

# 재해석 기법을 이용한 동적 구조시스템의 System Identification

## System Identification of Dynamic Systems Using Structural Reanalysis Method

한경봉\*                      박선규\*\*                      김형열\*\*\*  
Han, Kyoung Bong    Park, Sun Kyu    Kim, Hyeong yeol

---

### ABSTRACT

Model updating is a very active research field, in which significant efforts has been invested in recent years. Model updating methodologies are invariably successful when used on noise-free simulated data, but tend to be unpredictable when presented with real experimental data that are-unavoidably-corrupted with uncorrelated noise content. In this paper, Reanalysis using frequency response functions for correlating and updating dynamic systems is presented. A transformation matrix is obtained from the relationship between the complex and the normal frequency response functions of a structure. The transformation matrix is employed to calculate the modified damping matrix of the system. The modified mass and stiffness matrices are identified from the normal frequency response functions by using the least squares method. Full scale pseudo dynamic pier test is employed to illustrate the applicability of the proposed method. The result indicate that the damping matrix of correlated finite element model can be identified accurately by the proposed method. In addition, the robustness of the new approach uniformly distributed measurement noise is also addressed.

---

### 1. 서론

구조물의 손상추정을 위해서나 구조물의 효율적인 변경위치를 찾기 위해서는 구조계 원래의 특성을 찾아내는 것이 중요하다. 그러나, 실제 구조계의 동적 거동을 예측하는데 수학적인 모델이 실제 실험에서 측정된 결과와 비교하여 그 거동양상을 정확하게 예측하지 못하는 문제에 자주 접하게 된다. 수학적 모델의 불일치는 시스템에서 부정확한 변수의 원인이 된다. 그러므로, 구조모델의 정확한 Dynamic Parameter를 찾아내는 것은 매우 중요하며 구조추정이나 손상추정 그리고 구조설계 등의 분야에 널리 활용될 수 있을 것이다.

---

\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교량공학연구실 박사 후 연구원

\*\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

대부분의 구조추정 방법들은 계측데이터에서 노이즈가 포함되어 있지 않으면 그 방법이 비교적 정확하다고 할 수 있으나, 임의의 노이즈가 데이터에 포함이 되면 그 효용성에 문제를 발생시켰다. 특히, 구조물의 감쇠가 특별히 크지 않은 복잡한 경우 노이즈가 섞인 실험데이터로부터 감쇠행렬을 추정하는 것은 매우 어려운 일이다. 기존에는 계측데이터로부터 질량과 강성행렬을 찾아내는 방법에 초점을 맞추어 연구를 진행해 왔으나 최근 들어 구조물의 감쇠에 대한 영향을 고려하고자하는 노력이 많이 진행되고 있다.<sup>1)</sup>

이에 본 연구에서는 한경봉 등(2004)<sup>1)</sup>이 제안한 Parameter Updating Reanalysis Method를 사용하여 구조재해석을 수행하였다. 제안 방법은 구조물의 진동수응답함수(FRF)를 이용하여 보정된 상관해석모델을 구하는 방법으로서 이를 위해서 변환행렬을 산정하고, Least Square Method에 의해 노이즈가 제거된 FRF를 이용하여 상관해석모델의 응답수정 감쇠를 질량 및 강성행렬과 무관하게 독립적으로 추정한다. 또한 제안 방법은 상관해석모델의 응답수정 질량과 강성을 응답수정 감쇠와 무관하게 독립적으로 추정할 수 있는 방법이다. 본 논문에서는 제안된 재해석 기법의 효용성을 증명하기 위해 실물 크기의 교각을 제작하여 유사동적실험을 실시하였고, 그 결과 제안된 방법이 기존의 방법에 비하여 보다 높은 정밀도를 갖는 상관해석모델을 추정하였다. 그리고, 제안된 방법이 노이즈가 섞인 상태의 측정 데이터를 이용하여도 보다 높은 정확도를 갖는 상관유한요소모델 추정이 가능함을 알 수 있었다.

## 2. 제안된 재해석 기법의 효용성을 검증하기 위한 실물 크기의 교각 실험

제안된 재해석 기법의 효용성을 검증하기 위하여 본 논문에서는 실제 교각에서 선정된 교각의 유사동적실험을 통해 교각의 Dynamic Parameter를 찾고자 하였다. 이를 위해 기존 교각의 받침이 적용된 Non-Isolated 실험체 1개 그리고 지진격리장치 LRB를 적용한 Isolated 실험체 1개 등 총 2개의 실험체를 제작하였고, 각각의 구조별 동적특성과 지진을 경험한 후의 Dynamic Parameter의 변화를 실험적으로 규명하였다. 교각의 유사동적실험에 사용된 지진가속도는 El Centro (NS, 1940) 지진을 사용하였다. 실험개요도와 가력지진가속도는 그림 1과 같고, 실험체의 상세 설계도는 그림 2와 같다.

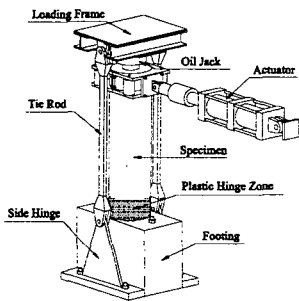


그림 1 교각 실험체의 유사동적실험 설치개요도와 가력지진가속도

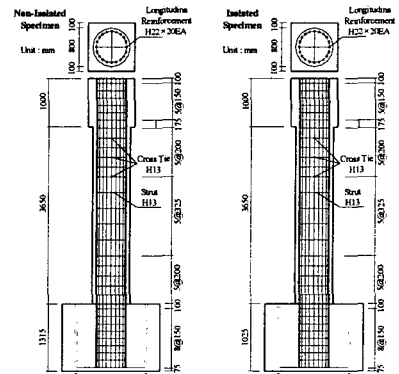
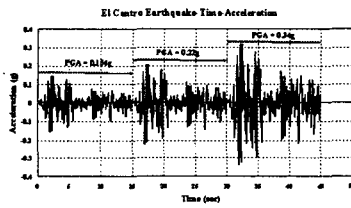


그림 2 실험체의 상세 설계도

본 실험에서는 Actuator의 가력하중과 받침 또는 교각 실험체의 변위 데이터를 얻기 위하여 Actuator에 내장되어 있는 Loadcell과 LVDT에 의해 그 값을 측정하였다. 그리고, 교각과 받침의 상대변위를 측정하기 위하여 별도로 Wire-DT를 받침에 연결하여 그 변위를 측정하였다. 그리고 각 교각 실험체의 상면과 기초부 상면에 경사계를 설치하여 회전곡률을 측정하여 휨-모멘트 관계를 파악하고자 하였으며, 균열계이치를 설치하여 지진하중 단계별 균열폭 및 최대 균열폭을 측정하였다. 각각의 실험체별로 게이지 설치 위치 및 세부사항은 그림 3과 같고 계측 기구의 모습은 그림 4와 같다.

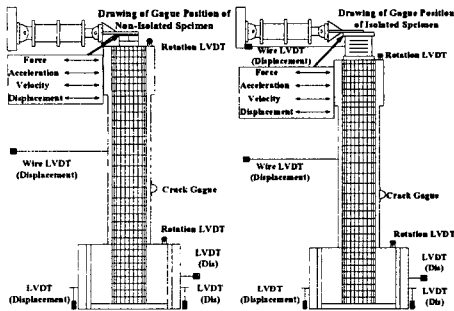


그림 3 실험체의 계측 현황

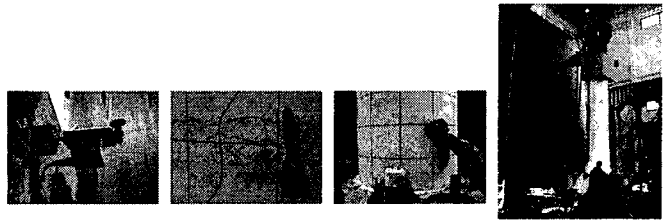


그림 4 계측 기구 상세

### 3. 실험 결과 및 분석

본 논문에서 실물 교각의 실험 결과를 이용하여 Dynamic Parameter를 찾는 재해석 기법은 한경봉 등(2004)이 제안한 Parameter Updating Reanalysis Method를 사용하였으며 Non-Isolated 실험체와 Isolated 실험체에서 실험 결과 추정된 대표적인 Dynamic Parameter는 그림 5~6과 같다.

본 논문에서는 제안된 재해석 기법의 상대적인 효용성 비교를 위해 Roemer(1992)<sup>2)</sup>의 수치적인 반복 방법과 Cha(2000)<sup>3)</sup>가 제안한 함수 증분방법(Increasing Function Method)을 실험체의 계측 결과를 바탕으로 동시에 수행하였다. 이러한 타 연구와의 상대 비교는 제안된 Parameter Updating Reanalysis Method의 효용성을 상대적으로 입증하기 위함이며, 결과적으로 타 연구자가 제안한 두 가지 방법과 본 연구에서 제안한 방법을 더불어 사용하여 실험체의 Dynamic parameter를 실험적으로 추정하였다.

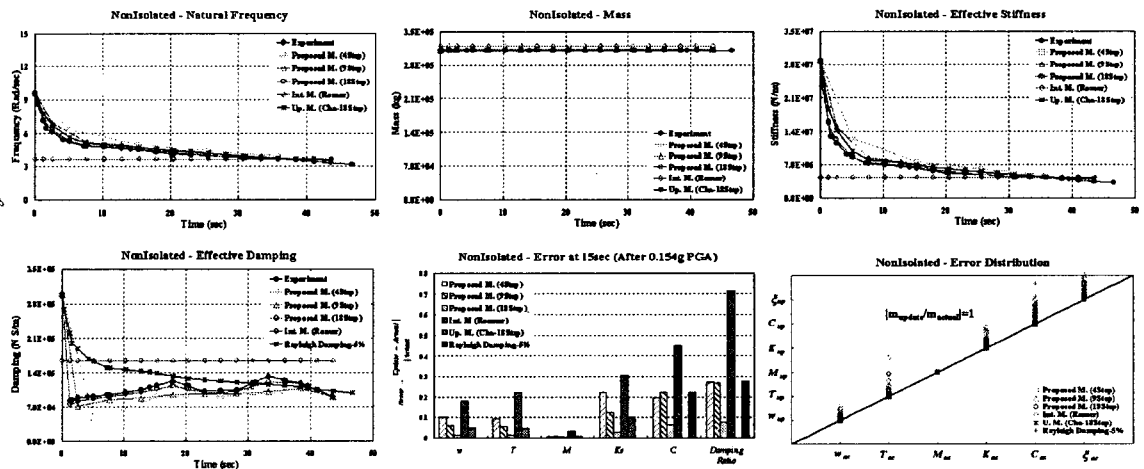
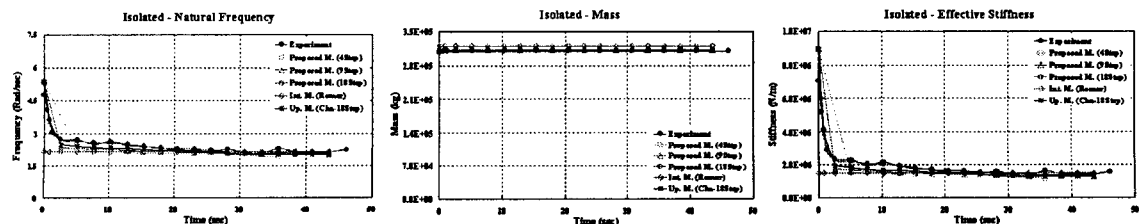


그림 5 Non-Isolated 실험체에서 추정된 Dynamic Parameter와 Error 분포



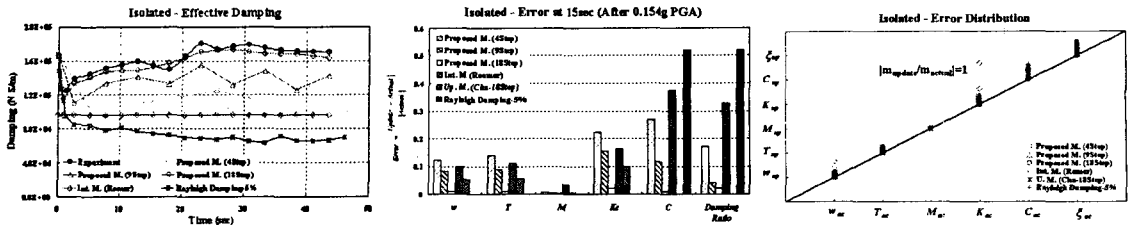


그림 6 Isolated 실험체에서 추정된 Dynamic Parameter와 Error 분포

그림 5-6의 실험결과에서 확인할 수 있듯이 제안된 재해석 방법이 Roemer나 Cha의 방법보다 정확도에 있어서 상대적으로 월등히 높음을 알 수 있었다. 이 중에서 Roemer의 방법은 응답수정모델을 사용하여 구조계를 Updating하는 방법이 아니므로 실험에서 계측된 데이터를 하나의 Step으로 판단하며, 구조계의 Dynamic Parameter를 한가지의 경우밖에는 추정하지 못하기 때문에 본 실험과 같이 지진가속도의 시간이력이 길고 시간이력별 Dynamic Parameter의 변화가 큰 경우에는 구조추정의 방법으로 사용하기가 불가능하다고 판단된다. Cha의 함수 증분법의 경우는 제안된 Parameter Updating Reanalysis Method와 유사하게 응답수정모델을 사용하여 구조계를 Updating하는 방법이기도 하나 재해석 방법의 특성상 제안된 방법과 비교하였을 때 실제 실험체의 Dynamic Parameter를 추정하는데 있어서 재해석 Step을 월등히 많이 사용할 수밖에 없다. 실제로 제안된 재해석방법에서는 9Step의 재해석 Step을 사용하여 Dynamic Parameter를 구한 경우보다 두 배정도 많은 19Step의 재해석 Step을 사용하여도 그 정확도가 상대적으로 떨어짐을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

제안된 Parameter Updating Reanalysis Method는 해석에서 가정된 기준해석모델과 실제모델과의 차이인 응답수정값을 Modal Data가 아닌 Dynamic Parameter로서 직접 추정이 가능하다. 이는 시스템을 정의한 뒤 구조 재해석 과정에서 구조계의 Dynamic Parameter들을 직접적으로 찾음으로써 시스템의 현 상황을 알아내고, 우리가 원하는 상태의 시스템이 가져야할 Parameter값과 구조 재해석 과정을 통해 찾아낸 값을 비교 검토하여 Parameter들을 조정할 수 있는 Parametric System Identification Reanalysis 방법이라 할 수 있다. 또한 교각의 유사동적실험 결과 예측되는 목표 수준의 지진하중을 경험한 구조물의 변화된 Dynamic Parameter를 제안방법을 사용하여 상대적으로 명확하게 파악할 수 있었다. 만약 실제 구조물에서 지진하중이 가해졌을 때의 계측 데이터가 존재한다면, 제안된 방법을 사용하여 변화된 Dynamic Parameter를 명확하게 알 수 있을 것이다. 이는 현재 상태를 바탕으로 한 구조물의 성능평가가 정확하게 수행될 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있으며, 구조물의 보수·보강에 대한 판단 기준이 될 수 있다. 만약 보수·보강이 필요하다면 보수·보강 후 구조물이 확보해야할 Dynamic Parameter를 제시하는 데에도 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. 한경봉, 박선규(2004), "FRF를 이용한 동적 구조 시스템의 구조추정 및 재해석", 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, 제 17권 제 1집, pp. 49~56.
2. Roemer, M. J. and Mook, d. J.(1992), "Mass, stiffness, and damping matrix identification: an integrated approach," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 114, July, pp. 358~363.
3. Cha, d. P. and Tuck-Lee, P. J.(2000), "Updating structural system parameters using frequency response data," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 12, December, pp. 1240~1246.