



유닛 모듈러 기둥 매입형 기초 접합부에 대한 실험 연구

이상섭¹ · 배규웅² · 박금성^{3*} · 홍성엽⁴

¹수석연구원, 한국건설기술연구원, ²선임연구위원, 한국건설기술연구원,
³연구위원, 한국건설기술연구원, ⁴전임연구원, 한국건설기술연구원

Test Result on Embedded Steel Column-to-Foundation Connection for Modular Unit Structural System

Lee, Sang Sup¹, Bae, Kyu Woong², Park, Keum Sung^{3*}, Hong, Sung Yub⁴

¹Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, 411-712, Korea

²Senior Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, 411-712, Korea

³Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, 411-712, Korea

⁴Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, 411-712, Korea

Abstract - A steel modular unit structural system has been used increasingly for mid and high-rise buildings, since the building can be easily constructed by assembling the pre-made modular unit structures. For this structural system, each modular unit structures have to be properly connected to the foundation to transfer the axial force and the bending moment that are generated from external load to the ground. In this study, a new type of the embedded steel column-to-foundation connection was proposed, and its flexural behavior was evaluated through a series of experimental study. Five full scale specimens for the proposed connections were constructed and tested. The effect of the main parameters that affect the flexural behavior of the proposed connection, such as embedment length and shape of end plate, were studied. From the results, it was found that the flexural stiffness of the proposed connection was higher than that of the semi-rigid connection for all test specimens, and 200 mm of embedment length was proper for the given test specimens in this study.

Keywords - Unit modular, Foundation, Embedded column, Connection, Flexural performance

1. 서론

유닛 모듈러를 이용한 건축물은 미리 제조된 유닛 모듈러 구조를 적층하여 전체 구조물을 구성할 수 있다. 이러한 유닛 모듈러 구조는 현재 북 유럽을 중심으로 학교, 기숙사, 호텔 등과 같이 반복되는 유닛이 필요로 하는 Mid-rise 건축물에 그 적용이 증가하고 있는 추세이다^[1]. 또한 이러한 유닛 모듈러 구조를 이용한 고층 건물에 대한 연구 또한 증가하고

있다^{[2],[3]}.

유닛 모듈러 구조는 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 첫 번째 구조는 내력벽 방식이며, 이러한 구조는 외부 하중을 벽체 구조로서 저항한다. 두 번째 구조는 라멘골조라고 불리며 외부 하중을 보와 기둥을 통하여 저항하는 구조로 되어 있다. 본 연구에서는 이러한 라멘식 모듈러 골조에 국한하여 연구를 제한한다.

이러한 라멘골조의 경우 중력하중과 횡력에 충분히 저항할 수 있어야 한다. 이러한 횡력에 대하여 유닛 내에 브레이스나 전단벽을 설치하는 보강방법에 대한 연구가 진행되었으며^{[4],[5]}, Ha *et al.* (2013) 등은 내력벽식 스티드패널을 이용한 모듈러 유닛의 내진성능 평가 연구를 수행한바 있다^[6]. Lee *et al.* (2013)은 유닛 내의 최적의 상세 개선을 위한 기둥-보 조인트에 대한 실험적 연구를 수행하였다^[7]. 그러나 대

Note.-Discussion open until June 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 13, 2014; revised June 17, 2014; approved on August 30, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-910-0370 Fax. +82-31-910-0392

E-mail. kspark1@kict.re.kr

부분의 연구는 유닛을 구성하는 골조나 접합부에 국한하여 연구가 진행되었으며, 기초와 모듈러 유닛 접합부에 대한 연구는 매우 미진한 상태이다.

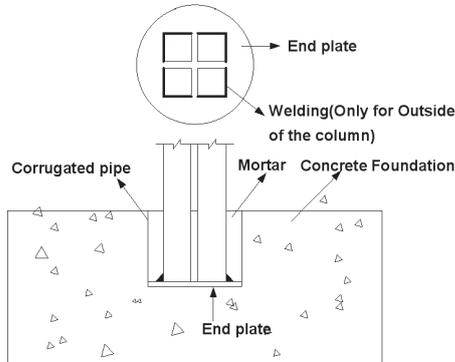


Fig. 1. Proposed connection shape

유닛 모듈러 구조와 기초부와의 연결부는 유닛 모듈러 구조 기둥의 소성휨모멘트 강도를 발휘할 수 있도록 하여야 하며, 연성성능 또한 확보되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 기존의 CFT에서 적용되는 매입형 연결부^{[8],[9],[10]}에 착안하여 Fig. 1과 같은 기초 연결부 상세를 제안하였다. 제안된 상세는 각각의 유닛 모듈러의 기둥을 하부에 원형 모양의 엔드플레이트에 용접을 하고 이를 기초에 매입한 후 그라우팅을 하여 완성을 한다. 여기서 각각의 기둥들은 서로 연결이 되어 있지 않고 간극이 있으므로 하부 엔드플레이트와 기둥의 용접은 Fig. 1과 같이 외부둘레에만 가능하다.

따라서 이러한 접합부에서는 응력 집중 및 복잡한 응력 흐름을 보일 것으로 예상되므로 본 연구에서는 이에 대한 해석적 연구를 선행하여 수행하였다. 해석결과를 반영하여 실험체를 계획하였으며, 주요변수에 따른 접합부의 거동 및 파괴모드, 변형성상 등을 평가하여 유닛과 기초 접합부에서 최소한의 고정도 확보 가능성을 실험적으로 확인하고자 하였다.

2. 기초-유닛 간 접합부의 비선형 해석

2.1 해석 개요

철골조 유닛 모듈러의 기둥과 매입형 기초 접합부에 적용되는 접합용 엔드플레이트를 갖고 미리 설치되는 주름형 강관 내에 기둥이 매입되고 무수축 모르타르를 충전하는 접합부 구조에 대한 비선형 유한요소해석으로서, 풍하중 및 지진

하중과 같은 횡력 등에 대한 기초-유닛 간 접합부의 구조적 거동을 미리 파악하기 위한 해석을 수행하였다.

기초-유닛 간의 접합부에 대한 비선형 해석은 주요한 변수 중에 하나인 기둥 매입길이에 따른 거동을 파악하여 실험체 계획시 이를 반영하기 위한 목적으로 수행하였다.

2.2 유한요소해석 모델링

2.2.1 해석 모델링 방법

본 연구에서는 범용 구조해석 프로그램 ABAQUS (2010)을 이용하여 해석을 수행하였으며^[11], Fig. 2은 해석에 사용된 모델, 하중 및 경계 조건을 나타낸다. 실제 조건을 모사하기 위하여 해석 모델의 밑면을 1, 2, 3방향으로 구속하였으며, 기초판의 고정용 앵커바를 모사하기 위하여 기초부 상단을 Fig. 2와 같이 부분적으로 구속하였다. 또한, 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위하여 전체 모델의 반만 모델링에 반영하여 해석을 수행하였다.

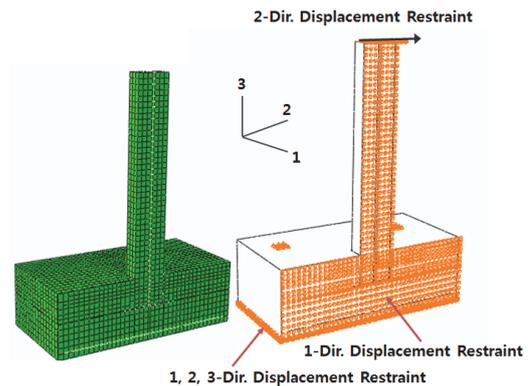


Fig. 2. Analytical model and loading conditions & constraints

Fig. 3은 유한요소해석에 사용된 요소 및 Base plate 접합부의 상세를 나타내고 있다. 각형강관에는 4절점 쉘 요소(S4R)를 적용하였고, 기초부에는 8절점 솔리드 요소(C3D8R)를 적용하였다. 강관과 기초부 콘크리트 접촉면이 전단 연결재 없이 마찰로만 전단력에 저항하는 것을 모사하기 위해 ABAQUS (2010)에서 제공하는 갭요소(Gap element)를 사용하였다. 갭 요소는 노드(Node)의 연결부에서 압축력은 전달하나 인장에는 저항할 수 없는 특징을 갖고 있다. 이와 더불어 갭 요소에 작용하는 압축력은 입력된 마찰계수와 같이 작용하여 압축력의 수직 방향으로 전단력을 발생시킨다^[12].

Baltay & Gjelsvik (1990)에 따르면 강재와 콘크리트 사

이의 마찰계수는 약 0.3에서 0.6 사이의 값을 가지게 되며, 평균값으로 0.47을 제안하고 있어 본 연구에는 강재와 콘크리트 사이의 마찰계수는 0.47, 강재와 강재 사이의 마찰계수는 0.6을 사용하였다.

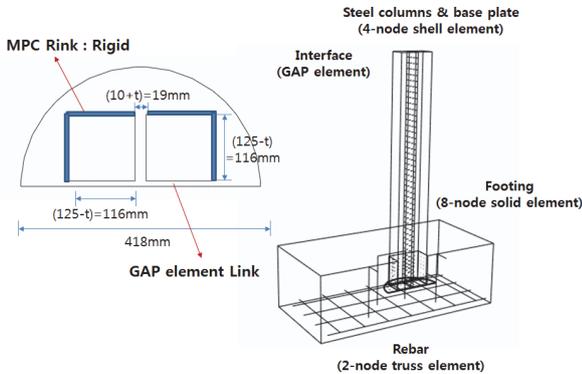
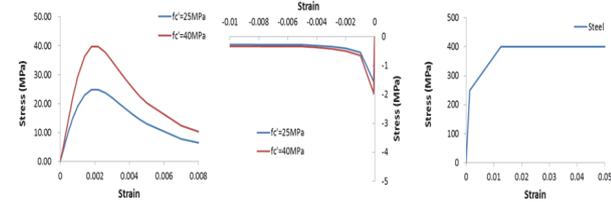


Fig. 3. Element analysis model

2.2.2 재료 모델링 및 특성

해석에서 사용한 재료의 일축 응력-변형률 곡선은 Fig. 4(a)와 같이 콘크리트의 일축 압축 응력-변형률 곡선은 Saenz (1964)의 제안식을 적용하였으며, 콘크리트의 압축 강도 f_{ck} 의 50%까지는 탄성으로 가정하였다. 여기서 콘크리트의 탄성계수(E_c)는 $4,700 \sqrt{f_{ck}}$ (MPa) 이며, 콘크리트의 푸아송 비(ν_c)는 0.2이다. 콘크리트의 인장 강도 f_{ct} 는 f_{ck} 의 9%로 가정하였으며, 콘크리트 인장 강도 발현 이후에는 Fig. 4(b)와 같이 콘크리트의 인장응력이 감소한다고 가정하였다^{[13],[14]}.



(a) Concrete(compression) (b) Concrete(tension) (c) Steel

Fig. 4. Material model

콘크리트의 비탄성 거동을 모사하기 위하여 본 해석에서는 ABAQUS (2010)에서 제공하는 Concrete damaged plasticity 모델을 적용하였고, 이 모델은 Lubliner (1989)와 Lee & Fenves (1998)에 의하여 제안된 모델로서 다축 응

력 상태에 놓인 콘크리트의 비탄성 거동을 모사하는데 적합한 것으로 알려져 있다^[15]. Concrete damaged plasticity 모델은 비상관 소성흐름법칙(Non-associated flow rule)을 적용하고 있어, 항복면(Yield surface)과 유동 포텐셜(Flow potential)이 같지 않으며 유동 포텐셜은 팽창각(Dilation angle)의 함수이다. 콘크리트의 팽창각(ψ)은 약 12°에서 31°의 값을 가지는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 31°를 해석에 사용하였다.

강재의 일축 응력-변형률 곡선의 경우, 항복응력(f_y)까지는 선형으로 가정하였으며, 여기서 강재의 탄성계수(E_s) 및 푸아송 비(ν_s)는 각각 200,000MPa 및 0.3이다. 탄성 거동 이후는 Fig. 4(c)와 같이 변형률이 $10\epsilon_y$ 일 때 강재의 일축 인장강도에 도달하도록 하였다.

2.3 해석 결과

Fig. 5은 해석 결과를 나타낸 것으로 Base plate에서 나타난 휨모멘트(하중점에서 작용하는 하중×매입기둥 길이)와 드리프트의 관계를 나타낸다. 여기서 드리프트는 하중 작용점의 횡변위를 기둥 길이(1,500mm)로 나누어 백분율로 계산할 수 있다. 이 Fig. 5에서 알 수 있듯이 해석 결과가 4개의 각형 강관의 소성 휨모멘트를 상회하는 것을 볼 수 있다. 또한, 매입길이가 작은 MRC175-c보다 MRC225-c가 비탄성 구간에서의 강성과 강도가 조금 더 큰 것을 볼 수 있으며, 이는 매입 길이가 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

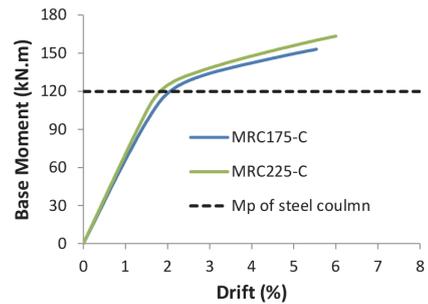


Fig. 5. Analysis result (moment-drift relationship)

Fig. 6과 Fig. 7은 약 5% 드리프트에서 콘크리트 기초부에서 발생하는 균열 및 주 압축응력의 분포를 보여주고 있다. MRC175-C과 MRC225-C 두 가지 경우 모두 Base plate와 기초부의 연결부에서 균열이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한, 매입길이가 작은 MRC175-C 실험체에서 균열

이 보다 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 주 압축력의 경우, MRC175-C와 MRC225-C 두 가지 경우 기초부의 압축부에서는 큰 지압 응력이 그리고 인장부에서는 약 45도의 기울기를 가지고 주 압축력이 발생하는 것을 볼 수 있다. MRC175-C 실험체는 뚜렷하게 45도의 기울기를 가지고 기초부 표면까지 주 압축력이 발생하는 것에 비하여 MRC225-C인 경우는 인장부의 주 압축력이 보다 작은 값을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

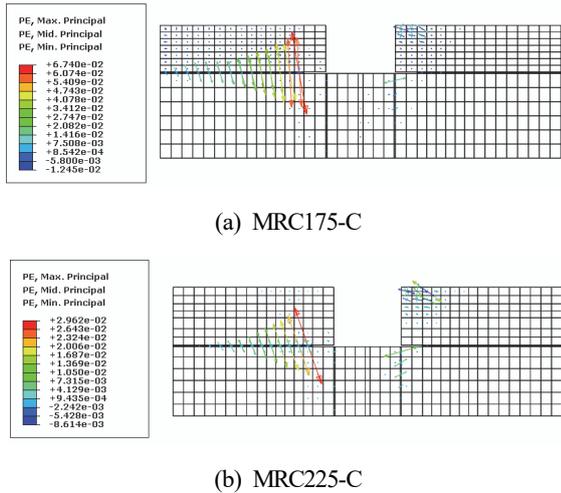


Fig. 6. Crack shape (5% drift)

Fig. 8은 각형강관 기둥에서 발생하는 Von-mises 응력을 보여주고 있다. MRC225-C의 경우, 보다 넓은 범위에서 항복응력이 분포하는 것을 볼 수 있으며, 이를 통하여 비탄성 회전 능력이 보다 높을 것으로 예측할 수 있다.

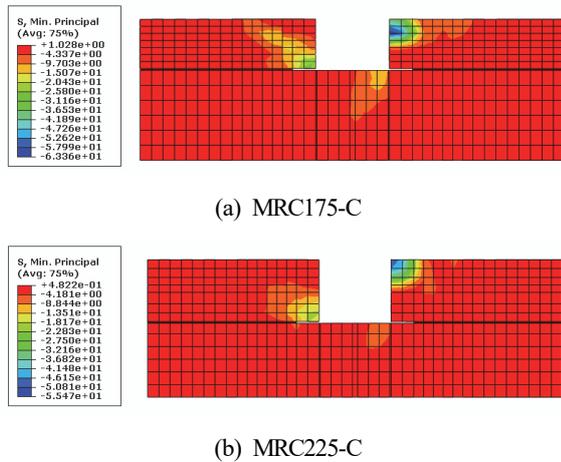


Fig. 7. Distribution of compressive stress (5% drift)

접합부에 대해 수행한 해석을 통하여 MRC175-C와 MRC225-C 두 가지 해석 모델 모두 모멘트 강도가 4개의 각형강관의 소성모멘트를 상회하고 있음을 알 수 있었다. MRC175-C의 경우 균열이 MRC225-C보다 컸으며, 인장부에서 작용하는 압축응력은 기초부의 상단까지 분포하는 것으로 나타났다.

각형강관의 소성모멘트보다 상회하고, 인장응력과 압축응력의 분포상황 및 균열거동을 고려하면 매입길이를 감소시켜도 기초부의 고정도를 확보하는 데에 큰 무리는 없을 것으로 판단되며 이를 반영하여 실험체를 계획하고 제작하였다.

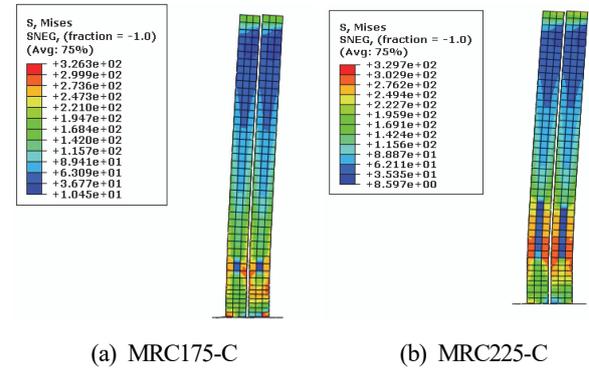


Fig. 8. Von-mises stress distribution Col. (5% drift)

3. 유닛-기초 접합부의 성능평가 실험

3.1 실험체 계획

본 연구에서는 새롭게 제시된 기초와 유닛 간의 접합부에 대한 비선형 해석결과를 반영하여 실험체를 제작하였으며, 실험을 통해 접합부의 거동을 고찰하고 강도 및 강성 평가를 위해 엔드플레이트 형상과 기둥의 매입길이 등의 주요 변수에 따른 내력증대와 변형성장 및 파괴모드 등에 대해 실험을 통해 고찰하고자한다.

Table 1은 본 연구에서 수행한 모듈러 유닛-기초 접합부에 대한 실험체의 일람을 보여준다. 총 5개의 실험체에 대하여 실험을 계획하였다. Table 1에서 b_1 은 기둥의 폭으로 모든 실험체에 대하여 동일하게 125mm이며, 기둥의 두께 t 는 6mm이다. 4개의 기둥을 Fig. 9와 같이 하부 엔드플레이트에 용접을 하였다.

하부 엔드플레이트는 Table 1에서 볼 수 있듯이 MFC125-c, MFC175-c, MFC225-c, 및 MFC175-cs 실험체에 대

Table 1. List of connection specimens

Specimen	b_1 (mm)	t (mm)	l_e (mm)	$\frac{l_e}{2b_1}$	End plate		Stud bolt
					t_p (mm)	Shape	
MFC125-c	125	6.0	125	0.50	6.0	Circle	×
MFC175-c	125	6.0	175	0.70	6.0	Circle	×
MFC225-c	125	6.0	225	0.90	6.0	Circle	×
MFC175-d	125	6.0	175	0.70	6.0	Diamond	×
MFC175-cs	125	6.0	175	0.70	6.0	Circle	○

하어는 원형형태이며, MFC175-d의 경우에는 다이아몬드 형태의 하부 엔드플레이트를 적용하였다. 모든 실험체에 대하여 하부 엔드플레이트의 두께 t_p 는 6mm이다. MFC175-cs의 경우는 기둥의 기초 매입부에 전단 스티드를 설치하여 전단 스티드가 접합부의 거동에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았다.

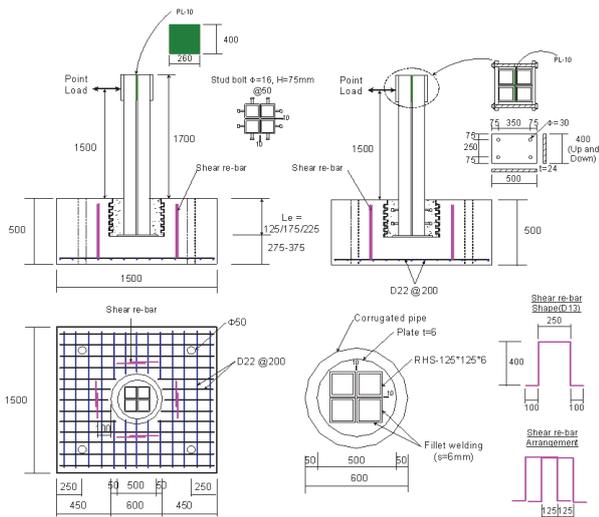


Fig. 9. Specimen shape

기초의 폭은 1,500mm이며, 기초의 깊이는 500mm이다. 하부 원형엔드플레이트의 폭은 500mm이다. 기초부에는 Fig. 9와 같이 휨 및 전단 철근을 배근하였다. 휨철근의 경우 D22 철근을 200mm 간격으로 배근 하였으며, 전단 철근에는 D13 철근을 사용하였다. 기초 콘크리트 압축강도는 27MPa, 접합부의 채움 모르타르 압축강도는 50MPa를 사용하였다.

일반적으로 기둥에는 압축력이 작용하게 된다. 하지만 강구조물에서는 압축력이 0일 때 부재의 휨모멘트 강도가 가장 크므로 실험체에서는 압축력을 도입을 하지 않고 횡력만

작용시켰다.

3.2 실험 및 가력 방법

Fig. 10에서 보는바와 같이 기둥 상부 측면에 설치된 액추에이터를 사용하여 횡방향으로 반복가력하는 방법을 이용하며, 하중 반복가력은 AISC“Seismic Provisions For Structural Steel Building(AISC, 2005)”의 접합부 내진 성능 평가를 위한 Cyclic Loading Program을 사용하여 변위제어로 가력하였다.

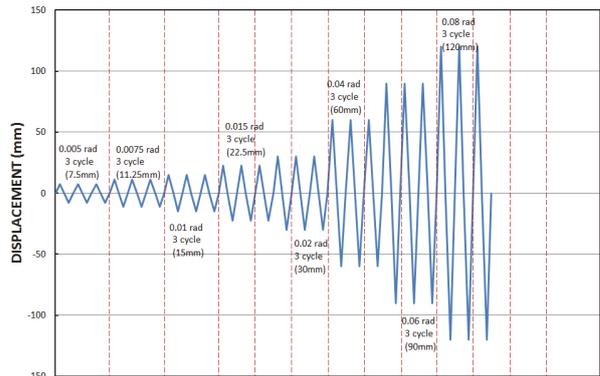


Fig. 10. Experiments and loading schedule

기둥 매입형 유닛-기초 접합부의 횡방향 반복가력 실험으로 인한 휨거동을 파악하고, 응력변화를 측정하기 위하여 주요한 실험변수에 따라 스트레인게이지를 부착하였다. 매입된 엔드플레이트의 인장 및 압축을 받는 소정의 강판 위치에 각각 2개의 변형률 게이지를 가력방향의 전후 면에 부착하였으며, 매입된 각형강관의 매입기둥 단부와 상단의 위치에 인장과 압축방향에 따라 각각 4개의 변형률 게이지를 부착하였다. 또한, 기둥의 인장 및 압축응력의 변화를 파악하기 위해 기둥 하단부와 중앙부에 각각 4개의 변형률 게이지를 부착하여 응력변화를 측정하였다.

3.2.1 강재 인장강도 시험

본 연구의 유닛-기초 접합부의 실험에 사용된 각형강관 및 경 π -형강으로 부터 KS B 0801규준에 따라 각형강관의 단면크기별로 강관 및 형강 평판부에서 길이방향으로 각각 3 개씩 인장 시험편(14B호)을 절취하여 KS B 0802의 금속재료 인장 시험편 시험방법에 의해 강재의 인장강도 시험을 실시하였다. 강재는 일반구조용 강재인 SPSR400 및 SS400급을 사용하였다.

인장강도 시험결과, 항복응력도 값은 258~374MPa의 분포를 나타내었고, 항복비는 0.64~0.81으로 각형강관인 경우 조금 높게 나타났다. 항복강도와 항복비가 높게 나타난 것은 각형강관의 경우 제작시 냉간롤성형 가공으로 인한 잔류응력의 영향으로 판단된다.

3.2.2 콘크리트 압축강도 시험

본 실험에 사용된 콘크리트의 설계기준 강도는 27MPa이며, KS F 2403에 따라 $\Phi 100 \times 200$ mm의 원통형 몰드에 콘크리트 강도에 따라 12개의 공시체를 콘크리트 타설과 동시에 제작하여 접합부 실험체와 동일한 조건으로 양생하였다. 콘크리트의 압축강도시험은 KS F 2405에 따라 만능시험기(Universal Testing Machine)를 사용하여 실시하였으며, 정확한 강도 산정을 위해 건축구조기준(KBC)에 의해 강도 보정계수 0.97를 적용하였다. 공시체의 평균 압축강도 값은 29.2MPa로 나타났다.

4. 실험결과 분석 및 고찰

4.1 실험체별 거동 분석

4.1.1 MFC125-c 실험체

원형 엔드플레이트를 갖고 매입길이가 125mm인 접합부 실험체로서 Fig. 11은 모멘트-드리프트비 관계를 나타내고, Fig. 12에는 실험사진을 수록하였다. 0.75% 드리프트비 변형에서 각형강관 코너부 대각선 방향으로 초기균열이 발생하였다. 이후 하중과 변형의 지속적 증가 및 매입부를 중심으로 기초판에 균열이 확대되는 현상이 관찰되었다. 4% 드리프트비 변형에서 매입 강관과 무수축 모르타르 사이가 이격되면서 주름관 주변으로 반원형의 풀아웃 콘파괴가 발생하였다. 변형률은 모두 탄성 상태였다.

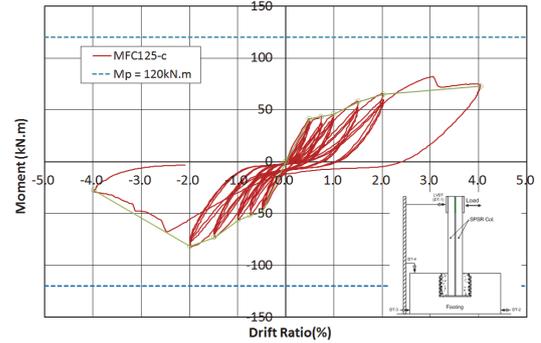


Fig. 11. Moment-drift ratio relationship (MFC125-c)

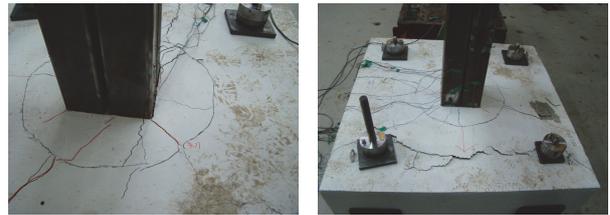


Fig. 12. Photos of experiment (MFC125-c)



Fig. 13. Cutting the photos (MFC125-c)

Fig. 13은 인장 측에서 풀아웃 콘파괴 현상이 나타나고, 매입길이가 가장 작은 실험체 대상으로 실험 후 매입형 접합부를 중심으로 절단하여 상태를 확인해 보았다. 확인결과, 기둥과 엔드플레이트 인장부 끝단에서 무수축 모르타르 채움부에 초기균열 발생 이후 균열이 확장됨을 알 수 있었으며, 싸일클이 반복될수록 균열이 주름관을 따라 진행되어 종국에는 주름관 매입 끝단에서 45도 방향으로 전단균열이 발생하고, 확대되면서 풀아웃 콘파괴 현상이 나타남을 확인할 수 있었다.

4.1.2 MFC175-c 실험체

원형 엔드플레이트를 갖는 매입길이가 175mm인 강관 매입형 기초 접합부 실험체로서 Fig. 14는 모멘트-드리프트비 관계를 나타내고, Fig. 15에는 실험사진을 정리하였다. 0.75% 드리프트 변형에서 각형강관 코너부위에서 대각선 방향으로

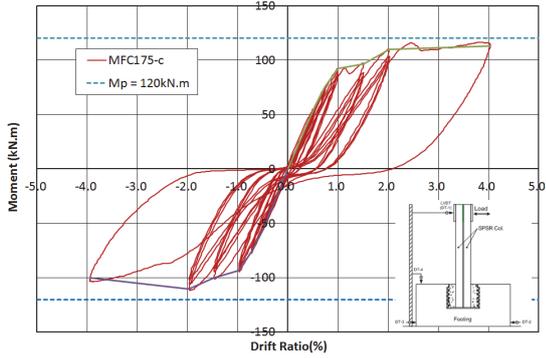


Fig. 14. Moment-drift ratio relationship (MFC175-c)

초기균열이 관찰되었다. 이후, 주름관 주변을 중심으로 균열이 집중적으로 발생하면서 지속적인 하중 증가와 더불어 균열 영역이 확대됨을 확인할 수 있었다. 4% 드리프트 변형에서 매입형 강관과 무수축 모르타르 사이가 이격되고, 균열 폭이 확대되면서 하중 증가 없이 변형만 증가되었다. 하지만, 기초판의 인장측 풀아웃 콘파괴 현상은 관찰되지 않았다. 또한, 부착하여 측정된 변형률은 모두 탄성 상태인 것으로 나타났다.



Fig. 15. Photos of experiment (MFC175-c)

4.1.3 MFC225-c 실험체

원형 엔드플레이트를 갖고 매입깊이가 225mm인 매입형 강관 접합부의 실험체로서 Fig. 16은 모멘트-드리프트비 관계를 나타내며, Fig. 17에는 실험사진을 정리하였다. 0.75% 드리프트 변형에서 매입부 각형강관 코너부 대각선 방향으로 초기균열이 발생하였다. 이후, 접합부의 변형 증가와 더불어 균열 영역이 기초판 전체로 확대됨을 알 수 있었다.

매입깊이가 225mm인 기둥 매입형 접합부에서 현저한 풀아웃 콘파괴 현상은 없었으나, 다른 실험체에 비해 주름관 주변 파괴현상이 비교적 크게 나타났다. 또한, 일부 인장부에서 변형률이 항복에 도달하여 소성화가 진행됨을 확인할 수 있었다. 이는 매입깊이가 커지면서 콘크리트 인장 풀아웃 콘파괴보다 주름관 내부에서의 파괴가 지배되는 거동의 요

인으로 판단된다.

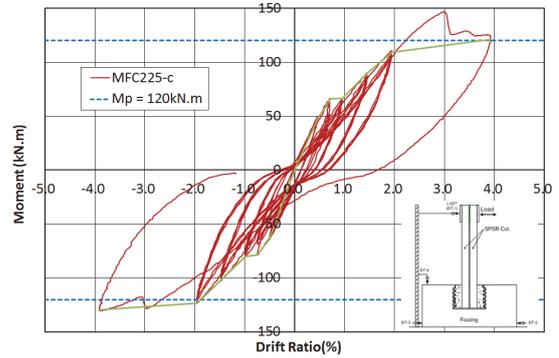


Fig. 16. Moment-drift ratio relationship (MFC225-c)



Fig. 17. Photos of experiment (MFC225-c)

4.1.4 MFC175-d 실험체

엔드플레이트가 마름모꼴 형태이며, 매입깊이가 175mm인 실험체로서 Fig. 18은 모멘트-드리프트비 관계를 나타내며, Fig. 19에는 실험사진을 나타내었다. 0.75% 드리프트 변형에서 기둥 매입부에서 초기균열이 발생하였다. 이후, 강관과 무수축 모르타르 사이에서 갭 발생으로 인하여 내력 저하 현상을 보였으며, 동일 루프 내에서 내력차가 상당히 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

엔드플레이트가 마름모형인 실험체는 강관과 모르타르

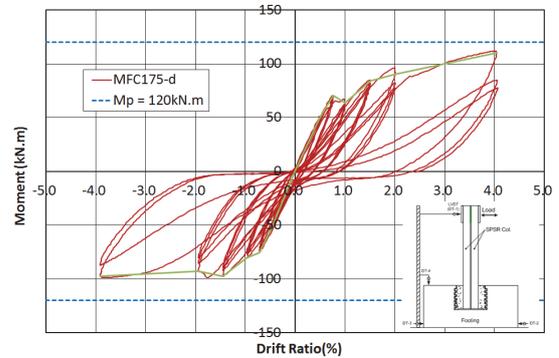


Fig. 18. Moment-drift ratio relationship (MFC175-d)

사이 이격이 발생한 이후 완전 복원이 안 된 것으로 파악되며, 풀아웃 콘파괴 발생하였으나 변형률은 모두 탄성 상태로 파악되었다. 매입깊이가 동일하면서 원형 엔드플레이트를 갖는 MFC175-c 실험체에 비해 엔드플레이트의 인장저항면적이 증가되기 때문에 콘크리트 풀아웃 콘파괴가 거동을 지배한 것으로 생각된다.

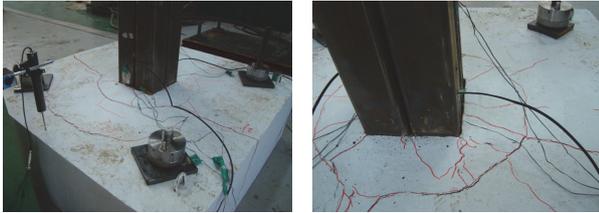


Fig. 19. Photos of experiment (MFC175-d)

4.1.5 MFC175-cs 실험체

매입깊이가 175mm이고, 매입 기둥 측면에 스티드 볼트로 보강한 실험체로서 Fig. 20은 모멘트-드리프트비 관계를 나타내며, Fig. 21에는 실험사진을 정리하였다. 0.50% 드리프트 변형에서 초기균열 발생하였고, 이후 매입 강관과 무수축 모르타르 사이에서 이격현상은 비교적 적게 나타났으나 내력저하 현상을 보였다. 매입 강관 측면에 스티드 볼트의 영향으로 이격 및 분리 현상은 작은 것으로 판단된다. 사이클이 반복될수록 주름관과 콘크리트 사이의 이격이 커지면서 내력 및 강성저하 현상이 현저하게 나타났다. 4.0% 드리프트 변형에서 기초판의 인장부 풀아웃 콘파괴가 발생하였다.

변형률은 모두 탄성 상태로 나타났으며, 스티드 볼트 영향으로 매입된 강관과 모르타르 사이의 이격현상은 비교적 작게 나타났으며 스티드 볼트와 모르타르 사이의 구속으로

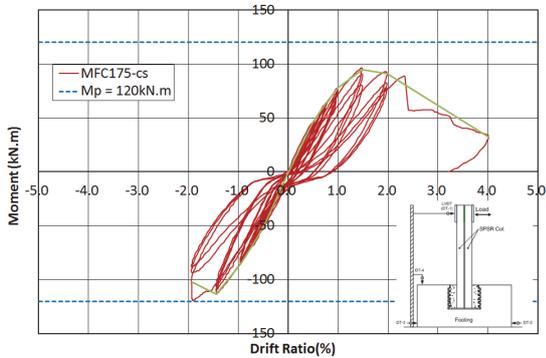


Fig. 20. Moment-drift ratio relationship (MFC175-cs)



Fig. 21. Photos of experiment (MFC175-cs)

기초판의 콘크리트 인장부에서 풀아웃 콘파괴가 현저히 나타난 것으로 판단된다.

4.2 매입깊이의 영향

각형강관 1개의 단면의 소성휨모멘트(M_p)는 약 30kN·m이며, 그러므로 기둥 4개의 소성휨모멘트(M_p)는 120kN·m이다. 실험결과, 실험체의 휨강도는 매입깊이가 깊어질수록 증가하는 것으로 나타났다. Table 2와 같이 단면의 소성휨모멘트에 대한 실험 휨강도의 비($M_{u, test}/M_p$)는 MFC125-c의 경우 0.68, MFC175-c는 0.97, MFC225-c는 1.23으로 나타났다. 단지, MFC225-c 실험체만 단면의 소성휨모멘트보다 높게 나타남을 알 수 있다. 또한, 모든 실험체는 4% 드리프트비에서 휨강도가 저하하는 현상을 보였다.

매입깊이가 가장 작은 MFC125-c 실험체는 풀아웃 콘파괴가 지배하였으며, 매입깊이가 비교적 깊은 MFC175-c와 MFC225-c 실험체는 주름관 내부에서 파괴가 지배되는 것으로 나타났다. 결론적으로 매입깊이에 관계없이 엔드플레이트의 인장 저항력이 동일하다고 한다면, 매입깊이가 작을수록 기초판 콘크리트 전단강도 저하로 풀아웃 콘파괴가 지배하고, 매입깊이가 깊을수록 풀아웃 콘파괴 전에 매입 강관과 채움 모르타르 사이 갭 발생 및 주름관 내에서 거동이 지배하는 것으로 생각된다.

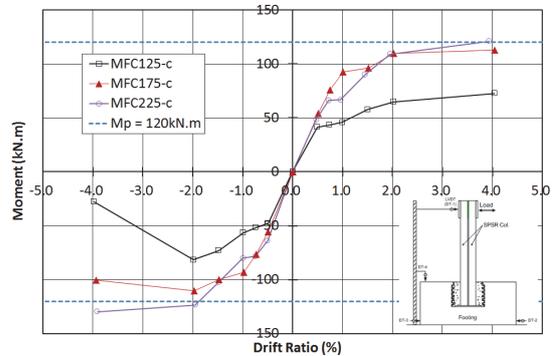


Fig. 22. Comparison of simple curves embedded length

Table 2. Test of result

Specimen	Failure mode	Strength ratio ($M_{u, test} / M_p$)	Remark
MFC125-c	Cone failure	0.68	Circle
MFC175-c	Column bending plastic	0.97	Circle
MFC225-c	Column bending plastic	1.23	Circle
MFC175-d	Cone failure	0.93	Diamond
MFC175-cs	Cone failure	0.80	Stud bolt

4.3 엔드플레이트의 형상 및 스티드 볼트의 영향

Table 2와 같이 단면의 소성휨모멘트에 대한 실험 휨강도의 비($M_{u, test} / M_p$)는 MFC175-cs의 경우 0.80, MFC175-d는 0.93으로 이론 소성휨모멘트에 비해 다소 저하하는 것으로 나타났다.

MFC175-c 실험체는 4% 드리프트 변형에서 휨강도가 다소 저하하는 현상을 보이고 있으나 MFC175-cs 실험체는 2.5% 드리프트 변형이후 휨강도가 급격히 저하하는 것으로 나타났다. 이는 강관 매입형 기초 접합부에서 스티드 볼트의 영향으로 매입된 강관과 모르타르 사이의 이격현상은 적었으나, 스티드 볼트와 모르타르 사이에서의 구속효과로 기초 판에서 풀아웃 콘파괴가 지배하는 거동의 요인으로 판단된다.

엔드플레이트 형상의 영향을 조사한 결과, 두 실험체의 실험 최대 휨강도의 차이는 무시할 만큼 작은 것으로 나타났다.

그러나 비탄성 영역에서 두 실험체는 다소 다른 평형상태를 보여주고 있는 것으로 평가되었다. MFC175-c 실험체는 기초판 콘크리트의 인장 파괴보다 채움부의 접합부에서 주름관 내에서 파괴거동이 선행하였으며, MFC175-d 실험체는 원형엔드플레이트에 비해 엔드플레이트의 인장저항 면적이 크기 때문에 주름관 주변의 기초 콘크리트에서 인장으로 인한 풀아웃 콘파괴가 지배하는 것으로 나타났다.

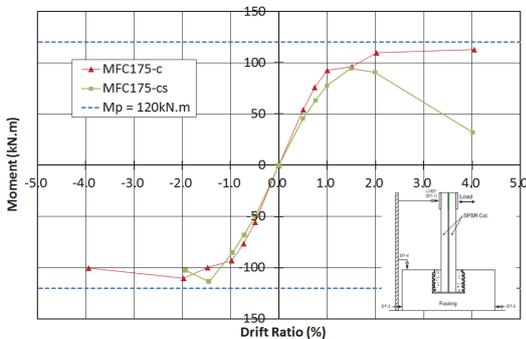


Fig. 23. Compared to the simple curve (stud bolt)

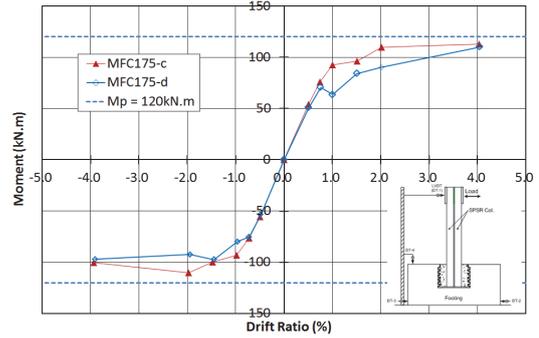


Fig. 24. Compared to the simple curve (end plate shape)

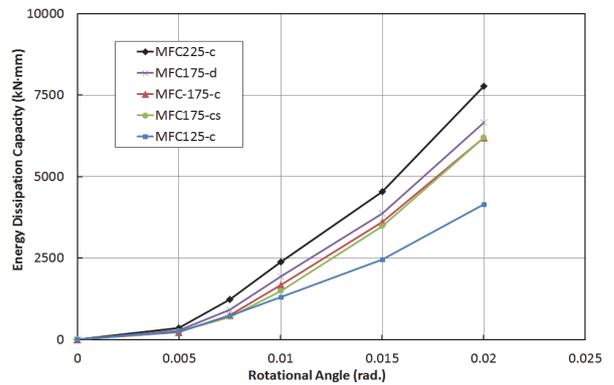


Fig. 25. Comparison of energy dissipation capacity

4.4 에너지 소산능력의 비교

모듈러 유닛 기둥 매입형 기초 접합부의 이력거동을 파악하기 위해 수행한 변형별로 누적된 에너지 소산능력을 비교하였다. 에너지 소산능력을 비교한 결과, MFC175-c 실험체보다 많은 에너지 소산능력을 발휘하는 실험체로는 MFC225-c와 MFC175-d 실험체로 나타났으며, MFC175-c 실험체보다 작게 평가된 실험체는 MFC125-c 실험체였으며, MFC175-c와 유사한 에너지 소산능력을 갖고 있는 실험체는 MFC175-cs인 것으로 조사되었다.

이는 앞에서 살펴본 바와 같이, 매입길이의 영향과 엔드플레이트의 인장저항 면적의 차이로 기초 접합부에서의 기초판 콘크리트 파괴거동 및 주름관 내부에서의 거동 차이에 의한 결과로 판단된다.

이상과 같이 실험결과를 분석하고 고찰한 결과, 대부분의 실험체는 2~4% 드리프트 변형까지 실험이 진행되어 최소한 강점과 반강점 사이의 강성은 확보됨에 따라 완전 고정도 확보 가능성을 확인할 수 있었다.

매입길이에 따라 내력 및 강성 증가는 나타나나, 매입길이가 175mm 이상인 실험체에서 비교적 안정적인 거동을 보임에 따라 매입길이는 175~225mm(약 200mm, $l_c/2b_1 = 0.80$) 정도의 범위가 적절할 것으로 판단된다.

5. 결론

중고층형 주거용 건축물에 적용을 목표로 유닛 모듈러 기둥과 기초 접합부의 구조 성능 평가를 위한 실험연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 매입길이가 가장 작은 MFC125-c 실험체는 풀아웃 콘파괴가 지배하였으며, 매입길이가 비교적 큰 MFC175-c와 MFC225-c 실험체는 주름관 내부에서 파괴가 지배하는 것으로 나타났다.
- (2) 매입길이에 관계없이 엔드플레이트의 인장 저항력이 동일하다면, 매입길이가 작은 경우 기초판의 콘크리트 전단강도 저하로 풀아웃 콘파괴 지배하고, 매입길이가 길어지면 풀아웃 콘파괴 전에 매입강관과 채움 모르타르 사이의 갭 발생 및 주름관 내부에서의 거동으로 지배됨을 알 수 있었다.
- (3) MFC175-d 실험체는 원형엔드플레이트에 비해 엔드플레이트의 인장저항 면적이 크기 때문에 주름관 주변의 기초판 콘크리트에서 인장으로 풀아웃 콘파괴가 지배하는 것으로 나타났다.
- (4) 에너지 소산능력을 비교한 결과, MFC175-c 실험체보다 많은 에너지 소산능력을 발휘하는 실험체로는 MFC225-c와 MFC175-d 실험체로 나타났으며, MFC175-c 실험체보다 작게 평가된 실험체는 MFC125-c 실험체였으며, MFC175-c와 유사한 에너지 소산능력을 갖고 있는 실험체는 MFC175-cs인 것으로 조사되었다.
- (5) 이상과 같이 실험결과를 분석하고 고찰한 결과, 대부분의 실험체는 2~4% 드리프트 변형까지 실험이 진행되어 최소한 강점과 반강점 사이의 강성은 확보됨에 따라 완전 고정도 확보 가능성을 확인할 수 있었다.
- (6) 매입길이에 따라 내력 및 강성 증가는 나타나나, 매입길이가 175mm 이상인 실험체에서 비교적 안정적인 거동을 보임에 따라 매입길이는 175~225mm(약 200mm, $l_c/2b_1 = 0.80$) 정도의 범위가 적절할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(탈현장 초고속 주택 구조안전성 기술 개발)과 국토교통부 주거환경연구사업(과제번호 13AUDP-C068788-01)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Annan, C.D., Youssef, M.A., and El Naggar, M.H. (2009) Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Modular Steel-Braced Frames, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.31, No.7, pp.1435-1446.
- [2] Lawson, R.M., Ogden, R.G., and Bergin, R. (2012) *Application of Modular Construction in High-Rise Buildings*, *Journal of Architectural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.18, No.2, pp.148-154.
- [3] Lawson, R.M., and Richards, J. (2010) *Modular Design for High-Rise Buildings*, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, ICE Publishing, Vol.163, No.3, pp.151-164.
- [4] Annan, C.D., Youssef, M.A., and El Naggar, M.H. (2009) Seismic Overstrength in Braced Frames of Modular Steel Buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, Taylor & Francis, Vol.13, No.1, pp.1-21.
- [5] Hong, S-G., Cho, B-H., Chung, K-S., and Moon, J-H. (2011) Behavior of Framed Modular Building System with Double Skin Steel Panels, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.6, pp.936-946.
- [6] 하태휴, 조봉호, 김태형, 이두용, 임태성(2013) 내력벽식 스티드 패널을 적용한 모듈러건물유닛의 내진성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제5호, pp. 519-530.
Ha, T.H., Cho, B.-H., Kim, T.H., Lee, D.Y., and Eom, T.S. (2013) Earthquake Resistance of Modular Building Units Using Load-Bearing Steel Stud Panels, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.5, pp. 519-530 (in Korean).
- [7] 이상섭, 배규용, 박금성, 홍성엽(2013) 유닛 모듈러 기둥-보 조인트의 구조성능에 대한 실험적 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.255-265.
Lee, S.S., Bae, K.W., Park, K.S., and Hong, S.Y. (2013) An Experimental Evaluation of Structural Performance for the Beam to Column Joints in Unit Modular System,

- Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.255-265 (in Korean).
- [8] 마향욱, 오현철, 김동욱, Kong Davon, 심창수(2012) 충전 원형강관을 이용한 모듈러 교각의 휨 거동 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, pp.725-734.
- Ma, H.W., Oh, H.C., Kim, D.W., Davon, K., and Shim, C.S. (2012) Evaluation of Flexural Behavior of a Modular Pier with Circular CFT, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.725-734 (in Korean).
- [9] Lehman, D.E., and Roeder, C.W. (2012) Foundation Connections for Circular Concrete-Filled Tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.78, pp.212-225.
- [10] Moon, J., Lehman, D.E., Roeder, C.W., and Lee, H-E. (2013) Evaluation of Embedded Concrete-Filled Tube (CFT) Column-to-Foundation Connections, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.56, pp.22-35.
- [11] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2009) *Abaqus Analysis User's Manual, Ver.6.9-2*, DSS, USA.
- [12] Moon, J., Roeder, C.W., Lehman, D.E., and Lee, H-E. (2012) Analytical Modeling of Bending of Circular Concrete-Filled Steel Tubes, *Engineering Structures*, Vol. 42, pp.349-361.
- [13] Saenz, L.P. (1964) Discussion of 'Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete' by Desayi, and Krishnan, *Journal of American Concrete Institute*, ACI, Vol.61, pp.1229-1235.
- [14] Hsu, T.T.C., and Mo, Y.-L. (2010) *Unified Theory of Concrete Structures* (2nd Ed.), John Wiley & Sons, USA.
- [15] Lee, J., and Fenves, G.L. (1998) Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol.124, No.8, pp.892-900.

요 약 : 골조 유닛 모듈러 구조 형식은 기 제작된 유닛 구조물을 적층하여 건물을 보다 간편히 건설을 할 수 있어 중, 고층 건물에 적용이 확대되고 있다. 이러한 유닛 모듈러 구조 형식은 외력에 의하여 발생하는 축력과 휨모멘트를 지반에 잘 전달시켜야 함으로 각각의 유닛 구조물은 기초와 적절히 연결되어야 한다. 본 연구에서는 새로운 형태의 매입형 유닛-기초 접합부를 제안하였으며, 제안된 접합부의 성능을 일련의 실험 연구를 통하여 평가하였다. 총 5개의 실물 크기의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였으며, 매입 길이와 엔드 플레이트와 같은 제안된 유닛-기초 접합부의 휨거동에 영향을 미칠 수 있는 인자들의 영향을 살펴보았다. 실험결과, 모든 실험체에서 강성은 최소한 반강접의 강성을 상회하는 것으로 나타났으며, 기둥의 매입길이는 본 연구에서 수행한 실험체에서 약 200mm가 적절한 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 유닛 모듈러, 기초, 기둥매입형, 접합부, 휨성능
