모드형상과 가정에 의한 모드형상 비교

토하여  $\beta$ 를 1.0으로 적용하였다. 이 때 계측에 의한 모드형상과 가정에 의한 모드형상을 그림 9에 비교하였다.

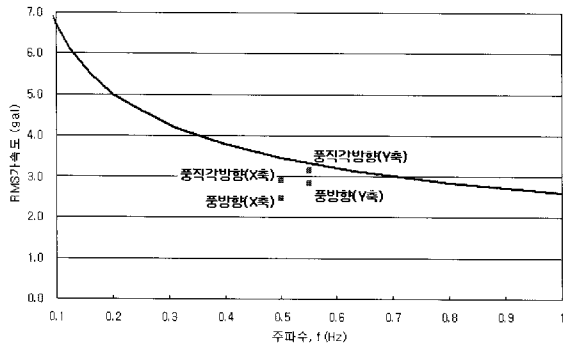
### 3.2.3 풍하중에 대한 사용성 검토 결과

#### (1) ISO 기준에 의한 평가

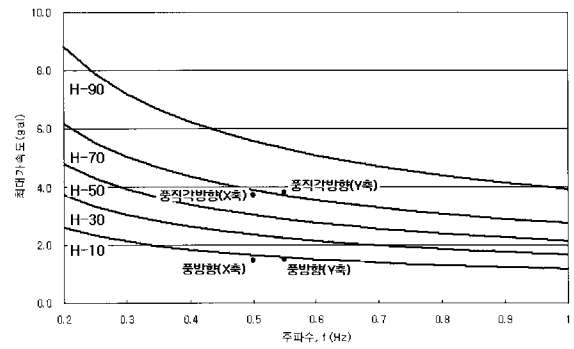
풍방향 RMS 가속도는 대한건축학회의 “건축물 하중기준 및 해설”에 제시된 변동변위에 관한 식으로 산정하였으며 풍직각방향은 Saunders와 Melbourne이 제안한 모드 일반화 하중스펙트럼법을 사용하여 산정하였다. 계측결과로부터 산정된 감쇠율(각 수평방향별로 1.77%, 1.83%)을 적용하여 산정된 가속도를 ISO기준과 비교한 결과를 그림 10에 나타내었다.

#### (2) 일본건축학회 기준에 의한 평가

일본건축학회의 “건축물하중지침 및 동해설(2004)”에 제시된 풍하중에 의한 풍방향 및 풍직각방향 최대가속도 산정방법을 이용하여 재현주기 1년 풍속에 대한 최대가속도를 산정하였으며 이를 일본건축학회 기준과 비교한 결과를 그림 10에 정리하였다.



(a) ISO기준에 의한 사용성 평가



(b) 일본건축학회기준에 의한 사용성 평가

그림 10 풍진동에 의한 사용성 평가 결과

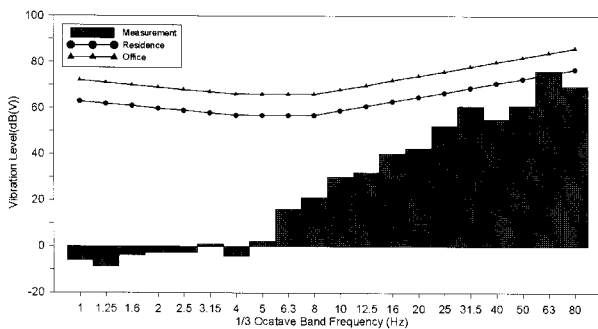
### 3.3 기계진동에 의한 공장건물의 진동영향 평가

#### 3.3.1 환경부 기준에 의한 진동사용성 평가

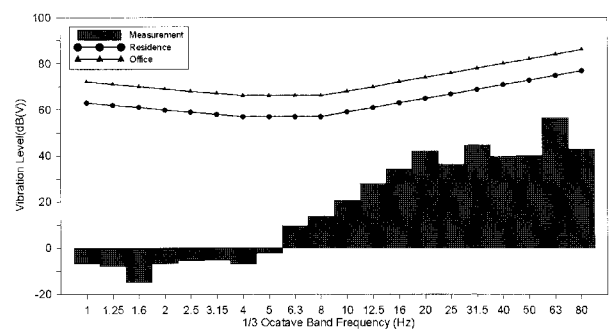
대상구조물은 공장 내 유틸리티동 건물로서 건물 내 1층에 설치된 총 8기의 컴프레서 중 1기가 과도한 진동을 유발시키는 진동문제가 발생하여 이를 검토하였다. 1층에는 공장의 Control Room이 있고, 2층에는 설비팀 사무실이 있으므로 각각의 용도에 맞는 진동허용기준의 적용이 필요하다. 사람이 상주하여 업무를 수행하게 될 컨트롤룸과 2층의 사무실 공간에서 측정한 진동가속도 레벨을 환경부 기준의 소음진동규제법상 생활진동기준과 비교하여 진동사용성을 평가하였다. 측정된 결과는 각각보정치를 이용해 보정한 후 합산하여 Overall값을 산정하였다.

표 10 정상상황에서의 진동레벨 비교(환경부 기준)

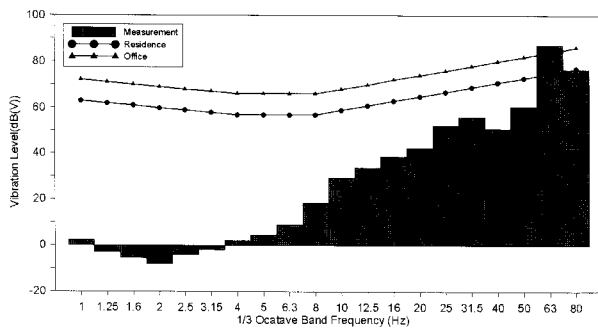
위치	정상상황(dB(V))		가동상황(dB(V))			
	진동레벨	진동기준	비교결과	진동레벨	진동기준	비교결과
컨트롤룸 #1	53.0	65	O.K	66.5	65	N.G
컨트롤룸 #2	59.4		O.K	69.4		N.G
컨트롤룸 #3	59.7		O.K	71.0		N.G
컨트롤룸 #4	51.5		O.K	62.7		O.K
컨트롤룸 #5	47.7		O.K	62.4		O.K
컨트롤룸 #6	43.3		O.K	55.0		O.K
컨트롤룸 하부	64.3		O.K	75.3		N.G
2층사무실 #1	41.4		O.K	45.9		O.K
2층사무실 #2	42.8		O.K	51.2		O.K
2층사무실 #3	44.0		O.K	47.2		O.K



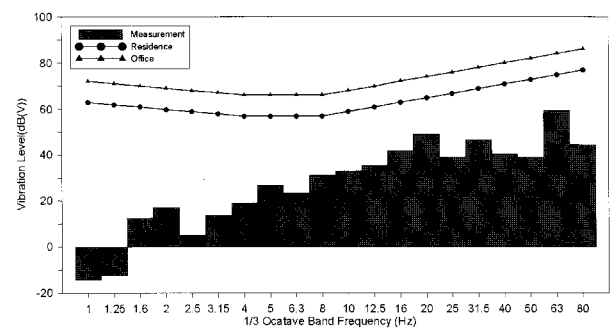
컨트롤룸 (정상상황)



2층 사무실 #1 (정상상황)



컨트롤룸 (가동상황)



2층 사무실 #1 (가동상황)

그림 11 정상상황에서의 진동레벨 비교(ISO기준)

표 10은 문제가 된 컴프레서를 작동시키지 않은 정상상황에서의 진동레벨과 문제가 된 컴프레서를 작동시킨 가동상황에서의 진동레벨을 비교한 것이다. 정상상황에서는 모든 측정위치에서 진동허용기준을 만족하지만 가동상황에서는 컨트롤룸 액세스 플로어 일부구간에서 진동허용기준을 상회하는 진동레벨이 발생한다.

### 3.3.2 ISO 기준에 의한 진동사용성 평가

사람이 상주하여 업무를 수행하게 될 컨트롤룸과 2층의 사무실 공간에서 계측한 진동가속도 레벨을 ISO기준의 사무실 및 주거지역 기준과 비교하여 진동사용성 평가를 수행하였다. 측정된 결과는 1/3 Octave Band로 분석하여 각 주파수별로 ISO기준과 비교하였다.

그림 11은 정상상황과 가동상황에서의 진동레벨을 비교한 것이며 환경부 기준과 마찬가지로 정상상황에서는 사무실 진동허용기준을 만족시키고 있으나, 가동상황에서는 컨트롤룸 액세스 플로어 구간 4개소에서 사무실 진동허용기준을 상회하는 진동레벨이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

## 4. 해석에 의한 진동 예측

설계 시 또는 시공 중에 있는 구조물의 경우 계측을 통해 직접 진동레벨을 확인해 볼 수 없으므로 해석적인 방법을 통해 완공 후 진동레벨을 예측 한 후 이를 진동허용기준과 비교하게 된다. 진동레벨은 식 (1)과 같이 계산되므로 예측의 정확성은 구조물의 동특성과 진동원을 얼마나 현실적으로 추정하는가에 좌우된다.

$$\{R(\omega)\} = [H(\omega)] \times \{F(\omega)\} \quad (1)$$

여기서,  $\{R(\omega)\}$ 은 진동레벨,  $[H(\omega)]$ 는 구조물의 시스템 특성,  $\{F(\omega)\}$ 는 진동원의 크기이다. 본 장에서는 진동원 산정과 구조물 동특성 추정에 관한 내용과 사례를 살펴보고, 해석에 의한 동특성 추정의 정확도를 향상시키기 위해 계측결과를 기반으로 해석모델을 개선하는 Correlation & Update 기술에 관해 소개하고자 한다.

### 4.1 진동원 산정(Force Identification)

해석에 의해 진동을 예측하는 과정에 있어서 진동원을 정확하게 산정하는 것이 가장 복잡한 과정이라 할 수 있다. 이는 진동문제에 있어서 진동을 유발하는 인자가 단일하게 존재하는 경우보다는 다수의 진동원이 복합적으로 존재하는 경우가 많고 또 주요한 진동원을 파악했다 하더라도 현장 상황 상 진동의 크기를 직접적으로 측정하기 어려운 경우가 많기 때문이다. 직접 측정의 경우 진동원이 이동하지 않고 진동원이 명확한 경로를 통해 구조물과 연결되어 있으며 연결부 사이에 동하중을 측정할 수 있는 Force Transducer를 설치할 수 있는 상태일 때 적용가능한 방법이다. 이러한 조건을 만족시키는 경우가 많지 않으므로 일반적으로 진동원을 평가할 때에는 역행렬(Inverse Matrix) 기법이나 동강성(Dynamic Stiffness) 기법과 같은 간접측정 방법을 이용하는 경우가 많다.

#### (1) 역행렬(Inverse Matrix) 기법

역행렬 기법은 하중을 측정하고자 하는 위치와 그 외에 몇 개의 위치에서 진동응답을 계측하고 하중을 측정하고자 하는 위치와 그 외의 위치와의 FRF(Frequency Response Function)을 이용하여 행렬계산을 통해 간접적으로 하중을 계산하는 방법이다. 그림 12와 같이 4개의 서포트로 지지되는 진동원이 있다고 가정하면 진동원이 가동되는 상태에서 하중이 전달되는 서포트 위치에서의 진동  $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3, \ddot{x}_4$ 와 그 외 추가적인 위치에서의 진동  $\ddot{x}_5, \ddot{x}_6$ 을 측정하고 서포트를 가진점으로 한 FRF를 측정한다. 측정된 데이터를 이용하여 식 (2)와 같이 SVD(singular value decomposition)에 의한 inverse matrix 기법으로 서포트 위치에서의 하중,  $F_1, F_2, F_3, F_4$ 를 구하게 된다.

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{11} & \ddot{x}_{12} & \dots & \ddot{x}_{1n} \\ F_1 & F_2 & \dots & F_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{x}_{m1} & \ddot{x}_{m2} & \dots & \ddot{x}_{mn} \\ F_1 & F_2 & \dots & F_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \vdots \\ \ddot{x}_m \end{Bmatrix} \quad (2)$$

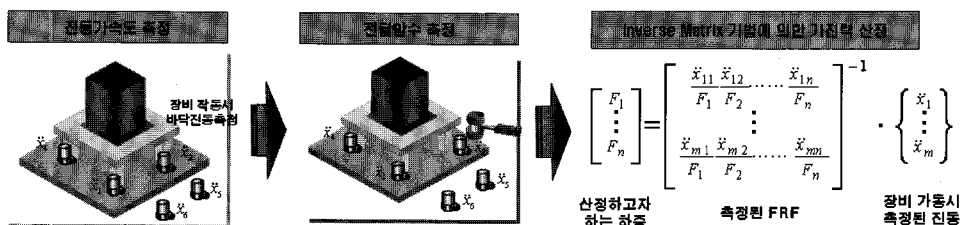


그림 12 역행렬 기법에 의한 진동원 산정



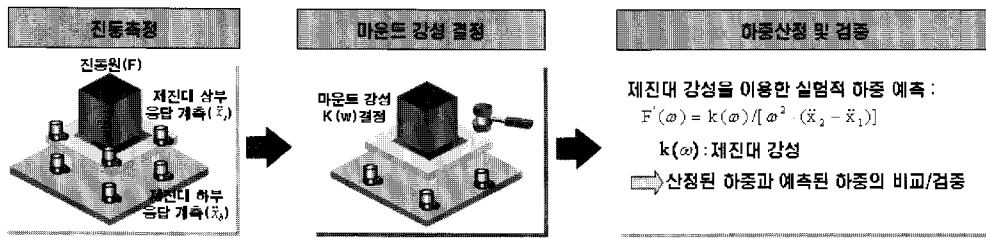


그림 13 동강성 기법에 의한 진동원 산정

여기서,  $\begin{Bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix}$ 은 서포트 위치에서 측정하고자 하는 진동원의 크기,  $\begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{Bmatrix}$ 은 장비 가동시 서포트 위치 및 그 외 추가적인 위치에서 측정된 진동이다.

(2) 동강성(Dynamic Stiffness) 기법

동강성 기법은 진동원과 구조물 사이를 연결해 주는 마운트의 동적 특성을 파악할 수 있을 때 적용할 수 있는 방법으로 아래 식 (3)를 사용하여 산정된다.

$$F(\omega) = K(\omega) \cdot [X_t(\omega) - X_b(\omega)] \quad (3)$$

여기서,  $K(\omega)$ 는 계측 또는 제원을 통해 파악한 마운트의 강성,  $X_t(\omega)$ 와  $X_b(\omega)$ 는 각각 마운트 상부에서 측정된 응답과 하부에서 측정된 응답이다. 그림 13은 동강성 기법에 의한 진동원 산정의 절차를 보여주고 있다.

4.2 구조물의 동특성 추정

구조물의 동특성은 일반적으로 고유진동수, 모드형상, 그리고 모드의 댐핑을 이야기하며 이를 추정하는 해석적, 실험적인 방법들이 많이 제안되어 있다. 이러한 구조물의 동특성은 해석을 통해 향후 발생할 진동레벨을 예측하는데 있어서 정확도를 결정하는 중요한 요소이며 진동제어에 있어서도 제어의 방향과 방법을 결정하기 위해 사용된다. 일례로 진동문제 발생 시 진동이 가장 크게 발생한 주파수 대역에 해당하는 고유진동수와 모드형상으로부터 구조물의 어디를 보강해야 하는지 결정하거나 모드의 댐핑을 조절하여 진동을 감쇠시키는 방법을 결정할 때 중요한 자료로 활용된다. 본 기사에서는 실제 구조물에 대해 해석적인 방법과 실험적인 방법으로 구조물의 동특성을 추정 한 사례를 살펴보고 해석을 통해 구조물의 동특성을 추정할 때 실험적인 방법과 연계하여 그 정확도를 보다 향상시킬 수 있는 기술에 대해 소개하고자 한다.

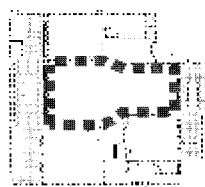
4.2.1 계측과 해석에 의한 동특성 추정 사례

동특성 추정에 사용된 건물은 GS건설 용인기술연구소 내 주거환경 실험동이며 그림 14와 같다. 아파트간 층간소음, 실내공기환경, 친환경 에너지 연구를 위해 실제 Xi아파트 구조와 동일하게 3층 5개 세대로 건축된 RC건물로 2개의 라멘구조와 3개의 벽식구조로 이루어져 있다.

동특성 추정은 해석적인 방법과 실험적인 방법으로 3층 벽식구조 세대의 거실과 부엌의 바닥판에 대해 이루어졌다. 먼저 실험적 방법은 임팩트 해머에 의한 가진으로 Modal



그림 14 GS건설 용인기술연구소 주거환경 실험동



(a) 계측위치



(b) 가속도계 배치

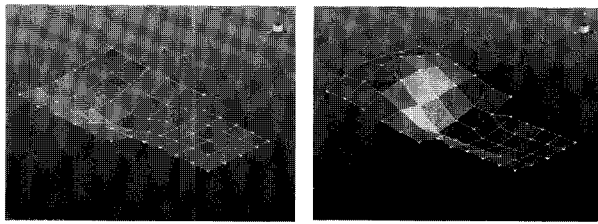


(c) 가속도계 설치모습

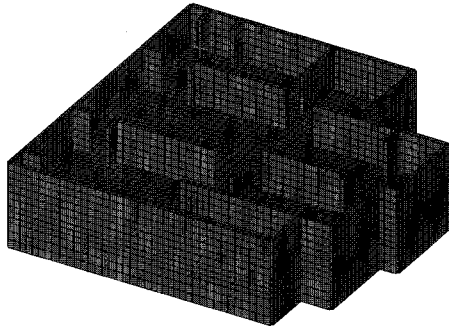


(d) 모달 테스트 수행

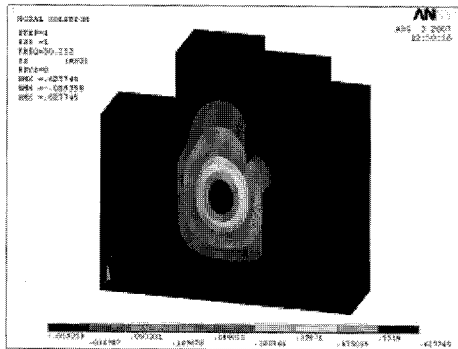
그림 15 동특성 추정 실험 모습



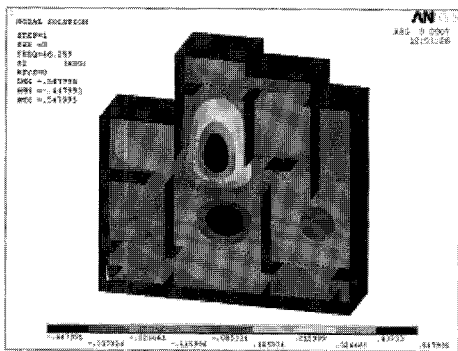
(a) 1차모드, 20.9Hz (b) 2차모드, 31.9Hz  
그림 16 실험에 의한 동특성 추정 결과



(a) 해석모델



(b) 1차모드, 22.0Hz



(c) 2차모드, 33.9Hz

그림 17 동특성 추정 해석모델 및 해석결과

Testing을 수행하고 LMS의 분석 프로그램인 Test.LAB의 Modal Analysis 모듈을 이용하여 계측결과를 분석하였다. 측정은 거실의 경우 36개소(가로 6개, 세로 6개)에서 가속도를 측정하고 부엌의 경우 25개소(가로 5개, 세로 5개)에서 가속도를 측정하였다. 가속도계는 몰탈 등의 마감재없이 바

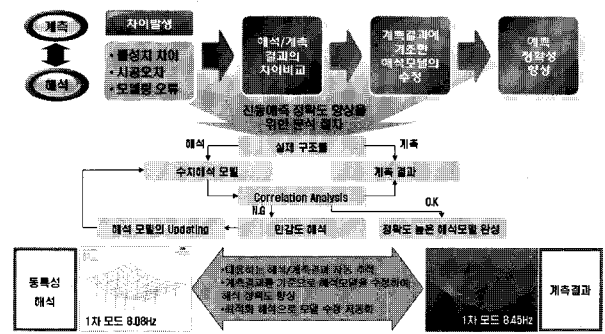


그림 18 계측-해석 연계에 의한 해석 정확도 향상

로 RC슬래브 위에 설치되었다. 그림 15는 계측이 수행된 위치와 계측 모습을 보여주고 있다. Modal Analysis에 의해 구조물의 고유진동수와 모드형상을 추정하였으며 1차 모드는 20.9Hz에서 2차 모드는 31.9Hz에서 발생하였고 모드형상은 그림 16과 같다.

다음은 해석적인 방법을 통해 구조물의 동특성을 추정 한 것으로 해석에 사용된 프로그램은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS11이며 벽식구조의 효율적인 모형화를 위해 shell 요소가 사용되었다. 경계조건의 영향을 최소화하기 위해 그림 17과 같이 세대 전체를 모형화하였으며 해석결과 1차모드는 22.0Hz, 2차모드는 33.9Hz로 나타났고 모드형상은 그림 17과 같다.

#### 4.2.2 계측-해석 연계에 의한 동특성 추정

실제 진동에 관련된 문제를 해결하기 위해서는 계측, 해석, 영향평가, 제어기술과 같은 다양한 기술이 복합적으로 연계된 Total Engineering Solution이 필요하게 된다. 계측과 해석에 의한 구조물의 동특성 추정은 설계/시공 중인 구조물의 진동레벨의 예측뿐만 아니라 진동제어의 방향 및 방법을 결정하고 진동제어대책의 효과를 평가하는 과정에 필수적으로 사용되며, 그 정확도를 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 특히, 해석에 의한 동특성 추정은 설계/시공단계에서 진동영향평거나 진동제어를 수행할 때 그리고 진동제어를 수행한 후 그 효과를 평가할 때와 같이 계측할 수 있는 구조물이 아직 존재하지 않을 경우에도 적용할 수 있다. 다만 해석에 의해 동특성을 추정하게 될 경우 실제 구조물과의 물성치 차이, 시공오차에 의한 치수 차이 등의 문제로 정확한 예측이 어려운 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위해 사용되는 기술이 그림 18과 같이 실제 계측결과를 기초로 정확한 해석이 가능하도록 해석모델을 수정하는 Correlation & Update기법이며, GS건설에서는 다목적 진동제어시스템(V-Con) 구축을 위해 관련 연구를 진행하였다. 실제 해석결과와 계측결과를 비교할

때에는 단순히 고유진동수가 유사한 모드가 동일한 모드라고 보기 어려우며 모드형상의 유사성을 기초로 동일 모드를 찾아야 한다. 구조물이 복잡하고 모드의 수가 많을 경우 이를 인력을 하는 것은 매우 시간소모적이고 오류가 포함되기 쉽다. 따라서, 해석/계측 결과를 기하학적인 보정하여 모드형상의 MAC값을 계산하고, 이를 통해 대응하는 모드를 찾은 후 고유진동수 상에 발생한 오차를 보정하기 위해 민감도 해석을 통해 물성치, Beam요소의 단면계수, Shell요소의 두께 등과 같은 영향인자 가운데 가장 큰 영향을 미치는 인자를 결정하고, 이 영향인자를 기초로 최적화해석을 수행하여 정확한 모델을 구성하는 기술이다. 이와 같이 해석결과와 계측결과를 모두 활용하여 동특성을 추정하므로써 정확성을 향상시키고 또한 다양한 방법으로 활용이 가능하다.

## 5. 결 론

본 기사에서는 최근 들어 관심이 높아지고 있는 진동문제에 대응하기 위한 가장 기본적인 단계인 진동영향평가 기술을 소개하였다. 실제로 의미있는 진동영향평가를 위해서는 현장상황에 따라 계측 및 해석과 관련된 다양한 기술을 효과적으로 조합하여 사용하여야 하며, 다양한 진동

제어기준에서 요구하는 계측 및 분석방법에 맞게 진행이 되어야 한다. 현재까지는 국내에서 진행되는 진동영향평가는 단순한 일회성 평가에 그치는 경우가 많지만 영향평가 결과를 향후 검증한 후 D/B화하고, 해석 및 계측의 정확도를 높이기 위한 지속적인 연구가 뒷받침된다면 예측하기 어려운 진동문제에 대해서 보다 이론적이고 체계적인 접근이 가능할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 환경부, "2007 소음·진동관리시책 시도별 추진실적 평가", 2008. 9, pp. 3~6
2. Ewins, D. J., Modal Testing theory, practice and application, 2nd Ed., 2000.
3. Tarantath, B. S., Wind and Earthquake Resistant Buildings, 2005
4. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 2000
5. AIJ, 건축물하중지침 및 동해설, 2004

[ 담당: 윤영철, 편집위원 ]