

CFRP sheet로 감싼 원형 콘크리트 압축부재의 보강 효과

문경태¹, 박상렬^{2*}, 김문관³

Strengthening Effect of Axial Circular Concrete Members Wrapped by CFRP sheet

Kyoung-Tae Moon¹, Sang-Yeol Park^{2*}, Moon-Kwan Kim³

Abstract: Many studies have been carried out on carbon fiber-reinforced plastic sheet(hereafter CFRP sheet)-confined concrete specimens for improve structural performance of concrete structures. To complement the existing studies, a parametric study is conducted to examine the effect of various design parameters such as layers of CFRP sheet, size and aspect ratio of specimens, and overlap length. The behavior of CFRP-confined concrete is compared using stress-strain curves of each specimen. And the strengthening effect of CFRP sheet is examined by maximum compressive strength. As the layers of CFRP sheet increases, structural performance of CFRP-confined concrete is significant increased. If the overlap length is more than 5% of circumference, strengthening effect is not affected. In addition, a test database assembled from test results and existing studies is presented. Using these test database, accuracy and reliability of the existing strength models for CFRP-confined concrete are verified.

Keywords: CFRP sheet, Confinement, Concrete, Maximum compressive strength, Strength model, Strengthening effect, Stress-strain curve

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC)는 콘크리트의 단점인 인장강도를 철근으로 보강하여 수많은 건축물과 토목구조물에 광범위하게 적용되어지고 있다. 그러나 철근콘크리트는 콘크리트의 중성화와 철근의 부식, 하중 조건의 변화, 유지관리의 소홀로 인하여 구조물의 내력성능이 감소하게 되어 보강 대책이 절실히 요구된다(Kim, 2006).

내력 성능이 감소한 구조물의 보강방법으로는 철근콘크리트 부재와 강관을 에폭시로 부착하는 강관압착공법, 보나 기둥을 증설하거나 손상된 단면을 복구하거나 확대하는 방법이 주로 사용되었다. 그러나 이러한 보강방법은 구조물의 중량 증가, 넓은 작업 공간 요구와 이용 공간 제한, 보강재의 부식 등 많은 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 1980년대에 들어와서는 미국, 일본을 시작으로 복합섬유와 수지를 이용한 보강방법이 제시되었고 1990년대부터 복합섬유를 이용한 보강 효과에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으

나 대부분 휨부재에 편중되어 있다. 국내에서 압축부재에 대한 연구는 부재의 단면형상(Hwang, 2000), 보강량(Chung et al., 1998; Hwang, 2000; Hwang, 2001), 보강재의 겹침길이(Shin et al., 1995; Chung et al., 1998), 콘크리트의 강도(Hwang, 2001) 등의 영향에 대한 시험연구가 있다. 그러나 제한된 변수영역으로 인하여 고려하지 못한 부분이 존재하고 있어 기존 연구결과를 보완하기 위한 추가적인 실험이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 보강재의 겹수, 기둥의 크기효과, 형상비 및 겹이음 길이의 영향에 대해 시험을 수행하여 그 결과를 비교, 분석하였다. 그리고 FRP로 구속된 콘크리트의 강도모델 예측식이 많은 연구자들(Samaan et al., 1998; Miyauchi et al., 1999; Lam and Teng, 2002; Youm et al., 2004)에 의해 제안되어 있는데, 본 연구에서의 시험결과와 기존 연구결과를 정리하고 이를 바탕으로 기존에 제안된 강도예측모델들의 정확성을 검증하였다.

1.2 기존 연구결과

FRP 쉬트(sheet)를 이용하여 콘크리트 압축부재의 보강효과에 대한 연구는 1990년대부터 2000년대까지 활발히 연구가 진행되었으며, 특히 압축강도에 영향을 미칠 수 있는 영향인자에 대한 연구가 주를 이루었다. 압축강도에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자로는 부재의 단면형상, FRP 쉬트의 보강량, 쉬트 및 에폭시의 종류, 보강재의 겹이음 길이, 콘크리트 강도 등이 있으며, 이런 영향인자가 압축강도에 미치는 영향을 정

¹정회원, 제주대학교, 토목공학과 박사과정

²정회원, 제주대학교, 토목공학과 교수, 교신저자

³정회원, (주)경일종합건설 이사

*Corresponding author: sypark@jejunu.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2015년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2015년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

량적으로 평가하기 위해 많은 연구가 진행되었고 그 결과를 토대로 강도예측모델도 다양하게 제안되었다.

기존 연구에서 슈트를 이용한 보강방법은 부재의 측면 전체를 감싸는 방법과 띠처럼 감아서 보강하는 방법이 있으며, 대부분 측면 전체를 감싸는 방법을 사용하였다. FRP 슈트의 보강효과는 무보강공시체의 압축강도에 대한 보강공시체 압축강도의 비(이하, 강도비)로 표현하였으며 보강량(슈트 두께)에 대해 강도비는 비례적으로 증가하는 결과를 나타내었다(Chung et al., 1998; Miyauci et al., 1997; Miyauci et al., 1999; Hwang, 2000; Hwang, 2001). 슈트의 겹이음 길이가 증가함에 따라 압축강도도 증가한다(Shin et al., 1995)는 연구결과가 있으나 이 연구는 겹이음 길이만의 영향이 아니라 보강량에도 영향을 미치도록 변수를 정하여서 연구결과에 대해 재고할 필요가 있다. 콘크리트의 강도의 증가에 따라 강도비는 감소하는 경향(Kim, 2003; Park, 2001; Youm et al., 2004)이 나타나고 있다.

2. 시험계획

2.1 시험체

시험체는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 직경이 100 mm이고, 높이가 200 mm인 원주형 시험체를 기준으로 사용하였다. 크기 효과를 확인하기 위하여 직경이 75, 125 mm이고, 형상비(H/D)가 2.0인 시험체를 제작하였으며, 형상비의 영향은 압축시험기의 높이가 350 mm로 제한되므로 직경이 75 mm인 시험체를 사용하여 형상비의 영향을 확인하였다. 1차 시험에서

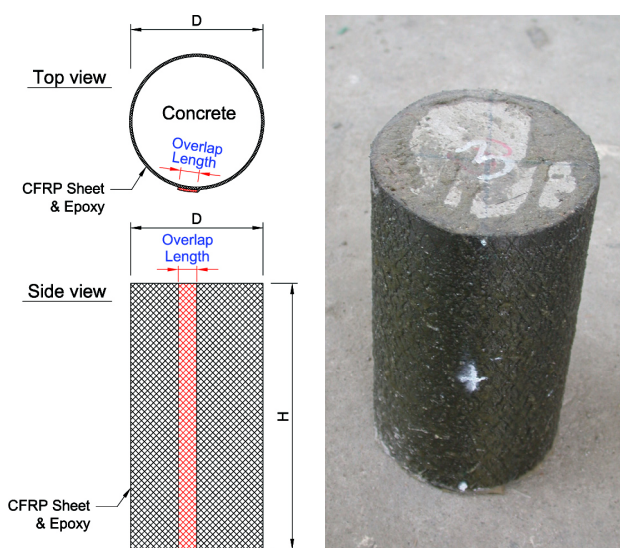


Fig. 1 Test Specimen

각 변수별로 시험체를 3개씩 제작하였으며, 데이터의 유실과 시험 결과의 큰 편차로 인해 추가 시험을 수행하였으며, 추가 시험시 변수별로 2개씩 제작하여 시험을 수행하였다. 각 시험체별 상세는 Table 1에 정리하였다.

2.2 사용 재료

2.2.1 콘크리트

시험체 제작에는 일반 레미콘 제품을 사용하였으며, 사용된 콘크리트의 재료시험결과를 Table 2에 정리하였다.

2.2.2 탄소섬유슈트(CFRP sheet)

본 연구에서는 일본 T사에서 제조된 FTS-C1-30을 사용하였으며 이 슈트는 폴리아크릴니트랄(Polyacrylonitrile, PAN)계인 탄소섬유슈트로 콘크리트 구조물의 유지보수에 많이 사용되고 있는 제품이다. Table 3에 제조사에서 제공한 재료의 물성치를 정리하였다.

2.2.3 에폭시(Epoxy)

탄소섬유슈트를 접착하는데 사용된 에폭시는 S사의 Sikadur-31 제품을 사용하였다. 이 에폭시는 모체의 습윤여부에 상관

Table 1 Summary of test parameters

Parameter	Specimen	Layers	Dimension (mm)	H/D & Overlap length (mm)
No. of layers	T0	-	D=100 H=200	H/D=2.0
	T1	1	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=30)
	T2	2	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=30)
Specimen size	T3	3	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=30)
	T4	-	D=75 H=150	H/D=2.0 (OL=30)
	T5	1	D=125 H=250	H/D=2.0 (OL=30)
Aspect ratio (H/D)	T6	1	D=75 H=225	H/D=3.0 (OL=30)
	T7	-	D=75 H=300	H/D=4.0 (OL=30)
	T8	-	D=75 H=300	H/D=2.0 (OL=0)
Overlap length	T9	1	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=15)
	T1	-	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=30)
	T10	-	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=45)

Table 2 Characteristics of concrete

Uniaxial compressive strength (MPa)	33.3
Slump (cm)	9.8
Maximum size of aggregate (mm)	25
Type of cement	Portland Type 1
Air content (%)	3.2

Table 3 Mechanical properties of CFRP sheet

Model	FTS-C1-30
Tensile strength (MPa)	3,480
Modulus of elasticity (MPa)	2.30×10^5
Thickness (mm)	0.17
Density (g/cm^3)	1.82
Ultimate elongation at break (%)	1.5

Table 4 Mechanical properties of epoxy

Model	Sikadur-31
Tensile strength (MPa, 14-day)	25
Bond strength (MPa, 14-day)	16.8
Modulus of elasticity (MPa, 7-day)	2,689.7

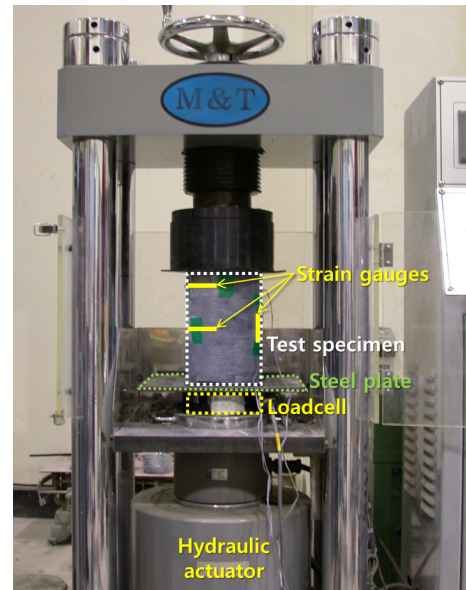
없이 시공이 가능하고 다양한 건설재료에 대한 접착력이 매우 우수하며, 고강도, 고탄성, 내마모성, 내충격성이 우수한 것으로 알려져 있다. Table 4에 에폭시의 물성을 정리하였다.

2.3 시험 장치 및 측정 데이터

시험은 M사에서 제작한 압축강도시험기, MT-150AC(1,470 kN)를 사용하였으며, Photo 1에 나타난 것과 같이 시험체를 설치하여 시험을 수행하였다. 시험시 측정된 데이터는 축방향 하중과 변위, 시험체 중앙에서의 중,횡 변형률, 시험체 상단에서의 횡방향변형률을 측정하였으며, 데이터 수집은 M사의 동적변형률측정기(MDS16)를 사용하였다.

3. 시험 결과 및 분석

원형공시체에 CFRP 쉬트로 보강한 시험체에 대하여 일축 압축시험을 수행한 결과 Table 5와 같은 결과를 얻었으며, 1차 시험결과는 1~3, 추가시험결과는 4~5로 표시하였다. Table 5에는 각 시험체 및 변수별 최대하중, 압축강도, 강도비와 파괴 모드를 정리하였으며, 시험결과 중 편차가 큰 데이터는 제외하여 분석하였다. T6-1 시험체는 Loadcell과 동적변형률기 간의 연결 불량으로 인해 하중값을 얻을 수 없었다.

**Photo 1** Test setup

3.1 보강 겹수에 따른 영향

CFRP 쉬트의 겹수에 따른 보강효과를 검토하기 위하여 쉬트를 1겹(T1), 2겹(T2), 3겹(T3)으로 보강하여 압축강도시험을 수행하고, 무보강 시험체(T0)와 비교하였다. Fig. 2는 변수별 응력-변형률 선도를 보여주고 있으며, 보강 겹수가 증가할수록 최대응력과 변형률 모두 증가하는 경향을 나타내고 있다. CFRP 쉬트의 보강 겹수에 대한 보강효과를 확인하기 위하여 보강 겹수에 대한 강도비(Strengthening ratio, f'_{cc}/f'_{co})를 Fig. 3에 나타내었다. CFRP 쉬트의 보강 겹수가 증가함에 따라 강도비가 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 CFRP 쉬트의 고탄성적 특성으로 인해 보강 겹수가 증가함에 따라 횡구속압이 선형적으로 증가하며, 이로 인해 압축강도가 증가하기 때문이다. 보강 겹수에 대한 강도비를 회귀 분석한 결과 식 (1)과 같은 경향을 보이고 있으며, 결정계수 (R^2)가 0.99로 매우 높은 상관성을 보이고 있다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.96n + 1 \quad R^2 = 0.99 \quad (1)$$

여기서, n 은 보강재의 겹수이다.

3.2 시험체의 크기의 영향

시험체의 크기에 따른 보강효과를 검토하기 위해 시험체의 직경을 75, 100, 125 mm로 변화하여 시험을 수행하였다. 형상비(H/D)는 2.0으로 고정하였으며, CFRP 쉬트는 모두 1겹으로 보강하여 결과를 비교하였다. Fig. 4는 변수별 응력-변형률 선도를 보여주고 있으며 직경이 커질수록 최대응력이 작

Table 5 Summary of test results

Parameter	Specimen	Max Load (kN)		Uniaxial Strength (MPa)		Strengthening ratio (f'_{cc}/f'_{co})	Failure Mode			
		Each	Average	Each	Average					
Unconfined	T0	1	237.97	261.35	30.32	33.29	-	Shear failure	Whole	
		2	284.72		36.27		-			
		3	264.64		33.71		-			
		4	245.90		31.32		-			
1	T1	1	583.61	547.48	74.35	69.74	2.23	Brittle failure after FRP Tension failure	Top	
		2	549.50		70.00		2.10		Bottom	
		3	576.26		73.41		2.20		Top	
		4	520.38		66.29		2.04		Top	
		5	507.64		64.67		1.99		Top	
No. of layers	2	T2	1	741.85	735.16	94.50	93.65	2.84	Brittle failure after FRP Tension failure	Top
			2	741.89		94.51		2.84		Bottom
			3	742.00		94.52		2.84		Bottom
			4	726.77		92.58		2.85		Top
			5	723.27		92.14		2.83		Bottom
3	T3	1	1014.30	1007.18	129.21	128.30	3.88	Brittle failure after FRP Tension failure	Top	
		2	994.21		126.65		3.80		Bottom	
		3	1033.12		131.61		3.95		Bottom	
		4	976.68		124.42		3.83		Bottom	
		5	1017.59		129.63		3.99		Top	
150/75	T4	1	357.88	434.15	81.05	98.32	2.43	Bond failure at overlap	Bottom	
		2	516.38		116.94		3.51		Top	
		3	446.24		101.06		3.04		Bottom	
		4	411.87		93.28		2.87		Bottom	
		5	438.39		99.28		3.05		Bottom	
Specimen size	200/100	T1	1	583.61	547.48	74.35	69.74	2.23	Brittle failure after FRP Tension failure	Top
			2	549.50		70.00		2.10		Bottom
			3	576.26		73.41		2.20		Top
			4	520.38		66.29		2.04		Top
			5	507.64		64.67		1.99		Top
250/125	T5	1	426.38	536.29	34.76	43.72	1.04	Bond failure at overlap	Top	
		2	579.32		47.23		1.42		Bottom	
		3	691.65		56.39		1.69		Top	
		4	503.30		41.03		1.26		Bottom	
		5	480.80		39.20		1.21		Top	
150/75	T4	1	357.88	434.15	81.05	98.32	2.43	Bond failure at overlap	Bottom	
		2	516.38		116.94		3.51		Top	
		3	446.24		101.06		3.04		Bottom	
		4	411.87		93.28		2.87		Bottom	
		5	438.39		99.28		3.05		Bottom	
Aspect ratio (H/D)	225/75	T6	1	-	329.60	-	74.64	-	Bond failure at overlap	Bottom
			2	366.42		82.98		2.49		Top
			3	327.57		74.18		2.23		Bottom
			4	305.09		69.09		2.12		Top
			5	319.33		72.32		2.22		Top
300/75	T7	1	342.94	286.58	77.67	64.90	2.33	Bond failure at overlap	Top	
		2	226.95		51.40		1.54		Top	
		3	273.82		62.01		1.86		Bottom	
		4	302.97		68.61		2.11		Top	
		5	286.24		64.83		1.99		Bottom	
0	T8	1	347.28	315.80	44.24	40.23	1.33	Bond failure at overlap	Top	
		2	335.60		42.75		1.28		Whole	
		3	251.13		31.99		0.96		Whole	
		4	310.52		39.56		1.22		Whole	
		5	334.43		42.60		1.31		Whole	
15	T9	1	491.65	519.21	62.63	66.14	1.88	Bond failure at overlap	Top	
		2	535.31		68.19		2.05		Bottom	
		3	538.42		68.59		2.06		Top	
		4	522.08		66.51		2.05		Bottom	
		5	508.61		64.79		1.99		Bottom	
Overlap length (mm)	30	T1	1	583.61	547.48	74.35	69.74	2.23	Brittle failure after FRP Tension failure	Top
			2	549.50		70.00		2.10		Bottom
			3	576.26		73.41		2.20		Top
			4	520.38		66.29		2.04		Top
			5	507.64		64.67		1.99		Top
45	T10	1	511.01	523.64	65.10	66.71	1.96	Brittle failure	Bottom	
		2	526.06		67.01		2.01		Top	
		3	530.40		67.57		2.03		Top	
		4	521.11		66.38		2.04		Bottom	
		5	529.63		67.47		2.07		Top	

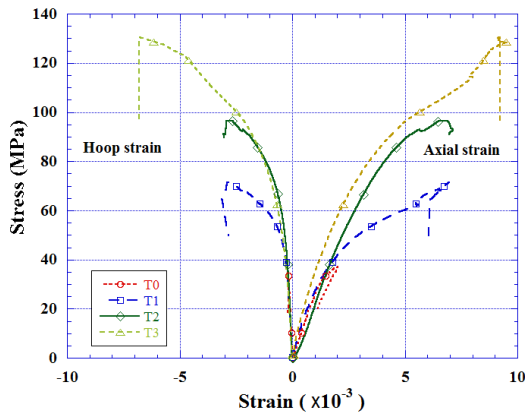


Fig. 2 Stress-strain curves (layers)

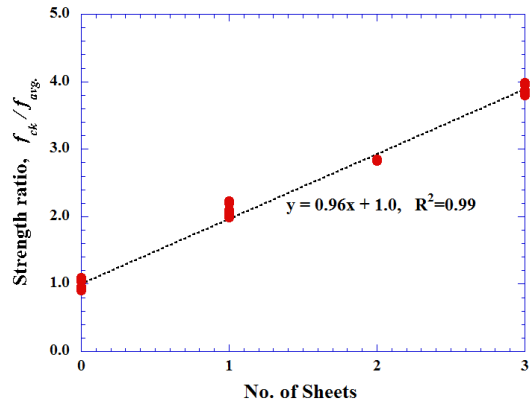


Fig. 3 Effect of layers on strengthening ratio

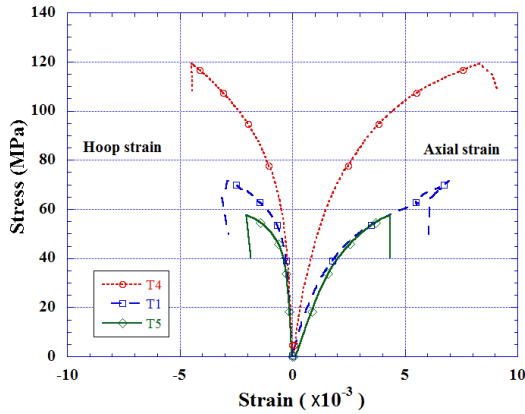


Fig. 4 Stress-strain curves (diameter effect)

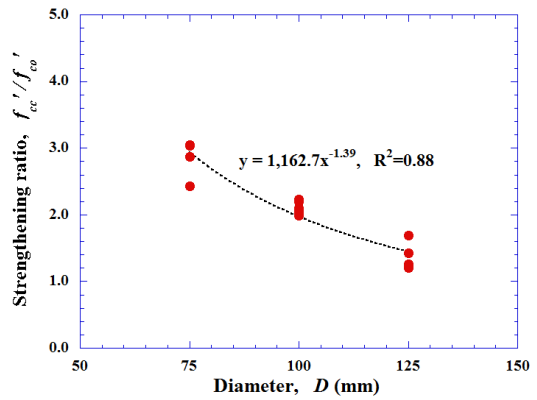


Fig. 5 Effect of diameter on strengthening ratio

아졌고, 변형률 또한 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 직경에 대한 강도비를 나타낸 것으로 시험체의 직경이 증가함에 따라 보강효과는 감소함을 알 수 있으며, 이를 통해 횡구속압(f_b , 식 (4))이 직경에 반비례한다는 이론을 시험을 통해 증명할 수 있었다. 식 (2)는 직경에 대한 강도비를 회귀분석한 결과이며, 결정계수 R^2 은 0.83이다.

$$\frac{f'_{cr}}{f'_{co}} = 1,162.7 D^{-1.39} \quad R^2 = 0.88 \quad (2)$$

여기서, D 는 시험체의 직경이다.

3.3 형상비 영향

시험체의 형상비(H/D)에 따른 보강효과를 확인하기 위하여 동일한 직경(75 mm)에서 형상비를 2~4로 변화시켜 보강효과를 비교하였다. Fig. 6은 T4, T6, T7 시험체의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로, 형상비가 커질수록 최대 응력과 최대 변형률이 감소하였으며, 이는 세장비의 영향으로 응력이 감소하는 것으로 판단된다. 같은 응력 값에서 형상비가 커짐

에 따라 변형률이 증가하였고, 같은 변형률 값에서는 형상비가 커짐에 따라 응력이 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 세장비와 임계응력간의 관계를 그대로 나타내고 있다. Fig. 7은 형상비에 따른 강도비를 나타낸 것으로 형상비가 증가함에 따라 강도비가 오목곡선적으로 감소하고 있으며 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{f'_{cr}}{f'_{co}} = 3.87 \left(\frac{H}{D} \right)^{-0.46} \quad R^2 = 0.73 \quad (3)$$

여기서, D 는 시험체의 직경, H 는 시험체의 높이이다.

3.4 겹이음길이의 영향

겹이음길이의 영향에 대해서는 Shin et al.(1995)와 Chung et al.(1998)에 의해 연구된 바가 있으나 겹이음길이의 범위를 Shin et al.(1995)는 둘레의 20~120%로, Chung et al.(1998)은 둘레의 50~150%로 결정하여 실험을 수행하였다. 이들의 연구결과 겹이음길이가 둘레의 20%인 경우 겹쳐 이은 부분에서 파괴가 발생하나 구속효과에는 큰 차이가 없었으며, 30%이

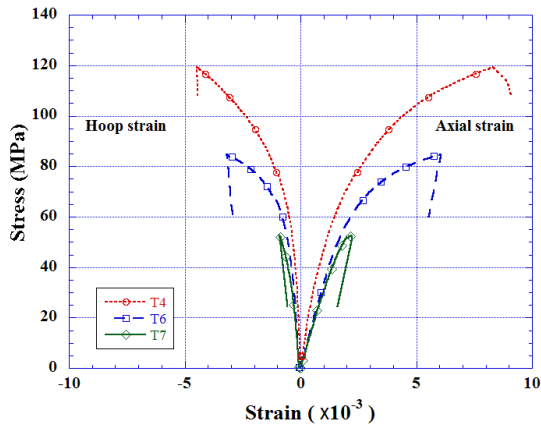


Fig. 6 Stress-strain curves (aspect ratio)

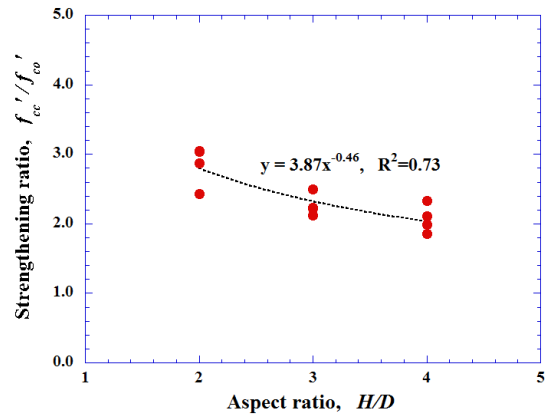


Fig. 7 Effect of aspect ratio on strengthening ratio

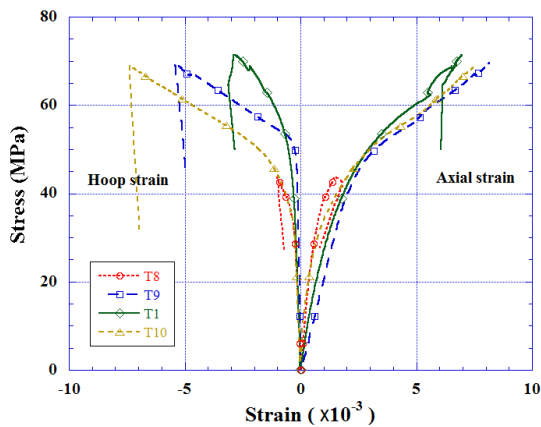


Fig. 8 Stress-strain curves (overlap length)

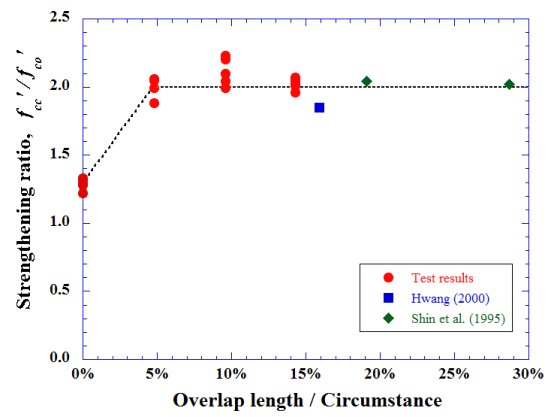


Fig. 9 Effect of overlap length on strengthening ratio

상인 경우 보강효과에 영향을 주지 않는다고 발표하였다. 따라서 본 논문에서는 겹이음길이가 둘레의 20% 미만인 경우 보강효과에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위하여 시험을 수행하였다. 겹이음길이의 범위를 둘레의 0~15%로 정하였으며, 5%간격으로 변화하여 시험을 수행하였다. Fig. 8은 변수별 응력-변형률을 나타내고 있으며, 겹이음길이가 없는 T8 시험체만 응력과 변형률이 작게 나타나고 겹이음길이가 5~15%인 T9, T1, T10 시험체는 축방향 응력-변형률 거동이 유사함을 확인할 수 있다. Fig. 9는 겹이음길이에 대한 강도비의 영향을 보여주고 있으며, 보강비(Confinement ratio, f_l/f'_{co})가 동일한 기존연구결과(Hwang, 2000; Shin et al., 1995)와 함께 분석하였다. 겹이음길이가 없는 경우(T8)는 겹이음부가 전체적으로 벌어지면서 할렬파괴 형태를 보였으며, 겹이음길이가 5%이상인 경우에는 대부분 겹이음부분이 떨어져 나가며 파괴되었다. 겹이음길이가 없는 경우에는 약 30%정도의 보강효과가 나타났으며, 겹이음길이가 5%이상인 경우에는 약 100%의 보강효과가 일정하게 나타났다. 따라서 CFRP 슈트로 보강하는 경우 겹이음길이를 둘레의 5% 이상으로 시공해

도 보강효과에 큰 영향이 없다.

Fig. 9에서 겹이음길이가 10%인 시험체(T1)의 경우 보강효과가 120%정도로 다른 시험체에 비해 크게 나타났는데, 이는 다른 시험체들과 달리 겹이음부에서 파괴되지 않고 CFRP 슈트의 인장파단에 의해 파괴되므로 구속효과가 더 크게 나타나는 것이다. 겹이음부에서의 파괴는 겹이음길이 뿐만 아니라 에폭시의 부착강도도 영향을 미치는 것으로 판단되며 에폭시의 부착강도에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. CFRP 슈트로 구속된 콘크리트의 강도추정

4.1 FRP로 구속된 콘크리트의 강도추정에 대한 기존연구

회구속된 콘크리트에 대한 압축강도 추정식은 대부분 다음과 같은 형태로 정리된다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (4)$$

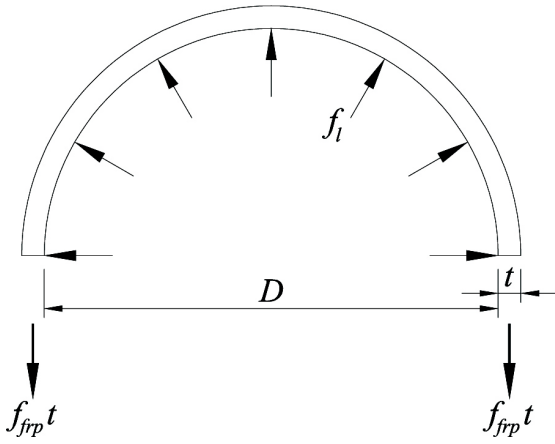


Fig. 10 Confining action of FRP composite

Table 6 Strength models for FRP confined concrete

Model	k_1
Karbhari and Gao (1997)	$2.1 \left(\frac{f_l}{f_{co}'} \right)^{-0.13}$
Samaan et al. (1998)	$6.0 f_l^{-0.3}$
Miyauchi et al. (1999)	2.98
Saafi et al. (1999)	$2.2 \left(\frac{f_l}{f_{co}'} \right)^{-0.16}$
Toutanji (1999)	$3.5 \left(\frac{f_l}{f_{co}'} \right)^{-0.15}$
Lam and Teng (2002)	2.0

여기서, f_{cc}' 는 FRP로 보강된 콘크리트의 최대압축강도, f_{co}' 는 무보강 콘크리트의 최대압축강도, f_l 은 횡구속압, k_1 은 횡구속유효계수이다. 이 모델은 Richart et al.(1928)이 유압으로 구속한 콘크리트 시험체에 대해 실험한 결과를 정리하여 최초로 제안한 식이며, 제안시 k_1 은 4.1이었다. 이 후 다른 연구자들에 의해 락철근이나 나선철근으로 횡구속된 콘크리트의 강도추정식이 발표되었다. 식 (4)가 FRP로 구속된 콘크리트에 대해서도 직접 적용이 가능하다는 것은 Fardis and Khalili(1982)에 의해 제안되었으며, Fig. 10에 나타난 것과 같이 FRP 인장강도에 의한 횡구속압(f_l)은 구속된 콘크리트의 포아송 효과에 의한 팽창응력과 같다고 가정하였다. 따라서 횡구속압은 식 (5)와 같이 정리된다.

$$f_l = \frac{2f_{frp}t}{D} \quad (5)$$

여기서, f_{frp} 는 FRP의 인장강도, t 는 FRP의 두께, D 는 FRP로 구속된 콘크리트의 직경이다.

FRP로 구속된 콘크리트에 대한 강도추정식은 식 (4)의 k_1

을 수정하는 형태로 제안되었으며, Table 6에 이를 정리하였다. 본 연구에서는 시험결과와 함께 기존에 수행된 연구 결과를 정리하여 강도추정식을 제안하였으며, 기존 강도추정식의 정확성을 검증하였다.

4.2 시험결과 및 기존연구결과 정리

강도추정식을 제안하기 위하여 본 연구에서 수행한 시험결과와 기존의 연구결과(Bae et al., 2000; Chung et al., 1998; Demers and Neale, 1994; Harmon and Slattery, 1992; Howie and Karbhari, 1994; Hwang, 2000; Karbhari and Gao, 1997; Kim, 2003; Lee and Jeong, 2003; Matthys et al., 1999; Miyauchi et al., 1997; Miyauchi et al., 1999; Modarelli et al., 2005; Park, 2001; Picher et al., 1996; Shin et al., 1995; Soudki and Green, 1996; Watanabe et al., 1997; Xiao and Wu, 2000; Youm et al., 2004; Zhang et al., 2000)를 정리하였다. CFRP 쉬트를 사용하여 보강한 시험 결과만 사용하였으며, 형상비나 접이음길이와 같이 보강효과에 영향을 미친 시험결과는 제외하였다. 정리한 결과는 Table 7과 같으며, 총 데이터 수는 204개이다.

4.3 데이터 분석 및 기존모델 비교

Fig. 11은 Table 7에 정리한 데이터를 도식화하여 기존의 강도추정식과 비교한 그래프이다. 그래프에 나타난 것과 같이 Toutanji(1999)와 Miyauchi et al.(1999), Samaan et al. (1998)은 강도를 과대추정하고 있으며, 그 외의 식들은 본 데이터 범위에서 비슷하게 추정하고 있다. 시험데이터에 대해 회귀분석한 결과 데이터의 경향을 가장 잘 나타내는 선형식은 식 (6)과 같으며, 결정계수(R^2)가 0.85로 상관성이 높게 나타났다.

$$\frac{f_{cc}'}{f_{co}'} = 1.00 + 2.28 \frac{f_l}{f_{co}'} \quad R^2 = 0.85 \quad (6)$$

Table 8은 각 추정식별 시험값(f_{cc}')에 대한 강도추정값의 비에 대해 통계분석한 결과를 나타내고 있다. 데이터 계열별로 평균값이 다르므로 표준 편차가 아닌 변동계수(=표준 편차/평균값)를 사용하여 데이터의 분포를 비교하였다. 앞서 그래프에서 확인된 것과 같이 통계결과에서도 Miyauchi et al.(1999), Toutanji(1999)와 Samaan et al.(1998)이 강도값을 과대하게 추정하고 있다. Karbhari and Gao(1997), Saafi et al.(1999), Lam and Teng(2002)은 비교적 정확하게 강도를 추정하고 있으나, 본 논문에서 제안한 추정식을 사용하는 것이 실험값과의 변동 폭도 가장 작고 정확하게 추정하고 있다.

Table 7 Data set of test results of CFRP-confined concrete specimen

Source of Data	D (mm)	H (mm)	H/D	f_{co}' (MPa)	t (mm)	f_{frp} (MPa)	f_i (MPa)	f_i/f_{co}'	f_{cc}' (MPa)	f_{cc}'/f_{co}'
Test results	100	200	2	33.29	0.17	3480	11.832	0.36	74.35	2.23
	100	200	2	33.29	0.17	3480	11.832	0.36	70.0	2.10
	100	200	2	33.29	0.17	3480	11.832	0.36	73.4	2.20
	100	200	2	33.29	0.34	3480	23.664	0.71	94.5	2.84
	100	200	2	33.29	0.34	3480	23.664	0.71	94.5	2.84
	100	200	2	33.29	0.34	3480	23.664	0.71	94.5	2.84
	100	200	2	33.29	0.51	3480	35.496	1.07	129.2	3.88
	100	200	2	33.29	0.51	3480	35.496	1.07	126.7	3.80
	100	200	2	33.29	0.51	3480	35.496	1.07	131.6	3.95
	75	150	2	33.29	0.17	3480	15.776	0.47	81.0	2.43
	75	150	2	33.29	0.17	3480	15.776	0.47	116.9	3.51
	75	150	2	33.29	0.17	3480	15.776	0.47	101.1	3.04
	125	250	2	33.29	0.17	3480	9.4656	0.28	34.8	1.04
	125	250	2	33.29	0.17	3480	9.4656	0.28	47.2	1.42
	125	250	2	33.29	0.17	3480	9.4656	0.28	56.4	1.69
	100	200	2	33.29	0.17	3480	11.832	0.36	62.6	1.88
	100	200	2	33.29	0.17	3480	11.832	0.36	68.2	2.05
	100	200	2	33.29	0.17	3480	11.832	0.36	68.6	2.06
	100	200	2	33.29	0.17	3480	11.832	0.36	65.1	1.96
	100	200	2	33.29	0.17	3480	11.832	0.36	67.0	2.01
100	200	2	33.29	0.17	3480	11.832	0.36	67.6	2.03	
Bae et al. (2000)	150	300	2	27.74	0.11	3480	5.104	0.18	46.50	1.68
	150	300	2	27.73	0.22	3480	10.208	0.37	59.81	2.16
Chung et al. (1988)	150	300	2	20.3	0.2	1911	2.548	0.13	27.06	1.33
	150	300	2	20.3	0.2	1911	2.548	0.13	27.51	1.36
	150	300	2	20.3	0.3	1911	15.288	0.75	39.26	1.93
	150	300	2	20.3	0.3	1911	3.822	0.19	25.37	1.25
	150	300	2	20.3	0.3	1911	3.822	0.19	29.96	1.48
	150	300	2	20.3	0.6	1911	7.644	0.38	37.73	1.86
	150	300	2	20.3	0.6	1911	7.644	0.38	32.55	1.60
	150	300	2	20.3	0.6	1911	7.644	0.38	33.47	1.65
Demers and Neale (1994)	152	305	2	32.2	0.30	380	1.50	0.05	41.1	1.28
	152	305	2	43.7	0.30	380	1.50	0.03	48.4	1.11
	152	305	2	43.7	0.90	380	4.50	0.10	75.2	1.72
Harmon and Slattery (1992)	152	305	2	43.7	0.90	380	4.50	0.10	73.4	1.68
	51	102	2	41.0	0.09	3500	12.35	0.30	86.0	2.10
	51	102	2	41.0	0.18	3500	24.71	0.60	117.0	2.85
Howie and Karbhari (1994)	51	102	2	41.0	0.34	3500	46.67	1.14	158.0	3.85
	51	102	2	41.0	0.69	3500	94.71	2.31	241.0	5.88
	152	305	2	38.6	0.31	755	3.08	0.08	45.5	1.18
	152	305	2	38.6	0.31	755	3.08	0.08	41.9	1.09
	152	305	2	38.6	0.31	755	3.08	0.08	47.2	1.22
	152	305	2	38.6	0.61	1047	8.40	0.22	56.5	1.46
	152	305	2	38.6	0.61	1047	8.40	0.22	60.6	1.57
	152	305	2	38.6	0.61	1047	8.40	0.22	61.9	1.60
	152	305	2	38.6	0.92	1105	13.38	0.35	80.9	2.10
	152	305	2	38.6	0.92	1105	13.38	0.35	76.4	1.98
	152	305	2	38.6	0.92	1105	13.38	0.35	75.8	1.96
	152	305	2	38.6	1.22	1352	21.70	0.56	89.5	2.32
	152	305	2	38.6	1.22	1352	21.70	0.56	89.9	2.33
	152	305	2	38.6	1.22	1352	21.70	0.56	89.0	2.31
	152	305	2	38.6	0.61	660	5.30	0.14	47.1	1.22
	152	305	2	38.6	0.61	660	5.30	0.14	47.7	1.24
	152	305	2	38.6	0.61	660	5.30	0.14	50.0	1.30
	152	305	2	38.6	0.92	822	9.95	0.26	68.3	1.77
	152	305	2	38.6	0.92	822	9.95	0.26	67.3	1.74
	152	305	2	38.6	0.92	822	9.95	0.26	64.7	1.68
152	305	2	38.6	1.22	388	6.23	0.16	52.7	1.37	
152	305	2	38.6	1.22	388	6.23	0.16	49.3	1.28	
152	305	2	38.6	1.22	388	6.23	0.16	52.6	1.36	
Hwang (2000)	200	400	2	17.5	Unknown	3797	3.227	0.18	24.49	1.40
	200	400	2	17.5	Unknown	3797	6.265	0.36	32.28	1.84
	200	400	2	17.5	Unknown	3797	12.530	0.72	43.14	2.47

Table 7 Data set of test results of CFRP-confined concrete specimen (continued)

Source of Data	D (mm)	H (mm)	H/D	f_{co}' (MPa)	t (mm)	f_{FRP} (MPa)	f_1 (MPa)	f_1/f_{co}'	f_{cc}' (MPa)	f_{cc}'/f_{co}'
Karbhari and Gao (1997)	152	305	2	18.0	1.55	1353	27.59	1.53	82.2	4.57
	152	305	2	18.0	2.06	1127	30.55	1.70	70.6	3.92
Kim (2003)	100	200	2	20.0	0.334	3550	23.71	1.19	58.7	2.94
	100	200	2	34.0	0.334	3550	23.71	0.70	70.2	2.06
	100	200	2	43.0	0.334	3550	23.71	0.55	77.7	1.81
	150	300	2	16.0	0.334	3550	15.81	0.99	52.3	3.27
	150	300	2	28.0	0.334	3550	15.81	0.56	56.5	2.02
	150	300	2	42.0	0.334	3550	15.81	0.38	70.4	1.68
	100	200	2	33.0	0.334	3550	23.71	0.72	79.4	2.41
	100	200	2	33.0	0.501	3550	35.57	1.08	99.1	3.00
	100	200	2	33.0	0.668	3550	47.43	1.44	109.6	3.32
	150	300	2	36.2	0.11	4510	6.615	0.18	41.7	1.15
Lee and Jeong (2003)	150	300	2	36.2	0.22	4510	13.229	0.37	57.8	1.60
	150	300	2	36.2	0.33	4510	19.844	0.55	69.1	1.91
	150	300	2	36.2	0.44	4510	26.459	0.73	85.4	2.36
	150	300	2	36.2	0.55	4510	33.073	0.91	104.3	2.88
	150	300	2	34.9	0.12	2600	4.16	0.12	44.3	1.27
Matthys et al. (1999)	150	300	2	34.9	0.24	1100	3.52	0.10	41.3	1.18
Miyauci et al. (1997)	150	300	2	45.2	0.11	3481	5.11	0.11	59.4	1.31
	150	300	2	45.2	0.22	3481	10.21	0.23	79.4	1.76
	150	300	2	31.2	0.11	3481	5.11	0.16	52.4	1.68
	150	300	2	31.2	0.22	3481	10.21	0.33	67.4	2.16
	150	300	2	31.2	0.33	3481	15.32	0.49	81.7	2.62
	100	200	2	51.9	0.11	3481	7.66	0.15	75.2	1.45
	100	200	2	51.9	0.22	3481	15.32	0.30	104.6	2.02
	100	200	2	33.7	0.11	3481	7.66	0.23	69.6	2.07
	100	200	2	33.7	0.22	3481	15.32	0.45	88.0	2.61
	100	200	2	33.7	0.33	3481	22.97	0.68	109.9	3.26
Miyauci et al. (1999)	150	300	2	23.6	0.11	3481	5.11	0.22	36.5	1.55
	150	300	2	23.6	0.22	3481	10.21	0.43	50.8	2.15
	150	300	2	23.6	0.33	3481	15.32	0.65	64.3	2.72
	100	200	2	33.7	0.11	3481	7.66	0.23	69.6	2.07
	100	200	2	33.7	0.22	3481	15.32	0.45	88.0	2.61
	100	200	2	33.7	0.33	3481	22.97	0.68	109.9	3.26
	100	200	2	26.3	0.11	3481	7.66	0.29	50.7	1.93
	100	200	2	26.3	0.22	3481	15.32	0.58	70.9	2.70
	100	200	2	26.3	0.33	3481	22.97	0.87	84.9	3.23
	150	300	2	28.4	0.165	3068	6.750	0.24	55.25	1.95
Modarelli et al. (2005)	150	300	2	38.2	0.165	3068	6.750	0.18	62.73	1.64
Park (2001)	150	300	2	19.5	0.11	3480	0.365	0.02	19.50	1.00
	150	300	2	19.5	0.11	3480	0.957	0.05	18.82	0.96
	150	300	2	19.5	0.11	3480	1.531	0.08	18.72	0.96
	150	300	2	19.5	0.11	3480	1.705	0.09	19.89	1.02
	150	300	2	19.5	0.11	3480	5.098	0.26	29.01	1.49
	150	300	2	19.5	0.17	3480	0.261	0.01	19.99	1.03
	150	300	2	19.5	0.17	3480	0.557	0.03	19.89	1.02
	150	300	2	19.5	0.17	3480	0.974	0.05	19.70	1.01
	150	300	2	19.5	0.17	3480	1.462	0.07	19.31	0.99
	150	300	2	19.5	0.17	3480	1.653	0.08	19.89	1.02
	150	300	2	19.5	0.17	3480	2.332	0.12	20.48	1.05
	150	300	2	19.5	0.17	3480	5.168	0.26	27.73	1.42
	150	300	2	19.5	0.17	3480	7.743	0.40	35.48	1.82
	150	300	2	44.0	0.17	3480	0.261	0.01	45.57	1.04
	150	300	2	44.0	0.17	3480	0.557	0.01	46.06	1.05
	150	300	2	44.0	0.17	3480	0.974	0.02	46.26	1.05
	150	300	2	44.0	0.17	3480	1.462	0.03	48.90	1.11
	150	300	2	44.0	0.17	3480	1.653	0.04	49.78	1.13
	150	300	2	44.0	0.17	3480	1.931	0.04	48.41	1.10
	150	300	2	44.0	0.17	3480	2.332	0.05	49.88	1.13
150	300	2	44.0	0.17	3480	2.575	0.06	48.02	1.09	
150	300	2	44.0	0.17	3480	5.168	0.12	49.20	1.12	
150	300	2	44.0	0.17	3480	7.743	0.18	65.37	1.49	
Picher et al. (1996)	152	304	2	39.7	0.90	1266	14.99	0.38	56.0	1.41
Shin et al. (1995)	100	200	2	21.4	0.11	3480	7.656	0.36	43.51	2.04
	100	200	2	21.4	0.11	3480	7.656	0.36	43.22	2.02

Table 7 Data set of test results of CFRP-confined concrete specimen(continued)

Source of Data	D (mm)	H (mm)	H/D	f_{co}' (MPa)	t (mm)	f_{frp} (MPa)	f_l (MPa)	f_l/f_{co}'	f_{cc}' (MPa)	f_{cc}'/f_{co}'	
Soudki and Green (1996)	152	305	2	46.0	0.16	1481	3.12	0.07	53.0	1.15	
	152	305	2	46.0	0.32	1481	6.24	0.14	59.0	1.28	
	100	200	2	30.2	0.17	2716	9.23	0.31	46.6	1.54	
Watanabe et al. (1997)	100	200	2	30.2	0.50	2873	28.73	0.95	87.2	2.89	
	100	200	2	30.2	0.67	2658	35.62	1.18	104.6	3.46	
	100	200	2	30.2	0.14	1579	4.42	0.15	41.7	1.38	
	100	200	2	30.2	0.28	1824	10.21	0.34	56.0	1.85	
	100	200	2	30.2	0.42	1285	10.79	0.36	63.3	2.10	
	100	200	2	30.2	0.42	1285	10.79	0.36	63.3	2.10	
Xiao and Wu (2000)	152	305	2	33.7	0.38	1577	7.89	0.23	47.9	1.42	
	152	305	2	33.7	0.38	1577	7.89	0.23	49.7	1.47	
	152	305	2	33.7	0.38	1577	7.89	0.23	49.4	1.47	
	152	305	2	33.7	0.76	1577	15.77	0.47	64.6	1.92	
	152	305	2	33.7	0.76	1577	15.77	0.47	75.2	2.23	
	152	305	2	33.7	0.76	1577	15.77	0.47	71.8	2.13	
	152	305	2	33.7	1.14	1577	23.66	0.70	82.9	2.46	
	152	305	2	33.7	1.14	1577	23.66	0.70	86.2	2.56	
	152	305	2	33.7	1.14	1577	23.66	0.70	95.4	2.83	
	152	305	2	43.8	0.38	1577	7.89	0.18	54.7	1.25	
	152	305	2	43.8	0.38	1577	7.89	0.18	52.1	1.19	
	152	305	2	43.8	0.38	1577	7.89	0.18	48.7	1.11	
	152	305	2	43.8	0.76	1577	15.77	0.36	84	1.92	
	152	305	2	43.8	0.76	1577	15.77	0.36	79.2	1.81	
	152	305	2	43.8	0.76	1577	15.77	0.36	85	1.94	
	152	305	2	43.8	1.14	1577	23.66	0.54	96.5	2.20	
	152	305	2	43.8	1.14	1577	23.66	0.54	92.6	2.11	
	152	305	2	43.8	1.14	1577	23.66	0.54	94	2.15	
	152	305	2	55.2	0.38	1577	7.89	0.14	57.9	1.05	
	152	305	2	55.2	0.38	1577	7.89	0.14	62.9	1.14	
	152	305	2	55.2	0.38	1577	7.89	0.14	58.1	1.05	
	152	305	2	55.2	0.76	1577	15.77	0.29	74.6	1.35	
	152	305	2	55.2	0.76	1577	15.77	0.29	77.6	1.41	
	152	305	2	55.2	0.76	1577	15.77	0.29	77	1.39	
	152	305	2	55.2	1.14	1577	23.66	0.43	106.5	1.93	
	152	305	2	55.2	1.14	1577	23.66	0.43	108	1.96	
	152	305	2	55.2	1.14	1577	23.66	0.43	103.3	1.87	
	Youm et al. (2004)	150	300	2	19.5	0.11	3480	0.261	0.013	20.09	1.03
150		300	2	19.5	0.11	3480	0.365	0.019	19.70	1.01	
150		300	2	19.5	0.11	3480	0.557	0.029	20.28	1.04	
150		300	2	19.5	0.11	3480	0.957	0.049	19.11	0.98	
150		300	2	19.5	0.11	3480	0.974	0.050	20.28	1.04	
150		300	2	19.5	0.11	3480	1.462	0.075	20.28	1.04	
150		300	2	19.5	0.11	3480	1.531	0.079	19.11	0.98	
150		300	2	19.5	0.11	3480	1.653	0.085	20.28	1.04	
150		300	2	19.5	0.11	3480	1.705	0.087	20.09	1.03	
150		300	2	19.5	0.11	3480	2.332	0.120	20.87	1.07	
150		300	2	19.5	0.11	3480	5.098	0.261	29.45	1.51	
150		300	2	19.5	0.11	3480	5.168	0.265	30.03	1.54	
150		300	2	19.5	0.11	3480	7.743	0.397	36.08	1.85	
150		300	2	31.4	0.17	3480	5.081	0.162	41.40	1.32	
150		300	2	31.4	0.17	3480	10.214	0.326	49.24	1.57	
150		300	2	31.4	0.17	3480	15.312	0.488	66.17	2.11	
150		300	2	44.0	0.11	3480	0.261	0.006	44.88	1.02	
150		300	2	44.0	0.11	3480	0.557	0.013	44.88	1.02	
150		300	2	44.0	0.11	3480	0.974	0.022	46.20	1.05	
150		300	2	44.0	0.11	3480	1.462	0.033	47.96	1.09	
150		300	2	44.0	0.11	3480	1.653	0.038	48.84	1.11	
150		300	2	44.0	0.11	3480	1.931	0.044	48.40	1.1	
150		300	2	44.0	0.11	3480	2.332	0.053	49.72	1.13	
150		300	2	44.0	0.11	3480	2.575	0.059	47.96	1.09	
150		300	2	44.0	0.11	3480	5.168	0.117	56.76	1.29	
150		300	2	44.0	0.11	3480	7.743	0.176	65.56	1.49	
Zhang et al. (2000)		150	300	2	34.3	1.00	423	5.64	0.16	44.2	1.29
		150	300	2	34.3	1.00	753	10.04	0.29	59.4	1.73

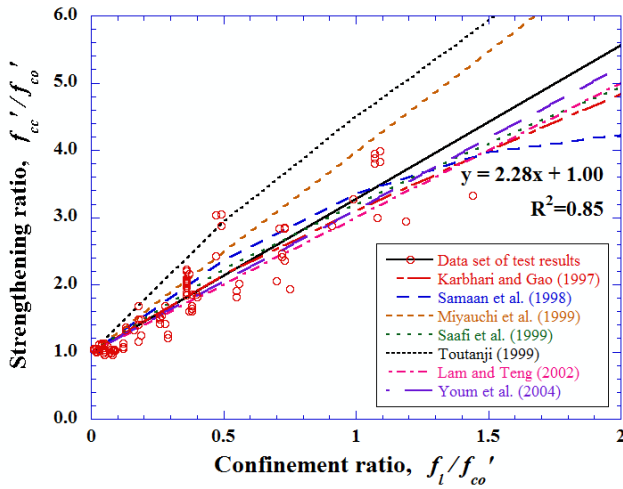


Fig. 11 Comparison of strength models

Table 8 Statistical performance of strength models for FRP-confined concrete as assessed by data set

Model	Predicted f'_{cc} to test ratio		
	Average	Standard deviation	Coefficient of Variation (%)
Karbhari and Gao (1997)	1.02	0.141	13.8
Samaan et al. (1998)	1.11	0.173	15.6
Miyauchi et al. (1999)	1.12	0.162	14.4
Saafi et al. (1999)	1.05	0.145	13.8
Toutanji (1999)	1.30	0.191	14.7
Lam and Teng (2002)	0.96	0.133	13.9
Best fit trend line	1.00	0.135	13.4

Number of datapoints = 204

5. 결론

본 연구에서는 CFRP 쉬트로 횡구속된 콘크리트 공시체에 대하여 보강 겹수, 시험체의 크기, 형상비, 겹이음길이를 변화시켜 시험한 결과를 분석하였고, 시험결과와 더불어 기존에 발표된 시험데이터를 통하여 CFRP 쉬트로 보강된 콘크리트의 강도추정식을 비교 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) CFRP 쉬트로 횡구속된 콘크리트의 압축성능은 쉬트의 구속효과에 의해 크게 개선되었으며, 보강겹수에 따라 압축 내력 향상효과가 크게 나타났다.
- (2) CFRP 쉬트로 보강된 콘크리트 시험체의 모든 조건을 동일하게 유지하고 크기를 변화시킬 경우, 크기가 커질수록 보강효과는 감소하였다. 이는 횡구속압(f_l)이 직경(D)에 반비례하기 때문이며, 본 시험을 통하여 CFRP에 의한 횡

구속압의 이론적인 부분을 증명할 수 있었다.

- (3) 시험체의 형상비(H/D)가 증가함에 따라 보강효과는 감소하였으며, 이는 세장비와 임계응력간의 관계가 CFRP 쉬트로 보강된 시험체에서도 동일하게 나타남을 확인할 수 있었다.
- (4) CFRP 쉬트로 감싼 콘크리트의 겹이음길이가 없는 경우에는 보강효과가 30%밖에 나타나지 않았으나 둘레의 5% 이상으로 겹이음한 경우에는 보강효과가 100%나타났으며, 5%이상의 범위에서는 겹이음길이를 변화시켜도 보강효과에 큰 영향이 없었다.
- (5) 본 논문에서의 시험결과와 기존에 수행된 연구결과를 기준으로 CFRP 쉬트로 구속된 콘크리트의 강도추정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.00 + 2.28 \frac{f_l}{f'_{co}}$$

- (6) 기존 강도추정식을 비교한 결과, Miyauchi et al.(1999), Samaan et al.(1998), Toutanji(1999)은 강도를 과대추정하고 있으며, Karbhari and Gao(1997), Lam and Teng(2002), Saafi et al.(1999)은 비교적 정확하게 강도를 추정하고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음

References

1. Bae, J.S., Kim, K.S., Kim, J.W. and Ko, Y.P. (2000), An Experimental Study on the Strengthening Effect of CFS on Concrete Cylinder under Load History, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.4, No.3, KSMI, 169-176.
2. Chung, L., Lee, H. K., Kim, S. C., Yoo, S. H., and Kim, J. K. (1998), Confined Effect of Concrete Compressive Members Strengthened with Carbon Fiber Laminate, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.10, No.6, KCI, 345-352.
3. Demers, M., and Neale, K. W. (1994). "Strengthening of concrete columns with unidirectional composite sheets." *Development in Short and Medium Span Bridge Engineering '94, Proc., 4th Int. Conf. on Short and Medium Bridges*, A. A. Mufti, B. Bakht, and L. G. Jaeger, eds., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, 895-905.
4. Harmon, T. G., and Slattery, K. T. (1992). "Advanced composite confinement of concrete." *Proc., 1st Int. Conf. on Advanced*

- Composite Materials in Bridges and Structures*, K. W. Neale and P. Labossiere, eds., Canadian Society for Civil Engineering, Sherbrooke, Canada 299-306.
5. Howie, I., and Karbhari, V. M. (1994). "Effect of materials architecture on strengthening efficiency of composite wraps for deteriorating columns in the North-East." *Infrastructure: New Materials and Methods of Repair, Proc., 3rd Materials Engineering Conf.*, K. D. Basham, ed., Material Engineerin Division, ASCE, 199-206.
 6. Hwang, J. S. (2000), A Study on the Axial Behavior of the Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Sheets, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.4, No.4, KSMI, 141-148.
 7. Hwang, J. S. (2001), Stress-Strain Charateristics of the Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Sheets, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure&Construction*, Vol.17, Vo.9, AIK, 57-63.
 8. Karbhari, V. M., and Gao, Y. (1997). "Composite jacketed concrete under uniaxial compression-verification of simple design equations." *J. Mater. Civ. Eng.*, 9(4), 185-193.
 9. Kim, M. K. (2006), Strengthening Effect of Circular Concrete Column Wrapped with Carbon FRP Sheet, Ph.M. Dissertation, Jeju National University.
 10. Kim, Y. S. (2003), Compressive Strength Enhancement of Concrete Cylinders Confined with FRP Wrap, Ph.M. dissertation, Chung-ang University.
 11. Lam, L and Teng, J. G. (2002), Strength Models for Fiber-Reinforced Plastic-Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No.5, ASCE, 612-623.
 12. Lee, J. Y. and Jeong, H. S. (2003), Prediction of the Maximum Strain of Circular Concrete Columns Confined with Fiber Composites, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.15, No.5, KCI, 726-736.
 13. Mathtys, S., Taerwe, L., and Audenaert, K. (1999). "Test on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping." *Proc., 4th Int. Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, C. W. Dolan, S. H. Rizkalla, and A. Nanni., eds., SP-188, American Concrete Institute, Farmington, Mich., 217-229.
 14. Miyauchi, K., Nishibayashi, S., and Inoue, S. (1997). "Estimation of strengthening effects with carbon fiber sheet for concrete columns." *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proc., 3rd Int. Symposium*, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, Vol. 1, 217-224.
 15. Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T., and Kobayashi, A. (1999). "Strengthening effects of concrete columns with carbon fiber sheet." *Trans. Jpn. Concr. Inst.*, 21, 143-150.
 16. Modarelli, R., Micelli, F. and Monni, O. (2005) FRP-Confinement of Hollow Concrete Cylinders and Prisms, *7th International Symposium FRP Reinforcement for Concrete Structures*, American Concrete Institute, Vol.2, 1029-1046.
 17. Park, Y. J. (2001), The Experimental Research on the Confinement Effect of Concrete Specimens with Carbon Fiber Sheet, Ph.M. Dissertation, Korea University.
 18. Picher, F., Rochette, P. and Labossiere, P. (1996). "Confinement of concrete cylinders with CFRP." *Proc., 1st Int. Conf. on Composites for Infra-Structures*, H. Saadatmanesh, and M. R. Ehsani, eds., Univ. of Arizona, Tucson, Ariz., 829-841.
 19. Shin, Y. S., Hong, Y. K., Hong, G. S., and Choi, O. C. (1995), The Strength Effects of Concrete Confined with Carbon Fiber Sheets, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure&Construction*, Vol.11, No.10, AIK, 323-328.
 20. Soudki, K. A., and Green, M. F. (1996). "Performance of CFRP retrofitted concret columns at low temperature." *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Proc., 2nd Int. Conf.*, M. M. Elbadry ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, 427-434.
 21. Watanable, K., Nakamura, H., Honda, T., Toyoshima, M., Iso, M., Fujimaki, T., Kaneto, M., and Shirai, N. (1997). "Confinement effect of FRP sheet on strength and ductility of concrete cylinders under uniaxial compression." *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proc., 3rd Int. Symposium*, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, Vol. 1, 233-240.
 22. Xiao, Y., and Wu, H. (2000). "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets." *J. Mater. Civ. Eng.*, 12(2), 139-146.
 23. Youm, K. S., Lee, Y. H., Park, Y. J., and Lee, H. E. (2004), The Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Sheet, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.2A, KSCE, 259-265.
 24. Zhang, S., Ye., and Mai, Y. W. (2000). "A study on polymer composites strengthening systems for concrete columns." *Appl. Compos. Mater.*, 7, 125-138.

Received : 10/14/2014

Revised : 01/28/2015

Accepted : 05/06/2015

요 지 : 콘크리트 구조물의 내력성능을 향상시키기 위해 탄소섬유쉬트(Carbon Fiber-Reinforced Plastic Sheet, 이하 CFRP sheet)로 보강된 콘크리트에 대해 많은 연구가 수행되어 왔다. 본 연구는 CFRP sheet로 구속된 콘크리트에 대한 연구 중 미비한 부분을 보완하기 위하여 보강접수, 시험체의 크기, 형상비, 겹이음길이를 변수로 하여 연구를 수행하였다. 각 시험체별 응력-변형률 곡선을 통해 콘크리트의 거동을 비교하였으며, 최대압축강도를 통하여 CFRP sheet의 보강효과를 확인하였다. 보강접수의 증가에 따라 콘크리트의 압축성능은 크게 개선되었으며, 시험체의 크기와 형상비의 변화를 통해 이론적인 부분을 검증하였고, 겹이음길이는 둘레의 5%이상으로 해야만 보강효과에 영향이 없는 것으로 확인하였다. 또한 본 연구의 시험결과와 기존 시험결과를 정리하고 이를 기준으로 기존 강도추정모델을 통계 분석함으로 모델의 정확성과 신뢰성을 검증하였다.

핵심용어 : 탄소섬유쉬트, 구속, 콘크리트, 최대압축강도, 강도추정식, 보강효과, 응력-변형률 곡선