

# TPA 기법을 이용한 건물 내 설비 동하중 산정

## Estimation of the Dynamic Load of the Utility in Building by TPA Method

정민기† · 김용구\* · 안상경\* · 이상엽\*\* · 이성수\*\*\*

Min-Ki Jeong† · Yong-Ku Kim\* · Sang-Kyung Ahn\* · Sang-Yeop Lee\*\* · Seong-Soo Lee\*\*\*

Key Words : Transfer Path Analysis(전달경로해석), Floor Vibration(바닥진동), Dynamic Load(동하중), FRF(주파수 응답함수)

### ABSTRACT

In this paper, the vibrations of floor systems of which buildings are under construction are studied by experimental and analysis method. The first step is to measure the operational response data and FRF at the supporting points of the utility and the second step is to calculate the dynamic load by TPA Method which provided by LMS VirtualLab System Analysis Module. The dynamics we used to identify is expressed by below equation:

$$\{F_{oper}\} = [H]^{-1} \cdot \{x_{oper}''\}$$

Where, H(Transfer function between position of the force and response) and x(response) are measured by vibration test.

### 1. 서론

최근에는 건물내부 공간의 효율성을 높이기 위하여 건물 바닥 구조시스템이 장스팬화 되고, 고강도 강재, 경량 콘크리트 등 새롭게 개발된 경량자재 사용이 보편화되면서 건물 바닥의 중량이 경량화 되는 추세이다. 이러한 시스템의 변화는 바닥 구조시스템의 고유진동수와 감쇠성능을 저하시키고, 동적강성을 감소시켜 동하중 작용 시 진동응답이 증가하는 특성을 가져왔다. 이러한 진동응답의 증대는 사용자의 거주환경을 악화시키고 필연적으로 진동민원을 유발하게 되므로, 설계단계에서부터 건물 바닥구조에 대한 체계적인 진동검토시스템이 요구된다.

본 논문은 건물 바닥구조의 진동평가를 체계적으로 수행하기 위한 초기단계로, 건물 내 설비 동하중을 산정하기 위하여 TPA(Transfer Path Analysis)기법을 활용하였다. 그리고 실제 현장에서 설비 동하중을 예측하고 검증하여 본 측정기법의 신뢰성을 검토하였으며, 최종적으로 완공단계 건물에서의 냉각탑, 공조기, 송풍기 등의 동하중 측정사례를 제시하였다.

### 2. TPA 기법을 이용한 설비 동하중 산정 방법

#### 2.1 개요

일반적으로 설비 동하중의 경우 Fig. 1과 같이 진동원이 다양하고, 제원 및 구조 또한 복잡하여 각 진동원의 Invariant Force를 산정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 설비 작동 시 바닥구조의 지점에서 측정된 진동데이터와 같은 진동을 발생시키는 Trouble Shooting Force를 설비 동하중으로 가정하고, TPA기법을 활용하여 설비 동하중을 산정하였다.

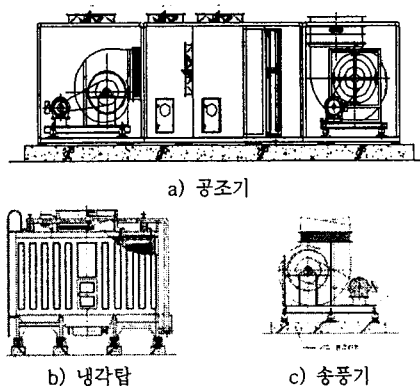


Fig. 1 건물 내 설비 상세 단면

† 교신저자: 정희원, (주)브이테크  
E-mail : jmk4000@vetech.co.kr  
Tel : (031) 783-5651, Fax : (031) 783-5653

\* 삼성물산 건설부문  
\*\* 정희원, LMS Korea  
\*\*\* 군산대학교 건축공학과 부교수

## 2.2 설비 동하중 산정 절차

본 논문의 TPA기법을 활용한 동하중 산정절차를 Fig. 2에서 제시하였다. 우선 Matrix Inverse기법과 Mount Stiffness기법으로 동하중을 산정하고, 검증위치에서 측정된 진동데이터와 TPA에 의해 계산된 진동데이터를 비교하여 산정된 동하중의 신뢰성을 검증하는 절차로 구성되어 있다.

## 2.3 Matrix Inverse 기법

Matrix Inverse기법은 Fig. 3과 같이 모든 하중전달 Path에서 장비 작동시 Operational Data와 미작동시 FRF를 계측하여 식 (1)에 따라 설비 동하중을 산정하는 방법이다. 그리고 식 (2)와 같이 계산된 진동가속도( $\{x_{op\ calculation}\}$ )와 측정된 진동가속도( $\{x_{op\ measure}\}$ )를 비교하여 산정된 설비 동하중의 검증하였다.

$$\{F_{op}\} = [H]^{-1} \cdot \{x_{op\ measure}\} \quad (1)$$

$$\{x_{op\ calculation}\} = [H_{vc}] \cdot \{F_{op}\} \quad (2)$$

여기서,

$\{F_{op}\}$  : 설비 동하중

$[H]^{-1}$  : 하중전달 Path들 간 전달함수의 역행렬

$\{x_{op\ measure}\}$  : 설비 작동시 측정된 진동가속도

$[H_{vc}]$  : 하중전달 Path와 검증위치 사이의 전달함수

$\{x_{op\ calculation}\}$  : 산정된 설비 동하중과 전달함수로부터 계산된 진동가속도

## 2.4 Mount Stiffness 기법

Mount Stiffness기법은 Fig. 4와 같이 설비 마운트 상하부에서 장비 작동 시 Operational Data와 마운트 하부 측정점과 검증점간의 장비 미작동시 FRF를 계측하여, 식 (2)

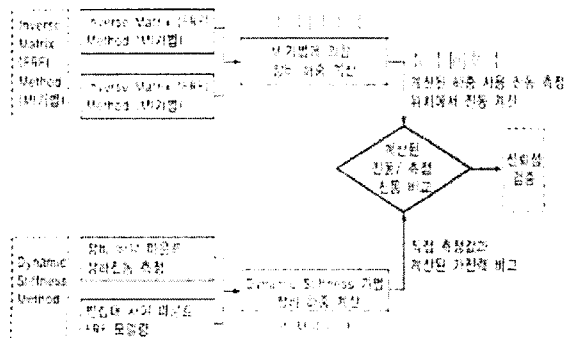


Fig. 2 TPA 기법을 이용한 진동원 산정 절차

에 따라 설비동하중을 산정하는 방법이다. 산정된 동하중은 식 (4)로부터 계산된 진동가속도( $\{x_{op\ calculation}\}$ )와 측정된 진동가속도( $\{x_{op\ measure}\}$ )를 비교하여 검증하였다.

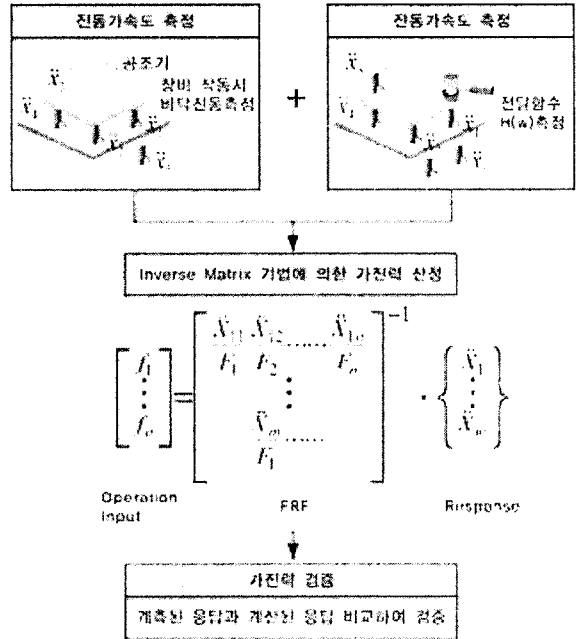


Fig. 3 Matrix Inverse 기법 수행 절차

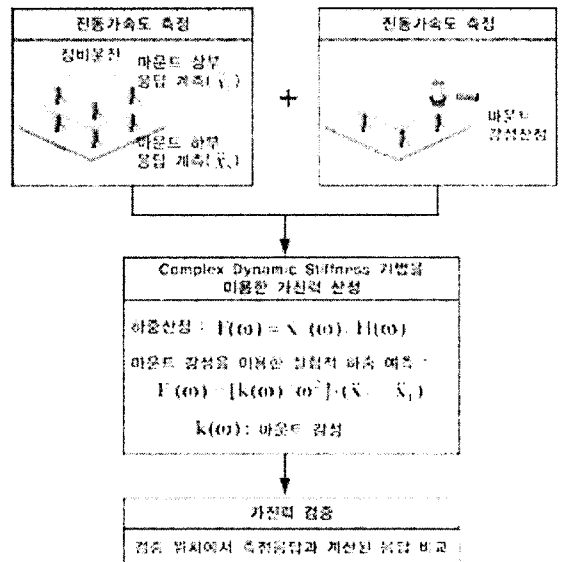


Fig. 4 Mount Stiffness 기법 수행 절차

Table 1 설비 동하중 산정을 위한 진동 측정 내용

동하중 산정방법	진동측정			TPA 기법	
	항목	측정위치	측정신호	동하중 산정	동하중 검증
Force Transducer	Operational Data	하중 전달위치 (지지점)	time	spectrum time	-
Mount Stiffness	Operational Data	모든 마운트 상/하	phase reference spectrum	Spectrum time	· 검증위치에서의 응답 spectrum
		검증위치	time		
	FRF	가진점 : 마운트하부	FRF		
		응답점 : 검증위치	time		
Mount Stiffness	마운트 강성	1/FRF			
Matrix Inverse	Operational Data	하중 전달위치(지지점)	spectrum		· 검증위치에서의 응답 spectrum
		검증위치	time		
	FRF	가진점 : 하중 전달위치	FRF		
		응답점 : 하중전달 & 검증위치	time		

$$\{F_{op}\} = [K/\omega^2] \cdot \{\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2\} \quad (3)$$

$$\{x_{op, calculation}\} = [H_{ve}] \cdot \{F_{op}\} \quad (4)$$

여기서,

$\{F_{op}\}$  : 설비 동하중

$K$  : Mount Stiffness

$\omega$  : Angular Frequency

$\{\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2\}$  : 설비 작동시 마운트 상·하부에서 측정된 진동가속도 차

$[H_{ve}]$  : 하중전달 Path 하부와 검증위치 간의 전달 함수

$\{x_{op, calculation}\}$  : 산정된 설비 동하중과 전달함수로부터 계산된 진동가속도

### 2.5 진동 측정 내용

TPA기법을 이용한 설비 동하중 계측 및 검증을 위한 상세 측정 내용을 Table 1에서 제시하였다. TPA Process의 Input Data로 사용되는 Operational Data와 Output Data인 동하중은 RMS Spectrum Data이다.

## 3. Matrix Inverse 기법의 신뢰성 검토

### 3.1 개요

건물 내 설비들의 경우 하중전달 Path가 다양하여 Mount Stiffness 기법을 적용하기 어려우므로, 본 논문에서는 Matrix Inverse 기법만 고려하였다. 그리고 현장 여건 상 직접 설비 운전 시 동하중을 Force Transducer로 측정하



Fig. 5 건물 내 공조실 Impact Hammer를 이용한 충격하중 재하 전경 및 충격하중 재하 위치

기가 불가능하다.

따라서, 본 논문에서는 공조기 설치된 현장에서 Impact Hammer에 의한 충격하중과 선형모터시스템 운전 시 지지점으로 전달되는 하중을 대상으로 Matrix Inverse 기법의 현장 적용성을 검토하였다. 그리고 Operational Data와 FRF는 LMS TestLab에서 측정하였으며, TPA(Matrix Inverse)는 LMS Cada-X Analysis 모듈에서 수행하였다.

### 3.2 충격하중에 대한 검토

#### 1) 검토 개요

Impact Hammer의 충격하중을 이용한 본 기법의 검토는 Fig. 5와 같이 고층 건물 내 공조실에서 수행하였다. 공조기는 PO Mat위에 콘크리트 베드위에 설치되어 있는 현상이다. 하중재하는 8개 측정위치 중 4개소(P5~P8)에 충격하중을 가하였다. 자세한 측정위치는 Fig. 6에서 제시하였으며, 하중을 재하한 4개소에서 계측된 동하중과 산정된 동하중을 다음에서 비교하였다.

#### 2) 검토 결과

충격하중에 대한 검토는 Force Transducer와 Matrix Inverse기법으로 구한 Time Data에 대하여 수행되었다.

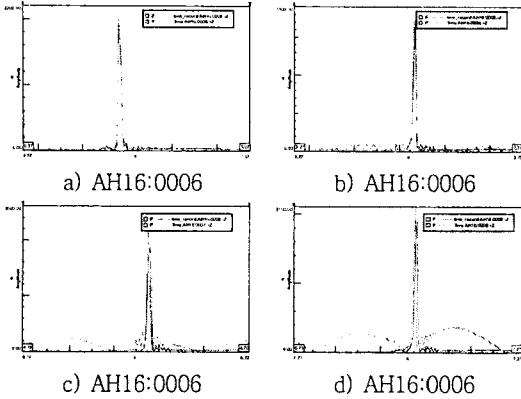


Fig. 6 충격하중 검토 결과 - Time Data 비교

Table 2 충격하중 검토 결과 - RMS 검토

측정위치	충격하중(N)		차이(%)
	Force Transducer	Matrix Inverse	
AH16:0005	1,020	1,037	1.6
AH16:0006	983	983	0.1
AH16:0007	1,029	1,057	2.8
AH16:0008	1,101	1,087	1.3

Fig. 6은 두 가지 방법으로 구한 충격하중 Time Data를 측정위치별로 도시한 것이며, 충격하중이 작용된 0.2초간의 RMS를 Table 2에서 제시하였다.

P7, P8 위치에서 time delay가 조금 있지만 대략적인 Time Data의 Envelope은 비슷하며, RMS값의 차이는 최대 3% 이내이다.

### 3.3 연속하중에 대한 검토

#### 1) 검토 개요

연속하중에 대한 적용성 검토는 Force Transducer로 건물 내 설비 동하중 측정이 어려워 Mover가 연속적으로 수평운동을 하는 선형모터시스템을 대상으로 하였다.

우선, Force Transducer를 선형모터시스템 하부에 설치하여, Matrix Inverse 기법으로 구한 지지점 4개소에 작용하는 하중과 Force Transducer에서 측정한 Time 및 Spectrum Data를 비교하였다. Fig. 7에서 상세한 측정현황을 도시하였다.

#### 2) 검토결과

연속하중에 대한 검토 결과는 Spectrum data로 Fig. 8에서 도시하였으며, 동하중 Spectrum에서 주된 주파수 성분인 0~30Hz까지의 RMS를 Table 3에서 제시하였다.

측정 동하중과 산정된 동하중 사이의 차이는 1.6~10.7%이며, 충격하중의 검토결과보다 약간 차이가 큰 것으로 검토되었다.

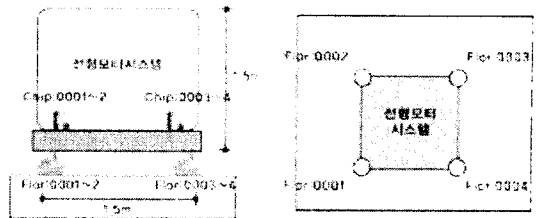


Fig. 7 선형모터시스템 하중 측정 현황

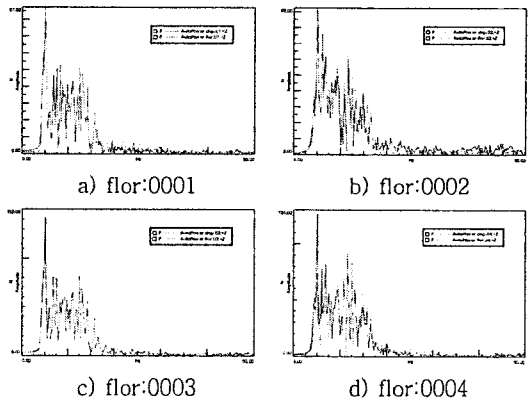


Fig. 8 연속하중 검토 결과

Table 3 연속하중 검토 결과 - RMS 검토

측정위치	충격하중(N)		차이(%)
	Force Transducer	Matrix Inverse	
chip1	227	221	2.8
chip2	262	266	1.5
chip3	356	318	10.7
chip4	334	315	5.6

### 3.4 검토 결과




이상에서 Matrix Inverse 기법의 신뢰성을 충격하중과 연속하중을 중심으로 검토해 보았다. 충격하중에 대해서는 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었지만, 연속하중에 대해서는 측정된 Operational Data와 FRF의 Quality에 따라 측정 위치별로 산정된 동하중의 정확도가 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 Matrix Inverse 기법으로 신뢰성 있는 설비 동하중을 산정하기 위해서는 신뢰성 있는 측정데이터, 특히 정확한 FRF가 요구된다.

## 4. 건물 내 설비 동하중 산정을 통한 현장 적용성 검토

### 4.1 개요

본 장에서는 이상에서 설명한 TPA 기법에 의한 건물 내 설비 동하중 산정 방법으로 건물 내 주요 설비(냉각탑, 공기기, 송풍기)의 동하중을 산정해 보았다. 대상설비들의 자세

Table 4 동하중 산정 대상

설비명	냉각탑	공조기	송풍기
전경			
설치위치	옥상	6층 공조실	B4
종류	압입송풍(밀폐)	UFAS	시로코팬
용량	143RT	784cmm	767cmm
운전중량	7.7ton	2~3ton	1.1ton
진동원	팬, 모터, 펌프	SF, 모터	팬, 모터
RPM	315, 1750, -	964, 1750	242, 1130
방진	2' 스프링	네오프렌패드	2' 스프링

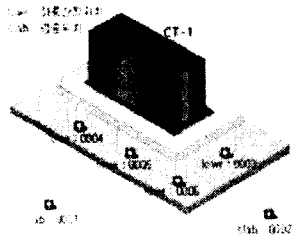
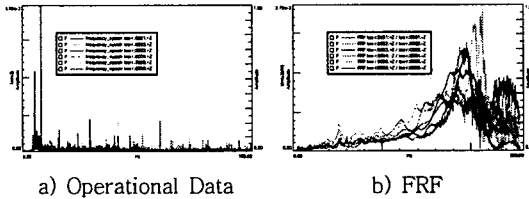
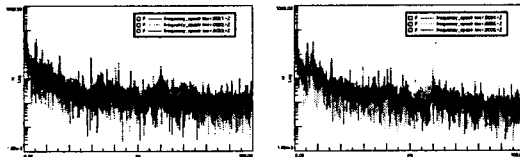


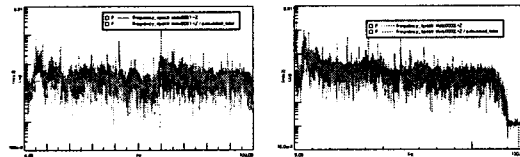
Fig. 9 냉각탑 측정위치



a) Operational Data      b) FRF  
Fig. 10 냉각탑 진동측정결과



(a) Slab:0001      (a) Slab:0002  
Fig. 11 냉각탑 동하중 산정결과



(a) Slab:0001      (a) Slab:0002  
Fig. 12 냉각탑 동하중 검증결과

Table 5 산정된 냉각탑 검증 결과

구분	O.A rms(dB)	
	Slab:0001	Slab:0002
측정	44.7	42.2
계산	44.9	44.3

한 사양은 Table 4에서 제시하였다.

## 4.2 냉각탑

### 1) 진동 측정

냉각탑 스프링 마운트 하부 6개소에 동하중 산정 목적으로, 나머지 2개소에 산정하중 검증 목적으로 가속도계를 설치하고, LMS TestLab에서 측정을 수행하였다. 그리고 측정된 Operational Data(Spectrum,  $\Delta f=1/32\text{Hz}$ )와 FRF( $\Delta f=0.25\text{Hz}$ )를 Fig. 10에서 도시하였다.

### 2) 동하중 산정 및 검증

TPA Process는 LMS CADA-X TPA 모듈에서 Matrix Inverse방법으로 수행하였으며, 산정된 동하중을 Fig. 11에서 제시하였다. 산정된 동하중에 대한 검증은 하중산정에 사용된 측정위치인 Slab:0001, Slab:0002 2개소를 대상으로 Fig. 12와 같이 측정응답과 계산응답을 비교하였다. Table 5에서 OA값을 비교한 것으로 두 값의 차이가 2dB 이내로 나타났다.

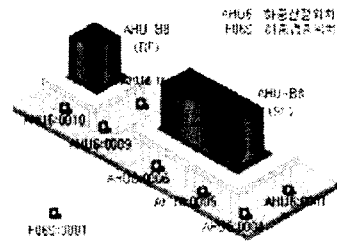
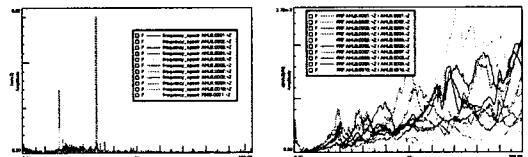
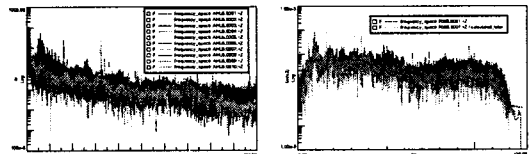


Fig. 13 공조기 측정위치



a) Operational Data      b) FRF  
Fig. 14 공조기 진동측정결과



a) 공조기 동하중      b) 동하중 검증  
Fig. 15 동하중 산정결과 및 검증

Table 6 산정된 공조기 검증 결과

검증위치	구분	O.A rms(dB)
	F06S:0001	측정
계산		23.1

### 4.3 공조기

#### 1) 진동 측정

공조기 지지점 10개소에 동하중 산정 목적으로, 나머지 1개소에 산정하중 검증 목적으로 가속도계를 설치하였으며, 측정결과는 Fig. 14에서 도시하였다.

#### 2) 동하중 산정 및 검증

산정된 공조기 동하중과 검증결과를 Fig. 15에서 도시하였으며, 검증 결과 두 값의 차이가 3dB 정도로 나타났다.

### 4.4 송풍기

#### 1) 진동 측정

송풍기 스프링 마운트 6개소에 동하중 산정 목적으로, 나머지 2개소에 산정하중 검증 목적으로 가속도계를 설치하였으며, 측정결과는 Fig. 17에서 도시하였다.

#### 2) 동하중 산정 및 검증

산정된 송풍기 동하중과 검증결과를 Fig. 18에서 도시하였으며, 검증 결과 두 값의 차이가 3dB 이내로 나타났다.

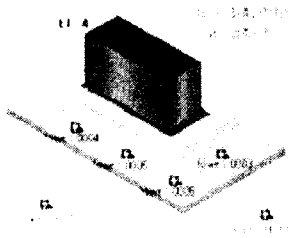
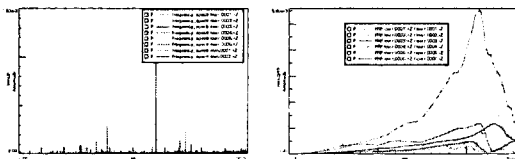


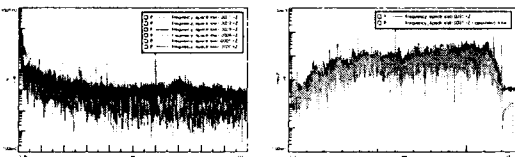
Fig. 16 송풍기 측정위치



a) Operational Data

b) FRF

Fig. 17 송풍기 진동측정결과



a) 송풍기 동하중

b) 동하중 검증

Fig. 18 동하중 산정결과 및 검증

Table 7 산정된 송풍기 검증 결과

구분	O.A rms(dB)	
	Slab:0001	Slab:0002
측정	34.6	33.1
계산	33.2	31.0

### 4.5 검토 결과

이상에서 TPA 기법을 이용한 건물 내 주요 설비에 대한 동하중 산정 및 검증결과 측정데이터의 수준을 높인다면 실제 현장에서 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이상에서 TPA 기법을 이용하여 건물 내 설비 동하중을 산정하는 소개하고 산정 기법의 신뢰성 및 현장 적용을 검토한 결과는 다음과 같다.

(1) 실제 건물 내 주요 설비들에 대한 동하중 산정 및 검증하여 본 기법의 현장 적용성을 최초로 검토해 보았다.

(2) TPA 기법을 이용하여 계산된 충격하중과 실제 측정데이터와 비교하여 신뢰성 검증하였으며, 시간영역에서 3%이내의 오차 범위내에서 예측하였다.

(3) TPA 기법을 이용한 실제 건물 내 주요 설비에 대한 동하중 산정 및 검증결과 측정 응답과 계산 응답이 3dB 이내의 오차로 정확하게 예측할 수 있었다. 따라서, 본 기법을 이용하여 실제 현장에서 충분히 적용 가능하였다.

(4) 건물 내 설비 동하중 이외에 파일 향타, 보행하중, 일반 산업체에서 발생 가능한 진동문제에 효과적으로 해결할 수 있다.

## 후 기

본 논문은 삼성건설의 “진동계측 시스템 구축을 통한 바닥진동 성능확보”과제의 일환으로 수행된 내용을 요약한 것이다.

본 기법을 이용하여 좀 더 정확한 동하중을 산정하기 위해서는 질 높은 측정데이터가 요구되며, 효과적인 진동대책을 수립하기 위해서는 해석데이터의 활용이 요구된다.

## 참 고 문 헌

- (1) Ewins, D. J., 2000, Modal Testing : Theory, Practice and Application Research Studies Press LTD
- (2) LMS TestLab, Cada-X User's Manual
- (3) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 2000, Random Data : Analysis & Measurement Procedures, Wiley