



GFRP 보강근의 정착길이 설계식 제안

하상수^{1)*} · 최동욱²⁾

¹⁾강남대학교 건축공학과 ²⁾한경대학교 건축학부

Development Length of GFRP Bars

Sang-Su Ha^{1)*} and Dong-Uk Choi²⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Kangnam University, Yongin 446-702, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

ABSTRACT The objective of this study was to propose a development length equation for GFRP bars. A total of 104 modified pullout tests were completed while the test variables were embedment length (15, 30, $45d_b$), net cover thickness ($0.5\sim 2.0d_b$), top-cast bar effect, different GFRP bar types (K2KR, K3KR and AsUS), and bar diameters (10, 13, 16 mm). Average bond stresses were determined based on modified pullout test results. Two variable linear regression analysis was performed of the average bond stresses. Utilizing 5% fractile concept, a conservative development length design equation was derived. The design equation derived in this study was compared to the ACI 440 committee equation. The cross-comparison revealed that the current equation resulted in shorter development lengths than those determined by the ACI 440 equation when the net cover thickness was large (greater than $1.0d_b$). On the other hand, when the net cover thickness was small (equal to or less than $1.0d_b$), the development lengths required by the current equation were larger than those by the ACI equation. The bond stresses were significantly influenced by the cover thicknesses. The current equation results in development lengths that are more economical when the cover thickness is large, and more conservative lengths when the cover thickness is small than the ACI 440 committee equation.

Keywords : GFRP bars, embedment length, cover thickness, splitting failure, average bond stress

1. 서 론

유리섬유보강폴리머(glass fiber reinforced polymer, 이하 GFRP) 보강근은 인장강도, 내부식성, 비자기성 등의 재료적 특성이 우수하고 경제적이므로 향후 철근을 대체할 수 있는 건설 재료로 사료된다. 그러므로 미국, 일본, 캐나다 등 선진 외국에서는 1990년대 이후 이미 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유 등을 사용한 FRP 보강근에 대한 광범위한 연구를 진행해 오고 있으며, FRP 보강근을 현장에 적용하기 위한 설계 및 시공 지침이 마련되어 있다.¹⁻⁶⁾

우리나라에서도 FRP 보강근에 대한 연구와 관심이 높아지고 있으며 학회를 중심으로 여러 연구자들이 FRP 보강근의 시공 및 설계지침을 제시하기 위해 노력하고 있다. 이 연구에서는 GFRP 보강근의 부착 특성 및 거동을 실험적으로 고찰하고, 실험결과에 근거하여 정착길이 설계식을 제안하고자 하였다. 외국의 경우 정착길이 설계식은 ACI 440 Committee,^{1,2)} JSCE,³⁾ JCI⁴⁾ ISIS Canada,⁵⁾

CAN/CSA S806-02⁶⁾ 등에서 제안하고 있다. 이 연구에서는 GFRP 보강근의 수정인발실험을 수행하고 부착 거동을 고찰하였으며, 실험결과 GFRP 보강근의 평균부착강도에 대한 통계적 분석을 실시하였고, 이에 근거하여 GFRP 보강근의 정착길이 설계식을 제안하였다.

2. 실험 준비

2.1 재료 시험

이 연구에서 사용된 보강근은 3종류로서 우리나라에서 개발된 2종(K2KR, K3KR)과 해외의 상용 보강근 중 미국산 1종(AsUS)을 선택하여 사용하였다.^{7,8)} Fig. 1에서 K2KR은 콘크리트와 보강근 간 부착을 향상시키기 위하여 별도의 코팅재료를 사용하고 있고, K3KR 및 AsUS는 나선형 형태로 마디를 제작한 것을 알 수 있다.

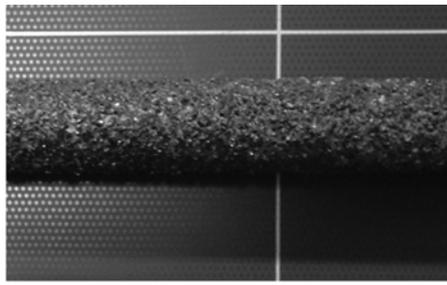
GFRP 보강근의 재료적 물성을 파악하기 위하여 인장 시험을 실시하였다. 인장시험편 제작 시 CAN/CSA S806⁶⁾에 따라서 시험 그림(이하 CSA 그림)을 제작하였다. CSA 그림은 GFRP 보강근을 강제 튜브 안에 넣고 접착제(H사, RE500)를 주입하였다. 일부 시험에서는 ASTM

*Corresponding author E-mail : knuhss@kangnam.ac.kr

Received October 8, 2009, Revised January 14, 2010,

Accepted January 25, 2010

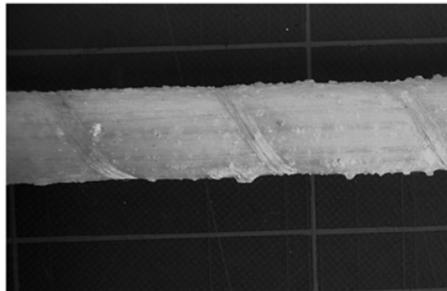
©2010 by Korea Concrete Institute



(a) K2KR



(b) K3KR



(c) AsUS

Fig. 1 GFRP bars

D3916에 따라서 시험 그립(이하 ASTM 그립)을 제작하여 사용하였다.^{9,10)} ASTM 그립은 접착제를 사용하지 않으므로 반복 재사용이 가능하다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 1,200 kN 용량의 만능시험기를 이용하여 인장시험을 실시하였으며, GFRP 보강근이 인장파괴되는 것을 확인한 경우의 시험 결과만을 사용하였다. 인장시험 결과와 ACI 440.1R-06¹⁾에서 제안하고 있는 GFRP 보강근의 재료적 물성을 Table 1에 비교하여 나타내었다. AsUS, K2KR(Kict)과 이형철근의 인장 거동을 비교한 Fig. 3 인장시험의 결과에서 GFRP 보강근의 인장 거동은 파괴 시까지 선형임을 알 수 있다.

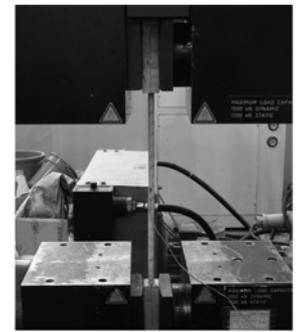
Table 1 Mechanical properties of GFRP bars

Properties ¹⁾	ACI 440	This study				
		AsUS	K2KR	K3KR		
				D13	D13	D10
Ultimate tensile strength (MPa)	483-1,600	-	989	1,178	1,059	1,045
Design tensile strength (MPa)	-	690	692	-	741	-
Elastic modulus (GPa)	35.0-51.0	40.8	37.2	49.9	49.3	45.0
Design rupture strain (%)	1.2-3.1	1.69	1.86	-	1.5	-
Cross-sectional area (mm ²)	-	145	113	78.5	127	201

Note : design tensile strength (f_{tu}) = ultimate tensile strength (f_{tu}^*) × environmental reduction factor^{1,2,11)}



(a) CSA grip



(b) ASTM grip

Fig. 2 Tensile test in progress

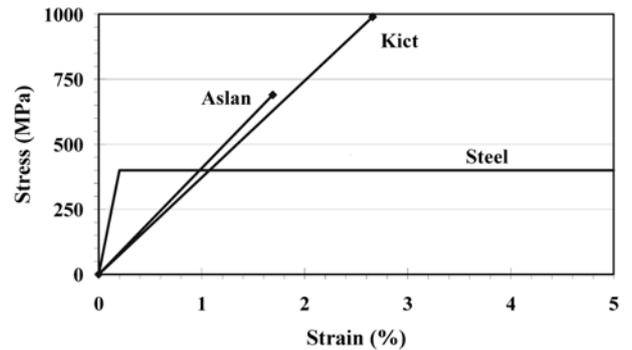
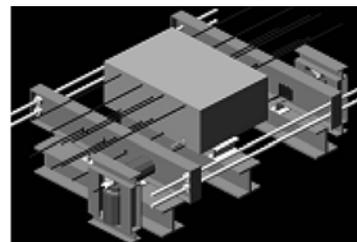
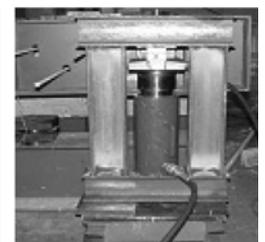


Fig. 3 Tensile test results: steel vs. GFRP bars



(a) Test setup



(b) ASTM grip

Fig. 4 Modified pullout test setup

2.2 실험체 계획

GFRP 보강근의 부착 거동을 고찰하고 이를 근거로 정착길이를 제안하기 위해 묻힘길이(L), 순피복두께(c), 보강근 지름(d_b)을 변수로 하여 Tables 2 및 3과 같이 총 104

Table 2 Summary of test variables and test results: bottom-cast GFRP bars

No.	Specimen index ¹⁾	d_b	A	L	P_{max} (kN)	σ_{max} (MPa)	u (MPa)	f_{ck} (MPa)	Failure mode
1	K3(B)-D10-L15-c0.5	10.0	78.5	150	24.97	318.09	5.30	32.1	Splitting failure
2	K3(B)-D10-L15-c1.0	10.0	78.5	150	25.29	322.17	5.37	32.1	Ditto
3	K3(B)-D10-L15-c1.5	10.0	78.5	150	27.59	351.46	5.86	32.1	Ditto
4	K3(B)-D10-L15-c2.0	10.0	78.5	150	35.39	450.83	7.51	32.1	Ditto
5	K3(B)-D10-L30-c0.5	10.0	78.5	300	34.04	433.63	3.61	32.1	Ditto
6	K3(B)-D10-L30-c1.0	10.0	78.5	300	36.82	469.04	3.91	32.1	Ditto
7	K3(B)-D10-L30-c1.5	10.0	78.5	300	48.67	620.00	5.17	32.1	Ditto
8	K3(B)-D10-L30-c2.0	10.0	78.5	300	51.05	650.32	5.42	32.1	Ditto
9	K3(B)-D10-L45-c0.5	10.0	78.5	450	39.44	502.42	2.79	32.1	Ditto
10	K3(B)-D10-L45-c1.0	10.0	78.5	450	46.52	592.61	3.29	32.1	Ditto
11	K3(B)-D10-L45-c1.5	10.0	78.5	450	48.35	615.92	3.42	32.1	Fracture of GFRP
12	K3(B)-D10-L45-c2.0	10.0	78.5	450	56.62	721.27	4.01	32.1	Ditto
13	AS(B)-D13-L15-c0.5	12.7	145	195	24.81	171.10	3.19	32.1	Splitting failure
14	AS(B)-D13-L15-c1.0	12.7	145	195	35.63	245.72	4.58	32.1	Ditto
15	AS(B)-D13-L30-c0.5	12.7	145	390	56.62	390.48	3.64	32.1	Ditto
16	AS(B)-D13-L30-c1.0	12.7	145	390	64.25	443.10	4.13	32.1	Ditto
17	K3(B)-D13-L15-c0.5	12.7	127	195	36.26	286.39	4.66	32.1	Ditto
18	K3(B)-D13-L15-c1.0	12.7	127	195	52.80	417.02	6.79	32.1	Ditto
19	K3(B)-D13-L15-c1.5	12.7	127	195	61.84	488.39	7.95	32.1	Ditto
20	K3(B)-D13-L15-c2.0	12.7	127	195	78.89	623.08	10.15	32.1	Fracture of GFRP
21	K3(B)-D13-L30-c0.5	12.7	127	390	59.16	467.25	3.80	32.1	Splitting failure
22	K3(B)-D13-L30-c1.0	12.7	127	390	64.25	507.45	4.13	32.1	Ditto
23	K3(B)-D13-L30-c1.5	12.7	127	390	88.67	700.32	5.70	35.5	Ditto
24	K3(B)-D13-L30-c2.0	12.7	127	390	91.77	724.81	5.90	35.5	Ditto
25	K3(B)-D13-L45-c0.5	12.7	127	585	64.81	511.88	2.78	32.1	Ditto
26	K3(B)-D13-L45-c1.0	12.7	127	585	57.41	453.43	2.46	32.1	Fracture of GFRP
27	K3(B)-D13-L45-c1.5	12.7	127	585	81.43	643.14	3.49	32.1	Ditto
28	K3(B)-D13-L45-c2.0	12.7	127	585	89.06	703.41	3.82	32.1	Ditto
29	K2(B)-D13-L15-c0.5	12.7	113	195	47.07	416.64	6.05	32.1	Splitting failure
30	K2(B)-D13-L15-c1.0	12.7	113	195	59.16	523.54	7.61	32.1	Ditto
31	K2(B)-D13-L15-c1.5	12.7	113	195	75.07	664.34	9.65	32.1	Ditto
32	K2(B)-D13-L15-c2.0	12.7	113	195	78.89	698.14	10.15	32.1	Ditto
33	K2(B)-D13-L30-c0.5	12.7	113	390	68.07	602.39	4.38	32.1	Ditto
34	K2(B)-D13-L30-c1.0	12.7	113	390	79.52	703.72	5.11	32.1	Ditto
35	K2(B)-D13-L30-c1.5	12.7	113	390	86.52	765.66	5.56	32.1	Ditto
36	K2(B)-D13-L30-c2.0	12.7	113	390	87.79	776.90	5.64	32.1	Fracture of GFRP
37	K2(B)-D13-L45-c0.5	12.7	113	585	83.34	737.52	3.57	32.1	Splitting failure
38	K2(B)-D13-L45-c1.0	12.7	113	585	96.06	850.09	4.12	32.1	Ditto
39	K2(B)-D13-L45-c1.5	12.7	113	585	82.06	726.19	3.52	32.1	Fracture of GFRP
40	K2(B)-D13-L45-c2.0	12.7	113	585	83.98	743.19	3.60	32.1	Ditto
41	K3(B)-D16-L15-c0.5	16.0	201	240	59.80	297.57	4.96	35.5	Splitting failure
42	K3(B)-D16-L15-c1.0	16.0	201	240	67.43	335.54	5.59	35.5	Ditto
43	K3(B)-D16-L15-c1.5	16.0	201	240	73.57	366.11	6.10	35.5	Ditto
44	K3(B)-D16-L15-c2.0	16.0	201	240	78.92	392.71	6.55	35.5	Ditto
45	K3(B)-D16-L30-c0.5	16.0	201	480	92.25	459.05	3.83	35.5	Ditto
46	K3(B)-D16-L30-c1.0	16.0	201	480	129.78	645.80	5.38	35.5	Ditto
47	K3(B)-D16-L30-c1.5	16.0	201	480	146.23	727.66	6.06	35.5	Ditto
48	K3(B)-D16-L30-c2.0	16.0	201	480	158.12	786.82	6.56	35.5	Ditto
49	K3(B)-D16-L45-c0.5	16.0	201	720	110.22	548.47	3.05	35.5	Ditto
50	K3(B)-D16-L45-c1.0	16.0	201	720	126.44	629.18	3.50	35.5	Ditto
51	K3(B)-D16-L45-c1.5	16.0	201	720	153.56	764.13	4.25	35.5	Ditto
52	K3(B)-D16-L45-c2.0	16.0	201	720	175.19	871.77	4.84	35.5	Ditto

Note 1) specimen index: K2(B)-D13-L15-c0.5, K2 = K2KR, (B) = bottom-cast bar, D13 = diameter of GFRP bars is 13 mm, L15 = embedded length of 195 mm ($15d_b$), c0.5 = net cover thickness of $0.5d_b$, u = average bond stress

Table 3 Summary of test variables and test results: Top-cast GFRP bars

No.	Specimen index ¹⁾	d_b	A	L	P_{max} (kN)	σ_{max} (MPa)	u (MPa)	f_{ck} (MPa)	Failure mode
1	K3(T)-D10-L15-c0.5	10.0	78.5	150	17.81	226.88	3.78	32.1	Splitting failure
2	K3(T)-D10-L15-c1.0	10.0	78.5	150	19.88	253.25	4.22	32.1	Ditto
3	K3(T)-D10-L15-c1.5	10.0	78.5	150	22.43	285.73	4.76	32.1	Ditto
4	K3(T)-D10-L15-c2.0	10.0	78.5	150	25.45	324.20	5.40	32.1	Ditto
5	K3(T)-D10-L30-c0.5	10.0	78.5	300	21.87	278.60	2.32	32.1	Ditto
6	K3(T)-D10-L30-c1.0	10.0	78.5	300	36.74	468.03	3.90	32.1	Ditto
7	K3(T)-D10-L30-c1.5	10.0	78.5	300	38.17	486.24	4.05	32.1	Ditto
8	K3(T)-D10-L30-c2.0	10.0	78.5	300	45.8	583.44	4.86	32.1	Ditto
9	K3(T)-D10-L45-c0.5	10.0	78.5	450	31.01	395.03	2.19	32.1	Ditto
10	K3(T)-D10-L45-c1.0	10.0	78.5	450	40.24	512.61	2.85	32.1	Fracture of GFRP
11	K3(T)-D10-L45-c1.5	10.0	78.5	450	62.35	794.27	4.41	32.1	Ditto
12	K3(T)-D10-L45-c2.0	10.0	78.5	450	54.08	688.92	3.83	32.1	Ditto
13	AS(T)-D13-L15-c0.5	12.7	145	195	20.36	140.41	2.62	32.1	Ditto
14	AS(T)-D13-L15-c1.0	12.7	145	195	24.17	166.69	3.11	32.1	Ditto
15	AS(T)-D13-L30-c0.5	12.7	145	390	38.17	263.24	2.45	32.1	Splitting failure
16	AS(T)-D13-L30-c1.0	12.7	145	390	48.35	333.45	3.11	32.1	Ditto
17	K3(T)-D13-L15-c0.5	12.7	127	195	22.27	175.89	2.86	32.1	Fracture of GFRP
18	K3(T)-D13-L15-c1.0	12.7	127	195	40.72	321.61	5.24	32.1	Splitting failure
19	K3(T)-D13-L15-c1.5	12.7	127	195	43.26	341.67	5.56	32.1	Fracture of GFRP
20	K3(T)-D13-L15-c2.0	12.7	127	195	49.62	391.90	6.38	32.1	Ditto
21	K3(T)-D13-L30-c0.5	12.7	127	390	45.17	356.76	2.90	32.1	Splitting failure
22	K3(T)-D13-L30-c1.0	12.7	127	390	57.89	457.22	3.72	32.1	Ditto
23	K3(T)-D13-L30-c1.5	12.7	127	390	66.88	528.23	4.30	32.1	Ditto
24	K3(T)-D13-L30-c2.0	12.7	127	390	83.98	663.28	5.40	32.1	Fracture of GFRP
25	K3(T)-D13-L45-c0.5	12.7	127	585	64.81	511.88	2.78	32.1	Ditto
26	K3(T)-D13-L45-c1.0	12.7	127	585	76.26	602.31	3.27	32.1	Splitting failure
27	K3(T)-D13-L45-c1.5	12.7	127	585	86.52	683.34	3.71	32.1	Fracture of GFRP
28	K3(T)-D13-L45-c2.0	12.7	127	585	84.61	668.26	3.63	32.1	Ditto
29	K2(T)-D13-L15-c0.5	12.7	113	195	48.99	433.54	6.30	32.1	Ditto
30	K2(T)-D13-L15-c1.0	12.7	113	195	48.99	433.54	6.30	32.1	Ditto
31	K2(T)-D13-L15-c1.5	12.7	113	195	60.44	534.87	7.77	32.1	Splitting failure
32	K2(T)-D13-L15-c2.0	12.7	113	195	53.44	472.92	6.87	32.1	Fracture of GFRP
33	K2(T)-D13-L30-c0.5	12.7	113	390	55.98	495.40	3.60	32.1	Splitting failure
34	K2(T)-D13-L30-c1.0	12.7	113	390	64.25	568.58	4.13	32.1	Ditto
35	K2(T)-D13-L30-c1.5	12.7	113	390	66.8	591.15	4.30	32.1	Fracture of GFRP
36	K2(T)-D13-L30-c2.0	12.7	113	390	94.79	838.85	6.09	32.1	Ditto
37	K2(T)-D13-L45-c0.5	12.7	113	585	69.34	613.63	2.97	32.1	Splitting failure
38	K2(T)-D13-L45-c1.0	12.7	113	585	73.8	653.10	3.16	32.1	Ditto
39	K2(T)-D13-L45-c1.5	12.7	113	585	94.15	833.19	4.04	32.1	Ditto
40	K2(T)-D13-L45-c2.0	12.7	113	585	89.7	793.81	3.85	32.1	Fracture of GFRP
41	K3(T)-D16-L15-c0.5	16.0	201	240	38.81	193.12	3.22	35.5	Ditto
42	K3(T)-D16-L15-c1.0	16.0	201	240	55.35	275.43	4.59	35.5	Splitting failure
43	K3(T)-D16-L15-c1.5	16.0	201	240	73.07	363.60	6.06	35.5	Ditto
44	K3(T)-D16-L15-c2.0	16.0	201	240	85.17	423.82	7.06	35.5	Ditto
45	K3(T)-D16-L30-c0.5	16.0	201	480	80.95	402.82	3.36	35.5	Ditto
46	K3(T)-D16-L30-c1.0	16.0	201	480	118.95	591.91	4.93	35.5	Ditto
47	K3(T)-D16-L30-c1.5	16.0	201	480	130.18	647.79	5.40	35.5	Ditto
48	K3(T)-D16-L30-c2.0	16.0	201	480	167.5	833.50	6.95	35.5	Fracture of GFRP
49	K3(T)-D16-L45-c0.5	16.0	201	720	94.23	468.90	2.60	35.5	Splitting failure
50	K3(T)-D16-L45-c1.0	16.0	201	720	112.68	560.71	3.12	35.5	Ditto
51	K3(T)-D16-L45-c1.5	16.0	201	720	135.66	675.06	3.75	35.5	Ditto
52	K3(T)-D16-L45-c2.0	16.0	201	720	146.48	728.90	4.05	35.5	Fracture of GFRP

Note 1) specimen index: K2(T)-D13-L15-c0.5, K2 = K2KR, (T) = top-cast bar, D13 = diameter of GFRP bars is 13 mm, L15 = embedded length of 195 mm (15 d_b), c0.5 = net cover thickness of 0.5 d_b , u = average bond stress

개의 수정인발실험을 계획하였다. 문힘길이는 $15d_b$, $30d_b$, $45d_b$ 3가지로 하였으며, 순피복두께는 $0.5d_b$, $1.0d_b$, $1.5d_b$, $2.0d_b$ 4가지이었다. K2KR, AsUS는 D13 한 가지만을 사용하였고, K3KR은 D10, D13, D16 3가지이며, 보강근 단면적은 제조사에서 제공하는 값을 이용하였다. Fig. 4(a) 및 Fig. 6과 같이 문힘길이와 같은 직육면체 콘크리트 블록 안에 GFRP 보강근을 겹침이음하였다. 부착강도를 안전 측으로 평가하기 위하여 실험체에 별도의 횡보강근은 설치하지 않았다. 또한 피복두께, 문힘길이 등에 따라 파괴형태 및 이음성능이 크게 달라지기 때문에 실험체 제작 시 많은 주의를 요하였다. 실험체 제작은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 거푸집을 정확하게 제작하고, 보강근의 피복두께와 문힘길이를 정확하게 배근하고 타설시 보강근을 고정시키기 위해 미리 거푸집에 보강근 지름과 동일한 구멍을 내고, 거푸집을 조립한 후에 보강근을 배근하였다. 초기균열이 발생하지 않도록 7일간 습윤 상태가 되도록 하고, 실험실 안에서 28일 동안 양생한 후 실험을 실시하였다.

일반적으로 보강근이 수평방향으로 설치되고 하부에 300 mm 이상의 콘크리트가 있는 경우(상부근)에는 굳지 않은 콘크리트의 침하로 인하여 콘크리트와 보강근 간 부착강도가 감소하게 된다. 그러므로 콘크리트구조설계 기준에서는 이형철근의 경우 상부근의 부착강도가 낮은 것을 고려하여 정착길이를 130%로 수정하도록 정하고 있다. GFRP 보강근에 대한 상부근 효과를 결정하기 위하여 Table 2의 시험체에 동일한 실험변수를 가지면서 상부근에 해당하는 한 세트의 실험체를 Table 3에 나타난 것과 같이 별도로 계획하였다. 즉 Table 3에 나타난 실험은 Table 2의 반복 실험이며 모든 실험변수가 동일하고 단지 상부근인 점만이 상이하다.

콘크리트 강도는 27 MPa로 계획하였고, 실험 시 콘크리트 압축강도의 시험 결과는 32.1 MPa 및 35.5 MPa로 나타났다.

2.3 수정인발실험

일반적으로 인발실험(pullout test)에서는 보강근이 배근

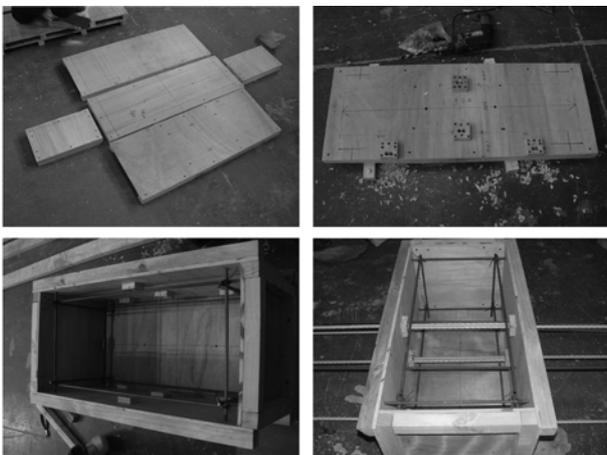


Fig. 5 Fabrication of specimens

되어 있는 콘크리트 면에 직접 중공식 유압 실린더를 설치하므로 가력 시 콘크리트에 작용하는 반력(압축력)으로 인하여, 콘크리트 인장 균열의 발생을 억제하고, 이에 따라서 부착응력이 실제보다 높게 평가되어 비보수적인 실험결과를 초래하게 된다. 따라서 이 연구에서는 유압 실린더가 콘크리트 면과 직접 접촉하지 않는 상태에서 순수한 인발력의 가력이 가능하도록 Fig. 4(a)에 나타난 것과 같이 별도로 제작한 강재 프레임에 하중이 가력되도록 설치하였으므로 콘크리트 면에는 압축력이 전달되지 않는다. 또한 중공식 유압 실린더를 관통하는 보강근 양 단부에는 ASTM 그림을 사용하고 Fig. 4(b)와 같이 추가로 ASTM 그림에 일정한 압축력을 가력하여 그림 부분에서 미끄러짐이 발생되지 않도록 계획하였다. Fig. 4에 나타난 실험을 이 연구에서 수정인발실험(modified pullout test)으로 칭하였다.^{12,13)}

실험이 진행되는 동안 인발하중(P)의 증가에 따른 콘크리트에 대한 보강근의 미끄러짐을 결정하기 위하여 Fig. 6과 같이 보강근의 하중단(loaded end)과 자유단(free end)에 각각 2개 및 1개의 변위계(LVDT)를 설치하였다. LVDT 변위 값을 확인하기 위하여 하중단 측 FRP 보강근에 별도로 변형률게이지 한 쌍을 설치하였다. 인발하중은 겹침이음된 보강근 양 단부에서 동시에 가력하였으며, GFRP 보강근이 인장파괴(tensile fracture)되거나 또는 콘크리트 쪼갬파괴(concrete splitting failure)가 발생되어 최종파괴에 도달될 때까지 가력하였다.

3. 실험 결과

3.1 파괴 형태

실험체 파괴는 Figs. 6과 7에 나타난 것과 같이 콘크리트 쪼갬파괴와 보강근 인장파괴 두 가지 경우로 나타났다. Fig. 7의 콘크리트 쪼갬파괴는 피복두께가 작거나 또는 인접 보강근 사이의 거리가 작을 때 주로 발생하는 파괴 형태로서 순 피복두께를 $0.5-2.0d_b$ 로 제한한 이 연구에서는 대부분의 실험에서 쪼갬파괴가 발생하였다. 쪼갬파괴 발생 시 콘크리트 피복이 보강근과 분리되어 탈락되었다.

보강근 파단은 보강근 종류에 따라서 약간씩 서로 다른 양상을 보였다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 K2KR은

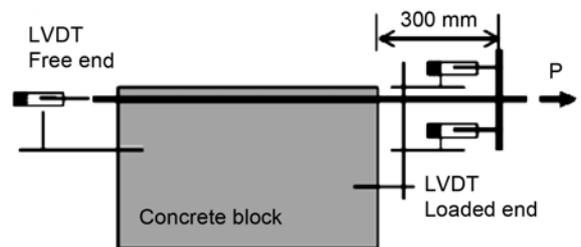


Fig. 6 Instrumentation for measurement

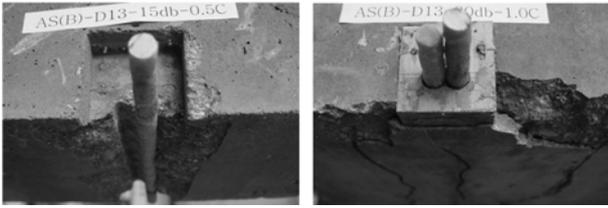


Fig. 7 Concrete splitting failure

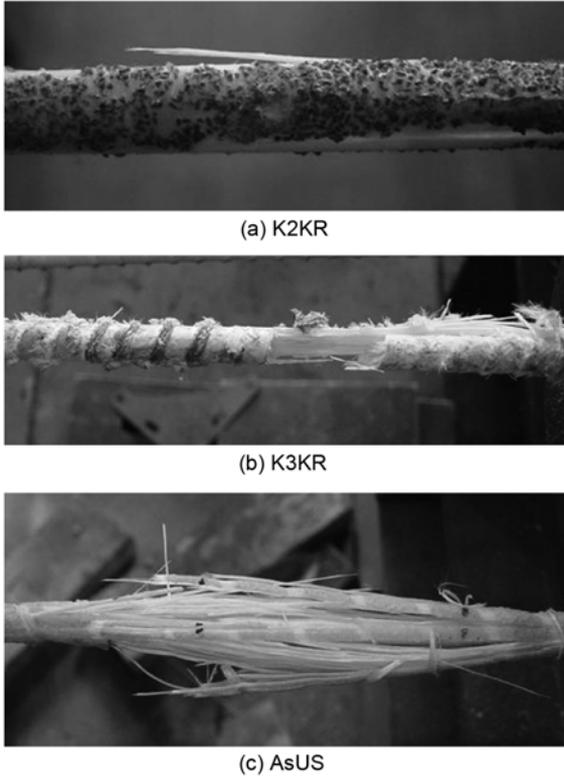


Fig. 8 Fracture of GFRP bars

GFRP 표면의 부착강도 증진을 위한 코팅재료가 일부 탈락하였고 이어서 섬유 필라멘트가 서로 분리되면서 최종적으로 파괴되었다. K3KR은 ASTM 그림으로 감싸여진 나사선 형태의 마디가 손상된 후 파단되었으며, AsUS는 섬유 필라멘트가 각각 분리되면서 파단되었다. 각 실험체의 최대 인발하중(P_{max}), 최대 응력(σ_{max}), 평균부착강도(u) 등의 실험결과를 Tables 2 및 3에 요약하여 나타내었다.

3.2 하중-변위 곡선

3.2.1 자유단(free end)의 하중-변위 곡선

보강근 자유단에서 하중-변위 곡선의 예를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에 나타낸 4개의 시험체는 D13 K3KR 보강근을 보강근 지름의 15배로 묻은 경우이고, 순피복 두께를 $0.5d_b \sim 2.0d_b$ 로 변화시킨 것이다. Fig. 9의 모든 실험에서 최대하중에 도달될 때까지 변위는 발생하지 않았고 이는 파괴양상(쪼갬파괴, 보강근 파단)에 관계없이 모든 실험체에서 동일하게 나타났다.

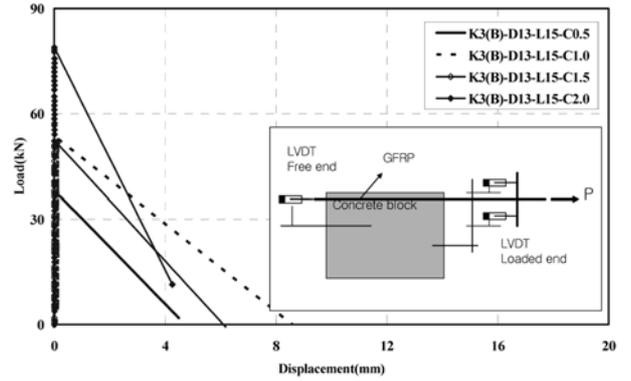


Fig. 9 Load vs. displacement at free end

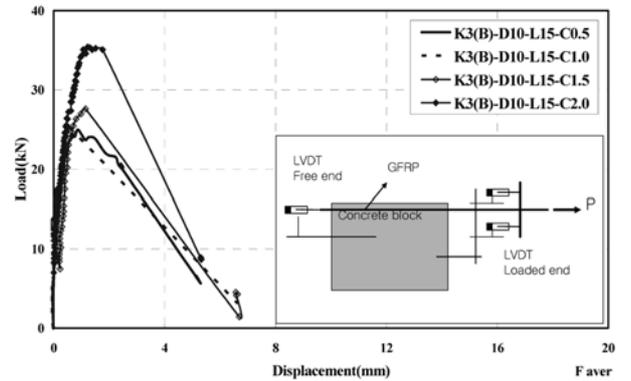


Fig. 10 Load vs. displacement at loaded end

3.2.2 하중단(loaded end)의 하중-변위 곡선

Fig. 10에 하중단에서 측정된 하중-변위 곡선을 나타내었다. Fig. 10에 나타낸 4개의 실험 결과는 D10 K3KR 보강근을 지름의 15배로 묻은 경우이고, 순 피복 두께를 $0.5d_b \sim 2.0d_b$ 로 변화시킨 것이다. 하중단에서는 가력의 증가에 따라서 변위가 선형으로 증가하는 양상을 보였으며 최대하중에 도달한 후 갑작스런 하중 감소를 보이며 최종적으로 파괴되었다. Fig. 10에서 변위는 콘크리트 면으로부터 LVDT가 설치된 위치까지의 거리(300 mm)에 해당하는 보강근의 탄성변형을 제외한 값이다.

3.3 평균부착강도

콘크리트와 GFRP 보강근 간에 발생하는 부착응력의 분포는 비선형이고 정확히 평가하기 어려우므로 부착응력의 분포가 묻힘길이에 걸쳐서 일정하다고 가정하고, 평균부착강도 개념을 사용하면 GFRP 보강근의 평균부착강도는 식 (1)로부터 결정할 수 있다.

$$A_f f_s = u \pi d_b L \quad (1)$$

여기서 A_f = 보강근 단면적, f_s = 보강근 응력, u = 평균부착강도, d_b = 보강근 지름, L = 묻힘길이이다. 식 (1)로부터 GFRP 보강근의 평균부착강도는 식 (2)와 같고 이렇

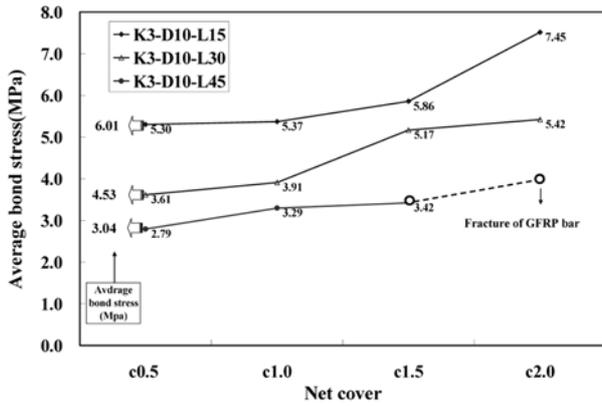


Fig. 11 Average bond strength: K3(B)-D10 series

계 결정한 평균부착강도(u)를 Tables 2 및 3에 나타내었다.

$$u = \frac{P_{\max}}{\pi d_b L} \quad (2)$$

Fig. 11은 K3(B)-D10 계열의 실험체에서 문힘길이가 피복두께의 변화에 따른 평균부착강도(u)의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11에서와 같이 문힘길이가 동일한 상태에서는 피복두께가 증가할수록 평균부착강도가 증가하고, 피복두께가 동일한 상태에서는 문힘길이가 증가할수록 평균부착강도가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한 Table 2에서 K3(B)-D13 계열, K3(B)-D16 계열, 그리고 K2KR(B) 및 AsUS(B) 계열 역시 동일한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.4 보강근 종류 및 지름의 영향

Table 2에서 GFRP 보강근의 평균부착강도는 일반적으로 K2KR>K3KR>AsUS 순으로 나타나고 있다. 동일한 13 mm 지름의 보강근(D13)의 경우 AsUS, K3KR, K2KR의 평균부착강도는 문힘길이가 $30d_b$ 이고 순피복두께가 $0.5d_b$ 인 경우 각각 3.64, 3.80, 4.38 MPa이다. 문힘길이가 $30d_b$ 이고 순피복두께가 $1.0d_b$ 인 경우에 AsUS, K3KR, K2KR의 평균부착강도는 각각 4.13, 4.13, 5.11 MPa이다. 그러나 이러한 보강근 종류에 따른 평균부착강도의 편차는 콘크리트 쪼갬파괴가 발생한 경우 측정된 것이므로 보강근의 부착특성과 더불어 취성적인 콘크리트 인장거동의 영향이 포함되어 있는 것으로 생각할 수 있다.¹⁴⁾

3.5 상부근 효과

전술한 것과 같이 Table 3의 52개 실험체는 상부근 효과를 결정하기 위한 Table 2 52개 실험체의 반복 실험이다. 동일한 실험 조건에서 상부근과 상부근이 아닌 경우 (이하 하부근)의 부착강도를 비교하기 위하여 보강근 파단이 발생한 실험체(Table 2에서 9개, Table 3에서 21개)를

Table 4 Comparison of average bond strengths: bottom-cast bars over top-cast bars

Bar type	Diameter	Min.	Max.	Average
K3KR	D10	1.0	1.56	1.28
	D13	1.05	1.53	1.25
	D16	0.93	1.22	1.11
K2KR	D13	1.20	1.30	1.24
AsUS	D13	1.33	1.49	1.41

제외하고 총 29개의 실험 결과 평균부착강도를 직접 비교하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 K3KR의 경우 하부근 대 상부근의 평균부착강도비는 0.93-1.56에 분포하고 평균값은 1.21(22개 평균)이다. K2KR의 경우 부착강도비는 1.2-1.3이고 평균값은 1.24(5개 평균)이다. AsUS의 경우 부착강도비는 1.33-1.49이고 평균값은 1.41(2개 평균)이다. 실험 결과는 상부근의 부착강도가 하부근에 비하여 뚜렷하게 감소함을 나타내고 있다. Tables 2 및 3에서 콘크리트 쪼갬파괴가 발생하였고 동일한 실험변수(보강근 지름, 피복두께, 문힘길이)를 갖는 총 29개의 실험결과로부터 하부근의 상부근에 대한 부착강도비의 평균값은 1.23인 것을 알 수 있다.

4. 정착길이 설계식

4.1 2변수 선형회귀분석

ACI 440 Committee^{1,2)}에서 GFRP 보강근의 정착길이 설계식은 식 (3)과 같이 콘크리트 압축강도를 무차원화시킨 평균부착강도를 종속변수($u_{calc}/\sqrt{f_{ck}}$)로 하고, 피복두께 및 문힘길이(c/d_b , d_b/L)를 독립변수로 한 2변수 선형회귀분석을 통해 결정하였다.

$$\frac{u_{calc}}{\sqrt{f_{ck}}} = a_1 + a_2 \frac{c}{d_b} + a_3 \frac{d_b}{L} \quad (3)$$

여기서 u_{calc} : 예측 평균부착강도, c : 피복두께, d_b : 보강근 지름, L : 문힘길이

또한 최동욱 등은 동일한 기법을 사용하여 GFRP 보강근의 겹침이음길이를 제안하였고, ACI 440 위원회 보고서의 근간이 되는 Wambeke 등의 연구에서도 동일한 기본식을 채택하여 회귀분석을 실시하였다.^{13,15)} 따라서 이 연구에서도 Table 2의 52개의 실험체 중 쪼갬파괴가 발생한 43개 실험체만을 대상으로 하여 평균부착강도에 대한 2변수 선형회귀분석을 실시하였고 그 결과를 Table 5에 나타내었으며, 식 (4)와 같은 회귀분석식을 얻었다.

$$\frac{u_{calc}}{\sqrt{f_{ck}}} = 0.135 + 0.302 \frac{c}{d_b} + 10.295 \frac{d_b}{L} \quad (4)$$

Table 5 Results of two-variable linear regression analysis: test vs. calculated values

No.	Specimen index	$\frac{c}{d_b}$	$\frac{d_b}{L}$	$\frac{u}{\sqrt{f_{ck}}}$ (test)	$\frac{u}{\sqrt{f_{ck}}}$ (calc)	Test/ calc
1	K3(B)-D10-L15-c0.5	0.5	0.067	0.936	0.976	0.96
2	K3(B)-D10-L15-c1.0	1.0	0.067	0.948	1.126	0.84
3	K3(B)-D10-L15-c1.5	1.5	0.067	1.034	1.278	0.81
4	K3(B)-D10-L15-c2.0	2.0	0.067	1.326	1.428	0.93
5	K3(B)-D10-L30-c0.5	0.5	0.033	0.638	0.626	1.02
6	K3(B)-D10-L30-c1.0	1.0	0.033	0.690	0.776	0.89
7	K3(B)-D10-L30-c1.5	1.5	0.033	0.912	0.927	0.98
8	K3(B)-D10-L30-c2.0	2.0	0.033	0.957	1.078	0.89
9	K3(B)-D10-L45-c0.5	0.5	0.022	0.493	0.512	0.96
10	K3(B)-D10-L45-c1.0	1.0	0.022	0.581	0.663	0.88
11	AS(B)-D13-L15-c1.0	1.0	0.065	0.809	1.106	0.73
12	AS(B)-D13-L30-c0.5	0.5	0.033	0.643	0.626	1.03
13	AS(B)-D13-L30-c1.0	1.0	0.033	0.729	0.776	0.94
14	K3(B)-D13-L15-c0.5	0.5	0.065	0.823	0.955	0.86
15	K3(B)-D13-L15-c1.0	1.0	0.065	1.198	1.106	1.08
16	K3(B)-D13-L15-c1.5	1.5	0.065	1.404	1.127	1.12
17	K3(B)-D13-L15-c2.0	1.5	0.065	1.791	1.407	1.27
18	K3(B)-D13-L30-c0.5	0.5	0.033	0.671	0.626	1.07
19	K3(B)-D13-L30-c1.0	1.0	0.033	0.729	0.776	0.94
20	K3(B)-D13-L30-c1.5	1.5	0.033	0.957	0.927	1.03
21	K3(B)-D13-L30-c2.0	2.0	0.033	0.990	1.078	0.92
22	K3(B)-D13-L45-c0.5	0.5	0.022	0.490	0.512	0.96
23	K2(B)-D13-L15-c0.5	0.5	0.065	1.069	0.955	1.12
24	K2(B)-D13-L15-c1.0	1.0	0.065	1.343	1.106	1.21
25	K2(B)-D13-L15-c1.5	1.5	0.065	1.704	1.257	1.36
26	K2(B)-D13-L15-c2.0	2.0	0.065	1.791	1.407	1.27
27	K2(B)-D13-L30-c0.5	0.5	0.033	0.773	0.626	1.23
28	K2(B)-D13-L30-c1.0	1.0	0.033	0.902	0.776	1.16
29	K2(B)-D13-L30-c1.5	1.5	0.033	0.982	0.927	1.06
30	K2(B)-D13-L45-c0.5	0.5	0.022	0.631	0.512	1.23
31	K2(B)-D13-L45-c1.0	1.0	0.022	0.727	0.663	1.10
32	K3(B)-D16-L15-c0.5	0.5	0.067	0.875	0.976	0.90
33	K3(B)-D16-L15-c1.0	1.0	0.067	0.987	1.126	0.88
34	K3(B)-D16-L15-c1.5	1.5	0.067	1.024	1.277	0.80
35	K3(B)-D16-L15-c2.0	2.0	0.067	1.099	1.428	0.77
36	K3(B)-D16-L30-c0.5	0.5	0.033	0.642	0.626	1.03
37	K3(B)-D16-L30-c1.0	1.0	0.033	0.903	0.776	1.16
38	K3(B)-D16-L30-c1.5	1.5	0.033	1.018	0.927	1.10
39	K3(B)-D16-L30-c2.0	2.0	0.033	1.100	1.078	1.02
40	K3(B)-D16-L45-c0.5	0.5	0.022	0.511	0.512	1.00
41	K3(B)-D16-L45-c1.0	1.0	0.022	0.587	0.663	0.89
42	K3(B)-D16-L45-c1.5	1.5	0.022	0.712	0.814	0.87
43	K3(B)-D16-L45-c2.0	2.0	0.022	0.813	0.965	0.84

식 (4)에서 결정계수(coefficient of determination)는 0.74로 나타났다. 결정계수는 회귀분석에 의해 예측된 평면(예측값)과 실험값(실제값) 사이의 신뢰도를 나타내는 계수로써 결정계수가 1.0인 경우 예측값과 실험값이 100% 일치하는 것을 의미한다. Fig. 12는 회귀분석에 의한 예측 평면이며 점으로 표시된 부분은 실험값으로서 예측 평면과 실험값 사이의 오차를 시각적으로 나타낸 것이다.

식 (4)에 대해 실제값에 대한 예측값의 신뢰도를 안전측으로 확보하기 위해 5% 분위수(5% fractile) 개념을 사용할 수 있다.¹⁶⁾ 이때 5% 분위수는 실제값이 예측값을 초과할 확률 95%에 대한 90%의 신뢰도를 뜻한다. 2변수 선형회귀분석으로부터 결정한 5% 분위수 계수($F_{5\%} = 0.72$)를 사용하여 식 (5)와 같이 보수적으로 평균부착강도를 산정하였다.

$$u_{design} = F_{5\%} \left(0.135 + 0.302 \frac{c}{d_b} + 10.295 \frac{d_b}{L} \right) \quad (5)$$

한편 식 (1)로부터

$$L = \frac{d_b f_s}{4u} \quad (6)$$

이므로 식 (5)와 (6)을 이용하여 GFRP 보강근의 정착길이에 관한 설계식을 식 (7)과 같이 제안할 수 있다.

$$L_d = a \left(\frac{1.2f_{fu} - 34.2}{\sqrt{f_{ck}}} \right) d_b \left(0.44 + \frac{c}{d_b} \right) \quad (7)$$

여기서 L_d =GFRP 보강근의 정착길이(mm), a =상부근 수정계수, f_{fu} : 보강근의 설계인장강도(MPa), f_{ck} =콘크리트 설계기준강도(MPa), c : 순피복두께(mm), d_b : 보강근 지름(mm)이다. 또한 정착길이 L_d 는 참고문헌 [12]의 인발실험 결과로부터 도출된 기본 정착길이에 관한 식 (8)

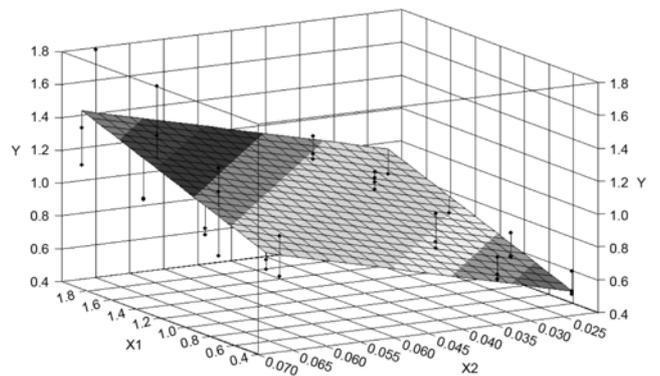


Fig. 12 Regression analysis results

의 값 이상이어야 한다.

$$L_{db} = \frac{d_b f_{fu}}{16.5} \quad (8)$$

여기서 L_{db} = GFRP 보강근의 기본정착길이(mm), d_b : 보강근 지름(mm), f_{fu} : 보강근의 설계인장강도(MPa)이다.

식 (7)은 Table 2의 실험체 중 콘크리트 쪼갬파괴가 발생한 43개 실험의 결과 평균부착강도에 대한 2변수 선형회귀분석을 수행하고, 평균부착강도를 보수적으로 평가하기 위하여 5% 분위수 개념을 적용한 결과 결정된 GFRP 보강근의 정착길이 설계식이다. 식 (8)은 참고문헌 [12]에서 인발실험의 결과 뽐힘파괴가 발생한 36개의 실험결과를 근거로 하고 5% 분위수를 적용하여 결정된 보강근의 기본정착길이 설계식이다.

4.2 피복두께 및 철근 간격의 영향

식 (7)은 수정인발실험의 결과를 근거로 하여 도출되었으므로 식 (7)에서 c/d_b 는 실험변수 중 가장 큰 값인 2.0 이하의 값으로 제한된다. 이 연구의 수정인발실험에서는 단일 보강근만을 실험하였으므로 철근 간격의 영향은 고려되지 않았다. 그러므로 다수 철근이 인접한 경우 c 값은 [순피복두께] 및 [철근 순간격의 1/2] 중 작은 값 이하로 제한되어야 한다.

4.3 상부근 효과 적용

3.5절에서 상부근의 부착강도는 하부근과 비교하여 감소하였으며 하부근의 상부근에 대한 부착강도비는 총 29개 실험체 평균 1.23이었다. 그러므로 상부근의 경우 식 (7)에 의한 정착길이에 수정계수(a)를 적용할 필요가 있다. 실험 결과 수정계수는 1.23으로 나타났으나, 이형철근의 경우 전통적으로 1.3을 적용하여 왔으므로 GFRP 보강근의 경우에도 안전 측으로 1.3의 수정계수를 적용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

4.4 극한인장강도 대 설계인장강도

Table 1에서 설계인장강도(f_{fu})는 극한인장강도(f_{fu}^*)에 환경영향계수를 곱하여 결정된다.¹²⁾ 또한 환경영향계수는 GFRP 보강근의 취성적 파괴, 자외선, 알칼리 등의 환경영향에 의한 강도 감소 등을 고려하여 0.7 또는 0.8이 많이 적용된다.¹¹⁾ Table 1에서 상용 GFRP 보강근인 AsUS의 경우, 극한인장강도 대신 설계인장강도만이 제시되어 있고, K2KR, K3KR 등은 대부분 극한인장강도만이 제시되어 있음을 알 수 있다. 식 (7) 및 (8)에 극한인장강도를 적용할 수도 있으나 이 경우 지나치게 보수적인 정착길이를 필요로 하게 되므로 이 연구에서는 식 (7), (8)에서 설계인장강도(f_{fu})를 적용하는 것으로 결정하였다.

5. ACI 440 설계식과의 비교

ACI 440.1R-06에서 제안하고 있는 정착길이 설계식은 다음 같다.

$$L_d = \frac{a \frac{f_{fr}}{0.083 \sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (9)$$

여기서 a = 상부근 효과, f_{fr} = 보강근의 인장응력(MPa), f'_c = 콘크리트 설계기준강도(MPa), C = 보강근 중심까지의 피복두께(mm), d_b = 보강근 지름(mm)이다.

이 연구에서 제안한 식 (7)과 ACI 440.1R-06의 식 (9)를 Table 6 및 Fig. 13에 비교하여 나타내었다. Table 6 및 Fig. 13에서 ACI 440.1R-06 식과 이 연구의 제안식 (7)을 비교한 결과, 순피복두께가 $1.0d_b$ 를 초과하는 경우에는 이 연구의 식 (7)이 ACI 식에 비하여 작은 정착길이를 필요로 하므로 경제적임을 알 수 있다. 반면에 순피복두께가 $1.0d_b$ 이하인 경우, 이 연구의 식 (7)로부터 결정된 정착길이가 ACI 식의 길이보다 더 크다. 이는 이 연구에서 작은 피복 두께를 대상으로 실험을 실시하여 보강근의 피복두께가 작은 경우 부착강도의 급격한 감소를 설계식에 반영한 것이 이유인 것으로 사료된다. 즉 ACI 440 Committee 식은 Fig. 13에 나타난 바와 같이 c/d_b 가 감소할수록 정착길이가 일정한 비율로 증가하지만 그 증가폭이 크지 않은 반면, 식 (7)을 이용하는 경우 c/d_b 의 감

Table 6 Comparison of development lengths between ACI 440-06 equation vs. this study

f_{fu} (MPa)	f_{ck} (MPa)	$\frac{c}{d_b}$	ACI-06 Eq. (9) (L_d/d_b)	Current study Eq. (7) (L_d/d_b)	$\frac{Eq.(7)}{Eq.(9)}$
690	27	0.5	86.3	133	1.54
		1.0	83.4	86.9	1.04
		1.5	80.8	64.5	0.80
		2.0	78.3	51.3	0.66
		3.0	73.7	51.3	0.70
	40	0.5	66.7	103	1.54
		1.0	64.5	67.2	1.04
		1.5	62.5	49.9	0.80
		2.0	60.5	41.8*	0.69
		3.0	57.0	41.8*	0.73
50	0.5	57.2	88.2	1.54	
	1.0	55.3	57.6	1.04	
	1.5	53.6	42.7	0.80	
	2.0	51.9	41.8*	0.81	
	3.0	48.9	41.8*	0.85	

Note)*Development length determined by Eq. (7) is smaller than that by Eq. (8), hence Eq. (8) controls.

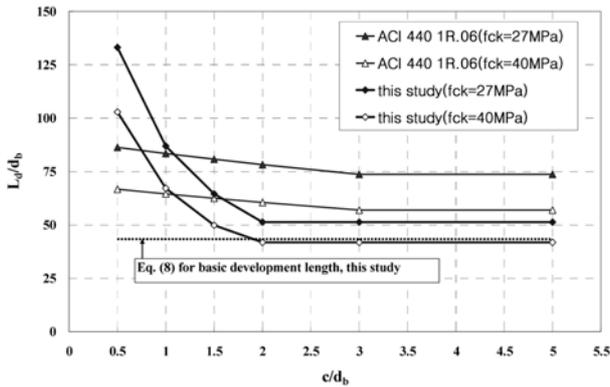


Fig. 13 Comparison of development lengths between ACI 440-06 equation vs. this study

소에 따라 정착길이가 큰 폭으로 증가하고 있어 피복두께가 정착길이에 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 GFRP 보강근의 부착 특성을 파악하고, 보강근의 정착길이 설계식을 제안하기 위하여 총 104개의 수정인발실험을 완료하였고, 실험결과 평균부착강도에 대한 통계적 분석을 수행하였으며, 5% 분위수에 기초하여 보수적인 정착길이 설계식을 제안하였다. 이 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 묻힘길이, 순피복두께, 보강근 지름, 상부근 효과 등을 변수로 하여 총 104개의 수정인발실험을 수행한 결과, 많은 실험체에서 콘크리트 쪼갬파괴가 발생하였다.
- 2) 쪼갬파괴가 발생된 실험체를 대상으로 2변수 선형 회귀분석의 결과, 얻어진 평균부착강도의 예측식에 대한 5% 분위수 개념을 적용하여 보수적인 정착길이 설계식을 제안하였다.
- 3) 이 연구의 결과 제안된 정착길이 설계식은 다음과 같다.

$$L_d = a \left(\frac{1.2f_{fu} - 34.2}{\sqrt{f_{ck}}} \right) d_b \left(\frac{1}{0.44 + \frac{c}{d_b}} \right)$$

여기서 L_d = GFRP 보강근의 정착길이(mm), a = 상부근 수정계수(1.3), f_{fu} = 보강근의 설계인장강도(MPa), f_{ck} = 콘크리트 설계기준강도(MPa), c : [순피복두께] 또는 [보강근 순 간격의 1/2] 중 작은 값(mm), d_b : 보강근 지름(mm)이다. 단 c/d_b 는 2.0 이하의 값이어야 한다. 또한 정착길이는 다음의 기본정착길이 이상이어야 한다.

$$L_{db} = \frac{d_b f_{fu}}{16.5}$$

- 4) 이 연구의 결과 피복두께는 GFRP 보강근의 부착강도 발현에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. ACI 440.1R-06의 정착길이 설계식과 이 연구의 제안식을 비교한 결과, 순피복두께가 $1.0 d_b$ 를 초과하는 경우 이 연구의 식이 더 경제적이고 순피복두께가 $1.0 d_b$ 이하인 경우에는 이 연구의 제안식이 더 보수적으로서 피복두께가 작은 경우 보다 안전한 설계가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ACI 440 Committee, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06)," *American Concrete Institute, Detroit, Michigan*, 2006.
2. ACI 440 Committee, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-03)," *American Concrete Institute, Detroit, Michigan*, 2003.
3. Japan Society of Civil Engineers, "Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials," *Concrete Engineering Series*, No. 23, 1997.
4. Architectural Institute of Japan, "Design and Construction Guideline of Continuous Fiber Reinforced Concrete," 2001.
5. ISIS Canada, "Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers," *Design Manual*, No. 3, 2001, 156 pp.
6. CAN/CSA S806-02, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers," *Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada*, 2002: Annex H., "Test Method for Bond Strength of FRP Rods by Pullout Testing."
7. 한국건설기술연구원, "FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발," 1차년도 최종 보고서, 2004.
8. 한국건설기술연구원, "FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발," 2차년도 최종 보고서, 2005.
9. ASTM D3916-02, "Standard Test Method for Tensile Properties of Pulltruded Glass -Fiber-Reinforced-Plastic Rods," *American Society of Testing Materials*, 2002.
10. 유영찬, 박지선, 유영준, 박영환, "GFRP 보강근의 인장강도 분석을 위한 시험방법 비교 연구," *콘크리트학회 논문집*, 18권, 3호, 2006, pp. 303~312.
11. 박찬기, 원종필, 강주원, "콘크리트 보강용 FRP 보강근의 내구성 설계를 위한 환경영향계수의 제안," *콘크리트학회 논문집*, 16권, 4호, 2004, pp. 529~539.
12. 최동욱, 하상수, 이창호 "인발실험에 의한 GFRP 보강근의 정착길이 제안," *콘크리트학회 논문집*, 19권, 3호, 2007, pp. 323~331.
13. 최동욱, 하상수, 천성철, "RC 부재 휨 실험에 의한 GFRP 보강근의 이음길이 제안," *콘크리트학회 논문집*, 21권, 1호, 2009, pp. 65~74.
14. Eshani, M. R., Saadatmanesh, H., and Tao, S., "Design Recommendations for Bond of GFRP Rebars to Concrete,"

ASCE J. of Structural Engineering, Vol. 122, No. 3, 1996, pp. 247~254.

15. Wambeke, B. W. and Shield, C. K., "Development Length of Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars in Concrete," *ACI*

Structural Journal, Vol. 103, No. 1, 2006, pp. 11~17.

16. ACI Committee 355, "Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete (ACI 355.2-04)," American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2004.

요 약 이 연구에서는 GFRP 보강근의 정착길이 설계식을 제안하기 위하여 실험적 연구를 수행하고 실험결과와 통계적 분석을 실시하였다. 총 104개의 수정인발실험을 완료하였으며 실험변수는 보강근의 문힘길이(보강근 지름의 15, 30, 45배), 순피복두께(보강근 지름의 0.5~2.0배), 상부근 효과, 보강근 종류(국내산 2종, 국외산 1종 등 3종) 및 보강근 지름(D10, D13, D16)이었다. 수정인발실험을 통해 얻은 실험 결과 평균부착강도를 결정하고, 평균부착강도에 대한 2변수 선형회귀분석을 실시하였다. 2변수 선형 회귀분석의 결과에 대하여 5% 분위수를 적용하여 보수적인 방법으로 정착길이 설계식을 제안하였다. 이 연구의 제안식과 ACI 440.1R-06 식을 비교하였다. 순피복두께가 $1.0 d_b$ 를 초과하는 경우 이 연구의 제안식이 더 경제적이고 순피복두께가 $1.0 d_b$ 이하인 경우에는 이 연구의 식이 더 보수적으로서 이 연구의 식을 사용하는 경우 보다 경제적이고 안전한 설계가 가능할 것으로 판단된다. 피복두께는 GFRP 보강근의 부착강도 발현에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

핵심어 : GFRP 보강근, 문힘길이, 피복두께, 포갸파괴, 평균부착응력