

합성단면을 적용한 모듈러 시스템의 내진 성능평가

최영후¹, 이호찬², 김진구^{3*}

Seismic Performance Assessment of a Modular System with Composite Section

Young-Hoo Choi¹, Ho-Chan Lee², Jin-Koo Kim^{3*}

Abstract: By producing pre-engineered modular system in the factory, It is enable to expedite construction and can be distinguished from two types by the method resisting load. One is the open-sided modular system composed of beams and columns. The other is enclosed modular system composed of panels and studs. Of the modular systems, the open-sided modular system buildings the connection between modules are difficult due to closed member sections, and the overall strength is reduced as a result of local buckling. In this study, in order to solve these problems, a modular system with folded steel members filled with concrete are proposed. The capacity spectrum method presented in ATC 40 is used for seismic performance assessment of the proposed model structure and the structure with conventional steel members. The analysis results show that at the performance point of each model the number and rotation of plastic hinge formed in the proposed modular system are smaller than those in the conventional system. Based on this observation it is concluded that the proposed system with composite sections has superior seismic capacity compared with conventional system.

Keywords: Open-sided modular system, Capacity spectrum method, Performance point, Composite section

1. 서 론

공장에서 단위모듈로 생산하여 현장에서 조립, 시공하는 모듈러 시스템은 기존의 건축공법과 달리 공기단축 및 친환경적인 순환 구조 등으로 미국, 영국 등 해외 선진국에서 활발하게 적용되고 있다. 특히 영국에서는 1950년대부터 철재 프레임 사용 모듈러 주택을 건축하였으며, 2000년대 이후 엔지니어링 기술 발달로 고층 주거시설 및 호텔 등 규모가 큰 프로젝트에 적용되고 있다. 가까운 일본에서는 1950년대 이미 모듈러 건축에 대한 연구가 진행되었으며 90년대 고베 지진 이후 내진성능을 인정받아 모듈러 시장이 더욱 활성화 되었다. 국내시장에서는 2003년에 모듈러 시스템이 도입되었다. 주로 저층 구조물에 적용되었으나, 공기 단축 및 공사비 절감의 효과가 입증되어 모듈러 시장의 확장 및 해외 선진국과 같이 고층화가 기대되고 있다. 모듈러 시스템은 하중 저항 방식에 따라 보-기둥 프레임 시스템(이하 개방형 방식)과 내

력벽 시스템(이하 폐쇄형 방식)으로 구분되는데, 각 단위모듈마다 보와 기둥으로 형성되어 있는 개방형 방식이 중, 고층 모듈러 건축에 주로 적용되고 있다(Lawson et al., 2012). 하지만 개방형 방식의 경우 모듈러간의 접합 시 기둥의 폐쇄된 형상으로 일체성을 확보하기 어려우며, 일체화된 바닥판이 없어 강막으로 거동하기 어렵다(Hong., 2014). 또한, 부재의 국부 좌굴로 인해 내력이 저하되어 정확한 성능평가가 어렵다.

이러한 이유로 기존의 모듈러 시스템은 지진 등의 횡력이 단위 모듈에 제대로 전달되지 않아 성능이 제대로 발휘되기 어렵다. 본 연구에서는 각형강관(기둥), C형강(보) 등 기존 모듈러 시스템의 주요 구조부재를 새로운 형태의 합성기둥과 합성보를 사용하여 구조적인 성능을 향상하는 방안에 대한 타당성을 검증하고자 한다. 해석 모델은 기존 모듈러와 제안한 모듈러 총 2가지 형태로 규모는 지하 1층 지상 15층의 중층 건물로 선정하였다. 비선형 정적해석을 통해 각 모듈러 시스템의 내진성능을 평가하였다.

2. 제안된 합성부재

2.1 합성부재의 기대효과

현재 사용되고 있는 모듈러 시스템은 앞서 언급했듯이 폐쇄된 단면 형상으로 인하여 모듈러간의 접합이 어려우며, 따라

¹정회원, MCS 구조기술사 사무소 사원

²정회원, MCS 구조기술사 사무소 대표

³정회원, 성균관대학교 건축토목공학부 교수, 교신저자

*Corresponding author: jkim12@skku.edu

Department of Civil and Architectural Eng, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

서 횡력에 대한 힘의 분배가 원활하지 않다. 본 연구에서는 Fig. 1(b), (c)와 같이 새로운 단면의 보와 기둥을 제안하였다. Fig. 1(b)의 보는 테두리에 강판이 부착되어 있으며, 내부에 콘크리트가 채워져 있는 합성보이다. 기존의 C형 보는 과도한 물량이 발생할 가능성이 있으며 좌굴로 인해 내력이 급격하게 저하될 수 있다. 하지만 제안된 합성보는 기존에 사용되어 온 강재의 두께를 줄이고 그 안에 콘크리트를 타설하여 부재 자체의 휨강성을 향상하고 및 국부좌굴의 단점을 개선하였다. 기존의 □형 기둥의 경우 폐쇄된 단면의 형태로 모듈간의 접합이 어려워 횡력에 대한 힘 전달이 제대로 전달되지 않는다. 하지만 Fig. 1(c)의 제안된 합성기둥은 절곡형 강판 내부에 콘크리트가 채워진 형태로, 강판의 일부가 뚫려있으므로 모듈간의 접합을 보다 수월하게 작업할 수 있다. 또한 콘크리트가 채워지므로 제안된 보와 마찬가지로 국부좌굴에 대한 내력 저하를 최소화 할 수 있다.

2.2 합성부재의 구조적 특성

제안된 모듈러 시스템의 합성보 및 합성기둥의 경우 기존에 사용되는 강재의 형태가 아니므로 1차적으로 단면특성에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 KBC 2009 0702.4.1에서 제시하는 판-폭 두께비(λ)에 대한 보, 기둥의 국부좌굴을 검토하였으며, Table 1에 합성보, 기둥에 대한 단면 정보를 나타내었다. 각 단면에 대한 세부적인 치수는 Fig. 1의 (b),(c)에 도시하였다. 두 부재 모두 절곡형 단면으로 세장단면으로 가정하였으며, 각 단면 특성에 대한 휨, 압축강도를 Table 2에 나타내었다. 보의 휨강도는 합성 부재의 특성에 맞게 산정하였으며, 기둥의 경

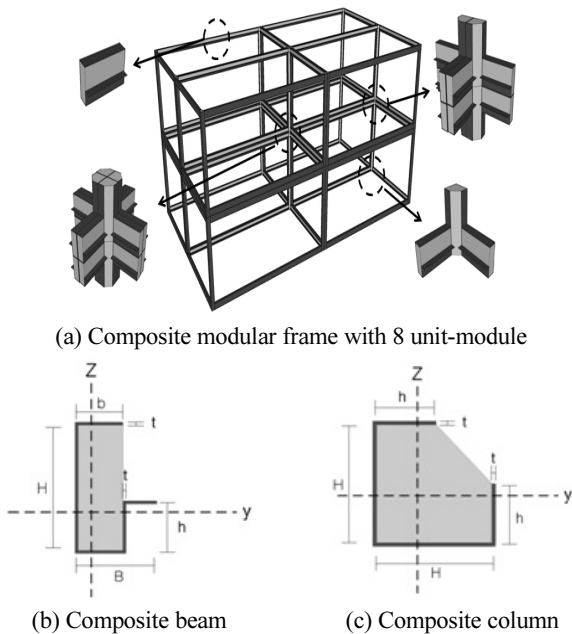


Fig. 1 Composite modular system

Table 1 Element size of composite modular system

Member	Section
Composite Girder	$H \times h \times B \times b \times t$ 200×80×125×75×4.5
Composite Column	$H \times h \times t$ 150×75×4.5

Table 2 Comparison of element strength

Member	Strength verification method	Axial strength (kN)	Moment strength (kN·m)
Composite girder	-	-	40.4
Composite column	ECC	708.2	-
	CFT	735.6	-
	GSD	703.3	-

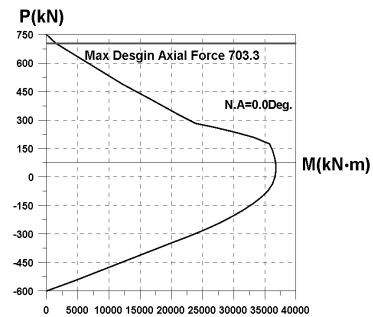


Fig. 2 P-M Curve for Composite Column used GSD

우 KBC 2009 0709.2.1 매립형 기둥(Encased Composite Column, ECC)과 0709.2.2 충전형 기둥(Concrete Filled Steel Tube, CFT)에서 제안하는 식으로 압축강도를 산정하였다.

또한 기둥을 완전합성으로 가정하여 MIDAS GSD 프로그램을 통해 산정한 결과와 비교하였다. PC공법과 같이 공장에서 생산되어 현장에서 조립되기 때문에 부재를 완전합성으로 가정하였으며 계산의 편의를 위해 MIDAS GSD에서 산정한 강도를 사용하였다. Fig. 2는 합성기둥에 대한 P-M 곡선을 나타낸 것이다.

3. 모듈러 건축의 구조적 이력거동

3.1 모듈러 시스템의 거동에 따른 설계 반영

모듈러 시스템은 단위 모듈로 형성되어 있는 모듈을 적용하는 식으로 구조물의 규모가 확장된다. 적용된 모듈은 건물의 형태에 따라 적게는 두 개의 부재가 중첩되고 많게는 네 개의 부재가 중첩되어 하나의 부재로 거동하여 강성 및 강도를 증가한다(Lee et al., 2007; Park et al., 2008). 또한 단면 형태 및 접합의 종류에 따라 모듈러 시스템의 구조적 성능이 달라지

므로 부재간의 접합 및 모듈 간의 접합에 따른 정밀검토 및 적절한 설계 반영이 필요하다. 일반적으로 부재간의 접합은 볼트와 Plate를 사용하여 체결하거나 용접을 통해 결속시키며, 모듈간의 접합 역시 부재간의 접합과 동일한 접합방식을 사용하고 있다. 하지만 모듈러 구조의 제작업체에 따른 접합상세가 다르므로 이를 정확하게 반영하기 위해서는 해당 모듈러 시스템에 적합한 접합방식을 별도로 해석하여 이를 바탕으로 해석에 반영해야 한다. 본 연구에서는 정확한 접합상세 해석에 대한 결과를 반영하기보다는 일반적으로 사용되는 볼트접합에 대한 강도 설계만을 고려하였다.

3.2 중첩 부재의 접합상세에 따른 구조적 거동

부재간의 합성 효과는 중첩방식에 따라 Fig. 3에 나타냈듯이 합성 단면과 비합성 단면으로 분리할 수 있다(Choi et al., 2015).

합성 단면의 경우 기둥과 보의 단면 2차모멘트(I_{cc} , I_{cb})는 Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 한 개의 부재로 거동하는 것으로 나타낼 수 있다. 도심이 부재의 중첩된 부분에 형성되어 있으며 그 축을 중심으로 응력이 분포된다. Fig. 3(b)는 비합성 단면의 응력분포를 나타낸 것으로 각 부재마다 중립축을 갖고 상부 부재의 단면 2차 모멘트(I_{uc} , I_{ub})와 하부 부재 단면 2차 모멘트(I_{lc} , I_{lb})를 더한 효과를 나타낸다. 결과적으로 모듈러 시스템의 규모가 커지면서 각 단위 모듈이 중첩될 경우 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 합성 단면의 하중 저항능력이 확연하게 증가한다.

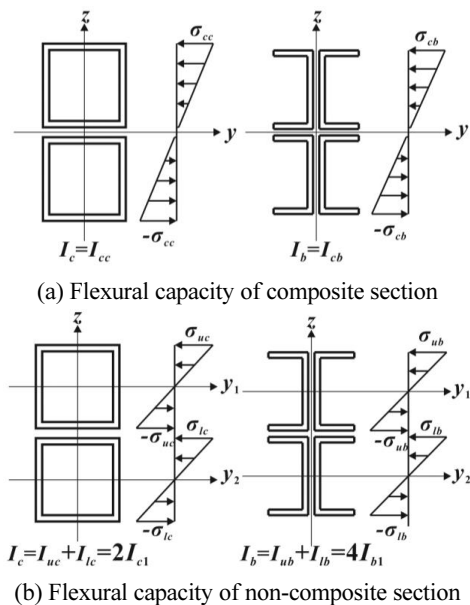


Fig. 3 Flexural capacity of doubled members with composite effects

3.3 모듈간의 접합상세에 따른 구조적 거동

모듈과 모듈이 만나는 부분은 접합상세에 따라 구조적인 특성이 달라진다. 본 연구에서는 Fig. 4와 5의 접합 방식을 사용하였다. 단위 모듈이 만나는 부분을 Connection Plate와 고력볼트의 마찰접합을 통해 모듈 간의 일체성을 확보한다. 이 방식은 3×6 m의 바닥 면적을 갖는 모듈에서 각형강관의 기둥과 C형강의 보 접합부가 강접합된 것으로 가정할 수 있다(Lee et al., 2015). 본 연구에서 적용한 방식 이외에도 SCI(The Steel Construction Institute)에서 제시한 50mm의 원형 액세스 홀을 뚫어 모듈간의 접합을 하는 방식과 Choi and Kim(2015)에서 제시한 아치형 액세스 홀을 뚫어 모듈간의 접합을 하는 방식이 있다.

본 연구에서는 모듈간의 접합을 강접합으로 가정하고 각 모듈의 거동을 파악하였다. Fig. 6은 기둥과 보의 접합부 모델의 단면을 나타낸 것으로 모듈간의 접합은 Rigid Link를 사용하였다.

4. 예제 구조물의 해석 모델 반영

4.1 예제 구조물 개요

본 연구에서는 지하 1층, 지상 15층의 중층 규모로 개방형 방식에 적합한 구조물을 해석모델로 설정하였다. 지상 15층은 보-기둥 프레임 모듈러 시스템인 개방형 방식을 사용하였으며 지하층 골조는 철근 콘크리트 모멘트 골조를 사용하였다. 내진성능계수는 코어 역할을 하는 건물골조식 보통 전

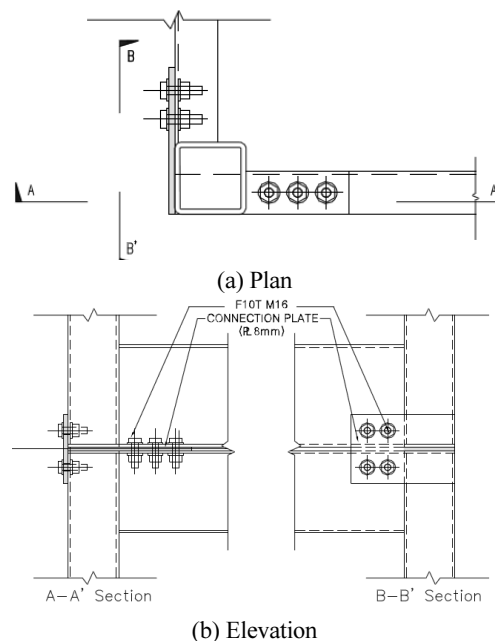


Fig. 4 Joint detail between 2 unit-modules

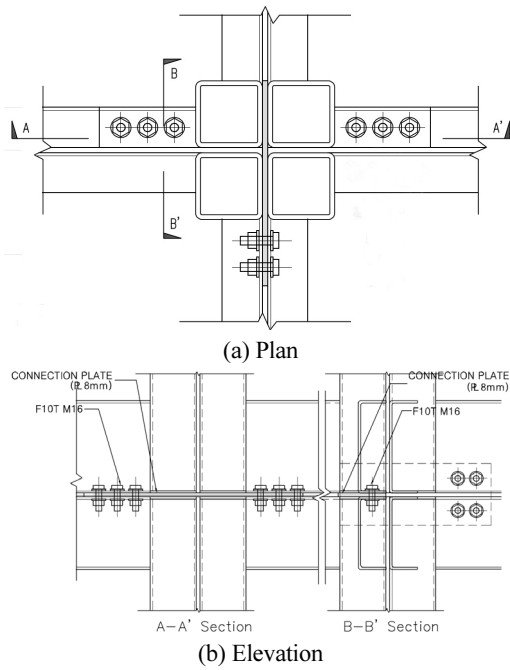


Fig. 5 Joint detail between 4 unit-modules

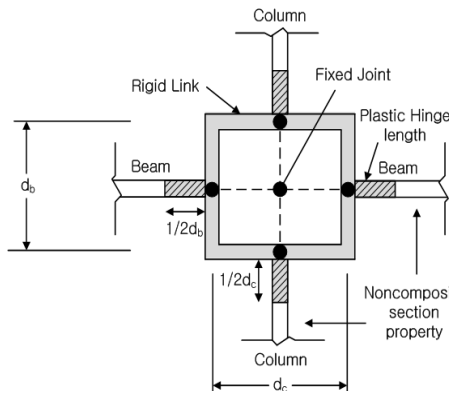
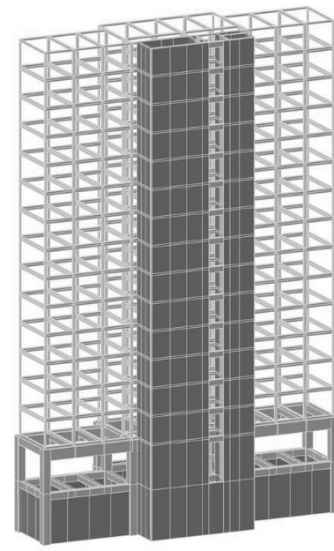


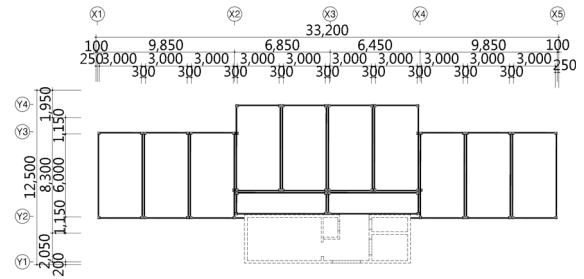
Fig. 6 Connection detail for unit-module

단벽 시스템을 적용하였다. 기존의 모듈러 시스템과 제안된 합성 부재를 사용한 시스템의 성능을 비교하기 위해 지하층과 코어는 변경하지 않고 모듈러 시스템만 변경하여 총 2개의 모델에 대한 해석을 수행하였다. 해석 모델에 사용된 모듈의 규격은 6.3 m(장변) × 3.3 m(단변) × 3.0 m(높이)와 6.4 m(장변) × 1.8 m(단변) × 3.0 m(높이) 총 두 개의 단위 모듈로 이뤄져 있다. Fig. 7에 예제 구조물의 3D 모델과 평면도를 나타내었으며, 구조물의 높이는 지하 5.4 m 지상 46.7 m이고, 모듈간의 간격은 0.02 m이다.

Table 3에 기존 모듈러 시스템에 사용된 부재의 단면 정보를 나타내었다. 예제 구조물의 구조 설계는 MIDAS GEN을 사용하였으며 철근 콘크리트 보통 모멘트 골조와 보통 전단벽 시스템의 단면 설계는 KBC 2009에 제시된 강도설계 기준



(a) 3D model



(b) Plan

Fig. 7 3D model and plan of analytical model

Table 3 Element size of conventional modularsystem

Member	Section	Area(cm ²)	Moment of inertia(cm ⁴)
Girder	C 200 × 75 × 6	20.28	2013.89
Column	B 125 × 125 × 9	41.76	865

을 적용하였다.

철근 콘크리트 보통 모멘트 골조의 경우 강기둥-약보에 맞춰 설계하고 보통 전단벽의 두께는 0.2 m로 일정 층수에 따라 철근비를 다르게 설계하였다. 예제 구조물의 부재 강도는 Table 4에 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 4와 5의 모듈간의 접합 이외에도 해석모델 특성상 모듈러와 RC코어가 접합되는 부분이 있다. 이에 대한 접합상세를 Fig. 8에 나타내었다.

설계하중은 KBC 2009의 기준에 따라 고정하중 5 kN/m², 활하중 2.5 kN/m²을 적용하였다. 최하층을 제외하고는 횡력에 대한 모델의 정확한 거동을 파악하기 위해 슬래브를 강막(Rigid Diaphragm)으로 가정하였다. 모듈러 시스템 특성상 슬래브의 일체화가 어렵지만 본 연구에서 제시된 합성 모듈러의 경우 슬래브 역시 공장에서 제작되어 모듈러와 일체화되

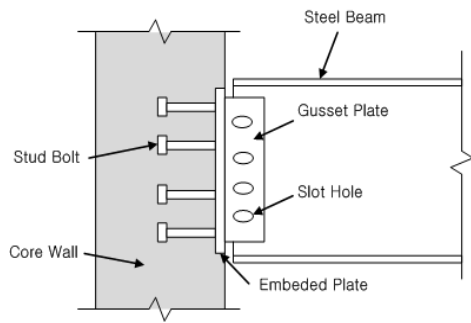


Fig. 8 Joint detail between core wall and modular

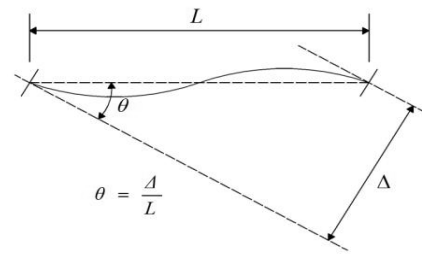


Fig. 9 Chord-rotation

Table 4 Material properties of structural members

Type	DB	Material Strength(MPa)
Concrete	C24	24
	C30	30
Rebar	SD400	400
Steel	SM490	325

Table 5 Seismic design parameters

Site Class	S _c
Fa	1.2
Fv	1.62
SDS	0.35
SD1	0.19
Importance Factor	1.2
Response Modification Factor	5
Seismic Design Category	C

Table 6 Wind load design parameters

Exposure Category	B
Basic wind Speed (m/s)	30
Importance Factor	1.0
Gust Effect Factor	1.96

기 때문에 RC 슬래브와 같은 거동을 할 것으로 가정하였다.

X방향의 고유주기는 1.09초, Y방향은 1.59초이다. 지진하중과 풍하중을 산정한 계수는 Table 5와 6에 나타내었다.

예제 구조물은 응답스펙트럼해석법을 사용하여 모드 밀면 전단력을 산정하였으며 정적해석과의 보정계수를 적용한 설계 밀면 전단력은 X방향이 1,271 kN, Y방향이 1,433 kN이다.

4.2 비선형 해석 모델 정의

비선형 해석을 위한 모델링은 비선형 전문해석 프로그램인 PERFORM3D를 사용하였다. 해석 모델의 기둥과 보는 ASEC/SEI

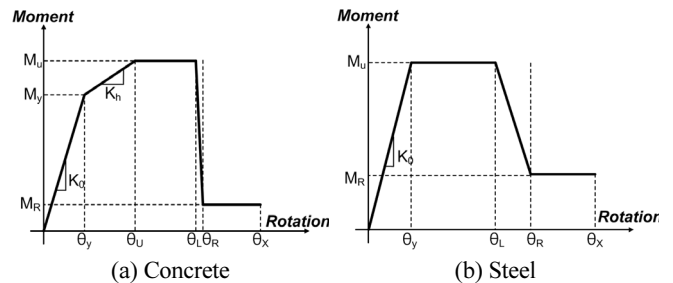
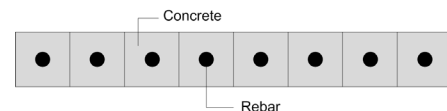


Fig. 10 Nonlinear models for material



(a) Fiber element of Wall

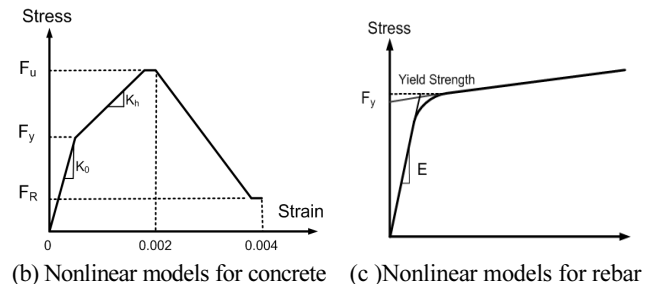


Fig. 11 Wall segment of nonlinear model

41-06에 제시되어 있는 Chord-rotation 방식에 따라 이력곡선을 정의하였다(Fig. 9). 사용된 재료의 비선형 거동은 Fig. 10에 나타내었다.

벽체의 모델링은 Fig. 11(a)에 나타냈듯이 Fiber Element를 사용하여 전체 길이의 비율에 따라서 설계하였다.

Fig. 11(b), (c)는 Paulay and Priestley가 제안한 벽체의 콘크리트와 철근의 이력곡선을 사용하였으며 ASEC/SEI 41-06의 기준을 참고하여 콘크리트의 기대강도는 항복강도의 1.5배, 철근의 기대강도는 항복강도의 1.25배를 적용하였다. 기둥과 벽체와 같은 수직재는 P-Δ 효과를 고려하여 횡력에 대한 거동을 반영하였다. 합성부재의 경우 AISC 360-10에서 제시하는 식 (1)의 탄성계수비(n)를 사용하여 콘크리트의 단면을 등가의 철골 단면으로 환산하였다.

Table 7 Transformed section property

Member	Verification Method	Area(cm ²)
Composite Girder	Theory	34.29
	GSD	37.71
Composite Column	Theory	40.12
	GSD	44.77

$$n = \frac{E_c}{E_s} \quad (1)$$

$$A_s = 3n \times A_c \quad (2)$$

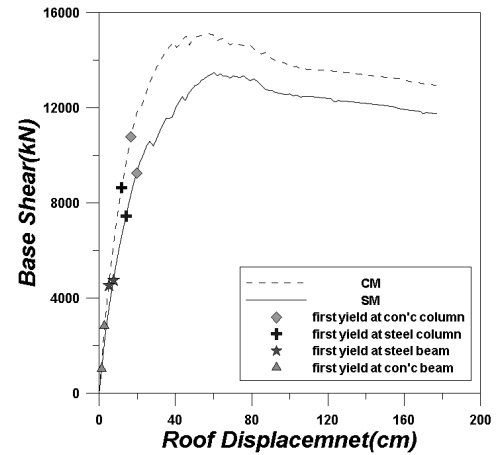
또한 AASHTO LRFD Article 6.10.1.1.a와 6.10.1.1.d에 제시되어 있듯이 콘크리트 양생이후 영구 하중에 대해서는 장기 합성단면의 특성을 가지므로 식 (2)를 사용하여 합성단면의 환산단면을 산정할 수 있다. Table 7은 이론식 및 MIDAS GSD를 이용하여 구한 환산단면의 단면정보를 나타내며, 본 연구에서는 보다 정확한 수치를 적용하기 위하여 MIDAS GSD에서 산정된 단면 정보를 사용하여 해석하였다.

5. 해석 모델의 비선형 해석결과

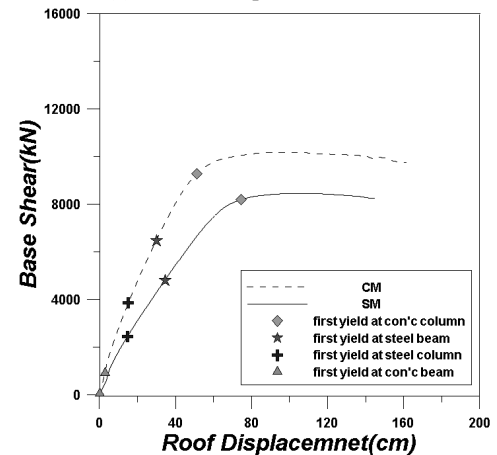
해석 모델은 각형강관의 기둥과 C형 보를 사용한 기존 모듈러(Steel Modular, SM)와 합성부재를 사용한 모듈러(Composite Modular, CM) 시스템이다. 두 개의 해석 모델은 정확한 붕괴 양상을 판별하기 위해서 모듈러 시스템을 제외하고는 동일한 단면을 갖는 골조 시스템을 적용하였다. 비선형 정적해석은 1차적으로 모델의 비정형성을 고려하여 각 방향마다 3개의 모드 조합을 고려하였으며 ASCE41-06에서 제시한 식 (3)의 중력하중이 작용된 상태에서 층간변위비가 5%에 도달할 때까지 해석을 수행하였다.

$$1.1 \text{ Dead Load} + 0.25 \text{ Live Load} \quad (3)$$

Fig. 12는 X방향과 Y방향의 비선형 정적 해석 결과를 나타낸 것으로, 각 방향에 대한 SM과 CM의 부재별 항복 상태를 밀면전단력과 지붕층 변위 관계로 표시하였다. Fig. 12(a)는 각 모델에 대한 X 방향의 비선형 정적해석 결과를 나타낸 것으로, 본 연구에서 제안한 CM이 기존 시스템인 SM 보다 높은 밀면전단력에서 항복하는 것을 확인할 수 있다. 이는 단면의 합성효과로 인하여 좌굴에 대한 저항 능력이 기존에 사용되는 철골 부재 보다 우수하여 나타난 것으로 보인다. 기존의 각



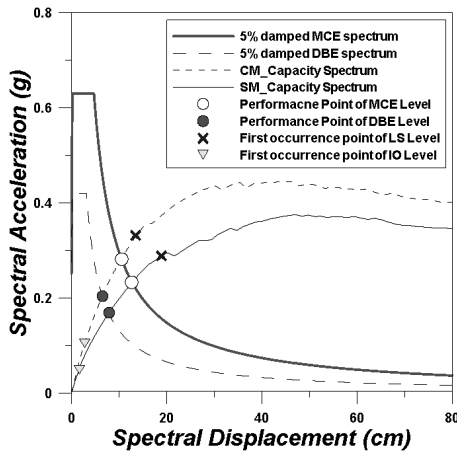
(a) X direction pushover curve



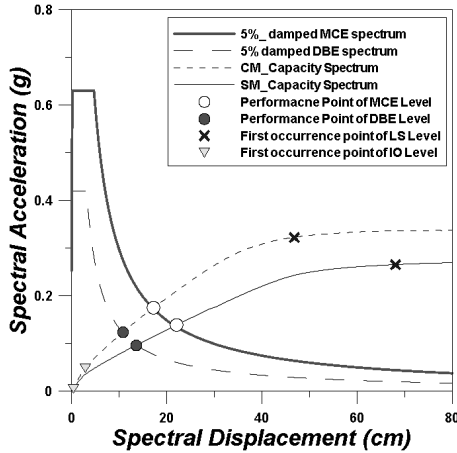
(b) Y direction pushover curve

Fig. 12 Pushover curve for models SM and CM

형강관과 C형강의 경우 국부좌굴로 인한 강도 및 연성의 저감 효과를 고려한 것에 비해 합성단면의 경우 국부좌굴이 방지되어 이러한 결과를 나타내었다. 부재별 항복 거동은 층내 단계로 나눌 수 있는데, 가장 먼저 5층에서 13층에 있는 인방보가 항복하였으며, 이는 비교적 짧은 경간으로 전단지배 거동으로 인한 항복으로 보인다. 이어서 10층에서 15층의 철골 보가 항복하여, 중, 고층에 있는 보가 먼저 항복하는 결과를 나타내었다. 이는 중, 고층부의 상대 변위가 저층부 보다 크게 발생하여 비교적 큰 모멘트가 발생한 결과이다. 기둥의 경우 1층 외부 철골기둥이 먼저 항복하였으며, 이후 지하층에 있는 철근콘크리트 기둥이 항복하였다. 비선형 정적해석 특성상 목표 층간변위비에 도달할 때까지 한 방향으로 하중을 가하므로 외부 저층부 기둥에 큰 압축력이 발생하여 이러한 결과가 나타난 것으로 사료된다. CM의 경우 SM과 동일한 부재 항복단계를 갖지만 합성부재의 경우 SM의 철골 부재가 항복할 때의 층간 변위비에서 최소 두 개 이상의 부재가 아직 항복하지 않은 것으로 나타났다. Fig. 12(b)는 Y방향에 대한 비선형



(a) Performance Point of Analytical models at X direction

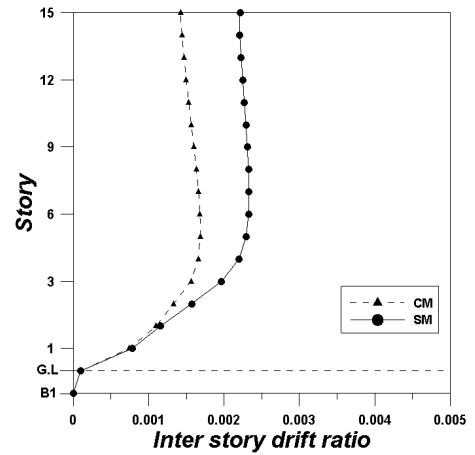


(b) Performance Point of Analytical models at Y direction

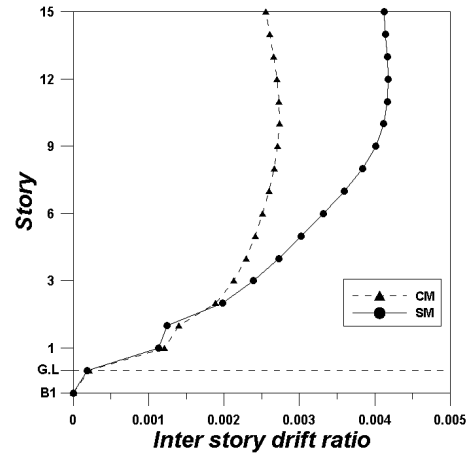
Fig. 13 Performance point of SM and CM

해석결과를 나타낸 것으로 CM이 SM보다 높은 밀면전단력에서 항복하는 것을 확인 할 수 있지만, X방향에 비해 낮은 밀면전단력에서 항복하는 결과를 볼 수 있다. 이는 X방향은 대부분의 횡력을 전단벽이 저항하므로 골조가 횡력에 저항하는 Y방향에 비해 밀면전단력이 높게 나타난다. 부재별 항복 단계의 경우 X방향과 다르게 철근 콘크리트 보 항복 이후 철골 기둥이 항복하는 거동을 보인다.

Fig. 13은 해석 모델에 대한 내진성능평가를 하기 위해 ATC-40(ATC, 1996)에서 제시하는 능력스펙트럼방법을 사용하여 각 방향 별 성능점을 나타낸 것이다. 성능점이란 설계 응답스펙트럼을 나타내는 요구곡선과 구조물의 성능을 나타내는 능력곡선이 교차하는 점으로 해당 요구곡선에 대한 구조물의 보유내력과 변위를 나타낸다. 요구곡선으로 사용된 스펙트럼은 5% 감쇠비를 적용한 2400년 재현주기의 2/3값 (Design Based Earthquake, DBE)인 설계 스펙트럼과 5% 감쇠비를 적용한 2400년 재현주기 (Maximum Considered Earthquake, MCE) 설계스펙트럼을 사용하였다.



(a) Inter story drift ratio of Analytical models at X direction



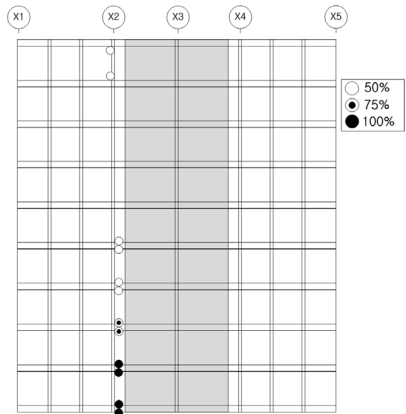
(b) Inter story drift ratio of Analytical models at Y direction

Fig. 14 Inter story drift ratio of SM and CM

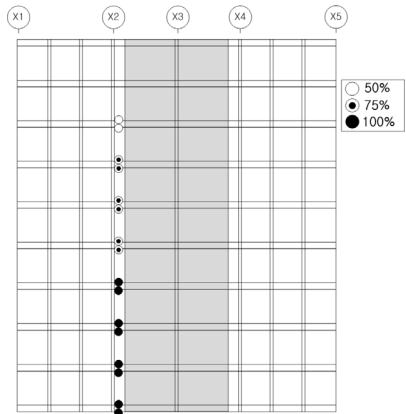
ASCE 41-06에 따르면 지진에 대한 성능평가 시 중요도 1 등급에 속하는 건물의 경우 DBE 스펙트럼에 대해서는 IO와 LS단계의 중간 수준을 만족해야 하며 MCE 스펙트럼에 대해서는 LS와 CP단계의 중간 수준을 만족해야 한다.

Fig. 13(a)는 X 방향에 대한 각 해석모델의 성능점을 나타낸 것으로 SM과 CM 모두 DBE 스펙트럼과 MCE 스펙트럼에 대하여 요구되는 성능수준을 만족하는 결과를 보인다. 앞장에서 언급했듯이 CM의 부재별 항복이 SM보다 더 큰 밀면전단력에서 항복하므로 CM이 더 큰 가속도에 대해서 성능수준을 만족한다. Fig. 13(b)는 Y 방향에 대한 각 해석모델의 성능점을 나타낸 것으로 X 방향의 결과와 마찬가지로 CM의 성능점이 작은 변위에서 형성됨을 알 수 있다. X방향과 Y방향에 대한 능력스펙트럼에서 가장 먼저 LS 단계에 도달하는 부재는 SM의 경우 중, 고층에 위치한 철골 보이며 CM 역시 중, 고층에 있는 합성보이다. 부재에 대한 강성 및 연성의 차이가 있으므로 LS 단계가 발생하는 지점이 다르지만, 전체적인 구조물의 성능수준을 파악하는데 있어 문제가 없는 것으로 사료된다.

Fig. 14는 DBE 수준의 요구곡선에 대한 각 해석모델의 성능점에서의 방향별 층간 변위비를 나타낸 것이다. 지표면 (Ground Level, G.L)을 경계로 지상 15층과 지하 1층을 나눠서 표시하였다.



(a) Plastic hinge formation in SM



(b) Plastic hinge formation in CM

Fig. 15 Comparison with plastic hinge formation at Y2 line

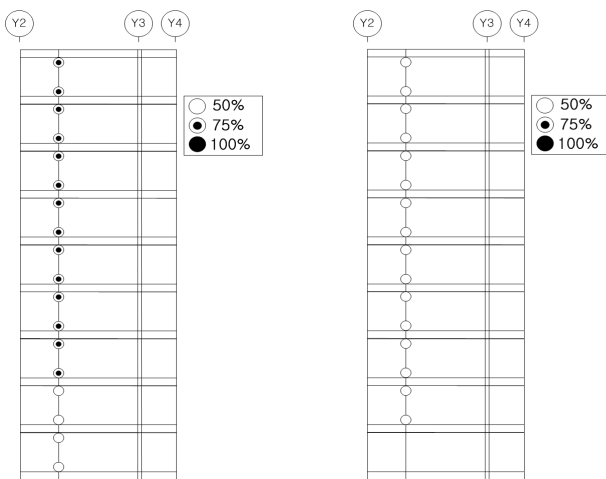
Fig. 15는 Fig. 14(a)에서 층간변위가 많이 발생한 3층부터 12층을 기준으로 평면도 Y2열에 해당하는 모듈러 시스템에 대한 소성힌지 분포를 나타낸 입면도이다. Y2 열을 제외하고는 성능점에서 소성힌지 발생이 적어 표현을 생략하였다. 또한 3층부터 12층을 제외한 나머지 층은 층간변위가 작아 생략하였다. 소성힌지의 회전각은 50퍼센트에서 100센트까지 표시하였다. 대부분의 소성변형이 보에서 발생하였으며, SM 모델 보다 CM에 소성힌지가 더 많이 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. Y축의 X2 골조의 소성힌지 분포를 Fig. 16에 표현하였다. Y축의 경우 X축과 마찬가지로 Fig. 14(b)를 기준으로 가장 층간변위가 많이 발생한 3층부터 12층에 대한 소성힌지 분포를 평면도 X2열에 해당하는 입면도에 표시하였다. 해석 모델 SM의 각형강관 기둥에 CM 모델의 합성기둥보다 더 큰 소성변형이 발생한 것으로 나타났다.

6. 결론

국내 모듈러 건축의 시장이 확장됨에 따라 대규모 생산이 가능해지고 점차 고층화의 필요성이 증가하고 있다. 하지만 고층 건물에 사용되는 개방형 모듈러 건축의 경우 일반적으로 부재가 폐쇄형 단면을 가지므로 모듈간의 접합이 어렵다. 따라서 횡력 등이 각층에 제대로 전달되지 않아 특정 부재에 국부좌굴이 발생하여 내력이 저감된다. 본 연구에서는 모듈간의 접합이 용이하도록 절곡형 단면을 갖은 기둥과 국부좌굴에 대한 내력저감을 최소화하기 위해 절곡 단면 내부에 콘크리트 충전하는 합성부재를 제안하였다.

모듈러건축의 고층화를 고려하여 지하 1층, 지상 15층 총 16층의 주거 건물을 예제 구조물로 정하였으며 모듈간의 접합은 기존 연구를 참고하여 강접합으로 가정하였다. 기존 모듈러 시스템(Steel Modular, SM)과 제안된 합성단면을 사용한 모듈러 시스템(Composite Modular, CM) 총 두 가지 해석모델에 대한 pushover 해석을 수행하였으며 ATC- 40에 제시하는 능력스펙트럼방법으로 각 모델에 대한 성능점을 산정하였다. 해석모델에 대한 내진성능평가 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 제안된 CM 모델은 부재의 합성효과로 인해 기존의 SM 모델에 비해 초기강성과 밀면전단력이 크게 나타났으며, 부재별 항복단계 역시 CM의 부재가 큰 밀면전단력에서 항복하는 결과를 보였다.
- 2) 해당 지진에 대한 구조물의 내력과 변위를 나타내는 성능점은 CM과 SM 모두 ASCE 41-06에서 제시하는 성능수준을 만족하였으며, CM이 SM보다 더 큰 내력을 갖는 것으로 나타났다.
- 3) DBE 요구곡선에 표시된 성능점에서의 소성힌지 분포를



(a) Plastic hinge formation in SM (b) Plastic hinge formation in CM

Fig. 16 Comparison with Plastic hinge formation at X2 line

비교한 결과, SM의 기둥 부재가 횡력에 의한 국부좌굴로 CM보다 소성힌지의 분포와 변형량이 높게 나타났다.

4) SM과 CM의 횡력에 대한 전체적인 거동을 비교하였을 때, CM이 SM보다 향상된 내진성능을 갖는 것을 확인하였다. 하지만 보다 정확한 해석을 위해 모듈간의 접합상세, 합성부재의 단면 정보 및 강도를 유한요소 정밀해석이나 모형실험을 통하여 도출하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 주거환경연구사업 (과제번호: 16RERP-B082884-03)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

AASHTO (2012), AASHTO LRFD bridge design specifications, 6th Ed., Washington, DC., 713-718.
AISC (2010), Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL
ASCE (2007), Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-06, American Society of Civil Engineers, Virginia
ATC-40 (1996), Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, Redwood City.
Choi, K. S., Lee, H. C., and Kim, H. J., (2015), Influence of Analytical Models on the Seismic Response of Modular Structures, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(2),

74-85.
Computer and Structures, Inc. (2006), PERFORM Components and Elements for PERFORM 3D and PERFORM-Collapse ver.4, CSI, Berkeley, CA.
Hong, S. G. (2014), Structural Design Guidelines for Middle to High-rise Modular Buildings for Architects and Engineers, *Review of Architecture and Building Science*, 58(5), 15-19.
KBC-2009 (2009), Korean Building Code and Commentary, Architectural Institute of Korea.
Lawson, R. M., Ogden, R. G., and Berfin, R. (2012), Application for Modular Construction in High-Rise Buildings, *Journal of Architectural Engineering*, 18, 148-156.
Lee, C. H., Kim, J. J., Hong, S. G., Cho, B. H., Kim, H. J., and Han, G. H (2007), Full-Scale Experimental Evaluation of Seismic and Wind Performance of a Modular Building Structure with New Cold-Formed Steel shapes, *Proceedings of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 29-32.
Lee, S. S., park, K. S., Hong, S. Y., and bae, K. W. (2015), Behavior of C-Shaped Beam to Square Hollow Section Column Connection in Modular Frame, *Journal of Korea Society of Steel Construction*, 27(5), 471-481.
Park, J.H, An, H. S., Cho, B. H., and Lee, S. H. (2008), Deflection of Vierendeel-type Coupled Beams Applied to Modular Unit Structures, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structures & Construction*, 24(9), 29-38.

Received : 11/08/2016

Revised : 11/25/2016

Accepted : 12/02/2016

요 지 : 공장생산으로 신속한 시공이 가능한 모듈러 시스템은 하중저항 방식에 따라 보-기둥 프레임식의 개방형 모듈러 시스템과 패널 및 스티드로 이뤄진 폐쇄형 모듈러 시스템으로 구분할 수 있다. 그 중 개방형 모듈러 시스템은 폐쇄형 단면형상으로 모듈간 접합이 어려우며, 특정부문의 하중 집중현상으로 국부좌굴이 발생하여 내력이 저감될 가능성이 있다. 본 연구에서는 기존 모듈러 시스템의 문제점을 해결하기 위하여 절곡형 단면 안에 콘크리트를 채운 합성단면을 사용한 모듈러 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템의 내진 성능 평가를 위해 ATC 40의 능력스펙트럼 해석법을 사용하였으며, 일반적인 모듈러시스템의 결과와 비교하여 성능을 검증하였다. 해석결과에 따르면 성능점에서 합성단면을 사용한 모듈러시스템의 소성힌지 갯수 및 변형량이 적게 나타났다. 이를 토대로 제안된 합성단면의 내진성능이 기존 부재 보다 우수 것으로 판단하였다.

핵심용어 : 개방형 모듈러 시스템, 능력스펙트럼 해석법, 성능점, 합성단면
