

TPA 기법을 이용한 건물 내 설비 동하중 산정#

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

정민기*.이성수†.김용구**.안상경**.이상엽***

Min-Ki Jeong, Seong-Soo Lee, Yong-Ku Kim, Sang-Kyung Ahn and Sang-Yeop Lee

(2008년 12월 17일 접수 ; 2009년 7월 23일 심사완료)

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

ABSTRACT

The facility equipments generate dynamic force on building floor and the force can be measured with force transducer. However, this method depends on the measuring capacity or range of sensor, or mounts installation condition of equipments. Because of this restricting condition on force measuring system, this paper suggests a indirect method, the TPA(transfer path analysis) method, that produces a closely approximate dynamic force of equipments. This method calculates the dynamic force by using transfer response function. Firstly, the calculated dynamic force of impact load and continuous load was respectively compared with the sensor-measured value to examine the accuracy of TPA method. After that, the dynamic force and response induced by large facility equipments - a cooling tower, AHU and a large ventilator - were calculated by TPA method and the validity of these value were examined.

1. 서 론

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.

건물의 진동특성을 분석하기 위해서는 우선적으로 건물에 작용하는 가진원의 동하중에 대한 정보를 정확하게 또는 근사하게 알고 있어야 한다. 보행하중이나 그 외 몇 가지 하중원에 대해서는 실제 가진력을 근사하게 모델링하는 함수식이 개발되어 있으나, 하중 함수가 없는 경우는, 기계 장비 등을 제조하는 업체에서 제공하는 동하중 제원을 사용하거나, 하중센서로 직접 계측한 값을 사용하여야 한다.

그러나, 하중센서로 동하중을 직접 계측하는 방법은 센서의 사양과 가진원의 마운트 상황 등에 여러 가지 제약조건이 있어서 대형 공조기 등에 대한 동하중을 상시로 센서 계측하기에는 한계가 있으므로 실제값에 근사한 결과를 나타낼 수 있는 다른 간접적인 추정방법이 필요해진다.

이 연구에서는 건물의 바닥구조에 설치되는 대형 공조기의 동하중을 간접적으로 추정하는 방법으로서 전달함수에 의해 동하중을 추정하는 TPA (transfer

† 교신저자; 정회원, 군산대학교 건축공학과
E-mail : leess@kunsan.ac.kr
Tel : (063)469-4786, Fax : (063)469-4781

* 정회원, (주)브이테크

** 삼성물산 건설부문

*** 정회원, LMS Korea

이 논문은 2008 추계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

path analysis)기법을 제시한다. 그리고, 실제 건물에 설치된 대형 냉각탑, 공조기, 송풍기에 대한 동하중을 TPA기법으로 추정하고, 이들 장비가 작동하는 상태에서의 진동응답과 TPA기법을 활용한 추정응답을 비교하여 TPA기법의 현장 사용성을 검증한다.

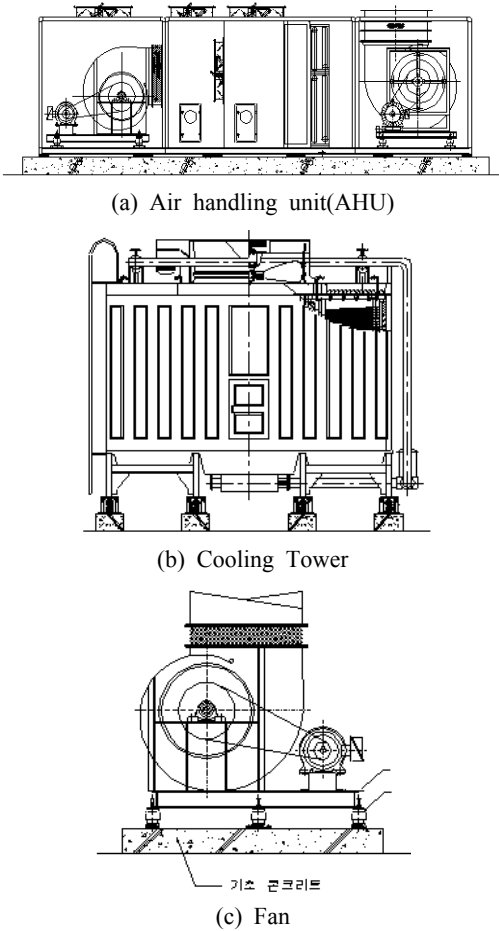


Fig. 1 Utility types in building

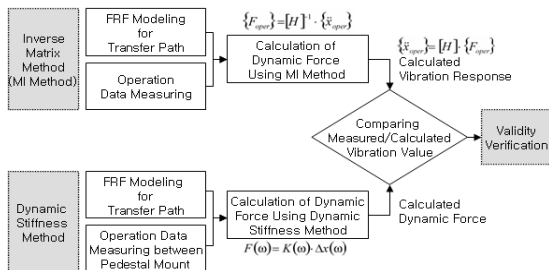


Fig. 2 Procedure of calculating dynamic forces of utilities by TPA process

2. TPA 기법을 이용한 설비 동하중 산정방법

일반적으로 설비 동하중의 경우 Fig. 1과 같이 진동원이 다양하고, 제원 및 설치되는 위치에서의 상호작용이 복잡하여 각 진동원에서 근원적으로 발생하는 동하중을 산정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 이 연구에서는 설비 작동 시 바닥구조의 지점에서 계측되는 진동데이터를 trouble shooting force로 정하고, TPA기법을 활용하여 설비 동하중을 산정하였다.

TPA기법을 활용한 동하중 산정절차는 Fig. 2와 같다. TPA기법에는 matrix inverse기법 또는 mount stiffness기법이 사용될 수 있는데 이 연구에서는 matrix inverse기법을 사용한다.

Matrix inverse기법으로 동하중을 산정하고, 검증 위치에서 측정된 진동데이터와 TPA에 의해 계산된 진동데이터를 비교하여 산정된 동하중의 신뢰성을 검증하는 절차로 구성되어 있다.

Matrix inverse기법은 Fig. 3과 같이 모든 하중 전달 경로에서 장비 작동 시의 진동응답과 장비 미작동 시의 FRF⁽²⁾를 계측하여 식(1)에 따라 설비 동하중 산정하는 방법이다. 그리고 식(2)를 사용하여 검증 위치에 대한 진동가속도($\ddot{x}_{op,calculation}$)를 추정하고, 이 값을 측정된 진동가속도($\ddot{x}_{op,measure}$)와 비교하여 산정된 설비 동하중의 타당성을 검증하였다.

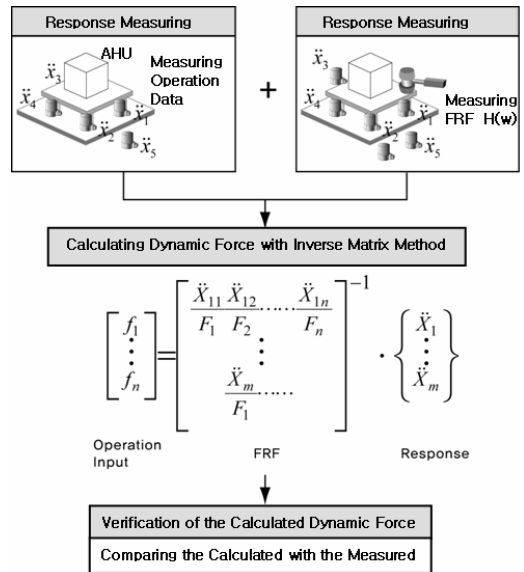


Fig. 3 Procedure of matrix inversion method

Table 1 Contents of measurement and verification of acceleration of vibration by using TPA process⁽³⁾

Dynamic force measuring method	Experimental measuring			TPA process	
	Data	Measuring point	Signal domain	Dynamic force calculation	Verification
Force transducer	Operational data	Loading point (pedestal)	time	Spectrum time	-
Matrix inverse	Operational data	Loading point (pedestal)	spectrum	Spectrum time	· Response spectrum at verification point
		Verification point	time		
	Frequency response function	Impacting point : loading point	FRF		
Response point : loading point & verification point		time			

TPA기법을 이용한 설비 동하중 계측 및 검증을 위한 상세 측정 내용을 Table 1에서 제시하였다.

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

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

여기서,

$\{x_{op_measure}\}$: 설비 작동 시 측정된 진동가속도

$[H_{vc}]$: 하중전달 경로와 검증위치 사이의 전달함수(FRF)

$\{x_{op_calculation}\}$: 산정된 설비 동하중과 전달함수로 부터 계산된 진동가속도

3. Matrix Inverse 기법의 신뢰성 검토

건물 내 설비들의 경우 하중전달 경로가 다양하여 mount stiffness 기법을 적용하기 어려우므로, 이 논문에서는 matrix inverse 기법만 고려하였다.

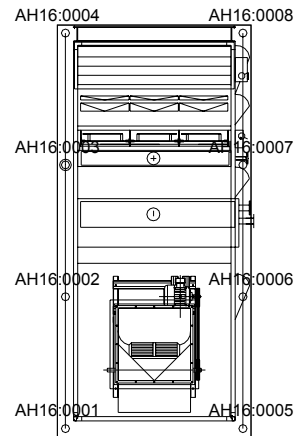
그리고 현장 여건상 공조기가 운전 중에 force transducer로 동하중을 직접 측정하기가 불가능하다. 따라서 이 논문에서는 impact hammer에 의한 충격 하중과 선형모터시스템 운전 시 지지점으로 전달되는 하중을 대상으로 하여 matrix inverse 기법에 의한 TPA기법의 현장 적용 타당성을 검토하였다. 실험과정에서 operational data와 FRF는 LMS TestLab으로 측정하였으며, TPA(matrix inverse)는 LMS Cada-X Analysis 모듈에서 수행하였다⁽¹⁾.

3.1 충격하중에 대한 검토

Impact hammer의 충격하중을 이용한 이 기법의



(a) Loading by impact hammer



(b) Location of impact load

Fig. 4 AHU test with impact hammer

검토는 Fig. 4(a)와 같이 고층 건물 내 공조실에서 수행되었다. 폴리우레탄 매트 위의 콘크리트 베드 위에 공조기가 설치되어 있는 현장이다. 충격하중 재하는 8개 측정위치 중 4개소(AH16:0005~0008)에 가하였다. 자세한 측정위치는 Fig. 4(b)에 제시하

였으며, 하중을 재하한 4개소에서 계측된 impact hammer의 동하중과 TPA기법으로 추정된 동하중을 Fig. 5와 같이 비교하였다.

충격하중에 대한 검토는 force transducer와 matrix inverse기법으로 구한 time data에 대하여 수행되었다. 4점에 대한 충격하중의 측정값과 계산값은 Fig. 5에 제시한 AH16:0005에 대한 것과 유사한 정확성을 보이는 것으로 확인되었다. 단 AH16:0007과 AH16:0008에 대해서는 미소한 time delay가 있었다.

4점에 대한 충격하중의 0.2초간 RMS 최대값을 정리하면 Table 2와 같고, RMS값의 차이는 최대 3% 이내이다.

3.2 연속하중에 대한 검토

연속하중에 대한 적용성 검토는 force transducer로 건물 내 설비 동하중 계측이 어려워 Fig. 6과 같이 mover가 연속적으로 수평운동을 하는 선형모터시스템을 대상으로 하였다.

우선, force transducer를 선형모터시스템 하부에 설치하여, matrix inverse 기법으로 구한 지지점 4개소에 작용하는 하중과 force transducer에서 계측

된 time 및 spectrum data를 비교하였다. Fig. 7은 floor:0001 위치에 대한 연속하중의 측정값과 계산값을 비교한 것이다. floor:0002~4의 위치에서도 측정값과 계산값 사이에 Fig. 7과 거의 근사한 경향을 보이며, 각 위치에 대한 RMS 최대값을 정리하면 Table 3과 같다.

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

3.3 검토 결과

이상에서 matrix inverse 기법의 신뢰성을 충격하중과 연속하중을 중심으로 검토해 보았다. 충격하중

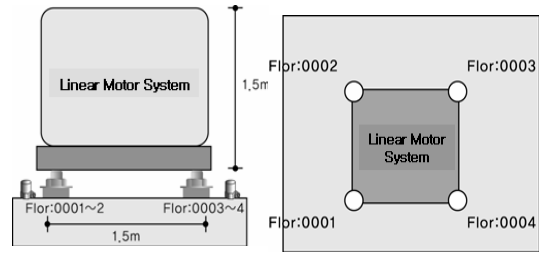


Fig. 6 Measurement of linear motor system

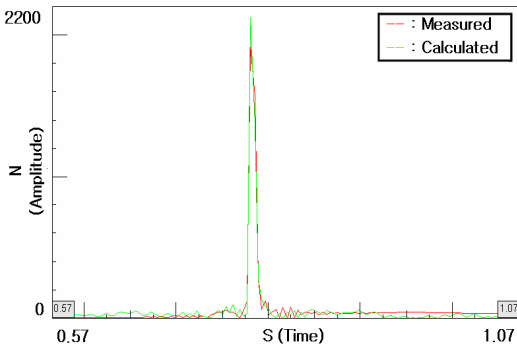


Fig. 5 Verification of impact load - time data (AH16:0005)

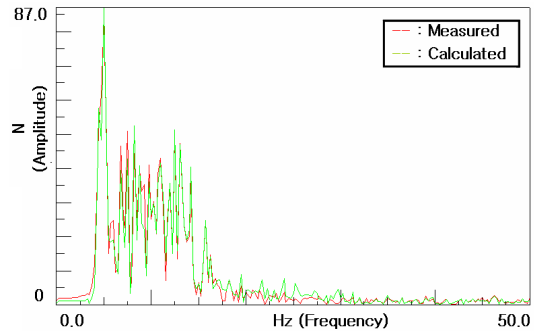


Fig. 7 Verification of continuous load - time data (floor:0001)

Table 2 Verification of impact load - RMS value

Measuring point	Impact load(N)		Deviation (%)
	Force transducer (measured)	Matrix inverse (calculated)	
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

Table 3 Verification of continuous load - RMS data

Measuring point	Impact load(N)		Deviation (%)
	Force transducer (measured)	Matrix inverse (calculated)	
chip1	227	221	2.8
chip2	262	266	1.5
chip3	356	318	10.7
chip4	334	315	5.6




에 대해서는 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었지만, 연속하중에 대해서는 측정된 operational data와 FRF의 quality⁽²⁾에 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

이 장에서는 앞에서 제시한 TPA 기법에 의한 건물 내 설비 동하중 산정 방법으로 건물 내 주요 설비(냉각탑, 공기조, 송풍기)의 동하중을 산정해 보았다. 대상설비들의 자세한 사양은 Table 4에서 제시하였다.

Table 4 The brief outline on the specifications of object utilities

Facilities	Cooling tower	AHU	Ventilator
Figure			
Location	Roof	F6 AHU Room	B4
Type	Closed Circuit	UFAS	Sirrico fan
Capacity	143RT	784cmm	767cmm
Operation weight	7.7 ton	2~3 ton	1.1 ton
Dynamic source	Fan, Motor, Pump	SF, Motor	Fan, Motor
RPM	315, 1750, -	964, 1750	242, 1130
Mount	2' Spring	Neoprene pad	2' Spring

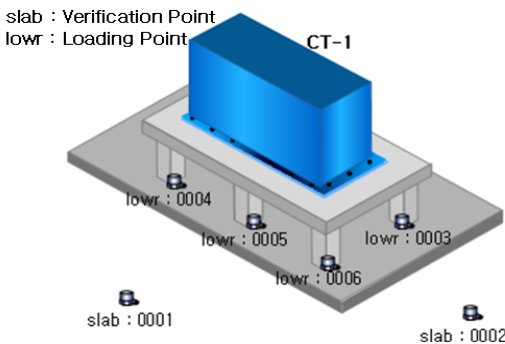
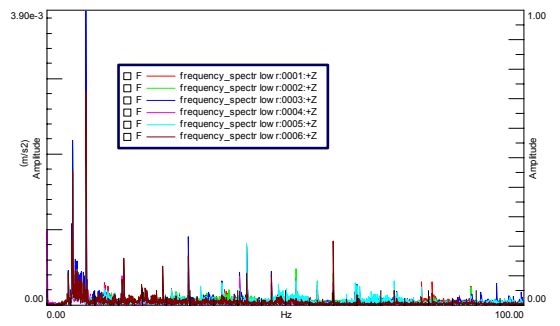
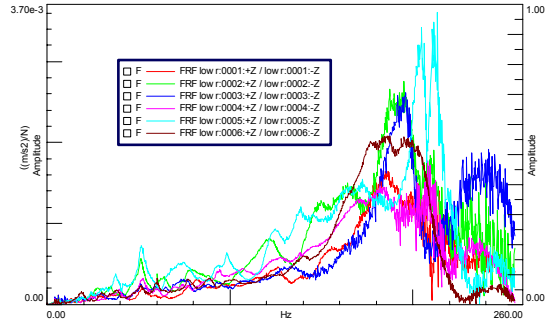


Fig. 8 Scheme of cooling tower measurement

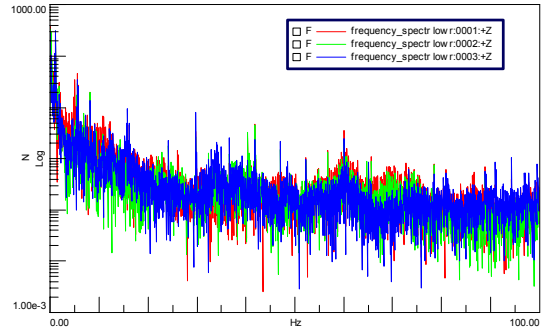


(a) Operational data

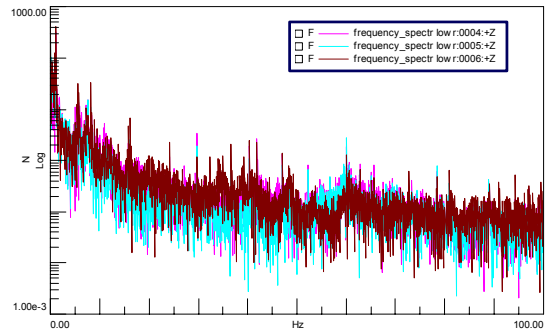


(b) FRF

Fig. 9 Measurement results of cooling tower



(a) Slab:0001



(b) Slab:0002

Fig. 10 Dynamic force of cooling tower

4.1 냉각탑

(1) 진동 측정

냉각탑 스프링 마운트 하부 6개소에 동하중 산정 목적으로, 나머지 2개소에 산정하중 검증 목적으로 가속도계를 설치하고, (Fig. 8) 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. 9에서 도시하였다.

(2) 동하중 산정 및 검증

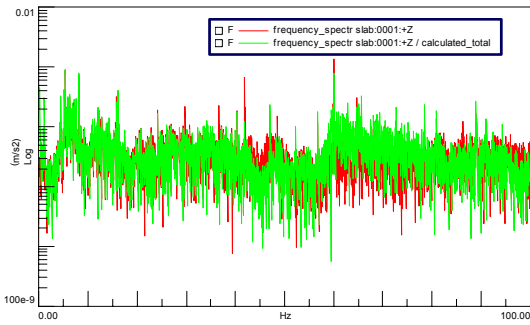
TPA 추정 과정은 LMS Cada-X TPA 모듈에서 matrix inverse 방법으로 수행하였으며, 산정된 동하중을 Fig. 10에서 제시하였다. 산정된 동하중에 대한 검증은 하중산정에 사용된 측정위치인 Slab:

0001, Slab:0002 2개소를 대상으로 Fig. 11과 같이 측정응답과 계산응답을 비교하였다. Table 5에서 OA값을 비교한 것으로 두 값의 차이가 2dB 이내로 나타났다.

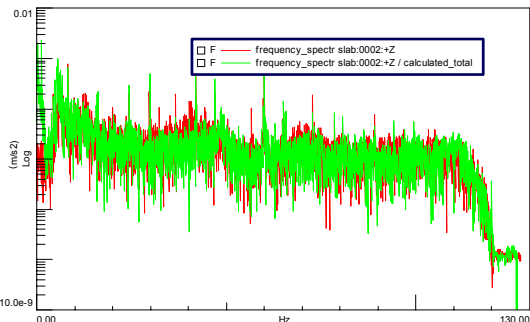
4.2 공조기

(1) 진동 측정

공조기 지지점 10개소에 (Fig. 12) 동하중 산정 목적으로, 나머지 1개소에 산정하중 검증 목적으로 가속도계를 설치하였으며, 측정결과는 Fig. 13에서 도시하였다.



(a) Slab:0001



(b) Slab:0002

Fig. 11 Verification of dynamic force

Table 5 Verification of cooling tower

Dynamic force	O.A rms(dB)	
	Slab:0001	Slab:0002
Measured	44.7	42.2
Calculated	44.9	44.3

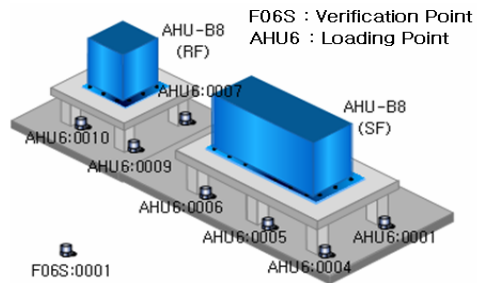
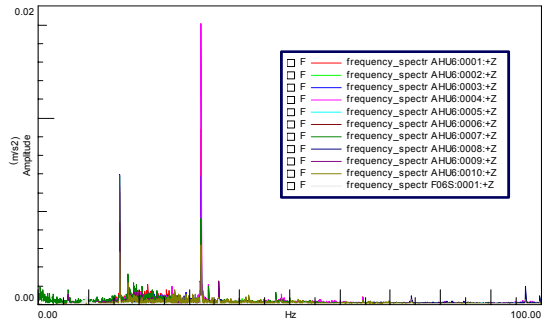
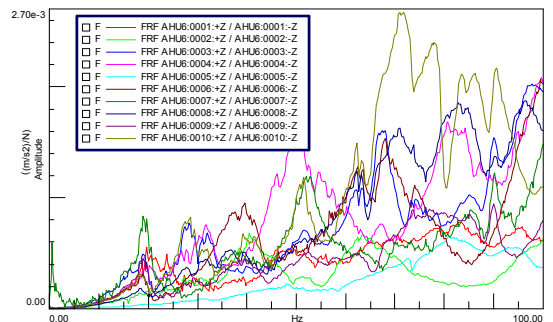


Fig. 12 Scheme of AHU measurement



(a) Operational data

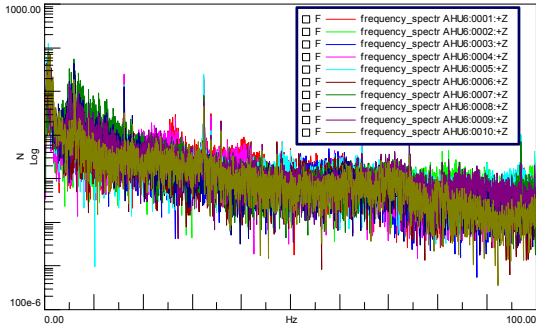


(b) FRF

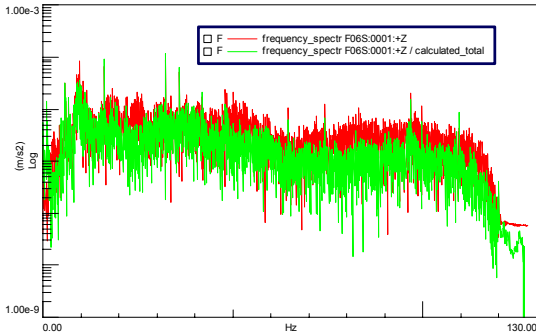
Fig. 13 Measurement results of AHU

(2) 동하중 산정 및 검증

산정된 공조기 동하중과 검증결과를 Fig. 14에서 도시하였으며, 검증 결과 두 값의 차이가 3 dB정도로 나타났다.



(a) Dynamic force of AHU



(b) Verification

Fig. 14 Dynamic force of AHU

Table 6 Verification of AHU

Verification point	Dynamic force (O.A rms(dB))	
F06S:0001	Measured	26.1
	Calculated	23.1

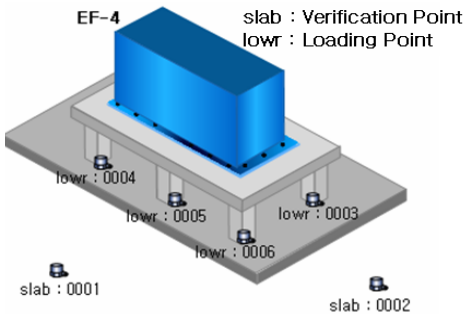
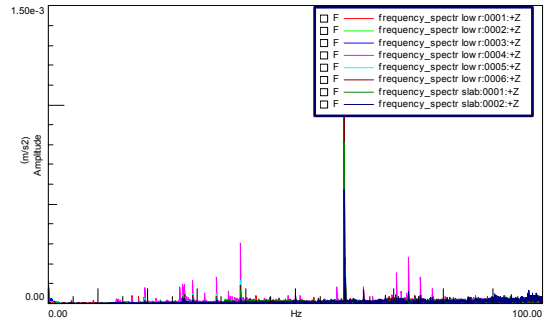
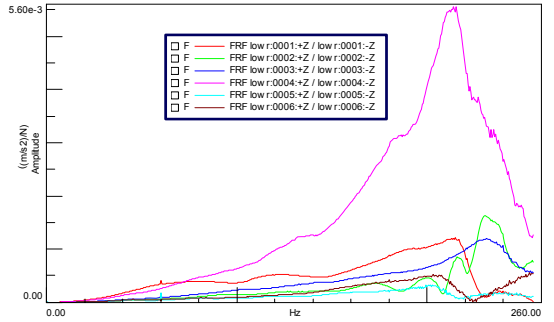


Fig. 15 Scheme of fan measurement

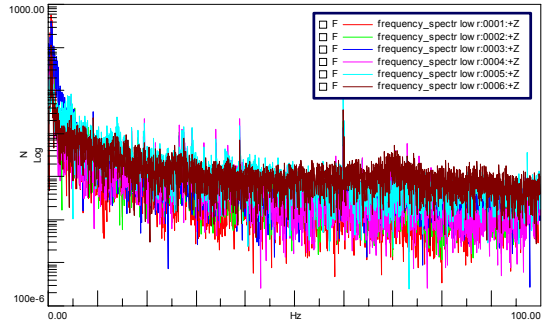


(a) Operational data

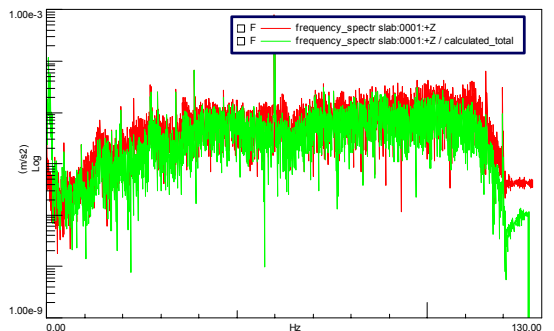


(b) FRF

Fig. 16 Measurement results of fan



(a) Dynamic force of fan



(b) Verification

Fig. 17 Dynamic force of fan

Table 7 Verification of fan

Dynamic force	O.A rms(dB)	
	Slab:0001	Slab:0002
Measured	34.6	33.1
Calculated	33.2	31.0

4.3 송풍기

(1) 진동 측정

송풍기 스프링 마운트 6개소에(Fig. 15) 동하중 산정 목적으로, 나머지 2개소에 산정하중 검증 목적으로 가속도계를 설치하였으며, 측정결과는 Fig. 16에서 도시하였다.

(2) 동하중 산정 및 검증

산정된 송풍기 동하중과 검증결과를 Fig. 17에서 도시하였으며, 검증 결과 두 값의 차이가 3 dB 이내로 나타났다.

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 이 기법의 현장 적용성을 최초로 검토해 보았다.

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

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

(4) 건물 내 설비 동하중 이외에 과일 향타, 보행 하중, 일반 산업체에서 발생 가능한 진동문제에도

효과적으로 해결할 수 있다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) LMS TestLab, Cada-X User's Manual.
- (2) Ewins, D. J., 2000, Modal Testing : Theory, Practice and Application Research Studies Press LTD.
- (3) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 2000, Random Data : Analysis & Measurement Procedures, Wiley.
- (4) Liu, J.-J., Ma, C.-K., Kung, I.-C. and Lin, D.-C., 2000, “Input Force Estimation of a Cantilever Plate by Using a System Identification Technique,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Vol. 190, Issue 11-12, pp. 1309~1322.
- (5) Allen, M. S. and Carne, T. G., 2008, “Delayed, Multi-step Inverse Structural Filter for Robust Force Identification,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, Issue 5, pp. 1036~1054.
- (6) Lee, H.-J., 1994, “Prediction of Dynamic Behavior in Concrete Slab by Transfer Function Method,” Master Thesis, Yonsei University.
- (7) Kim, S.-H., Kim, J.-H. and Lee, H.-K., 1992, “Prediction of the Exciting Force of Machine and the Vibration Response of Floor Using Transfer Function Method,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2 No. 4, pp. 273~280.