

반응표면법 및 다목적 최적화를 이용한 철근콘크리트 건물모델의 모델 개선

이 상 현¹ · 유 은 종^{1*}

¹한양대학교 건축공학부

Model Updating of a RC Frame Building using Response Surface Method and Multiobjective Optimization

Sang-Hyun Lee¹ and Eunjong Yu^{1*}

¹Department of Architectural Engineering, Hanyang Univ., Seoul, 04763, Korea

Abstract

In this paper, a model updating procedure based on the response surface method combined with the multi-objective optimization was proposed and applied for updating of the FE models representing a low-rise reinforced concrete building before and after the seismic retrofit. The dynamic properties to be matched were obtained from vibration tests using a small shaker system. By varying the structural parameters according to the central composite design, analysis results from the initial FE model using a commercial software were collected and used to produce two regression functions each of which representing the errors in the natural frequencies and mode shapes. The two functions were used as the objective functions for multi-objective optimization. Final solution was determined by examining the Pareto solutions with one iteration. The parameters representing the stiffnesses of existing concrete, masonry, connection stiffness in expansion joint, new concrete, retrofitted members with steel section jacketing were selected and identified.

Keywords : FE model updating, response surface method, multi-objective optimization, vibration test, system identification, seismic retrofit

1. 서 론

유한요소해석은 해석모델이 실제 구조물의 거동을 모사할 수 있다는 가정 하에 구조물의 응답을 예측하고 원하는 성능을 가질 수 있도록 설계하기 위해 사용되고 있다. 하지만 설계도면과 엔지니어의 판단에 의해 작성된 유한요소모델은 실제구조물의 거동과 큰 차이를 보이는 경우가 많다. 이러한 차이의 원인으로는 재료특성, 부재형상, 경계 조건의 차이, 혹은 해석모델에서 고려되지 않은 비구조요소의 영향 등을 들 수 있다.

유한요소모델 개선은 불확실한 특성치를 조정하여 실험 또는 해석에서 얻은 구조물의 특성과 유사한 특성을 나타내는 해석 모델을 최적화기법을 통해 얻는 방법으로 구조동역학 분야에서

많이 적용되고 있다. 유한요소모델 개선기법의 대표적인 방법은 민감도를 기반으로 하는 반복법이다. 하지만 이 방법은 민감도 행렬을 얻기 위한 계산량이 많아 상용해석프로그램으로 모델링된 해석모델의 개선에서 적합하지 않다. 반응표면법(response surface method, RSM)은 실험계획법의 일종으로 적절히 계획된 인자(input)의 조합을 통해 반응(output)을 나타내는 회귀함수를 얻고 이를 사용하여 최적치를 구하는 방법으로 실험 혹은 해석횟수를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 사용된 변수의 범위에 따라 추정된 회귀함수가 실제 거동과 차이를 보일 수 있어 적절한 변수의 범위설정이 필요하다. 한편, 유한요소모델 개선에서 많이 사용되는 동특성으로는 고유진동수와 모드형상을 들 수 있다. 민감도기반기법이나 단일

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2220-4311; E-mail: eunjongyu@hanyang.ac.kr

Received October 26 2016; Revised November 6 2016;

Accepted November 7 2016

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

목적함수를 사용하는 최적화 기법에서 고유진동수와 모드형상의 차이 모두를 최소화시키기 위해서는 각각에 해당하는 목적함수를 구한 뒤 가중치를 사용하여 하나의 목적함수로 만든 후 최적화를 진행한다. 따라서 주관적으로 설정된 가중치에 따라 두 목적함수 사이의 기여도가 달라지므로 최종해가 달라지는 문제가 있다.

기존 연구에서도 모델개선을 위해 반응표면법을 사용하는 시도가 있었으나 비교적 단순한 형태의 구조물을 대상으로 하였으며, 하나의 목적함수만을 사용한 연구들이었다(Wei-xin *et al.*, 2010; Fang *et al.*, 2009). 본 연구에서는 반응표면법과 다목적 최적화법을 이용한 모델 개선기법의 절차를 제안하고 이를 상용프로그램으로 모델링된 실제 건축구조물의 모델 개선에 적용하였다. 제안된 방법은 고유진동수와 모드형상에 기반한 2개의 목적함수를 사용하였으며, 최초 반응함수의 오차가 클 경우 최종해에 도달하기 위한 절차를 포함한다.

2. 반응표면법 및 다목적 최적화를 이용한 모델 개선

반응표면법은 성능에 영향을 미치는 중요 인자에 대한 비선형 회귀식으로 정류점을 추정하여 최소의 실험으로 최적화하는 실험계획법의 일종이다. 반응표면법은 여러 개의 인자가 복합적인 작용을 하여 목적함수에 영향을 주고 있을 때 이러한 인자들의 변화가 이루는 반응표면을 회귀식으로 추정하는 통계적인 분석방법이다. 반응표면 추정식이 2차 회귀모형으로 적절하다고 판단될 때는 3^k 요인배치법, 3수준계의 일부실험법, 중심합성계획, 회전계획, 회전중심합성계획, Box-Behnken 계획법이 사용된다. 2차 회귀모형은 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (1)$$

본 연구는 대상 건물 동특성의 변화에 영향을 미치는 인자 선정 및 반응식 도출과 함께 최적화를 실시하기 위하여 반응표면법 중 중심합성계획(central composite design, CCD)을 적용하여 분석을 수행하였다. CCD는 인자 변화에 대한 최적화에 적합한 실험계획법이며, 2차 모형의 제공 항들의 효율적인 추정이 가능하고, 실험계획의 바람직한 특성인 직교 블록화 및 회전성의 구현이 용이하다. CCD는 2^k 요인실험에 축점과 중심점을 추가시킨 구조로써, 중심점의 수에는 제한없이 하나 이상이면 되고, 축점의 수는 $2k$ 개가 된다. 따라서 실험횟수 $N=2^k+2k+n$ (k :설계변수의 개수, n :중심점수)개가 된다(Park, 2003).

회귀분석으로 도출된 반응함수들은 분산 분석(analysis of variance, ANOVA)을 통해 각 변수들의 유의성을 확인하고 반응표면 모형 축소(pooling) 작업으로 유의하지 않은 교호작용 및 제곱항은 제거한다. 회귀분석결과 통계적인 신뢰성을 검증하기 위해서 결정계수 R^2 을 주로 사용한다. 하지만 결정계수는 그 중요성의 유무와 상관없이 변수가 증가할수록 높아지는 단점을 가지고 있으므로 이를 보완하기 위해 조정결정계수 $R^2(\text{adj})$ 가 사용되고 다음 식으로 나타낸다(Kim, 2016).

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2)$$

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \frac{SSE/(n-p)}{SST/(n-1)} \quad (3)$$

(n : 실험횟수, p : 반응표면모델 계수의 개수)

만약 $R^2(\text{adj})$ 값이 작다면 예측한 반응함수의 결과와 실제의 결과 사이에 편차가 존재하게 되므로 재평가가 필요하다.

단일목적 최적화(single-objective optimization) 알고리즘(fmincon Interior Point 등)은 하나의 목적함수를 최소화하기 위한 알고리즘이며 그 동안 여러 공학적 문제에 성공적으로 적용되었다. 그러나 많은 실질적인 문제에서 평가기준이 하나일 수는 없고 또 이러한 평가기준이 서로 대립적인 경우, 평가기준을 하나로 대치하는 것이 불합리한 경우가 있다. 다목적 최적화(multi-objective optimization)는 이러한 문제를 위해 도입되었다. 단일목적 최적화 문제의 목적은 하나의 목적함수를 최소화하는 설계 변수를 찾는 것이지만, 다목적 최적화 문제의 목적은 '파레토 최적해(pareto optimal)'를 찾는 것을 목적으로 한다(Kim *et al.*, 2001).

본 연구에서는 목적함수의 가중치 설정이나 제한조건 설정의 시행착오와 불합리성 해결을 위해 다목적 최적화 기법을 사용하였다. 사용된 기법은 다목적 최적화의 대표적인 알고리즘인 비지배 분류 유전자 알고리즘(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II) (Kalyanmoy Deb, 2002)이다.

최적화를 위한 목적함수로는 해석모델과 계측치와의 고유진동수의 오차와 모드형상의 오차를 나타내는 2개의 함수를 사용하였으며, 전체적인 모델 개선의 절차를 요약하면 다음과 같다.

- ① CCD의 변수 선정 및 변수의 범위 설정
- ② CCD의 변수 조합을 이용한 유한요소해석 실시
- ③ 회귀분석을 이용한 목적함수 추정 및 ANOVA
- ④ 다목적최적화를 이용한 파레토 최적해 선정
- ⑤ R^2 값이 낮을 경우, 유한요소해석을 통한 오차 재평가

⑥ 기준 만족하는 파레토 해 확인, 없을 시 step 2 반복

Step 2를 반복할 경우, 새로운 CCD는 오차가 작은 회귀식을 구하기 위해 이전의 계산 결과를 이용하여 변수의 범위를 축소시켰다. 즉, 파레토 최적해 중에서 두 개의 목적함수가 각각 최소인 두 개의 파레토 해를 선택하고 새로운 CCD의 중심점을 이 두 개의 파레토 해 변수들의 평균으로 하였다. 변수의 범위는 선택된 파레토 해의 변수가 최소값 혹은 최대값이 되도록 범위를 줄였다. 이 범위 안에 최적값이 존재하지 않을 수도 있음을 고려하여 최소값과 최대값에 각각 0.9배와 1.1배를 하여 새로운 범위로 설정하였다.

3. 대상건물의 가진실험 및 동특성 추출

3.1 대상건물

대상건물은 표준설계도면에 의해 건설된 층고 3.3m인 지상 3층의 초등학교의 교사 한 동이다. Fig. 1은 기준층 평면을 나타낸 것으로 장변방향으로 4.5m의 스패인 19개의 베이가 있으나 12번째 라인을 따라 신축줄눈이 설치되어 좌측동(BD1)과 우측동(BD2)로 나뉘어져 있다. 이 건물은 현행 구조기준에 의한 검토결과, 지진하중에 대해 대부분의 부재에서 내력이 부족한 것으로 나타나 이를 확보하기 위한 내진보강이 이루어졌다. 즉, 그림과 같이 *y*축 방향으로는 7번째와 16번째 라인의 조적채움벽을 제거하고 1~3층에 걸쳐 200mm 두께의 전단벽을 신설하였으며, *x*축 방향으로는 기존 골조의 철골프레임 보강 및 보강골조와 연결된 댐퍼시스템을 설치하였다. 또한 환경개선을 위해 교실 및 복도바닥의 나무 마루를 철거하고 모르타르 마감으로 교체하였다.

대상건물의 진동실험은 최대 가진용량이 800kN인 소형 가진기를 이용한 백색잡음 가진실험으로 Fig. 1과 같이 가속도계를 설치한 후 가진기를 좌측동과 우측동으로 이동시키며 수행하였다.

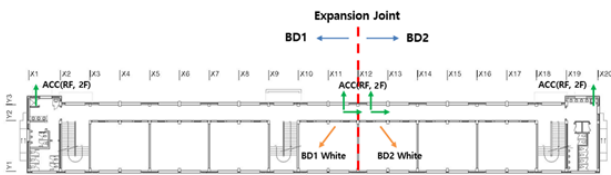


Fig. 1 Location and direction of shaker and accelerometers

3.2 시스템 식별

각 실험에서 얻어진 데이터로부터 부분공간식별법(subspace system identification method ; Van Overschee and De

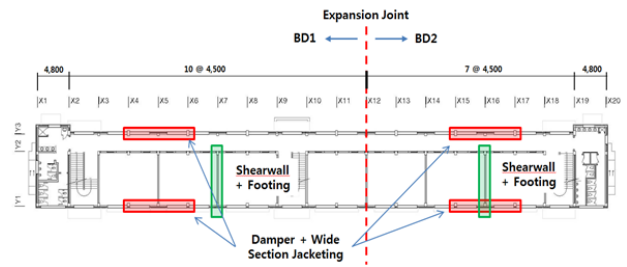


Fig. 2 Seismic retrofit of the building

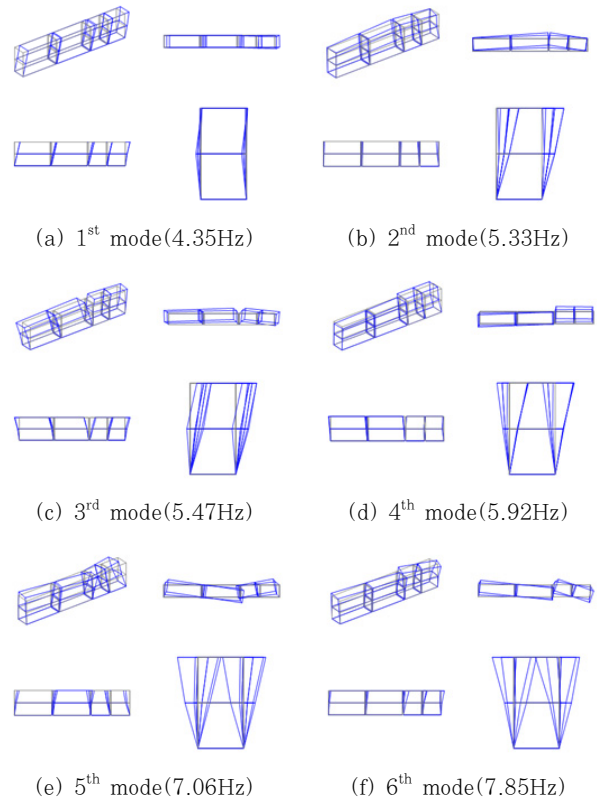


Fig. 3 Mode shapes obtained from system identification (before retrofit)

Moor, 1993)을 사용하여 동특성을 추출하였다. 시스템식별결과 최대 8차 모드까지 모드 추출이 가능하였다. Fig. 2는 6차까지의 모드형상을 나타낸 그림이다. 모드형상을 보면 두 건물이 신축줄눈에 의해 분리되도록 설계 및 시공되었지만 실제로는 어떠한 강성을 가지는 스프링으로 연결된 것과 같은 거동을 함을 알 수 있다.

Table 1은 내진보강 공사 전후의 고유진동수 및 감쇠비를 비교한 것이다. 내진보강 및 신축줄눈부의 보수에 따른 연결강성의 변화에 따라 고유진동수에 변화가 있으며 특히 변형형상에 해당하는 모드의 순서가 달라져 있음을 볼 수 있다. 우측동 가진 시 나타난 동특성도 표와 거의 동일하여 논문에 나타내지는 않았다.

Table 1 Measured natural frequencies and damping ratios before and after the retrofit

Mode	Natural frequencies(Hz)			Damping ratios(%)		
	Before	After	Ratio	Before	After	Ratio
X-dir in-phase	4.35(1)	4.22(1)	97%	2.23	2.69	121%
Y-dir in-phase	5.33(2)	5.71(2)	107%	2.47	1.99	81%
X-dir out-of-phase	5.47(3)	7.18(5)	131%	0.68	2.15	316%
Y-dir out-of-phase	5.92(4)	6.22(3)	105%	1.64	2.33	142%
Torsion in-phase	7.06(5)	6.76(4)	96%	1.49	1.76	118%
Torsion out-of-phase	7.85(6)	8.38(6)	107%	2.26	2.28	101%

4. 유한요소 모델링 및 모델 개선

본 연구에서는 Midas Gen(MIDAS IT)을 사용하여 해석을 실시하였다. 일반적인 구조설계를 위한 구조해석모델에서는 조적채움벽은 비구조체로 보고 무시하고 모델링한다. 하지만 본 실험과 같이 작은 크기의 진동에 대해서는 조적채움벽도 영향을 미칠 것으로 판단되어 쉘요소를 사용하여 채움벽을 모델링하였다. 조적벽은 고유치해석 수행시 발생하는 로컬 모드를 최소화하기 위해 질량을 0으로 하고 해당 질량은 하단의 보에 합산하였다. 시스템 식별 결과에서 나타난 바와 같이 신축줄눈을 사이에 둔 좌측동과 우측동은 서로 구조적 거동에 영향을 미치고 있으므로 이를 해석모델에 반영하기 위하여 양쪽을 탄성연결요소(elastic link)로 연결하였다. 또한 슬래브도 전체강성에 큰 영향을 미치므로 바닥판도 모델링하였다. 모델에 사용된 절점의 수는 24,014개, 부재의 수는 27,770개로 상당히 정밀하게 모델링하였다.

4.1 초기해석모델

대상건물의 질량으로는 정밀안전진단 보고서 및 실측을 통해 구조체의 자중 및 마감하중, 파라펫과 조적벽의 하중 등을 최대한 정밀히 산정하고 모델링에 반영하였다.

콘크리트의 탄성계수로는 정밀안전진단시 수행한 반발경도법에서 얻은 콘크리트강도를 근거로 산정하였다. KBC2009의 식 (4)을 사용하여 27209MPa의 탄성계수를 얻었으며 이를 초기해석모델의 기둥, 보, 계단, 슬래브의 탄성계수로 사용하였다.

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{ck}} \tag{4}$$

문헌(ACI 318, 2011)에 의하면 콘크리트의 품질관리와 응력의 크기에 따른 비선형성에 의해 탄성계수는 식 (4)로 계산된 값에서 20%정도의 오차를 가질 수 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서 중심합성법에서 콘크리트 탄성계수의 범위는 위의 값의 0.8배와 1.2배로 설정하였다.

조적채움벽의 탄성계수는 ASCE 41(2006)에 조적의 강도 f_m' 을 사용한 식 (5)가 제시되어 있는데 재료상태가 보통 상태인 경우 $f_m' = 4.14\text{MPa}$, 재료상태가 나쁜 경우 $f_m' = 2.07\text{MPa}$ 로 규정하고 있다.

$$E_m = 550 \times f_m' \tag{5}$$

신축줄눈부분에 해당하는 탄성연결요소 강성의 경우 평면도 및 상세도 등의 도면과 재료의 특성을 참고하여 초기 범위를 산정했다. 상세도에 신축줄눈의 이음재는 아스팔트 코킹으로 채워져 있는데, 이는 고무와 유사한 물질이라고 판단하여 탄성계수 E는 고무의 탄성계수인 0.7~4MPa를 사용하였으며, 전단탄성계수 G는 $G = E/3 \sim E/2$ 를 사용하였다. 그 결과 x방향의 강성은 8495~48542N/mm, y방향의 강성은 2832~24271N/mm로 산정되었다.

설계도서 및 실측, 정밀안전진단보고서 등의 자료를 토대로 만든 초기해석모델(조적의 탄성계수와 링크의 강성은 중간값 이용)의 고유치해석결과는 Table 2에 나타내었는데 계측을 통해 구한 동특성과 상당한 차이를 보였다. 1차부터 6차까지 고유진동수가 전체적으로 낮게 나왔으며 일부 모드에서 모드 형상이 다름을 알 수 있다. Table 3의 MAC은 모드형상간의 일관성을 나타내는 값으로 모드형상의 스케일 효과가 상쇄되어

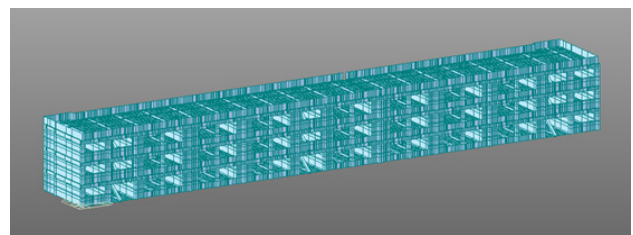


Fig. 4 FE modeling of the test building using MIDAS gen

Table 2 Natural frequencies and MAC values of initial FE model(before retrofit)

Mode	Natural frequencies(Hz)		Difference	MAC
	Measured	Analytical		
1st	4.35	3.87	-11.0%	0.96
2nd	5.33	4.87	-8.5%	0.64
3rd	5.47	5.03	-8.1%	0.84
4th	5.92	5.57	-6.0%	0.91
5th	7.06	6.13	-13.1%	0.92
6th	7.85	6.74	-14.1%	0.96

1일 경우 모드가 일치함을 나타내며 아래의 식과 같이 표현한다.

$$MAC_{ij} = \frac{|\phi_i^T \phi_j|^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)} \quad (6)$$

4.2 보강 전 모델 개선

보강전 모델의 모델개선에는 콘크리트와 조적조의 탄성계수 (E_c, E_m), 신축률누부 탄성연결요소의 x 및 y 방향 강성(k_x, k_y) 4가지를 개선변수로 사용하였다.

CCD를 위한 변수의 범위는 앞에서 언급한대로 E_c 의 경우 기준값의 0.8~1.2, E_m 의 경우 조적상태가 나쁨에서 보통일 경우로, k_x 은 8495~48542N/mm, k_y 는 2832~24271 N/mm로 설정하였다. CCD에서 변수가 4개이고 중심점이 하나일 경우 총 실험횟수는 25회가 된다. Table 3에 본 연구에서 사용한 실험계획 case에 따른 각 인자의 값을 나타내었다.

25회의 해석 결과를 바탕으로 반응표면법을 통해 4개의 변수로 이루어진 목적함수를 도출하였다. 목적함수로는 해석 모델과 계측치의 1차 모드부터 6차 모드까지 고유진동수 오차의

Table 3 1st Initial CCD table(before retrofit)

Order	Real Value			
	E_c	E_m	k_x	k_y
1	24488.1	1422.025	18506.75	8191.75
2	24488.1	1422.025	18506.75	18911.25
3	24488.1	1422.025	38530.25	8191.75
4	24488.1	1422.025	38530.25	18911.25
5	24488.1	1990.875	18506.75	8191.75
6	24488.1	1990.875	18506.75	18911.25
7	24488.1	1990.875	38530.25	8191.75
8	24488.1	1990.875	38530.25	18911.25
9	29929.9	1422.025	18506.75	8191.75
10	29929.9	1422.025	18506.75	18911.25
11	29929.9	1422.025	38530.25	8191.75
12	29929.9	1422.025	38530.25	18911.25
13	29929.9	1990.875	18506.75	8191.75
14	29929.9	1990.875	18506.75	18911.25
15	29929.9	1990.875	38530.25	8191.75
16	29929.9	1990.875	38530.25	18911.25
17	21767.2	1706.45	28518.5	13551.5
18	32650.8	1706.45	28518.5	13551.5
19	27209	1137.6	28518.5	13551.5
20	27209	2275.3	28518.5	13551.5
21	27209	1706.45	8495	13551.5
22	27209	1706.45	48542	13551.5
23	27209	1706.45	28518.5	2832
24	27209	1706.45	28518.5	24271
25	27209	1706.45	28518.5	13551.5

SRSS(square root of the sum of the squares)와 MAC 값의 평균 두 가지를 이용하였으며, 각 오차를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$e_1 = \sqrt{\frac{1}{6} \times \sum_{k=1}^6 \left(\frac{f_{k,analytical} - f_{k,measured}}{f_{k,measured}} \right)^2} \quad (7)$$

$$e_2 = \frac{1}{6} \times \sum_{k=1}^6 (1 - MAC_k) \quad (8)$$

목적함수는 2차 다항식의 형태로 도출되며, ANOVA를 통해 유의하지 않은 항들을 모두 제거한 결과는 다음과 같다.

$$J_1 = 0.69965 - 6.5272 \times 10^{-6} E_c - 0.0002975 E_m - 1.7444 \times 10^{-6} k_x - 2.4272 \times 10^{-6} k_y + 1.1704 \times 10^{-9} E_c E_m - 1.5584 \times 10^{-11} k_x k_y + 3.6142 \times 10^{-9} E_m^2 + 1.8416 \times 10^{-11} k_x^2 + 3.5298 \times 10^{-11} k_y^2 \quad (9)$$

$$J_2 = 0.4228 + 1.8119 \times 10^{-6} E_c + 1.904 \times 10^{-5} E_m - 5.075 \times 10^{-6} k_x - 2.555 \times 10^{-5} k_y + 7.672 \times 10^{-10} k_y^2 \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)의 R^2 (adj)값은 각각 0.999와 0.662로 나왔다. 모드형상과 관련된 목적함수에 해당하는 J_2 의 R^2 (adj) 값이 낮기 때문에 모드형상의 경우 목적함수의 결과와 실제 해석 결과는 차이가 있을 것으로 예상할 수 있다.

이렇게 구해진 두 개의 목적함수를 이용하여 NSGA-II 알고리즘을 이용한 다목적 최적화를 실시하여 총 18개의 파레토해를 얻을 수 있었다.

목적함수인 J_2 의 R^2 (adj)값이 상대적으로 낮기 때문에 각 파레토해에 해당하는 실제오차를 구조해석을 통해 산정하고 이를 Fig. 5에 나타내었다. 그래프를 살펴보면 가로축은 값이

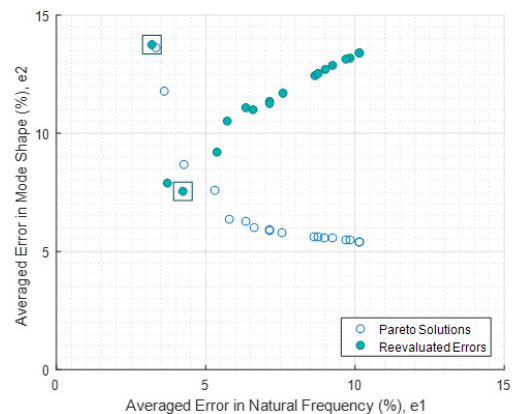


Fig. 5 Pareto solutions at iteration 1(before retrofit)

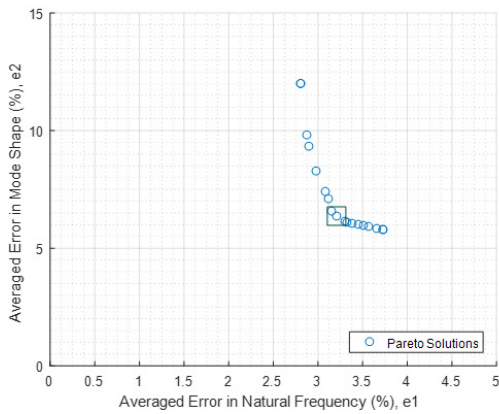


Fig. 6 Pareto solutions at iteration 2(before retrofit)

잘 맞지만 세로축의 값이 잘 맞지 않음을 알 수 있다. 예상했듯이 이는 식 A는 $R^2(\text{adj})$ 이 0.999로 높지만 식 B는 $R^2(\text{adj})$ 이 0.662로 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다.

이번 연구에서는 1차부터 6차 모드까지 계측치와의 고유진동수 오차가 5% 이하, MAC값이 0.9 이상인 해석 모델을 얻고자 하였다. 파레토 해의 결과중에 1차부터 6차 모드까지 고유진동수 오차의 평균 5%이하, MAC값의 평균이 0.9 이상인 case는 있지만 모든 모드에서 기준을 만족하지 않으므로 범위를 좁혀서 두 번째 중심합성계획을 실행하였다. 이를 위해 18개의 파레토 해 중에서 1차에서 6차모드까지 고유진동수 오차제곱의 합이 가장 작은 case와 MAC값의 평균이 가장 높은 case를 기준으로 범위를 새로 지정하였다. 두 개의 case에 대해 각각 4개의 설계변수 값이 최소값이나 최대값이 되도록 범위를 줄였으며, 이 범위 안에 최적값이 존재하지 않을 수도 있음을 고려하여 최소값과 최대값에 각각 0.9배와 1.1배를 하여 새로운 범위로 설정하였다.

새로운 범위를 이용하여 두 번째 중심합성계획을 실시하고 반응식을 도출한 결과 각 목적함수의 $R^2(\text{adj})$ 값은 0.992,

Table 4 Updated parameters (before retrofit)

Elastic modulus of concrete	28531MPa
Elastic modulus of masonry	2245MPa
Stiffness of elastic link in X direction	42382N/mm
Stiffness of elastic link in Y direction	19104N/mm

Table 5 Natural Frequencies and MAC values of updated model(before retrofit)

Mode	Messured	Analytical	Difference(%)	MAC
1st	4.35Hz	4.24Hz	-2.6%	0.96
2nd	5.33Hz	5.48Hz	2.9%	0.94
3rd	5.47Hz	5.63Hz	3.0%	0.92
4th	5.92Hz	6.18Hz	4.4%	0.92
5th	7.06Hz	6.84Hz	-3.1%	0.92
6th	7.85Hz	7.61Hz	-3.1%	0.97

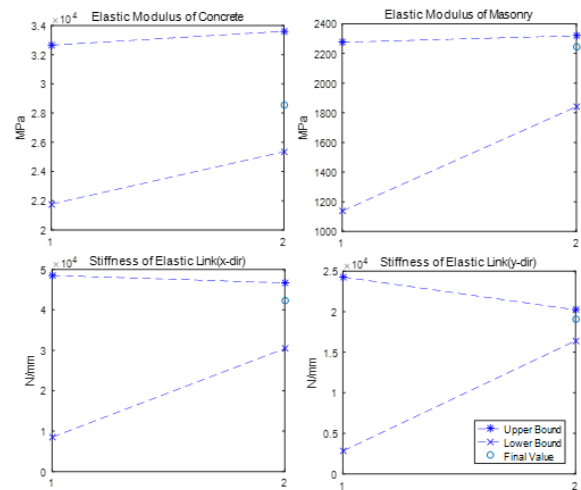


Fig. 7 Change of parameters with iteration (before retrofit)

0.986으로 충분히 높았다. 따라서 각각의 파레토 해에 해당하는 실제 오차를 모두 확인하지 않았으며, 그래프 상에서 원점과 거리가 가장 가까운 해를 선택하여 기준을 만족하는지 확인하였다. 이에 대한 고유치해석 결과 설정된 기준인 1차부터 6차 모드까지 모든 모드에서 계측치와의 고유진동수 오차 5% 이하, 모든 모드에서 MAC값 0.9 이상을 만족하는 모델을 얻었으며, 이를 보강 전 최종 모델로 결정하였다.

결정된 보강 전 모델과 고유치해석 결과는 Table 4와 Table 5에 나타내었으며, 반복계산시 변수범위의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

4.3 보강 후 모델 개선

보강후 건물의 초기모델은 보강전 모델의 개선을 통해 구한 해석모델을 수정하여 구하였다. 즉, 기존 콘크리트의 탄성계수와 조적의 탄성계수는 모델개선을 통해 얻은 값을 그대로 사용하고, 내진보강의 위해 변경된 부분을 모델링에 반영하였다. 즉, 전단벽이 설치된 부분의 쉘요소를 철근콘크리트로 변경하고 두께를 200mm로 증가시켰으며 댄퍼를 위해 설치된 가새는 단면과 형상을 그대로 모델링에 반영하였다. 철골단면이 증설된 부분의 경우 별도로 모델링하지 않고 기존 기둥과 보부재에 증설된 부분을 고려하여 유효강성계수를 증가시켰다. 점성댄퍼는 해당위치의 가새 노드와 기둥 노드를 Elastic Link를 이용하여 연결하고 Link의 강성으로 댄퍼의 물성치인 350kN/mm를 사용하였다. 또한 바닥보수로 인한 바닥판 질량을 증가를 고려하였다.

보강 후 초기해석모델의 고유치해석결과는 Table 6에 나타내었으며 계측을 통해 구한 동특성과 상당한 차이를 보임을 알

Table 6 Natural frequencies and MAC values of initial FE model(after retrofit)

Mode	Natural frequencies(Hz)		Difference	MAC
	Measured	Analytical		
1st	4.22	4.12	-2.4%	0.99
2nd	5.71	5.42	-5.0%	0.40
3rd	6.22	5.61	-9.8%	0.24
4th	6.76	6.14	-9.2%	0.02
5th	7.18	6.73	-6.3%	0.54
6th	8.38	7.50	-10.5%	0.66

수 있다. 전체적으로 고유진동수가 낮게 나왔으며 모드형상도 1차 모드를 제외하고 잘 맞지 않음을 알 수 있다.

보강 후의 개선변수로는 강성에 영향을 미치는 신설 전단벽의 탄성계수, 댐퍼 설치를 위한 합성단면의 유효강성계수, 보강 공사를 통해 특성치가 변화한 신축줄눈부분의 elastic link의 x 및 y 방향 강성 총 4가지로 정하였다.

CCD를 위한 변수의 범위로는 신설전단벽이 기존 보의 상하단에 설치되므로 실제 강성은 일체식의 경우보다 낮을 것임을 감안하여 전단벽 콘크리트의 설계강도를 사용하여 산정된 탄성계수의 5~100%를 범위로 설정하였으며, 보강단면의 유효강성계수는 완전합성단면일 경우의 5~100%로 하였다. 또한 x 및 y 방향의 링크 강성은 보강 전 모델에서 결정된 강성의 100~300%로 설정하였다.

반응표면법을 이용하여 회귀분석한 결과 두 목적함수의 R^2 (adj) 값은 각각 0.65와 0.991으로 나타났다. 보강 전의 경우와 같이 식 1개의 R^2 (adj) 값이 상대적으로 낮아서 파레토 해에 해당하는 실제오차를 구조해석을 통해 다시 산정하였다. 두 번째 CCD를 이용한 목적함수의 R^2 (adj) 값은 각각 0.991, 0.995로 충분히 높은 값이 나왔으며 보강 전과 마찬가지로 그래프 상에서 원점과 거리가 가장 가까운 해를 최종해로 선택하였다.

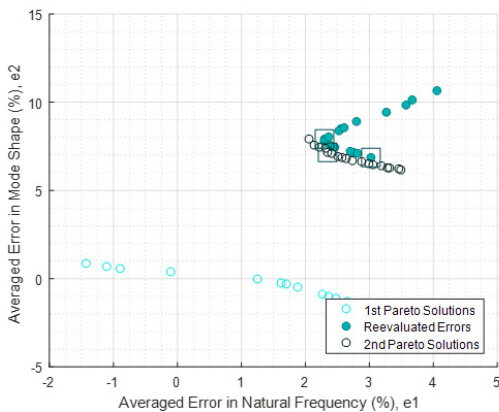


Fig. 8 Pareto solution(after retrofit)

Table 7 Updated parameters (after retrofit)

	Before retrofit	After retrofit
E_c	28531MPa	28531MPa
E_m	2245MPa	2245MPa
k_x	42382N/mm	132116N/mm
k_y	19104N/mm	49203N/mm
Effective factor of stiffness	-	22.2%
E of shear wall	-	3159MPa

Table 8 Natural Frequencies and MAC values of updated model(after retrofit)

Mode	After retrofit			
	Measured	Analytical	Difference(%)	MAC
1st	4.22	4.05	-4.0%	1.00
2nd	5.71	5.55	-2.7%	0.97
3rd	6.22	6.14	-1.3%	0.93
4th	6.76	6.77	0.1%	0.96
5th	7.18	7.24	1.0%	0.95
6th	8.38	8.60	2.6%	0.90

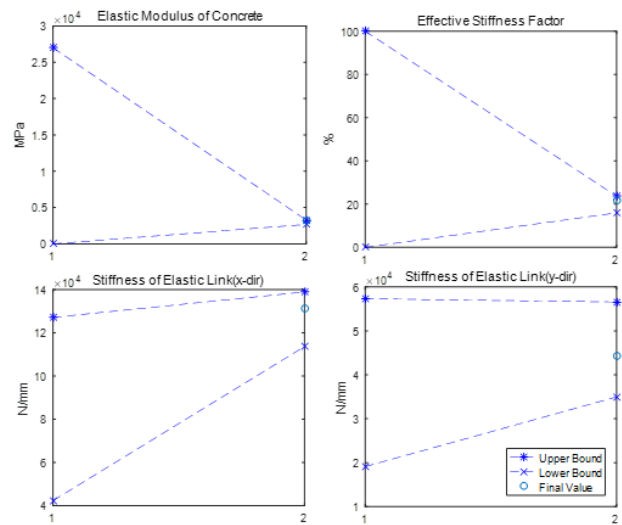


Fig. 9 Change of parameters with iteration(after retrofit)

결정된 보강 후 모델과 고유치해석 결과는 다음의 Table 7과 Table 8에 나타내었으며, 변수 범위의 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

신설전단벽과 댐퍼 프레임의 유효강성은 상당히 낮은 값을 가짐을 볼 수 있다. 그 원인은 명확히 않으나 새롭게 타설된 콘크리트의 수축으로 인해 기존 콘크리트와의 접합면에 존재할 수 있는 미세한 틈새의 영향으로 추정할 수 있다. 하지만 더 큰 하중이 작용할 경우에도 여전히 낮은 강성을 유지할지와 이러한 강성이 보강효과에 미치는 영향은 추후 연구를 통해 규명될 필요가 있다고 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 반응표면법과 다목적최적화 기법을 이용한 모델개선기법의 절차를 제안하고 이를 상용프로그램으로 모델링된 실제 구조물의 모델 개선에 적용하였다. 대상건물은 저층의 철근콘크리트 골조 건물로 전단벽 신설 및 단면증설을 통한 부재보강 등의 내진보강이 이루어진 건물로 본 연구에서 제안된 절차를 통해 내진보강 전후 상태를 나타내는 해석모델을 구축하였다. 개선변수로는 내진보강 전의 경우 구조물의 강성에 큰 영향을 미치는 요소인 콘크리트와 조적의 탄성계수 및 신축률로 분리된 건물의 좌우 커플링 거동에 영향을 미치는 Elastic link의 강성을 사용하였고, 내진보강 후 모델의 경우 신설 콘크리트의 탄성계수, 단면증설이 이루어진 부재의 강성, 변화된 Elastic link의 강성이었다.

이를 위해 설계도면 혹은 안전진단결과를 근거로 개선변수의 초기범위를 결정한 후 중심합성법에 따라 변수조합을 구하고 구조해석을 실시한 후 반응표면법을 사용하여 고유진동수와 모드형상의 오차에 해당하는 두 개의 회귀식을 산정하였다. 산정된 두 회귀식을 사용하여 다목적최적화를 실시하고 파레토해를 얻었다. 하지만 반응표면법은 변수 범위가 넓을 경우 정확한 회귀식을 구하지 못하는 한계를 가지고 있어 산정된 파레토해의 조사를 통해 변수범위를 축소시키고 동일한 절차를 통한 반복계산을 수행하여 최종해를 구하였다.

본 연구에서 제시된 모델개선절차는 기존의 민감도기반 모델개선을 적용하기 어려운 상용프로그램을 사용하여 구축된 해석모델의 개선에 적용될 수 있는 효과적인 가이드라인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

References

ASCE/SEI (2007) Seismic Rehabilitation Standards Committee, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-06), American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Hasselmann, T., Lloyd, G. (2008) A Top-down Approach to Calibration, Validation, Uncertainty Quantification and Predictive Accuracy Assessment, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 197(29), pp.2596~2606.

Kalyanmoy, D., Amrit, P., Sameer, A., T. Meyarivan (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 6(2), pp.182~197.

Kim, G.H., Park, Y.S. (2001) HDD Cover FE Model Updating using Multiobjective Optimization, *Korean Soc. Noise & Vib. Eng.*, pp.565~570.

Kim, S.W. (2016) Fundamentals of Statistics, Hakjisa Corp.

Korea Buiding Code (2009) Architectural institute of Korea. Ministry of Land, Tranport and Maritime Affairs.

MIDAS IT (2004) MIDAS/GEN Version 6.3. 2 User's Manual, Computer Program,

Park, S.H. (2003) Design of Experiments, Minyung Publishing Co.

Fang, S.E., Perera, R. (2009) A Response Surface Methodology Based Damage Identification Technique, *Smart Materials and Structures*, 18/065009(14pp).

Standard, A.A. (2011) Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11), American Concrete Institute.

Van Overschee, P., De Moor, B. (1993) N4SID: Numerical Algorithms for State Space Subspace System Identification, *In Proc. of the World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC*, 7, pp.361~364.

Wei-Xin, R., Hua-Bing, C. (2010) Finite Element Model Updating in Structural Dynamics by using the Response Surface Method, *Eng. Struct.*, 32, pp.2455~2465.

요 지

본 논문에서는 반응표면법과 다목적최적화 기법을 이용한 유한요소모델개선기법의 절차를 제안하고 이를 저층의 철근콘크리트건물의 모델개선에 적용하였다. 대상건물은 전단벽 신설 및 댐퍼부착을 위한 부재의 강제보강을 통해 내진보강이 이루어진 건물로서 보강전후에 소형 가진기를 이용한 진동실험을 실시하여 동특성을 구하였다. 대상건물의 개선에 사용된 변수는 기존콘크리트, 신규타설된 콘크리트, 조적의 탄성계수, 신축률의 스프링계수, 강제보강된 부재의 유효강성비이다. 보강전후 건물의 초기모델을 구축한 후 중심합성법에 따라 개선변수의 값을 변화시키면서 얻은 해석결과를 통해 고유진동수의 오차와 모드형상의 오차를 나타내는 2개의 반응함수를 구하고, 이를 다목적최적화의 목적함수로 사용하였다.

핵심용어 : 유한요소모델개선, 반응표면법, 다목적최적화, 진동실험, 시스템 식별, 내진보강