

# 소규모 철근콘크리트 건축물을 위한 비선형해석 프로그램 비교 I

## Comparison of Nonlinear Analysis Programs for Small-size Reinforced Concrete Buildings I

유창환<sup>1)</sup> · 김태완<sup>1)\*</sup>

Yoo, Changhwan<sup>1)</sup> · Kim, Taewan<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>강원대학교 도시건축학부

<sup>1)</sup>Division of Urban, Design and Architecture, Kangwon National University

### / A B S T R A C T /

For small-size reinforced-concrete buildings, Midas Gen, OpenSees, and Perform-3D, which are structural analysis programs that are most popularly used at present, were applied for nonlinear static pushover analysis, and then difference between those programs was analyzed. Example buildings were limited to 2-story frames only and frames with one or more rectangular walls. Analysis results showed that there was not much difference for frames only based on capacity curves. There were some differences for frames with rectangular walls, but it was not so significant. The global behaviors represented by the capacity curve were not so different, but the feature of each analysis program appeared when the results were analyzed in more detail. Therefore, the program users should understand the feature of the program well, and then conduct performance assessment. The result of this study is limited to low-story frames only and frames with rectangular walls so that it should be noted that it is possible to get different results for frames with non-rectangular walls or mid- to high-rise buildings.

**Key words:** Small-size building, Reinforced concrete, Nonlinear static pushover analysis, MIDAS Gen, OpenSees, Perform-3D, Moment-frame, Shear wall

## 1. 서론

국외에서 발생하는 지진의 규모에 비해 상대적으로 작긴 하지만 최근 국내에서도 과거에 비해 더 자주 지진이 발생하고 있다. 이로 인해 국내 건축물의 지진 안정성에 대한 관심이 높아짐에 따라 특히 학교나 관공서와 같은 공공건물을 중심으로 근래 내진성능평가 및 보강 작업이 시작되었고 그 범위는 점차 넓어지고 있다. 내진성능평가 및 보강을 위해서는 기본적인 탄성해석만으로는 정확한 결과를 산출하기 어려우며 비선형해석이 반드시 수반되어야 한다. 이에 따라 많은 실무기술자들이 비선형해석을 통해 내진성능평가 및 보강 작업을 수행하고 있다. 대부분의 공공건물은 철근콘크리트 구조이기 때문에 철근콘크리트 비선형해석에 대한 수요가 급증하고 있다.

하지만 대부분의 기존 실무기술자들은 건축물의 설계를 위한 탄성해석만을 수행해왔기 때문에 비선형해석에 익숙하지 않는 문제점이 있다. 이와 더불어 국내 상업용 구조해석프로그램을 석권하고 있는 MIDAS Gen[1]의 문제점도 있다. 이 프로그램은 탄성 및 비선형해석과 설계가 동시에 가능하며 이를 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic user interface)를 통해 대단히 편리하게 수행할 수 있도록 구성되어 있다. 이러한 장점으로 많은 실무기술자들이 비선형해석에 대한 명확한 지식 없이 이 프로그램을 사용하고 있으며, 이 점이 현재 중요한 문제로 대두되고 있다. 즉, MIDAS Gen[1]이라는 프로그램 자체의 문제라기보다는 이용자가 비선형해석에 대한 명확한 이해를 바탕으로 이 프로그램이 비선형해석으로 어떤 결과를 산출하는지 정확히 이해할 필요가 있다. 더욱이 대상 구조물이 골조인 경우에는 상대적으로 큰 문제는 없으나 다양한 형태의 벽체가 있는 경우에는 사용하는 해석 프로그램에 따라 결과의 차이를 보이는 것이 현실이다.

이러한 배경으로 본 연구에서는 현재 일반적으로 사용되고 있는 구조해석프로그램들의 비선형해석 결과를 비교 분석함으로써 실무기술자들뿐만

\*Corresponding author: Kim, Taewan

E-mail: tkim@kangwon.ac.kr

(Received March 31, 2015; Revised May 28, 2015; Accepted July 9, 2015)

아니라 학계의 연구자들에게 각각의 프로그램이 어떤 특성이 있으며 비선형 해석 시 어떤 점에 유의해야 하는 지를 제공하고자 한다. 이를 위해 MIDAS Gen[1]과 함께 현재 오픈소스를 기반으로 무료로 사용할 수 있는 OpenSees[2]와 상업용 구조해석프로그램인 Perform-3D[3]를 선택하였다. 비선형해석의 대상은 소규모의 철근콘크리트 건물로 한정하였다. 본 연구에서는 먼저 소규모 건물을 대상으로 해석프로그램들의 차이를 비교한 후 후속 연구에서는 점차 층수와 규모를 늘려갈 계획이다.

연구 대상 건물은 2층으로 골조뿐만 아니라 벽체도 함께 있는 철근콘크리트 구조이다. 먼저 골조 단독으로 있는 건물을 대상으로 해석을 수행한 후 골조와 벽체가 함께 있는 건물도 수행하였다. 벽체는 직사각형 단독으로 있는 ‘—’자 형뿐만 아니라 ‘L’, ‘□’자 형도 포함하였다. 구조해석 프로그램들을 차이를 비교하기 위해 철근콘크리트구조의 주요 구조체인 보, 기둥, 및 벽체의 비선형모델링과 비선형해석 결과를 사용하였다. 비선형해석은 비선형정적해석만을 대상으로 하였다. 일반적으로 비선형정적해석이 많이 수행되고 있는 것과 함께 MIDAS Gen[1]은 일반적인 구조체의 비선형 동적해석이 불가능하기 때문이다.

본 논문은 전체 연구 결과 중 골조만 있는 경우와 골조와 벽체가 함께 있는 경우에서는 ‘—’자 형 벽체만을 수록하였다. 본 논문과 병행하는 또 다른 논문에서는 ‘L’, ‘□’자 형의 벽체가 골조와 함께 있는 건물의 결과를 수록하였다. 이렇게 논문을 구성한 이유는 골조만 있는 건물과 ‘—’자 형 벽체가 골조와 함께 있는 건물의 경우와 ‘L’, ‘□’자 형의 벽체가 골조와 함께 있는 건물의 경우가 다른 경향의 해석결과를 보여줬기 때문이다. 더불어 후자의 경우에는 비정형 벽체의 탄성 및 비선형거동에 대한 설명이 추가적으로 더 필요하였다.

## 2. 비선형 구조해석 프로그램

### 2.1 MIDAS GEN[1]

MIDAS GEN(이하 마이다스)은 앞서 언급한대로 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 상업용 구조해석 프로그램이다. 가장 큰 이유는 화면을 통한 입출력이 편리하고 설계 및 해석을 동시에 수행할 수 있기 때문이다. 더불어 탄성해석은 기본으로, 비선형정적해석 및 일부 비선형동적해석도 가능하기 때문에 전통적인 설계뿐만 아니라 간단한 성능평가도 함께 수행할 수 있다. 편리한 그래픽 사용자 인터페이스를 가지고 있어 대부분 3차원해석을 수행하게 된다.

비선형해석에 국한하여 장점을 말하자면 입력된 단면 정보로부터 비선형해석에 필요한 항복강도를 자동으로 계산해주는 것이다. 기둥 부재의 경우는 축력-모멘트 상호작용 관계를 자동으로 계산하여 항복강도 산정에 반영한다. 물론 사용자가 계산한 값을 직접 입력할 수도 있다. 비선형모델링에서 주요 입력사항인 소성힌지 속성은 휨-변위 또는 모멘트-회전각으로 입력할 수 있다. 이 때 변위 또는 회전각은 FEMA356[4]에서 제공하는 형태로 입력할 수 있게 되어 있다. 하지만 철근콘크리트 부재의 경우는 입력값의 형식이 달라 불편하며, 항복 변형에 연동되어 있어 산정한 항복 변형에 따라 결과가 크게 달라지는 단점이 있다.

보나 기둥 부재의 비선형모델링 경우는 일반적으로 사용하는 해석프로그램에 크게 영향을 받지 않으나 벽체의 경우는 그 영향이 매우 크다. 마이

다스의 중요한 장점 중의 하나는 벽체의 비선형모델링이 매우 간편하다는 것이다. 일단 벽체는 4개의 꼭짓점을 사용하여 형상을 그대로 입력할 수 있다. 단면 정보는 기둥과 동일한 형식이며, 기둥과 같이 축력-모멘트 상호작용을 반영하여 항복강도를 계산한다. 벽체의 변형 능력 또한 FEMA356(이하 FEMA)의 형식으로 입력 가능하다. 벽체의 해석 결과는 보나 기둥과 같이 2개의 절점(벽체의 하부 및 상부에 위치)에서 제공된다. 따라서 벽체 형상은 그대로 입력가능하면서 해석 및 그 결과는 기둥과 같은 형태로 제공하는 것이 마이다스의 큰 특징 중에 하나이다.

이러한 벽체의 모델링방법 및 해석결과제공의 특성은 이번 논문에서 다루는 ‘—’자 형 벽체, 즉 단면이 직사각형 형태의 대칭인 벽체에서는 다른 프로그램과 현저한 차이를 보이지 않는다. 하지만 다음 논문에서 다루게 될 단면 형상이 대칭이 아닌 벽체의 비선형해석은 마이다스의 다른 무엇보다도 더 중요한 장점이다. 이에 대한 자세한 사항은 다음 논문에서 다루게 될 것이다.

### 2.2 OpenSees[2]

OpenSees(이하 오픈시스)는 Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER)에서 개발하여 일반인에게 개방되어 있는 무료 해석프로그램이다. 따라서 누구나 사용할 수 있는 장점이 있으나 마이다스와 같은 그래픽 사용자 인터페이스가 없어 해석모델의 입력과 해석결과 분석에 많은 노력이 필요하다. 마이다스와 다르게 해석에 국한된 프로그램이며 선형 정적 및 동적, 비선형 정적 및 동적해석 모두가 가능하다. 3차원해석이 가능하나 일반적으로 2차원해석용으로 주로 사용된다. 아마도 그래픽 사용자 인터페이스의 활성화가 되지 않았기 때문인 것으로 보인다.

오픈시스는 부재 단면의 비선형특성을 마이다스와 같이 소성 힌지의 형태로 입력할 수 있을 뿐만 아니라 섬유요소를 사용하여 단면을 직접 입력할 수도 있다. 소성 힌지 입력에서 한 가지 다른 점은 마이다스는 모멘트-회전각 관계를 사용하나 오픈시스는 모멘트-곡률 관계를 사용하는 것이다. 따라서 오픈시스에서는 FEMA에서 제공하는 소성 힌지 속성을 바로 사용할 수 없다. 섬유요소를 사용할 경우 소성 힌지와 다르게 해당 재료의 응력도-변형률 관계를 입력해야 한다. 기둥 부재의 경우 섬유요소를 사용하여 축력-모멘트 상호작용을 직접적으로 반영할 수 있다.

오픈시스에는 벽체를 입력할 수 있는 요소가 있으나 이는 탄성해석 용이다. 벽체의 비선형해석을 위해서는 벽체를 기둥 부재로 모델링하고 대신 강재 보를 사용해 벽체의 실제 치수를 나타낸다. 이 때 섬유요소를 이용하여 실제 단면의 상세를 그대로 반영한다. 따라서 오픈시스에서는 기둥과 벽체 모두 섬유요소를 사용하여 축력-모멘트 상호작용이 직접적으로 반영된다. 하지만 이 경우 FEMA의 소성 힌지 속성 형태, 즉 항복 후 일정한 소성 구간을 지난 후 강도가 급격히 감소하는 현상을 나타내지는 못한다. 섬유요소에서 콘크리트는 최대 강도 도달 후 강도가 감소하는 모델이 있으나 철근은 강도가 감소하는 모델이 없어 섬유요소로 표현된 단면은 특정 변형(변위 또는 곡률)에서 강도가 감소하는 현상을 나타낼 수 없다. 물론 기둥과 벽체 모두 섬유요소 대신 모멘트-곡률 관계를 가지는 소성 힌지로 모델링할 수 있으나 그럴 경우 축력-모멘트 상호작용을 직접적으로 반영할 수 없다는 단점이 있다.

### 2.3 Perform-3D[3]

Perform-3D(이하 퍼폼)는 마이더스와 같이 그래픽 사용자 인터페이스를 가지고 있는 사업용 해석프로그램이다. 해석에 국한된 프로그램으로 선형 정적 및 동적, 비선형 정적 및 동적해석이 모두 가능하다. 마이더스와 같이 대부분 3차원 해석으로 사용한다. 퍼폼은 비선형해석을 주된 목표로 개발되었기 때문에 마이더스와 오픈시스의 기능을 모두 포함하는 장점이 있다.

부재 단면의 비선형특성은 마이더스와 같이 FEMA의 소성힌지 속성을 직접 입력할 수도 있고 오픈시스와 같이 섬유요소로 입력할 수 있다. 단, 건물 기둥에서 섬유요소 사용할 경우 계산 시간의 급격한 증가로 권장하지 않고 있다. 마이더스와 같이 단면의 치수와 배근상세를 입력하면 강성과 강도를 자동적으로 계산하여 반영하나 변형능력은 직접 입력해야 한다. 부재 단면의 모멘트 소성힌지 속성에서 변형을 마이더스와 같이 회전각으로 입력하거나 다른 점은 퍼폼에서는FEMA에서 제공하는 회전각을 그대로 입력할 수 있다는 것이다. 기둥의 축력-모멘트 상호관계는 마이더스와 같고 오픈시스와는 다르게 섬유요소를 사용하지 않더라도 반영이 가능하다.

퍼폼이 마이더스 및 오픈시스와 차별되는 가장 큰 장점은 비선형벽체 모델을 가지고 있는 것이다. 벽체 모델은 일반적인 사업용 유한요소해석 프로그램에 있는 4개의 절점을 가지는 요소이다. 따라서 유한요소해석 프로그램과 같이 벽체를 수많은 요소로 나타낼 수 있고 비선형거동이 예상되는 곳에 상대적으로 많은 수의 요소를 사용할 수 있다. 벽체의 단면은 섬유요소로 모델링하여 벽체의 휨 거동을 나타낼 수 있다. 벽체의 전단 거동은 힘-변위 관계를 입력하여 나타낸다. 즉, 퍼폼은 4개의 절점으로 벽체의 휨과 전단 거동을 함께 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있다.

퍼폼에서는 벽체를 나타낼 수 있는 요소가 Shear Wall 과 General Wall 두 가지가 있다. Shear Wall은 벽체의 수직방향 휨에 더해 전단거동을 나타낼 수 있는 특성이 있다. General Wall 요소는 Shear Wall 요소가 나타낼 수 있는 거동에 추가해서 수평방향 휨도 같이 나타낼 수 있다. General Wall 요소는 주로 개구부로 인한 불연속적인 벽체나 벽체가 서로 수직으로 만나는 경우에 사용하도록 권고하고 있다[5]. 본 연구에서는 직사각형 단면의 벽체가 단독으로 있는 건물이 대상이며, 해석 결과 두 요소간의 차이는 없으므로 나타냈다. 따라서 여기서의 결과는 벽체를 Shear Wall 요소로만 모델링한 것이다. 2개의 벽체가 서로 수직으로 만날 때는 다른 결과를 보일 것으로 예상된다. 이와 관련해서는 다음 논문에서 다룰 예정이다.

### 3. 예제 건물

본 연구에서 사용한 예제 건물은 2층 철근콘크리트 건물로서, 평면은 Fig. 1과 같이 x, y축으로 각각 3경간, 2경간으로 구성되어 있다. 그림은 ‘—’자형 벽체가 있는 경우의 평면을 보여주고 있다. 벽체의 길이는 경간 길이 6m의 절반인 3m를 선택하였다. 벽체가 평면상에서 대칭 또는 비대칭에 따른 차이를 조사하기 위해 다양한 위치를 고려하였다.

벽체들의 위치 및 그에 따른 이름은 Fig. 2에서 알 수 있다. 개별 평면의 이름은 벽체의 형상, 개수, 위치 등의 정보를 포함하고 있다. 맨 처음의 ‘FW’는 골조와 벽체가 함께 있다는 것을 의미한다. 그다음의 벽체의 형상을 나타내는 기호로서 ‘—’자형, 즉 직사각형 형태임을 나타낸다. 그다음에 있는 숫

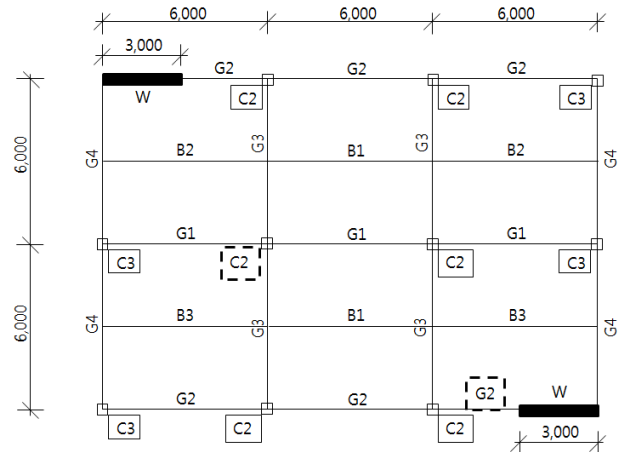


Fig. 1. Plan view of an example building (FW-2S)

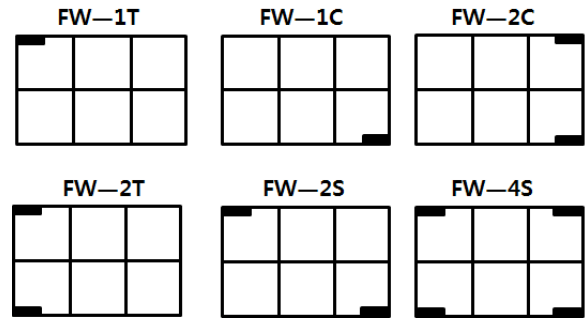


Fig. 2. Shape, location, and nomenclature of shear walls in two-story and 6m span buildings

Table 1. Vertical loads for design by KBC2009 (kN/m<sup>2</sup>)

Story	Dead load	Live load
Typical	5.50	4.0
Roof	6.55	1.0

자는 벽체의 개수를 나타낸다. 벽체의 개수는 길이가 경간의 1/2인 경우를 1로 보고 수평방향으로 위치한 벽체의 수를 나타낸다. 마지막에 위치한 ‘C’ 또는 ‘T’는 평면의 오른쪽으로 가하는 횡하중에 의해 벽체가 각각 압축력(C) 또는 인장력(T)이 발생하는 쪽에만 위치할 때를 나타낸다. 벽체가 평면에서 좌우 대칭으로 위치할 경우에는 ‘S’로 표시하였다.

건물의 설계는 KBC2009[6]를 따랐다. 기준에 따른 내진설계변수는 지진구역I, 내진등급II, 그리고 지반조건 S<sub>c</sub>이다. 골조만 있는 경우의 지진력 저항시스템은 모멘트저항골조시스템에서 철근콘크리트 보통모멘트골조(R=3)로 설계하였다. 골조와 벽체가 함께 있을 때의 지진력저항시스템은 건물골조시스템에서 철근콘크리트 보통전단벽(R=5)으로 설계하였다. 벽체가 있는 골조의 경우는 중력하중에만 설계되었음을 주지한다. 지진력에 대한 설계는 Fig. 1의 평면에서 수평방향으로만 수행하였다. 설계에 사용한 수직하중은 Table 1과 같다. 표에서 활하중은 용도를 판매장으로 가정했을 때의 값이다. 설계 시 재료의 공칭강도는 21 MPa(콘크리트), 400 MPa(철근)을 적용하였다.

## 4. 해석 모델 및 방법

각 구조 부재의 비선형모델링 방법에 있어서는 마이다스와 퍼폼이 유사하다. 둘 모두 그래픽 사용자 인터페이스를 가지고 있으며 부재 단면의 비선형모델은 FEMA의 힌지 속성을 사용하고 있다. 마이다스는 보, 기둥, 및 벽체를 모두 이름 그대로 Beam, Column, Wall 요소로 모델링한다. 3가지 요소 모두 FEMA 힌지 속성, 즉 모멘트-회전각 관계를 사용한다. 퍼폼은 보와 기둥의 경우 여러 가지 옵션이 있으나 각각 FEMA beam, FEMA column 요소로 모델링하였다. 이들의 힌지 속성은 이름 그대로 FEMA의 형식을 따른다. 벽체는 Shear Wall 및 General Wall 요소를 사용할 수 있으며, 단면은 두 요소 모두 섬유요소로 나타내므로 보와 기둥과는 다른 형식이다. 오픈시스에서 보는 beamWithHinges 요소로 모델링하였고 단면은 Pinching4 요소로 나타내었다. 여기서는 FEMA의 모멘트-회전각 관계와 다르게 모멘트-곡률 관계를 사용한다. 기둥과 벽체는 nonlinearBeamColumn 요소로 모델링하였고 단면은 섬유요소로 나타내었다. 본 연구에서 사용한 각 부재의 비선형 단면 모델을 Table 2에 정리하였다.

소성힌지 속성을 입력하기 위해서는 항복 및 최대 강도와 항복 및 최대 변형을 산정해야 한다. 먼저 강도에 대해 살펴보면 철근 콘크리트 부재에서는 항복모멘트강도 보다는 최대모멘트강도를 산정하는 게 더 편리하다. 최대 모멘트강도는 극한 모멘트강도로 대체할 수 있으며 이는 일반적인 설계 기준이나 도서에 제시되어 있다. 반면 항복 모멘트강도는 부재나 단면의 특성에 따라 단일하게 정해지지 않는다. 여기서 사용한 강도는 공칭값을 사용했음을 주지한다. 구조물의 성능평가 시 일반적으로 평균강도를 사용하나 본 연구는 해석 프로그램 간의 차이를 다루고 있으므로 편리한 공칭 강도를 사용하였다.

보 부재의 경우 건축구조기준[6]에서 제시하고 있는 철근콘크리트 모멘트강도 식을 이용하여 최대 강도를 산정하였다. 이는 마이다스, 오픈시스, 퍼폼에서 모두 동일하다. 항복모멘트강도는 단면의 형상 및 철근 상세에 따라 다르지만 극한모멘트강도의 96%로 가정하였다. 이 비율은 퍼폼에서 입력 가능한 최소값이다. 물론 마이다스에서는 자동 계산 기능을 사용하면 사용자가 직접 값을 입력할 필요가 없다. 이 자동 계산 기능은 다른 모든 부재에도 동일하게 적용된다. 따라서 결과 비교 시 마이다스는 사용자 입력(Midas\_M)과 자동 입력(Midas\_A)으로 구분하였다.

보 부재의 경우는 위와 같이 수식을 통해 직접적인 모멘트강도 계산이 가능하나 기둥 부재의 경우는 모멘트와 축력이 서로 연동되어 있기 때문에 약간 다르다. 오픈시스의 경우는 단면을 섬유요소로 모델링하여 해석 시 축력-모멘트 상관관계가 바로 반영된다. 마이다스와 퍼폼에서는 동일하게 소성힌지를 사용하지만 약간의 다른 방법을 사용한다. Midas\_M에서는 보와 마찬가지로 극한모멘트강도의 96%를 항복모멘트강도로 가정하여 입력하였다. 이때의 모멘트강도 계산은 김태완과 민찬기[7]의 방법을 사용하였다.

Midas\_A에서는 자체적으로 기둥 단면의 축력-모멘트 상관관계와 축력을 이용하여 모멘트강도를 계산한다. Midas\_A에서 항복모멘트강도는 극한 모멘트강도로서 Midas\_M과 약간의 차이가 있음을 주지한다. 퍼폼은 축력-모멘트 상관관계를 사용자가 입력하면 자체적으로 항복모멘트강도를 계산한다. Midas\_A와 퍼폼의 다른 점은 퍼폼에서는 축력-모멘트 상관관계로부터 구한 모멘트강도에 계수를 사용하여 그 크기를 변경할 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 Midas\_M과 퍼폼에서 모두 96%를 사용하여 일관성을 유지하였다.

벽체의 경우 Midas\_M과 Midas\_A 모두 입력 시 절점 수를 제외하면 기둥의 경우와 동일하다. 오픈시스에서도 마이다스와 마찬가지로 벽체와 기둥의 입력 및 출력 방법 모두 동일하다. 퍼폼의 경우에 절점 수는 마이다스와 같으나 단면은 오픈시스와 같이 섬유요소를 사용한다. 따라서 사용자의 직접적인 벽체 모멘트강도 계산은 필요하지 않다.

소성힌지의 변형에 대해 살펴보면 마이다스는 모든 부재, 퍼폼에서는 보와 기둥에서 회전각으로 입력한다. 이 회전각은 KISC[8]에서 제시하고 있는 값을 따랐다. Midas\_A에서도 회전각은 표에서 구한 값을 직접 입력하여 사용자 입력과 모멘트강도만 차이가 발생하도록 하였다. 표에서 회전각을 산정할 때 모든 부재는 비내진상태로 가정하였다. 여기서 최대 회전각은 탄성과 소성을 모두 합한 값이다. 퍼폼의 경우는 이 값을 그대로 입력할 수 있으나 마이다스의 경우는 이 값을 그대로 입력할 수 없다. 마이다스에서는 최대 회전각을 항복 회전각의 배수로 입력해야 한다. 이를 위해 항복 회전각을 산정해야 하며 이는 항복 모멘트강도를 휨 강성으로 나눈 값이다. 휨 강성은 기둥의 경우 중앙부에서 변곡점이 있는 복곡률로 가정하여  $6EI/L$  (E: 탄성계수, I: 단면2차모멘트, L: 부재 길이), 벽체의 경우 단곡률로 가정하여  $3EI/L$ 을 사용하였으며, 이때 EI는 KISC[8]에서 제공하고 있는 부재별 유효강성을 사용하였다.

오픈시스에서 소성힌지의 변형을 입력하는 경우는 보 부재로 한정되어 있다. 오픈시스에서 소성힌지의 변형은 곡률로 입력하므로 마이다스나 퍼폼과 같이 KISC[8]의 표를 사용하지 않고 항복곡률과 극한곡률을 휨 이론을 바탕으로 직접 계산하여 입력하였다. 오픈시스에서 기둥 및 벽체, 퍼폼에서 벽체는 섬유요소를 사용하므로 FEMA 힌지를 사용하는 경우와 다르다. 섬유요소 모델링을 위해서는 콘크리트와 철근의 응력-변형도 관계를 입력해야 한다. 이 관계 입력을 위해 오픈시스에서는 concrete01(콘크리트) 및 steel01(철근)을, 퍼폼에서는 Elasto-Plastic(콘크리트) 및 Elasto-Plastic Non-Buckling(철근) 모델을 사용하였다. 여기서 응력은 공칭값을 사용했음을 주지한다. 이와 같이 단면을 섬유요소로 모델링하는 경우에는 FEMA 힌지와 다르게 최대 강도 도달 후 급격한 강도의 하락을 나타낼 수 없다.

## 5. 부재 단면 해석 결과 비교

사용한 해석프로그램의 부재 별 비교를 위해서 모멘트-회전각 관계를 사용하였다. 오픈시스는 출력되는 결과가 모멘트-곡률관계이므로 곡률을 회전각으로 변환시켜 사용하였다. 이 때 곡률과 회전각의 관계는 일반적인 역학 이론을 따랐다. 퍼폼에서는 기둥과 보의 모멘트-회전각 관계를 직접 출력할 수 있지만 벽체의 경우 회전각을 출력하기 위해 벽체에 게이지를 사용해야 한다. 이 게이지는 벽체 모델의 4개 절점에 위치하여 각 지점의 수평,

Table 2. Types of inelastic section model

Member	Midas Gen	OpenSees	Perform-3D
Beam	FEMA Hinge	Lumped Hinge	FEMA Hinge
Column	FEMA Hinge	Fiber	FEMA Hinge
Wall	FEMA Hinge	Fiber	Fiber

수직 변위로부터 해당 벽체의 축, 전단, 및 휨 변형을 산출한다. 다른 프로그램과 비교를 위해 휨 변형에 대한 회전각을 사용하였다.

Fig. 3은 보 부재의 모멘트-곡률 관계를 나타낸 것이다. 대상 보는 Fig. 1에서 네모 상자로 표시한 G2 부재다. Midas\_A를 제외한 모든 프로그램에서는 강도를 직접 입력하기 때문에 부재의 강도 부분은 같게 나타난다. Midas\_A에서 항복모멘트가 다른 경우보다 더 큰 이유는 Midas\_A에서의 항복모멘트는 실제 항복모멘트 My가 아닌 공칭모멘트 Mn이기 때문이다. 마이다스는 설계를 위해 각 부재의 Mn을 계산하지만 My를 계산하지 않는다. 따라서 마이다스 자동 입력을 사용하면 항복모멘트는 공칭모멘트를 명심해야 한다. Midas\_M과 다른 프로그램에서는 Mn의 96%를 항복모멘트 My로 사용하였다.

변형능력은 Midas\_A, Midas\_M, 그리고 퍼폼에서 동일하게 입력하였다. 하지만 Fig. 3에서 Midas\_A의 성능곡선이 더 큰 변형능력을 보이고 있다. 마이다스는 최대회전각을 항복회전각의 비로 입력하는데, 이 비가 동일하더라도 항복회전각이 크면 최대회전각도 크게 된다. Midas\_A의 항복모멘트가 Midas\_M과 퍼폼보다 큼에 따라 항복회전각도 크기 때문에 최대회전각이 더 크게 되므로 Fig. 3에서 알 수 있듯이 가장 늦게 강도가 떨어지게 된다. 오픈시스에서는 변형능력이 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. 타 프로그램의 경우 FEMA 형식으로 회전각을 입력시켰지만 오픈시스는 휨 이론을 이용한 극한곡률( $\phi_u$ )을 직접 구하여 회전각으로 변환시켰기 때문에 FEMA의 보수적인 값보다 상대적으로 크다.

기둥의 경우도 큰 차이는 없었다. Fig. 4는 Fig. 1에서 네모 상자로 표시된 C2 기둥의 모멘트-회전각 관계를 나타낸 것이다. 오픈시스를 제외한 나머지는 곡선이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. Table 3에서 Midas\_M의 축력과 모멘트는 김태완과 민찬기[7]의 방법으로 성능점에서 구한 값으로

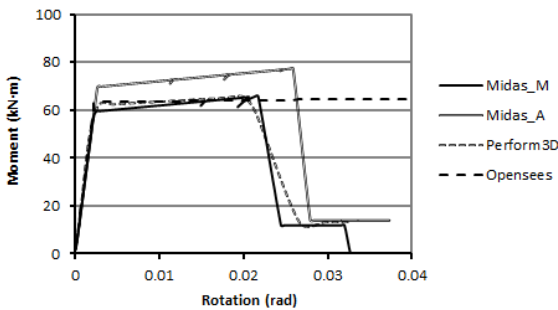


Fig. 3. Moment-rotation at G2 beam (FW-2S)

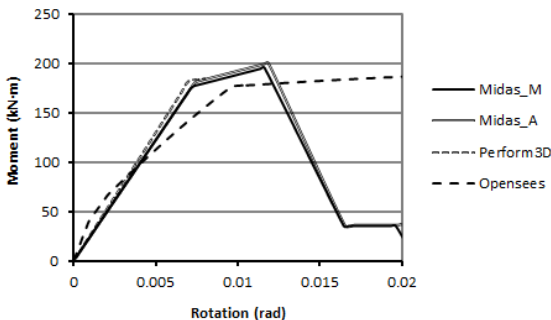


Fig. 4. Moment-rotation at C2 column (FW-2S)

Table 3. Axial force and yield moment of column

	Po (kN)	Py (kN)	My (kN · m)
Midas_M	-602	-621	177
Midas_A	-602	-609	181*)
Opensees	-574	-582	177
Perform 3D	-606	-615	181

\* Ultimate strength (Mn)

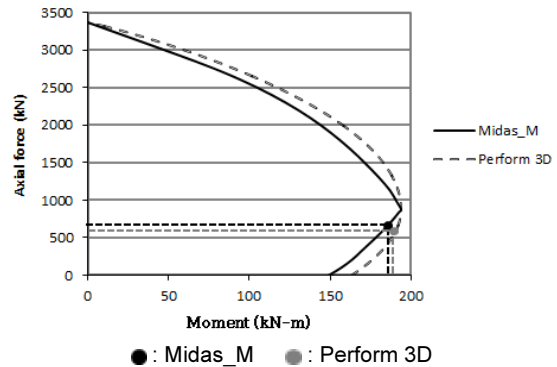


Fig. 5. P-M curve of C2 column (FW-2S)

해석 전에 모델에 입력한 값이며, Midas\_A의 축력과 모멘트는 해석 과정에서 축력-모멘트 상관관계를 항복면(yield surface)로 하여 기둥이 항복하는 시점에서 추출한 값이다. Midas\_M과 Midas\_A의 항복 시점에서 축력의 차이가 12 kN이 발생하는 이유다. Midas\_M의 My는 극한강도의 96%이고 Midas\_A의 My는 실제로 Mn이다. 더불어 Midas\_M은 축력-모멘트 상관관계에서 해석 방향으로 1축 모멘트를 사용하였고 Midas\_A는 프로그램 자체적으로 2축 모멘트를 사용한 결과임을 주지한다. 항복 시점의 축력에서 약간의 차이가 발생하지만 공학적으로 크게 의미 있지는 않으므로 김태완과 민찬기[7]의 방법의 유용성을 보여주는 사례다.

퍼폼에서 기둥의 항복모멘트강도를 구하는 방식은 Midas\_M과 Midas\_A의 혼합형이다. Midas\_A와 같이 항복면으로부터 축력과 모멘트를 산정하나 특정 비율로 이 값을 조절할 수 있어 Midas\_M과 같이 96%의 비율로 항복모멘트강도를 산정하였다. Table 3에서 퍼폼의 결과는 이러한 과정으로 산출된 것이다. 따라서 기둥의 항복모멘트 산정에서는 마이다스와 퍼폼의 방법이 거의 동일하다고 할 수 있다. 하지만 그 절차에서는 서로 약간의 차이가 있으며 그 차이를 Fig. 5에 나타내었다. Midas\_M에서는 축력-모멘트 상관관계를 25개의 점을 선형보간하여 사용하는 반면 퍼폼은 연속적인 타원을 사용한다. 특정 기둥 부재의 축력이 동일하더라도 마이다스와 퍼폼의 모멘트강도는 다를 수 있다. 축력-모멘트 상관관계를 구할 때 마이다스가 퍼폼보다 많은 지점을 사용하므로 마이다스의 결과가 보다 정확하다고 할 수 있다. 물론 퍼폼에서 축력-모멘트 상관관계의 형태를 조절할 수 있는 기능이 있으므로 사용자의 의도를 반영할 수 있다.

오픈시스에서 기둥은 유일하게 섬유요소로 모델링 되어 모멘트-회전각 관계에서 다른 프로그램과 다른 결과를 보이고 있다. 섬유요소 이외에도 중요한 요인이 있다. 마이다스와 퍼폼에서 기둥의 모멘트-회전각 관계는 기둥 요소의 양단 두 절점에서 제공된다. 하지만 오픈시스에서는 양단 절점에서 곡률만을 제공한다. 따라서 Fig. 4에서 오픈시스의 회전각은 기둥 부재가

중양부를 변곡점으로 한 복곡률을 보이는 것으로 가정하여 곡률을 적분하여 산정한 것이다. 또한 Fig. 4의 모멘트-회전각은 1층 기둥 하단부 지점의 결과다. 지점은 회전이 구속되어 있으므로 실제로 항복하기 전까지는 회전각이 있을 수 없다. 결국 항복 이전의 회전각은 기둥 지점이 아니라 변곡점에서의 회전각이며 항복 이후의 회전각은 항복 시 변곡점에서의 회전각에 지점의 소성 회전각을 더한 것이다. 마이다스나 퍼폼도 내부적으로 이와 같은 방법을 사용하거나 소성힌지를 입력할 때 포함 된 탄성영역으로부터 직접 회전각을 얻을 것이다. 하지만 오픈시스에서는 기둥의 단부 곡률로부터 회전각을 산정해야 하므로 타 프로그램과 일정한 차이가 발생하였다. 더불어 마이다스와 퍼폼에서 기둥의 유효강성비를 50%로 사용하였는데 오픈시스의 기율기는 이들의 기율기보다 더 작았다.

Table 3의 오픈시스 결과에서 항복 시 축력은 타 프로그램과 차이가 난다. 이 차이는 비선형 푸시오버해석 과정의 차이도 있겠지만 주로 푸시오버 해석을 시작하기 전 수직하중(고정하중의 1.0배와 활하중의 0.25배)만을 가했을 때 산정한 기둥의 축력 Po로부터 발생하였다. 이러한 차이의 원인은 근본적으로 2D와 3D 모델의 차이에 기인한 것이다. 오픈시스는 예제 건물을 2D로 모델링하여 개별 골조를 일렬로 세워 해석하였으나 퍼폼과 마이다스는 3D로 실제 골조 형태를 그대로 모델링하였다. 부재력(축력, 전단력, 모멘트)을 모두 확인한 결과 평면에서 가장자리에 위치한 골조의 경우에는 오픈시스 결과값이 더 컸으며 가운데 위치한 골조의 경우에는 마이다스의 결과가 더 컸다. 그리고 2층 골조보다는 1층 골조에서 부재력의 차이가 더 크게 나타났다.

오픈시스의 경우에는 해석 방향 골조의 횡방향에서 연결되는 보들의 전단력을 수계산으로 반영하고 있으나 강성은 전혀 반영하지 못한다. 하지만 퍼폼과 마이다스의 경우는 실제 모든 부재의 강성이 반영되므로 가장자리의 골조보다는 가운데 위치한 골조의 강성이 더 커서 전반적인 부재력이 가운데 골조로 보다 더 집중되는 결과가 발생하였다. 오픈시스에서는 횡방향 보에 작용하는 하중이 대칭이므로 보 양단에 각각 1/2씩 작용하는 것으로 계산하여 이를 기둥에 축력으로 작용시켰다. 하지만 마이다스에서 횡방향 보의 양단 전단력을 확인한 결과 두 값이 동일하지 않고 내부에 면한 단부의 전단력이 더 크게 나타났다. 이로 인해 내부 기둥의 축력은 마이다스의 결과가 오픈시스보다 컸고 외부 기둥의 축력은 마이다스의 결과가 오픈시스보다 작았다. Table 3의 기둥은 내부 기둥이므로 오픈시스의 축력 결과가 마이다스나 퍼폼의 결과보다 더 작게 나타난 것이다. 횡력이 증가하면서 기둥은 평면에서 위치에 따라 추가적인 압축 또는 인장력을 받는다. 대상 기둥은 압축력이 약간 증가하였으며, 프로그램간의 증가량의 차이는 크지 않았다. Table 3에서 Midas\_M에 대한 축력 및 모멘트는 해석 전에 미리 입력한 값으로 Midas\_A와 정확히 일치하지 않는다.

마이다스에서 기둥과 벽체의 차이는 이미 언급한대로 입력 절점 개수의 차이를 제외하면 동일하다. 벽체 입력을 위한 절점은 4개이나 결과의 출력은 기둥과 동일하게 2개의 절점에서 제공한다. 따라서 벽체 해석에서 Fig. 6과 Fig. 7, Table 4와 Table 5에서 확인할 수 있는 Midas\_M과 Midas\_A의 차이는 기둥의 경우와 완전히 동일한 원인이다. 마이다스에서 벽체의 모멘트-회전각 관계는 기둥과 동일하게 1층 벽체 하단부, 즉 지점에서 추출한 값이다. 기둥에서는 마이다스와 퍼폼이 동일한 모델링방식을 사용하여 동일한 출력을 보였으나 벽체에서는 서로 완전히 다른 방식을 사용한다.

벽체 해석에서 오픈시스와 퍼폼은 단면을 섬유요소로 모델링한다는 점

에서 동일하나 벽체 요소를 정의할 때 오픈시스는 두 개의 절점을, 퍼폼은 네 개의 절점을 사용하는 점에서 다르다. 또한 오픈시스는 벽체의 형상을 해석모델에 반영하기 위해 강체보를 사용하여 인접 골조와 연결한다. Fig. 6과 Fig. 7에서 오픈시스의 회전각은 1층 벽체 상단에 위치한 강체보의 회전각을 추출한 것이다. 기둥과 같이 벽체 하단의 곡률로부터 적분하여 회전각을 산정할 수도 있으나 변형형상 및 소성힌지영역과 같은 불확실한 요인이 많았고 벽체 상단의 곡률이 매우 미미하여 벽체 상단의 절점으로부터 직접 회전각을 추출하였다. 퍼폼에서도 벽체 상단의 절점으로부터 직접 회전각을 추출하였다. 따라서 Fig. 6과 Fig. 7에서 나타난 마이다스의 회전각은 오픈시스나 퍼폼과 근본적으로 차이가 날 수밖에 없다. 또한 마이다스에서는 앞서 언급한대로 강성을 단곡률로 가정하여 3EI/L을 사용하였고 콘크리트의 균열을 고려하여 EI를 50%만 반영하였음에도 불구하고 오픈시스나 퍼폼에 비해 탄성기율기가 매우 크다. 회전각 추출에 있어 근본적인 차이가 있더라도 이러한 차이는 유효강성을 더 작은 값으로 사용해야 할 필요성을 보여준다.

오픈시스와 퍼폼은 벽체에서 섬유요소를 사용하는 점에 있어 동일하나 Fig. 6과 Fig. 7에서는 차이가 있다. 오픈시스의 곡선은 해석이 수행된 지점까지 나타난 것이다. 두 프로그램의 차이를 분석하기 위해 벽체의 인장철근이 항복할 때를 삼각형으로 표시하였다. 삼각형의 위치를 가로축의 회전각으로 비교하면 큰 차이가 없다. 하지만 세로축의 모멘트를 비교하면 서로 큰 차이가 있다. 이러한 모멘트의 차이는 먼저 오픈시스와 퍼폼이 벽체의 모멘트를 제공하는 방식에 기인한다. 오픈시스의 벽체 모멘트 제공 방식은 마이다스와 동일하게 벽체 상, 하단의 절점에서 2개를 제공한다. Fig. 6과 Fig. 7에서의 오픈시스와 마이다스의 모멘트는 벽체 하단에서 추출한 값이다. 두 프로그램 모두 벽체상단에서의 모멘트는 하단보다 작은 값을 보이고 있다. 반면 퍼폼은 벽체 요소에서 하나의 모멘트를 제공한다. 마이다스나 오픈시스

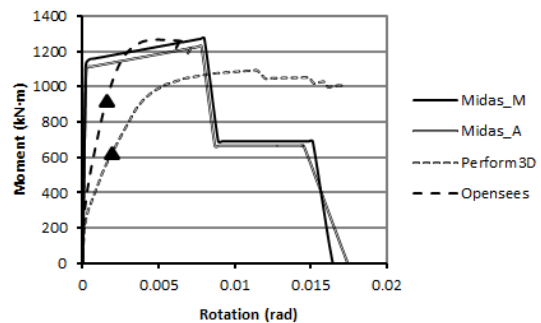


Fig. 6. Moment-Rotation at Compression wall (FW-2S)

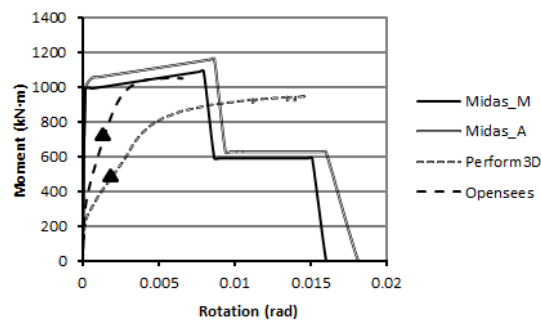


Fig. 7. Moment-Rotation at Tension wall (FW-2S)

**Table 4.** Axial force and yield moment of compression wall

	Po (kN)	Py (kN)	My (kN · m)
Midas_M	-220	-316	1153
Midas_A	-220	-261	1107*)
Opensees	-266	-332	913
Perform 3D	-233	-317	837

\* Ultimate strength (Mn)

**Table 5.** Axial force and yield moment of tension wall

	Po (kN)	Py (kN)	My (kN · m)
Midas_M	-220	-176	987
Midas_A	-220	-215	1047*)
Opensees	-266	-212	759
Perform 3D	-233	-158	695

\* Ultimate strength (Mn)

스의 벽체 상, 하단 모멘트를 하단으로부터 벽체 높이 1/3 지점의 모멘트로 선형보간하면 퍼폼의 모멘트와 거의 유사한 값을 얻는다. 다음 장에서 다룰 전체 건물의 성능곡선에서는 퍼폼과 다른 프로그램과의 차이는 크지 않았으므로 퍼폼과 타 프로그램의 벽체 모멘트 차이의 원인은 바로 이것이다.

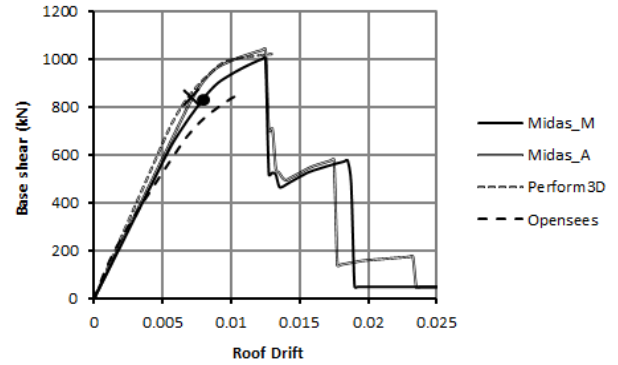
벽체의 평면 위치에 따라 푸시오버해석 시 압축력이 추가될 수도, 인장력이 추가될 수도 있다. Fig. 6과 Fig. 7, Table 4와 Table 5는 각각 압축력 및 인장력이 추가되는 벽체의 결과이다. 즉, Fig. 1의 평면에서 좌측 위에 위치한 벽체는 인장력이 우측 아래에 위치한 벽체는 압축력이 추가된다. 표에서 보면 항복 시의 축력은 모두 압축력이다. 이는 예제 건물의 층수가 낮아 벽체에 인장력이 발생할 만큼의 전도모멘트가 발생하지 않는다는 의미다. Table 4와 Table 5에서 고정하중의 1.0배와 활하중의 0.25배를 가했을 때 벽체의 축력 Po는 기둥과 유사하게 오픈시스만 차이가 크다. 벽체에서는 오픈시스의 축력이 마이다스보다 더 크게 앞서 설명한대로 벽체는 바깥쪽에 위치하고 있기 때문이다.

이러한 중력하중에 의한 차이보다는 푸시오버해석에 의한 축력의 변화 차이가 더욱 크다. Table 4와 Table 5에서 항복 시의 축력을 보면 마이다스는 푸시오버해석으로 인한 축력의 변화가 크지 않았으나(Midas\_M은 성능점에서의 값이므로 제외) 오픈시스와 퍼폼은 축력의 변화가 상대적으로 매우 크다. 비선형정적 푸시오버해석 시 개별 프로그램이 수직 부재의 축력을 어떻게 반영하는가에 따라 달라진 것이며 이러한 축력의 차이는 항복모멘트의 차이로 나타날 수밖에 없다. 물론 기둥에서와 같이 축력-모멘트 상관관계를 반영하는 방법에서도 기본적으로 차이가 발생한다. 퍼폼과 타 프로그램의 벽체 모멘트 제공 방법 자체의 차이 때문이기도 하다. 하지만 전체 건물의 성능곡선을 비교하면 그 차이는 크지 않았다. 이는 다음 장에서 다루게 될 것이다.

## 6. 비선형정적 해석 결과 비교

### 6.1 골조만 있는 건물

Fig. 8은 벽체가 없는 순수 모멘트 골조 건물의 밀면전단력과 지붕층 변



**Fig. 8.** Capacity curve of moment frame only

위 관계를 나타낸다. 오픈시스를 제외한 모든 프로그램에서 기둥의 항복에 의해서 푸시오버 곡선이 항복한다. 최초로 항복하는 기둥은 1층에서 건물의 가운데에 위치한 내부 기둥에서 항복하며 푸시오버 곡선에서 파괴되는 시점 또한 1층 내부 기둥에서 최초로 파괴가 발생한 때다. 이 때 퍼폼은 해석이 중단되며, 마이다스는 강도의 급격한 저하가 나타난다. 반면 오픈시스에서는 보가 먼저 항복한 후 기둥이 항복하는데 약간의 소성구간을 지난 후 특별한 거동이 없는데도 불구하고 해를 찾지 못해 해석이 중단되었다. 오픈시스의 성능곡선에서 소성구간이 뚜렷하게 보이지 않는 이유다. 이러한 현상은 보와 기둥이 함께 비선형영역에 진입하여 특정 접합부에서 정해를 찾지 못하는 것으로 판단된다. 해석 모델에서 특정 변수의 값이 약간 변화하더라도 해석이 더 진행되거나 더 빨리 중지될 수 있다. 만약 해석이 더 진행되었다면 오픈시스의 성능곡선은 타 프로그램에 비해 훨씬 더 큰 변형능력을 보였을 것이다. Fig. 4에서 오픈시스의 기둥 강성이 타 프로그램보다 작았기 때문에 Fig. 8의 성능곡선에서도 오픈시스의 기울기가 가장 작다.

Midas\_M과 Midas\_A에서는 기둥이 항복한 후 자신의 최대변형능력에 도달하여 전체 강도의 급격한 저하를 초래했다. Fig. 3과 Fig. 4의 보 및 기둥의 결과에서와 같이 성능곡선에서도 둘 사이에 큰 차이는 없었다. 퍼폼의 성능곡선도 마이다스와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이 또한 Fig. 3과 Fig. 4의 결과가 반영된 것이다. 성능평가를 수행할 때는 성능곡선이 이루고 있는 면적이 중요하다. 순수골조만 있을 때는 마이다스와 퍼폼을 사용할 경우 성능평가 결과에 큰 차이가 없을 것이다. 오픈시스의 경우 본 예제와 같이 해석이 중단되는 현상이 없다면 변형능력이 더 크게 나타나므로 이 경우에는 성능을 더 좋게 평가할 수 있다. 하지만 강성이 작으므로 성능곡선 면적의 차이는 크지 않을 수도 있다. 따라서 사용자가 프로그램의 이러한 차이를 염두에 두고 해석결과를 성능평가에 이용한다면 순수골조 건물의 비선형정적해석 및 성능평가는 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다.

### 6.2 골조와 ‘—’자형 벽체가 함께 있는 건물

‘—’자형 벽체가 있을 때 벽체의 위치 및 개수에 따라 각 프로그램 별로 차이를 비교하였다. 벽체가 평면의 한쪽에 위치한 경우 프로그램에 따라 푸시오버 진행 시 횡력에 의해 변화하는 축력의 크기가 서로 다르고 항복모멘트 강도를 구하는 방법 또한 프로그램마다 차이가 있다. 이는 앞 장에서 이미 다른 주제이며, 이로 인해 푸시오버 곡선의 최대강도 및 최대변위가 프로그램마다 차이를 보이게 된다. Fig. 9는 벽체의 위치 및 개수에 따른 각각 프

로그래의 성능곡선을 밀면전단력과 지붕층 변위 관계로 나타내었다. Midas\_M과Midas\_A의 성능곡선 상에는 성능점을 각각 ‘●’과 ‘×’로 표시하였다. 오픈시스의 성능곡선 상에서 ‘▲’로 표시된 위치는 벽체 단부의 변형률이 0.004에 도달하는 순간을 나타낸 것이다.

먼저 성능곡선의 형태로부터 해석프로그램의 특성을 분석하였다. Midas\_M과Midas\_A에서 첫 번째 강도가 떨어지는 시점은 벽체가 최대 강도에 도달했을 때이다. 인장측과 압축측 벽체가 함께 있는 경우에는 압축 측 벽체가 먼저 최대강도에 도달하고 그다음 인장측 벽체가 최대강도에 도달한다. 그다음으로 기둥이 최대강도에 도달하여 급격한 강도의 저하를 보인다. 다만Fig. 9(b)에서 Midas\_A의 경우는 대부분의 기둥이 먼저 최대강도에 도달하여 한 번의 급격한 강도 저하를 보이고 있다. 따라서 마이다스에서는 수직부재인 벽체와 기둥에 비선형거동이 집중적으로 나타나고 보는 상대적으로 비선형거동이 약하게 나타났다. 전체적으로 Midas\_M과

Midas\_A의 성능곡선은 약간의 차이를 보이는데 이 차이의 원인은 앞 장에서 이미 다루었다.

오픈시스의 성능곡선은 강도의 저하 없이 특정 시점에서 멈춰있다. 이 지점은 예제 건물에 따라 그 이유가 각자 다르다. 오픈시스 성능곡선에는 벽체 단부 변형률이 0.004에 도달하는 시점에 ‘▲’를 표시하였는데 Fig. 9를 보면 이 표시가 없는 경우도 있다. 이 경우는 그 이전에 다른 중요한 사건이 발생했을 때다. FW-1C와 FW-1T는 벽체 단부에서 먼저 콘크리트의 파괴가 시작된 후 벽체와 연결된 보에서 파괴가 발생하여 해석이 중단되었다. 인장측 벽체가 2개 있는 FW-2T도 동일한 현상을 보였다. 압축측 벽체가 2개 있는 FW-2C는 벽체 단부 변형률이 0.004에 도달하기 이전에 해석이 중단되었다. 만약 해석이 더 진행되었다면 아마도 동일한 결과가 나타났을 것이다. FW-2S와 FW-4S도 동일한 현상이 발생하였는데, 다른 점은 이러한 현상이 압축측 벽체에서만 발생했다는 것이다.

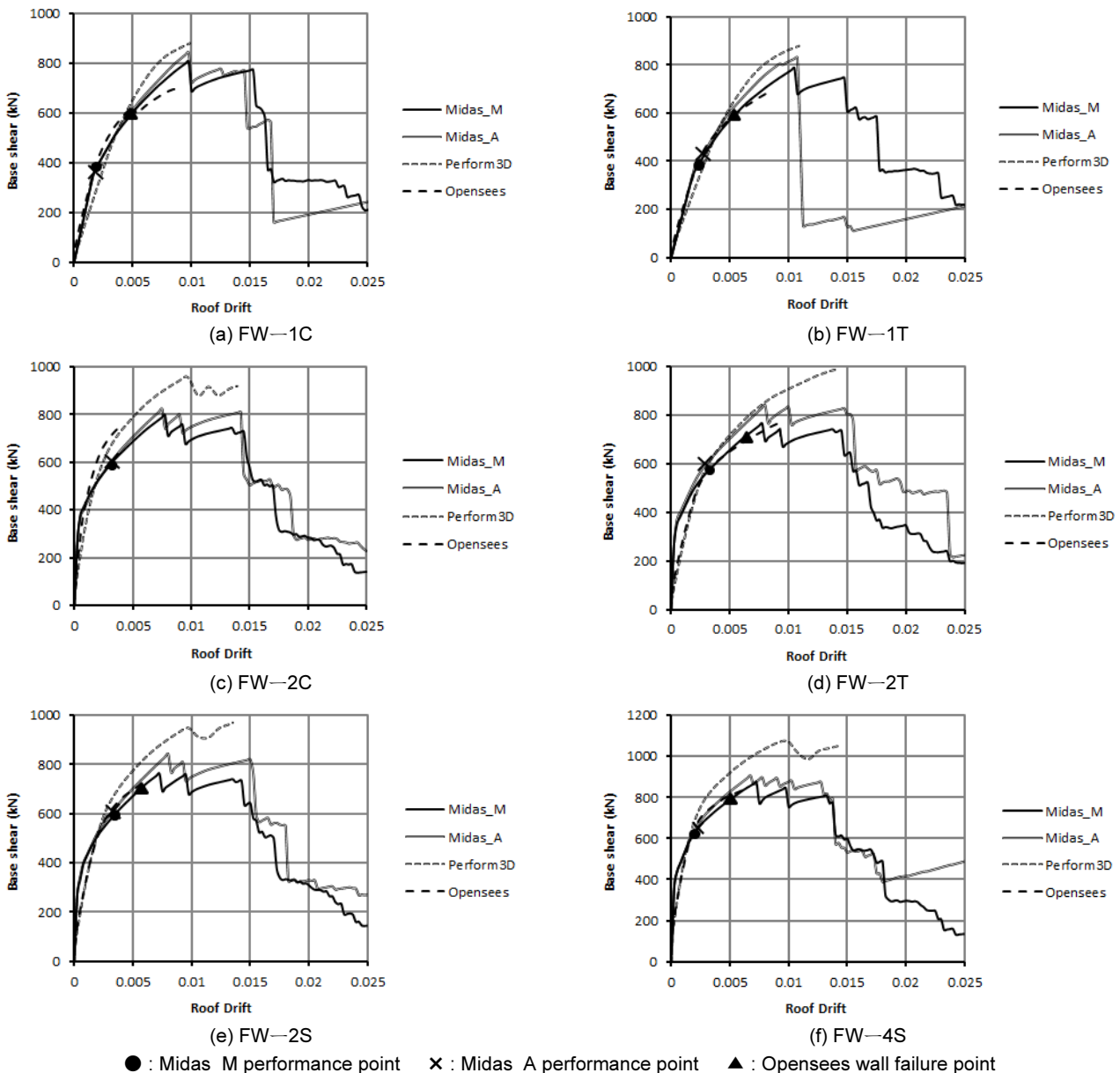


Fig. 9. Capacity curve of buildings with ‘—’ type wall



퍼폼은 다른 두 프로그램과 많이 다른 현상을 보였다. 마이더스와 오픈시스에서는 대부분 벽체에서 먼저 파괴가 발생하였는데 퍼폼에서는 벽체 단부에서 변형률이 0.004에 도달하는 경우가 없었다. 오히려 기둥이나 벽체와 연결된 보에서 먼저 파괴가 발생하여 해석이 중단되었다. FW-1C와 FW-1T는 벽체에서 대각선으로 가장 멀리 떨어진 기둥에서 가장 먼저 파괴가 발생했다. 이는 벽체가 한쪽 모서리에 위치하여 평면 비대칭이 아주 커서 발생한 것으로 보인다. FW-2T에서는 평면 중앙에 위치한 두 기둥에서 먼저 파괴가 발생하였다. 반면 FW-2C에서는 벽체와 연결된 보에서 파괴가 먼저 발생하였다. FW-2S와 FW-4S의 경우 압축측 벽체와 연결된 보에서 먼저 파괴가 발생하였다. 따라서 퍼폼에서는 벽체가 하나 있을 때를 제외하고 압축측 벽체와 연결된 보의 회전 요구량이 크게 산정되고 있다.

개별 건물간의 성능곡선을 비교하면 먼저 FW-1C와 FW-1T의 성능곡선이 큰 차이가 없다. Fig. 2를 보면 이들은 벽체가 평면에 한 쪽 모서리에 위치하여 해석 방향으로 예제 건물 중 가장 비대칭인 건물이다. 따라서 해석 전에는 두 건물의 성능곡선에 큰 차이가 있을 것으로 예상하였으나 결과는 그렇지 않았다. FW-2C와 FW-2T는 벽체가 평면의 한 쪽에 치우쳐 있지만 해석 방향으로 비대칭은 아니다. 이 경우도 성능곡선에서 서로간의 큰 차이는 없었다. FW-2S와 FW-4S는 해석 방향으로 대칭이면서 벽체가 인장측과 압축측에 동시에 위치하고 있다. 둘 사이도 성능곡선에서 전반적으로 유사하다.

마지막으로 프로그램간의 성능곡선 차이를 비교하면 Fig. 6과 Fig. 7의 벽체 모멘트-회전각 관계와는 다른 결과를 보인다. Midas\_M과 Midas\_A는 Fig. 6과 Fig. 7의 결과와 Fig. 9의 결과가 일치한다. 오픈시스의 경우도 거의 일치하는 결과를 보인다. 반면 퍼폼의 경우에는 개별 벽체에서 모멘트강도가 다른 프로그램보다 작게 나타났지만 성능곡선에서는 밀면전단력이 다른 프로그램보다 오히려 크게 나타났다. 이는 이미 언급한대로 퍼폼은 타 프로그램과 벽체 모멘트 제공 방식이 다르기 때문이다.

### 6.3 결과 요약 및 분석

위의 결과를 한마디로 정리하면, 순수 골조 또는 골조와 ‘—’자형 벽체가 함께 있는 2층 소규모 철근콘크리트 건물의 성능곡선은 현재 가장 많이 사용하고 있는 비선형해석 프로그램 간에 큰 차이가 없다는 것이다. 특히 순수 골조만 있을 때는 더욱 그러하다. 하지만 벽체가 있을 때 좀 더 세밀하게 비교 분석하면 벽체의 위치 및 숫자에 따라 약간의 차이를 발견할 수 있다.

압축측에 위치한 벽체는 푸시오버해석 시 압축력이 증가할 수밖에 없고 예제와 같은 저층 건물에서는 항복모멘트가 증가하게 된다. 이에 따라 벽체와 연결된 보 부재도 더 큰 하중을 받게 된다. 벽체와 연결된 보에 집중되는 모멘트 또는 회전 요구량에 따라 전체 건물의 성능에 차이가 발생하며 이를 처리하는 프로그램의 방식에 따라 서로 조금씩 차이가 발생하게 된다. 벽량이 증가하면 강성의 증가로 벽체로의 하중 집중이 더욱 심화되어 벽체의 축력 및 모멘트와 같은 부재력도 함께 증가한다. 앞 장에서 분석한대로 푸시오버해석 시 축력의 변화는 프로그램 간에 차이가 있다. 따라서 이는 벽체의 모멘트강도의 차이로 이어져 성능곡선에도 영향을 미치는 것이다. 또한 벽량이 증가하는 데도 불구하고 변형능력은 오히려 감소한다. 강성 증가로 하중이 집중되어 빨리 자신의 최대 강도에 도달하기 때문이다.

벽체 단면의 콘크리트 압축 변형률을 성능 평가를 위한 주요한 변수로 선택한다면 벽체를 섬유요소로 모델링하는 오픈시스와 퍼폼의 결과가 크게 다를 수 있다. 푸시오버해석에서 지붕층 변위를 동일한 수준까지 증가했을 때 오픈시스에서는 거의 대부분 한계 변형률에 도달하였으나 퍼폼에서는 모두 도달하지 않았다. 결국 콘크리트 압축 변형률을 성능의 주요 변수로 하고 퍼폼으로 이를 검토한다면 벽체의 성능에 문제가 없는 것으로 나타날 수 있다. 반면 오픈시스로 검토한다면 반대의 결과가 나올 수 있다. 이에 대한 자세한 분석은 다음 논문에서 다루고 있다.

비선형정적 푸시오버해석을 통한 성능평가에서는 일반적으로 밀면전단력과 지붕층변위의 관계인 성능곡선을 사용한다. 성능곡선으로 성능을 판단하면 벽체가 있을 때 퍼폼의 성능이 상대적으로 좋게 나타난다. 반대로 마이더스, 특히 오픈시스는 상대적으로 좋지 않게 나타난다. 물론 여기서는 Midas\_A에서 변형능력을 사용자 입력으로 직접 입력했다는 것을 주지해야 한다. 변형능력에도 지동입력을 사용한다면 전혀 다른 결과를 얻을 수 있다. 따라서 성능평가 시 평가자는 이와 같은 프로그램의 특성을 잘 감안하여 해석결과를 평가에 사용할 필요가 있다.

## 7. 결론

소규모 철근콘크리트 건물을 대상으로 순수 골조만 있을 때와 ‘—’자형 벽체가 함께 있을 때로 구분하여 현재 가장 활발히 사용하고 있는 해석 프로그램으로 비선형정적 푸시오버해석을 수행하여 프로그램 간의 차이를 분석하였다. 성능곡선으로 대표되는 전체 거동은 순수 골조만 있을 때나 ‘—’자형 벽체가 함께 있을 때도 큰 차이는 없었다. 하지만 이를 부재 수준에서 좀 더 세밀하게 분석하면 프로그램간의 약간의 차이가 있음을 알 수 있었다. 그 차이는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 2차원과 3차원 해석모델은 골조의 위치에 따라 탄성해석에서도 부재력에 차이가 발생한다. 이는 특히 축력에 따라 영향을 받는 기둥의 모멘트 강도에 영향을 미친다. 두 모델의 결과를 비교할 때는 이 점에 유의해야 한다.
- 2) 마이더스와 퍼폼의 기둥 모델링 방법은 거의 동일하나 축력-모멘트 상관 관계를 산정할 때 약간 다르다. 마이더스는 다수의 점들을 선형보간하나 퍼폼은 3개의 점으로부터 포물선을 만들어 나타낸다. 이때 포물선을 더 폴트 값으로 산정하면 동일한 축력에서 퍼폼의 모멘트강도가 마이더스보다 더 크게 나타날 수 있다.
- 3) 벽체의 모멘트-회전각 관계에서는 마이더스, 퍼폼, 및 오픈시스의 결과가 서로 달랐다. 하지만 건물 전체의 밀면전단력과 지붕층변위 관계에서는 세 프로그램의 결과에 차이가 크지 않았다. 벽체 모멘트-회전각의 차이는 각 프로그램의 제공 방법 차이에 기인한다. 비선형해석의 결과를 분석할 때 이러한 차이를 주지해야 한다.
- 4) 벽체 단면의 콘크리트 압축 변형률을 성능평가를 위한 주요 변수로 사용한다면 오픈시스와 퍼폼의 결과는 다를 수 있다. 이는 두 프로그램의 벽체 모델링과 변형률을 제공하는 방법상의 차이에 기인한다. 일반적으로 오픈시스가 훨씬 보수적인 결과를 제공하였다. 사용자는 이러한 특성을 고려하여 벽체의 성능을 검토해야 한다.

이러한 결과를 근거로 프로그램 사용자는 해당 프로그램의 특성을 잘 인식한 상태에서 성능평가를 수행할 필요가 있다. 특히, 건물 전체의 거동을 나타내는 성능곡선만으로 성능을 평가하는 것이 아니라 부재 수준에서도 성능을 평가할 필요가 있다. 위에 언급한 바와 같이 부재 수준에서 성능을 평가할 때 사용하는 프로그램의 결과 제공 방식에 따라 다른 결론을 내릴 수 있기 때문이다.

본 연구의 결과는 대상 건물이 순수 골조만 있을 때와 ‘—’자형 벽체가 함께 있을 때로 한정되므로 ‘L’ 및 ‘口’자형 벽체가 있을 때는 전혀 다른 결과가 나타날 수 있다. 이와 관련한 해석결과는 다음 논문에서 확인할 수 있다. 더불어 대상 건물은 2층으로 저층이므로 중, 고층 건물에서는 본 논문과 다른 결과가 나타날 수 있다. 국내에서는 대부분의 철근콘크리트 건물에 벽체를 사용하므로 앞으로 벽체가 있는 중, 고층 건물의 비선형해석을 위한 프로그램의 특성을 비교 분석할 필요가 있으며, 이러한 연구를 수행할 계획이다.

**/ 감사의 글 /**

2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호- 120140378).

**/ REFERENCES /**

1. MIDAS GEN User's Manual, ver 785, MIDAS IT; c2010.
2. Pacific Earthquake Engineering Research Center. Open simulation for earthquake engineering. Available from : <http://opensees.berkeley.edu>.
3. CSI, Perform-3D, Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures, user guide version 4, Berkeley, CA: Computers and Structures Inc.; c2006, 336p.
4. FEMA356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency; c2000, p.518.
5. CSI, Perform components & elements version 4, Berkeley, CA: Computers and Structures Inc.; c2006, 270p.
6. AIK, KBC 2009, Korean building code-structural, Seoul, Korea: Architectural Institute of Korea; c2009, 772p.
7. Kim TW, Min CG. Analytical Study of the Effect of Full and Partial Masonry Infills on the Seismic Performance of School Buildings, Earthquake Engineering Society of Korea, 2013 Sep;17(5):197-207.
8. KISC, Guidelines for seismic performance evaluation and rehabilitation of existing buildings, Gyeonggi-do, Korea: Korea Infrastructure Safety Corporation; c2013, 120p.