

# OpenSees 구조해석 프로그램을 활용한 병렬구조해석

## Parallel Processing for Structural Analysis Using OpenSees Program

### 1. 서론

최근 구조물의 안전에 대한 사회적 관심과 경각심이 높아짐에 따라 구조물에 대한 정밀한 해석이 요구되고 있다. 또한 대규모의 피해를 유발할 수 있는 지진에 대한 내진설계를 위하여 비선형 동적해석이 요구되고 있으며, 이러한 경향의 일환으로 최근 국내에서는 보다 면밀한 해석을 통하여 구조물의 거동을 예측하고 검증하는 성능기반내진설계가 도입되고 있다.

이와 같은 지진에 대한 비선형 해석에서는 전단변형률이 증가함에 따라 재료적 비선형성이 증가하는 지반에 대한 해석과 구조물의 재료적 비탄성과 기하학적 비선형성이 고려되어야 한다. 지반에 대한 해석과 구조물에 대한 해석을 동시에 수행할 수 있는 프로그램으로 OpenSees 구조해석 프로그램이 있다. 또한 OpenSees 구조해석 프로그램은 여러 개의 중앙처리프로세서(cpu)를 동시에 사용하여 대규모 구조물에 대한 해석을 가능하게 하고, 해석시간을 단축할 수 있는 병렬처리해석(parallel processing)을 지원하고 있다. 본 학술기사에서는 OpenSees 구조해석 프로그램과 이를 활용한 병렬해석의 예제들을 소개하고자 한다.

### 2. OpenSees 구조해석 프로그램

OpenSees 구조해석 프로그램은 미국의 NEES 프로젝트의 일환으로 PEER에서 개발된 비선형해석 프로그램이다. C언어나 포트란과 같은 프로그램 언어의 일종인 tcl/tk 프로그램을 바탕으로 OpenSees 프로그램이 구동된다. 전술한 바와 같이 비선형해석에는 매우 유용한 구조해석 프로그램이지만, Graphical User Interface(GUI)가 지원되지 않아서 구조물에 대한 모델링과 결과를 확인하는 전처리 및 후처리(Pre- and Post-processing)에는 취약하다. 다만 최근에는 BuildingTcl, OpenSees Navigator, nvStructural 등의 연계프로그램을 활용하여 수월하게 모델링 및 해석결과를 확인할 수 있다.

병렬처리해석은 슈퍼컴퓨터에 내장된 여러 개의 cpu를 동시에 사용하여 대용량의 구조해석을 빠르게 수행하거나, 다양한 변수에 대한 해석을 동시에 수행하여 시간을 절약할 수 있는 해석방법이다. PEER에서는 NEEShub라는 클라우드 시스템에 OpenSees 프로그램을 탑재하여 병렬처리가 가능하도록 하고 있다. 국내에서는 국가슈퍼컴퓨팅연구소(KISTI)에서 운영하는 슈퍼컴퓨터 OpenSees 프로그램을 탑재하여 사용가능하다.



김 동 관

선구조연구소 연구팀장

### 3. 변수해석연구에 활용된 OpenSees 프로그램

#### 3.1 변수해석

OpenSees 구조해석 프로그램의 병렬처리방법으로 활용하여 다양한 변수에 대한 해석연구를 수행할 수 있다. 본 예제는 지반-구조물 상호작용을 고려하여 응답스펙트럼을 도출하는 해석의 예제이며, 한 단면의 예는 그림 1과 같다.

해석모델은 지반-구조물에 대한 합성모델로서 해석변수는 다음과 같다.

- 지반의 주상도 : 487가지
- 구조물의 주기 : 31가지
- 입력 지진파 : 15가지
- 입력지진파의 유효지반가속도 : 3가지
- 총 해석량 =  $487 \times 31 \times 15 \times 3 = 679,365$ 회

위와 같이 4가지 변수에 대한 총 해석량은 679,365회이고, 자유도가 많은 유한요소해석이기에 때문에 1회의 해석당 약 20분의 해석시간이 소요되었다. 따라서 일반 개인용 컴퓨터로 위의 679,365회에 대한 해석을 수행하면 226,455시간이 소요될 것이고, 이는 산술적으로 약 9,400일이 소요될 것으로 예측되었다.

하지만 본 연구에서는 국내 국가슈퍼컴퓨팅연구소(KISTI)에 OpenSees 프로그램을 탑재하여 여러 개의 cpu를 동시에 사용하여 해석연구를 수행하는 병렬처리방법을 적용하였다. 따라서 약 500~1,000개의 cpu를 동시에 사용하여 해석을 수행하여, 총 해석시간을 7~10일로 해석시간을 약 1/1000로 단축시켰다.

#### 3.2 지반-구조물 합성모델

지반-구조물 상호작용을 고려한 응답스펙트럼을 구하기 위

하여 본 연구에서는 그림 1과 같이 박홍근 등(2010)이 제안한 유한요소해석모델을 사용하였다. 제안된 해석모델은 대규모 토사지반에 의한 지반효과와 지반-구조물 상호작용을 동시에 고려할 수 있도록 자유장 지반모델(free field soil model), 하부 지반모델(subsoil model) 그리고 기초를 포함한 구조물 등 세 가지 모델로 구성되었다.

자유장 지반모델은 지반-구조물 상호작용의 영향을 받지 않는 토사지반 고유의 동적응답특성을 나타내기 위하여 사용되었으며, 하부지반모델은 지반-구조물 상호작용을 나타내기 위하여 사용되었다. 하부지반모델의 좌우 경계는 자유장 지반모델과 연결되어 대규모 지반의 움직임을 나타내는 자유장 지반과 동일한 지반 움직임을 나타내도록 변위가 제어되었다.

2차원 유한요소모델에서 지반은 두께방향(z방향)으로 무한히 구속되어 있기 때문에 변형이 발생하지 않는 plane strain 조건을 적용하였다. 2차원 해석이지만 plain strain 조건에서는 면의 직각방향으로 변형이 구속되어 있기 때문에 3차원 confining stress가 발생하며, 그의 영향이 다음과 같이 고려되었다.

지반에 대한 시간이력해석을 위하여 직접 수치적분법을 이용한 재료비선형해석법 적용하였다. 지반의 비선형 응력-변형률 관계를

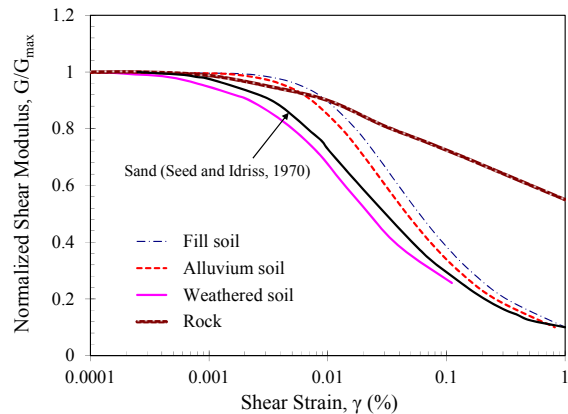


그림 2 지반의 전단탄성계수 감소곡선

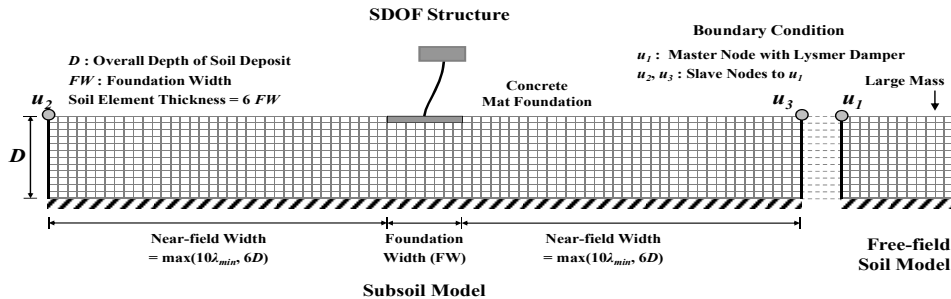


그림 1 변수 해석연구를 위한 2차원 지반-구조물 합성모델

정의하기 위하여, 김동수 등(2001)이 그림 2와 같이 40~400kPa 구속압 조건에 대한 공진주시험으로부터 제안한 전단탄성계수 감소곡선을 토대로, 식 (1)과 같이 Hyperbolic curve fitting을 하여 OpenSees 프로그램에 적용하였다.

$$\tau = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ =전단응력,  $\gamma$ =전단변형률,  $G_{mo}$ =전단탄성계수,  $\tau_{mo}$ =전단강도,  $\gamma_r$ =기준전단변형률(Reference strain)이다. 구속

압에 따라 지반의 비선형 응력-변형률 관계가 달라지기 때문에 깊이에 따라 기준전단변형률이 달라지도록 적용하였다.

### 3.3 지반-구조물 합성모델 해석결과

지반-구조물 상호작용을 고려한 응답스펙트럼의 예는 그림 3과 같다. KBC2009와 같이  $V_{S,30}$ 으로 지반을 분류한 경우에 비선형 시간이력해석결과를 통해 얻어진 응답스펙트럼을 비교한 것으로 EGA가 0.18g인 경우에 대한 결과이다. 회색의 선들은 15개의 입력지진파에 대한 지반-구조물 상호작용을 고려

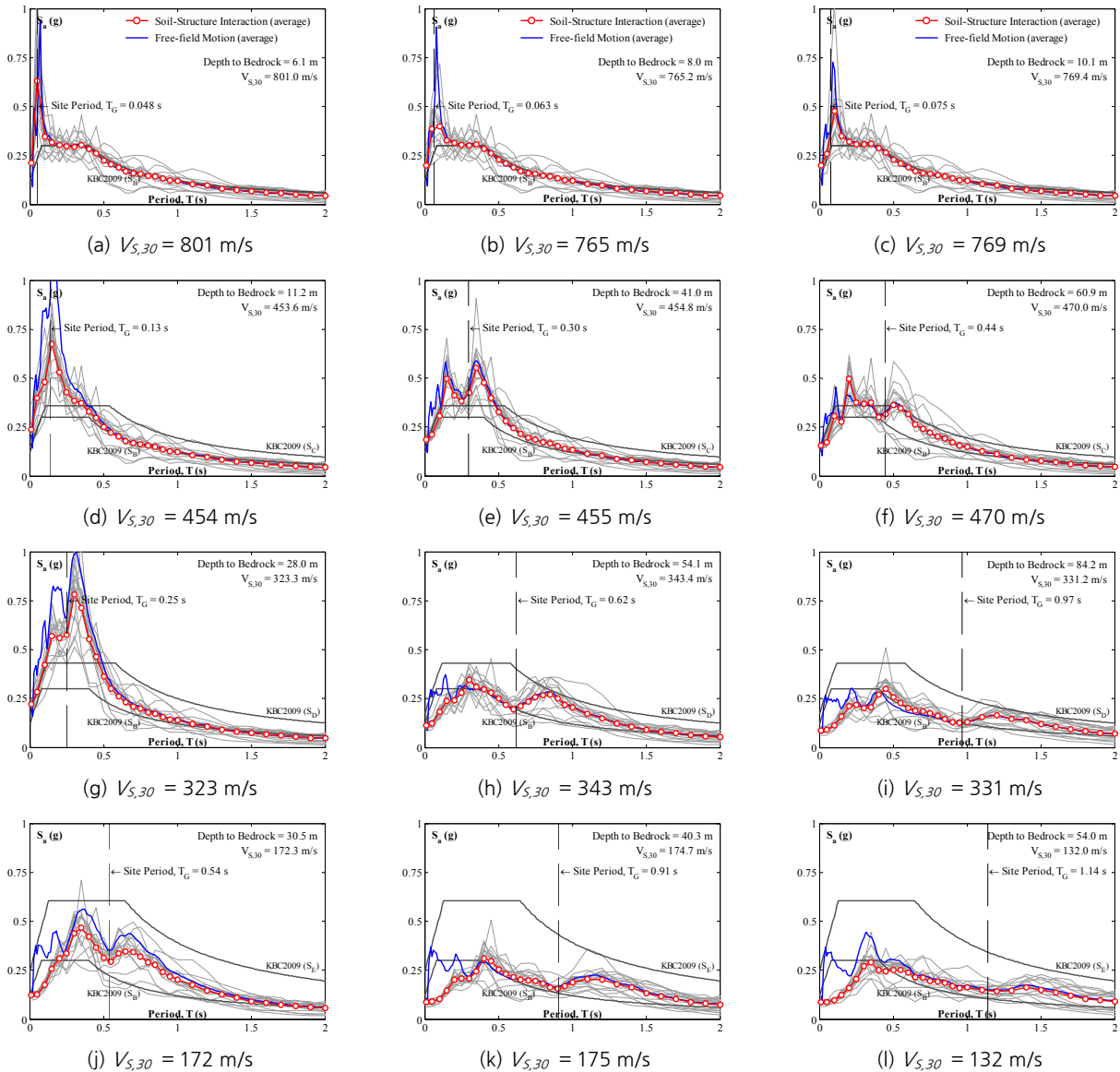


그림 3 KBC2009 지반분류에 대한 비선형해석결과와 평균값 - EGA:0.18g

한 비선형 해석결과로서 0.01~2.0초 사이에 31가지 구조물의 최대응답을 스펙트럼으로 나타낸 것이고, 붉은 선은 평균 응답 스펙트럼이다. 푸른 선은 지반-구조물 상호작용이 고려되지 않은 응답스펙트럼으로 유한요소모델을 사용한 비선형 시간이력 해석시 토사지반에 의해 증폭된 지표면의 자유장 가속도 (free-field motion)를 하부고정단모델(fixed-base model)에 입력하여 구해진 응답스펙트럼이다.

지반에 의한 구조물 응답의 증폭은 지반주기와 구조물 주기의 공진에 의해 발생하였다. 따라서 지표면으로부터 상부 30m의 평균전단파속도로 지반을 분류하는 KBC2009의 설계응답 스펙트럼과 달리 기반암까지의 깊이에 따라 지반주기가 달라지며, 지반주기와 유사한 주기의 구조물에서는 KBC2009의 설계응답스펙트럼보다 큰 구조물 응답의 증폭이 발생하였고, 지반주기를 벗어난 주기의 구조물에서는 응답의 증폭이 거의 발생하지 않았다.

그림 3의 KBC2009 설계응답스펙트럼과의 비교를 통하여 다음과 같은 사항을 파악할 수 있다.

- 1) 지반분류가 동일하더라도 토사지반이 깊이에 따라서 지반의 주기가 크게 변화할 수 있다.
- 2) 구조물 응답의 증폭구간은 지반분류보다는 지반의 주기에 따라 결정된다.
- 3) 지반의 주기가 단주기일 경우(0.5초 이하), 응답의 증폭이 KBC2009보다 크거나 비슷하며, 지반의 주기가 0.5초 이상인 경우에는 응답의 증폭이 KBC2009의 응답스펙트럼보다 작다
- 4) 특히 SE 지반( $V_{s,30} < 180\text{m/sec}$ )에서는 응답의 증폭이 KBC2009의 해당 응답스펙트럼보다 작거나 심지어 증폭이 거의 발행하지 않아서 SB 지반의 응답스펙트럼과 비슷하다.
- 5) 지반-구조물 상호작용을 고려하는 경우, 단주기 영역의 구조물에서 자유장 운동에 대한 응답보다 응답의 증폭이 감소한다.

위와 같은 결과는 현재의 지반분류체계와 단주기 및 장주기 증폭계수를 적용하여 토사지반에 의한 지진응답을 계산하는 것은 실제 지반조건에 적합하지 않음을 나타내고 있다. 즉, 현행 기준에 따라 지진하중을 계산하면, 지반주기와 구조물의 공진현상을 반영하지 못함에 따라 지반주기와 주기가 비슷한 구조물에 대해서는 응답을 과소평가하며, 이와 반대로 지반주기보다 긴 장주기 영역의 구조물에는 비경제적인 설계가 될 수 있다.

## 4. 대규모 공동주택에 대한 비선형해석

### 4.1 대규모 행렬에 대한 병렬처리해석

3장에서 소개한 병렬처리해석방법은 하나의 변수에 대하여 하나의 cpu가 독립적인 해석을 수행하는 방법으로 여러 대의 개인용 컴퓨터를 한 번에 사용하는 방법으로 생각할 수 있다. 4장에서는 단일한 구조물의 크기가 매우 커서, 개인용 컴퓨터에서는 해석을 수행할 수 없는 경우에 대하여 병렬처리방법을 적용하여 해석한 예를 소개하고자 한다.

개인용 컴퓨터에서 OpenSees 프로그램을 활용하여 대규모 행렬에 대한 해석을 수행하면, 전술한 바와 같이 out of memory가 발생하고 컴퓨터 용량의 한계로 해석을 수행할 수 없다. 이 경우, 병렬처리해석에서 cpu마다 사용자가 다른 해석영역을 설정하여 모델링하고, 이를 슈퍼컴퓨터에 연결하여 구동하면, cpu간의 통신으로 행렬이 공유되어 대규모의 행렬에 대한 해석이 가능해진다.

본 예제는 이한선 등(2011)이 수행한 10층 판상형 공동주택에 대한 실험연구를 해석적으로 모사하기 위한 연구로 해석모델의 평면은 그림 4와 같다.

- X방향 노드수 : 37개
- Y방향 노드수 : 18개
- 공동주택의 층수 : 10층
- 노드당 자유도 : 6 자유도
- 총 자유도 =  $37 \times 18 \times 10 \times 6 = 39,960$  자유도

그림 4와 같이 15층의 공동주택에 대하여 39,960개의 자유도가 생성되고, 이에 대한 비선형해석 수행시 일반 개인용 컴퓨터에서는 out of memory로 해석을 수행할 수 없었다. 병렬처리방법에서는 1개 층에 1개의 cpu를 할당하여 모델링을 하여 cpu당 할당되는 자유도를 1/15로 줄이고, cpu간의 통신을 활용하여 해석하였다.

### 4.2 실험개요

앞서 수행된 실험(이한선 등, 2011)은 우리나라 공동주택의 지진 응답특성을 실제 발생 가능한 지진과 동일한 상황 하에서 지진모의실험을 통해 평가하고자 하였다. 실험을 위한 표준대상건물은 국내의 가장 전형적인 형태의 모델을 선정하였으며, 한 세대의 규모가 89㎡이고 2세대가 한 층을 이루는 15층

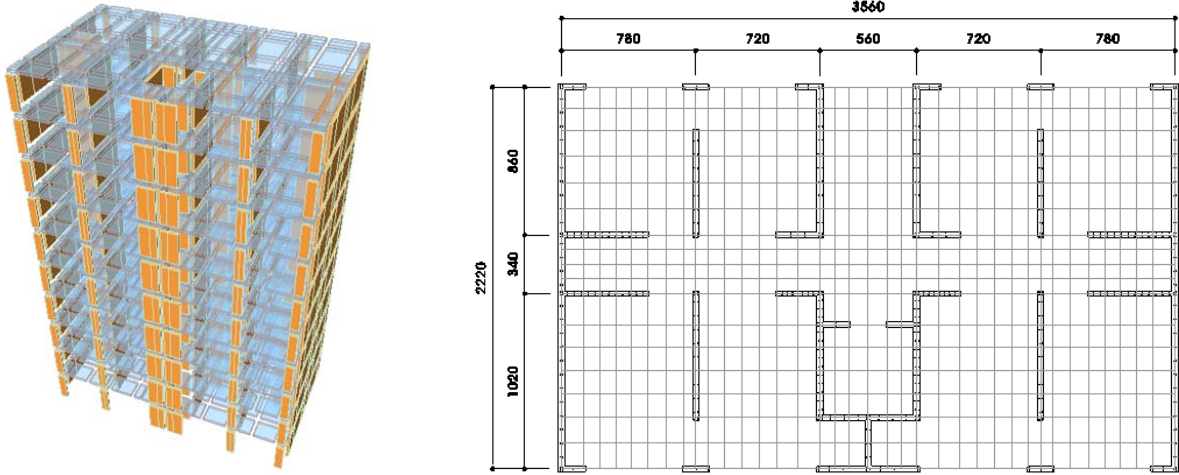


그림 4 3차원 해석 모델 및 해석 모델 평면

관상형의 철근콘크리트 공동주택이다. 진동대의 용량과 사용 재료인 철근의 가용성을 고려하여 층수를 10층으로 낮추고 축소율을 1:5로 결정하였다.

실험체 제작은 실물크기 철근(D13, D10)에 상응하여, 축소 모델 실험체(1:5)에서 D3,  $\phi 2$ 의 모델철근이 사용되었다. 모델 철근은 상사성에 의하여 철근의 힘에 축소율을 적용하여 항복력을 맞추었다. 이 때 D3철근은 벽체 주근으로 사용하였고,  $\phi 2$  철근은 벽체의 가로근, 슬래브근으로 사용하였다. 콘크리트 굵은 골재는 실물 골재의 크기인 25mm를 1:5 축소한 5mm 골재를 사용하였고, 물시멘트비 57%의 배합비를 사용하였다.

실험에 사용된 지진파는 X방향의 경우 Taft N21E 성분이고, Y방향의 경우 Taft S69E 성분이고 상사성의 원리에 맞추어 시간 축을 기존 지진파의  $1/\sqrt{10}$ 로 줄이고 가속도를 2배로 높였다.

### 4.3 해석 모델

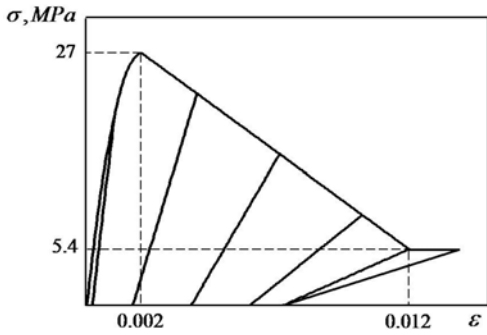
3차원 해석 모델과 해석 모델의 평면 및 배근은 그림 4에 나타나 있다. 해석에 사용된 평면은 진동대 실험을 수행한 실험체와 동일하며, 벽체의 면외 휨강성 및 슬래브의 영향을 고려하기 위하여 플레이트인 셸요소를 사용하여 가로 방향 37개, 세로 방향 18개로 나누어 해석을 수행하였다.

재료 모델은 재료 실험을 바탕으로 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ )는 27MPa이고 철근의 항복강도( $f_y$ )는 400MPa에 대한 OpenSees에서 제공하는 모델을 사용하였다. 그림 5는 해석에서 비선형 거동을 나타내는 부분을 모사하기 위해 적용한 콘크리트와 철근의 이력모델로서 콘크리트의 경우 Zero tensile

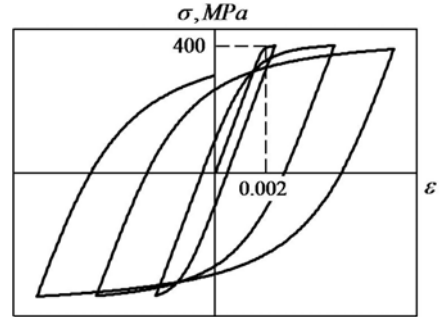
strength 모델을 사용하여 인장강도를 무시하였다. 이는 콘크리트의 인장력은 압축력에 비해 현저히 작고 또한 비선형 시간이력 해석의 경우 해석시간이 길기 때문에 이를 줄이기 위하여 위의 모델을 선택하였다. 철근은 Menegotto and Pinto 모델을 사용하였고 압축과 인장이 동일한 응력-변형을 관계를 적용하였다.

먼저 벽체의 콘크리트와 수직방향 철근을 길이방향 트러스로 모델링한다. 이 때 길이방향 트러스는 콘크리트와 철근이 1축 요소인 트러스로 동일한 위치에 설치하고 각각 별도의 1축 요소로 모델링된다. 이 때 길이방향 1축 요소의 개수가 많을수록 휨-압축 거동을 보다 정확하게 나타낼 수 있지만 본 연구에서는 해석의 간편성을 위해 가로 방향 37개, 세로방향 18개로 평면을 분할하여 위치를 설정하고 해당 위치에 트러스를 각각 설치하였다. 설치된 길이방향 트러스의 일체 거동을 위해 무한강성을 갖는 수평방향 강제보를 설치한다. 그리고 횡력에 의한 전단거동을 나타내기 위해 대각방향의 1축 요소 트러스를 설치한다. 이 때 대각방향 트러스는 콘크리트 1축 요소로 모델링하며, 이 때 대각방향 요소의 각도는 벽체의 사인장 균열 각도를 나타낸다. 정확한 사인장 균열 각도를 예측하는 것은 어렵기 때문에 본 연구에서는 간편한 해석을 위하여  $45^\circ$ 를 사용하였다.

설치된 길이방향 및 대각방향 LDLEM요소는 콘크리트 1축 요소(또는 스트럿)가 중첩된다. 따라서 중첩되는 부분이 발생하지 않도록 하기 위해 Pushover 해석을 X방향, Y방향으로 각각 수행하여 길이방향 1축 요소 트러스 중 순수하게 인장력이 발생하는 부분을 파악한다. 콘크리트의 경우 인장력을 받지 않는다고 가정하였으므로 인장력이 발생하는 부분의 길이방향 콘



(a) 콘크리트



(b) 철근

그림 5 재료의 이력모델

크리트 트러스 면적을 0으로 입력하고 압축력이 발생하는 부분은 콘크리트 면적을 모두 입력한다.

실제 실험체에 배근한 수평방향 전단철근은 벽체의 전체적인 거동에서 철근의 인장이 발생했을 경우에만 유효하기 때문에 본 연구에서 수행하는 해석결과에 영향이 거의 없으므로 무시하였다. 벽체의 면외방향 휨강성을 고려하기 위하여 길이방향 트러스와 동일한 위치에 길이방향 유효보를 설치하고 이때 길이방향 유효보의 면적과 길이방향 트러스의 면적이 중첩되므로 길이방향 유효보의 면적을 0으로 입력하였다.

슬래브를 고려한 경우, 변수 설정에 따라 강막과 플레이트 요소인 Shell 요소로 모델링을 수행하였으며 벽체의 면외 휨강성을 15% 고려하고 슬래브의 강성은 20%를 고려하여 해석을 수행하였다.

해석 모델의 모델링 완료 후 최대한 실험체와 유사한 조건으로 해석을 수행하기 위하여 실험체와 진동대 사이에 설치되

는 로드셀의 회전 강성을 고려하였다. 이 때 로드셀의 회전 강성은 재료의 탄성계수와 로드셀 단면의 단면 2차 모멘트의 곱으로 산정하였다.

### 4.3 해석 결과

그림 7은 위의 정적 비탄성 해석 결과를 토대로 층간 변위율이 각각 1.0%, 2.0%, 2.5%인 경우에 대해 나타난 것이다. 그래프에 나타난 바와 같이 강막인 경우 구조물이 전체적으로 휨 거동이 나타나는 것에 비해 슬래브 강성을 20% 고려한 경우 구조물이 전체적으로 전단 거동을 보임을 알 수 있다. 슬래브 강성을 고려한 경우 슬래브가 횡하중에 대해 저항하는 역할을 분담함에 따라 구조물의 전체적인 거동이 강막과 다른 양상을 보이게 된다.

그림 8은 입력 가속도가 0.374g이고 가진 방향이 XY방향인 경우, 실험체에 2층마다 설치한 층별 변위계의 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 그림 8의 (a)~(d)는 X방향에 대한 층간 변위 그래프이다. 그림에 나타난 바와 같이 강막으로 설정된 경우, 모두 실험 결과보다 층간 변위가 다소 크게 도출되고 슬래브 강성을 20% 고려한 경우 X방향은 거의 유사한 결과를 나타내었다.

### 5. 소 결

본 학술기사는 OpenSees 구조해석프로그램과 이를 활용한 병렬구조해석의 예를 소개하였다. 지반과 구조물을 동시에 모델링할 수 있는 지반-구조물 상호작용에 대한 해석연구를 소개하였으며, 병렬처리방법을 활용하여 다양한 변수에 대한 해석을 짧은 시간에 수행할 수 있었다. 또한 공동주벽에 대한 병렬해석방법과 해석결과를 소개하였다. OpenSees 구조해석

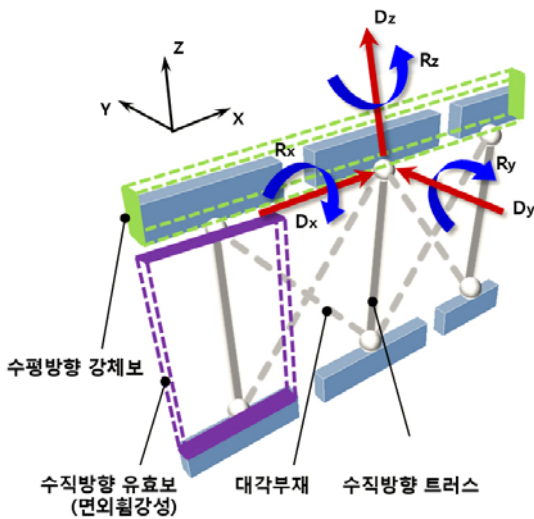


그림 6 벽체의 면내 및 면외 강성 모델링

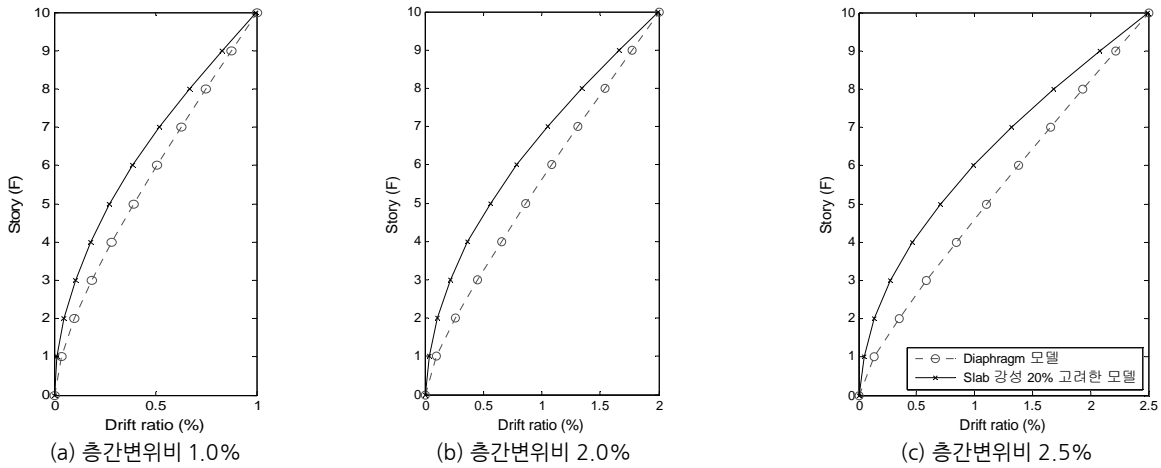


그림 7 Push-over 해석결과 층별 층간변위비

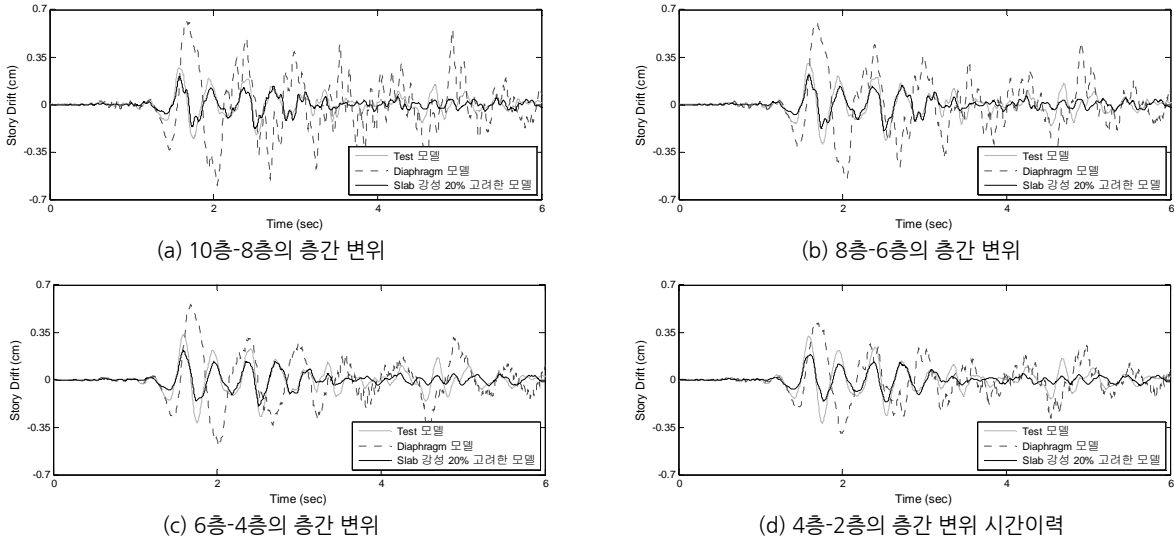



그림 8 X방향의 층간변위 시간이력

프로그램과 KISTI의 슈퍼컴퓨터를 활용하여 일반 개인용 컴퓨터에서는 용량의 한계로 해석하기 어려운 대규모의 비선형 매트릭스에 대하여 해석을 수행할 수 있었다. 향후 보다 정밀한 비선형 구조해석에 대한 요구가 증가할 것이 예상됨에 따라 본 학술기사에서 소개된 OpenSees 구조해석프로그램을 활용한 병렬처리방법이 도움이 될 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌

1. 김동수, 추연욱, “공진주 시험을 이용한 국내 비점토 지반의 동적변형 특성,” 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제5호, 2001

2. 박홍근, 김동관, 이경구, 김동수, “낮은 심도의 연약지반에 대한 비선형 지진응답해석,” 한국지진공학회 논문집, 제14권 제5호, 2010
3. 이한선, 황성준, 이경보, 강창범, 이상호, 오상훈, “1:5 축소 10층 내력벽식 R.C. 공동주택의 지진모의 실험,” 한국지진공학회 논문집, 제15권 제6호, 2011 <http://opensees.berkeley.edu/> 

[섭외: 김대진 편집위원]