

접합부 강성을 고려한 합성 모듈러 시스템의 내진 성능평가

최영후¹, 이호찬², 김진구^{3*}

Seismic Performance Assessment of a Composite Modular System Considering Stiffness of Connections

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

Abstract: Modular system can be divided into two types based on the methods of resisting load. The one is the open-sided modular system composed of beams and columns. The other is the enclosed modular system composed of panels and studs. Of the Modular systems, the use of open-sided modular system is limited because it consists of closed member sections. In order to solve this problem, Choi et al.(2017) proposed a composite modular system with folded steel members filled with concrete. However, it was assumed in the previous study that the connections between modules are composed of rigid joint. Therefore it didn't identify the effect of connection behavior in structure. This study used finite element analysis to calculate stiffness of the connections in the proposed modular system. The linearization method presented in FEMA 440 is used for seismic performance assessment of structures, considering the connection stiffness computed in this study. The result of analysis shows that the capacity and story drift ratio obtained in the model considering stiffness of connection are less than those in the model not considering connection stiffness. Based on this observation, it is concluded that the stiffness of connection has a considerable effect on structural behavior.

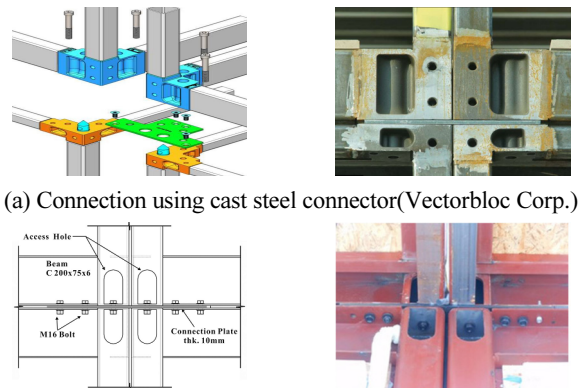
Keywords: Composite modular system, Connection stiffness, Finite element analysis, Seismic performance

1. 서 론

2003년 이후 국내에 도입된 모듈러 시스템은 교육시설, 상업시설 등 동일한 유닛을 갖은 건축물에 적용되었으며, 대표적인 사례 중 서울 양천구에 위치한 신기초등학교는 9m×10m, 3m×10m, 3m×6m 총 3개의 단위 모듈을 사용하였다(Park et al., 2005). 하지만 모듈러 건축은 공장생산 및 공기단축 등의 효과가 있음에도 불구하고 층수가 증가됨에 따라 시공 및 설계가 복잡해져 주로 3층 이하 건축물에 적용되어졌다.

모듈러는 하중저항 방식에 따라 두가지로 분류 될 수 있는데 그 중 보-기둥 프레임 을 갖은 모듈러 구조의 주요부재는 폐쇄형 단면을 사용하여 부재간의 접합 및 모듈간의 접합성능을 확보하기 어렵다. 접합성능이 제대로 확보되지 않을 경우 하중전달 및 부재의 국부좌굴로 인해 내력이 저하될 가능성

이 있으며, 모듈간의 일체성이 확보되지 않아 외력에 의한 구조물 전체거동에 영향을 미칠 수 있다. 해외 및 국내에서는 모듈러의 접합성능 및 일체성을 확보하기 위해 다양한 접합방식을 제안하였다. 해외 사례 중 하나인 모듈간 접합 방식은 Fig. 1(a)과 같이 부재간의 접합과 모듈간의 접합을 하나의 새로운 부재에 접합하여 일체성을 확보하는 방식이 있다. 이외에도 Kullman Building Corporation에서 제안한 기둥으로 사용된 각형강관 측면에 hole을 내어 플레이트와 리벳을 이용하



(a) Connection using cast steel connector(Vectorbloc Corp.)

(b) Connecting through access hole(kumkangkind Co., Ltd)

Fig. 1 Connection detail of modular

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 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

여 고정하는 방식과 SCI(The Steel Construction Institute)에서 제안한 각형강관 기둥 단부 부분에 원형 Access hole을 내어 볼트로 모듈간의 접합을 사용하는 방식 등이 있다. Fig. 1(b)의 경우 국내 사례 중 하나로써 각형강관 기둥에 Access hole을 내어 모듈간의 접합 방법을 제안하였다. 접합부의 성능검증을 위해 기둥의 두께, Access hole의 유, 무 등의 변수를 두고 부재간의 접합성능 및 모듈간의 접합성능을 파악하였다(Lee, 2015).

또한 Lee et al.(2017)은 부재의 손실을 최소화 하기위해 연결부재와 브래킷을 보강하여 접합부의 성능을 향상시켰다.

본 연구에서는 Choi et al.(2017)에서 제안한 합성단면을 적용한 모듈러 시스템을 사용하였으며, 모듈러의 접합부를 강접으로 가정한 기존연구와 달리 접합부의 정확한 성능을 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 이에 접합성능을 적용한 건물과 적용하지 않은 건물의 비선형정적해석을 통해 각각의 내진성능을 파악하였다.

2. 합성단면의 모듈러 구조

2.1 합성단면의 구조적 특징

기존에 사용되고 있는 모듈러 구조물은 폐쇄형 단면의 기둥을 사용하기 때문에 모듈간의 접합을 하는데 있어 제약이 있으며 국부좌굴로 인해 정확한 성능평가를 하기 어렵다. 이에 Choi et al.(2017)는 제안된 철골단면에 항복강도 30 Mpa

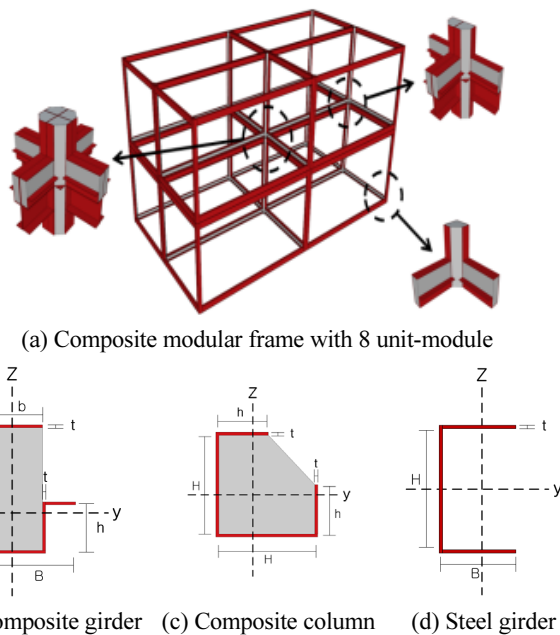


Fig. 2 Composite modular system

콘크리트를 채운 형태의 보와 기둥 부재를 제안하여 기존 모듈러의 단점을 보완하였다. 이전 연구에서 사용한 합성단면을 적용한 모듈러 시스템과는 달리 본 연구에서는 보 부재를 하중을 전달하는 부분과 저항하는 부분으로 분류하였다. 저항하는 부분은 바닥판이 설치되는 부분으로 합성보를 사용하였으며 전달하는 부분은 C형강을 사용하였다. Fig. 2(a)는 총 8개의 단위 모듈로 구성되어 있는 모듈러 구조물로 부재간의 접합된 부분을 나타낸 것이며, Figs. 2(b), 2(c)는 모듈러에 사용된 합성부재를 나타내었다(Choi et al., 2017). 일반 철골부재의 좌굴로 인한 내력저감 등의 단점을 보완하기 위해 철골부재 안에 콘크리트를 채워 놓은 단면 형상을 갖는다. 또한, 기존의 모듈러는 폐쇄형 기둥을 사용하여 모듈간의 접합이 어렵지만 제안된 합성기둥은 단면 일부가 절곡되어 있어 모듈간의 접합을 수월하게 작업할 수 있다. Table 1에 모듈러에 사용된 합성부재 및 철골부재의 단면정보를 나타내었다. 제안된 합성부재의 경우 Choi et al.(2017)은 KBC 2009에 제시되어 있는 식으로 부재의 내력을 산정하고 MIDAS GSD 프로그램을 이용하여 결과를 비교하였다. 하지만 본 연구에서는 압축강도를 최근 개정된 KBC 2016 0709.2.1 매입형 합성기둥(Encased Composite Column, ECC)에서 제안한 식으로 다시 산정하였으며 Table 2에 나타내었다.

2.2 모듈러 중첩효과에 따른 거동

단위 모듈을 중첩하여 하나의 구조물로 거동하는 모듈러 시스템은 부재 단면의 형상 및 접합의 종류에 따라 이력거동 및 구조적인 성능이 달라진다. Choi et al.(2015)에 따르면 접합 방식에 따라 합성과 비합성 단면으로 분리할 수 있으며 Fig. 3에 나타냈듯이 기둥과 보의 단면 2차모멘트(I_{cc} , I_{cb})를 중립축을 중심으로 하나의 부재 또는 단일 부재로 볼 수 있다.

Fig. 3(a)의 경우 부재의 합성효과가 적용된 것으로 두개의

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
Steel Girder	$H \times B \times t$	200×125×6

Table 2 Comparison of element strength

Member	Strength verification method	Axial strength (kN)	Moment strength (kN·m)
Composite girder	-	-	40.4
Composite column	ECC	705.2	-
	GSD	703.3	-

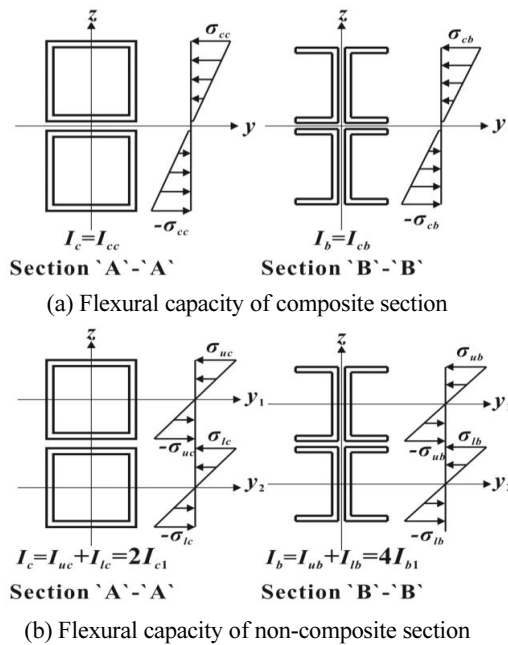


Fig. 3 Flexural capacity of doubled members with composite effects

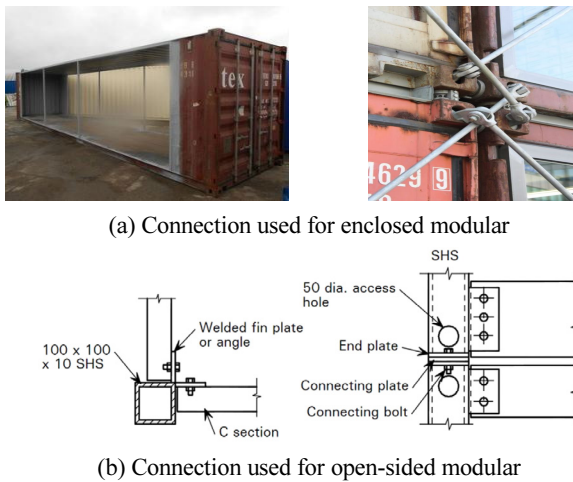


Fig. 4 Kind of connection according to modular system

부재가 하나의 부재로 거동하는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 3(b)는 부재의 비합성을 고려하여 단일 부재로 거동하는 것을 확인할 수 있다. 일반적인 하중 저항 시스템과 달리 모듈러 구조는 단위 모듈이 중첩된 것으로 부재의 비합성 효과가 고려되어 중첩이 될수록 합성효과를 고려한 단면에 비해 강성이 적게 평가될 수 있다.

3. 접합방식에 따른 모듈러의 이력거동

3.1 모듈러 시스템의 접합방식

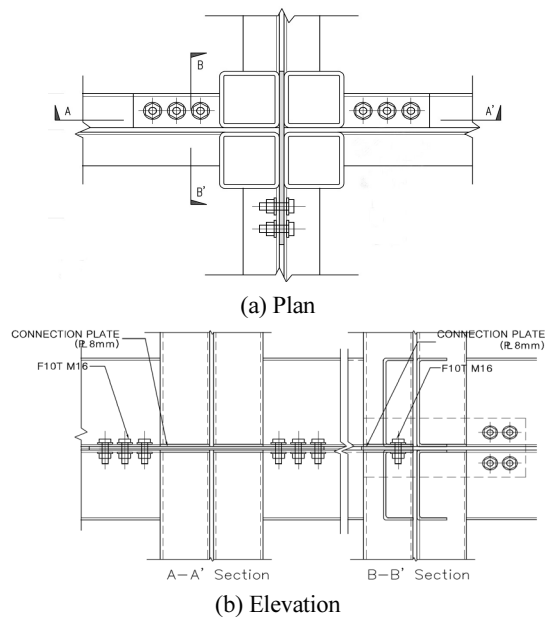


Fig. 5 Joint detail between 4 unit-modules

모듈러 시스템에서 접합은 Fig. 4에 나타냈듯이 폐쇄형 모듈러, 개방형 모듈러에 따라 접합 방식이 다르다. Fig. 4(a)는 폐쇄형 모듈러 접합방식으로 외각에 설치된 이음쇠에 강봉을 엇갈리게 배치하여 단위 모듈을 접합하는 방식이다. 개방형 모듈러의 경우 보-기둥 프레임 형식으로 부재간의 접합이 이뤄진 상태에서 단위모듈간의 접합이 이뤄진다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 보 웨브와 기둥을 볼트 접합하였으며 단위모듈간의 접합은 기둥 단부에 Access hole을 뚫어 단위모듈 사이에 Plate를 두고 볼트 접합하였다.

본 연구에서는 개방형 모듈러형태로써 보와 기둥을 용접하는 것으로 가정하고 모듈간의 접합은 Fig. 5에 나타냈듯이 단위모듈 사이에 Plate를 두고 볼트로 체결하는 방식을 사용하였다.

3.2 모듈러 접합부의 이력거동

접합부의 이력거동을 파악하기 위해서 보-기둥 접합 및 단위 모듈의 접합 조건을 고려하여 외력에 대한 실험 및 해석이 필요하다. Lee et al.(2015)은 각형강관과 C형강으로 이뤄진 철골 모듈러에 대하여 접합부의 강성 및 강도를 평가하였으며, Choi and Kim(2015)은 Access hole이 형성된 기둥과 보 접합부의 거동을 평가하였다.

본 연구에서는 앞서 언급한 접합방식을 적용하여 합성부재로 이뤄진 모듈러의 접합부 거동을 평가하기 위해 Charney and Downs(2004)가 제안한 Scissor 모델을 사용하였다. Scissor 모델은 접합부의 거동을 평가하기 위해 사용되는 모델 중 하나로 횡하중 적용시 가위처럼 움직인다고 하여 정의되었다

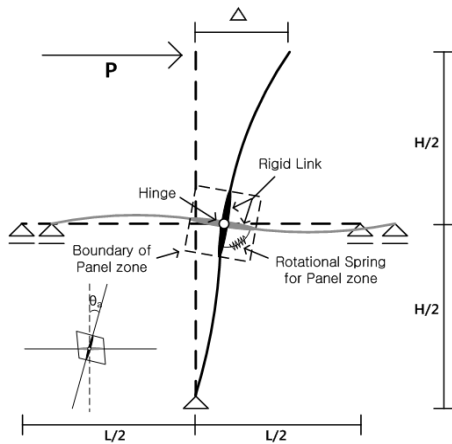


Fig. 6 The scissors model

(Fig. 6). 패널존을 경계로 기둥과 보가 Rigid Link로 구성되어 있으며 각 부재를 연결하는 절점을 하나의 절점이 아닌 두 개의 절점으로 만들어 각 절점 사이를 스프링 요소로 연결시킨다. 부재에 외력이 가해지면 패널존 내부에 위치한 두 개의 절점에서 회전각이 발생하는데 각 절점의 회전각 차이를 패널존의 회전각으로 정의할 수 있다.

외력(P)이 기둥 상단에 작용하면 변위(Δ)가 발생하고 패널존 부분에 모멘트에 의한 회전각(θ_a)이 발생한다. θ_a 는 보의 회전각(θ_b)과 기둥의 회전각(θ_c)의 차이이며, 식 (1)에 나타내었다.

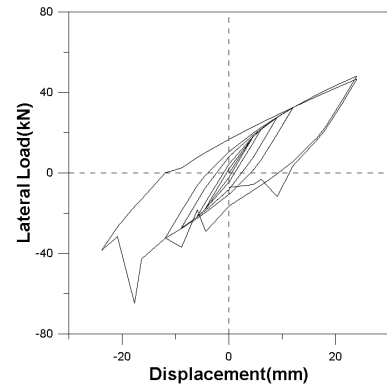
$$\theta_a = \theta_b - \theta_c = \frac{PH}{K_s} \quad (1)$$

$$\Delta = PL^2 \left(\frac{L}{12EI_b} + \frac{H}{12EI_c} + \frac{1}{K_s} \right) \quad (2)$$

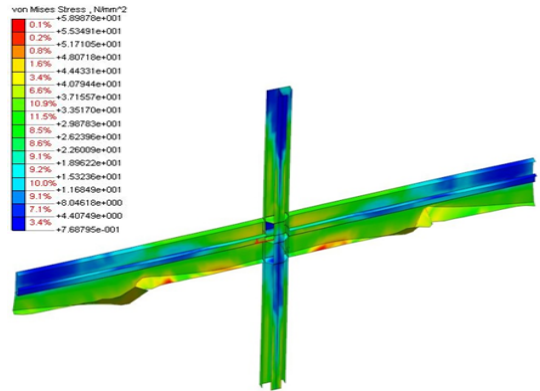
Δ 는 식 (2)에 나타냈듯이 보의 변위(Δ_b)와 기둥의 변위(Δ_c) 및 스프링의 회전변위(Δ_k)의 합이며, 여기서 K_s 는 스프링의 회전강성이며, E 는 탄성계수, I_b 와 I_c 는 보의 단면2차모멘트, 기둥의 단면2차모멘트이다. 결과적으로 Δ 는 부재의 휨강성과 스프링의 회전강성에 의해 결정되며, 회전각이 커질수록 변위도 증가한다.

3.3 접합부의 유한요소해석

접합부의 강성을 도출하기 위해 Fig. 6의 Scissor 모델과 같이 보 양 끝단은 이동지점, 기둥 아랫단은 회전지점으로 가정하였으며 기둥 윗부분은 자유단으로 가정하였다. 모델링은 MIDAS FEM을 사용하였으며, FEMA 355D에 제시되어 있는 반복가력하중을 변위제어 방식으로 기둥 윗부분에 가력하여



(a) Lateral load-displacement curve



(b) Deformed shape and stress distribution at 2% rotation

Fig. 7 The result of cyclic loading

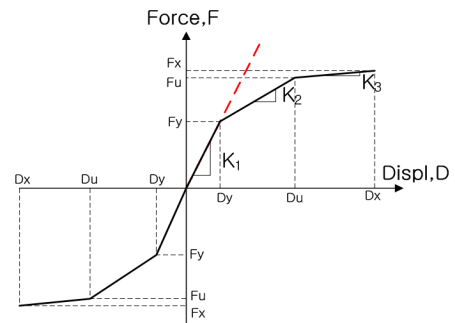


Fig. 8 Proposed trilinear envelope curve of connection

회전각 5%가 발생할 때까지 해석하였다.

내력저감은 회전각 2%에 도달하였을 때 처음으로 발생하였으며, C형강 보의 중앙부에 국부좌굴이 발생하면서 패널존 거동에 영향을 미치는 것으로 나타났다. Figs. 7 (a), 7(b)에 회전각 2%가 도달하였을 때의 힘-변위 그래프와 FEM 모델의 von Mises 응력 분포를 나타내었다. Fig. 7(b)에 나타냈듯이 재료의 항복강도에 도달하기 전에 가력하중에 의한 비틀림 좌굴이 발생한 것을 확인할 수 있다.

패널존의 강성은 국부좌굴에 의한 내력저감을 고려하여 국

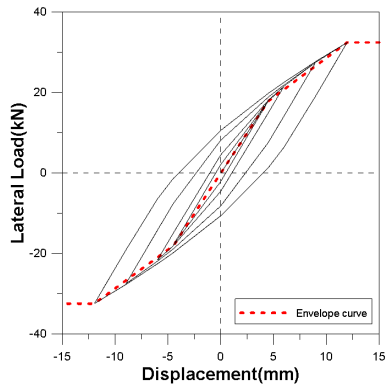


Fig. 9 Lateral Load-Displacement curve occurred 1.5% rotation

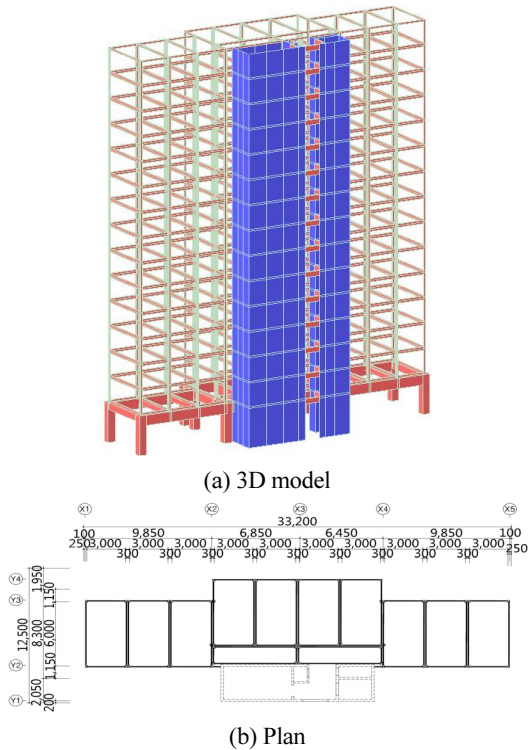


Fig. 10 3D model and plan of analytical model

부좌굴이 발생하기 전 단계인 회전각 1.5%까지의 내력으로 산정하였다. 해석 결과를 삼선형화하기 위해 Fig. 8의 Envelop curve를 사용하여 해당 강성을 calibration 하였으며, Fig. 9에 나타내었다.

4. 예제 구조물의 해석 모델 반영

4.1 예제 구조물 개요

본 연구에 사용된 예제 구조물은 15층 규모의 중층 구조물

Table 3 Member size of reinforced concrete moment frame

Member	Section(cm)	Area(cm ²)	Moment of inertia(cm ⁴)
Girder	80 × 120	9.6 × 10 ³	1.15 × 10 ⁷
Column	80 × 80	6.4 × 10 ³	3.41 × 10 ⁶

Table 4 Material properties of structural members

Type	DB	Yield Strength(MPa)
Concrete	C24	24
	C30	30
Rebar	SD400	400
Steel	SM490	315

Table 5 Seismic design parameters

Site Class	S _c
F _a	1.2
F _v	1.62
S _{DS}	0.35
S _{DI}	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

로 중앙부에 전단벽식 코어를 지니며, 1층은 철근콘크리트 모멘트 골조, 1층을 제외한 층은 개방형 모듈러 시스템으로 이뤄져 있다. 개방형 모듈러의 단위 모듈은 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)로 이뤄져 있다. 해석모델의 총 높이는 46.7 m, 모듈간의 간격은 0.02 m이며 Fig. 10에 3D모델과 평면도를 나타내었다. 1층 철근콘크리트 모멘트 골조의 단면정보를 Table 3에 나타내었다. 선형 탄성모델은 MIDAS GEN을 사용하여 모델링하였으며, KBC 2016에 제시되어 있는 설계기준에 따라 구조설계 하였다.

전단벽의 두께는 0.2 m이며 층수에 따라 철근비를 다르게 하였다.

철근 콘크리트 모멘트 골조는 중간 모멘트 골조 배근상세를 적용하였다. 해석모델의 재료 강도는 Table 4에 나타내었다. 고정하중은 5 kN/m², 활하중은 KBC 2016에 따라 2.5 kN/m²을

적용하였다. 횡력에 대한 모델의 정확한 거동을 파악하기 위해 슬래브를 강막(Rigid Diaphragm)으로 가정하였다. 고유주기는 X방향이 1.09초, Y방향이 1.59초이다. 지진하중과 풍하중을 산정한 계수는 Tables 5, 6에 나타내었다. 예제 구조물의 지진하중은 응답스펙트럼해석법을 사용하여 산정하였으며 설계 밀면 전단력은 X방향이 1,433 kN, Y방향이 1,271 kN이다.

4.2 비선형 해석 모델 정의

내진성능을 평가하기 위해 비선형 해석 프로그램인 PERFORM 3D를 사용하였다. 비선형 해석모델은 선형 탄성모델을 기반으로 패널존의 강성을 입력한 모델(Composite Model applied

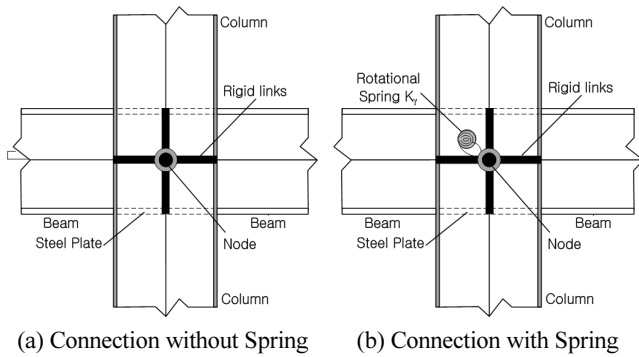


Fig. 11 Panel zone Model

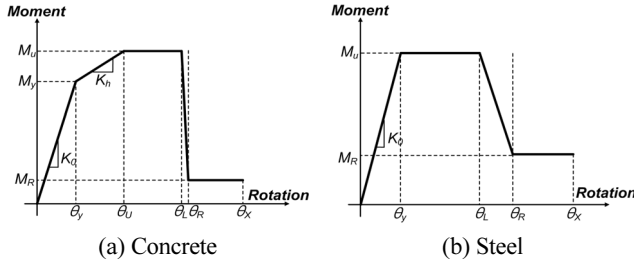


Fig. 12 Nonlinear models for material

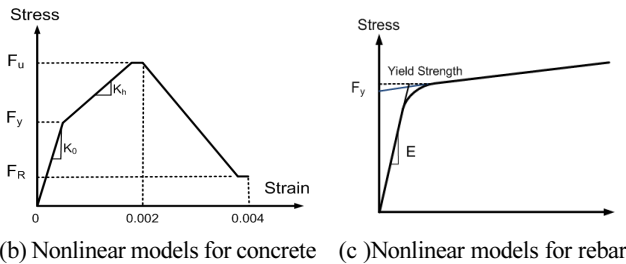
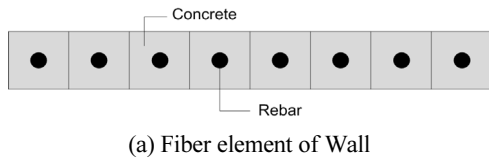


Fig. 13 Wall segment of nonlinear model

Panel zone, CM_P)과 입력하지 않은 모델(Composite Model, CM)로 총 두 개의 모델로 하였다.

Fig. 11은 패널존 강성 유, 무에 따른 접합부 모델을 나타낸 것으로 합성부재가 접합되는 부분에 적용하였으며, 나머지 부재에 대한 접합상세는 고정단으로 가정하였다. 보와 기둥으로 이뤄진 모멘트 골조의 경우 Fig. 12와 같이 사용된 재료별로 비선형 이력곡선을 정의하였다. 코어에 해당하는 전단벽체는 Fig. 13(a)에 나타냈듯이 Fiber Element를 사용하여 전체길이의 비율에 따라 정의하였다. Figs. 13(b), 13(c)는 Paulay and Priestley가 제안한 벽체의 콘크리트와 철근의 이력곡선을 나타낸 것이다. 비선형 모델의 경우 ASCE/SEI 41-06에 제시되어 있는 재료의 기대강도를 사용하였다. 콘크리트 기대강도는 항복강도의 1.5배를 적용하였으며, 철근의 기대강도는 항복강도의 1.25배를 적용하였다. 기둥과 벽체와 같은 수직부재는 횡력에 의한 P-Δ효과를 해석에 반영하였다.

Choi et al.(2017)는 개방형 모듈러에 사용된 합성부재를 탄성계수비(n)를 사용하여 콘크리트 단면을 등가 철골 단면으로 환산하였으며 AASHTO LRFD Article 6.10.1.1.a와 6.10.1.1.d에 제시되어 있는 장기 합성단면의 특성을 고려하였다. 본 연구에서는 Choi et al.(2017)에서 사용한 환산단면을 동일하게 사용하였으며, Table 7에 단면정보를 나타내었다.

5. 해석 모델의 비선형 해석결과

앞서 언급했듯이, 두 개의 비선형 해석 모델은 합성부재의 패널존 강성 유, 무를 제외하고는 동일한 단면특성을 적용하였다. 비선형 해석은 횡하중을 목표하는 층간변위비가 발생할 때까지 가력하는 비선형 정적해석(Push-over Analysis)을 수행하였다. ASCE/SEI 41-06에 제시되어 있는 식 (3)의 중력하중이 적용된 상태에서 층간변위비 5%가 발생할 때까지 해석을 수행하였다.

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

횡하중에 의한 해석모델의 수직분포는 고유주기가 1초 이

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

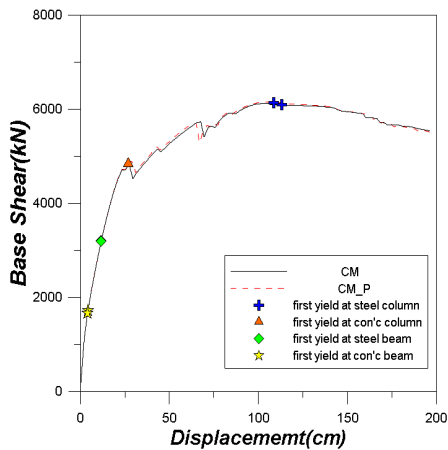
상, 1차주기의 질량참여율이 75%이하인 것을 감안하여 방향별 3개의 모드형상의 질량참여율이 총 질량참여율의 90% 이상이 되는 것을 고려하였다.

Fig. 14은 CM과 CM_P의 비선형 정적해석 결과를 나타낸 것으로 각 방향에 대한 부재의 항복상태를 밀면전단력-지붕층 변위 관계로 표시하였다. Fig. 14(a)에서 확인할 수 있듯이 X방향의 경우 벽량이 많아 대부분의 횡력을 전단벽체가 저항하므로 CM과 CM_P의 Push-over curve가 비슷한 형태를 보인다. 각 해석모델에 대한 부재의 항복단계 역시 비슷한 구간에서 항복하는 것을 확인할 수 있으며, 총 4단계로 정의할 수 있다. 2개의 해석모델 모두 6층 전단벽체에 위치한 인방보가 가장 먼저 항복을 하는데 이는 벽체의 횡변위에 의해 인방보의 전단지배 거동에 의한 항복으로 보인다. 이어서 코어에 인접한 철골 C형보가 항복하며, 저층보다는 중, 고층에서 항복이 발생하는데 이는 상대변위뿐만 아니라 $P-\Delta$ 효과에 의한 추가적인 하중이 발생한 결과로 나타난다.

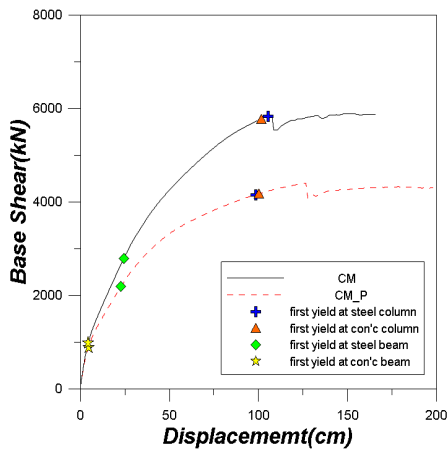
기둥의 경우 1층의 철근콘크리트 기둥이 항복하며, 이후에

합성 기둥이 항복한다. X방향의 Push-over Curve에서 확인할 수 있듯이 두 구간에서 내력이 순간적으로 저감을 하는데 대부분 철골 C형보 및 합성보의 항복에 의해 저감되는 것으로 나타났다. X방향의 경우 횡력에 대하여 대부분 전단벽이 저항하므로 합성부재의 패널존 유, 무에 따른 차이를 확인하기 어렵다. Fig. 14(b)는 Y방향에 대한 CM과 CM_P의 Push-over Curve를 나타낸 것으로 X방향의 해석 결과와 달리 두 해석 모델의 강성 및 부재의 항복단계 등이 차이가 있다. 이는 합성부재가 횡력에 저항하여 패널존의 강성이 전체 구조물 거동에 영향을 미치는 것으로 보인다. 부재별 항복단계는 X방향과 유사하게 보가 항복한 뒤 기둥이 항복하지만 작은 밀면전단력에서 항복하는 것에 차이가 있다. 구조물의 내진성능평가를 위해 FEMA 440에서 제시한 선형화 방법(Linearization Methods)을 통해 성능점을 산정하였다.

Fig. 15에 CM과 CM_P의 Push-over Curve를 가속도-변위 응답 관계(Acceleration-Displacement Response, ADRS)로 변환하여 두 모델의 설계지진(Design Based Earthquake, DBE)수

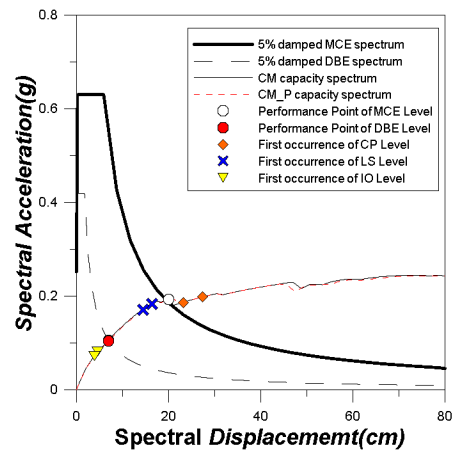


(a) X direction pushover curve

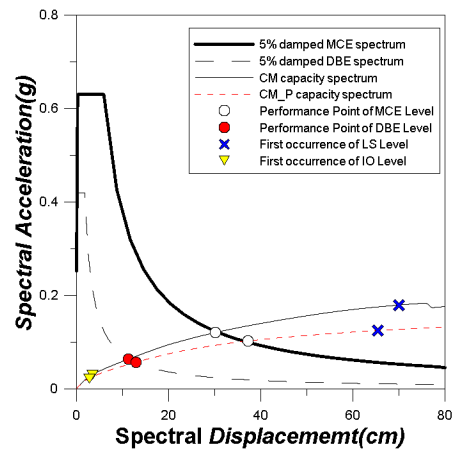


(b) Y direction pushover curve

Fig. 14 Pushover curve for models CM and CM_P



(a) Performance point of analysis models at X direction



(b) Performance point of analysis models at Y direction

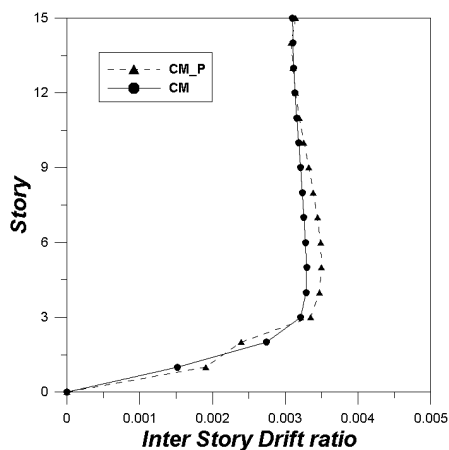
Fig. 15 Performance point of CM and CM_P

준과 최대예상지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)수준에 해당하는 성능점을 나타내었다. 성능점이란 요구곡선과 능력곡선의 교차점으로 해당 요구곡선에서의 구조물 보유내력과 변위로 정의할 수 있다.

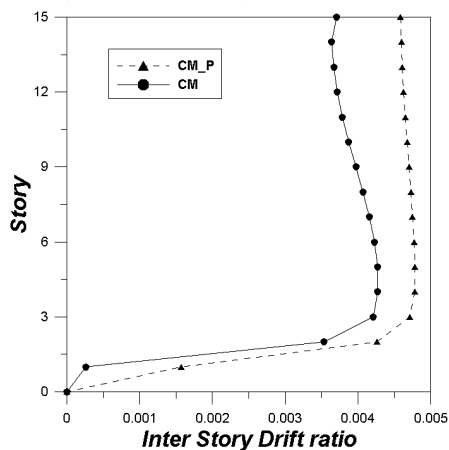
ASCE41-06에 따르면 성능점에 의한 내진성능 평가시 구조물의 중요도에 따라 만족해야 하는 성능수준이 달라진다. 본 연구에서 사용한 구조물은 중요도 1등급에 속하므로 DBE 단계의 요구곡선에서는 성능점이 IO와 LS단계 사이에 있을 경우 만족해야 하며 MCE 수준의 요구곡선에서는 LS와 CP단계 사이에 만족해야 한다. Fig. 15(a)는 X방향에 대한 CM과 CM_P의 성능점을 나타낸 것으로 DBE 수준과 MCE 수준의 요구곡선에 대하여 두 모델 모두 성능수준을 만족하는 것으로 보인다. X방향의 경우 앞서 언급했듯이 전단벽이 대부분의 횡력에 저항하므로 패널존 강성의 유, 무가 구조물 거동에 많은 영향을 미치지 않는다. Fig. 15(b)는 Y방향에 대한 CM과 CM_P의 성능점을 나타낸 것으로 X방향과 달리 두 모델의 능력곡선이 차이가 있으며, CM_P의 성능점이 CM보다 작은 가속도

에서 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한 패널존 강성의 유, 무가 부재에 영향을 미치므로 부재별 성능수준이 차이가 난다.

결과적으로 두 모델 모두 각각의 요구곡선에 대한 성능수준은 만족하지만 패널존 강성에 영향을 받아 성능점의 위치가 다른 것을 확인할 수 있다. Fig. 16은 DBE 수준의 요구곡선에 해당하는 성능점에서의 CM과 CM_P의 방향별 층간변위비를 나타낸 것이다. KBC2016에 따르면 중요도 1등급에 경우 층간변위비가 1.5%를 초과할 수 없다. 두 해석모델의 X, Y 방향 모두 층간변위비를 만족하는 것으로 보이며, X방향 층간변위비는 X방향 Push-over Curve의 결과와 마찬가지로 미세한 차이가 난다(Fig. 16(a)). Y방향 층간변위비는 X방향과 달리 확연하게 차이가 난다(Fig. 16(b)). 이는 앞서 언급한 것과 같이 패널존 강성 유, 무에 따른 차이로 보인다. Fig. 17과 Fig. 18은 Fig. 16에 나타낸 층간변위비 중 가장 변위비가 큰 3층에서 15층에 해당하는 CM과 CM_P의 소성힌지 분포를 나

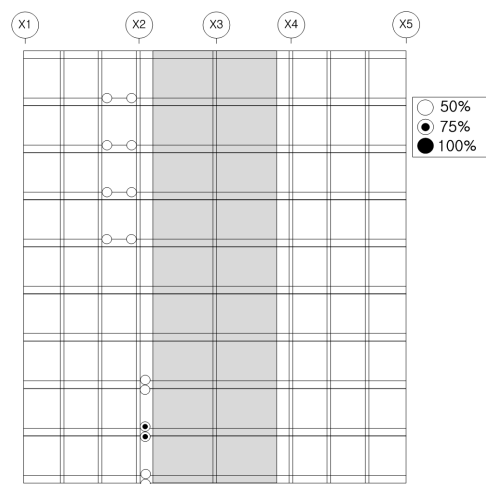


(a) Inter story drift ratio of analytical models at X direction

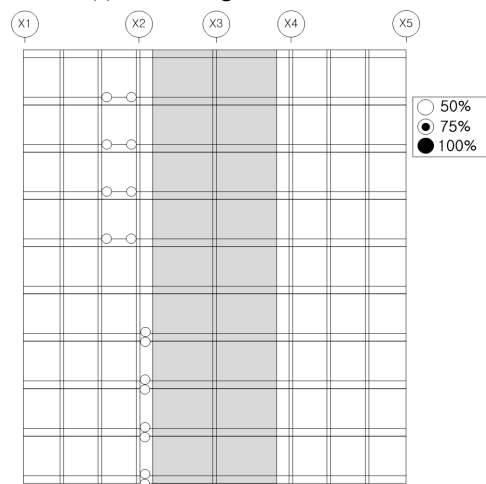


(b) Inter story drift ratio of Analytical models at Y direction

Fig. 16 Inter story drift ratio of CM and CM_P

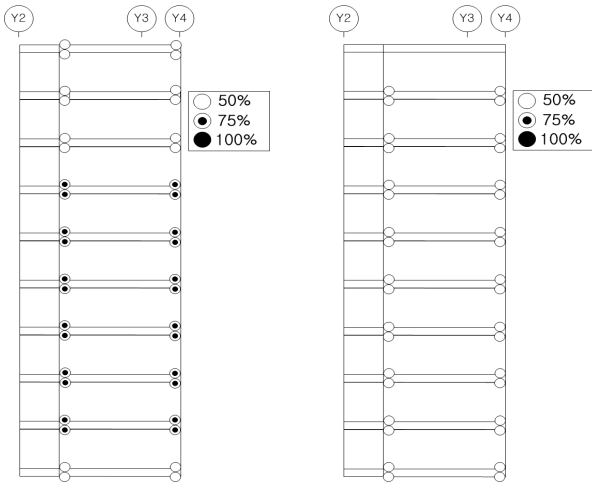


(a) Plastic hinge formation in CM



(b) Plastic hinge formation in CM_P

Fig. 17 Comparison with plastic hinge formation at Y2 line



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

Fig. 18 Comparison with Plastic hinge formation at X2 line

타낸 것이다. 소성힌지의 비율은 50퍼센트에서 100퍼센트로 표시하였다. Fig. 17은 X방향 층간변위비에 대하여 Y2열에 해당하는 두 모델의 소성힌지 분포를 나타낸 것으로 X2열의 4층과 6층 부분을 제외하고는 동일한 분포를 갖는다. Fig. 18은 Y방향 층간변위비에 대하여 X2와 X3열 사이에 해당하는 열에 해당하는 두 모델의 소성힌지 분포를 나타낸 것이다. Y방향에 대한 소성힌지 분포는 전 구간 동일하지만 소성힌지 비율은 차이가 나타났다. CM_P의 경우 패널존이 항복하면서 일정량의 에너지 소산으로 인하여 부재의 소성힌지 분포에 영향을 준 것으로 보인다.

6. 결론

2003년 이후 국내에 도입된 모듈러 시스템은 교육시설, 상업시설 등 주로 동일한 평면을 갖는 건축물에 적용되었다. 공장에서 제작하여 대량생산 및 공기단축 등의 효과가 있지만, 기존의 개방형 모듈러의 경우 부재가 폐쇄형 단면으로 모듈 간 접합 시 일체성을 확보하기 어려워 중, 고층 구조물에 적용하는데 제한이 있다. 이를 개선하기 위해 해외 및 국내에서는 모듈 간 접합 방법을 제안하고 접합 성능을 파악하고 있다. 국내 사례 중 Choi et al.(2017)는 기존의 폐쇄형 단면을 갖는 개방형 모듈러의 단점을 보완하기 위해 절곡형 단면에 콘크리트를 충전시킨 합성 부재를 제안하여 내진성능평가를 하였다. 하지만 모듈 간의 접합을 강점으로 가정하여 접합부 거동에 의해 구조물에 미치는 영향을 파악하지 못하였다. 본 연구에서는 Choi et al.(2017)에서 제안한 개방형 모듈러의 접합 성능을 파악하기 위해 유한요소해석을 통해 접합부의 강성을

도출하였다. 성능을 검증하기 위해 15층 예제 구조물에 접합부 강성을 적용하지 않은 모델(Composite Model, CM)과 접합부 강성을 적용한 모델(Composite Model applied Panel zone, CM_P) 총 두 개의 해석모델에 비선형 정적해석을 수행한 후, FEMA 440의 선형화 방법(Linearization Methods)을 통해 각 해석 모델의 성능점을 산정하였다. 최종 성능점으로 내진성능평가를 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

- 1) CM과 CM_P의 X방향에 대한 Push-over Curve는 전단벽이 대부분의 횡력에 저항하여 내력이 저감되는 구간을 제외하고는 동일한 거동을 보였다. 반면 Y방향에 대한 Push-over Curve는 접합부 강성의 영향을 받아 기울기 및 부재별 항복단계 등이 다르게 나타났다.
- 2) 두 해석 모델에 대한 방향별 성능점은 ASCE 41-06에 제시하는 성능수준을 만족하였으며, 비선형정적해석결과와 마찬가지로 X방향의 경우 거의 동일한 성능점 위치를 가졌지만 Y방향의 경우 DBE 수준과 MCE 수준의 요구 스펙트럼에서의 성능점 위치가 다르며 CM가 CM_P보다 더 큰 밀면전단력을 갖는 것을 확인할 수 있다.
- 3) 각 모델의 소성힌지 분포는 DBE 수준의 요구스펙트럼에 위치한 성능점에서 확인하였으며, X방향의 경우 동일한 분포가 나타났지만 Y방향의 경우 CM_P의 소성힌지 비율이 CM보다 작은 것으로 나타났는데, 이는 부재가 항복하기 전에 접합부에 항복이 발생하여 주요부재 거동에 영향을 미치는 것으로 보인다.
- 4) CM과 CM_P 모두 ASCE 41-06에서 제시하고 있는 내진 성능은 만족하였지만 현재 사용중인 합성단면 부재력은 치환단면을 사용하여 산정하였기 때문에 정확한 부재력을 반영하기 위해서는 재료의 합성효과 등을 고려한 실험을 통해 얻은 값이 필요하다. 또한 모듈 간의 접합을 기존의 Plate 및 볼트를 이용한 접합방식을 적용하였는데 제안된 모듈러에 적합한 접합방식을 도출하여 정확한 강성을 반영하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 주거환경연구사업(과제번호: 17RERP-B082884-04)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Park, Y. Y., Cho, B. H., Kim, K. H., Lee, C. K., and Park, T.K. (2005), A Study on Evaluation of Optimal Construction Method of BTL

- Projects-Focused on Educational Facilities-, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 10(3), 22-31.
- 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.
- 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.
- 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.
- Choi, Y. H., Lee, H. C., and Kim, J. K. (2017), Seismic Performance Assessment of a Modular System with Composite Section, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(2), 69-77.
- KBC-2016 (2016), Korean Building Code and Commentary, Architectural Institute of Korea.
- 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.
- Choi, K. S., and Kim, H. J. (2015), An Analytical Study on Rotational Capacity of Beam-Column Joint in Unit Modular Frames, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 9(2), 100-103.
- Lee, S. J., Kwak, E. S., Park, J. S., Kang, C. H., and Shon, S. D (2017), Structural Performance of the Modular System with Fully Restrained Moment Connections using Ceiling Bracket, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 33(12), 37-44.
- Charney, F. A., and Downs, W. M. (2004), Modeling Procedures for Panel Zone Deformation in Moment Resisting Frames, *Proceedings of the 15 International Workshop on Connections in Steel Structures*, Amsterdam, 121-130.
- FEMA-355D (2000), State of the Art Report on Connection Performance, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- AASHTO. (2012), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed., Washington, D.C. 713-718.
- Computer and Structures, Inc. (2006), PERFORM Components and Elements for PERFORM 3D and PERFORM-Collapse ver.5, CSI, Berkeley, CA.
- ASCE (2007), Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-06, American Society of Civil Engineers, Virginia
- Skalomenos, K. A., Hatzigeorgiou, G. D., and Beskos, D. E. (2014), Modeling Level Selection for Seismic Analysis of Concrete-filled Steel Tube/moment-resisting Frames by Using Fragility Curve, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(2), 199-220.
- FEMA-440 (2005), Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Received : 11/14/2017

Revised : 02/21/2018

Accepted : 02/28/2018

요 지 : 모듈러 시스템은 하중저항 방식에 따라 개방형 모듈러 및 폐쇄형 모듈러 분류가 된다. 그 중 개방형 모듈러는 폐쇄형 단면을 갖고 있어 부재간의 접합 및 모듈간의 접합을 하는데 제약이 있다. 이에 Choi et al.(2017)은 절골형 단면 안에 콘크리트를 채운 합성 모듈러 시스템을 제안하였다. 하지만 모듈간 접합을 강점으로 가정하여 접합부 거동에 의해 구조물 전체에 미치는 영향을 파악하지 못하였다. 본 연구에서는 유한요소해석을 하여 제안된 모듈러의 접합부 강성을 산정하였다. 성능 검증을 위해 FEMA 440의 선형화방법을 사용하여 접합부 강성 유, 무에 따른 구조물의 내진성능을 파악하였다. 해석결과에 따르면 접합부 강성을 고려한 모델의 보유 내력 및 층간변위비가 접합부 강성을 고려하지 않은 모델에 비해 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 이를 토대로 접합부의 강성이 전체 구조물 거동에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 합성 모듈러 시스템, 접합부, 유한요소해석, 선형화방법
