

건물 바닥 구조 해석 모드의 튜닝

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

정민기† · 권형오* · 김효범* · 이정하** · 이상엽***

Min-Ki Jeong† · Hyung-O Kwon* · Hyo-Beom Kim* · Jeong-Ha Lee** · Sang-Yeop Lee***

Key Words : Floor Vibration(바닥진동), FE Model(해석 모델), Modal Model(모달 모델), Experimental Modal Analysis(실험 모드해석), Correlation(연성), FRF(주파수응답함수),

ABSTRACT

The source transfer receiver model ('Source × Transfer = Response' model) which is widely used by NVH development process of vehicle/transport/machinery to analyze effectively and manage efficiently the structural dynamic behaviour is also applicable to construction structure.

If the evaluation assessment of the vibration level does not meet the target level, there are two methods, one is source treatment or replacement and the other is the reduction treatment on the transfer structure. In case of source treatment, it is done by source supplier and so, the latter is more practical method to reduce the vibration level.

In this study, in order to get the accurate Transfer FE model(floor structure FE model), Experimental modal analysis of part of floor structure and FEM modal analysis of full floor structure are performed, then updating of FE model is performed after correlation analysis between these two results and finally, the modal model and FRF are compared between FE and Experimental results.

1. 서 론

건물 구조시스템은 내부의 공간의 효율성을 높이고 공사 기간을 단축하기 위하여 장스팬화, 경량화 되어가고 있다. 이러한 추세로 인해 건물 바닥구조의 강성 저하로 인한 고 유진동수 감소와 구조물의 감쇠 성능을 저감시켜, 구조물에 진동 문제를 유발시키는 주요 원인이다. 따라서 건물 바닥 구조의 동적 거동을 효과적인 분석과 진동문제를 효율적인 관리하기 위한 프로세서가 필요하다.

이러한 측면에서 효율적인 접근방식 중에 하나가, 자동차 및 수송 기계류 등의 NVH 개발 프로세서에서 광범위하게 사용되고 있는 [진동원 × 전달 구조물의 동적 특성 = 바닥 진동레벨]로 표현되는 분석적인 접근 방식이다. 자동차에 비해 건물의 구조시스템이 간단하므로, 바닥구조의 진동 저감 대책에 효율적으로 사용할 수 있는 방식이다.

일반적으로, 건물 바닥 진동의 수준이 평가 기준에 미달

시 대책으로는 진동원 저감 또는 진동원의 교체, 전달 구조물의 전달을 감소 등의 대책이 요구된다. 진동원 대책의 경우 진동원의 공급자에 의한 대책 수립이 요구되므로, 현장에서 진동원 대책 보다 전달구조물의 전달율을 저감시키는 대책이 비교적 많이 적용되고 있다. 이러한 전달경로에 대한 대책은 건물 바닥구조에 대한 진동실험으로부터 전달 경로의 기여도 해석 결과에 의한 최대 전달 경로의 강성 및 감쇠율을 변경시키고, 전달 경로의 실험적 모드해석 결과를 가시화함으로써 최대 변위 및 상대 변위 지점에 댐퍼 및 강성 보강 등의 방식을 사용하고 있다. 실험 모델의 불안전성으로 인하여 변경된 구조물의 동적 응답의 정확한 예측 보다는 효과적인 저감방법론에 의존하고 있으며, 최종 실험에 의한 구조 변경 효과를 평가하는 방식으로 사용되고 있다. 이러한 실험적인 방법의 단점은 정확하게 실험에 의해 튜닝된 정확한 해석 모델을 사용시 매우 효과적으로 극복 될 수 있다.

본 논문에서는 건물 바닥 구조물의 일부분에 대한 실험 모드 해석과 건물 바닥 구조물 전체에 대한 해석 모드 해석을 수행하여, 이들 결과의 연성 해석 후 해석 모델의 튜닝을 수행하였다. 그리고 튜닝된 해석 모델과 실험 모델의 모드 해석 결과 및 FRF의 비교를 수행하였다.

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

* (주)보이테크
** 삼성물산 건설부문
*** 정희원, LMS Korea

2. 이론 고찰 및 결과

2.1 개요

해석 모델의 교정을 위한 프로세스는 상기 그래프로 대표되며 각각의 절차에 대한 주의 사항을 아래에 기술하였다.

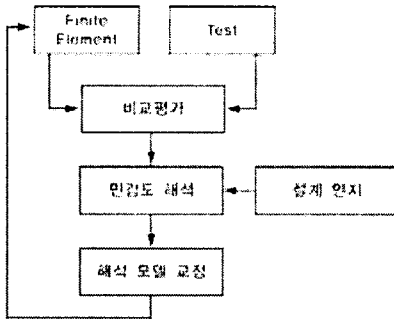


Fig. 1 해석 모델의 교정을 위한 프로세스

2.2 실험 모드 해석 절차

일반적으로 실험 모드 해석은 모달 Survey 시험이라고 불린다. 이는 구조물 전체에 있는 모든 모드를 측정/분석하기보다는 관심 있는 모드 추출을 하기 위함이다.

모드 해석 절차로는 크게 3가지로 나누어 진행된다.

(1) 시편 준비 작업 및 사전 Survey

시편 지지대 BC 준비 및 점검 / 필요한 mode의 개수 또는 분석하고자 하는 주파수 영역에 대한 정의 / 가진 방식에 따른: 가진 주파수 대역 조사 및 센서 교정 / Repeatability, Linearity (Amplitude 변화에 대한), 시 불

변성 점검 / Target Mode Selection, Survey Process : ODS 에 의한 점검 작업

(2) FRF 측정

Trigger Level 점검 / Pre Trigger Length 조절 / Window length for Impact Signal 결정 / Response Signal DSP Parameter 결정 / Response Signal Auto Range / Response Window Size or Frequency Resolution 점검 / Response Window 결정 / 측정데이터 검증

(3) 측정 FRF로 부터의 모달 파라미터 추출 및 검증

본 논문에 사용한 모달 파라미터 추출법은 LMS사에서 개발한 PolyMax기법을 사용 / 해석된 결과는 해석된 모달 파라미터에 의해 측정 지점에서 FRFs의 Synthesize되며 이를 측정된 FRF와 비교를 수행함으로써 검증

2.3 해석 모델의 작성

해석 모델과 실험 모델의 비교 및 해석 모드의 튜닝을 위해서는 해석 모델 작성시에 튜닝에 사용할 입력 파라미터를 튜닝전에 준비해 놓으면 재 모델링 작업 수행 없이 수월하게 진행된다.

다음은 각 모델작성 단계별 주의 사항을 기술한 것이다.

(1) 해석 Geometry 작성

해석 geometry 작성시 도면 상에 나타나지 않는 불확실한 치수에 대한 파라미터 할당.

(2) Mesh 작업

적절한 요소의 사용, 특히 3D 요소의 경우 민감도 해석이 불가능하므로, 3D 요소가 사용되는 경우, 요소의 표면에 2D 셀 요소를 사용하면, 이의 민감도 해석 수행이 가능.

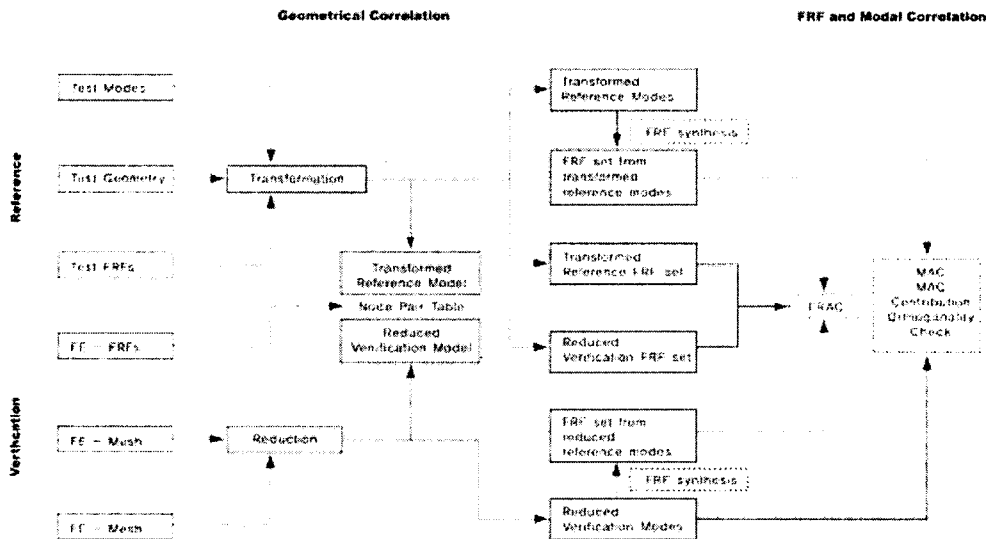


Fig. 2 해석 모델과 시험 모델의 연성 해석 절차

(3) 물성치 및 Property 할당

일반적으로 연결부위의 특성, Material 의 특성, 및 property를 모델 튜닝 시 입력 매개 변수로 사용하므로, 불확실한 영역에 대한 mesh를 Grouping 화를 하여, 각 Group에 대한물성 치를 할당할 경우, 각 group 별 요소의 물성치 특성을 해석 모델의 튜닝시 입력 매개 변수로 사용 가능.

2.4 해석 모델과 시험 모델의 연성 해석

해석 모델과 시험 모델의 연성 해석은 Fig. 2와 같이 수행되며, Geometry Correlation과 FRF & Modal Correlation에 대하여 아래에서 설명하였다.

(1) Geometry Correlation

Geometry Correlation 작업은 FE 모델과 Test 모델의 geometry를 일치 시켜주기 위해 수행되며, 이는 시험/해석 모델 작성시 global 좌표 계의 차이 및FE node 와 시험 모델 측정 위치의 차이점으로부터 발생하며, 이를 일치시키는 geometry를 작성하기 위해 수행된다, 즉, 상기 그림에 제시된 바와 같이, 시험 모델의 경우, 시험 좌표계 시스템을 해석 모델 좌표계 시스템으로 변환 하는 과정을 가지며, 해석 모델의 경우, 시험 모델에서 측정한 위치에 대한 node 를 추출하는 과정을 갖는다. 해석 모드에서 추출된 노드로부터 시험 및 해석에 공통으로 사용되는 geometry를 만드는 작업이 수행된다.

(2) FRF 와 Modal correlation

FRF 와 modal correlation 작업을 수행하기 위해서는, 새로이 작성된 공통 geometry 상으로 FRF및 Mode 해석 결과를 이전시키는 작업이 필요하다. 시험 모델의 경우, 측정된 데이터의 좌표 변환이 Transformation 파라 미터인 회전과 Scaling 값에 의해 수행되며, 해석 데이터인 경우에는 새로이 작성된 geometry 에서의 데이터 추출 작업, 즉 데이터 reduction 작업이 수행된다.

새로이 작성된 geometry 상에서 수행되는 작업으로는 MAC, Orthogonality check 및 FRAC 등이 계산되며 수식은 다음과 같다.

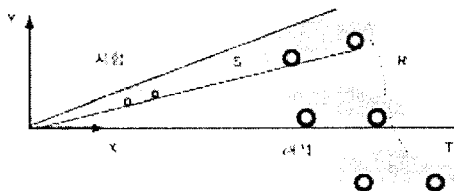


Fig. 3 FE & Test 모델 Geometry Correlation

$$MAC_{ij} = \frac{\{\psi_i^{test}\}\{\psi_j^{FE}\}^2}{(\{\psi_i^{test}\}\{\psi_i^{test}\}^* \{\psi_j^{FE}\}\{\psi_j^{FE}\}^*)} \quad (1)$$

MAC 값의 일반적인 기준은 다음과 같다.

- MAC > 0.7 : good correlation
- MAC < 0.5 : bad correlation

상기 값은 실험 모드와 형상이 같은 해석모드를 찾아내어 모드 pair 테이블 상에 위치 시켜 모델 튜닝시 target 값으로 사용하거나 또한 mode switching, spatial aliasing 및 시험에서 추출하지 못한missing 모드를 살펴보기 위해서 사용된다.

$$O_r(i,j) = \{L_i\}^t [A] \{R_j\} \quad (2)$$

Orthogonality 또한 MAC와 같은 용도로 사용되며, 특히 항공 쪽에서 전형적으로 많이 사용했던 기법으로 알려져 있다.

$$FRAC(j) = \frac{|\{H^{test}(\omega_j)\}\{H^{FE}(\omega_j)\}|^2}{(\{\{H^{test}(\omega_j)\}\{H^{test}(\omega_j)\}^*\}) (\{\{H^{FE}(\omega_j)\}\{H^{FE}(\omega_j)\}^*\})} \quad (3)$$

FRAC은 해석 모델의 FRF와 시험 모델의 FRF를 하나의 값으로 비교하기 위한 목적으로 사용되며, 특히 해석 모델의 주파수에 stiffness factor을 곱하여, 해석 모델의 FRF를 변경하면서 FRAC의 변화를 살펴봄으로써, 해석과 실험의 차이점을 정량적인 값으로 표현이 가능하며, 특히 하나의 물성치로 작성된 컴포넌트 모델에 적용시 물성치의 변화량을 쉽게 간파할 수 있다.

2.4 해석 모델의 튜닝

해석 모델의 튜닝 작업은 다음의 항목을 Fig. 4에서 제시된 절차에 따라 진행하게 된다.

- (1) 설계 변수 지정
- (2) 목적 함수 지정
- (3) 설계 변수에 대한 목적 함수의 민감도 해석
- (4) 민감도 해석 결과를 이용한 Optimization Design 작업 등으로 분류 된다.

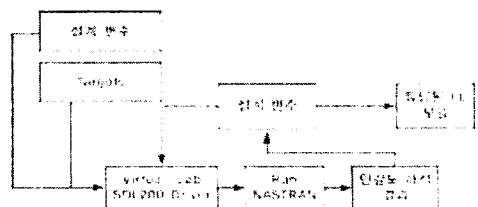


Fig. 4 해석 모델의 튜닝 절차

3. 건물 바닥구조 실험 및 해석 결과

3.1 개요

본 연구에서 적용한 고층 오피스 건물이며, 바닥구조는 철골구조이다. Fig. 5에서 구조평면도를 제시하였다.

3.1 실험 모드 해석 결과

실험 모드 해석 결과가 Table 1에 표시되어 있으며, 각각의 모드 형상을 Fig. 6에서 제시하였다.

3.2 해석 모드 해석 결과

실험 모드 해석 결과가 아래의 도표에 표시되어 있으며, MAC 값을 비교한 후 실험 모드에 가장 가까운 해석 모드 형상을 찾아 아래 그래프에 순차적으로 제시 하였다. 해석 모드가 실험 모드에 비하여 많은 사유로는 해석 모델의 경우 전체 바닥 구조물(60.9 M X 48.9 M)의 모델링을 수행 하였으며 실험 모델의 경우 바닥 구조물 부분(29.8 M X 14.4 M)만을 실험하여 local 모드를 추출 하였다.

Fig. 7에서 제시된 모드 형상은 1st 모드, 2, 3, 9, 10, 16, 18, 27 번째 모드이다. 첫 번째 해석 모드의 경우 실험 모델과는 관계없는 모드 형상이나 바닥 floor의 전체적인 모드 형상을 가시화하기 위하여 도시되었으며, 이후의 모든

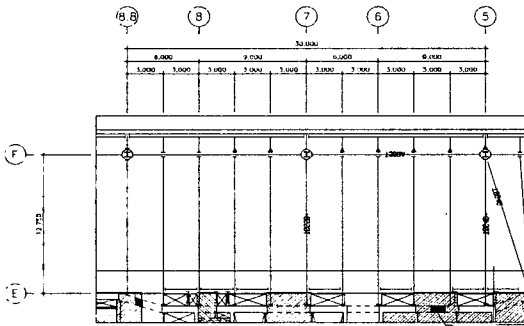


Fig. 5 대상 건물 바닥 구조

Table 1 건물 바닥구조에 대한 실험 모드 해석 결과

순번	Frequency(Hz)	Damping(%)
Mode 1	6.046	1.72
Mode 2	6.308	1.80
Mode 3	7.579	1.60
Mode 4	8.016	1.66
Mode 5	9.400	1.12
Mode 6	10.015	1.54
Mode 7	10.447	1.45
Mode 8	11.235	2.03
Mode 9	12.682	3.03

모드는 3.3절 연성 해석 결과의 실험 모드와 MAC 값이 0.85 이상인 모드 형상이다.

3.3 연성 해석 결과

실험 모델의 고유 진동수를 기준으로 하여 해석 모델과의 MAC 값을 계산 하였으며, 가장 큰 MAC값을 보여 주는 해석모드를 실험모드와 일치한다고 간주하였다.

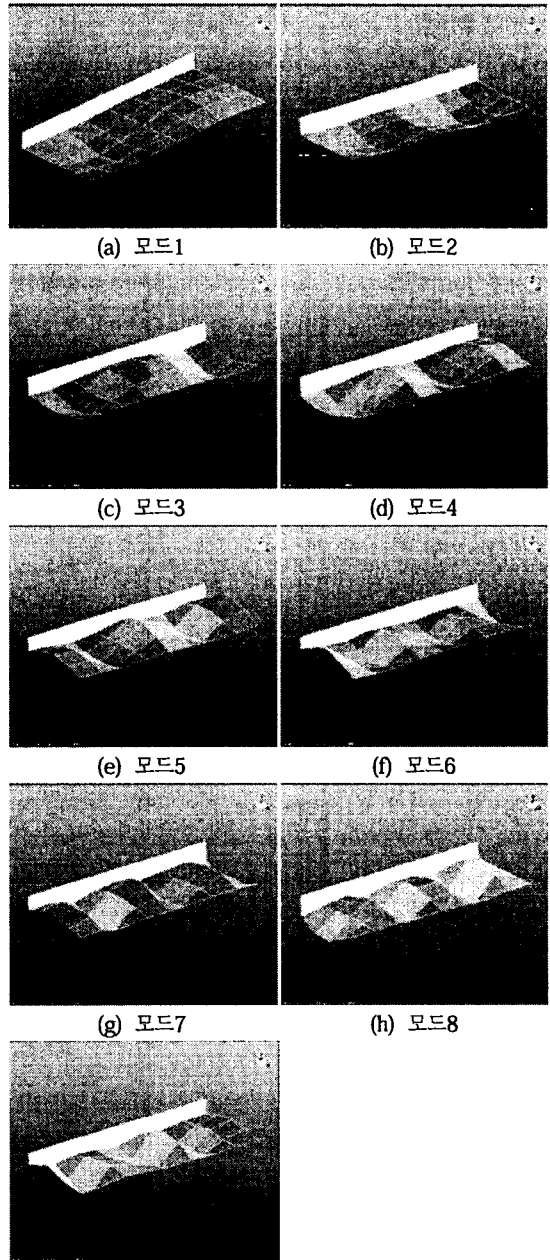


Fig. 6 대상 바닥구조의 실험 모드 해석 결과 (모드형상)

Table 2 해석 모드 해석 결과

No.	Frequency(Hz)	No.	Frequency(Hz)
1	5.782	19	9.149
2	5.916	20	9.155
3	6.018	21	9.295
4	6.187	22	9.585
5	6.873	23	9.867
6	6.682	24	10.467
7	6.777	25	10.721
8	6.886	26	10.950
9	7.163	27	11.801
10	7.826	28	11.619
11	7.883	29	11.680
12	7.583	30	11.760
13	7.888	31	12.828
14	8.260	32	12.708
15	8.891	33	12.762
16	8.565	34	12.801
17	8.660	35	12.844
18	8.805	36	12.918

Table 3 FE & Test 모델 Correlation 결과

Id1	Freq1	Id2	Freq2	MAC Value	Freq2-Freq1 (Hz)
1	6	2	5.9	0.986	0.13
2	6.3	3	6	0.978	0.29
3	7.6	9	7.2	0.93	0.42
4	8	1	7.3	0.961	0.69
5	9.4	16	8.6	0.943	0.83
6	10	18	8.8	0.916	1.21
7	10.4	20	9.2	0.786	1.29
8	11.2	23	9.9	0.791	1.37
9	12.7	27	11.3	0.855	1.38

3.4 해석 모델 튜닝

해석 모델을 튜닝 하기 위한 절차는 다음과 같다.

(1) 설계 변수 설정

설계 변수로서는 Floor 하부 에 지지대는 철 구조물의 물성치, 바닥판 콘크리트 구조물의 물성치과 바닥판을 2개 부 위로 분할하여 각각의 두께를 변수로 사용하였다.

(2) 목적 함수 설정

목적 함수로는 해석 모드의 MAC 값이 가장 큰 해석 모드의 주파수와 해당 실험 모드의 주파수 차이를 설정하였다.

(3) 설계 변수에 대한 목적함수의 민감도 계산

설계 변수에 대한 목적함수의 민감도를 계산하기 위하여, MSC/Nastran 을 사용하여 각 해당 해석 고유진동수 및 모드 형상에 대한 민감도 해석과 LMS Virtual.lab 에서 지원

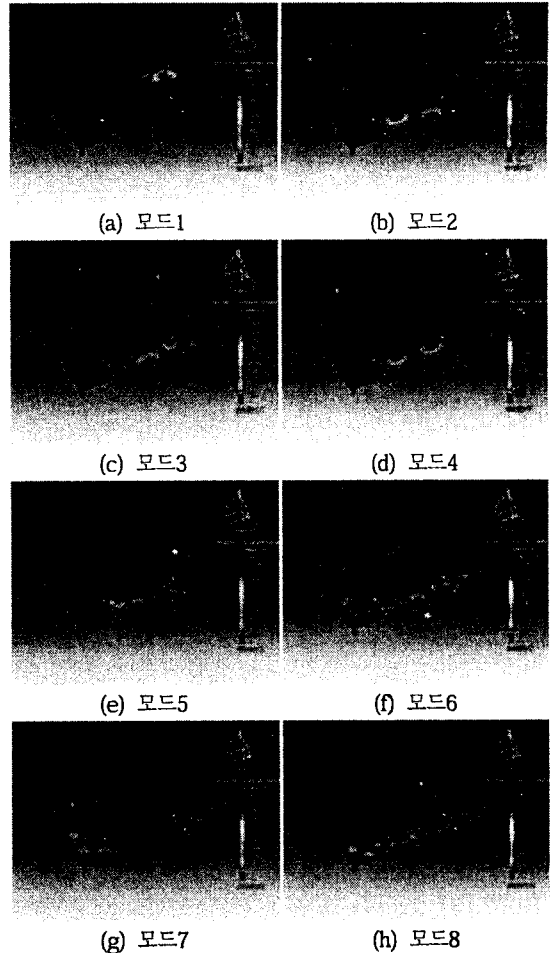


Fig. 7 MAC 값을 비교한 후 실험 모드에 가장 가까운 해석 모드 형상

하는 MAC 값에 대한 민감도 해석을 수행하였다.

(4) 최적 설계 Process Design

최적설계에 사용된 알고리즘으로는 local optimization 기법에 사용되는 sequential quadratic Programming 기법을 사용하였고, 최대 iteration : 7회 및 각 iteration 시 선형 가정에 대한 보정을 위하여 line search는 4번을 수행하였다. 즉 FEM 모드 해석은 28회 수행되었으며, 7회의 민감도 해석이 수행되었다.

3.5 실험 및 튜닝 된 해석 모드의 결과 비교

본 절에서는 이상에서 실험 및 튜닝 된 해석모드의 결과를 비교하였다. 우선 Table 4에서 변경 전과 튜닝 후 설계 변수를 제시하였으며, Table 5에서 튜닝 후 해석 모드와 실험 모드의 MAC값 및 고유 진동수 차이를 비교해 보았다. 그리고 Fig. 8에서 실험 모델(빨간색), 튜닝 전(파란색)후(빨간색) 해석모델의 Synthesized FRF를 도시하였다.

Table 4 설계 변수의 변경전과 튜닝 후 결과 비교

항목	단위	변경전	튜닝 후
Young's Modulus1	N/m ²	2.06E+11	2.266E+11
Young's Modulus2		2.40E+10	2.64E+10
Young's Modulus3		3.20E+10	3.233E+10
Value4(mm)		135	143.7
Value5(mm)		135	148.5

Table 5 해석 모드와 실험 모드의 고유 진동수 차이 비교.

ld1	Freq1	ld2	Freq2	MAC Value	Freq2-Freq1 (Hz)
1	6	2	6.1	0.984	0.07
2	6.3	4	6.3	0.975	0.01
3	7.6	9	7.5	0.954	0.09
4	8	11	7.7	0.974	0.28
5	9.4	17	9	0.952	0.38
6	10	22	10.3	0.902	0.3
7	10.4	19	9.6	0.83	0.81
8	11.2	24	11.1	0.853	0.17
9	12.7	26	11.8	0.893	0.91



Fig. 8 실험 모델(빨간색), 튜닝 전(파란색)-후(빨간색) 해석모델의 Synthesized FRF

4. 결론

이상에서 차량, 기계 구조물에 적용되는 해석 모델의 튜닝 작업을 건물 바닥 구조물에 대해서 수행하였으며, 다음에서 요약하였다.

- (1) 부분 구조 시험 모델에서 국부 local mode를 추출하였다
- (2) 전체 구조물에 대한 해석 모드와 해당 실험모드 찾기 위하여 MAC 값을 사용하였으나, 전체 바닥 시스템의 FE 모드와 바닥 시스템 국부에서 추출된 모드의 연성관계를 확인하기 위해서는 MAC뿐만 아니라 각 모드의 최대변위 지점에서 Residue 크기에 의한 연성 해석이 요구된다.
- (3) Optimization 시 설계 변수가 변함으로 인하여 해당

해석 모드의 순번이 바뀌게 되므로, 해석 모드와 시험 모드 사이의 MAC tracking 수행이 반드시 필요하였다.

- (4) 본 구조물의 경우 전체 구조물의 모드 해석 결과를 살펴보면, 측정된 부 구조물의 국부 모드가 매우 확실하게 구분되어 있어, MAC Tracking 수행에 어려움이 없었으나, 유사 모드가 많이 밀집되어 있을 경우 MAC Tracking만으로는 실험과 같은 해당 해석 모드의 Tracking 이 매우 난해함이 예측되므로, iteration시 MAC Tracking 에 추가하여, 모달 residue 등을 함께 사용하여 최적 설계시 해석모드의 추적을 좀더 수월하게 수행할 수 있다고 판단된다.
- (5) 본 논문에서는 Test 와 해석 모델의 FRF amplitude 에 대한 차이점을 목적 함수로 지정하지 않음으로 하여, Amplitude error에 대한 고려는 하지 않았다.
- (6) 해석모델의 FRF를 사용하여 동하중 산정 등의 기법에 활용하기 위해서는 좀 더 정확한 해석 모드의 튜닝이 요구된다.

최종적으로 본 연구에서 수행된 해석 모델에 대한 모달 튜닝 기법을 활용하여 건물 바닥구조의 진동문제의 개선시 효율적으로 접근할 수 있을 것으로 판단된다.

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