

콘크리트 보강강판 및 GFRP 튜브의 구속효과 분석 및 평가

Assessment of Confining Effect of Steel and GFRP Jackets for Concrete

최 은 수¹⁾

안 동 준²⁾

Choi, Eunsoo

An, Dong Jun

요 약 : 본 연구에서는 새로이 제안된 콘크리트의 강판 보강기법 및 GFRP 튜브의 구속효과를 분석하고 평가하였다. 새로이 제안된 강판 보강기법은 기존의 강판 보강기법과 설치 및 거동에서 차이가 있으므로 이 기법의 구속효과를 평가할 필요성이 있으며, GFRP 보강기법과 상호 비교를 통해서 장단점을 분석하였다. 강판 보강기법에 의한 콘크리트의 구속효과는 기존의 연구자들이 제안한 식과 일치하는 결과를 보여주었다. 그러나 GFRP 보강기법은 보강두께 및 콘크리트의 압축강도에 따라 구속효과가 없는 경우가 나타났기 때문에 기존의 구속효과 추정식을 그대로 사용할 수 없었다. 따라서 본 연구에서 새로이 추정하는 기법을 제시하였으며, 이를 통해서 구속효과가 발생하는 최소 보강두께를 결정하는 기법을 제시하였다. 마지막으로, 두 기법으로 보강된 콘크리트의 과단변형률 비교하여 연성거동 능력을 평가하였다.

ABSTRACT : In this study, the confining effect of the proposed steel jackets and GFRP tubes for concrete was investigated. The new steel jacket differs from the existing steel jacket in terms of installation technique and behavior. Thus, it is necessary to assess its confining effect on concrete. Moreover, the method was compared to GFRP tubes to investigate its strong and weak points. The confining effect of the proposed steel jacket was shown to correspond with that presented in the previous researches. The GFRP jacketing method, however, does not show any confining effect in some cases, according to the tube thickness and concrete peak strength as such, the previous assessment equation cannot be used in such cases. Thus, in this study, a new method of assessing the peak strength of confined concrete was suggested, and the minimum thickness was determined to show the confining effect. Lastly, the ultimate strains of concrete that had been confined through the two methods were compared to assess their ductile behavior.

핵심용어 : 강판보강, GFRP, 콘크리트, 구속효과

KEYWORDS : steel jackets, GFRP, concrete, confining effect

1. 서론

콘크리트의 보강 기법에서 사용되는 재료는 콘크리트, 강재 및 FRP(Fiber Reinforced Plastic or Polymer)가 대표적이다. 각각의 재료는 장단점이 있어 지속적으로 사용되어지고 있으며, 관련연구도 수행되고 있다(Bousias et al. 2007). 특히, 내진성능을 보유하고 있지 않은 철근콘크리트 구조물의 기둥에 위의 재료를 사용하여 내진성능을 향상시키는 기법은 일반적인 것이 되었다. 그러나 콘크리트를 사용한 구조물의 보강은 시공 상의 어려움에 의해 상당히 제한적으로 사용되고 있으며, 최근 국내에서는 그에 대한 사용 및 연구가 거의 수

행되고 있지 않다. 강재와 FRP를 사용하여 콘크리트를 보강하는 기법은 현재 국내외적으로 널리 사용되고 있으며, 연구분야에서 FRP를 사용한 보강기법 및 보강효과 분석에 대한 연구가 주로 수행되고 있다.

FRP 재료 중, 콘크리트 보강에 주로 사용되는 것은 CFRP(Carbon FRP)와 GFRP(Glass FRP)가 있다. 그러나 CFRP의 경우 가격이 강재에 비해 지나치게 고가이므로 적용에 대한 적대적 요소가 되고 있다. GFRP는 CFRP에 비해 성능이 떨어지지만 적절한 가격에 생산이 가능하므로 강재에 대해서 경쟁력을 가지고 있다고 판단되고 있으며, 적용범위를 확대해 나가고 있다.

1) 교신저자, 홍익대학교 토목공학과, 조교수
(Tel. 02-320-3060, Fax. 02-320-3060, E-mail: eunsochoi@hongik.ac.kr)

2) 홍익대학교 토목공학과, 박사과정(andy@chol.com)

본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

Spoolstra and Monti(1999)의 연구는 강재, CFRP 및 GFRP로 콘크리트를 보강하는 경우 전형적인 콘크리트의 응력-변형률의 관계를 보여주고 있다. 강재보강은 최대강도(peak strength)가 강재의 항복점에서 발생되고 이후에는 강성도 저하현상이 발생한다. FRP 보강은 최대강도(peak strength)의 발현이 FRP의 파단 시점에서 발현되며, 콘크리트의 최대강도 이후에도 강도가 계속적으로 증가하는 현상을 보인다. 이것은 FRP 재료가 파단 시까지 응력이 계속적으로 증가하기 때문이다. 일반적으로 CFRP가 GFRP에 비해 탄성계수 및 인장강도가 크기 때문에 보강에 의한 강도증진 효과가 크게 나타난다. 그러나 파단 시의 변형률은 GFRP가 크기 때문에 GFRP로 보강된 콘크리트가 더 큰 연성거동을 보이는 것으로 나타나고 있다.

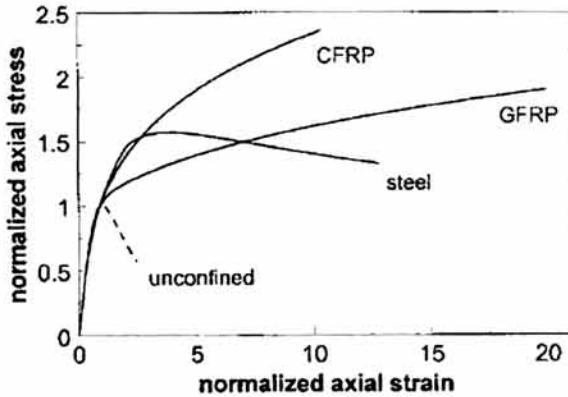


그림 1. 구속된 콘크리트의 거동 비교(Spoolstra and Monti, 1999)

위에서 언급한 것과 같이 구속된 콘크리트는 구속재료에 따라 콘크리트의 거동 및 보강성능의 차이를 발생시킨다. 본 연구에서는 최은수 등(2008)에 의해서 제안된 새로운 강판보강 기법과 GFRP 튜브에 의한 콘크리트의 보강성능을 분석하고 비교하고자 한다. 이러한 보강성능의 비교·분석은 새로이 제안된 강판 및 GFRP 튜브 보강기법의 사용에 있어서 매우 유용한 정보를 제공할 것이다. 본 연구에서 보강성능을 분석을 위해서 사용한 항목은 최대압축강도(peak strength)와 극한변형률(ultimate strain)이다. 본 연구에서 사용하는 최대압축강도(peak strength)는 기존에 사용한 극한강도(ultimate strength)와 동일하나, 극한강도는 극한변형률 즉 파단 시에 발생하는 강도와 혼란이 있으므로 다른 표현을 사용하고자 한다.

2. 강판 및 GFRP 튜브 보강 및 압축실험

최은수 등(2008)에 의해서 제안된 강판 보강기법은 기존의 강판 보강기법과 같이 그라우팅을 사용하지 않는 점에서 차별

성이 있다. 새로운 강판 보강기법은 얇은 강판을 외부압력을 사용하여 콘크리트 표면에 밀착하고 강판을 용접하여 보강을 완료하는 기법으로 자세한 설명은 위의 논문과 태기호 등(2008)의 논문에 나타나 있다. 새로운 강판 보강기법은 그라우팅을 실시하지 않기 때문에 강판과 콘크리트가 합성거동을 하지 않게 된다.

GFRP 튜브로 보강된 기법은 최은수 등(2009)의 논문에 자세히 설명되어 있으며, 기계작된 GFRP 튜브에 콘크리트를 타설하는 기법으로 보강실험이 수행되었다. GFRP 튜브를 이용한 보강기법은 GFRP 튜브와 콘크리트가 접착에 의해서 합성거동을 한다는 점에서 새로이 제안된 강판 보강기법과 차이점이 존재한다.

2.1 시험체의 제작

압축실험을 위한 콘크리트의 공시편은 150 mm × 300 mm (φ×L) 크기를 사용하였으며, 구체적인 제작과정은 위에서 언급한 논문에 나타나 있으며, 본 논문에서는 생략하도록 하겠다. 강판보강 및 실험은 2차에 걸쳐서 이루어 졌으며, 1차 실험에서는 분리된 강판 (2개 강판 사용)을 사용하였고, 2차 실험에서는 분리되지 않은 일체형 강판 (1개 강판 사용)을 사용하였다. 특히, 2차 실험에서는 용접부를 스틸밴드로 보강하였다. 1차 실험에서의 변수는 콘크리트의 강도, 강판의 두께, 강판과 콘크리트 사이의 접착제 유무를 사용하였다. 설계 압축강도는 21, 27 및 35 MPa를 사용하였으며, 강판의 두께는 1.0 및 1.5 mm를 사용하였다. 접착제는 폴리우레탄 필름으로 두께가 0.05 mm인 것을 사용하였다. 2차 실험에서는 일체형 강판의 두께를 1.0, 1.5 및 2.0 mm로 하였고, 접착제는 사용하지 않았으며, 콘크리트의 압축강도도 하나만을 사용하였다. 2차 실험에서의 변수는 강판을 일체형으로 하는 것과 겹침으로 보강하는 것이었다. 따라서 2.0 mm의 보강은 1.0 mm 강판 두 개를 겹쳐서 보강한 것이다.

GFRP 보강 시편은 내경이 150 mm이고 일정한 두께를 가진 길이 300 mm 튜브를 제작하여, 그 안에 콘크리트 타설하여 제작하였다. 사용한 GFRP는 A-type과 B-type이 있으며, 제작기법에 따른 분류이다. GFRP의 두께는 2.0, 4.0 및 6.0 mm를 사용하였으며, 콘크리트의 압축강도는 32 및 43 MPa를 사용하였다.

2.2 시험체의 압축실험

실험은 일축압축실험으로 응력-변형률 곡선을 얻어 최대압축강도 및 극한변형률을 추정하였다. 강판보강 시험체의 실험

에서 변형률은 그림 2(a)에서 나타난 것과 같이 축방향에 대한 변형을 변위변환계로 측정하여 최초의 길이로 나누어 구한 값을 사용하였다. 반면, GFRP 보강 시험체의 변형률은 그림 2(b)에 나타난 것과 같이 GFRP 튜브에서 전기저항식 스트레인게이지에 의해서 측정되는 변형률을 사용하였다.



(a) 강판 보강 (b) GFRP 보강

그림 2. 압축실험 전경:

이러한 경우 최은수 등(2009)이 지적한 것과 같이 측정된 변형률은 콘크리트 부풀음에 의한 인장변형률로 인해 실제보다 작게 된다. 그러나 본 연구에서는 측정된 변형률을 보정하지 않고 사용하였다. 두 실험 모두 보강재인 강판과 GFRP 튜브에 직접적으로 압축력이 작용하지 않도록 하였다. 강판보강의 경우 강판을 콘크리트 시편보다 상하에서 5 mm 작게 하였으며, GFRP 보강 시험체의 경우 가력판의 지름을 정확히 150 mm로 하여 튜브에는 압축력이 전달되지 않도록 하였다. 구속재에 압축력이 작용하게 되면, 압축에 대해서 구속재가 직접적으로 저항하게 되므로 구속효과의 측정결과를 왜곡하게 된다.

3. 구속효과 분석 및 비교

3.1 최대압축강도 (Peak Strength)

콘크리트의 최대압축강도는 구속효과의 평가지수로 일반적으로 사용되어 진다. Richart et al. (1928)은 구속비 (confinement ratio)와 강도비(strength ratio)를 사용해서 구속효과를 아래와 같은 식으로 표현하였다.

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

여기서,

- f_{cc}' : 구속된 콘크리트의 압축강도
- f_{co}' : 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도
- f_l : 횡방향 구속력
- k_1 : 유효구속계수 (confinement effectiveness)

식 (1)은 콘크리트의 능동구속(active confinement)의 경우에 적용되며, 유효구속계수, k_1 은 4.1로 추정되었다. 이후에 Richart et al. (1929)은 식 (1)을 철근으로 구속된 콘크리트의 강도 추정에도 사용할 수 있음을 보여주었다. 또한, Fardis and Khalili (1982)는 식 (1)을 FRP로 구속된 콘크리트에 적용될 수 있음을 보여주었다. 여러 연구자들에 의해서 유사한 추정식이 제안되었지만 Lam and Teng (2002)은 Richart et al. (1928)의 제안식이 사용하기에 간편하며 효과적이라 언급하고 있다. 따라서, 본 연구에서도 식 (1)을 이용하여 최대압축강도의 구속효과를 분석하고자 한다.

식 (1)에서 횡방향 구속력, f_l 은 콘크리트의 단면이 원형인 경우 다음과 같이 표현된다.

$$f_l = \frac{2f_{yh}t}{d} \quad (2)$$

여기서, f_{yh} 는 강재인 경우 항복강도(f_y)이고, GFRP인 경우 인장강도(f_{FRP})이다. t 는 강판 및 GFRP의 두께이며, d 는 콘크리트 시편의 지름이다.

표 1과 2에는 강판보강 1 및 2차 실험결과와 강도비가 나타나 있으며, 표 3에는 GFRP 보강의 결과가 정리되어 있다. 강판보강 1차 실험에서 콘크리트의 압축강도는 팔호안에 나타나 있으며, 각각 35, 39 및 48 MPa로 측정되었고, 2차 실험에서 무보강 콘크리트의 압축강도는 27 MPa로 측정되었다. 또한, 1차 및 2차 실험에서 사용한 강판의 항복강도는 각각 480 MPa와 217 MPa로 측정되었다. 1차 실험에서는 아연도금의 SM570 강을 사용하였고, 2차 실험에서는 부식방지를 위해서 스테인리스강을 사용하였다. 일반적으로 스테인리스강이 일반강보다 항복강도가 작다. GFRP 튜브에서 인장시편을 추출하여 인장실험을 한 결과 A 및 B-type의 평균적인 인장강도가 275와 328 MPa이며, 탄성계수 값이 15.1과 16.8 GPa로 측정되었다.

표 1. 1차 실험(분리형 강판) 시험체의 강도비

구분		강도비 (f_{cc}'/f_{co}')			
강도 (MPa)	시편 구분	평균	1	2	3
21 (35)	(1)-0	1.00	1.00	1.00	1.00
	(1)-1	1.14	1.14	1.07	1.18
	(1)-2	1.27	1.40	1.39	1.32
	(1)-3	1.53	1.51	1.52	1.58
	(1)-4	1.63	1.61	1.72	1.69
27 (39)	(2)-0	1.00	1.00	1.00	1.00
	(2)-1	1.08	1.11	1.07	1.08
	(2)-2	1.27	1.20	1.26	1.23
	(2)-3	1.43	1.43	1.48	1.51
	(2)-4	1.59	1.44	1.59	1.58
35 (48)	(3)-0	1.00	1.00	1.00	1.00
	(3)-1	0.99	1.03	1.06	1.13
	(3)-2	1.16	1.29	1.24	1.28
	(3)-3	1.32	1.40	1.34	1.41
	(3)-4	1.38	1.47	1.47	1.52

여기서, 0: 무보강; 1:1.0mm+접착제; 2:1.0mm; 3: 1.5mm+접착제; 4: 1.5mm

표 4에는 각 보강재의 구속력과 구속비를 보여주고 있다. 식 (1)은 Lam and Teng (2002)에 의하면 구속비, f_l/f_{co}' 가 1.0보다 작을 때는 안정적이지만, 1.0보다 클 때는 불안정하다고 지적하고 있다. 본 연구에서 사용한 결과 중, 구속비가 1.0 상회하는 경우가 유일하기 때문에, 그 특성을 고려하지 않고 분석을 수행하였다.

보강에 의한 구속효과를 평가하기 위해서 표 1-3의 강도비 및 표 4의 구속비를 활용하여 선형회귀분석을 실시하였다. 식 (1)에서 y축을 강도비 및 x축을 구속비로 표현하는 경우 y절편은 1.0인 구속조건을 가진다. 이렇게 수행된 선형회귀분석의 결과가 그림 3-5에 나타나 있다.

표 2. 2차 실험(일체형 강판) 시험체의 강도비

시편 구분	강도비 (f_{cc}'/f_{co}')			
	무보강	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
1	1.00	1.45	1.73	1.81
2	1.00	1.52	1.67	1.89
3	1.00	1.42	1.61	1.87
평균	1.00	1.48	1.67	1.86

표 3. GFRP 보강 콘크리트의 강도비

시편구분	두께 (mm)	강도비 (f_{cc}'/f_{co}')				
		1	2	3	4	평균
A-32 (32 MPa)	2	1.54	1.41	1.46	1.35	1.44
	4	2.15	2.22	2.17	2.22	2.19
	6	2.87	2.76	2.73	2.85	2.80
A-43 (43 MPa)	2	1.02	1.04	1.13	1.04	1.06
	4	1.33	1.28	1.29	1.35	1.31
	6	1.67	1.57	1.71	1.71	1.66
B-43 (43 MPa)	2	1.09	1.11	1.00	1.05	1.06
	4	1.40	1.61	1.57	1.58	1.53
	6	2.24	2.23	2.45	2.27	2.30

표 4. 강판 및 GFRP 튜브의 구속력 및 구속비

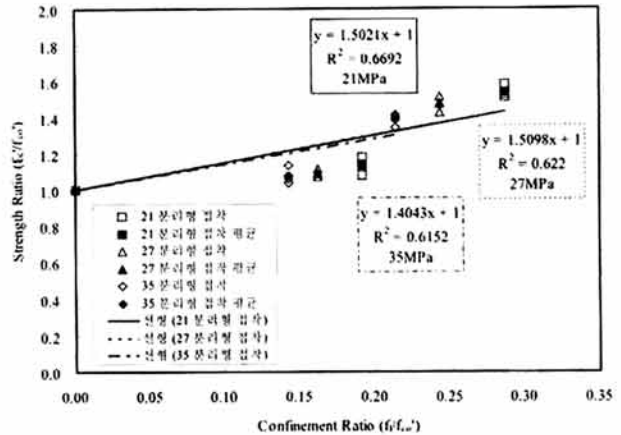
보강재	형식	두께 (mm)	구속력 (MPa)	구속비 (f_l/f_{co}')
강판	분리형	1.0	6.40	0.191
		1.5	9.60	0.287
	일체형	1.0	2.89	0.108
		1.5	4.34	0.162
GFRP	A-32 (32 MPa)	2.0	11.0	0.344
		4.0	22.0	0.688
		6.0	33.0	1.031
	A-43 (43 MPa)	2.0	11.0	0.265
		4.0	22.0	0.512
		6.0	33.0	0.767
	B-43 (43 MPa)	2.0	13.1	0.305
		4.0	26.2	0.377
		6.0	39.4	0.916

그림 3(a)의 분리형 강판 접착제가 없는 경우, 평균적인 유효구속계수, k_1 의 값은 2.11로 나타났으며, 회귀분석에서 오차의 정도를 나타내는 상관계수(correction coefficient, R2)는 설계압축강도가 27 MPa인 콘크리트에서 0.83으로 상대적으로 적게 나타났다. 또한, 그림 3(b)의 접착제가 있는 경우에는, 유효구속계수가 1.47로 접착제가 없는 경우에 비해서 30% 적으며, 상관계수도 평균적으로 0.635로 상대적으로 오차가 크다. 이러한 결과는 표 1에서 보듯이 1.0 mm 강판에 접착제를 사용하는 경우 강도비가 상대적으로 적기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 분리형 강판에서 접착제를 사용하는 것은 강판 두께에 따른 보강효과가 접착제가 없는 경우에 비해 적다고 판단할 수 있다. 또한, 회귀분석결과에서 오차가 큰 것으로 볼 때, 강도발현이 균일하지 못하다고 판단된다. 이러한 원인은 최은수 등(2008)의 논문에서 언급한 것과 같이 분리형 강판을 결합하기 위한 용접부의 파괴에

의해서 강재에 충분한 변형이 발생하지 못했고 이로 인해 항복강도까지 발현되지 못하는 경우가 발생했다고 판단된다 (그림 6(a) 참조). 그러나 그림 4(a) 일체형 강판의 경우 유효 구속계수가 4.1로 상대적으로 크고, 상관계수도 0.97로 매우 양호하다. 또한, 4.1의 유효구속계수는 Richart et al. (1928)이 제시한 값과도 일치한다. 따라서 일체형으로 강판으로 보강하는 경우는 구속효과에 있어 기존의 연구결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)에서 보듯이 일체형 강판은 용접부에서 파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해서 스틸밴드로 보강하였고, 이로 인해 강판에 충분한 변형이 발생하고 항복강도에 이르렀을 것으로 판단된다.

GFRP 튜브로 보강한 콘크리트의 구속효과 분석은 그림 5에 나타나 있다. 유효구속계수가 A-32, A-43 및 B-43의 경우 각각 1.71, 0.79 및 1.21로 일체형 강판에 비해서 매우 작고, 상관계수도 상대적으로 작아 회귀분석에서 오차가 큰 것을 알 수 있다. 압축강도가 43 MPa인 경우 표 3에서 보듯이 두께 2.0mm GFRP 튜브는 강도비가 평균적으로 1.06으로 구속효과가 거의 없다. 위의 GFRP 보강에 의한 구속효과가 나타나지 않는 것과 같이, CFRP 시트에 의한 콘크리트 보강에서도 구속효과가 없는 경우가 있는 것으로 보고되고 있다 (염광수 등, 2004). 염광수 등 (2004)은 이러한 경우 구속효과가 없는 경우를 제외하고 y-절편 1.0의 구속조건을 유지한 상태에서 선형회귀분석을 실시하였다. 그러나 y-절편 1.0의 구속조건을 유지하면 모든 경우에 있어 구속효과가 발현되는 것으로 추정되기 때문에 실재와 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서 구속효과가 없거나 미미한 경우를 제외하고, y-절편이 1.0인 구속조건 없이 선형회귀분석을 수행하였다.

이렇게 분석한 결과가 그림 7에 나타나 있다. 그림 7에서의 유효구속계수는 A-type의 경우 각각 1.98과 1.38로 나타났으며, B-type의 경우 2.32로 나타났다. 또한, 상관계수도 0.94 이상으로 그림 5의 결과에 비해 양호함을 알 수 있다.



(b) 접착제가 있는 경우
그림 3. 분리형 강판 보강의 구속효과 분석

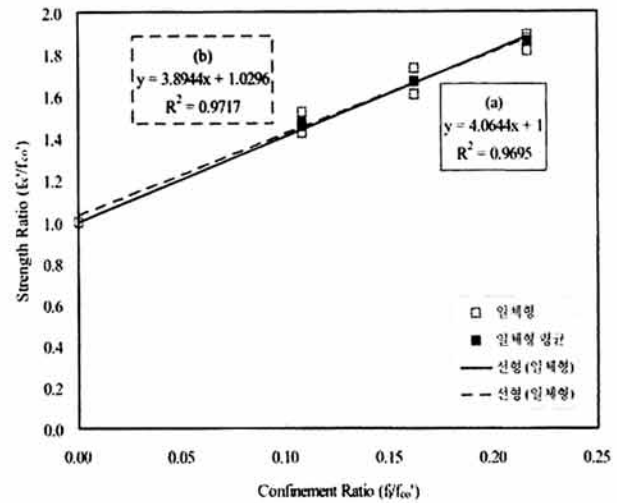


그림 4. 일체형 강판의 구속효과 분석

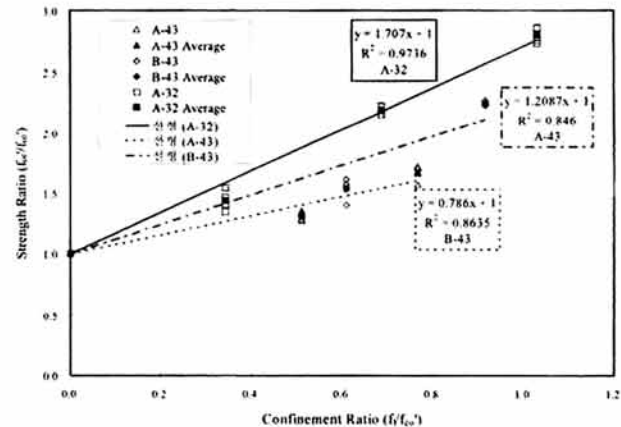
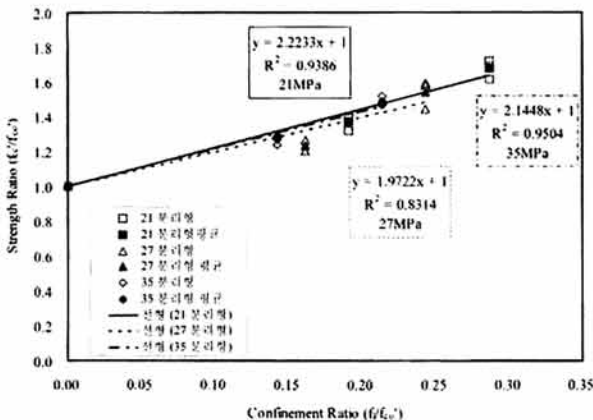
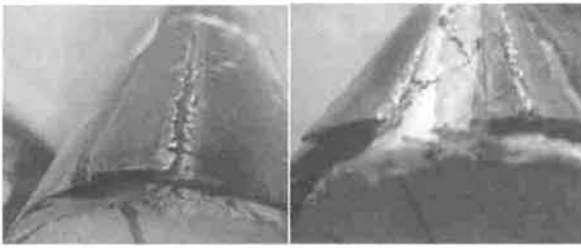


그림 5. GFRP 튜브의 구속효과 분석



(a) 접착제가 없는 경우



(a) 분리형 강판의 파괴양상



(b) 일체형 강판의 실험 후 모습
그림 6. 강판보강의 파괴양상

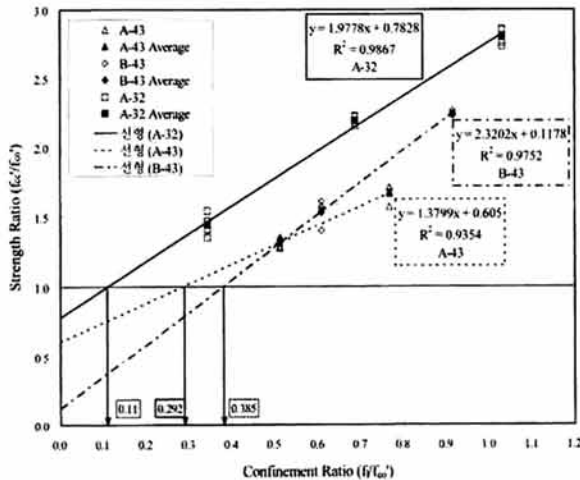


그림 7. GFRP 튜브 구속효과의 재분석

그림 7에서 선형회귀분석의 직선과 강도비 1.0의 수평선이 교차하는 점은 구속효과의 임계점 (critical point)으로 그 이하의 구속비에서는 구속효과가 발현되지 않는다고 볼 수 있다. 임계점에서의 구속비는 A-32, A-43 및 B-43의 값들이 0.11, 0.292 및 0.385로 나타났다. 식 (2)를 이용하여 임계점에 해당하는 GFRP 튜브의 두께를 계산하면 각각 0.64, 2.3 및 2.5 mm가 된다. 따라서 43 MPa 콘크리트에서는 두께 2.0 mm의 GFRP 튜브는 구속효과가 나타나지 않는 것으로 판단되며, 이것은 실험결과와 일치한다. 또한, 그림 7에서 A-32의 유효구속계수가 1.98로 A-43의 유효구속계수인 1.38보다 30% 크다. 따라서 콘크리트의 압축강도가 크면 동일한 GFRP에서 보강량을 증가시켰을 경우 구속효과가 상대적으로 적게 나타나는 것을 알 수 있다. A-43과 B-43을

비교하면, 유효구속계수가 1.38과 2.32로 B-43이 월등히 크다. 이것은 B-type의 GFRP의 인장강도가 상대적으로 20% 크고, 탄성계수가 11% 크기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 결론적으로 GFRP 튜브의 구속효과는 인장강도 및 탄성계수가 크고 콘크리트의 압축강도가 작을수록 양호하게 나타난다고 판단할 수 있다.

그림 4의 (b)는 일체형 강판의 데이터를 y-절편이 1.0인 구속조건을 해지하고 선형회귀분석을 수행한 것이다. 결과는 유효구속계수가 3.89이고, y-절편이 1.03이며, R2 값이 0.97로 나타났다. 이것은 y-절편이 1.0인 구속조건을 사용한 것과 매우 유사한 결과로 일체형 강판의 경우 모든 두께에 대하여 구속효과가 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로 강은 탄성계수가 200 GPa로 본 연구에서 사용한 GFRP의 약 12~13배의 크기를 가지고 있다. 따라서 작은 두께의 보강에 대해서도 구속효과가 나타나는 것이다. 강판을 사용하여 콘크리트를 보강하는 경우 탄성계수비가 크기 때문에 작은 두께를 사용해도 환산단면으로 치환하면 상당한 두께가 된다. 그러나 본 연구에서 사용한 GFRP의 탄성계수(15.1과 16.8 MPa)는 본 연구에서 사용한 압축강도 32MPa의 탄성계수(26.6MPa)보다 작기 때문에 환산단면으로 치환하면 원래의 두께보다 작은 두께를 가지게 된다. 즉, 두께 2 mm의 GFRP 튜브를 사용하면 A-43의 경우 두께 0.96 mm의 콘크리트를 추가로 붙인 것과 같아, 구속효과는 거의 나타나지 않는 것이다.

3.2 파단변형률(Fracture Strain)

콘크리트는 취성재료로 압축하중을 받을 경우에 매우 작은 변형률에서 파괴가 발생한다. 그러나 강 또는 FRP 자켓으로 구속하게 되면 증가된 연성거동을 보이게 된다. 연성거동의 능력을 평가하는 기준으로 본 연구에서 파단변형률을 비교하였다.

그림 8에는 구속형태에 따른 파단변형률을 표시하였다. 분리형 강판의 경우 파단변형률이 산재하는 것은 용접부에서 파괴가 발생하였기 때문이다. 그러나 일체형 강판의 경우 용접부를 보강하여 약 4%에 이르는 파단변형률이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 파단변형률도 시편이 파단이 된 것이 아니라 계측기의 한계 때문에 실험을 중단한 것이기 때문에 실제 파단변형률은 이 보다 클 것이다.

GFRP 튜브로 보강된 콘크리트의 파단변형률은 1.5% 내외로 발생하고 있다. 이것은 일체형 강판의 파단변형률의 37.5%에 해당하는 값으로 상대적으로 매우 작은 값이다. 본 연구에서 사용한 GFRP의 인장 파단변형률은 약 2% 내

외이다. 이 값은 강재의 인장 파단변형률인 10%에 비해 매우 작은 값이다. 따라서 GFRP의 인장 파단변형률의 근처에서 보강된 시험체가 파괴는 것을 알 수 있다. GFRP 튜브로 구속된 콘크리트가 강관으로 구속된 콘크리트에 비해 조기에 파단이 발생하는 것은 지진 시에 흡수할 수 있는 에너지 양과 구조물의 전체적인 연성거동에 크게 영향을 준다. 기존 또는 신규 구조물에서 강관 또는 FRP 자켓을 사용하는 목적은 강도의 증가가 아니라 구조물의 연성거동 능력 증대 및 에너지 소산능력의 향상이다. 따라서 GFRP 튜브 시험의 상대적인 조기파단은 이러한 점에서 단점으로 작용할 수 있다.

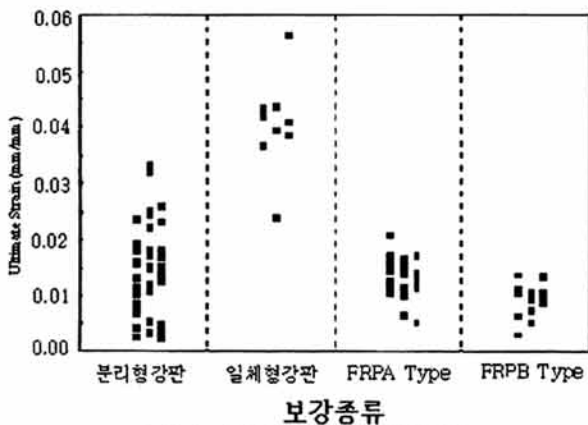


그림 8. 구속형태에 따른 파단변형률

4. 결론

본 연구에서는 횡방향 구속압력에 의해 강관으로 구속된 콘크리트와 GFRP 튜브로 구속된 콘크리트의 구속효과를 분석 및 평가를 수행하였다. 분리형 강관의 경우, 용접부에서 파단이 발생하여 강도의 증가 및 연성거동의 증가에 부정적인 결과를 가져왔다. 또한, 최대압축강도의 추정을 위한 회귀분석에서도 상대적으로 불량한 결과를 나타냈다. 일체형 강관은 용접부의 조기파단을 방지하기 위하여 보강 스틸밴드를 사용하였다. 일체형에서는 강관에 충분한 소성변형이 발생하였고 최대압축강도 및 파단변형률의 증가가 분리형에 비해서 상대적으로 우수했다. 또한, 최대압축강도 추정의 회귀분석에서도 유효구속계수가 4.1로 나타나 Richart et al. (1928)이 제시한 값과 동일한 값을 얻었다. 이를 통해서 판단하면, 일체형의 강관은 콘크리트에 양호한 구속효과를 제공함을 알 수 있다. 파단변형률에서도 최대 6%에 이르는 변형률을 보여 우수한 연성거동 능력을 보여주었다.

GFRP 튜브를 사용하여 콘크리트를 구속하는 경우, 콘크리트 압축강도가 상대적으로 크고 GFRP 튜브의 두께가 상대적으로 작을 때 구속효과가 거의 나타나지 않는 경우가 있었다.

이러한 구속효과가 나타나지 않는 데이터는 최대압축강도 추정을 위한 회귀분석의 결과를 불량하게 하는 것을 알 수 있었으며, 이러한 데이터를 제외하고 회귀분석을 수행할 때 y-절편이 1.0인 구속조건을 해제하고 회귀분석을 수행하는 것이 적절하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 회귀분석은 각 GFRP 튜브의 구속효과 임계점을 보여주기 때문에 최소 보강량을 추정할 수 있었으며, 추정된 임계두께와 실험결과와 일치하는 것을 볼 수 있었다.

GFRP 튜브로 구속된 콘크리트의 최대압축강도 추정 회귀분석 결과, 유효구속계수가 A-32와 B-43의 경우 1.98과 2.32로 Lam and Teng (2002)이 제시한 유효구속계수 2.0과 유사하지만, A-43의 경우 1.38로 차이가 크다. 따라서 유효구속계수 모든 FRP 구속에서 2.0으로 동일하게 사용하는 것은 적절하다고 판단되지 않으며, 유효구속계수는 콘크리트의 압축강도와 FRP의 인장강도의 함수로 판단되므로, 유효구속계수 2.0을 적용할 수 있는 조건을 추후 연구를 통해서 제시하는 것이 바람직하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 홍익대학교 학술연구진흥비(2009)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사를 표하는 바입니다.

참고 문헌

염광수, 이영호, 박영준, 이학은 (2004) 탄소섬유시트(CFS)로 보강된 콘크리트의 거동, 대한토목학회 논문집(구조공학), 대한토목학회, 제24권 2A호, pp.259-265.
 최은수, 조성철, 정영수, 조백순 (2008) 그라우팅이 필요 없는 RC기둥 강관 보강기법, 한국강구조학회 논문집, 제20권 1호, pp.55-65.
 태기호, 최은수 (2008) RC기둥 보강을 위한 새로운 강관 보강 기법 및 수정 연속체 모델, 한국강구조학회 논문집, 제20권 5호, pp.675-681.
 최은수, 이영근 (2009) 외부 자켓에 의해 보강된 콘크리트 압축시험의 압축변형률 측정 및 보정, 한국구조물 진단 유지관리 공학회 논문집, 제13권, pp.215-222.
 Bousias, S., Spathis, A.L. and Fardis, M.N. (2007) Seismic Retrofitting of Columns with Lap Spliced Smooth Bars Through FRP or Concrete Jackets, *Journal of Earthquake Engineering*, 11, pp.653-674.
 Fardis, M.N. and Khalili, H. (1982) FRP-encased concrete as a structural material, *Magazine of Concrete Research*, 34(122), pp.191-202.

- Lam, L. and Teng, J.G. (2002) Strength Models for Fiber-Reinforced Plastic-Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No.5, pp. 612-623
- Richart, F.E., Brandtzaeg, A. and Brown, R.L. (1928) A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, Bullentin, No. 185, Univ. of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Ill.
- Richart, F.E., Brandtzaeg, A. and Brown, R.L. (1929)

The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression, Bullentin, No. 185, Univ. of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Ill.

- Spoelstra, M. and Monti, G. (1999) FRP-Confined Concrete Model, *Journal of Composite for Construction*, 3(3), pp.143-150.

(접수일자 : 2009. 4. 26 / 심사일 2009. 5. 19 /
게재확정일 2009. 7. 21)