

탄소섬유쉬트(CFRP Sheets)로 보강된 세장한 각형강관기둥의 중심축하중실험

박재우¹⁾ · 최선규²⁾ · 최성모³⁾ · 송동엽⁴⁾ · 유정한^{5)*}

¹⁾ 부장, (주) 가윤, 건축부 ²⁾ 대표이사, 선영구조기술사건축사사무소
³⁾ 교수, 서울시립대학교, 건축학부 ⁴⁾ 부장, 한국시설안전공단, 건축팀
⁵⁾ 조교수, 서울과학기술대학교 건축학부

Concentrated Axial Loading Test for Slender Square Hollow Section Retrofitted by Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets(CFRP Sheets)

Park, Jai Woo¹⁾ Choi, Sun Kyu²⁾ Choi, Sung Mo³⁾ Song, Dong Yub⁴⁾ Yoo, Jung Han^{5)*}

¹⁾ Director, Dept. of Construction, Gayoon Construction, Co, Ltd., Seoul, 143-130, Korea
²⁾ President, Sunyoung Architects & Engineering Consultants, Seoul, 135-924, Korea
³⁾ Professor, Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-020, Korea
⁴⁾ Director, Dept. of Architecture, Korea Infrastructure Safety Corporation, Goyang, 411-758, Korea
⁵⁾ Professor, School of Architecture, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 139-743, Korea

ABSTRACT : This paper presents the experimental results of axially loaded stub columns of slender steel hollow square section(SHS) strengthened with carbon fiber reinforced polymers(CFRP) sheets. 6 specimens were fabricated and the main parameters were: width-thickness ratio(b/t) and CFRP retrofitting. From the tests, it was observed that two sides would typically buckle outward and the other two sides would buckle inward. A maximum increase of 33% was achieved in axial-load capacity. Also, stiffness and ductility index(DI) were compared between unretrofitted specimens and retrofitted specimens. In the last section, a prediction formula of the ultimate strength developed using the experimental results is presented.

KEYWORDS : carbon fiber sheet, CFRP, steel hollow section(SHS), slender section, retrofit, elastic buckling, effective width

1. 서 론

1980년대 이후로 지난 30여 년 동안 섬유보강쉬트(Fiber reinforced polymer sheet, 이하 FRP)는 콘크리트 구조물의 보수보강재료로 널리 쓰여 왔고 이에 관한 연구 또한 상당수 진행되어 왔다. 그러나 철골구조물에 FRP를 보수보강

재료로 적용한 연구 및 사례는 극히 드물다. 일반적으로 철골 구조물에 대한 보수보강방법으로는 강판보강법이 유일하지만 강판 자체는 중량이 큰 재료이므로 시공성이 떨어지고, 기존 구조물 자체의 자중을 증가시키며, 부식에 취약하다. 또한 강판보강법을 적용할 경우 볼트나 용접으로 모재와 연결을 해야 되는데 이는 모재의 단면손실이나 용접 열로 인한 잔류응력으로 모재가 변형이 생기는 등 많은 단점이 있다. 최근 기존의 강판보강법에 대한 고정관념을 탈피하여 해외를 중심으로 강구조물의 FRP를 적용한 보수보강에 대한 연구가 진행되고 있으며, 실제로 시공현장에 적용한 사례 또한 많다¹⁾. FRP는 강판에 비해 경량재 이므로 시공성이 간편하고, 강판 내부식성을 지니고 있다. 또한 강판에 비해 약 10배에 해당하는 인장강도를 지니고 있어 적은 보강량으로 높은 보강효

Note.-Discussion open until June 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 22, 2012; revised November 28, 2012; approved on November 29, 2012.
© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-2-970-9015; Fax. +82-2-974-1480
E-mail: happyjh@seoultech.ac.kr

과를 기대할 수 있다. Miller 등^[2]은 합성부의 H형강 플랜지 하부에 탄소섬유쉬트(Carbon Fiber reinforced polymer sheet, 이하 CFRP) 유리섬유쉬트 (Glass Fiber reinforced polymer sheet, 이하 GFRP)로 보강하여 휨성능을 증가시키는 연구를 수행하였다. Narmashir 등^[3]은 H형강 보의 양단부위 전단구간에 CFRP스트립으로 전단보강을 하여 실험을 수행하고 보강효과를 검증하고 유한요소 해석을 수행하였다. 박재우^[4]는 탄소섬유쉬트로 보강한 각형 CFT기둥의 중심압축실험을 통하여 연성능력의 증가를 확인하였다. 본 연구내용과 비슷한 속이 빈 중공강관의 FRP보강효과에 대한 연구내용을 요약하면, Teng^[5]은 GFRP로 보강된 단주원형 강관에 대한 중심축하중 실험을 수행하였다. 실험결과 횡방향 보강을 통해 바깥방향의 국부좌굴을 GFRP의 구속력을 통해 지연시켜 보강효과를 검증할 수 있었다. Shatt and Fam^[6]은 HSS(Hollow Square Section)강관의 단주에 대해서는 횡방향으로 장주에 대해서는 길이방향으로 각각 CFRP를 보강하여 중심압축실험을 수행하였으며, 단주의 경우 CFRP의 구속으로 인해 좌굴을 지연시켜 내력을 상승시킬 수 있었다. 장주의 경우 CFRP로 인해 합성탄성계수가 증가하여 오일러 좌굴하중이 증가하였으며, 이로 인해 내력이 상승됨을 관찰할 수 있었다. 그러나 기존 연구에서는 강관의 판폭두께비가 작은 콤팩트단면 실험체에 대해서만 초점을 맞추어 진행되어 왔다.

본 연구에서는 기존의 진행된 연구(Teng^[5], Shatt and Fam^[6])와는 달리 세장판으로 구성된 각형강관기둥에 CFRP 보강을 통해 중심압축실험을 수행한다. 건축구조기준 (KBC 2009)^[7], 미국 강구조설계기준(AISC LRFD 2010)^[8]에서는 강관의 폭-두께비에 따라 콤팩트단면, 비콤팩트단면, 세장판단면으로 구성하고 있다. 이중 세장판단면은 상대적으로 큰 폭-두께비를 가지고 있어 항복강도에 도달하기 이전에 국부좌굴이 발생하며 파괴되며, 이를 방지하기 위해 설계기준집 (KBC 2009, AISC 기준 등)^{[7],[8]}에서는 일정 값 이하의 폭-두께비를 적용하여 제한하고 있다. 최근 고강도 강재의 개발로 적은 강재 단면적으로 충분한 내력을 발휘할 수 있어, 세장판 부재의 사용이 활성화 될 것으로 기대된다. 그러나 세장판 사용은 강재량을 절약할 수 있는 장점이 있으나, 상대적으로 큰 폭-두께비로 인해 항복강도 이전에 국부좌굴이 발생하게 되며, 좌굴발생 이후 내력이 크게 저하된다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 폭-두께비가 큰 세장판으로 구성된 강관기둥에 FRP쉬트 보강을 통해 국부좌굴을 지연시키고, 탄성좌굴응력의 증대를 통해 압축내력을 증가시킨다. FRP쉬트는 강도와 구조적 성능에 있어 우수한 CFRP를 선택하였다. 실험체는 설계기준집(KBC 2009, AISC기준 등)에서

언급한 비콤팩트단면 이상(본 연구에서는 $b/t=40$ 이상) 총 3종류의 판폭두께비 값을 가진 세장판 각형강관에 CFRP를 보강하였으며, 중심축하중실험을 통해 구조적 거동을 관찰하였고, 내력을 통한 보강효과, 초기강성, 연성 등을 비교하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 내력 예측식을 제안하여 실험 결과 값과 비교하여 예측식의 신뢰성을 입증하였다.

2. 실험계획 및 실험결과

2.1 실험체제작

KBC 2009기준^[7]이나 AISC기준^[8]에서는 하중조건과 단면의 형상에 따라 콤팩트단면, 비콤팩트단면, 세장판단면으로 구분하고 있으며, 이에 기준이 되는 세장비를 한계판폭두께비라 하며, 본 연구에서 수행 될 각형강관에 대한 판폭두께비 근거는 균일 압축을 받는 각형강관의 비콤팩트 단면의 한계 판폭두께비($b/t = 1.40 \sqrt{E/F_y}$) 이상의 판폭두께비를 가진 단면 즉 세장판 단면을 가지고 실험변수를 설정하였다(KBC 2009기준^[7], AISC기준^[8]). 판폭두께비를 변화시키기 위해 두께 2.3mm의 강판으로 강관의 폭을 변화시켜가며 폭두께비를 60에서 100까지 20씩 증가시켜가며 총 3종류의 폭두께비 실험체 6개를 제작하였다. 실험체의 길이는 실험체 폭에 3.0배로 하였고, 양단에는 하중이 균등하게 분포할 수 있도록 엔드플레이트를 설치하였다. 실험체 제작 시 얇은 강판을 용접해야 하므로 Fig. 1(b)와 같이 용접으로 인해 변형이 상대적으로 적은 아르곤 용접을 실시하였다. CFRP에 대한 보강효과를 살펴보기 위해 기준실험체를 제외한 나머지에 CFRP쉬트 3겹을 횡방향으로 보강 후 10일간 양생하였다.

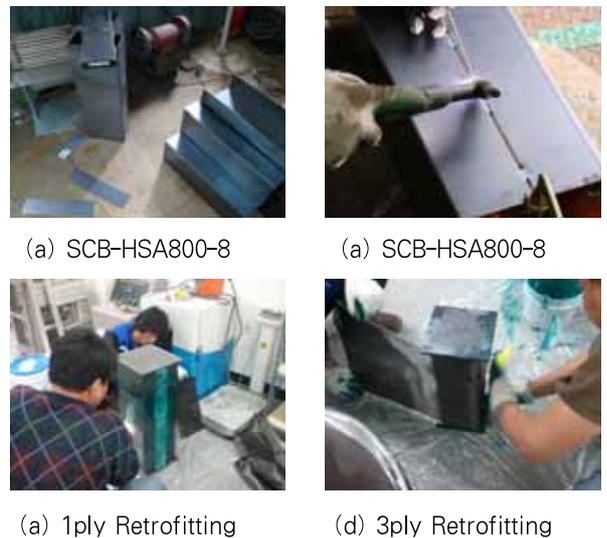


Fig. 1 Specimen Fabrication Procedure

실험체 일람표는 Table 1에 정리하였으며 버니어캘리퍼스로 측정된 실제 강관의 두께는 2.2mm로 측정되어 계획된 판폭두께비와 실제 판폭두께비는 각각 다르게 산정되었으며 이를 Table 1 실험체 일람표에 각각 정리하였다.

Table 1. Test Specimens

| Specimen | size(mm) (B×B×t, mm) | b/t (plan) | b/t (actual) | CFRP ply |
|----------|-------------------------|---------------|-----------------|-------------|
| SH60-0T | □-142.6×142.6×2.3 | 60 | 62.7 | - |
| SH60-3T | □-142.6×142.6×2.3 | 60 | 62.7 | 3 |
| SH80-0T | □-188.6×188.6×2.3 | 80 | 83.6 | - |
| SH80-3T | □-188.6×188.6×2.3 | 80 | 83.6 | 3 |
| SH100-0T | □-234.6×234.6×2.3 | 100 | 104.5 | - |
| SH100-3T | □-234.6×234.6×2.3 | 100 | 104.5 | 3 |

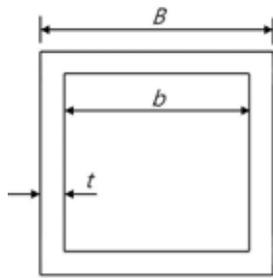


Fig. 2 Cross Section

실험체에 대한 표기로서, 예를 들어, SH60-3T에서 SH는 Square Hollow 형상(박스형), 60은 판폭두께비(b/t)를 3T는 CFRP 3겹 보강을 의미한다.

2.2 재료시험

강관에 대한 재료시험결과 항복강도는 288MPa, 인장강도는 371MPa이며, 연신율은 33%이다. CFRP는 평균두께는 0.111mm/ply이며, 인장강도는 4,958MPa, 탄성계수는 240GPa이다. 제조사의 시방서에서 제공한 에폭시 함침 시 CFRP시트의 시공두께는 0.5-1.0mm/ply이다.

2.3 계측계획

Fig. 3은 실험체 계측 계획도이다. 실험은 2,000kN급 만능시험기(UTM)에서 수행하였으며, 길이방향에 대한 축변위를 측정하기 위해 엔드플레이트 양 모서리에 2개의 LVDT를 설치하였으며 평균값을 축변위로 결정하였다. 실험체 중앙부에 대해 횡방향변위를 측정하기 위해 2개의 LVDT를 횡방향으로 설치하였다. 또한 실험체의 1/3지점과 2/3지점 사이에 각각 종방향과 횡방향으로 스트레인게이지를 각각 2개씩 설치하여 변형률을 측정하였다.

를 측정하기 위해 엔드플레이트 양 모서리에 2개의 LVDT를 설치하였으며 평균값을 축변위로 결정하였다. 실험체 중앙부에 대해 횡방향변위를 측정하기 위해 2개의 LVDT를 횡방향으로 설치하였다. 또한 실험체의 1/3지점과 2/3지점 사이에 각각 종방향과 횡방향으로 스트레인게이지를 각각 2개씩 설치하여 변형률을 측정하였다.

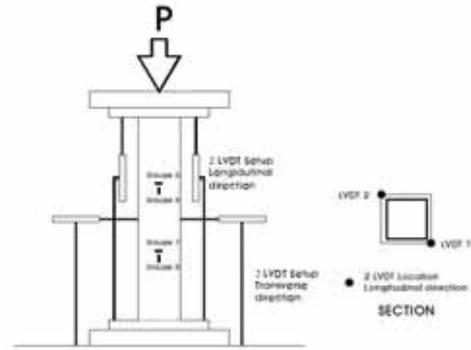


Fig. 3 Test Setup

2.4 실험체 파괴과정

Fig. 4는 보강실험체와 무보강실험체의 파괴전경을 비교한 것이다.



(a) Unretrofitting Specimen



(b) Retrofitting Specimen

Fig. 4 Comparison of Specimen Failure Mode

압축을 받는 사각형 단면의 중공강관은 마주보는 두면은 안쪽방향으로 변형이 일어나고, 나머지 마주보는 두면은 바깥쪽방향으로 변형이 발생하게 된다. Fig 5는 무보강실험체와 보강실험체의 파괴모습을 확대한 것인데, 6개 실험체 모두

Fig 4,5와 같이 실험체 상부 혹은 하부에서 두면은 안쪽면으로 국부좌굴이 발생하고, 나머지 두면은 바깥쪽으로 국부좌굴이 발생하며 파괴되어 세장판으로 구성된 중공강관의 파괴거동은 압축을 받는 콤팩트단면 중공의 파괴거동과 유사하게 나타났다.



(a) SH60-0T



(c) SH80-0T



(e) SH100-0T



(b) SH60-3T

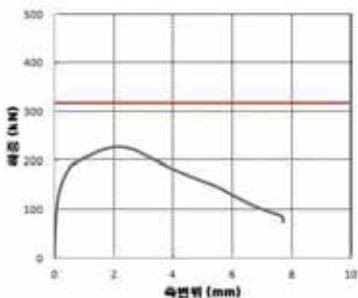


(d) SH80-3T

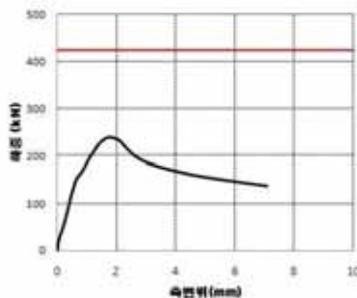


(f) SH100-3T

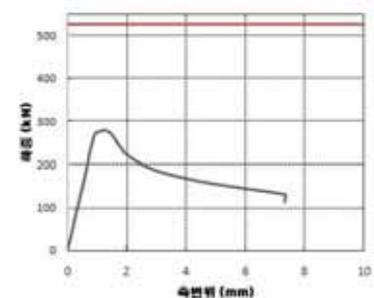
Fig. 5 Specimen Failure Shape



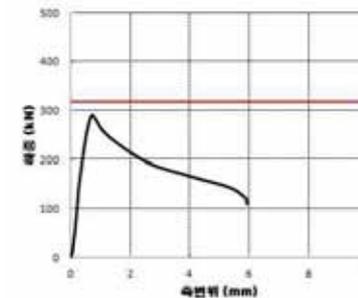
(a) SH60-0T



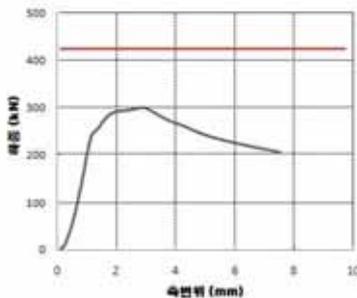
(c) SH80-0T



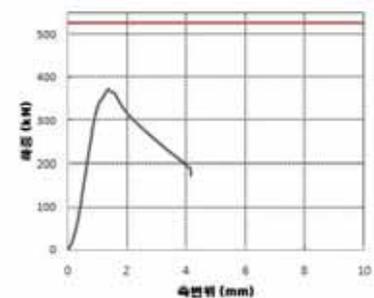
(e) SH100-0T



(b) SH60-3T



(d) SH80-3T



(f) SH100-3T

Fig. 6 Load-Displacement Curve

CFRP시트로 보강된 실험체는 무보강실험체와 유사한 파괴 거동을 보였으나 바깥쪽으로 국부좌굴이 발생하는 면에 대해 CFRP시트의 구속이 발생하였으며, 좌굴의 범위가 확장됨에 따라 CFRP시트는 찢어지며 파단(rupture)되었고, 이후 국부 좌굴의 범위가 계속적으로 확대되어 실험체는 최종적으로 파괴되었다. 다만 CFRP시트의 보강으로 국부좌굴의 발생시점을 지연시킴을 실험을 통해 확인하였다. Fig. 5는 본 연구에서 수행된 모든 실험체의 최종파괴 모습을 나타낸 것이다.

2.5 하중-변위 곡선

Fig 6은 각 실험체의 하중-축변위 곡선이다. 일반적으로 단주는 부재좌굴(Global buckling)에 지배를 받지 않고, 국부좌굴(Local buckling)에 지배를 받으며 파괴된다. 따라서 강재가 항복한 이후에 항복하중(P_y)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_y = A_s f_y \quad (1)$$

Fig. 6에서 붉은색 직선은 항복하중(P_y)을 나타낸 것이다. 세장관으로 구성된 각형강관은 실험체 모두 항복내력 이전에 최대내력이 도달하고, 국부좌굴발생으로 내력이 저하되는 탄성좌굴(Elastic buckling)거동을 보이고 있다. 그러나 CFRP시트의 보강으로 인해 국부좌굴을 지연시키고, 부재의 내력을 상승시킴을 확인하였다. 특히 판폭두께비가 100인 실험체 중 보강실험체(SH100-3T)는 다른 두 보강실험체와 달리 최대내력 이후 급격한 내력저하 현상을 보이고 있다. 이는 판폭두께비가 큰 실험체는 부재의 폭에 상대적으로 얇은 박판으로 구성되어 있어 국부좌굴에 더욱 취약하여 강제항복강도 이전에 국부좌굴 발생으로 판폭두께비가 작은 실험체에 비해 연성거동을 하지 못하게 된다. CFRP의 재료성질은 변형률이 증가함에 따라 인장강도는 상승하나 최대인장강도 이후 급작스럽게 파단 되는 취성거동을 보이고 있다⁽⁹⁾. CFRP의 보강으로 강도는 상승시키게 되나 CFRP의 취성적인 재료성질로 인해 실험체는 강재의 연성능력보다 CFRP의 취성능력에 지배를 받아 취성파괴를 일으키며 내력이 급작스럽게 저하 되는 현상을 보인 것으로 사료된다.

2.6 실험결과 분석

Table 2에는 실험결과를 통해 얻은 최대내력, 초기강성, 연성 값 등을 정리하였다. 실험체의 최대내력은 CFRP의 보강을 통해 판폭두께비 별로 각각 27%, 25%, 35% 상승시킴을 확인하였다. 이는 판폭두께비가 큰 실험체는 상대적으로 국부좌굴에 취약하여 내력이 항복강도에 도달하지 못하고 저

하되는 탄성좌굴거동을 보여주고 있으나, CFRP시트의 보강을 통해 국부좌굴을 지연시키고 이로 인해 탄성좌굴응력(Elastic buckling stress)을 상승시켜 내력을 증가시킬 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

초기강성은 Fig. 7의 방법을 통해 산정하며 식 (2)와 같이 정의한다⁽¹⁰⁾.

$$K_y = \frac{P_{peak}}{\delta_y} \quad (2)$$

Table 2. Test Analysis Result

| Specimen | Item | Result | (%) |
|----------|-------------------------------|--------|------------------|
| SH60-0T | Peak Load (kN) | 227.0 | Control specimen |
| | displacement at peak load(mm) | 2.081 | |
| | Stiffness (kN/mm) | 328.7 | |
| | DI | 6.969 | |
| SH60-3T | Peak Load (kN) | 290.0 | 27.8 |
| | displacement at peak load(mm) | 0.740 | - |
| | Stiffness (kN/mm) | 358.3 | 9.00 |
| | DI | 3.072 | -55.54 |
| SH80-0T | Peak Load (kN) | 239.0 | Control specimen |
| | displacement at peak load(mm) | 1.838 | |
| | Stiffness (kN/mm) | 224.1 | |
| | DI | 3.387 | |
| SH80-3T | Peak Load (kN) | 298.0 | 25.00 |
| | displacement at peak load(mm) | 2.807 | - |
| | Stiffness (kN/mm) | 200.5 | -10.54 |
| | DI | 3.559 | 5.07 |
| SH100-0T | Peak Load (kN) | 280.0 | Control specimen |
| | displacement at peak load(mm) | 1.273 | |
| | Stiffness (kN/mm) | 229.7 | |
| | DI | 2.001 | |
| SH100-3T | Peak Load (kN) | 378.0 | 35.00 |
| | displacement at peak load(mm) | 1.372 | - |
| | Stiffness (kN/mm) | 261.1 | 13.67 |
| | DI | 1.841 | -8.00 |

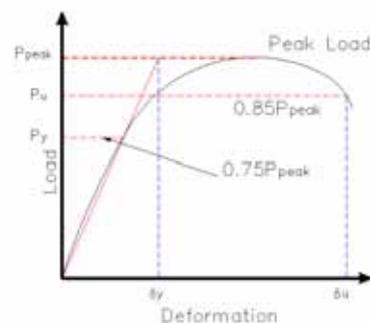


Fig 7. Concept of Initial Stiffness and Ductility ⁽¹⁰⁾

초기강성(Initial Stiffness)은 Table 2의 결과와 같이 기준 실험체 대비 10% 내외 증가 혹은 감소하는 것으로 나타났으며, CFRP 보강이 초기강성에는 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 연성(Ductility)은 항복점(δ_y)과 파괴점(δ_u)의 비율로 정의하며 이는 식 (3)에 나타냈으며 DI (Ductility index)로 정의한다^[10].

$$DI = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3)$$

파괴점 (δ_u)는 최대 내력점 이후 85%의 내력저하가 발생한 점으로 정의하며^[10], 계산된 DI 값은 Table 2에 정리하였다. DI는 CFRP 보강점수가 증가함에 따라 일반적으로 감소하는 것으로 나타났으나, SH80-3T 실험체는 기준실험체 (SH80-0T) 대비 약 5% 증가하는 것으로 나타났다. CFRP 쉬트의 보강을 통해 내력을 상승시킬 수 있었지만 연성능력은 개선시키지 못함을 확인하였다. 이는 본 연구에서 채택한 실험체는 판폭두께비가 큰 세장판 요소로 구성되어 있기 때문에 부재단면에 비해 상대적으로 강재량은 적어 CFRP쉬트로 보강 시 강재는 연성거동을 하지 못하고, CFRP의 취성적인 재료 성질로 인해 연성능력이 감소한 것으로 사료된다.

3. 내력예측식 제안

3.1 유효폭 이론

KBC 2009기준이나 AISC기준에서는 하중조건과 단면의 형상에 따라 콤팩트단면, 비콤팩트단면, 세장판단면으로 구분하고 있으며, 이에 기준이 되는 세장비를 한계 판폭두께비라 한다. 이중 세장판요소로 구성된 각형강관에서 KBC 2009 기준과 AISC기준에서는 강재의 총단면적(A_g)에서 감소계수(Q)를 사용하여 압축강도를 계산하며, 이의 개념은 Fig. 8과 같다.

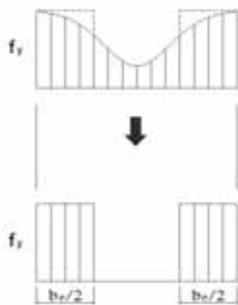


Fig. 8 Plate Stress Distribution Under Uniform Load (Actual Stress Distribution and Effective Stress Distribution)

균일압축을 받는 플레이트의 비선형적인 실제 응력분포상태를(Fig 8의 상부그림)을 유효폭(b_e)의 개념으로 사용된 등가응력상태로 치환한다(Fig. 8의 하부그림). 등가상태는 항복응력(f_y)이 유효폭에 걸쳐 균등하게 분포한 것으로 보며 유효폭은 식 (4)에 의해 산정한다^{[7],[8]}.

$$b_e = 1.92t \sqrt{\frac{E}{f}} \left[1 - \frac{0.38}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq b \quad (4)$$

여기서, f 는 좌굴응력 F_{cr} 이다. 감소계수(Q)는 비보강요소에 대한 감소계수 Q_s 와 보강요소에 대한 감소계수 Q_a 의 곱으로 나타내는데, 각형강관의 경우 $Q_s=1.0$ 이므로 감소계수 $Q=Q_a$ 이며, 유효단면적(A_e)은 감소계수 Q 이용하여 산정한다. 여기서, 유효단면적(A_e)에 대한 총단면적(A_g)비가 감소계수 Q_a 가 되며, 최종적으로 각형강관의 압축내력은 식 (5)와 같다.

$$P_u = A_s f_y \quad (5)$$

여기서, $A_{se} = Q \times A_s$, $Q = b_e/b$

3.2 내력예측식 제안

순수 중공강관의 경우 KBC 2009기준과 AISC기준에서 제시하는 식 (4)의 유효폭 개념식을 적용해 사용할 수 있으나 CFRP쉬트로 보강된 중공강관의 경우 개발된 식이 없기 때문에 CFRP로 보강된 중공강관의 유효폭을 산정할 식이 필요하다. 세장판 단면의 경우 식 (4)에서와 같이 유효폭 계수는 1.92를 사용하고 있으나, CFRP쉬트로 보강된 세장판 단면의 최적화된 계수값을 찾기 위해 실험값을 토대로 기존의 1.92대신 계수값을 달리하여 구한다^[11]. 구해진 계수값을 토대로 CFRP쉬트로 보강된 세장판의 유효폭을 재계산하여 극한압축내력(P_u) 산출하였으며, 이를 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Coefficient Value and Result of Proposed Formula

| Specimen | b/t(actual) | Q | Value | P_u (kN) | P_{exp} (kN) |
|----------|-------------|------|-------|------------|----------------|
| SH60-0T | 62.7 | 0.69 | 1.92 | 243.58 | 227.00 |
| SH80-0T | 83.6 | 0.54 | 1.92 | 254.34 | 239.00 |
| SH100-0T | 104.5 | 0.44 | 1.92 | 260.75 | 280.00 |
| SH60-3T | 62.7 | 0.82 | 2.32 | 289.70 | 290.00 |
| SH80-3T | 83.6 | 0.63 | 2.28 | 298.46 | 298.00 |
| SH100-3T | 104.5 | 0.64 | 2.81 | 378.00 | 378.00 |

본 연구에서는 CFRP시트로 보강한 중공강관기둥에 대해 균일압축을 받는 플레이트의 유효폭을 계산하기 위하여 기존의 1.92를 변경한 Table 3의 세 계수(2.32, 2.28, 2.81) 평균 값 2.47로 변경한 유효폭 산정식을 제안한다. 감소계수 Q값은 변경된 계수값에 의해 제안된 식 (6)을 이용해 산정한다.

$$b_e = 2.47t \sqrt{\frac{E}{f}} \left[1 - \frac{0.38}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq b \quad (6)$$

$$P_u = A_e f_y \quad (7)$$

여기서, $A_e = Q \times A_s$, $Q = b_e/b$

기존기준^{(7),(8)}의 식을 그대로 적용할 수 있는 무보강실험체에 대해 Fig 9와 같이 식 (4), (5)를 토대로 산정한 압축내력 값을 실험값과 비교한 결과 값은 서로 근접하여 설계기준에서 제시한 유효폭 제안식 식 (4)는 신뢰가 있음을 알 수 있다. 그러나 CFRP시트로 보강된 각형강관기둥에 대해서는 기존 기준식을 그대로 적용할 수 없으므로 본 연구에서 제안한 유효폭 식 (6), (7)을 토대로 산정하여 압축내력 값과 실험값과의 비교를 Fig 9에 나타내었다. 본 연구에서 제안한 유효폭 계수 2.47을 사용하여 제안식과 실험값과 비교한 결과 평균 0.99, 표준편차 0.12로서, 본 연구에서 제안한 압축내력식 식 (6), (7)은 실험값과 근접함을 보여 매우 좋은 대응을 보이고 있다. 판폭두께비 60, 80 실험체는 제안식과 실험값의 비가 0.93, 0.94(중공강관의 경우), 0.93, 0.91 (CFRP보강된 중공강관의 경우)로 과소평가되며 안전측에 속하였으나, 판폭두께비 100의 실험체는 제안식과 실험값의 비가 각각 1.07, 1.13으로 과대평가 된 것으로 나타났다.

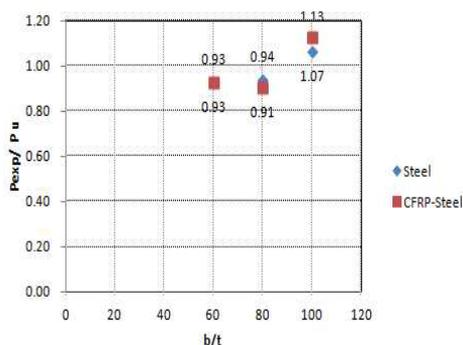


Fig. 9 Comparison of Test Result and Proposed Formula

4. 결론

본 연구에서는 세장판으로 구성된 중공강관기둥에 CFRP

시트를 횡방향으로 보강하여 6개의 실험체를 제작하여 중심축하중실험을 수행하였다. 또한 극한내력을 예측할 수 있는 내력에 측식을 제안하였고, 본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 세장판단면의 각형 중공강관에 CFRP시트로 횡보강하여 중심축하중실험을 수행한 결과 마주보는 두면은 안쪽으로 국부좌굴이 발생하고, 나머지 두면은 바깥쪽으로 국부좌굴이 발생하였다. 또한 국부좌굴의 확장으로 인해 CFRP시트는 파단(rupture)되며 실험체가 파괴되었으나, CFRP시트가 국부좌굴의 발생을 지연시킴을 확인하였다.
- (2) 하중-측변위 곡선에서는 실험체 모두 판폭두께비가 큰 실험체 이어서 항복강도 이전에 국부좌굴의 발생으로 내력이 저하되는 탄성좌굴거동을 보이고 있다.
- (3) 실험분석결과 CFRP시트의 보강으로 최대 33%의 내력이 상승하여 보강효과를 검증할 수 있었다. 초기강성은 CFRP시트로 보강하여도 10%의 편차로 거의 일정하여 CFRP 보강이 초기상성에 영향을 미치지 못함을 확인하였다. 그러나 연성능력(DI)은 보강 시 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 세장판 단면은 단면에 비해 상대적으로 강재량은 적어 CFRP시트로 보강 시 강재는 연성거동을 하지 못하고, CFRP의 재료적 취성적인 성질로 연성능력이 감소한 것으로 사료된다.
- (4) 유효폭의 개념을 도입해 CFRP로 보강된 세장판 중공강관기둥의 감소계수(Q)를 정하기 위하여 유효폭(b_e)의 계수값을 실험값을 근거로 산정하였으며, 그 값은 2.47로 하며 유효폭 산정식은 식 (6)과 같다. 이를 토대로 극한 압축내력을 산정하였으며, 실험결과와 제안식의 결과를 비교한 결과 근접한 것으로 나타나 제안식은 신뢰가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌(References)

[1] Xiao, X.L. and Zhang, L. (2006) State-of-the art Review on FRP Strengthened Steel Structures, *Engineering Structures*, Vol. 29, pp 1808-1823.
 [2] Miller, T.C., Chajes, M.J., Mertz, D.R., and Hastings, J.N. (2001) Strengthening of a Steel Bridge Girder Using CFRP Plates, *J. Bridge. Eng.*, ASCE,

- Vol. 6, No. 6, pp.514-522.
- [3] Narmashiri, K., Jumaat, M.Z., and Ramli Sulong, N.H. (2010) Shear Strengthening of Steel I-Beams by using CFRP strips, *Scientific Research and Essays*, Vol. 5, No. 16, pp.2155 -2168.
- [4] 박재우, 홍영균, 홍기섭, 이성희, 최성모(2009) 탄소섬유 쉬트로 구속된 콘크리트충전 각형강관기둥의 단조압축실험, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제21권, 제3호, pp.311-320.
Park, J.W., Hong, Y.K., Hong, G.S., Lee, S.H., and Choi, S.M. (2009) The Experimental Study on Axial Loaded Concrete Filled Steel Tube Confined by Carbon Fiber Sheet, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 21, No. 3, pp.223-320 (in Korean).
- [5] Teng, J.G. (2007) Behavior of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp.827-838.
- [6] Shatt, A. and Fam, A. (2006) Axial Loading Tests on Short and Long Hollow Structural Steel Columns Retrofitted using Carbon Fibre Reinforced Polymers, *Canadian Journal of Civil Eng.*, Vol. 6, No. 6, pp.458-470.
- [7] 대한건축학회(2009) 건축구조설계기준 및 해설(KBC 2009), 기문당.
AIK (2009) Korea building code and commentary - structural, Architectural Institute of Korea (in Korean).
- [8] AISC (2010) Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, USA.
- [9] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., and Lam, L. (2002) *FRP Strengthened RC Structures*, Jonh Wiley & Son, INC., pp.3-5.
- [10] Hu, Y.M. (2011) Behavior and Modeling of FRP Confined Hollow and Concrete-Filled Steel Tubular Columns, Ph.D. Thesis, Hong Kong Polytechnic Univ., p.35.
- [11] 정원제(2012) 폭두께비가 큰 각형 CFT단주의 구조성능 평가, 서울시립대학교 석사학위논문, pp.63-64.
Jung, W.J. (2012) Evaluation of Structural Performance of Square CFT Columns with Slender Elements, Master thesis, University of Seoul., pp.63-64 (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 세장판으로 구성된 중공강관(SHS)기둥에 CFRP쉬트로 보강하여 중심축하중 실험을 수행하였다. 총 6개의 실험체를 제작하였으며, 실험변수는 판폭두께비, 보강유무이다. 실험결과 사각단면의 두면은 안쪽으로 국부좌굴이 발생하였으며, 나머지 두 면은 바깥쪽으로 국부좌굴이 발생하였다. CFRP쉬트의 보강을 통해 최대 33%의 내력상승효과를 얻었으며, 초기강성과 연성능력을 비교하였다. 끝으로, 압축극한 내력을 산정식을 제안하여 실험값과 비교하였다.

핵심용어 : 탄소섬유쉬트, CFRP, 중공강관(SHS), 세장판, 보수보강, 탄성좌굴, 유효폭
