

# 복합소재 부재에서 섬유유 양과 시편의 크기에 따른 콘크리트 구속모델

## Behavior of Concrete Confined with GFRP According to the Fiber Volume, Diameter and Length

이명\*                      이성우\*\*                      최석환\*\*\*                      정규상\*\*\*\*                      이영기\*\*\*\*\*  
Lee, Myung                      Lee, Sung Woo                      Choi, Sokhwan                      Jeong, Gyu Sang                      Lee, Young-Ki

### ABSTRACT

The behavior of stocky concrete-filled glass fiber reinforced polymer(GFRP) tubes was studied experimentally and analytically. The behavior is focused on the confining action of GRFP tube against concrete. In the experimental work, extensive tensile tests for GFRP tubes which have various fiber lay-out were conducted. And, also short length concrete filled GFRP tubes which have various tube thickness, diameter, and length were tested. In the analytical work, equations to describe the compressive stresses and strains at failure, as well as the entire stress-strain curve of the GFRP tubes were developed. A comparison between the experimental results and those of analytical results indicate that the proposed model provides satisfactory predictions for the compressive strengths, strains at failure, and stress-strain responses.

### 1. 서 론

유리섬유를 이용한 경제적인 콘크리트충전 복합소재(concrete-filled glass fiber reinforced polymer ; 이하 GFRP로 한다) 튜브에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>(1),(2)</sup> GFRP 튜브의 장점으로는 구조물 설계에 따라 다양한 강도의 설계가 가능하고, 튜브 자체가 거푸집으로써의 역할, 콘크리트를 염해로부터 보호하는 기능, 구속으로 인한 강도증진효과, 그리고 전단과 휨에 대한 보강 기능이 있고, 또한 전통적인 건설재료를 보완할 수 있다. 본 논문에서는 콘크리트 충전 GFRP 튜브의 압축거동을 연구함에 있어서 유리섬유의 적층방법, 튜브의 두께, 충전 콘크리트의 지름, 그리고 콘크리트의 압축강도 등을 변수로 다양한 실험을 수행하였다. 또한 실험결과를 이용하여 GFRP 튜브의 응력-변형률 곡선뿐만 아니라, 압축강도와 파괴 변형률을 예측하는 식을 개발하게 되었다.

\* (주)국민씨아이 기술개발팀 대리  
\*\* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수  
\*\*\* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 조교수  
\*\*\*\* 정회원 · 국민대학교 구조안전연구소  
\*\*\*\*\* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 조교수

## 2. 복합소재 튜브 시편의 인장시험

### 2.1 시험과정

시편의 인장시험은 ASTM Standard D2290의 방법을 기준으로 수행하였으며 시편폭(b)은 25mm, 튜브 모양 시편의 안쪽지름(D)은 100mm다.<sup>(3)</sup> 시험 장치 중 튜브에 인장력을 가하는 반원의 두 강판은 인장력이 고루 전달될 수 있도록 복합소재 튜브 시편의 곡률과 같도록 제작되었다. 파괴 예측면의 원주방향으로 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였고 하중 재하속도는 1.5mm/분이다. 사진 1은 시험 결과의 전형적인 형태이며, 구체적인 수치는 <표 1>에 주어져 있다.



사진 1 인장시험시편 시험 후의 모습

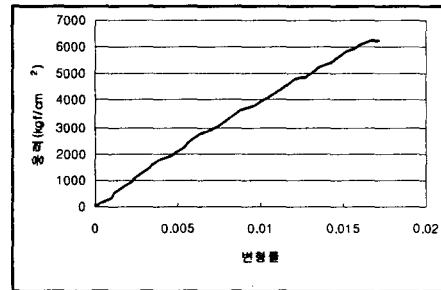


그림 1 020h1 응력-변형률 곡선

### 2.2 시험결과

그림 1에서 보듯이, 복합소재 튜브는 약간의 굴곡을 가진 거동을 보여주고 있고, <표 1>에서는 인장시험 결과를 보여주고 있다. 인장강도( $f_m$ )는 다음과 같다.

$$f_m = \frac{P}{2tb} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

여기서,  $P$  = 실험 파괴강도,  $t$  = 튜브 두께,  $b$  = 게이지를 붙인 부분의 튜브 폭,  $A$  = 튜브의 횡단면적을 나타낸다.

<표 1> 인장시험시편 결과

ID	t(mm)	P(tonf)	$f_m$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	ID	t(mm)	P(tonf)	$f_m$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
500h1	4.4	0.530	237.6	511h1	5.7	4.111	1471.8
500h2		0.694	311.0	511h2		3.927	1439.8
500h3		0.581	255.8	511h3		4.478	1652.3
020h1	2.0	6.253	6275.2	522h1	7.0	8.017	2317.4
020h2		6.457	6568.3	522h2		8.313	2323.4
020h3		6.477	6535.8	522h3		7.984	2260.5
030h1	2.7	8.935	6805.2	533h1	8.6	10.414	2545.6
030h2		8.874	6800.0	533h2		12.699	3025.0
030h3		9.435	7099.3	533h3		10.598	2529.3
002h1	2.2	1.112	1009.3	513h1	7.1	5.692	1601.9
002h2		1.091	971.9	513h2		5.539	1571.2
002h3		1.090	999.7	513h3		5.459	1445.5
003h1	2.8	1.785	1264.2	-			
003h2		1.877	1348.3				
003h3		1.928	1334.1				

\* 시편 ID : ID의 세자리 숫자는 유리섬유의 각 방향별로의 적층회수(숫자 차례대로 Fabric, F.W ±85°, F.W ±45°일 때의 경우)를 나타낸다.

<표 2>에서는 시험치 탄성계수와 ESAComp에 의한 해석치 탄성계수의 비교 결과를 보여주고 있다.<sup>(4)</sup>

<표 2> 인장시편시험의 시험치와 해석치의 탄성계수 비교

ID	E <sub>y</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )		시험치 / 해석치	ID	E <sub>y</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )		시험치 / 해석치
	시험치	해석치			시험치	해석치	
500h1	137672	140007	0.983	002h1	84579	79130	1.069
500h2	148488		1.061	002h2	-		-
500h3	128399		0.917	002h3	77641		0.981
020h1	365262	374440	0.975	511h1	155829	160503	0.971
020h2	376839		1.006	511h2	-		-
020h3	386277		1.032	511h3	166383		1.037
030h1	364695	377499	0.966	-			
030h2	-		-				
030h3	392643		1.040				

### 2.3 인장시편시험 결과를 이용한 구속응력식

복합소재 튜브의 적층에 따른 구속압력( $f_r$ )과 인장응력과의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_r = \frac{2f_{th}t_f}{D} \quad (2)$$

여기서,  $f_{th}$  = 인장응력,  $t_f$  = 튜브두께,  $D$  = 코어 지름을 말한다. 구속압력을 구하는 식(2)를 튜브의 횡방향 구속압력식인 식(1)에 대입하면 다음과 같다.

$$f_r = \frac{P}{D \cdot b} \quad (3)$$

여기서,  $b$  = 튜브 폭(2.5cm),  $P$  = 인장시편시험시 파괴하중

인장시편시험을 통하여 각 적층구조(Fabric구조, F.W ±85°, F.W ±45°)에 따른 하중  $P$ 와 적층수(ply)에 따른 함수로 나타내어 회귀분석을 수행하면 그림 2와 같다. 인장시편 하중에 관한 회귀분석식은 다음과 같다.

$$P = 0.12x + 3.5134y^{0.8641} + 0.4445z^{1.3040} \text{ [tonf]} \quad (4)$$

여기서,  $x$ =Fabric 적층수(ply),  $y$ =F.W ±85° 적층수,  $z$ =F.W ±45° 적층수를 말한다.

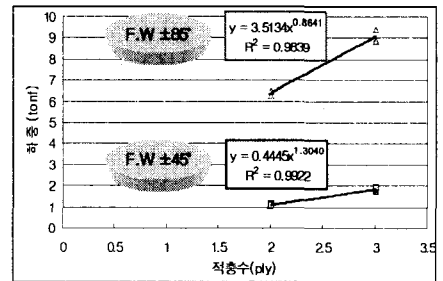


그림 2 하중과 적층수에 따른 회귀분석

위의 회귀식에서 Fabric 인장시편시험 시 하중은 거의 레진이 받으므로 선형거동이라 가정할 수 있으므로  $0.12x$ 라 할 수 있다. 서로 다른 적층구조의 시험결과에 의해 수립된 회귀분석식과 세 가지 적층구조를 합해서 인장시편시험을 수행한 결과와 비교하면 거의 같은 결과를 보인다(표 3). 유리섬유를 이용한 적층 설계시 구속응력을 추정할 때, Fabric구조, F.W ±85°, F.W ±45° 설계일 경우 식(4)를 식(3)에 대입하여 설계에 반영한다.

<표 3> 인장시편시험 P에 대해서 결과치와 해석치 비교

ID	P(tonf)		시험치 / 해석치	ID	P(tonf)		시험치 / 해석치
	시험치	해석치			시험치	해석치	
511h1	4.1	4.5	0.91	533h1	10.4	11.5	0.90
511h2	3.9		0.88	533h2	12.7		1.10
511h3	4.5		1.00	533h3	10.6		0.92
522h1	8.0	8.1	0.99	513h1	5.7	5.9	0.97
522h2	8.3		1.02	513h2	5.5		0.93
522h3	8.0		0.99	513h3	5.5		0.93

### 3. GFRP 단주 압축시험

#### 3.1 시험과정

GFRP 부재의 일축 압축거동을 예측하는 모델링을 개발하는데 있어서 다양한 시험 결과 값들은 보다 정확한 거동을 예측하는데 있어서 중요하므로, 유리섬유의 적층방법과 내경, 그리고 콘크리트의 설계강도를 달리하여 시험을 수행하였다(표 4).

콘크리트 공시체와 콘크리트충전 복합소재 시편 모두 재하면을 연마처리 하였으며, 시험시 변형률은  $\epsilon=0.003$ /분이었다. 그리고 콘크리트 공시체는 재하판과 시편 사이에 전단구속을 줄이기 위해서 Teflon 쉬트와 스테아르산과 바셀린(petroleum jelly)을 이용해서 만든 윤활제를 사용하였다. 모든 시험에서 초기의 과도한 변형으로 생기는 강성이 낮은 부분을 제거하기 위해서 일차 재하(preloading)를 실시하였다. 변위를 측정하기 위해서 변위계를 상하 재하면 사이에 시편에 양면에 각각 설치하였고, 또한 튜브의 표면에 2개씩의 변형률 게이지를 축방향과 횡방향으로 부착하였다. 시험 장비로는 최대하중을 500tonf까지 가할 수 있는 자동유압 재하 장비를 사용하였다.

〈표 4〉 단주압축시험 종류

ID	t (mm)	D (mm)	L (mm)	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{cu}$ (MPa)	Fabric	F.W ±85°	F.W ±45°
100H100	1.23	100	200	314.2	60	1	-	-
100H300	2.60	100	200	314.2	60	3	-	-
100H500	4.35	100	200	314.2	60	5	-	-
100H00.50	0.65	100	200	314.2	60	-	0.5	-
100H010	1.10	100	200	314.2	60	-	1	-
100H020	1.98	100	200	314.2	60	-	2	-
100H030	2.65	100	200	314.2	60	-	3	-
100H001	1.10	100	200	314.2	61	-	-	1
100H001	2.18	100	200	314.2	61	-	-	2
100H003	2.75	100	200	314.2	61	-	-	3
100H511	5.70	100	200	314.2	61	5	1	1
100H522	6.98	100	200	314.2	62	5	2	2
100H533	8.55	100	200	314.2	62	5	3	3
100H513	7.05	100	200	314.2	62	5	1	3
150H522	6.98	150	300	314.2	70	5	2	2
100_250H522	6.98	100	250	314.2	73	5	2	2
100_300H522	6.98	100	300	314.2	73	5	2	2
100N511	5.70	100	200	261.5	75	5	1	1
100N522	6.98	100	200	261.5	75	5	2	2
100N533	8.55	100	200	261.5	75	5	3	3

\* t = 튜브 두께, D = 코어 지름, L = 시편 길이,  $f_{cm}$  = 콘크리트 강도

\*\* 시편 I.D : ID의 첫째 세자리 숫자는 시편의 직경(mm), 영대문자는 콘크리트 강도(H:고강도, N:일반강도), 뒤쪽 세자리 숫자는 유리섬유의 각 방향별로의 적층회수(숫자 차례대로 Fabric, F.W ±85°, F.W ±45° 일 때의 경우)를 나타낸다.

#### 3.2 시험결과

GFRP 부재의 단주압축시험 결과, 모든 시편의 응력-변형률 곡선에서 두 가지 뚜렷한 변화구간이 발견되었다. 첫째 구간은 충전 콘크리트만 파괴되는 구간인데 콘크리트 공시체 파괴 거동과 비슷하고, 둘째 구간은 충전 콘크리트의 파괴로 인해 튜브가 구속 효과가 발생하여 매우 큰 연성을 나타내는 구간이다. 처음 구간의 기울기는 콘크리트 공시체의 탄성계수  $E_1$ , 두 번째 구간의 기울기는 튜브의 횡방향 탄성계수  $E_2$ 라 할 수 있으며 튜브의 횡방향 구속으로 인해 강도와 연성이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 〈표 5〉에서는 단주압축시험 결과를 보여주고 있다.

〈표 5〉 단주압축시험 결과

I.D	P(tf)	f <sub>cc</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>cu</sub>	I.D	P(tf)	f <sub>cc</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>cu</sub>
100H100-1	23.14	294.6	-	100H522-1	120.00	1527.9	-
100H100-2	24.80	315.7	0.00340	100H522-2	125.44	1597.1	0.07071
100H300-1	33.93	432.1	0.00529	100H522-3	121.84	1545.1	0.07292
100H300-2	30.60	389.7	0.00460	100H533-1	161.36	2054.6	0.08288
100H500-1	37.44	476.8	0.00629	100H533-2	145.42	1849.8	0.07524
100H500-2	39.85	507.4	0.00558	100H533-3	136.08	1727.8	0.07862
100H00.50-1	35.66	454.1	0.00660	100H513-1	95.84	1218.1	0.05221
100H00.50-2	33.35	424.7	0.00798	100H513-2	99.84	1259.1	0.05696
100H010-1	53.52	678.0	0.02179	100H513-3	90.26	1143.4	0.04813
100H010-2	65.56	834.7	0.04072	150H522-1	207.81	1176.0	0.04554
100H020-1	86.57	1102.2	0.04899	150H522-2	208.09	1177.5	0.04217
100H020-2	89.60	1140.8	0.04594	100_250H522-1	122.10	1554.6	-
100H030-1	114.16	1453.5	0.06901	100_250H522-2	128.19	1632.2	0.05571
100H030-2	106.35	1354.1	0.06722	100_300H522-1	-	-	-
100H001-1	27.01	343.9	0.00453	100_300H522-2	-	-	-
100H001-2	29.02	369.4	0.00499	100N511-1	76.98	980.1	0.05421
100H002-1	28.15	358.4	0.00775	100N511-2	69.47	884.6	0.04992
100H002-2	32.65	413.9	0.00709	100N511-3	80.09	1019.8	0.05180
100H003-1	36.38	463.3	0.00802	100N522-1	113.59	1446.3	0.07258
100H003-2	35.17	447.8	0.00997	100N522-2	109.00	1387.8	0.06555
100H511-1	74.35	944.7	0.03887	100N522-3	113.42	1444.1	0.06952
100H511-2	77.10	981.7	0.03749	100N533-1	147.10	1872.9	0.08508
100H511-3	76.37	972.2	0.04396	100N533-2	137.89	1755.6	0.07468

\* t = 튜브 두께, P = 파괴하중, f<sub>cc</sub> = 파괴응력, ε<sub>cu</sub> = 콘크리트 파괴 변형률

### 3.3 콘크리트 구속모델 개선연구

#### (1) 본 연구를 통한 새로운 구속모델 제안

본 연구에서 튜브는 축방향 강성을 고려하지 않고 횡방향 구속력이 부재의 강도를 지배한다는 판단아래 Samaan et al.(1998)의 구속모델식을 이용하였다.<sup>(5)</sup> GFRP 부재의 응력은 네 개의 매개변수 관계를 이용한 식 (5)로 나타내어진다.

$$f_{cc} = \frac{(E_1 - E_2) \epsilon_c}{\left[ 1 + \left( \frac{(E_1 - E_2) \epsilon_c}{f_o} \right)^n \right]^{1/n}} + E_2 \epsilon_c \quad (5)$$

여기서, f<sub>cc</sub> = 콘크리트의 일축압축 응력, n = 곡률보정계수(1.5), ε<sub>c</sub> = 콘크리트의 일축압축 변형률, 그리고 E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> = 1, 2차 탄성계수, f<sub>o</sub> = 2차 탄성곡선의 y절편 응력값이다.

식(5)의 매개변수에 관한 값을 추정하기 위하여 인장시험의 결과와 단주압축시험의 결과를 이용하여 회귀분석을 수행하였다.

#### ① 곡률보정계수(n)

곡률보정계수는 식 (5)에 다양한 n값을 대입한 후 시험결과와 비교하여 1.5가 가장 타당하다는 결론을 얻었고 그림 3에서 보여주고 있다.

#### ② 구속된 콘크리트의 극한변형률(ε<sub>cu</sub>)

구속된 콘크리트의 극한변형률(ε<sub>cu</sub>)은 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f'_{cc} - f_o}{E_2} \quad (6)$$

여기서,  $f'_{cc}$  = 구속된 콘크리트의 강도이다.

구속의 효율성은 구속된 콘크리트의 강도( $f'_{cc}$ )와 구속되지 않은 콘크리트의 강도( $f_{ck}$ )비로 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\frac{f'_{cc}}{f_{ck}} = 1 + k_1 \frac{f_r}{f_{ck}} \quad (7)$$

여기서,  $k_1$  = 구속유효계수이다. 식(7)을 구속유효계수에 관한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$k_1 = \frac{f_{ck}}{f_r} \left( \frac{f'_{cc}}{f_{ck}} - 1 \right) \quad (8)$$

단주압축시험 결과를 이용하여 식(8)의  $k_1$ 에 대입한 후, 회귀분석을 수행한 것이 그림 4이다.

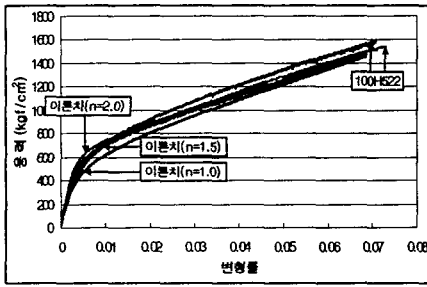


그림 3 100H522 시험결과를 이용한  
폭률보정계수

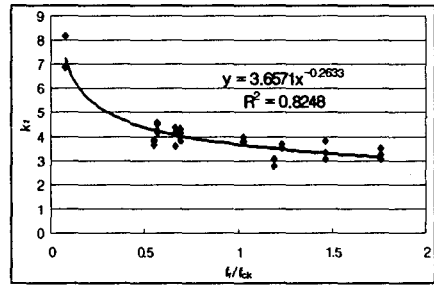


그림 4  $k_1$  회귀분석

그림 4의 결과를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$k_1 = 3.6571 \left( \frac{f_r}{f_{ck}} \right)^{-0.2633} \quad (9)$$

식(9)을 식(7)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 구속된 콘크리트( $f'_{cc}$ )의 강도를 구할 수 있다.

$$f'_{cc} = f_{ck} \left[ 1 + 3.6571 \left( \frac{f_r}{f_{ck}} \right)^{0.7367} \right] \quad (10)$$

식(10)에 의해 구하여진 구속된 콘크리트의 강도는 콘크리트의 극한 변형률[식(6)] 계산에 사용된다.

순수한 콘크리트만의 파괴이후 튜브의 구속압력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_r = \frac{2f_m t_f}{D} = \frac{P}{D \cdot b} \quad (11)$$

튜브의 구속압력은 인장시편시험을 통하여 제안된 파괴하중[P : 식(4)]과 튜브의 폭, 그리고 코어지름을 이용하여 구해진다. 단 파괴하중이 Fabric구조, F.W ±85°, F.W ±45°의 조합으로 시편시험을 수행하였으므로 식(4)은 세가지 적층구조시에만 사용된다.

### ③ 1, 2차 탄성계수( $E_1, E_2$ )

1차 탄성계수( $E_1$ )는 Shah에 의해서 제안된 밀폐된 콘크리트의 초기 탄성계수식을 이용한다.<sup>(7)</sup> 그림 5에서 Shah가 제안한  $E_1$ 식과 ACI 기준  $E_1$ 식을 시편 100H522의 시험결과와 비교하여보면, ACI 기준식은 구속된 콘크리트의 초기  $E_1$ 보다 더욱 크게 나오고 Shah의 제안식이 더 적절한 것으로 보인다.

$$E_1 = 12613.53 \sqrt{f_{ck}} \text{ [kgf/cm}^2\text{]} = 3950 \sqrt{f_{ck}} \text{ [MPa]} \quad (12)$$

2차 탄성계수( $E_2$ )는 구속하는 튜브의 강성에 관한 함수이므로 시험결과를 이용하여 회귀분석을 수행한 결과

는 그림 6과 같다.

그림 6에서 보듯, 회귀분석을 수행하면 식(13)으로 나타내어진다.

$$E_2 = E_1 (0.0007 \frac{E_{th} t_f}{f_{ck} D} + 0.0278) \quad (13)$$

여기서,  $E_{th}$  = 튜브의 횡(원주)방향 탄성계수, 강성비(stiffness ratio) =  $E_{th} \cdot t_f / f_{ck} \cdot D$

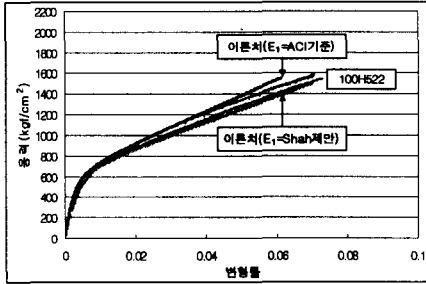


그림 5 100H522 시험결과를 이용하여 Shah의 제안식  $E_1$ 과 ACI 기준식  $E_1$  비교

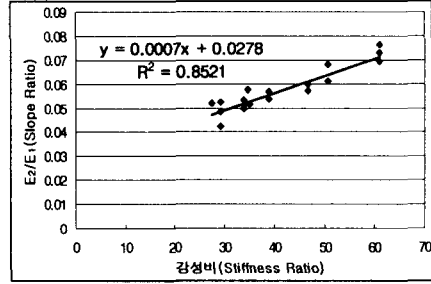


그림 6  $E_2$  회귀분석

#### ④ 2차 탄성곡선의 y절편 응력값( $f_0$ )

2차 탄성곡선의 y절편 응력값( $f_0$ )은 구속되지 않은 콘크리트 강도와 튜브에 의해서 생기는 구속압력의 함수이며, 단주압축시험을 통한 시험치  $f_0$ 값은 <표 6>으로 주어진다.

<표 6> 단주압축시험을 통한 시험치  $f_0$ 값

ID	100H513-1	100H513-2	100H513-3	100H513	150H522	100N511	100N522	100N533
$f_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	549.9	643.0	728.9	578.2	575.8	462.6	551.4	633.3

$f_0$ 는  $f_{ck}$ 과  $f_r$ 의 함수이므로 시험치  $f_0$ 를 가지고 시산법을 이용한 회귀분석 과정을 수행하면 다음의 식(14)으로 표현된다.

$$f_0 = 1.34 f_{ck} + 0.63 f_r + 17.9 \quad (R^2=95\%) \quad (14)$$

식(10)으로 구하여진 구속된 콘크리트의 강도( $f'_{cc}$ )와 식(13)으로 구해진 2차 탄성계수( $E_2$ ), 그리고 식(14)에 의한 2차 탄성곡선의 y절편 응력값( $f_0$ )을 식(6)에 대입하여 구속된 콘크리트의 극한 변형률을 구한다.

인장시편시험 결과와 단주압축시험 결과를 가지고 회귀분석을 수행한 후 제안된 식들을 이용하여 식(5)에 대입하여보면, 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선 거동을 추정할 수 있고 일축압축응력을 알 수 있다. 단, 다양한 콘크리트강도와 코어지름을 가진 압축부재설계 시 이용가능하고 튜브의 적층은 Fabric구조, F.W ±85°, F.W ±45° 설계 시에만 제안된 구속모델식을 이용할 수 있다.

#### (2) 이전 연구자들에 의한 모델식과 제안된 모델식의 비교

이전 연구자들에 의한 응력-변형률 모델과 이번 시험을 통해 제안된 구속모델을 시험결과에 적용하여 보면 그림 7과 같은 응력-변형률 곡선을 나타낸다.<sup>(8),(9),(10)</sup> 그림을 보면 Fardis 모델은 강도는 비슷하게 나오지만 변형률이 과소 평가됨을 알 수 있고 Mander 모델은 강도와 변형률 모두 과소 평가됨을 알 수 있다. 또한 Samaan 모델도 강도와 변형률 모두 과소 평가되고 Toutaji 모델은 강도는 비슷하나 변형률이 과대 평가됨을 알 수 있다. 그러나, 본 연구의 단주압

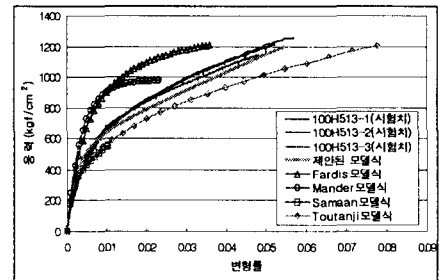


그림 7 100H513 시험결과와 여러 모델식의 응력-변형률 곡선

축시험을 통해 제안된 구속모델은 강도와 변형률이 시험결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 인장시편시험과 단주압축시험을 수행한 결과, 압축 부재의 거동에 영향을 미치는 요소는 콘크리트 강도, 튜브의 적층구조에 따른 구속효과 등이 있음을 알 수 있고, 복합소재를 이용한 압축부재설계 시 응력-변형률 거동과 압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다.

- 1) 유리 섬유유리 적층구조를 달리하여 GFRP 튜브를 사용함으로써 콘크리트 공시체에 비해 강도는 최대 7.1배, 변형률은 최대 40.5배까지 증가하는 결과를 보였다.
- 2) 이전의 연구자들에 의해 제시된 모델식에 본 연구를 통해 나타난 시험결과를 적용하여 보면 GFRP 압축부재의 거동 예측으로 적당하지 않음을 알 수 있다. 그러므로 시험을 통해 회귀분석을 수행한 후 구속모델을 제안하였고, 제안된 구속모델은 시험결과와 거의 비슷함을 확인하였다.
- 3) 압축부재의 휨강성을 증대하기 위해선 길이방향으로 섬유를 배치하고 구속효과를 발휘하기 위해선 유리섬유를 횡방향으로 배치하여 강도를 증대시킬 수 있음을 알 수 있다.
- 4) 제안된 구속모델은 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선 거동을 추정할 수 있고 일축압축응력을 알 수 있다. 단, 다양한 콘크리트강도와 코어지름을 가진 압축부재설계 시 이용가능하고 튜브의 적층은 Fabric구조 (L900), F.W  $\pm 85^\circ$ , F.W  $\pm 45^\circ$  설계 시에만 제안된 구속모델식을 이용할 수 있다.

#### 참고 문헌

1. 이명, 최석환, 이성우, 손기훈. 콘크리트충전 유리섬유 복합소재 기둥의 세장비 특성에 관한 실험적 연구. 한국콘크리트학회, 2001, 585~590.
2. 이명, 최석환, 이성우, 조남훈. 콘크리트충전 복합소재 합성부재의 횡구속 거동분석. 한국토목학회, 2002, 805~808.
3. Standard Test Method for Apparent Tensile Strength of Ring or Tubular Plastics and Reinforced Plastics by Split Disk Method. *American Society for Testing and Materials*, PA, 2000.
4. ESAComp V2.0 Software. Helsinki University of Technology, Finland, 2001.
5. Mirmiran, A., Samaan, M., and Shahawy, M., Model of concrete confined by fiber composites. *ASCE Structural Engineering*, V. 124, No. 9, 1998, pp. 1025~1031.
6. Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R.L., A study of failure of concrete under combined compressive stresses. *Engineering Experiment Station Bulletin No. 185*, Urbana, IL, 1928.
7. Ahmad, S.H. and Shah, S.P., Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement. *ACI J.* 1982, 79(6), pp. 484~490.
8. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., Theoretical stress-strain model for confined concrete. *J. Struct. Eng. Div., ASCE*, 1988, 114(8), pp. 1805~1826.
9. Fardis, M.N. and Khalili, H.H., Concrete encased in fiber glass reinforced plastic. *ACI J.* 1981, 78(6), pp. 440~446.
10. Saafi, M., Toutanji, H., and Li, Z., Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes. *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 4, July-August 1999, pp. 500~509.