

FRP로 구속된 콘크리트 압축부재의 구속효과 분석

Analysis of Confinement Effectiveness for FRP Confined Concrete Columns

최은수* · 최승환**

Choi, Eunsoo · Choi, Seung-Hwan

Abstract

Concrete columns strengthening effect due to FRP (Fiber Reinforced Polymer) confinement depends on the elastic modulus of the FRP. This study analyzes the retrofitting effect of FRP confinements according to elastic modulus of FRPs using the existing data and suggests a practical model to assess the strengthening effect. This study subdivides the FRP elastic modulus into three parts based on normal concrete and steel elastic modulus. The slope and the y-axis intersection seem to increase with increasing FRP elastic modulus. In addition, the strengthening effect does not develop up to some amount of FRP confinement having relatively smaller elastic modulus than the compressive elastic modulus of concrete. In this case, a linear model to assess the strengthening effect is hard to be used. Thus, this study suggests that the FRP jackets having 2 times larger elastic modulus than that of concrete are recommended to be used for retrofit of concrete and that a linear model can be applied for the case. The suggested model shows nearly the same result regardless to the restraint of the y-axis intersection. This has been observed at the model of steel confinement and, thus, is a reliable result.

Keywords : FRP, Confinement effect, Concrete, Elastic modulus

요 지

FRP 자켓으로 콘크리트를 보강하는 경우 FRP의 탄성계수에 따라 강도증진효과가 상이하게 나타난다. 본 논문에서는 기존의 데이터를 사용하여 FRP 보강재의 탄성계수에 따른 보강효과를 분석하고, 실용적으로 사용할 수 있는 강도증진 추정모델을 제시하였다. FRP의 탄성계수는 일반 콘크리트의 압축탄성계수와 강재의 탄성계수를 기준으로 세 구간으로 구분하여 비교하였다. FRP의 탄성계수가 증가할수록 추정모델의 기울기 및 y-절편이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, FRP의 탄성계수가 콘크리트의 압축탄성계수보다 작은 경우 FRP의 보강량이 작으며 보강효과가 없는 것으로 나타났으며, 이러한 경우 선형적인 모델을 사용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 FRP의 탄성계수가 콘크리트 압축탄성계수보다 약 2배 큰 것만을 사용하는 경우의 보강효과 추정모델을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 모델은 y-절편의 구속조건 여부와 상관없이 거의 동일한 결과를 보여 주었으며, 이러한 특징은 강재보강에서도 발견되는 것으로 합리적인 결과라고 판단할 수 있다.

핵심용어 : FRP, 구속효과, 콘크리트, 탄성계수

1. 서 론

외부보강(external retrofit)기법은 지진에 대한 대응능력을 충분히 확보하지 못한 철근콘크리트 기둥에 효과가 있다는 것이 잘 알려져 있다(Richart *et al.*, 1928; Ahmad and Shah, 1982; Mander *et al.*, 1988). 외부보강은 일반적으로 콘크리트에 수동구속(passive confinement)을 제공하여 콘크리트의 강도증진과 균열 후 탈락을 방지하여 철근콘크리트 기둥의 연성거동을 유발하여 지진에 대한 거동을 개선하는 효과가 있다. 철근콘크리트 기둥의 외부보강을 위해서 사용되는 대표적인 재료는 강재와 FRP(Fiber Reinforced Plastic or Polymer)로 초기에 강재를 이용한 보강기법과 효과에 대한 연구가 수행되었

고(Chai *et al.*, 1991), 후에 새로운 재료인 FRP를 이용한 보강연구가 수행되었다(Pantelides *et al.*, 2004). 최근에 강재보강에서 기존의 기법에서 사용되었던 그라우팅이 없이 가능한 강재보강기법이 소개되었고, 실험을 통해서 성능이 검증되었다(Choi *et al.*, 2009). FRP의 경우 Carbon FRP(CFRP)와 Glass FRP(GFRP)는 재료의 특성에 차이가 있어 보강효과에서도 상당한 차이를 발생시킨다(최은수 등, 2009). Spoelstra and Monti(1999)는 그림 1과 같이 강재, GFRP 및 CFRP로 보강한 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 비교하여 설명하고 있다. 강재는 항복하는 시점에서 구속된 콘크리트가 최대강도(peak strength)를 나타내지만, GFRP와 CFRP는 파괴 시점까지 선형 거동을 하기 때문에 최대강도가 내부의 콘크리트의 최대강도

*정회원 · 교신저자 · 홍익대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : eunsoochoi@hongik.ac.kr)

**홍익대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : piawall@korea.com)

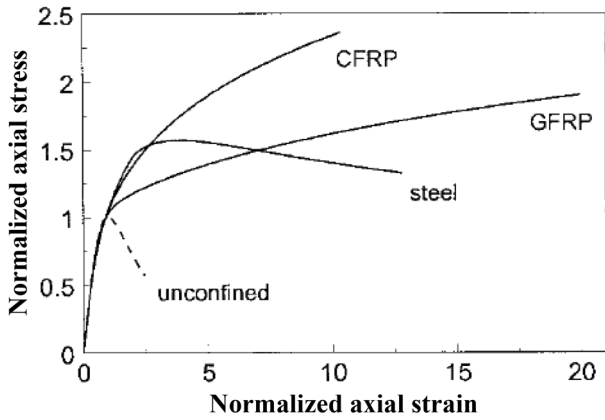


그림 1. 보강재료에 따른 구속 콘크리트의 응력-변형률 곡선 (Spoelstra and Monti, 1999)

발현시점을 지나서 FRP 보강재가 파괴되는 점에서 발생한다. 따라서, 강재는 최대강도가 발생하는 변형률이 비구속 콘크리트의 최대강도 변형률에 비해 2-3배인데 반해, CFRP는 10배 이상, GFRP는 15배 이상 크게 나타난다. GFRP는 일반적으로 파단 변형률이 CFRP보다 크기 때문에 나타나는 현상이다. 또한, CFRP는 GFRP에 비해 탄성계수가 상당히 크기 때문에 강도증가곡선 부분에서 기울기가 GFRP에 비해 크게 나타난다.

강재의 항복강도는 제작기법에 따라서 달라질 수 있으나, 탄성계수는 거의 일정하다. 반면, FRP는 제작기법에 따라서 파단강도 및 탄성계수의 변화폭이 매우 크다. CFRP는 GFRP에 비해 탄성계수가 10배 이상 큰 것이 일반적이다. 이러한 재료의 특성의 차이는 콘크리트를 구속하는 효과에 있어서도 차이를 발생시킬 수 있다. 강재 및 FRP로 콘크리트를 보강하는 기법을 실무적으로 사용하기 위해서는 보강에 의한 최대강도의 증진을 추정할 수 있는 기법이 필요하며, 본 연구에서는 FRP로 보강된 콘크리트의 보강효과를 분석하고 적절한 모델을 제시하고자 한다. 이를 위해서 기존 논문의 자료를 활용하여 분석을 수행하였다. FRP 자켓은 강자켓에 비해 여러 장점이 있으므로 실무적으로 사용하기 위해서는 실용적이며 효과적인 보강효과 추정모델이 필요하다 (Harajli and Dagher, 2008).

2. 보강효과 평가 모델

외부구속에 의한 콘크리트의 최대압축강도 증가를 평가하는 모델은 최초로 Richart *et al.*(1928)에 의해서 아래 식과 같이 제안되었다.

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

여기서,

$$f_l = \frac{2t f_{yh}}{d} : \text{횡방향 구속응력}$$

f'_{cc} : 구속된 콘크리트의 압축강도,

f'_{co} : 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도

k_1 : 유효구속계수 (confinement effectiveness coefficient)

f_{yh} : 강재의 항복강도 또는 FRP의 파단강도; t: 보강재의 두께; d: 시편의 지름

식 (1)에서 f'_{cc}/f'_{co} 은 강도비(strength ratio)이고, f_l/f'_{co} 은 구속비(confinement ratio)를 나타내며, 식에서 유효구속계수 k_1 은 능동구속 하에서 4.1로 평가되었다. 후에 Richart *et al.*(1929)은 위의 모델이 보강철근으로 구속된 콘크리트에도 적용될 수 있음을 보여주었다. 최근에 제안된 그라우팅이 없는 강자켓으로 콘크리트를 보강하는 경우 k_1 이 4.05로 나타나는 것을 보여주었다(Choi *et al.*, 2009). 또한 강자켓 구속효과분석에서 식 (1)의 y-절편에 대한 구속조건이 있는 경우와 없는 경우에 대한 모델을 비교하였으며, 두 경우가 거의 유사한 결과를 보여주었다(최은수, 안동준, 2009). 위의 결과들을 보면, 강자켓 또는 보강철근과 같은 강재로 콘크리트를 구속하는 경우 k_1 이 4.1 또는 4.05로 매우 유사하게 나타났으므로 식 (1)을 강재로 보강하는 경우에 유효하게 사용될 수 있음을 알 수 있고, y-절편의 구속조건이 없는 경우와 있는 경우에 거의 동일한 모델이 나타난 것은 강재로 보강하는 경우 항상 강도증진 효과가 있다는 것을 보여준다.

FRP로 보강하는 경우는 여러 모델들이 제안되었으나, 실용적으로는 식 (1)을 사용하였다. 식 (1)과 같은 모델을 사용하는 경우 k_1 값이 2.98(Miyauchi *et al.*, 1997) 또는 2.0(Lam and Teng, 2002)으로 제안되었다. 일반적인 모델들은 구속비 f_l/f'_{co} 만을 변수로 고려하였지만, Mirmiran *et al.*(1998)은 시편의 길이-지름 비(L/D)를 고려하였으며, Karbhari and Gao(1997)은 FRP 자켓과 콘크리트의 탄성계수 비를 고려하는 모델을 아래와 같이 제안하였다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.1 v_c \frac{2t E_{FRP}}{d E_c} + \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (2)$$

여기서 v_c 와 E_c 는 각각 콘크리트의 포아송 비 및 탄성계수를 나타낸다. FRP의 경우는 탄성계수가 강재와는 다르게 다양하기 때문에 탄성계수 비를 고려하는 것도 상당히 합리적인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 FRP 자켓의 탄성계수에 따라 자료를 구분하고 이를 분석하고자 한다.

3. FRP 자켓의 보강효과 분석

본 연구에서는 기존에 정리되어 있는 자료를 활용하여 연구를 수행하였으며, Lam and Teng(2002)의 연구에 자료들이 나타나 있다. FRP 자켓의 보강효과 분석을 위해서 FRP의 탄성계수를 다음과 같은 세 구간으로 분리하여 분석을 수행하였다.

- 1) Case I : $E_{FRP} \leq 25(GPa)$
- 2) Case II : $25 < E_{FRP} \leq 200(GPa)$
- 3) Case III : $E_{FRP} > 200(GPa)$

구분의 기준은 일반적인 콘크리트의 탄성계수와 강재의 탄성계수를 이용하였으며, 일반적인 콘크리트의 최대압축강도를 30 MPa로 본다면, 압축탄성계수 산정공식인 $E_c = 4700 \sqrt{f'_c} (MPa)$ 을 이용하여 콘크리트의 탄성계수를 계산하면 25 GPa이 된다. 강재의 탄성계수는 200 GPa이며, 강재의 경우 식 (1)이 매우 잘 적용되기 때문에 이를 기준점으로 삼아 FRP의 탄성계수가 강재보다 작은 경우와 큰 경우의 특성을 분석하였다. 본 연구에서 사용된 자료는 Lam and Teng(2002)이 정

리한 것으로 표 1-3에 각 구간에 따라서 자료를 다시 정리하여 활용하였다. 각 구간의 자료들의 분포가 정규분포라는 가정 하에 평균과 표준편차를 사용하여 분석을 수행하였으며, 식 (1)을 사용할 때 y-절편 1.0의 구속조건이 있는 경우와 없는 경우를 분리해서 수행하였다. 따라서 아래와 같은 수식을 이용하였다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = a + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (3)$$

여기서, 구속조건이 있는 경우에는 a=1.0 이다.

3.1 Case I : $E_{FRP} \leq 25(GPa)$ 의 경우

FRP의 탄성계수가 콘크리트 압축탄성계수보다 작은 경우는 7개의 데이터를 사용했으며, E_{FRP} 의 평균은 17.6 GPa

이고 표준편차는 2.72이다. 표 1에는 구속조건이 있는 경우 k_1 값과 구속조건이 없는 경우 k_1 과 a 값이 나타나 있다. 구속조건이 있는 경우에는 k_1 값은 2.06으로 구속조건이 없는 경우 k_1 값인 2.44와 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있다. 또한, 구속조건이 없는 경우 a 값은 0.81으로 일반적으로 사용되는 1.0 보다 작다. 이러한 것은 기존의 연구에서 분석한 결과와 일치한다. 즉, FRP의 탄성계수가 콘크리트 압축탄성계수보다 작은 경우 일정한 보강량까지는 최대압축강도의 증진효과가 나타나지 않는 것으로 판단할 수 있다.

3.2 Case II : $25 < E_{FRP} \leq 200(GPa)$ 의 경우

FRP의 탄성계수가 콘크리트 압축탄성계수와 강재의 탄성계수 사이에 존재하는 경우는 15개의 데이터를 사용하였으며, E_{FRP} 의 평균은 71.5 GPa이고 표준편차는 37.05 이다.

표 1. FRP 탄성계수 $E_{FRP} \leq 25(GPa)$ 인 구속 콘크리트의 실험결과

Source of data	d (mm)	L (mm)	f'_{co} (MPa)	Fiber type	f_{FRP} (MPa)	Restrained condition			Unrestrained condition			f_l/f'_{co}	f'_{cc}/f'_{co}
						E_{FRP} (GPa)	k_1	R^2	k_1	R^2	a		
C A-32	100	200	32	E glass filament		15.1	1.71	0.974	1.98	0.987	0.78	0.68	2.14
C A-43	100	200	43	E glass filament		15.1	0.79	0.864	1.38	0.935	0.61	0.51	1.35
Harries <i>et al.</i> , 1998	152	610	26.2	E glass sheets	330	19.1	2.02	0.942	2.63	1.000	0.83	0.25	1.49
Harries <i>et al.</i> , 1998	152	610	26.2	E glass sheets	383	21.6	2.60	0.995	2.79	1.000	0.94	0.29	1.74
Mastrapa 1997	153	305	31.2	S glass sheets	565	19.2	2.55	0.974	2.90	0.989	0.79	0.59	2.48
Mastrapa 1997 (by wrapped FRP sheets)	153	305	31.2	S glass sheets	565	19.2	2.70	0.959	3.09	0.975	0.76	0.59	2.56
Rochette and Labossiere 2000	150	300	43.0	Armid sheets	230	13.6	2.06	0.945	2.31	0.958	0.93	0.23	1.46
평균						17.6	2.06	0.95	2.44	0.98	0.81		
표준편차						2.72	0.62	0.04	0.55	0.02	0.106		

표 2. FRP 탄성계수 $25 < E_{FRP} \leq 200(GPa)$ 인 구속 콘크리트의 실험결과

Source of date	d (mm)	L (mm)	f'_{co} (MPa)	Fiber type	f_{FRP} (MPa)	Restrained condition			Unrestrained condition			f_l/f'_{co}	f'_{cc}/f'_{co}
						E_{FRP} (GPa)	k_1	R^2	k_1	R^2	a		
Ahmad <i>et al.</i> , 1991	102	203		Glass strands	2070	48.3	2.24	0.947	1.94	0.9700	1.22	0.91	2.96
Harries <i>et al.</i> , 1998	152	610	26.2	Carbon sheets	580	38.1	2.63	0.729	1.76	1.0000	1.42	0.44	2.19
Howie and Karbhari 1994	152	305	38.6	Carbon sheets		62.7	2.50	0.937	2.59	0.9383	0.97	0.25	1.62
Mirmiran <i>et al.</i> , 1998	153	305	44.8	E glass filament		39.	2.14	0.887	2.91	0.9623	0.70	0.35	1.71
Mirmiran <i>et al.</i> , 1998	153	305	32.0	E glass filament		39.4	2.36	0.713	1.63	0.9183	1.44	0.54	2.32
Mirmiran <i>et al.</i> , 1998	153	305	30.9	E glass filament		39.	2.33	0.889	2.03	0.9097	1.18	0.55	2.31
Mirmiran <i>et al.</i> , 1998	153	305	29.6	E glass filament		39.4	2.80	0.653	2.36	0.6792	1.29	0.58	2.66
Saafi <i>et al.</i> , 1999	152	435	35.0	Glass filament		34.0	2.85	0.936	2.33	0.9996	1.20	0.31	1.92
Soudki and Green 1996	152	305	46.0	Carbon sheets	1481	140.0	2.03	0.991	1.86	1.0000	1.02	0.24	1.6
Tegola and Manni 1999	150	300	25.6	E glass filament		25.3	1.79	0.820	1.69	0.8222	1.13	1.32	3.36
Watanable <i>et al.</i> , 1997	100	200	30.2	Armid sheets		90.6	2.52	0.913	3.46	0.999	0.44	0.51	2.2
Xiao and Wu 2000	152	305	55.2	Carbon sheets	1577	105.0	1.79	0.798	2.89	0.9582	0.63	0.29	1.46
Xiao and Wu 2000	152	305	43.8	Carbon sheets	1577	105.0	2.16	0.878	2.70	0.9223	0.77	0.36	1.74
Xiao and Wu 2000	152	305	33.7	Carbon sheets	1577	105.0	2.29	0.934	2.47	0.9399	0.90	0.47	2.06
Zhang <i>et al.</i> , 2000	150	300	34.3	Carbon sheets		64.0	2.35	0.899	3.39	1.0000	0.75	0.23	1.51
평균						71.6	2.30	0.85	2.40	0.93	1.00		
표준편차						37.05	0.333	0.10	0.569	0.08	0.289		

표 3. FRP 탄성계수 $E_{FRP} > 200(GPa)$ 인 구속 콘크리트의 실험결과

Source of date	d (mm)	L (mm)	f'_{CO} (MPa)	Fiber type	Restrained condition				Unrestrained condition			f_i/f'_{co}	f'_{cc}/f'_{co}
					f_{FRP} (MPa)	E_{FRP} (GPa)	k_1	R^2	k_1	R^2	a		
Harmonand Slattery 1992 ^a	51	105	41.0	Carbon sheets	3500	235.0	2.26	0.927	1.86	0.9969	1.65	1.09	3.67
Matthysetal. 1999 ^a	150	300	34.9	Carbon sheets		310.0	1.73	0.982	2.00	1.0000	0.97	0.11	1.19
Miyauchi et al., 1997	100	200	51.9	Carbon sheets	3481	230.5	3.32	0.982	3.80	1.0000	0.88	0.23	1.74
Miyauchi et al., 1997	150	300	45.2	Carbon sheets	3481	230.5	3.21	0.977	3.75	1.0000	0.90	0.17	1.54
Miyauchi et al., 1997	100	200	33.7	Carbon sheets	3481	230.5	3.49	0.879	2.65	0.9984	1.45	0.45	2.65
Miyauchi et al., 1997	150	300	31.2	Carbon sheets	3481	230.5	3.43	0.951	2.85	1.0000	1.22	0.33	2.15
Miyauchi et al., 1999	100	200	33.7	Carbon sheets	3481	230.5	3.49	0.879	2.65	0.9984	1.45	0.45	2.65
Miyauchi et al., 1999	100	200	26.3	Carbon sheets	3481	230.5	2.71	0.937	2.24	0.9888	1.32	0.58	2.62
Miyauchi et al., 1999	150	300	23.6	Carbon sheets	3481	230.5	2.64	0.998	2.72	0.9992	0.96	0.43	2.14
Saafi et al., 1999	152	435	35.0	Carbon filament		390.7	2.48	0.878	1.92	0.9986	1.32	0.4	2.09
Watanable et al., 1997	100	200	30.2	Carbon sheets		418.1	2.11	0.952	1.93	0.9649	1.15	0.55	2.20
평균						269.7	2.81	0.94	2.58	0.99	1.206		
표준편차						67.58	0.592	0.04	0.661	0.01	0.245		

최대값은 140 GPa이고 최소값은 38.1 GPa로 최대값이 범위의 한계인 200 GPa과 차이가 상당하다. 표 2에서 구속조건이 있는 경우 k_1 값은 2.30이며, 구속조건이 없는 경우는 2.40이다. 또한 구속조건이 없는 경우 a 값은 1.0으로 나타났다. 이 결과를 보면 구속조건이 있는 경우와 없는 경우의 결과 값이 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 기존의 연구결과를 보면 강제에서도 구속조건의 여부와 관계없이 추정식이 거의 일치하는 것으로 나타나고 있어, FRP의 탄성계수가 콘크리트 압축탄성계수보다 큰 경우는 식 (1)을 강재와 같이 안정적으로 사용할 수 있음을 알 수 있다(최은수, 안동준, 2009). 두 경우에 있어 k_1 값이 3.4%의 차이를 보이고 있으나, 기존의 강제 보강에 대한 연구에서도 두 경우에 있어 k_1 값이 4.4%의 차이를 보고 있어 매우 양호한 결과인 것을 알 수 있다.

3.3 Case III : $E_{FRP} > 200(GPa)$ 의 경우

FRP의 탄성계수가 200 GPa보다 큰 경우의 결과가 표 3에 나타나 있다. 이 경우는 11개의 데이터를 사용했으며, E_{FRP} 의 평균은 269.8 GPa이며 표준편차는 67.58이다. 구속조건이 있는 경우는 k_1 값이 2.81이고, 구속조건이 없는 경우는 2.58로 나타났다. 구속조건이 없는 경우 a 값은 1.21로 나타났다. a 값은 실제적으로 1.0 보다 크게 나타날 수가 없는 것으로 1.0보다 크게 되면 보강이 없는 경우에도 보강효과가 있는 것으로 되기 때문에 사용할 수가 없다.

4. 고찰 및 제안

위에서 얻은 각 구간에 대한 모델을 그림 2에 나타내었다. 구속조건이 있는 경우에는 FRP의 탄성계수가 증가함에 따라 k_1 값도 증가하는 경향을 보였다. 그러나 구속조건이 없는 경우에는 k_1 값의 증가보다는 y-절편인 a 값의 증가현상이 나타났다. k_1 값의 증가는 모델에서 기울기가 증가하는 것이고 a 값의 증가는 추세선이 위로 움직이는 것을 나타내므로, 기울기의 증가는 보강재의 양이 증가할 때 보강효과가 더 발

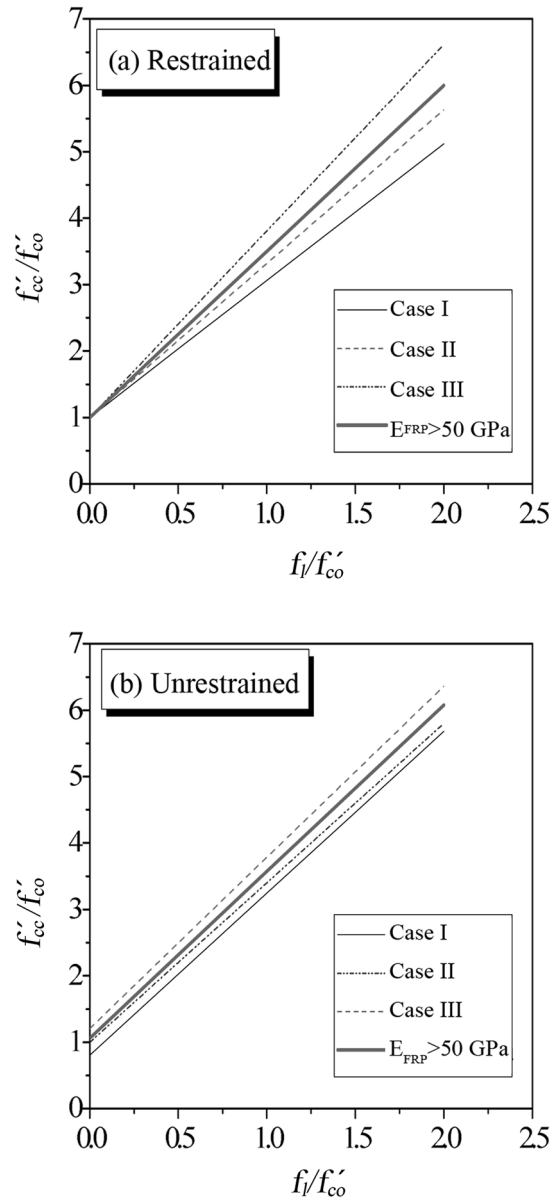


그림 2. FRP 탄성계수에 따른 추정모델

생하는 것을 의미하고 y-절편이 증가하는 것은 같은 보강량에서 보강효과가 크게 나타나는 것을 의미한다. 위의 결과를 바탕으로 고찰하면, FRP의 탄성계수가 200 GPa 이상인 경우, 위의 두 가지 현상이 모두 나타나는 것으로 판단된다. Case I 과 II를 비교하면 구속조건이 있는 경우에는 Case II의 k_1 값이 크게 나타나지만, 구속조건이 없는 경우에는 k_1 값이 유사하며, 반면에 a 값이 증가하는 것으로 나타났다. 구속조건이 있는 경우의 회귀분석의 신뢰도를 나타내는 R^2 값이 구속조건이 없을 때보다 작게 나타난다. 즉, 구속조건 없이 회귀분석을 수행하는 것이 더 적합한 추정모델을 제시해 준다는 의미이다.

일반적으로 FRP로 콘크리트를 보강하는 경우 두께는 수 mm로 제한된다. 실용적인 측면에서 아주 두꺼운 보강재를 사용하는 것은 용이한 것이 아니다. 만약, FRP의 탄성계수가 콘크리트의 압축탄성계수보다 작은 경우 1-2 mm 두께의 보강은 단면을 환산하면 1-2 mm 보다 작은 두께의 콘크리트를 붙이는 것과 같기 때문에 강도증진효과를 얻기가 힘들다. 따라서 분석결과에서 나타나는 것과 같이 y-절편인 a 값이 1.0 이하로 나타나게 된다. 이러한 FRP를 콘크리트의 보강재로 사용하는 것은 실용적이지 못하다고 판단된다. 보강효과를 추정하기 위한 선형모델을 제시할 수 없기 때문에 설계가 용이하지 않고, 두께를 과도하게 사용해야 하기 때문에 시공이 용이하지 않기 때문이다. 따라서 콘크리트 보강재로서 FRP는 탄성계수가 콘크리트 압축탄성계수보다 작은 것은 사용하는 것이 바람직하지 않다고 판단된다. 위의 결과를 바탕으로 FRP의 탄성계수가 콘크리트 압축탄성계수보다 큰 데이터 ($25(\text{GPa}) < E_{FRP}$) 만을 이용하는 경우, 구속조건이 있는 경우 k_1 값은 2.525이며, 구속조건이 없는 경우는 2.475로 2%의 차이가 발생한다.

또한, a 값은 1.09로 1.0과 9%의 차이가 발생한다. 이 결과는 구속조건 여부와 관계없이 거의 동일한 모델을 제시하기 때문에 상당히 신뢰할 수 있는 모델이라 생각된다. 그러나 실제사용에 있어서는 불확실성과 편차가 있기 때문에 본 연구에서는 FRP의 탄성계수가 콘크리트 압축탄성계수보다 약 2배가 큰 50 GPa 이상인 FRP를 사용할 것을 권고하며, 이러한 경우에 대해서 분석을 다시 수행하였다. 이 때 사용한 데이터는 17개이며, E_{FRP} 의 평균은 198.6 GPa이다. 구속이 있는 경우와 없는 경우의 k_1 값은 각각 2.50과 2.51로 거의 일치하고 있으며, 구속조건이 없는 경우의 a 값도 1.06으로 두 모델이 거의 동일한 것을 알 수 있다. 구속조건 여부에 따른 모델을 그림 2에 추가로 나타내었다. 그림 2(a)를 보면 구속조건하에서, $50(\text{GPa}) < E_{FRP}$ 에 대한 모델은 Case I 및 II의 기울기보다 크며, Case III의 기울기 보다는 작다. 비구속 상태에서도 위 모델은 Case II와 III 사이에 위치하고 있다. 즉, FRP의 탄성계수 영역이 추정모델에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FRP의 탄성계수가 50 GPa 이상인 것만을 콘크리트 보강재로 사용할 것을 권하며, 이 때 보강효과 추정을 위한 모델을 아래와 같이 제시한다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.5 \frac{f_1}{f'_{co}} \quad (4)$$

본 연구에서 제시한 k_1 값 2.5는 Lam and Teng(2002)

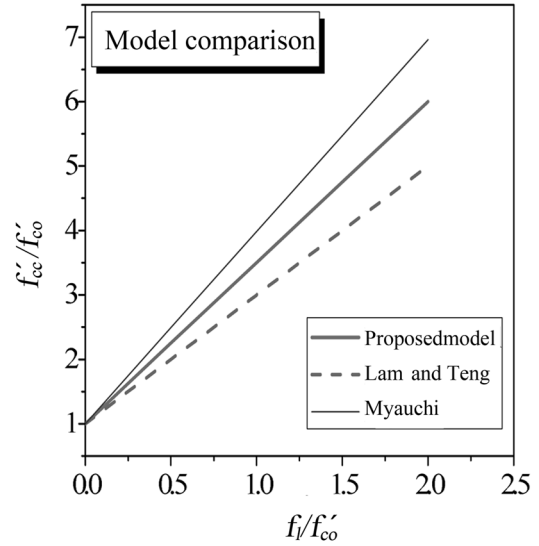


그림 3. 추정모델과 기존모델의 비교

이 제시한 2.0보다 약간 크게 나타났다. Lam and Teng (2002)은 모든 FRP에 대한 모델을 제시하는 것으로 위에서 설명한 것과 같이 FRP의 탄성계수가 감소하면 k_1 값이 감소하게 된다. 그림 3에는 세 추정모델이 비교되어 있다. 본 연구에서 제안한 모델은 Lam and Teng(2002)와 Miyauchi (1997)의 중간적인 위치를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 FRP로 콘크리트를 보강하는 경우 FRP의 탄성계수에 따른 보강효과의 특성을 파악하였다. FRP의 탄성계수가 증가하면 추정모델에서 기울기가 증가하는 것으로 파악되었다. 또한, FRP의 탄성계수가 콘크리트의 압축탄성계수보다 작은 경우 일정 보강량까지는 보강효과가 없다는 것을 여러 데이터를 통해서 일반적인 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 FRP는 콘크리트 보강재로 적합하지 않기 때문에 FRP의 탄성계수가 콘크리트의 압축탄성계수보다 2.0배 이상 큰 것만을 사용할 것을 권고하였다. 이러한 권고는 다소 보수적인 측면이 있으며, 실용적인 사용면에서 안정적이라 판단된다. FRP의 탄성계수가 50 GPa보다 큰 경우에 대한 강도증진효과 추정모델을 제시하였다. 제시된 추정모델은 구속조건 여부와 관계없이 거의 일정한 형태로 나타났으며, 이러한 현상은 강재를 사용하여 보강하는 것과 동일하다. 따라서 본 연구에서 제시하는 FRP를 이용한 콘크리트 보강 및 추정모델은 상당히 합리적인 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시된 모델은 k_1 값이 기존의 두 모델의 평균에 가까우며, 이는 모델 추정을 위해서 사용한 데이터의 특성이 상이하기 때문이라고 판단된다. 즉, 사용된 FRP의 탄성계수의 범위에 따라서 k_1 값이 달라지는 것이다. 따라서 추정모델을 제시함에 있어 FRP 탄성계수의 적용범위를 한정하는 것은 매우 의미 있는 것으로 판단된다. 특히, FRP의 탄성계수가 콘크리트 압축탄성계수보다 작거나 근접할수록 추정모델의 신뢰도가 떨어지기 때문에 주의해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 홍익대학교 학술연구진흥비(2010)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사를 표하는 바입니다.

참고문헌

- 최은수, 안동준(2009) 콘크리트 보강강판 및 GFRP 튜브의 구속 효과 분석 및 평가, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제21권 제4호, pp. 1-8.
- Ahmad, S.M. and Shah, S.P. (1982) Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement, *ACI Structural Journal*, Vol. 79, No. 6, pp. 484-490.
- Chai, Y.H., Priestly, M.J.N., and Seible, F. (1991) Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance, *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 5, pp. 572-584.
- Choi, E., Park, J., Nam, T.H., and Yoon, S.J. (2009) A new steel jacketing method for RC columns, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 61, No. 10, pp. 787-796.
- Harajli, M.H. and Dagher, F. (2008) Seismic strengthening of bond-critical regions in rectangular reinforced concrete columns using fiber-reinforced polymer wraps, *ACI Structural Journal*, Vol. 105, No. 1, pp. 68-77.
- Karbhari, V.M. and Gao, Y. (1997) Composite jacketed concrete under uniaxial compression-verification of simple design equation, *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 185-193.
- 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.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R. (1988) Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- 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, pp. 217-224.
- Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., and El Echary, H. (1998) Effect of column parameters on FRP-confined concrete, *Journal of Composite and Construction*, Vol. 2, No. 4, pp. 175-185.
- Pantelides, C.P., Alameddine, F., Sardo, T., and Imbsen, R. (2004) Seismic retrofit of state street bridge on interstate 80, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 4, pp. 333-342.
- Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R.L. (1928) A study of the failure of concrete under combined stresses, *Bulletin 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, *Bulletin 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*, Vol. 3, No. 3, pp. 143-150.

(접수일: 2010.9.7/심사일: 2010.10.15/심사완료일: 2010.11.17)