

소규모 철근콘크리트 건축물을 위한 비선형해석 프로그램 비교 II

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

유창환¹⁾ · 김태완^{1)*} · 박홍근²⁾

Yoo, Changhwan¹⁾ · Kim, Taewan^{1)*} · Park, Hong-Gun²⁾

¹⁾강원대학교 도시건축학부, ²⁾서울대학교 건축학과

¹⁾Urban, Design and Architecture, Kangwon National University, ²⁾Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University

/ A B S T R A C T /

For small-size reinforce-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 with irregular shaped walls. Analysis result showed that there were more differences than for frames only and frames with rectangular walls, but it was not so significant. Nevertheless, the capacity curve were different in some buildings, which is attributed to shape and location of walls, and feature of the analysis program. Especially, selection of automatic or manual input in Midas Gen, or nonlinear wall elements in Perform3D can affect the capacity curve and performance of the buildings. 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 buildings so that it should be noted that it is possible to get different results for 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

이 논문은 앞선 ‘소규모 철근콘크리트 건축물을 위한 비선형해석 프로그램 비교 I’ 과 배경과 연구진행 방식이 동일하다. 따라서 서론에서는 앞선 논문의 간략한 정리와 함께 다른 부분을 서술하고자 한다.

국내에서는 현재 관공서나 학교와 같은 공공건물을 중심으로 내진성능 보강 작업이 점차 증가하는 추세에 있다. 기존 건물이 노후화되면서 리모델링에 대한 수요가 증가하고 있는데 이 때 과거 기준으로 내진설계가 되어 있지 않거나 상대적으로 낮은 지진재해도에 대해 설계된 건물의 내진보강 작업을 동시에 실시하는 것이다. 내진보강을 위해서는 내진성능평가가 반드시 선행되어야 하는데, 이는 비선형해석이 반드시 수반되어야 한다. 특히 대부분의 공공건물이 철근콘크리트 구조이기 때문에 이 구조의 정확한 비선형해석이 중요하다.

현재 국내 건축구조설계 실무기술자들은 대부분 국내 상업용 구조해석 프로그램인 MIDAS Gen[1]을 사용하고 있다. 이 프로그램은 탄성 및 비선형해석과 설계가 동시에 가능하며 이를 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic user interface)를 통해 대단히 편리하게 수행할 수 있기 때문이다. 이러한 장점이 있는 반면에 비선형해석에는 여러 단점이 있으며, 특히 철근콘크리트 벽체의 비선형해석은 그 신뢰성에 의문이 있다. 많은 연구자나 실무자들이 신뢰성에 의문을 가지고 있지만 상세한 연구 결과를 제시하지는 못하고 있다.

일반적으로 연구에서는 직사각형 형태의 벽체가 단독으로 골조와 함께 있는 건물을 주로 예제로 사용한다. 그 이유는 해석모델링 및 해석 결과 분석이 상대적으로 쉽기 때문이다. 하지만 실제 건물에서는, 특히 국내의 경우, 직사각형 벽체가 단독으로 위치하는 경우는 많지 않다. 반면 직사각형 벽체가 서로 수직으로 만나는 형태가 매우 흔하다. 이 경우 벽체의 비선형해석 결과는 2차원 또는 3차원 해석인지, 벽체의 비선형 모델이 섬유 요소(Fiber element) 또는 집중 힌지(Lumped hinge)인지에 따라 크게 다르다. 더불어 구조해석 프로그램들 간에도 결과의 차이가 존재한다. 이러한 차이

*Corresponding author: Kim, Taewan

E-mail: tkim@kangwon.ac.kr

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

가 발생하는 원인을 분석하여 연구자 또는 실무자가 이들 프로그램을 사용하여 비선형 모델링 및 해석을 수행할 때 필요한 정보를 제공할 필요가 있다.

이러한 배경으로 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 구조 해석 프로그램인 MIDAS Gen[1]과 현재 오픈소스를 기반으로 무료로 사용할 수 있는 OpenSees[2], 상업용 구조해석프로그램인 Perform-3D[3]의 비선형해석 결과를 비교 분석함으로써 실무기술자들뿐만 아니라 학계의 연구자들에게 각각의 프로그램이 어떤 특성이 있으며 비선형해석 시 어떤 점에 유의해야 하는지를 제공하고자 한다. 앞선 논문에서는 벽체가 없는 골조형식의 건물과 직사각형 벽체가 골조와 함께 있는 건물을 대상으로 연구를 수행하였다. 그 결과 벽체가 없거나 직사각형 벽체가 함께 있는 골조 건물은 해석프로그램 간에 차이가 크지 않았다. 본 연구에서는 직사각형 벽체가 서로 수직으로 만나 ‘L’, 또는 ‘口’자 형태를 가지는 건물을 대상으로 하였다.

2. 비선형 구조해석 프로그램

앞선 논문에서는 각 해석 프로그램의 일반적인 특성에 대해 주로 기술하였다. 여기서는 벽체, 특히 직사각형 벽체가 서로 수직으로 만나는 ‘L’, 또는 ‘口’자 형태의 벽체, 모델링에 대한 각 해석 프로그램의 특성과 차이점을 기술하고자 한다.

2.1 MIDAS GEN[1]

MIDAS GEN(이하 마이다스)은 타 프로그램에 비해 벽체 입력력이 가장 편리하다. 입력 시 4개의 절점을 사용하는 것을 제외하면 강성, 강도 등의 입력이나, I, J로 나타내는 두 개의 절점으로 부재력 및 변형을 제공하는 점에서 기둥 부재와 다른 점이 없다. 본 논문에서 다루는 ‘L’, 또는 ‘口’자 형태의 벽체를 모델링 할 경우, 마이다스는 3차원 그래픽 사용자 인터페이스로 각 방향의 직사각형 벽체를 개별적으로 입력하면 되므로 매우 간단하다. 개별 직사각형 벽체는 면내 방향으로만 저항능력을 가지며 면외 방향으로는 저항능력이 없는 Membrane 요소로 모델링한다. 따라서 해석방향에 평행한 벽체(이하 웹 벽체)는 횡력에 전단 및 휨으로 저항하나 수직으로 놓인 벽체(이하 플랜지 벽체)는 축력으로 횡력에 저항하게 된다. 이 때문에 직사각형 벽체는 일반적으로 전단 및 휨에 대해 비선형거동을 모델링하지만, 다른 직사각형 벽체와 서로 수직으로 만날 때는 축방향으로도 비선형거동을 모델링할 필요가 있다. 한 직사각형 벽체가 면내 방향으로 전단 또는 휨에 저항할 때 이 벽체에 수직인 벽체는 축방향으로 압축 또는 인장, 항복 또는 파괴가 발생할 수 있기 때문이다. 이럼에도 불구하고 플랜지 및 웹 벽체 사이의 상호작용, 즉 플랜지 벽체 유효 길이나 전단지연(shear lag) 등과 같은 거동은 나타낼 수가 없다. 이러한 단점은 다른 해석프로그램에서도 동일하게 존재한다.

2.2 OpenSees[2]

OpenSees(이하 오픈시스)는 벽체를 기둥과 같이 선 요소로 단순하게 표현한다. 비선형거동을 나타내기 위한 단면 모델링은 집중(Lumped) 힌

지를 사용할 수도 있으나 대개 섬유요소를 사용한다. 오픈시스는 3차원해석이 가능하나 그래픽 사용자 인터페이스가 부재한 관계로 주로 2차원해석을 수행한다. 직사각형 벽체의 경우 약간의 부족함이 있지만 선 요소와 섬유요소를 사용하여 2차원으로 모델링하고 해석하는데 큰 문제는 없다. 하지만 ‘L’, 또는 ‘口’자 형태의 비정형벽체를 2차원으로 해석하는 것은 간단하지 않다. 2차원해석에서는 해석 방향으로만 모델링하므로 해석 방향에 평행한 벽체와 함께 거동하는 수직 방향 벽체는 하나의 단면으로 나타낼 수 밖에 없다. 이 경우 마이다스에 비해 해석 방향에 수직인 플랜지 역할 벽체의 영향을 직접 반영할 수 있는 장점이 있다. 하지만 벽체 형태가 비정형이므로 하중의 방향에 따라 중립축의 위치가 크게 바뀌게 되는데 선 요소로 모델링하므로 이를 반영하지 못하는 단점이 있다. 비정형벽체 해석에서 오픈시스의 장점은 단면을 섬유 요소로 모델링하여 단면의 특정 위치에서 응력이나 변형률을 검토할 수 있는 것이다. 이를 통해 비정형벽체에서 웹 벽체나 플랜지 벽체의 비선형거동을 세밀하게 관찰할 수 있다.

2.3 Perform-3D[3]

Perform-3D(이하 퍼폼)는 마이다스와 같이 그래픽 사용자 인터페이스로 비정형벽체를 3차원으로 입력할 수 있다. 비정형벽체에서 개별 직사각형 벽체를 각각 4개의 절점을 가진 벽체 요소로, 그 단면은 섬유 요소로 모델링할 수 있다. 비정형벽체를 3차원으로 입력할 수 있다는 점에서는 마이다스와 같으나 다른 점은 단면이 섬유 요소로 되어 있어 웹 벽체와 플랜지 벽체의 콘크리트 및 철근의 비선형거동을 동시에 반영할 수 있다. 또한 섬유 요소는 축력-휨 상호작용을 모사하여 하중의 방향에 따른 중립축의 이동을 반영할 수 있다. 동시에 콘크리트의 재료 특성을 바탕으로 전단 거동을 축력-휨과 함께 모사할 수 있다. 이는 섬유 요소를 동일하게 사용하는 오픈시스와 다른 점이다. 더불어 웹 벽체와 플랜지 벽체 단면의 특정 위치에서 변형률 또는 응력을 관찰할 수 있다.

퍼폼에서는 벽체를 나타낼 수 있는 요소가 Shear Wall(이하 SW)와 General Wall(이하 GW)가 있다. 이들은 먼저 해당 벽체가 탄성으로만 거동할지 비탄성으로 거동할지를 선택할 수 있다. 두 요소의 가장 큰 차이점은 축력-휨 상호작용 거동을 수직 방향으로만 모사가 가능(SW)한지 수직/수평 방향 모두 모사가 가능(GW)한지 여부다. 더불어 전단 거동은 콘크리트 재료 특성만으로 나타내는데, 이때 SW에서는 전단을 탄성/비탄성 모두 모사 가능하나 GW에서는 비탄성으로만 모사가 가능하다. 마이다스에서 벽체 요소를 퍼폼의 벽체 요소와 대비하면 SW 요소에 전단은 탄성으로만 반영한 것이 된다. 오픈시스도 마찬가지다. 물론 절점 개수나 섬유 요소 사용 유무와 같은 차이가 있지만 구조적 거동 자체로만 본다면 위와 같다. 이 연구에서는 타 프로그램과 비교를 위해 퍼폼에서 벽체를 SW로 모델링할 때는 전단을 탄성으로 입력하였고 GW로 모델링할 때는 전단을 비탄성으로 입력하였다.

일반적인 벽체에는 SW 요소로 비선형거동을 모사하기에 충분하지만 개구부로 인한 불연속적인 벽체나 벽체가 서로 수직으로 만나는 경우에는 GW 요소를 사용할 것을 CSI[5]에서 권고하고 있다. 특히 벽체가 서로 수직으로 만나더라도 세장비가 크면 SW 요소로 모델링하여도 무방하나 저층 건물에서 세장비가 작으면 전단 지연(Shear lag)과 같은 거동을 반영하기 위해서는 GW 요소가 더욱 필요할 수 있다. 하지만 퍼폼의 경우에도 비정형 벽체의 정확한 비선형 모델링 및 해석은 가능하지 않다. 이 두 요소가 벽체의 비선형 거

등을 완벽하게 묘사하지는 못하지만 서로간의 차이를 비교해보는 것은 의미가 있다. 본 연구에서는 벽체를 이 두 가지 요소로 각각 모델링하여 그 결과를 타 해석프로그램의 결과와 함께 비교하였다.

3. 예제 건물

앞선 연구와 마찬가지로 본 연구에서 사용한 예제 건물은 2층 철근콘크리트 건물로서, 평면은 Fig. 1과 같이 x, y축으로 각각 3경간, 2경간으로 구성되어 있다. 다른 점은 벽체의 형상이 ‘L’ 및 ‘U’자 형태일 때만을 대상으로 하고 있다는 것이다. 벽체의 길이는 동일하게 경간 길이 6m의 절반인 3m이다. 벽체의 위치 또한 평면상에서 대칭 또는 비대칭으로 구분하여 그 차이를 조사하였다.

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

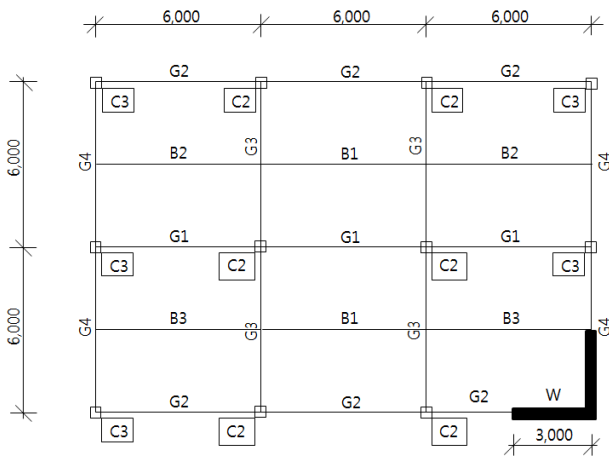


Fig. 1. Plan view of example buildings (FW-L1C)

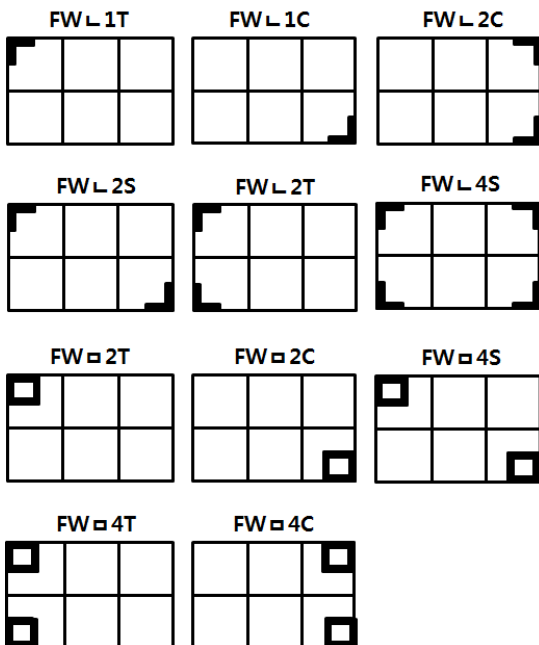


Fig. 2. Shape, location, and nomenclature of example buildings

Table 1. Vertical loads for design by KBC2009 (kN/m²)

Story	Dead load	Live load
Typical	5.50	4.0
Roof	6.55	1.0

골조와 벽체가 함께 있다는 것을 의미한다. 그 다음의 벽체의 형상을 나타내는 기호로서 ‘L’은 직사각형 벽체 2개가 서로 수직으로 만나는 벽체, ‘U’은 직사각형 벽체 4개가 서로 수직으로 만나는 벽체이다. 그 다음에 있는 숫자는 벽체의 개수를 나타낸다. 벽체의 개수는 길이가 경간의 1/2인 경우를 1로 보고 수평방향으로 위치한 벽체의 수를 나타낸다. 따라서 ‘FW-U2T’의 경우, 수평방향으로 경간 길이의 1/2인 벽체가 2개 있는 것을 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[4]를 따랐다. 기준에 따른 내진설계변수는 지진구역 I, 내진등급 II, 그리고 지반조건 S_c이다. 이들 건물의 지진력저항시스템은 건물골조시스템에서 철근콘크리트 보통전단벽(R=5)으로 설계하였다. 골조는 중력하중을 저항하도록 설계하였다. Fig. 1의 평면에서 지진하중에 대한 설계는 수평방향으로만 수행하였다. 설계에 사용한 수직하중은 Table 1과 같다. 설계 시 재료의 공칭강도는 21 MPa(콘크리트), 400 MPa(철근)을 적용하였다.

4. 해석 모델 및 방법

앞선 연구에서 보, 기둥, 및 ‘-’자 형 벽체의 비선형모델링에 대한 내용을 기술하였기 때문에 여기서는 ‘L’ 및 ‘U’자 형 벽체에 대해 기술하고자 한다. 먼저 마이다스는 벽체를 Wall 요소로 모델링한다. 여기서 비선형 속성은 FEMA 힌지, 즉 모멘트-회전각 관계를 사용한다. 단, 앞에서 언급한대로 마이다스에서는 벽체의 휨 거동을 면내 방향으로만 고려하므로 ‘L’ 및 ‘U’자 형 벽체에서는 해석 방향으로 웹 벽체가 횡력에 대해 휨으로 저항하고 플랜지 벽체는 축력으로 저항한다. 따라서 플랜지 벽체는 축방향 힌지를 입력했는데, 압축은 최대 강도에 도달 후 소성변형이 없이 강도가 떨어지도록 입력하였으며 인장은 항복 강도에 도달 후 탄소성 거동을 하도록 입력하였다.

퍼폼의 경우는 ‘-’자 형과 ‘L’ 및 ‘U’자 형 벽체 간에 모델링 상의 차이는 없다. ‘-’자 형 벽체를 모델링할 때와 동일하게 SW 및 GW 요소를 사용하였으며 단면은 섬유요소로 나타내었다. ‘-’자 형 벽체에서는 SW를 사용할 경우 전단은 탄성으로, GW를 사용할 경우 전단은 비탄성으로 입력하였다. SW에서 전단을 탄성으로 한 이유는 마이다스와 오픈시스에서는 벽체의 전단이 탄성이므로 타 프로그램과 동일한 조건으로 비교하기 위한 것이었다. GW는 전단을 비탄성으로만 입력할 수 있기 때문에 다른 선택은 없다. ‘L’ 및 ‘U’자 형 벽체에서도 기본적으로 동일한 모델링 방법을 사용하여 마이다스와 오픈시스 결과와 비교하였으며, 추가적으로 SW에 비탄성 전단을 사용한 결과를 따로 비교하였다.

마이다스와 퍼폼은 기본적으로 3차원으로 모델링 및 해석을 수행하므로 ‘L’ 및 ‘U’자 형 벽체의 모델링에 큰 어려움이 없다. 하지만 오픈시스에서

는 2차원으로 수행하므로 약간의 어려움이 있다. 오픈시스 2차원 해석에서 벽체 모델링 방법은 선 요소를 벽체의 중심에 위치시키고 단면은 섬유요소로 실제 콘크리트 및 철근의 단면적 및 위치를 그대로 반영하는 것이다. 그런데 ‘L’ 및 ‘口’자형 벽체를 2차원으로 모델링할 때는 약간의 문제가 있다. 먼저 Fig. 1에서 알 수 있듯이 웹 벽체는 골조의 선상에 위치하나 플랜지 벽체는 선상에서 벗어나 있다. 이를 2차원으로 모델링한다면 일차적으로 평면 안쪽에서 플랜지벽체로 전달되는 수직하중을 어떻게 대입하는가의 문제가 있고 더욱 실제적으로는 평면상의 비대칭으로 인한 비틀림을 고려할 수 없다는 문제가 있다. 또한 ‘—’자형에서도 동일한 문제인 선 요소의 위치와 벽체의 실제 중립축과의 차이이다. ‘L’ 및 ‘口’자형 벽체에서는 실제와 더욱 차이가 발생한다. 오픈시스 해석의 결과는 이러한 점을 주지하여 분석할 필요가 있다.

비선형해석모델을 완성하기 위해서는 소성인지나 섬유요소의 속성을 입력해야 한다. 이 속성에는 항복 강도, 강성, 및 변형능력 등을 부재별로 산정

해야 하며 이에 대한 사항은 앞 논문에 자세히 제시되어 있으므로 여기서는 생략한다. 비선형해석 모델링 종류는 미다스의 경우 사용자 입력(Midas_M)과 자동 입력(Midas_A), 퍼폼의 경우 벽체를 SW 요소(Perform3D_SW)와 GW 요소(Perform3D_GW)로 구분하였다. 전단은 앞서 언급한대로 Perform3D_SW에서는 탄성, Perform3D_GW에서는 비탄성으로 입력되었다. 오픈시스는 한 가지 방법을 사용하였다.

5. 비선형정적 해석 결과 비교

5.1 ‘L’자형 벽체일 때

Fig. 3은 ‘L’자형 벽체의 비선형정적 푸시오버해석 결과를 각 예제 건물 및 해석 프로그램 별로 나타낸 것이다. 먼저 Midas_M과 Midas_A의 결

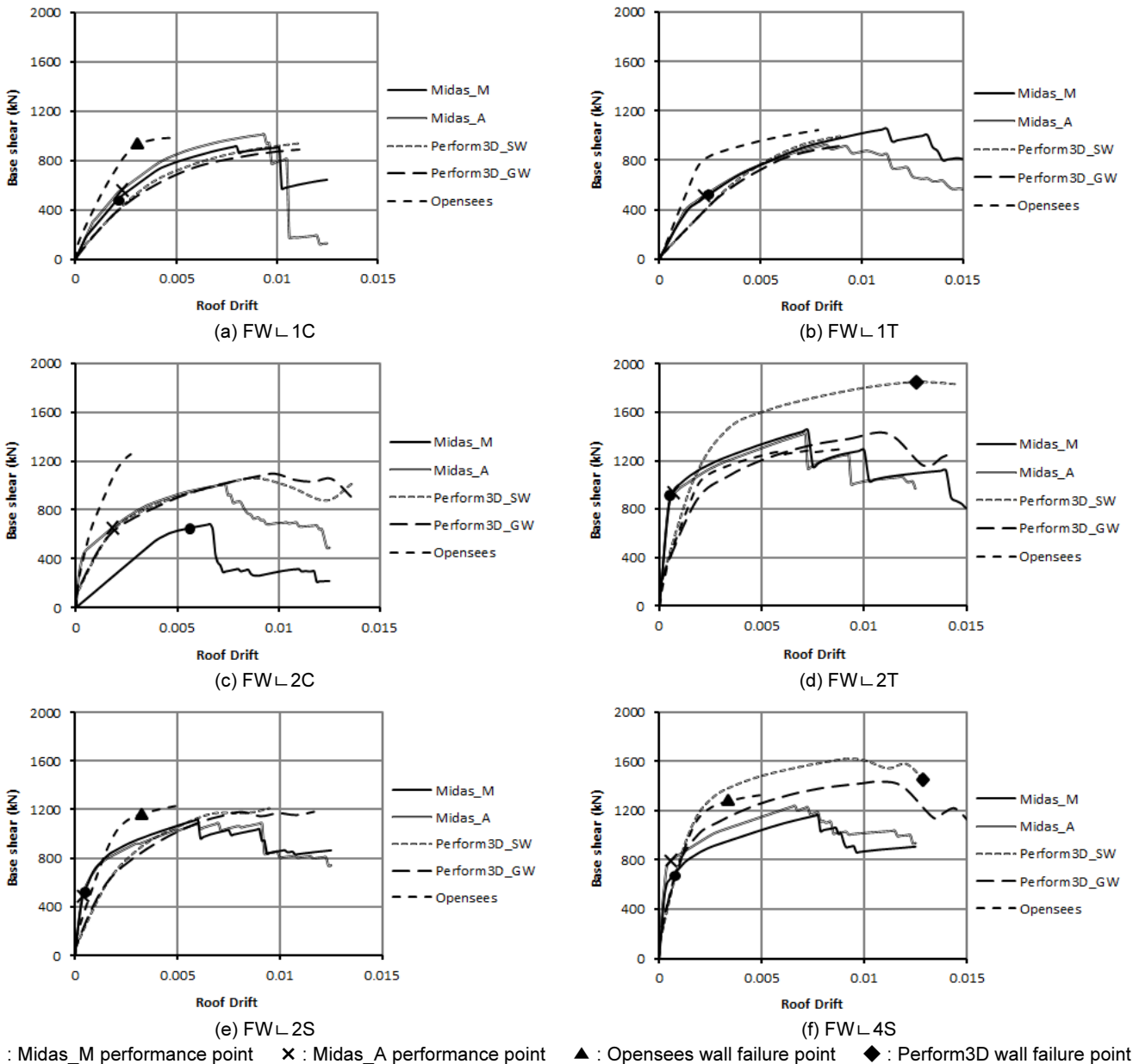


Fig. 3. Pushover curve of buildings with ‘L’ type wall

과를 비교해 보면, 전반적으로 큰 차이가 없었다. 다만 FW-2C와 FW-4S의 경우는 서로 차이가 있었다. 이 두 건물의 유사한 특징은 평면에서 ‘L’자 형 벽체가 압축측에 동시에 2개가 함께 위치하고 있다는 것이다. Midas_M에서는 모멘트 강도 산정 시 성능점에서의 축력을 고려한다. 평면에서 압축측에 위치한 ‘L’자 형 벽체는 푸시오버해석 시 압축력이 추가 되는데 이 추가 압축력을 플랜지벽체가 대부분 가져가기 때문에 웹벽체는 큰 인장력이 발생한다. 이 인장력으로 인해 모멘트 강도가 0로 설정되었기 때문에 성능곡선에서 차이가 발생하게 된 것이다. 반면 Midas_A는 웹벽체가 모멘트에 의해 항복할 때의 축력을 사용하는데, Midas_M에서의 인장력보다는 상대적으로 작아 모멘트 강도가 작게나마 남아 있었다. 이로 인해 성능곡선의 강도가 더 크게 나고 변위 또한 조금 더 크게 나타났다. FW-4S의 경우에는 인장 측에도 벽체가 2개 위치하고 있기 때문에 상대적으로 차이가 적게 나타났다. FW-1C의 경우도 인장 측에 벽체가 위치하고 있지만 단독으로 있기 때문에 힘의 집중이 상대적으로 덜 발생하여 차이가 작게 나타났다. 벽체가 인장 측에 위치한 FW-1T나 FW-2T, 인장 및 압

축 측에 각각 하나씩 위치한 FW-2S에서는 Midas_M과 Midas_A의 차이는 거의 없었다.

오픈시스는 퍼폼과 같이 벽체에 섬유요소를 사용하지만 ‘L’ 및 ‘口’자 형 벽체와 같은 비정형단면을 2차원으로 모델링하여 해석했기 때문에 3차원 해석을 수행한 퍼폼이나 마이다스와는 근본적으로 다르다. 앞 선 논문에서 오픈시스와 퍼폼의 벽체 모델링 차이를 설명하였지만, 거기에 추가해서 비정형 단면의 2차원 해석은 오픈시스의 결과를 타 프로그램과 더 차이 나게 한 원인이다. 따라서 여기서는 오픈시스의 결과에 대한 언급은 더 하지 않겠다.

Perform3D_SW와 Perform3D_GW의 결과를 서로 비교하면 대부분의 건물에서 매우 비슷한 성능곡선을 나타내고 있고 마이다스의 결과와도 유사하다. 비슷한 성능곡선이 나타나는 이유는 Fig. 4에서와 같이 벽체의 거동과 건물 전체의 거동이 거의 비슷하게 나타나기 때문이다. FW-1C, FW-1T, FW-2C, FW-2S의 모델이 이에 해당하는데다. 하지만 특정 건물에서는 성능곡선에 뚜렷한 차이를 보이고 있다. FW-2T와 FW-4S 가 이에 해당하는데 모두 인장 측에 벽체가 2개 위치하는 경우다. 이는 Fig.

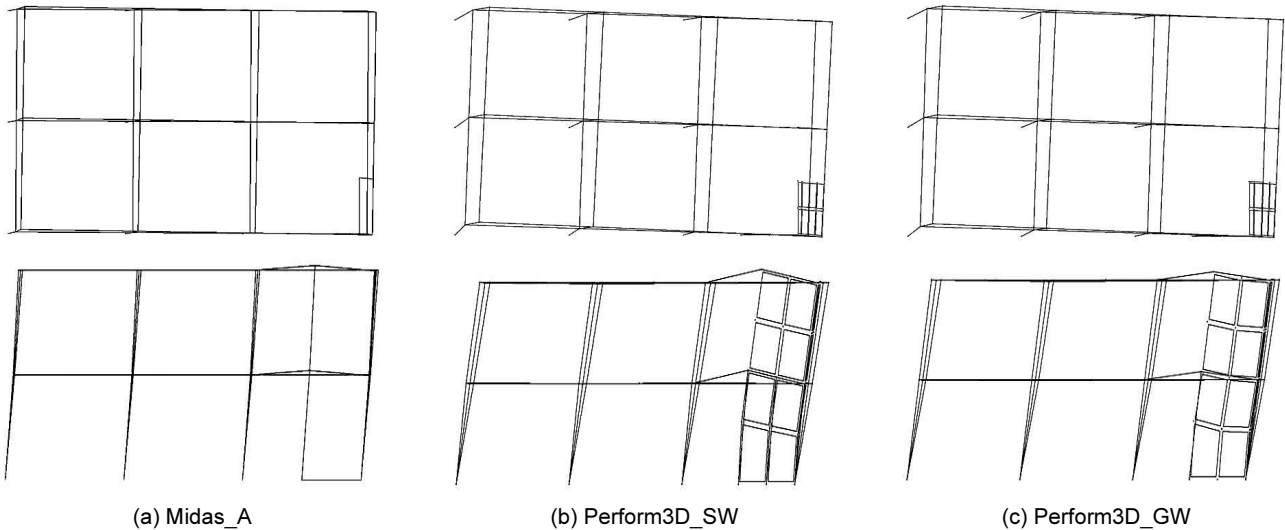


Fig. 4. Final deformed shape of FW-1C

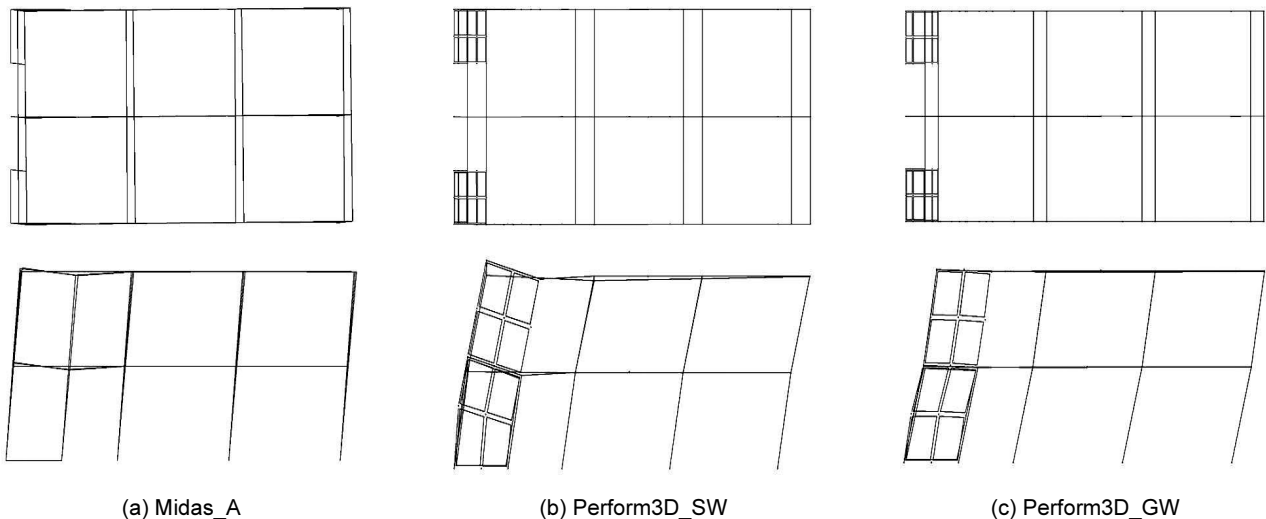


Fig. 5. Final deformed shape of FW-2T

Table 2. Comparison of maximum axial force and moment strength of flange and web walls according to analysis programs

ID	Wall location		Midas_A					Perform3D_SW					Perform3D_GW				
	Plan (Axial Force)	Web/Flange**	Web			Flange		Web			Flange		Web			Flange	
			P _o ***	P _{max}	M _{max}	P _o	P _{max}	P _o	P _{max}	M _{max}	P _o	P _{max}	M _{max}	P _o	P _{max}	M _{max}	P _o
FWL 2T	Left(T)		-183	-876	1957	-194	570	-190	-1026	1980	-188	570	-190	-764	1151	-188	360
FWL 4S	Right(C)		-146	117	197	-186	-551	-152	217	43	-181	-655	-152	220	40	-181	-656
	Left(T)		-146	-509	1067	-186	253	-152	-665	1132	-181	253	-152	-475	645	-181	130
FW□ 2C	Right(C)	U/L	-145	570	955	-173	570	-150	511	75	-162	570	-150	358	162	-162	570
		D/R	-112	570	980	-84	-2417	-108	507	80	-95	-2157	-108	253	247	-95	-1812
FW□ 4S	Right(C)	U/L	-114	165	483	-132	253	-115	228	31	-117	253	-115	212	47	-117	253
		D/R	-103	195	441	-85	-1135	-100	225	35	-98	-1197	-100	208	52	-98	-1198
	Left(T)	U/L	-103	253	693	-85	253	-100	230	29	-98	253	-100	216	43	-98	253
		D/R	-114	253	503	-132	-1253	-115	221	39	-117	-1262	-115	202	58	-117	-1223

* Direction of axial force from lateral push-over analysis; T(tension), C(compression)

** U: upside web, D: downside web, L: left flange, R: right flange

*** Axial force when gravity load is only applied

5에서와 같이 벽체의 거동에 차이가 있기 때문이다. SW 탄성 전단으로 모델링 할 경우 웹벽체는 휨 변형을 주로 한다. 이는 Fig. 4(b) 및 Fig. 5(b)에 잘 나타나 있다. 반면 GW 비탄성 전단으로 모델링 할 경우 Fig. 5(c)와 같이 벽체에 전단 변형이 주로 발생하여 수직 방향 축 휨 변형이 거의 발생하지 않았다. Fig. 4(c)에서도 약간의 전단 변형이 관찰되었으나 Fig. 5(c)에 비해서는 낮은 수준이었다.

SW와 GW의 벽체 거동의 차이는 플랜지벽체의 역할에도 기인하는 것으로 보인다. Fig. 5(c)와 같이 플랜지벽체가 인장을 받을 경우 웹벽체의 전단변형이 크게 발생하였다. Fig. 4(c)의 웹벽체도 전단변형이 관찰되었으나 이때는 플랜지벽체가 압축을 받으므로 Fig. 5(c)에 비해 상대적으로 전단변형이 크게 관찰되지 않았다. 이런 이유로 Fig. 3(d)의 FWL 2T에서 SW와 GW의 결과 차이가 발생한 것으로 보인다. FWL 1T에서도 플랜지벽체가 인장을 받는대도 불구하고 Fig. 3(b)와 같이 두 요소간의 차이가 발생하지 않는 것은 Fig. 4(c)와 같이 평면 비정형성으로 인해 평면 비틀림 현상이 발생하여 전단변형의 영향이 상대적으로 작았기 때문인 것으로 보인다. FWL 4S의 경우는 플랜지가 압축 및 인장을 받는 벽체가 평면에서 대칭으로 위치하고 있어 FWL 2T 만큼은 아니지만 두 요소간에 차이가 발생하였다.

마이더스와 퍼폼에서 플랜지 및 웹벽체의 거동이 어떻게 반영되는지 비교하기 위해 Midas_A와 퍼폼에서 SW 및 GW를 모델링 했을 때 초기축력(P_o), 최대축력(P_{max}) 및 최대모멘트(M_{max})를 Table 2에 나타내었다. FWL 2T의 경우 Midas_A와 퍼폼 SW에서 웹벽체에 작용하는 최대 모멘트가 거의 비슷하게 나타난 것을 볼 수 있다. 하지만 성능곡선 상에서는 매우 큰 차이가 발생한다. 퍼폼 GW의 경우 Midas_A와 비교해 보면 최대 모멘트에서는 차이가 많이 발생하지만 성능곡선 상에서의 차이는 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 결국 웹벽체의 면내 모멘트와 플랜지벽체의 축력을 서로 어떤 방식으로 결합하여 밀면전단력의 계산에 반영하는 지에 따라 다르게 나타난 것이다. 앞 선 논문에서 기술한 마이더스 또는 오픈시스와 퍼폼의 벽체 모멘트강도에 차이가 발생하는 원인 또한 영향을 미칠 것이다.

5.2 '□'자형 벽체일 때

다음으로는 '□'자형 벽체가 있을 때 비선형정적 푸시오버해석을 통한 성능곡선을 Fig. 6에 나타내었다. '□'자형 벽체가 있을 때 프로그램들 간의 차이를 비교해 보면 먼저 Midas_M과 Midas_A에서는 FW□ 4S를 제외하고 성능곡선의 차이가 거의 없게 나타났다. FW□ 4S의 차이는 Midas_M과 Midas_A의 웹벽체 항복모멘트강도가 다른 것에 기인한다. Midas_M일 때가 약간 더 크며 평면에서 아래 위 벽체의 항복강도가 유사하다. Midas_A는 항복모멘트강도가 Midas_M에 비해 약간 작으며 아래 위 벽체의 값이 서로 다르다. 이에 따라 Midas_M의 경우 압축 측에 위치한 벽체와 인장 측에 위치한 웹벽체에서 동시에 파괴가 발생하여 급격한 강도감소가 나타나고 있다. 하지만 Midas_A의 경우 압축 측에 위치한 웹벽체에 의해 최초 파괴가 발생하고 이후 인장 측에 있는 웹벽체와 기둥들의 파괴에 의해 강도감소가 나타나고 있다.

Perform3D_SW와 Perform3D_GW를 비교하면 'L'자 벽체에 비해 '□'자형일 때는 서로 간의 차이가 작은 것을 알 수 있다. 하지만 FW□ 2C와 FW□ 2T를 보면 성능곡선에서 크지는 않지만 약간의 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 7에서 알 수 있듯이 SW 요소일 경우 벽체는 휨 변형으로만 거동하고 건물이 비틀리는 현상이 거의 없지만 GW 요소일 경우는 벽체가 전단변형을 하면서 전체 건물은 비틀리는 현상을 볼 수 있다. 위와 같은 현상에 의해 웹 벽체 및 플랜지 벽체에 작용하는 축력 및 최대 모멘트가 달라지는 것을 Table 2를 통해 확인 할 수 있다. FW□ 4T에서도 약간의 차이가 발생하는데 이것은 'L'자형 벽체에서도 언급했듯이 GW에서 벽체가 전단변형을 나타내기 때문이다. 이러한 현상이 'L'자형 벽체와 같이 심하지는 않기 때문에 성능곡선에서의 차이는 크지 않은 것으로 보인다.

Table 2를 통해 Midas_A와 퍼폼의 SW, GW를 비교하여 보면 FW□ 2C에서 Midas_A의 웹벽체에 작용하는 최대 모멘트와 퍼폼의 SW 및 GW의 웹벽체에 작용하는 최대 모멘트를 비교하여 보면 매우 큰 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Midas_A와 SW의 경우 약 900kN·m가

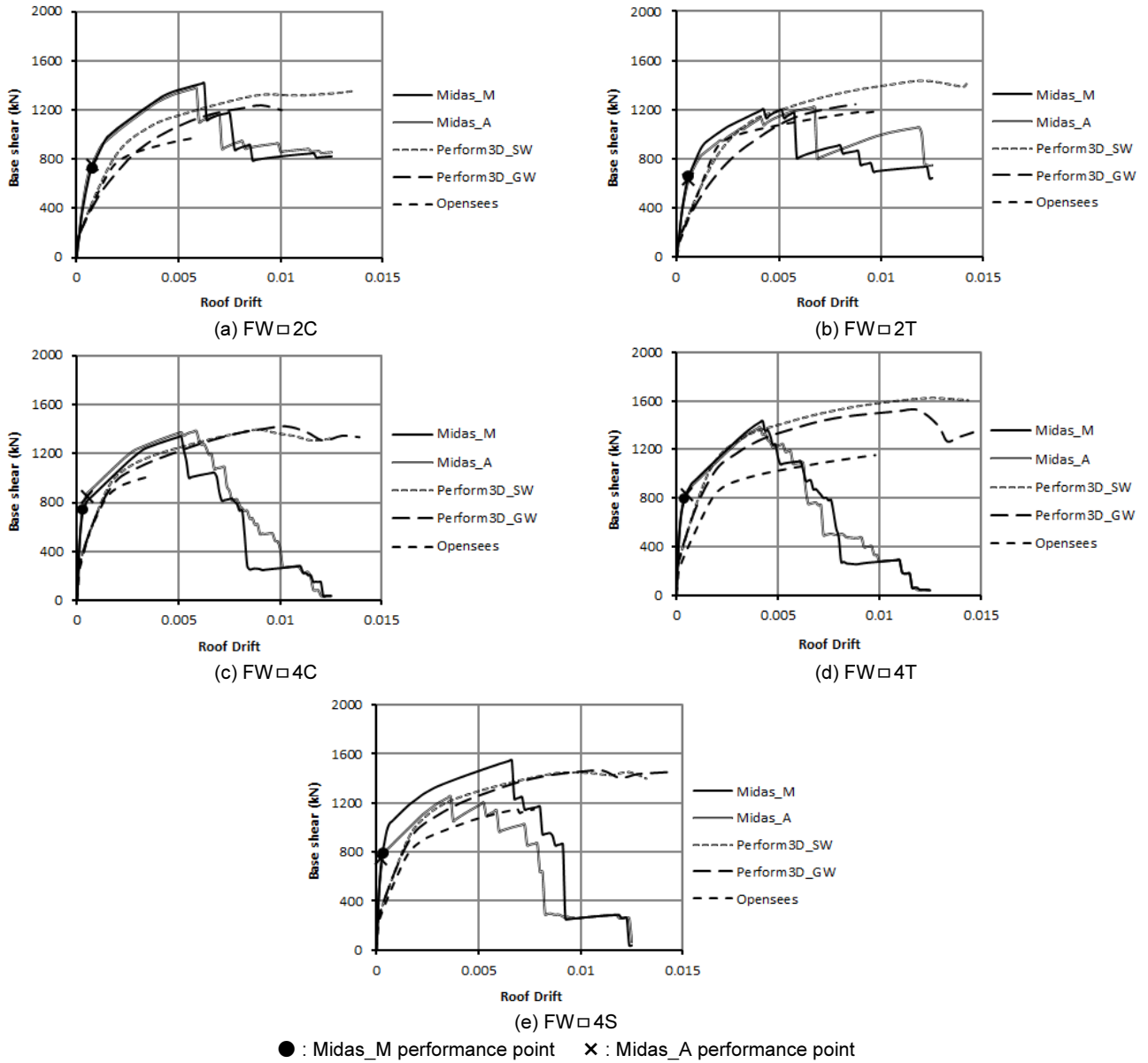


Fig. 6. Pushover curve of buildings with '□' type wall

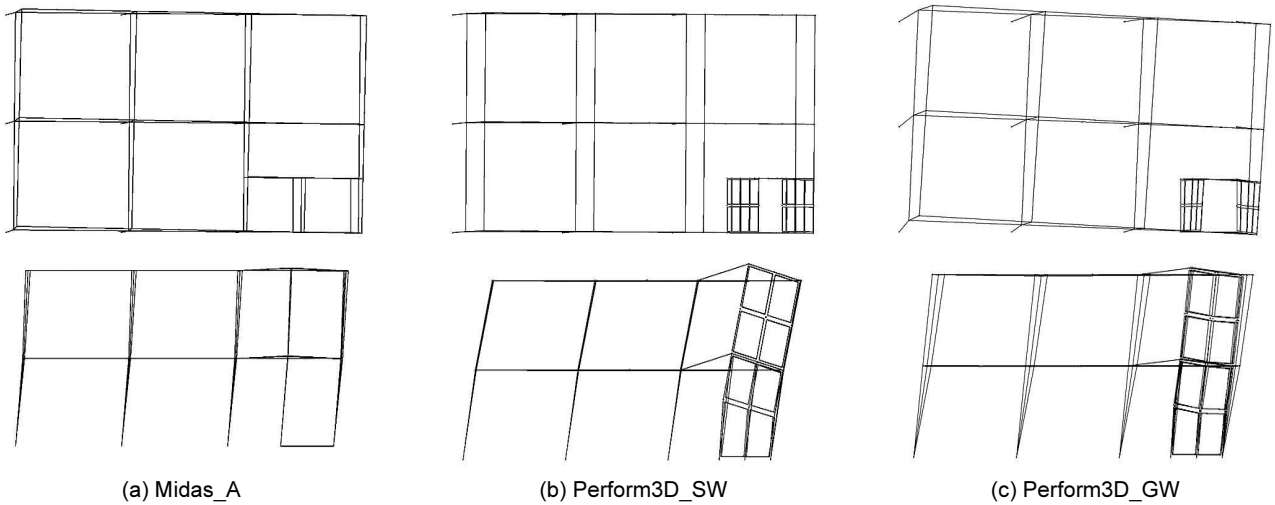


Fig. 7. Final deformed shape of FW□2C

지 차이가 발생하지만 성능곡선 상에서 최대강도의 차이는 거의 없는 것으로 나타난다. 이러한 이유는 ‘ㄴ’자형 벽체에서도 언급한대로 벽체의 모멘트와 전단력을 산정하는 방식에 있어 마이다스와 퍼폼이 차이가 있기 때문인 것으로 보인다. ‘ㄱ’자 벽체의 2차원 오픈시스 모델링은 ‘ㄴ’자형 벽체를 가질 때와 마찬가지로 한계가 있기 때문에 그 결과는 언급하지 않겠다.

6. 퍼폼의 벽체 해석 모델링 분석

퍼폼에서 벽체의 변형 결과를 얻기 위해서는 게이지를 정의해야 한다. 만약 축 변형률을 산정하기 위해서는 두 절점을 하나의 게이지로 설정한다. 회전각을 산정하기 위해서는 네 개의 절점을 하나의 게이지로 설정해야 한다. 일반적으로 벽체에서는 양 단부의 콘크리트 압축 변형률을 주요 변수로 고려하기 때문에 벽체 단부에서 두 절점을 하나의 게이지로 설정한다. 이 경우 두 절점 사이의 거리에 따라 변형률 산정 값이 변화하게 된다. 여기서는 벽체 모델링 방법에 따른 변형률의 변화를 살펴보고자 한다.

퍼폼에서 벽체를 모델링할 때 일반적으로 한 층당 하나의 요소로 모델링한다. 벽체 요소의 숫자가 많아지면 해석의 속도가 느려지기 때문이다. 예제 건물의 높이는 4 m이고 벽체의 길이는 3 m이므로 한 층당 하나의 벽체 요소를 사용하면 Fig. 8(a)와 같다. Fig. 8(b)는 한 층의 벽체를 4개로, Fig. 8(c)는 9개로 나눈 것이다. Fig. 8(c)에서는 개별 요소의 높이를 바닥으로부터 1.5 m, 1.5 m, 1 m로 나누었다. 이렇게 나눈 이유는 벽체의 소성힌지 영역을 맞추기 위해서다. 일반적으로 벽체의 소성힌지 영역은 벽체 길이의 1/2로 본다. 벽체의 길이가 3 m이므로 소성힌지 영역은 바닥으로부터 1.5 m가 된다. 각각의 경우에 게이지는 벽체 바닥으로부터 최초로 만나는 절점으로 정의하였으므로 게이지 길이는 각각 4 m, 2 m, 1.5 m가 된다. 게이지 길이는 변형률을 산정할 때 분모가 되며 Fig. 8에서 ΔL이 분자가 된다.

Table 3은 벽체 형상, 벽체의 평면 위치, 게이지 길이에 따른 ΔL과 변형률을 정리한 것이다. 벽체는 최하부에 비선형거동이 집중되는 경향이 있으므로 최하부 벽체 요소의 크기에 비선형변형의 크기도 좌우된다. 더불어 게이지 길이를 어떻게 설정하느냐에 따라 압축변형률이 달라진다. 벽체 모델의 종류에 따라 달라지는데 SW에 탄성전단 및 GW에 비탄성전단으로 모델링한 결과도 함께 정리하였다. ‘ㄴ’자 벽체가 있을 경우 플랜지가 압축을 받으면(예, FW-2C) 게이지 길이가 4 m에서 1.5 m로 감소했을 때 SW와 GW에 관계없이 압축변형률의 변화가 적은 반면 인장변형률은 2배가 증가하였다. SW와 GW의 변형률 차이는 인장 및 압축 모두 크지 않았다. 반대로 플랜지가 인장을 받으면(예, FW-2T) 게이지 길이가 감소했을 때 인장 및 압축 변형률 모두 2배로 증가하였다. SW와 GW의 변형률을 비교하면 인장은 GW에 비해 아주 큰 값을 보였으나 압축은 SW에 비해 GW가

작았지만 차이는 상대적으로 작았다. ‘ㄱ’자 벽체가 있을 경우 SW와 GW 모두 압축변형률은 게이지 길이의 감소에 따른 차이가 적었지만 인장변형률은 2배로 증가하였다. SW와 GW의 변형률을 비교하면 인장은 SW가 GW의 2배가량 되었으나 압축은 차이가 작았다.

Table 3의 결과를 정리하면 먼저 비정형벽체단면에서 압축을 받는 플랜지벽체가 있을 때 게이지길이나 벽체 모델에 관계없이 압축변형률의 변화가 크지 않았다. 그 이유는 압축면적의 증가로 벽체 단면의 압축연단으로부터 중립축까지의 거리가 매우 짧아지기 때문이다. 이로 인해 압축변형률이 매우 낮은 수준에 머물러 게이지길이나 벽체 모델의 변화에 큰 영향을 받지 않았다. 이때 인장변형률이 압축에 비해 매우 큰 값을 보인 것은 짧은 중립축거리 때문이고 게이지길이의 감소에 2배가량 증가한 이유는 게이지길이가 짧아질수록 변형이 벽체 하단에 집중되었기 때문이다. 이 인장변형률이 ‘ㄴ’자 벽체에서는 SW와 GW의 차이가 거의 없었지만 ‘ㄱ’자 벽체에서는 SW가 GW의 2배가량 나타났는데 기본적으로는 SW가 휨에 대해서는 비선형 거동을 하므로 SW의 변형률이 클 수밖에 없다. ‘ㄴ’자 벽체에서 SW와 GW의 차이가 없는 이유는 플랜지가 인장만을 받을 때(FW-2T)를 보면 유추할 수 있다.

인장 플랜지만 있을 때는 중립축 길이가 압축 플랜지가 있을 때보다 클 수밖에 없어 게이지 길이의 감소에 따라 압축 및 인장변형률 모두 증가하였다. 또한 변형률에 있어서는 SW가 GW보다 더 크며 특히 인장변형률은 거의 10

Table 3. Strain at the end of wall section according to element and gage size

ID	Strain sign	L (m)	Shear wall		General wall	
			ΔL (m)	Strain	ΔL (m)	Strain
FW-2C	Tension	4	0.039	0.010	0.033	0.008
		2	0.032	0.016	0.032	0.016
		1.5	0.030	0.020	0.030	0.020
	Comp.	4	-0.0004	-0.0001	-0.0004	-0.0001
		2	-0.0002	-0.0001	-0.0002	-0.0001
		1.5	-0.0002	-0.0001	-0.0002	-0.0001
FW-2T	Tension	4	0.033	0.008	0.0048	0.0012
		2	0.026	0.013	0.0024	0.0012
		1.5	0.024	0.016	0.0022	0.0015
	Comp.	4	-0.006	-0.0015	-0.0020	-0.0005
		2	-0.005	-0.0026	-0.0014	-0.0007
		1.5	-0.005	-0.0033	-0.0033	-0.0022
FW-2C	Tension	4	0.029	0.007	0.010	0.003
		2	0.024	0.012	0.014	0.007
		1.5	0.022	0.015	0.016	0.010
	Comp.	4	-0.0009	-0.0002	-0.001	-0.0003
		2	-0.0005	-0.0003	-0.0008	-0.0004
		1.5	-0.0004	-0.0003	-0.0006	-0.0004
FW-2T	Tension	4	0.030	0.0075	0.011	0.003
		2	0.024	0.012	0.014	0.007
		1.5	0.023	0.015	0.008	0.006
	Comp.	4	-0.0014	-0.0003	-0.0014	-0.0003
		2	-0.0004	-0.0003	-0.0007	-0.0003
		1.5	-0.0004	-0.0002	-0.0004	-0.0002

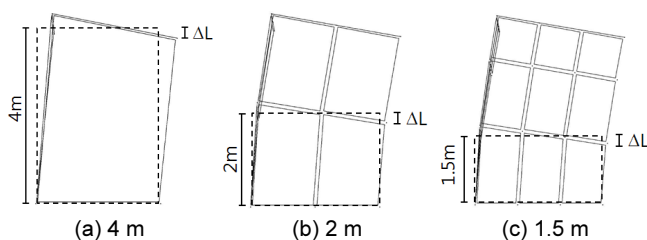


Fig. 8. Change of nonlinear behavior according to element size

Table 4. Strains of FW-L2T for different Perform3D wall models and gage length

Strain sign	L (m)	SW_ES		SE_IS		GW_VH		GW_NH	
		ΔL (m)	Strain	ΔL (m)	Strain	ΔL (m)	Strain	ΔL (m)	Strain
Tension	4	0.033	0.008	0.007	0.0018	0.0048	0.0012	0.0048	0.0012
	2	0.026	0.013	0.004	0.0020	0.0024	0.0012	0.0024	0.0012
	1.5	0.024	0.016	0.004	0.0029	0.0022	0.0015	0.0022	0.0015
Comp.	4	-0.006	-0.0015	-0.0028	-0.0007	-0.0020	-0.0005	-0.0020	-0.0005
	2	-0.005	-0.0026	-0.0014	-0.0007	-0.0014	-0.0007	-0.0014	-0.0007
	1.5	-0.005	-0.0033	-0.0012	-0.0008	-0.0033	-0.0022	-0.0033	-0.0022

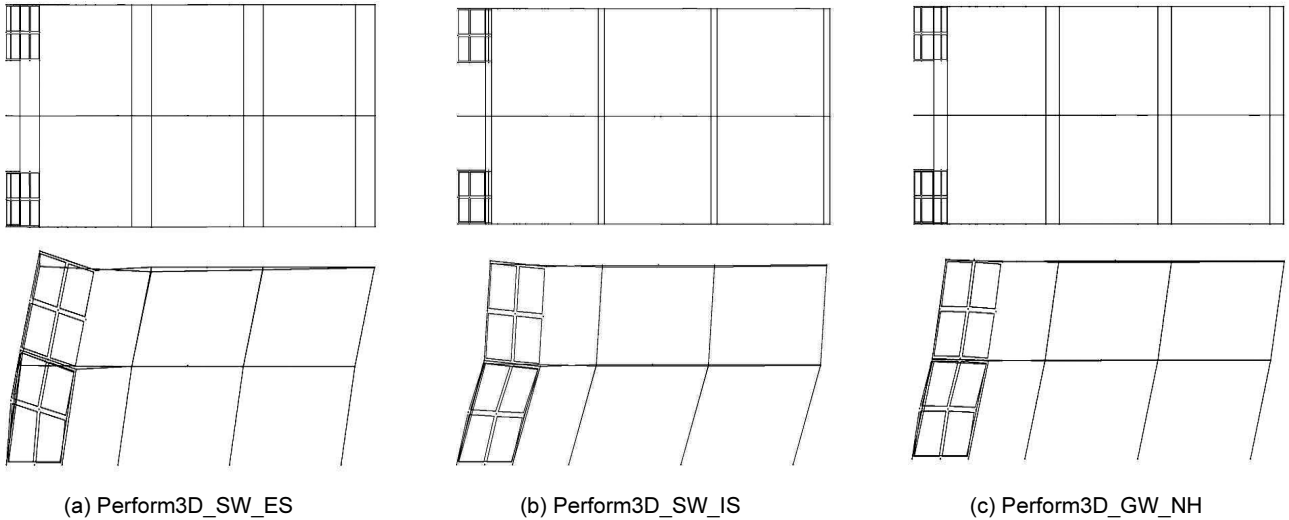


Fig. 9. Final deformed shape of FW-L2T for different Perform3D wall models

배로 나타났다. 이는 Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)의 변형 형상을 비교하면 알 수 있다. SW는 벽체가 휨으로 변형하여 인장플랜지 쪽의 수직변형률이 크지만 GW는 변형의 많은 부분이 전단으로 거동하여 수직변형률이 작게 나타났다. 인장플랜지만 있다는 것은 벽체 단면의 대부분을 차지하는 플랜지의 콘크리트가 변형에 전혀 저항하지 못하는 것을 의미한다. 이로 인해 변형은 철근에 의한 휨으로 가지 않고 콘크리트의 전단으로 거동하게 된다. GW에서는 콘크리트 비선형전단이 입력되어 있으므로 이러한 결과로 나타난 것으로 판단 된다.

퍼폼의 벽체 모델의 차이를 더욱 자세히 살펴보기 위해 SW에서 콘크리트 전단을 기존의 탄성(SW_ES)과 비탄성(SW_IS)로 구분하여 해석하였다. GW의 경우는 콘크리트 전단은 비탄성으로만 입력할 수 있으므로 수직 및 수평철근을 모두 입력한 모델(GW_VH)과 수직철근만 입력한 모델(GW_NH)로 구분하여 해석하였다. 대상 건물은 SW와 GW의 차이가 많이 발생한 FW-L2T를 선택하였다. 이들의 게이지길이에 따른 변형률 결과를 Table 4에 정리하였다. 이 값들은 SW의 경우는 지붕층 변위각 1.0% GW의 경우는 0.8%에서 추출한 것이다.

먼저 SW의 결과를 살펴보면 SW_ES 변형률은 SW_IS에 비해 매우 컸다. 그 차이는 인장변형률이 압축변형률에 비해 월등히 컸으며 게이지길이가 감소할 때에도 인장 및 압축변형률 모두 컸다. GW_VH와 GW_NH의 변형률 차이는 없었다. 변형률을 살펴보면 결국 같은 비선형전단을 사용하는 SW_IS와 GW의 변형률이 상대적으로 유사하였다. 이러한 결과는

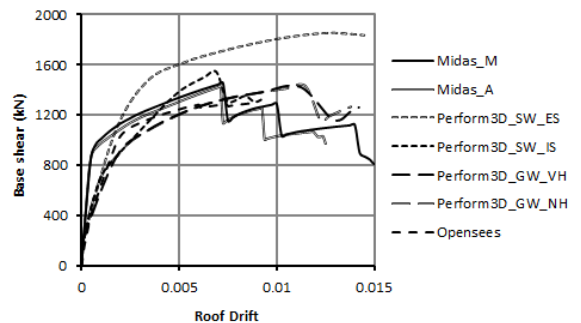


Fig. 10. Pushover curve of FW-L2T

Fig. 9에서도 확인할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있는데 SW_ES의 경우 수직으로 같은 위치에 있는 벽체 요소의 회전각은 서로 동일하다. 따라서 1층 벽체에서 4개의 벽체 요소 중 아래 2개 요소의 회전각은 동일하다. 반면 콘크리트 비탄성전단을 사용한 경우(SW_IS 및 GW_NH)는 좌, 우 요소의 회전각이 동일하지 않다. 비탄성전단 거동이 요소의 변형에 포함되어 있기 때문이다. 즉 SW를 사용하더라도 비탄성전단을 사용하면 GW에 더 가까운 거동을 보인다. 물론 SW_IS의 변형률이 여전히 GW보다 크다. 따라서 벽체 단부의 축방향 콘크리트 압축변형률을 성능평가의 주된 변수로 사용한다면 퍼폼 벽체 모델간의 차이는 상당히 크다. 항복시점을 결정하는 인장 변형률의 차이는 더욱 크다.

Fig. 10의 푸시오버곡선 결과를 보면 퍼폼에서 벽체를 SW_ES로 모델링했을 때 밑면전단력이 가장 크게 나타났다. SW_IS의 성능곡선은 GW 모델에 더 가깝다. 성능곡선 상으로는 SW_ES가 더 나아 보이지만 벽체 단면의 콘크리트 압축 변형률을 기준으로 하면 SW_ES가 오히려 더 좋지 않다. 따라서 벽체가 있는 건물을 비선형해석으로 성능평가를 수행한다면 프로그램간의 이러한 차이를 정확히 인식하여 최소 2개 이상의 프로그램의 결과를 서로 비교한 후 공학적인 판단을 거쳐 최종적인 성능을 판단해야 할 것으로 판단된다.

7. 결론

‘-’ 또는 ‘口’자형 벽체가 평면상에서 비대칭 또는 대칭으로 위치할 때 구조해석 프로그램 간의 비선형정적해석 결과 차이를 비교하였다. 그 차이는 골조만 있을 때 또는 ‘-’자형 벽체가 있을 때 보다는 컸으며 성능평가 결과에 영향을 미칠만한 크기의 차이도 때에 따라 발생하였다. 즉, 벽체 형태, 평면에서의 위치, 및 해석프로그램에 따라 성능을 다르게 평가할 가능성이 있다는 것이다. 비정형 벽체에서 뚜렷한 한계를 가지고 있는 오픈시스템을 제외하면 마이다스와 퍼폼은 대상에 따라 성능을 서로 더 크게도 작게도 평가할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 다만 마이다스는 벽체 모델링에서 퍼폼과 근본적으로 달라 그 비선형정적 푸시오버 결과도 많이 다를 것으로 예상하였으나 예상외로 크게 다르지 않았다. 최근 벽체가 있는 건물의 비선형해석에 활발히 사용되고 있는 퍼폼에서도 벽체의 모델링 방법에 따라 성능평가 결과에 영향을 미칠 수 있는 차이를 보였다. 다음은 비정형벽체가 있는 저층 건물의 비선형해석 시 유의해야 할 사항은 다음과 같다.

- 1) 마이다스의 경우 항복강도는 자동입력을 사용하고 변형능력은 사용자입력을 사용하여 직접 입력하는 방법이 적절할 것으로 보인다. 항복강도의 경우 성능점에서 산정하여 사용자입력[5]을 사용하는 경우 자동입력과 차이가 발생할 수도 있다. ‘-’자형 벽체가 있을 때는 큰 상관이 없으나 비정형벽체가 있을 때는 차이가 클 수 있다는 것을 주지해야 한다.
- 2) 오픈시스템을 사용한 2차원 해석은 비정형벽체가 있는 건물의 해석에는 적절하지 않다. 특히 모델에 포함되지 않는 가로방향의 골조가 비정형벽체에 미치는 하중영향을 정확히 고려하기 힘들다. 더불어 비정형벽체를 선요소로 모델링하는데 그 위치를 적절하게 정하기는 힘들다.
- 3) 퍼폼에서 벽체를 Shear Wall 요소로 모델링할 때 콘크리트를 비탄성전단으로 할 경우 콘크리트 압축변형률을 과소평가할 수 있다. 벽체를 General Wall 요소로 모델링할 경우도 마찬가지이다. 따라서 벽체 단면의

콘크리트 압축변형률을 성능평가의 기준으로 사용한다면 Shear Wall 요소를 사용하고 콘크리트를 탄성전단으로 해야 보수적인 결과를 얻을 수 있다.

- 4) 이론적으로 마이다스의 벽체 모델링과 가장 가까운 퍼폼의 벽체 모델은 Shear Wall 요소에 콘크리트 탄성전단을 사용한 것이다. 하지만 이 모델들이 서로 가장 근접한 결과를 항상 제공하지는 않았다. 경우에 따라 Shear Wall 요소에 콘크리트 비탄성전단을 사용하거나 General Wall을 사용할 때가 마이다스와 더 근접한 결과를 보였다. 따라서 비정형벽체를 비선형해석으로 성능평가를 수행할 때는 최소한 2개 이상의 해석프로그램 결과를 서로 비교한 후 공학적인 판단을 거쳐 최종적인 성능을 판정해야 한다.

결론적으로 벽체, 특히 비정형벽체를 가진 건물의 비선형거동을 가장 정확히 해석할 수 있는 유일한 해석프로그램은 현존하지 않는다. 따라서 사용자는 이 논문에서 제시한 해석프로그램 간의 차이를 인식하고 비선형해석을 통한 성능평가 시 프로그램 간 교차 검토를 적극적으로 수행할 필요가 있다. 또한 이 논문은 저층 건물만을 대상으로 연구를 수행한 결과이므로 세부적인 결과 값들은 중, 고층 건물에서는 전혀 다른 결과를 얻을 수 있음을 주지한다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비지원(13AUDP-B066083-01)에 의해 수행되었습니다.

/ 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. AIK, KBC 2009, Korean building code-structural, Seoul, Korea: Architectural Institute of Korea; c2009. 772p.
5. 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.