



일축 압축 실험을 통한 DSCT 부재의 구속 콘크리트에 대한 실험적 연구

이정화¹ · 한상윤² · 원덕희³ · 강영종⁴

고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정¹, 고려대학교 초고층초장대교량기술연구소 연구교수²,
 한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부 연수 연구원³, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수⁴

Experimental Study for Confined Concrete of Double Skinned Composite Tubular Columns by Uniaxial Compression Test

Lee, Jeong-Hwa¹ · Han, Sang-Yun² · Won, Deok-Hee³ · Kang, Young-Jong⁴

¹The doctor's course, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

²Research professor, Research Institute for Supertall and Superlong Structure Technology, Korea University, Seoul, Korea

³Researcher, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Korea

⁴Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

Abstract: In this study, uniaxial compression tests were performed to investigate the stress-strain relations of Double Skinned Composite Tubular Columns reinforced with steel tube. The confined concrete has been known as the strength of concrete increases significantly. Specimens reinforced with outer and inner steel tube were tested by uniaxial compression test. To investigate the influence of concrete strength increase by confining conditions in steel tubes, 8 specimens with different thickness of tube, hollowness ratio and concrete strength were tested and compared with other researcher's concrete material model.

Key Words: DSCT, Confining effect, Concrete material model, Composite column

1. 서론

최근 들어 토목구조물에 복합재료를 이용한 구조물의 제작, 보수 및 보강 등의 다양한 방법들로 시도되고 있으며, 특히, 부식성이 높은 환경에서 내부식성이 높은 복합재료를 이용한 시도들이 많이 이루어지고 있다. 부식성이 강한 탄소섬유수트나 FRP를 콘크리트와 합성시킨 구조물 등 복합재료를 이용한 연구가 다양하게 진행되고 있다. (Park et al., 2010; Choi et al., 2011; Kim et al., 2012).

또한, 기존의 재료 특성을 더욱 향상시켜 구조물에 적용하고자 하는 시도들도 진행되어 왔으며, 기둥에서는 강관을 삽입한 형태의 구조 부재가 개발되어 연구

가 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히, 외부를 강관을 이용하여 감싼 형태인 CFT 기둥의 구속 효과에 의한 강도 증진에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. (Won et al., 2012)

일반적으로 CFT 기둥은 외부강관에 콘크리트를 타설한 모양을 하고 있기 때문에, 외부강관에 의한 콘크리트의 압축강도 증진과 연성능력을 향상시키는 효과를 가지고 있다. 또한, 최근에는 콘크리트를 탄소섬유수트나 FRP계열로 보강하는 연구가 진행되어 상당수의 연구데이터가 축적이 되어 있는 상태이다. 국내에서는 Im et al.(2006)이 구속 조건에 따른 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대하여 실험연구를 진행한바 있다. 3축 구속 상태의 원형 CFT와 사각형 단면의 CFT, 2축 구속 상태의 사각형 단면의 CFT에 대한 실험

주요어: DSCT, 구속효과, 콘크리트 재료 모델, 합성 기둥

Corresponding author: Kang, Young-Jong

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 138-050, Korea.
 Tel: +82-2-3290-3317, Fax: +82-2-921-5166, E-mail: yjkang@korea.ac.kr

투고일: 2013년 7월 5일 / 수정일: 2013년 8월 1일 / 게재확정일: 2013년 8월 16일

험 연구를 통하여, 콘크리트 응력-변형률 관계에 대하여 연구를 수행하였다.

내진성능 및 연성성능이 뛰어난 CFT 부재와 비슷한 구조로는 DSCT(Double Skinned Composite Tubular) 단면이 있다. DSCT 기둥 단면은 콘크리트의 내부에 중공부를 두어 부재의 자중을 저감시키는 동시에 외부와 내부에 강재로 보강함으로써, CFT와 동일한 성능의 구속효과를 발휘할 수 있는 구조이다. Wei et al(1995)는 DSCT와 동일한 Sandwich tube의 일축압축실험을 진행한바 있다. Wei에 의한 실험은 강재와 콘크리트의 실험을 따로 진행을 하였고, 각 실험 결과를 더하여 합성단면의 실험결과와 비교를 하여 합성 Sandwich tube의 성능이 우수하다는 것을 실험결과로서 보여주었다. Han et al(2010)은 이론적인 방법을 통하여, DSCT 기둥의 파괴거동을 제안하였고, 이에 따라 구속효과를 고려한 재료모델을 정립하였다.

Won et al(2012)는 범용 해석 프로그램을 이용하여 일축 압축하중을 받는 DSCT 부재의 구속응력에 대하여 연구를 수행하였다. 해석방법은 콘크리트부에만 압축하중을 가려하여, 순수한 콘크리트의 구속응력에 대하여 중공비에 따른 구속응력에 대하여 연구를 진행하였다. 중공비에 따라서 내측 튜브에 발생하는 구속응력이 이론보다는 작아진다는 연구결과를 토대로 DSCT부재의 내부 튜브 산정식을 수정 제안하였다.

본 연구에서는 Won et al(2013)에 의하여 수정 제안된 내부튜브 산정식으로 모든 시험체의 단면을 설계하였고, 내외부가 강관으로 둘러싸인 DSCT 부재에 대하여 3축으로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선에 대하여 실험 결과를 토대로 검증하고자 한다. 실험은 하중을 전단면에 균일하게 재하한 Wei et al(1995)에 의한 방법과는 달리 내측의 콘크리트부분에만 압축하중을 재하하여, 내외부튜브에 의한 순수한 구속효과에 초점을 맞추어 DSCT 기둥의 구속효과를 검증하고자 한다.

2. 배경 이론

2.1 DSCT 부재의 콘크리트 재료 모델

Mander et al(1988)는 일축 압축 응력을 받는 구속 콘크리트의 재료 모델을 제안하였다. 이 모델은 Popovics(1973)가 제안한 통합형 해석법을 사용을 하여, 콘크리트의 응력-변형률 곡선에서 응력 상승 구간과 하강구간을 구별하지 않고 식 (1)에 의하여 통합적으로 나타내고 있다.

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \tag{1}$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} \tag{2}$$

$$r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})} \tag{3}$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \tag{4}$$

여기서, f_c 는 콘크리트의 응력, ϵ 는 축방향 변형률, f'_{cc} 는 구속 콘크리트의 극한 응력, ϵ_{cc} 는 구속 콘크리트가 극한 응력일 때의 변형률이다. 비 구속 콘크리트의 접선 탄성계수 (E_c : tangent modulus)는 $5000\sqrt{f'_{cc}}$ (MPa)로 산정되며, 구속된 콘크리트의 최대 강도(f'_{cc})는 구속 조건에 따라 3축 구속 상태일 경우 식 (5)에 의해서 2축 구속 상태일 경우 식 (6)에 의하여 산정이 가능하다.

$$f'_{cc} = f'_{co} (2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - \frac{2 f'_l}{f'_{co}} - 1.254) \tag{5}$$

$$f'_{cc} = -2.75 \frac{f'^2_l}{f'_{co}} + 1.835 f'_l + f'_{co} \tag{6}$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \tag{7}$$

$$f'_l = k_e \cdot f_l \tag{8}$$

여기서 f'_{co} 는 비구속된 콘크리트의 최대 강도이며, f'_l 는 유효 구속응력이다. 구속된 콘크리트의 최대 강도에서의 변형률 ϵ_{cc} 는 식 (7)과 같이 비구속된 콘크리트의 최대 강도에 해당하는 변형률 ϵ_{co} 의 함수로서 정의되며, ϵ_{co} 는 일반적으로 0.002로 알려져 있다.

띠철근이나 나선철근 등의 횡철근의 경우에는 콘크리트 심부를 완전하게 구속하지 못하기 때문에 식 (8)에서와 같이 감소계수(k_e)를 두게 된다. 원형 띠

철근에 의해 구속된 콘크리트를 고려하게 되면, 콘크리트에 작용하는 구속압에 의해 후프철근에 등분포의 인장력이 작용할 때 횡구속 응력은 식 (9)에 의해 계산된다. 여기서 s 는 후프철근의 배근 간격이며, A_b 는 후프철근의 단면적, f_s 는 후프철근에 작용하는 인장응력이다.

$$f_l = \frac{2f_s A_b}{s d_s} \quad (9)$$

Han et al(2010)은 Mander의 구속 콘크리트 모델을 이용하여, DSCT 부재 내의 재료 모델을 제안하였다. 철근 콘크리트 부재에서의 구속 응력에 대한 감소계수를 1로 가정하여, 완전한 구속 상태를 발휘한다고 가정하였다. Fig. 1은 DSCT 부재 내의 구속 응력을 나타내며, 식 (10)는 외부튜브가 항복하는 조건에서의 콘크리트의 구속 응력식이다.

$$f_l = \frac{2f_{ot} t_o}{D} \quad (10)$$

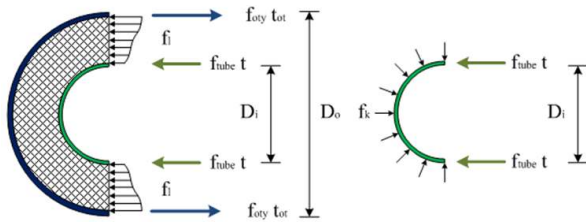


Fig. 1 Confining stress on a DSCT column

또한, Han et al(2010)는 압축하중을 받는 DSCT 부재의 3가지 파괴 모드를 제안하였다. 첫 번째 파괴 모드는 내측 강관이 항복이나 좌굴이 발생하기 전에 외측 강관이 항복하여 파괴가 일어나는 경우이다. 두 번째 파괴 모드는 외측 강관이 항복하기 전에 내측 강관이 항복이나 좌굴이 발생하는 경우이다. 세 번째 파괴 모드는 외측 강관과 내측 강관이 동시에 파괴되는 경우이다. 첫 번째 파괴 모드의 경우 외측 강관이 파괴 할 때 까지 DSCT 부재는 3축 구속 효과를 발휘한다. 두 번째와 세 번째의 경우에는 외측 강관이 파괴하기 전에 내측 강관에서 항복이나 좌굴이 발생한 경우로, 내측 강관에서 파괴가 발생되게 되면, 구속 효과는 외측 강관에 의하여서만 발휘되므로, 2축 구속 상태가 된다고 가정된다.

2.2 DSCT 부재의 설계

Han et al(2010)는 Fig. 1의 자유 물체도를 이용하여 내부 튜브의 항복 조건과 좌굴 조건에 따라 내부 튜브가 파괴가 발생하지 않도록 설계를 위한 최소 두께식 식 (11)(12)으로 제안하였다. 그는 콘크리트의 구속응력이 외측 강관부와 내측 강관부에 동일하다는 가정조건을 이용하여, 내측 튜브의 두께 산정식을 유도하였으며, 내측 튜브의 두께는 식 (11)(12)보다 크도록 규정하였다.

$$t_y = \frac{D_i f_{oty} t_{ot}}{D' t} \quad (11)$$

$$t_{bk} = \sqrt{\frac{6}{2.27} \frac{D_i^2 f_{oty} t_{ot}}{D' E}} \quad (12)$$

반면, Won et al(2012)는 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 콘크리트의 중공비에 따라 튜브에 작용하는 구속응력에 대한 연구를 수행하였다. 해석 결과 콘크리트 외측의 구속응력과 콘크리트 내측의 구속응력이 다르다는 사실을 발견하여, 내측 튜브의 두께 산정식을 수정 제안하였고, 식(13)(14)와 같다. 제안식은 중공비에 따라서 다른 식(15)(16)과 같은 감소계수(γ)를 적용하여, Han의 식을 수정하였다.

$$t_y = \frac{\gamma D_i f_{oty} t_{ot}}{D' t} \quad (13)$$

$$t_{bk} = \sqrt{\frac{6}{2.27} \frac{\gamma D_i^2 f_{oty} t_{ot}}{D' E}} \quad (14)$$

$$\gamma = 0.11 + 1.1e^{-x/0.26}, 0.1 < x \leq 0.6 \quad (15)$$

$$\gamma = 0.19 + (2.5 \times 1.0^{-6})e^{x/0.072}, 0.6 < x \quad (16)$$

본 실험 연구에서는 Won et al(2012)가 제안한 내부 튜브 산정식을 이용하여, DSCT 실험체의 내부 강관을 설계하였다.

3. 실험 개요

3.1 실험체 제작

실험체는 Fig. 2과 같이 중공단면을 가진 콘크리트를 강관을 이용하여 내외부로 보강한 형태로 만들어졌으며, 분석에 이용된 실험체는 총 8개이다. 각 실험체는 Table. 1에 나타내었으며, 내부 튜브의 설계는 Won et al(2012)의 설계식을 근거로 설계를 수행하였다. 실험체명은 외부 및 내부 강관의 종류(Steel-Steel)-중공비-내부강관의 유무(Double or Single)-콘크리트강도(24 or 34)-실험체 외부 직경(300 or 350) 순으로 축약하여 나타낸 것이다. 예를 들면, 외부와 내부가 모두 강재로 보강되었으며, 중공비가 0.9, 내외부 모두 보강된 경우(Double), 콘크리트의 강도가 24MPa, 직경이 300mm인 실험체의 경우에는 SS-0.9-D-24-300으로 나타내어질 수 있다. 실험체의 제작은 내외부 보강재의 종류, 중공비, 비구속 콘크리트의 압축 강도, 외부 및 내부 강관의 두께, 직경을 매개변수로 제작하였으며, 2축 구속 상태일 때와 3축 구속 상태일 경우에 대해 비교할 수 있도록 하였다. 실험체의 외부 직경(D)은 300mm, 350mm이며, 내부 직경은 중공비 0.8, 0.9를 만족하도록 하였고, 실험체의 높이는 400mm로 동일하게 제작하였다. 콘크리트는 재령일 21일 기준으로 보통 강도는 24MPa, 고강도는 35MPa로 설계하였으며, 증기 양생 후 공시체 강도 실험 결과 각각 평균 23.54MPa와 33.4MPa로 나타났다.

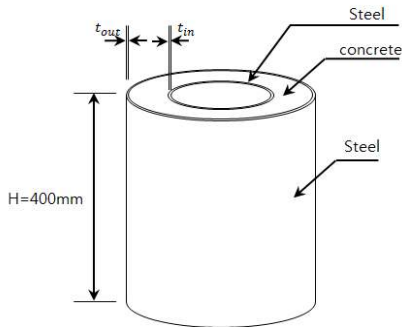


Fig. 2 Specimen

3.2 실험 장비

실험체는 Fig. 3과 같은 3000kN 용량의 오일잭을 사용하여 가력되는 하중을 측정하였으며, 축방향 변위는 Fig. 4와 같이 가력판에 LVDT를 2개 사용하여 측정 후 평균 값을 이용하였다. 또한, 축하중 재하에 따른 횡방향 변위를 측정하기 위해 강관에 총 8개의 스트레인 게이지와 4개의 LVDT를 설치하였다. 하중은 0.01mm/sec의 속도로 변위제어(displacement control mode)를 통하여 재하하였다.

Table 1. Properties of Test Specimens

Specimen	outer tube thickness (t_{out} ,mm)	inner tube thickness (t_{in} ,mm)	Hollowness ratio (D_i/D_o)	Compressive strength of Concrete (f_{ck} ,MPa)
SS-0.9-D-24-300	3	1.5	0.9	23.54
SS-0.8-D-24-300(1)	3	1.5	0.8	
SS-0.8-D-24-300(2)	4	1.5	0.8	
SS-0.8-D-24-350	3	1.5	0.8	
SS-0.8-S-24-350	3	-	0.8	
SS-0.8-S-24-300	4	-	0.8	
SS-0.9-D-35-300	3	1.5	0.9	33.4
SS-0.8-D-35-300	3	1.5	0.8	



Fig. 3 Loading Setup

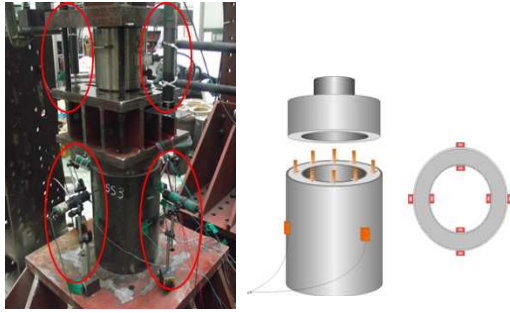


Fig. 4 LVDT & Strain Gage

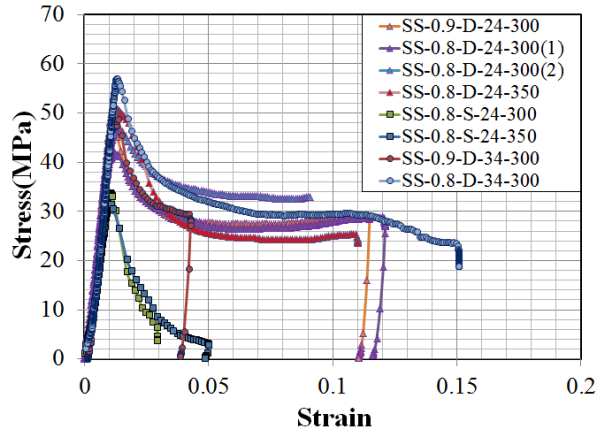


Fig. 5 Test Results (Stress-Strain Relations)

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 결과

정리된 실험 결과를 나열하면, Table 2.와 같으며, 그래프를 나타내면 Fig. 5와 같다.

Table 2와 Fig. 5로부터 알 수 있듯이, 내외부 모두 강관으로 제작된 실험체군(3축 구속 상태)이 외부만 강관으로 제작된 실험체(2축 구속 상태)보다 최대 강도가 높은 것으로 나타나 구속 상태에 따른 구속응력의 차이는 큰 것으로 나타났다.

Table 2. Experiment Results and Rate of Increase

Specimen	Compressive strength of concrete (MPa)	Compressive strength of concrete considering confining effect (MPa)	Strength increment of the specimen by confining effect (MPa)	Rate of increase(%)
SS-0.9-D-24-300	23.54	46.09	22.55	95.8
SS-0.8-D-24-300(1)		41.84	18.30	77.7
SS-0.8-D-24-300(2)		47.00	23.46	99.7
SS-0.8-D-24-350		55.89	32.35	137.4
SS-0.8-S-24-350		31.55	8.01	34.0
SS-0.8-S-24-300		33.82	10.28	43.7
SS-0.9-D-35-300	33.4	48.72	25.18	75.4
SS-0.8-D-35-300		57.06	33.52	100.4

또한, 연성의 측면에서 보았을 때, 2축 구속 상태의 실험체 군의 변형률은 0.05 이하인 것에 반해, 3축 구속 상태의 실험체는 변형률이 크게 나오는 것으로 나타났다. 이는 3축 구속 상태의 실험체는 내외부로 강재로 보강되어 있어 콘크리트의 취성적인 파괴를 방지해주는 역할을 하는 것으로 판단된다. 반면 2축 구속 상태의 실험체는 내부 튜브가 없으므로, 내측의 콘크리트의 취성적인 파괴로 인하여 연성이 좋지 못하였다.

실험체의 대표적인 파괴형태는 Fig. 6과 같다. 실험체의 파괴는 하중 가력부에서 일어났다. 이는 하중 가력부분이 취약한 부분으로 작용을 하여, 상단부분에 파괴가 집중이 되었고, 두께가 작은 내부 튜브 쪽에서 큰 변형과 함께 파괴가 일어나는 현상을 볼 수 있었다.



(a) SS-0.8-D-24-300(1)

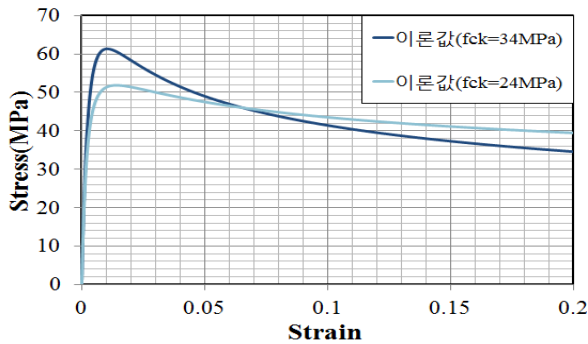


(b) SS-0.8-S-24-350

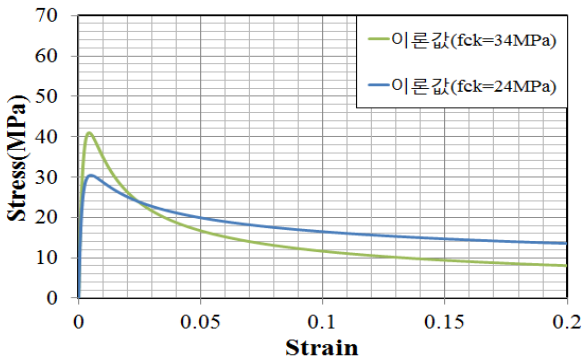
Fig. 6 Failure Shape of Specimens

결과 분석을 위하여, Mander에 의하여 제안된 구속 콘크리트 모델과 실험치를 비교하였다.

Mander의 콘크리트의 재료 모델은 Fig. 7에서 보이는 것과 같이, 구속된 콘크리트가 최대 응력을 도달하고 나서 서서히 강도가 감소되는 경향을 보인다. 구속 조건에 따라서, 콘크리트의 강도에 따라서 최대 강도와 연성능력에는 차이가 나는 것을 알 수 있다. 콘크리트의 강도가 클수록 최대 강도 이후의 거동에서 하중이 급격히 저하되는 것으로 나타났다.



(a) Triaxial Confining Condition



(b) Biaxial confining condition

Fig. 7 Stress-Strain Relations Using Mander's Concrete Material Model

4.2 2축 구속 상태일 때 구속 콘크리트의 응력-변형률 곡선

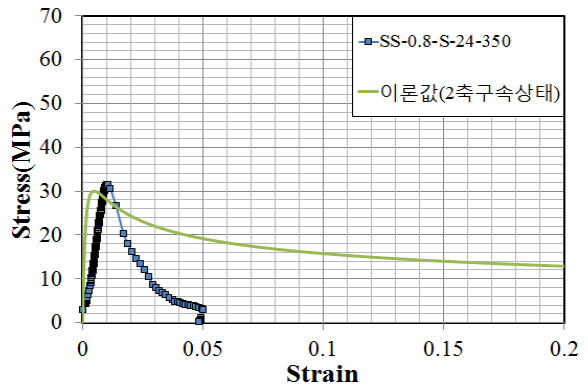
2축 구속 상태일 때의 구속 콘크리트의 응력-변형률 곡선의 비교결과를 Table 3에 나타내었으며, 실험 결과와 이론 강도의 차이는 3~12% 정도로 나타나 이론 결과와 유사한 경향을 보인다.

반면에 실험결과와 Mander 모델과 비교하였을 때, 초기 접선의 기울기와 재료의 연성거동에서 차이가 발생하게 되었다. 초기 접선의 기울기가 상이한 이유는 하중 가력 부분에서의 편심의 영향과 실험체 지지 구조물의 변형의 영향으로 판단되며, 추후 연구에서 보완되어 실험이 진행될 예정이다. 두 번째로는 최대 강도를 지나 하중이 급격히 감소한 구간이 예상한 모델과 상이한 결과를 얻었다.

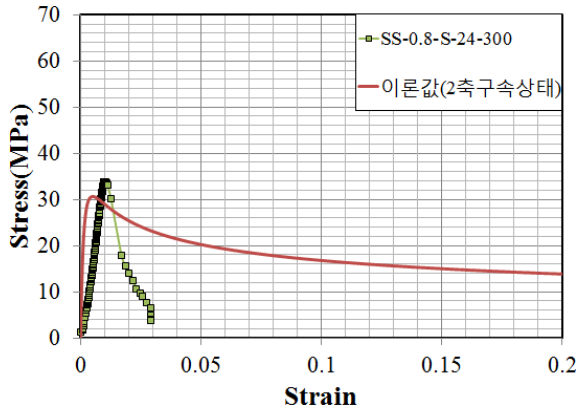
최대 강도 이후 급격히 강도가 저하한 이유는 내측 콘크리트의 취성적인 영향이 지배적으로 작용하였다는 것으로 판단되며, 상대적으로 약한 하중 가력부분에서의 취성과파괴도 결과에 영향을 준 것으로 판단된다. Fig. 6(b)에서 보이는 것과 같이 콘크리트의 파괴 방향은 외측에서 내측 방향으로 비스듬한 파괴 형상이 나타났다. 이러한 파괴에 의하여 콘크리트가 취성적인 파괴가 일어나게 된 것으로 판단된다.

Table 3. Comparisons Confined Concrete Strength in Biaxial Confining Conditions

Specimen	Compressive strength of confined concrete (MPa)		Error(%)
	test results	Mander's model	
SS-0.8-S-24-350	31.55	30.64	3.0
SS-0.8-S-24-300	33.82	30.03	12.6



(a) SS-08-S-24-350



(b) SS-08-S-24-300

Fig. 6 Comparisons Between Test Results and Mander's Model in Biaxial Confining State

4.3 3축 구속 상태일 때 구속 콘크리트의 응력-변형률 곡선

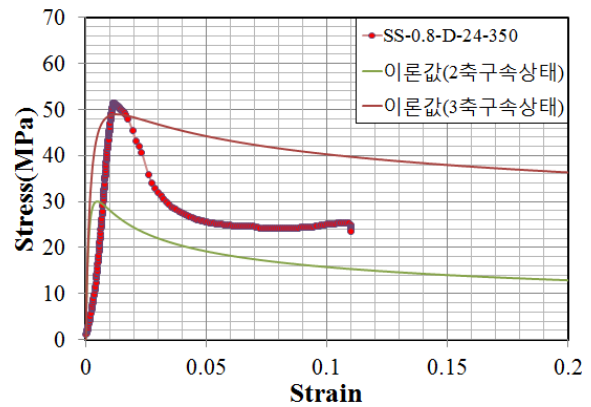
3축 구속 상태인 실험체의 실험결과를 정리해보면, Fig. 7와 Table 4와 같다. 콘크리트의 강도는 적게는 3.8%에서 20.6%정도 이론 값과 차이가 남을 알 수 있었으며, 최대 응력이 지나서는 급격한 강도의 감소 현상을 보였다. 반면, 이론 강도는 변형률이 0.2에 도달할 때 까지도 강도의 급격한 저하는 일어나지 않았고, 하중이 가해짐에 따라 서서히 강도가 감소하는 것으로 나타났다.

최대 압축강도 이후 실험결과가 이론 결과와 상이한 이유는 하중 가력부분이 취약하여 내부 튜브의 파괴가 유발되어 2축 구속 상태가 되었기 때문이다.

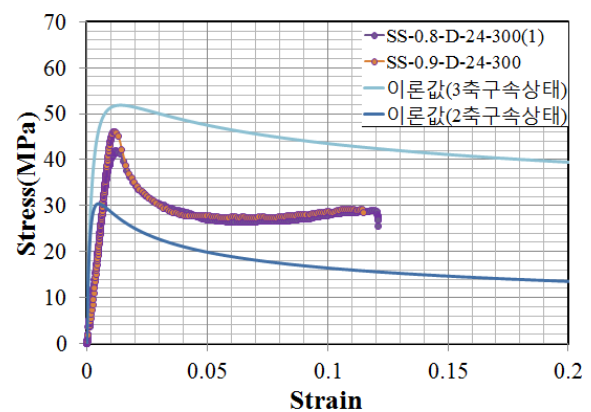
Fig. 6(a)은 대표적인 강재의 파괴 형태로 하중 가력부분에서부터 아래쪽으로 서서히 변형이 진행된 것을 알 수 있었다. 내측 튜브가 파괴가 일어남에도 불구하고, 2축 구속 상태로서 거동할 것이라는 예상과는 달리 3축 구속 및 2축 구속 상태의 중간에 응력-변형률 선도가 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉, 내측 튜브가 항복이나 좌굴이 일어날 경우, 2축 구속 상태로 존재한다는 가정은 실제보다 안전 측의 결과를 제공한다는 것을 유추해볼 수 있었다. 하지만, 정확한 DSCT의 구속 콘크리트의 응력-변형률 상태를 얻기 위해서는 가력부분의 보강이 필수적이라는 것을 짐작할 수 있었다.

Table 4. Comparisons Confined Concrete Strength in Triaxial Confining Conditions

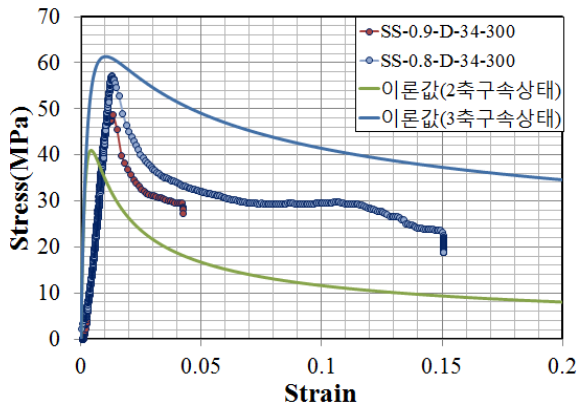
Specimen	Compressive strength of confined concrete (MPa)		Error(%)
	Test results	Mander's model	
SS-0.9-D-24-300	46.09	51.87	-11.1
SS-0.8-D-24-300(1)	41.84	51.87	-19.3
SS-0.8-D-24-300(2)	47.00	57.78	-18.7
SS-0.8-D-24-350	50.83	48.98	3.8
SS-0.9-D-35-300	48.72	61.35	-20.6
SS-0.8-D-35-300	57.06	61.35	-7.0



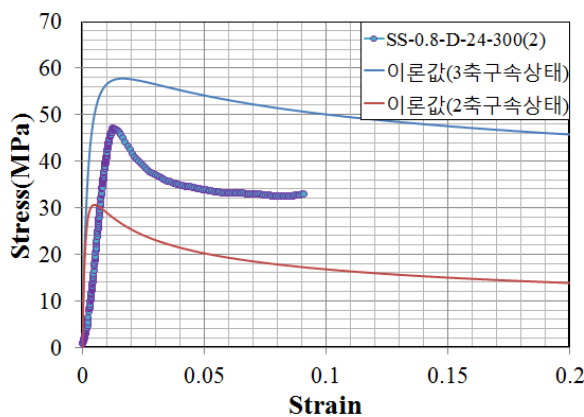
(a) SS-0.8-D-24-350



(b) SS-0.8-D-24-300(1) & SS-0.9-D-24-300



(c) SS-0.9-D-34-300 & SS-0.8-D-34-300



(d) SS-0.8-D-24-300(2)

Fig. 7 Comparisons Between Test Results and Mander's Model in Triaxial Confining State

5. 결론

본 연구에서는 DSCT부재의 구속효과를 연구하기 위해 콘크리트 부분만 하중을 가력한 일축 압축 실험을 수행하였다. 실험된 데이터와 Mander의 재료 모델과 비교를 하였고, DSCT부재의 콘크리트의 구속 강도에 관하여 분석하였다.

1. DSCT 기둥에서 내부 튜브의 유무는 콘크리트의 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 내부 튜브의 삽입 여부에 따라 콘크리트는 2축 혹은 3축 구속 상태로 존재하게 되며, 내부 튜브에 의하여 콘크리트의 강도와 연성 능력이 매우 높아짐을 알 수 있었다.

2. 이론적으로 내부 튜브의 파괴 후, 콘크리트는 2축 구속 상태인 것으로 가정되나, 실험 결과 내측 튜브가 파괴가 일어난 후에도 콘크리트의 강도는 2축

구속 상태의 응력-변형률 곡선보다 강도가 크게 유지가 됨을 알 수 있었다. 즉, 내측 튜브의 파괴 후에도 DSCT는 내부구속이 어느 정도 발휘되어 콘크리트는 2축 구속과 3축 구속의 사이에 존재한다는 것을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This experimental study had been conducted under the financial support provided by a grant (PA110020) from the Patented Formula Commercialization Program, funded by the Seoul Business Agency.

References

Park, J. S., Joo, H. J., Nam, J. H., and Yoon, S. J. (2010), "Structural Behavior of Flexurally Reinforced FRP-Concrete Composite Compression Member with FRP," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 1, No. 3, pp. 10-16.

Choi, J. W., Park, J. S., Nam, J. H., An, D. J., Kang, I. K., and Yoon, S. J. (2011), "An Experimental Study for the Compression Strength of Hybrid CFFT Pile," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 2, No. 1, pp. 30-39.

Kim, J. J., Noh, H. C., and Mahmoud, R. T. (2012), "Flexural Failure Design Criteria for Retrofitted RC Slabs using FRP-UHPC Hybrid System," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 3, No. 2, pp. 11-18.

Won, D. H., Han, T. H., Kim, J. H., Choi, J. H., and Kang, Y. J. (2012), "A Parametric Study on Seismic Performance of Internally Confined Hollow RC Columns," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 3, No. 2, pp. 28-35.

Im, S. B., Han, T. H., Han, S. Y., and Kang, Y. J. (2006), "Stress-Strain Relations of Concrete According to the Confining Conditions," *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 4, 2006, pp. 743-752.

Wei S., Mar S. T., Vipulanandan C., and Mantrala S. K. (1995), "Performance of new sandwich tube under axial loading: experiment," *J Struct Eng.*, 121(12), pp. 1806-1184.

- Han, T. H., J. Michael Stallings, and Kang, Y. J. (2010), "Nonlinear concrete model for double-skinned composite tubular columns," *Construction and Building Materials*, 24, pp. 2542-2553.
- Won, D. H., Han, T. H., Kim, S. J., and Kang, Y. J. (2013), "A Study on Optimum Confined Effect for Internally Confined Hollow CFT Columns under Uniaxial Compression," *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 2, pp. 397-407.
- Mander J. B., Priestley M. J. M, and Park R. (1988), "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of the structural Division*, ASCE 114(8), pp. 1804-1826.
- Popovics S. (1973), A numerical approach to the complete stress-strain curves of concrete, *Cem Concre Res*, 3(5), pp. 583-599.