

# 모델개선기법과 반강접 접합부 모델을 이용한 부재단부 손상탐지

## Detection of Damage at the Ends of Members using Finite Model Updating and Semi Rigid Connection Model

유 은 종\* · 김 승 남\*\* · 이 현 국\*\*\* · 최 항\*\*\*\*

Yu, Eun-Jong · Kim, Seung-Nam · Lee Hyun-Kook · Choi, Hang

### 요 약

일반적으로 모델개선에서는 부재단위의 강성을 파악하기 때문에 구조물의 취약부인 부재단부의 손상이 집중될 경우 손상의 형태를 세밀히 파악하기 어려우며 손상된 구조물의 거동을 정확하게 모사하기 어려운 단점이 있었다. 이를 해결하기 위해서는 부재 단부에 발생한 손상을 고려할 수 있는 좀 더 정밀한 해석 모델을 통한 모델개선이 필요하다. 본 연구에서는 부재 단부에 반강접 접합을 가지는 해석모델을 사용해 모델 개선을 실시하고 이를 통해 접합부의 손상 평가와 손상 구조물의 거동을 파악하였다. 제안된 방법을 5층 1경간의 RC 벽식 실험체의 손상탐지에 적용하였으며 그 결과 부재단위 모델을 사용할 때보다 더욱 정확하게 구조물의 손상을 평가하고 거동을 모사할 수 있었다.

**keywords** : 유한요소모델개선기법, 반강접 접합, 접합비

### 1. 서 론

모델개선기법은 구조물이 손상탐지를 위한 유용한 해석적인 기법중의 하나로써, 손상전후 구조물의 계층치를 모사하는 해석모델을 구한 후 각 해석모델에서 부재별 강성을 비교하여 손상의 위치 및 정도를 추정한다. 이때 일반적인 방법은 부재별 혹은 부재그룹별로 휨강성을 개선파라미터로 사용하므로 손상추정을 위해 비교되는 값은 부재단위의 휨강성이다. 하지만 대부분의 골조구조물은 초과하중 작용시 기둥과 보의 단부에서 휨항복에 의한 소성힌지, 즉 손상이 먼저 발생하도록 설계되며 이에 따라 손상부위도 부재 전체보다는 단부에 집중된다. 부재별 휨강성을 통해 손상을 추정할 경우 손상위치의 추정에는 큰 문제가 없지만 이 경우 모델개선을 통해 얻은 해석모델의 거동은 실제 구조물의 층간변위 분포 및 변형모드(즉, 골조의 진단변형 혹은 캔틸리버와 같은 휨변형인지)와 차이를 보이게 된다. 따라서 좀더 정확히 실제 구조물의 거동을 모사하기 위해서는 부재별 강성값보다는 부재 단부에 발생하는 소성힌지를 고려할 수 있는 해석모델이 필요하다.

본 연구에서는 이를 위해 부재 단부에 반강접 접합부를 가지는 해석모델을 사용해 모델 개선을 실시하고 이를 통해 접합부별 손상 평가가 가능한 손상탐지기법을 제안하고 이를 부재단부에 손상이 집중되는 파괴거동을 보인 5층 1경간의 RC 벽식 실험체에 적용하였다.

\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 조교수, eunjongyu@hanyang.ac.kr

\*\* 학생회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정, maang2@naver.com

\*\*\* GS건설, 전임연구원, hklee01@gsconst.co.kr

\*\*\*\* GS건설, 수석연구원, 공학박사

## 2. 반강접 접합

보 요소의 강성행렬을 계산할 때, 접합부는 모멘트-상대 회전각 관계에 따라 강접합, 핀접합, 반강접 접합의 세 가지로 분류할 수 있다(그림 1, (a)).

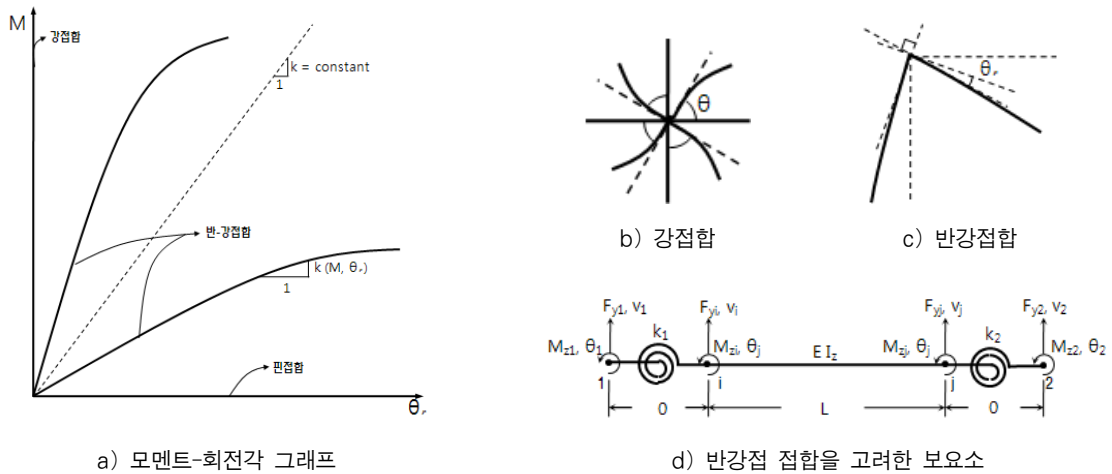


그림 1 접합의 종류

반강접 접합을 갖는 보요소의 강성행렬은 그림 1, (d)와 같이 부재의 단부를 길이가 0 이고  $k_i$ 의 회전강성을 가지는 스프링요소로 치환하고 정적응축을 통해 다음과 같이 구할 수 있다. 식에서  $\alpha_i$ 는 강접합일 경우 무한대의 값, 0일 경우 핀접합이 되며 그 사이 임의의 값을 가질 경우 부재사이에 상대적인 회전각을 가지는 반강접접합에 해당한다. 따라서 단부의 손상이 클 경우 이값이 작아지며 손상이 없을 경우는 무한대의 값을 가진다고 볼 수 있다. 하지만 이를 모델개선에 적용할 경우 0에서부터 무한대로 변화하는 값을 구하기는 힘들기 때문에 본 연구에서는 식 (2)와 같이 이 값을 접합비(Connection Percentage,  $\nu$ )라는 값으로 치환하여 사용하였다. 이렇게 치환된 접합비는 핀접합일 때는 0을, 강접합일 때는 1을 가져 모델개선키에 적용하기 용이하다

$$\hat{\mathbf{K}}_{cc} = \alpha \begin{bmatrix} \frac{12}{L^2} \left(1 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2}\right) & \frac{6}{L} \left(1 + \frac{2}{\alpha_2}\right) & -\frac{12}{L^2} \left(1 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2}\right) & \frac{6}{L} \left(1 + \frac{2}{\alpha_1}\right) \\ & 4 \left(1 + \frac{3}{\alpha_2}\right) & \frac{6}{L} \left(1 + \frac{2}{\alpha_2}\right) & 2 \\ & & \frac{12}{L^2} \left(1 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2}\right) & -\frac{6}{L} \left(1 + \frac{2}{\alpha_1}\right) \\ & & & 4 \left(1 + \frac{3}{\alpha_1}\right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sym.

$$\nu_i = \frac{\alpha_i}{3 + \alpha_i} \quad (2)$$

### 3. 모델개선을 통한 손상탐지

앞서 제시한 반강직 집합을 고려한 모델을 사용한 유한요소모델개선기법의 적용을 위해 김학진 등(2007)의 연구에서 실시한 다음과 같은 구조물의 지진동 가진실험에 의해 측정한 가속도 데이터를 사용하였다. 구조물은 1/5로 축소된 5층 1경간 규모의 벽식 콘크리트 구조물이다. 실험은 진동대를 이용해 지진동 가진실험을 실시하였다. 이때 사용한 지진 데이터는 각각 PGA가 0.06g, 0.12g, 0.20g, 0.30g, 0.40g, 0.50g 가 되도록 조절한 El Centro(S00E, 1942)이다. 실험 후 그림 2처럼 1층 벽 하부와 2, 3, 4층 바닥에 균열이 발생했다.

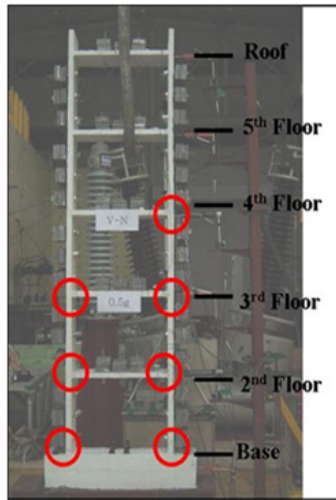


그림 2 실험체 및 균열 위치

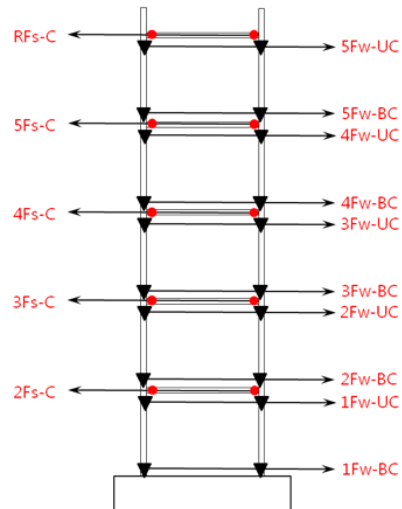
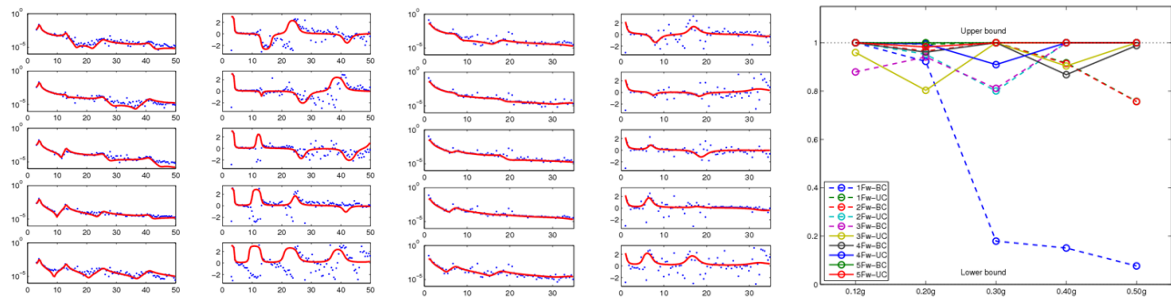


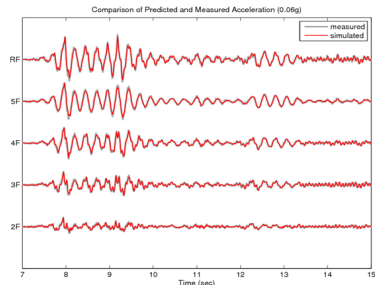
그림 3 손상탐지에 사용된 접합비 그림



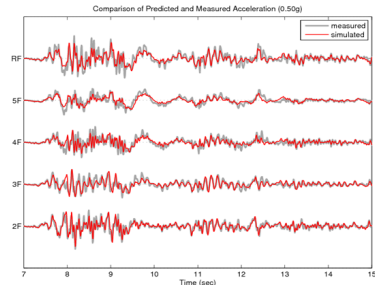
a) 주파수 응답함수(청 : 실제, 홍 : 모델)

a) 주파수 응답함수(청 : 실제, 홍 : 모델)

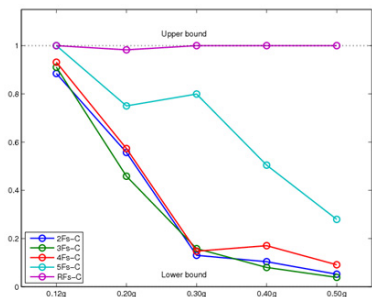
a) 벽체 접합비



b) 가속도응답 비교(회 : 실제, 홍 : 모델)



b) 가속도응답 비교(회 : 실제, 홍 : 모델)



b) 바닥 접합비

그림 4 모델개선 결과(PGA 0.06g)

그림 5 모델개선 결과(PGA 0.50g)

그림 6 접합비

모델 개선에 의한 손상탐지는 다음과 같이 진행된다. 먼저 손상 전 구조물(PGA 0.06g)에 대해서 계측된 동적응답을 통해 동특성(고유진동수, 주파수 응답함수)을 추출한 후, 이론 초기 모델의 민감도와 동특성의 간차를 계산해 모델 개선을 실시하여 손상 전 구조물에 대한 모델을 만든다. 그리고 손상 이후의 구조물(PGA 0.12g ~ 0.50g)에 대해 같은 방법으로 모델개선을 실시한다. 이때 개선변수로는 그림 3과 같은 부재그룹의 접합비를 사용하였다. 이렇게 구해진 손상 후 구조물에 대한 모델과 손상 전 구조물에 대한 모델간의 비교를 통해 손상의 위치와 손상 정도를 파악한다.

손상 전(PGA 0.06g)과 후(PGA 0.50g)의 모델개선 결과를 보면 그림 4, 5와 같다. 그림을 살펴보면 PGA 0.06g 모델은 실제 실험체를 거의 유사하게 모사하나, PGA 0.50g 모델은 주파수 응답함수, 가속도 응답에서 오차가 생기는 부분이 존재한다. 이는 실제 실험체의 경우 손상이 과도하게 발생하며 구조물이 비선형으로 거동하는 반면, 모델 개선에서 사용한 해석모델은 선형 거동만을 고려하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 그림 6의 접합비를 살펴보면 PGA 0.30g 가진실험에서 1층 벽 하부와 2, 3, 4층 바닥에서 큰 폭으로 저감 이 있었고 이는 이 부분에 손상이 발생했음을 의미하고, 이 손상의 위치는 실제 손상 위치와 일치했다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 손상이 부재 단부에 집중된 구조물의 손상을 효과적으로 탐지하고 그 거동을 정확히 예측하기 위해 반강접 접합을 고려한 모델을 사용해 유한요소 모델개선을 실시하는 방법을 제안하였다. 그리고 제안된 방법은 RC 벽체 구조물의 PGA를 다양하게 변화시킨 지진동 가진 실험을 통해 계측한 데이터를 이용해 검증하였다. 반강접 접합을 가지는 부재의 강성행렬은 부재의 단부를 회전강성을 가지는 스프링 모델로 치환한 후 정적응축을 통해 구하였으며, 접합강성을 손상지표로 사용하여 모델개선을 실시하였다.

모델 개선을 통해 얻은 개선 모델은 실제 실험체의 동특성 및 가속도 응답 등을 거의 유사하게 모사하고 있었다. 모델 개선을 통한 손상탐지 결과로 얻은 손상의 위치 역시 실제 실험에 의한 구조물의 손상 위치와 일치해 반강접 접합을 갖는 모델을 사용해 손상탐지를 하는 것이 접합부 손상이 발생하는 구조물의 손상탐지에 효과적임을 알 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발 사업(과제번호:07도시재생B04) 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 김학진, 김호근, 유은종, 이상현, 조승호, 정란, (2007), 유한요소모델수정기법을 통한 철근콘크리트조 벽식구조물 실험체의 강성추정, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 27(1), pp.107-110
- Türker, T., Kartal, M.E., Bayraktar A., and Muvafik, M.(2009), Assessment of Semi-Rigid Connections in Steel Structures by Modal Testing, Journal of Constructional Steel Research, 65, pp. 1538-1547
- Yu, E. J., Taciroglu, E., and Wallace, J. W. (2006), Parameter identification of framed structures using an improved finite element model-updating method - Part I: formulation and verification. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 36(5), pp.619-636.