



인발실험에 의한 GFRP 보강근의 정착길이 제안

최동욱^{1)*} · 하상수²⁾ · 이창호¹⁾

¹⁾한경대학교 건축학부 ²⁾한경대학교 건설공학연구소

Development Length of GFRP Rebars Based on Pullout Test

Dong-Uk Choi^{1)*}, Sang-Su Ha²⁾, and Chang-Ho Lee¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

²⁾Center for Construction Engineering Research, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

ABSTRACT The development length equations of the GFRP rebars are suggested based on the pullout tests performed in this study. A total of 48 pullout and modified pullout tests were completed. Test variables included embedment length ($L = 10, 15, 20,$ and $30d_b$), vertical and horizontal installation of the rebars, height of the rebars ($H = 100$ and 300 mm), and cover thickness ($C = 2\sim 5d_b$). D13 GFRP rebars domestically developed were used in the experimental program. The average of the bond strength of all vertically installed GFRP rebars was 6.39 MPa with a 5% fractile of 4.63 MPa. A basic development length equation was derived that resulted in an equation equivalent to the one proposed in the ACI 440.1R-03. Careful reevaluation of the bond strength using the modified pullout test indicated that a modification of the design equation was necessary so that the basic development length increases by 11%. The top bar effect of the horizontally installed rebars as well as the effect of the cover thickness were determined and included in the set of suggested equations. Since the current equations were derived from testing rebars embedded in relatively low strength concrete ($f_{ck} = 20\sim 24$ MPa), they result in conservative development lengths when applied to bars embedded in higher strength concretes.

Keywords GFRP rebar, pullout test, development length, modified pullout test, top bar effect

1. 서 론

유리 섬유 보강 폴리머 (glass fiber reinforced polymer, 이하 GFRP) 보강근은 높은 인장강도를 갖고, 경량성, 비부식성 및 비자기성 등의 우수한 공학적 성질로 인하여 장차 철근을 대체할 수 있는 잠재성을 갖고 있다. 따라서 GFRP 보강근에 관련한 선진 외국의 연구는 매우 활발하다. 일본은 1997년과 2001년, 캐나다는 2000년 이후 각각 fiber reinforced polymer (FRP)를 사용한 콘크리트 구조물의 설계 및 시공 지침을 제시하였다^{1,4)}. 미국의 경우, FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물의 설계 및 시공에 관한 미국콘크리트학회 (ACI) 440 위원회의 지침이 2001년에 처음 제시되었으며, 이후 2003년 및 2006년의 개정을 거쳐 오늘에 이르고 있다^{5,6)}.

우리나라에서는 2000년대 이후 FRP 보강근을 자체적으로 개발하고, 개발된 보강근의 기계적 성질을 파악하고자 하는 연구 결과가 발표되고 있다⁷⁻¹⁰⁾. 또한 개발된 GFRP 보강근의 구조설계법을 정립하고자 학회를 중심으로 연구가 진행 중이며, 본 연구는 이러한 연구의 일

환으로서 특히 GFRP 보강근의 부착 특성을 고찰하고, 현장 적용을 앞당기기 위한 정착설계식을 개발하는데 주목적이 있다.

현재까지 GFRP 보강근에 관련한 국외의 설계 및 시공 지침은 인장 보강근으로서의 활용에 국한된다. 따라서 본 연구에서도 인장을 받는 GFRP 보강근의 부착 성능을 정량화하고, 정착길이를 결정하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 우리나라에서 개발된 GFRP 보강근을 이용하여 총 48개의 인발실험 및 수정 인발실험을 수행하였고, 정착길이를 제안하였다. Table 1에 GFRP 보강근의 대표적인 기계적 물성 (GFRP-foreign) 과 본 연구에서 사용된 GFRP 보강근 (GFRP-Kor.)의 물성을 철근과 비교하여 나타내었다.

2. 실험 준비

2.1 GFRP 보강근

본 연구에 사용된 GFRP 보강근은 인발 성형 (pulltrusion) 방법으로 제작되었고, 유리섬유와 비닐에스터 수지로 구성되었다. 보강근 총 단면적에 대한 섬유의 면적비는 75% 이었다. 인발 성형 후 부착강도의 증진을 위하여 코팅재

*Corresponding author E-mail : choиду@hknu.ac.kr
Received December 4, 2006, Accepted March 20, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

Table 1 Mechanical properties of steel rebars vs. GFRP rebars^{5,8)}

Properties	Steel	GFRP -foreign	GFRP -Kor.
Density	7.90	1.25-2.10	-
Thermal coefficient (m/m/°C)	Aaxial	11.7	6.0-10.0
	Transverse	11.7	21.0-23.0
Yield stress (MPa)	276-517	-	-
Tensile strength (MPa)	483-690	483-1,600	989
Elastic modulus (GPa)	200	35.0-51.0	37.2
Yield strain (%)	0.14-0.25	-	-
Rupture strain (%)	6.0-12.0	1.2-3.1	2.66

로서 알루미늄아 지르코니아 (alumina zirconia)를 약 740 μm 두께로 부착시켰다. 참고로, 지르코니아는 산 및 알칼리에 강한 등 내식성이 매우 좋으며 이를 응용한 알루미늄아 지르코니아는 고급 회전용 연마제로 많이 사용된다. Table 1 및 Fig. 1에 나타난 GFRP 보강근의 기계적 성질은 다음과 같았다⁸⁾.

- 공칭직경, $d_b = 12.7$ mm
- 단면적, $A_b = 113$ mm²,
- 극한인장강도, $f_{tu}^* = 989$ MPa
- 탄성계수, $E_f = 37.2$ GPa

선행 연구로서 GFRP 보강근의 묻힘길이를 보강근 공

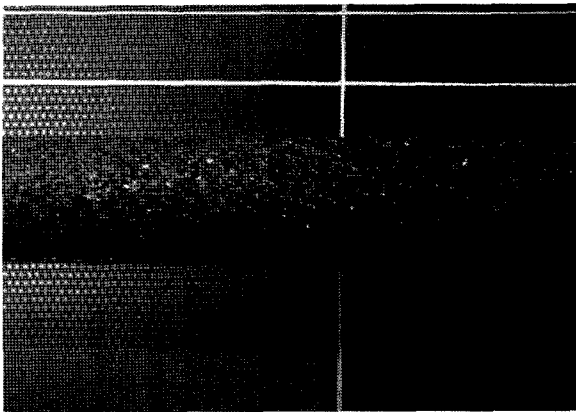
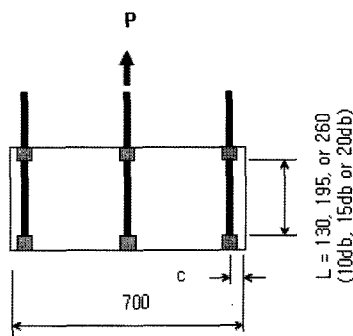
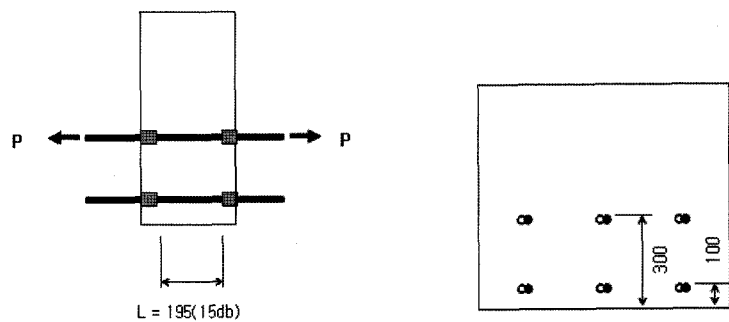


Fig. 1 A GFRP rebar



(a) Vertically installed bars



(b) Horizontally installed bars

Fig. 2 Pullout test schematics

칭직경의 4배 ($4d_b$)로 하고, 보통강도 콘크리트를 사용하여 CSA S806-02의 규격에 준하여 표준 인발실험을 수행한 결과, 평균 부착강도는 9.0~18.0 MPa이었다^{4,8)}.

2.2 콘크리트

실험실 인근의 레미콘 공장으로부터 콘크리트를 주문하여 실험체를 제작하였다. 인발실험 수행 시 콘크리트의 압축강도는 20.0, 23.2 및 24.0 MPa이었다.

2.3 인발실험체 제작

2.3.1 인발실험 (pullout test)

인발실험의 변수는 보강근의 배근 방향 (수직 배근 및 수평 배근), 묻힘길이, 피복두께, 상부근 효과 등이었다. 총 30개의 FRP 보강근을 연직 방향으로 설치 (수직 배근)한 상태에서 타설하고 실험을 수행하였다. 이때 묻힘길이 (L)를 10, 15 및 $20d_b$ 로 변화시켰고, 또한 피복두께 (C =보강근 중심으로부터 콘크리트 면까지 거리, Fig. 2(a) 참고)를 $2\sim 5d_b$ 및 중앙부로 변화시켜서 묻힘길이 및 피복두께의 부착강도에 대한 영향을 고찰하였다. 각 변수에 대하여 2개의 실험을 계획하였다.

수평 방향으로 설치 (수평 배근)한 FRP 보강근에 대하여 총 6개의 인발실험을 수행하였다. 상부근 효과를 조사하기 위하여 수평 배근 상태에서 설치, 타설 및 실험한 인발실험의 변수는 보강근의 높이 ($H = 100, 300$ mm)였다. 보의 보강근이 이음된 상태를 모사하기 위하여 Fig. 2(b)와 같이 겹침이음한 두 개의 보강근에 대하여 동시에 각각 인발력을 가력하였다. 각 변수에 대하여 3개의 실험을 계획하였다. 인발실험의 변수는 Tables 2, 3에 요약하였다.

2.3.2 수정 인발실험 (modified pullout test)

인발실험에서는 콘크리트 면에 직접 중공식 유압실린더를 설치하고, 실린더의 중공을 관통시킨 보강근을 실험 그룹을 사용하여 고정시킨 후, 유압실린더로 가력하였다 (Fig. 4(a) 참고). 이 방법을 사용하면 경제적이지만 유압실린더로부터 콘크리트에 작용하는 반력 (압축력)으

Table 2 Summary of pullout (p/o) test variables and test results: vertically installed bars

Specimen index ¹⁾	f_{ck} (MPa)	Cover, C ²⁾ (mm)	Embedded length, L ³⁾ (mm)	L/d_b	P_{test} ⁴⁾ (kN)	σ_{test} ⁵⁾ (MPa)	u_{test} ⁶⁾ (MPa)	$u_{test}/\sqrt{f_{ck}}$ (MPa)	$u_{test}/\sqrt{f_{ck}}$ average	Failure mode ⁷⁾
V-L10-C2(1)	23.2	27.7	130	10	40.2	356	7.75	1.61	1.60	p/o
V-L10-C2(2)	24.0	23.4			40.0	354	7.72	1.58		
V-L10-C3(1)	23.2	38.0			35.8	317	6.91	1.43	1.46	
V-L10-C3(2)	24.0	46.7			37.8	335	7.29	1.49	1.46	
V-L10-C4(1)	23.2	46.0			30.8	273	5.94	1.23	1.29	
V-L10-C4(2)	24.0	58.6			34.1	302	6.58	1.34	1.29	
V-L10-C5(1)	23.2	68.3			29.4	260	5.67	1.18	1.13	
V-L10-C5(2)	24.0	62.7			27.3	242	5.27	1.08	1.13	
V-L10-CN(1)	23.2	-			29.9	265	5.77	1.20	1.36	
V-L10-CN(2)	24.0	-			38.4	340	7.41	1.51	1.36	
V-L15-C2(1)	23.2	49.9	195	15	43.7	387	5.62	1.17	1.27	p/o
V-L15-C2(2)	24.0	27.8			51.7	458	6.65	1.36	1.27	
V-L15-C3(1)	23.2	39.9			35.0	310	4.50	0.93	1.26	
V-L15-C3(2)	24.0	38.0			60.7	537	7.81	1.59	1.26	
V-L15-C4(1)	23.2	50.6			44.3	392	5.70	1.18	1.16	
V-L15-C4(2)	24.0	45.5			46.0	407	5.92	1.21	1.16	
V-L15-C5(1)	23.2	50.8			44.5	394	5.72	1.19	1.37	
V-L15-C5(2)	24.0	62.6			58.5	518	7.52	1.54	1.37	
V-L15-CN(1)	23.2	-			43.7	387	5.62	1.17	1.26	
V-L15-CN(2)	24.0	-			51.3	454	6.60	1.35	1.26	
V-L20-C2(1)	23.2	25.0	260	20	64.6	572	6.23	1.29	1.37	p/o
V-L20-C2(2)	24.0	27.9			73.4	650	7.08	1.45	1.37	
V-L20-C3(1)	23.2	45.9			70.0	619	6.75	1.40	1.41	
V-L20-C3(2)	24.0	36.9			72.2	639	6.96	1.42	1.41	
V-L20-C4(1)	23.2	45.7			60.8	538	5.86	1.22	1.29	
V-L20-C4(2)	24.0	58.7			69.2	612	6.67	1.36	1.29	
V-L20-C5(1)	23.2	57.7			67.5	597	6.51	1.35	1.38	
V-L20-C5(2)	24.0	58.6			71.4	632	6.89	1.41	1.38	
V-L20-CN(1)	23.2	-			58.0	513	5.59	1.16	1.13	
V-L20-CN(2)	24.0	-			55.4	490	5.34	1.09	1.13	

Note 1) Specimen index: V-L10-C2 (1), V = vertically installed bars, L10 = embedded length of $10d_b$, C2 = cover thickness of $2d_b$, (1) = replicate no.1, 2) C = distance between bar center and concrete edge, 3) L = length of bar embedded in concrete, 4) P_{test} = max. pullout load determined from test, 5) $\sigma_{test} = P_{test}/(\text{bar cross-sectional area})$, 6) u_{test} = average bond stress = $P_{test}/(\pi * \text{bar diameter} * L)$, 7) p/o = pullout

Table 3 Summary of pullout test variables and test results: horizontally installed bars

Specimen index ¹⁾	f_{ck} (MPa)	Height, H (mm)	Embedded length, L (mm)	L/d_b	P_{test} (kN)	σ_{test} (MPa)	u_{test} (MPa)	$u_{average}$ (MPa)	Failure mode
H100-L15-HS(1)	20.0	100	195	15	84.1	744	10.8	10.3	p/o
H100-L15-HS(2)					75.4	667	9.70		
H100-L15-HS(3)					80.7	714	10.4		
H300-L15-HS(1)		300			58.4	517	7.51	6.77	
H300-L15-HS(2)					49.1	435	6.31		
H300-L15-HS(3)					50.4	446	6.48		

Note 1) specimen index: H100-L15-HS(1), H100 = horizontally installed bars with a height of 100 mm, L15 = embedded length of 195 mm ($15d_b$), HS = test of two horizontally lap spliced bars where the two bars were pulled out at the same time, (1) = replicate no. 1

로 인하여 콘크리트에 인장 균열 발생이 억제되고, 따라서 비보수적인 실험 결과를 초래할 수 있다¹¹⁾.

그러므로 수정 인발실험은 일반적인 인발실험과 달리 유압실린더가 콘크리트 면과 접촉하지 않는 상태에서 순수한 인발력의 가력이 가능하도록 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 특수하게 고안하였다. 수정 인발실험에서 FRP 보강근은 모두 350 mm 위치에 수평 방향으로 설치, 타설 및 실험하였으며, 겹침이음된 두 개의 보강근에 대하여 동시에 인발력을 가력하였다. 문힘길이는 15, 30 d_b , 피복 두께 (보강근 중심으로부터 콘크리트 면까지 거리)는 2, 4 d_b 및 중앙부였다. 각 실험 변수에 대하여 2개씩 총 12개의 인발실험을 계획하였다. 수정 인발실험에서는 겹침이음된 보강근의 하중단 및 자유단에 각각 LVDT를 사용하여 변위를 계측하였다. 수정 인발실험의 변수를 Table 4에 요약하였다.

2.4 실험 setup

인발실험은 제작이 완료된 실험체 면에 300 kN 용량의 중공식 유압실린더를 Fig. 4(a)와 같이 직접 설치하고, 실린더를 관통한 보강근 단부를 Fig. 4(b)의 특수하게 제작된 실험 그림을 사용 고정시킨 후, 핸드 펌프로 구동된 유압실린더를 사용하여 인발 하중을 가력하는 방법으

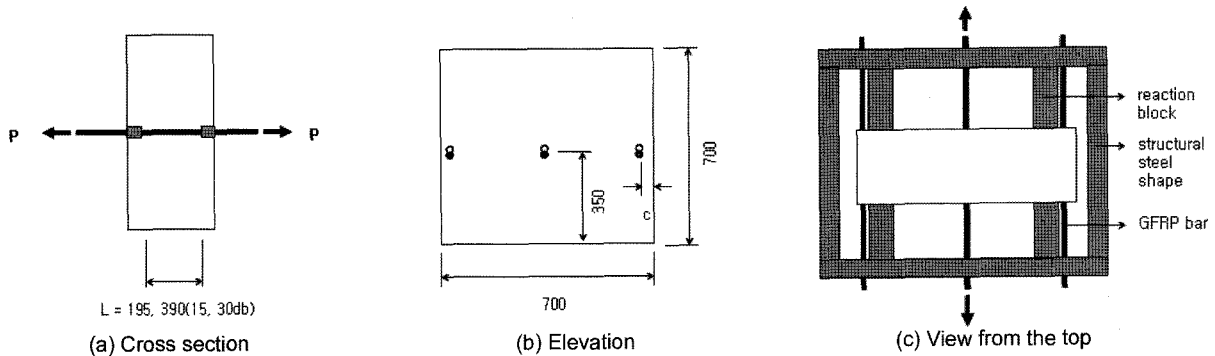


Fig. 3 Modified pullout test schematics

Table 4 Summary of modified pullout test variables and test results

Specimen index ¹⁾	f_{ck} (MPa)	Height, H (mm)	Embedded length, L (mm)	Cover, C (mm)	P_{test} (kN)	σ_{test} (MPa)	u_{test} (MPa)	$u_{average}$ (MPa)	Failure mode	
K-L15-C2(1)	20.0	350	195	26.0	43.6	386	5.60	5.62	splitting	
K-L15-C2(2)					43.9	388	5.64		p/o	
K-L15-C4(1)				52.0	66.2	586	8.51	7.69	p/o	
K-L15-C4(2)					53.4	473	6.86			
K-L15-CN(1)				--	51.6	457	6.63	6.09	p/o	
K-L15-CN(2)					43.2	382	5.55			
K-L30-C2(1)			390	26.0	26.0	72.4	641	4.65	4.50	p/o
K-L30-C2(2)						67.7	599	4.35		
K-L30-C4(1)				52.0	26.0	93.3	826	6.00	5.91	p/o
K-L30-C4(2)						90.6	802	5.82		
K-L30-CN(1)				--	26.0	82.4	729	5.30	5.50	p/o
K-L30-CN(2)						88.7	785	5.70		

Note 1) specimen index: K-L15-C2(1), K = modified pullout test of GFRP bars made by KICT, L15 = embedded length of 195 mm (15 d_b), C2 = cover thickness of 2 d_b , (1) = replicate no.1

로 수행하였다¹²⁾.

수정 인발실험의 전반적인 setup은 인발실험과 동일하지만 Fig. 4(c)와 같이 유압실린더가 콘크리트 면에 직접 접촉하지 않는 상태에서 인발력을 가할 수 있도록 강제 골조를 추가로 사용하고, 강제 면에 유압실린더를 고정하여 가력하였다. 또한 수정 인발실험에서는 Fig. 4(d)와 같이 각 보강근의 자유단 및 하중단에 총 3개 (하중단 2개 및 자유단 1개)의 LVDT를 설치하여 하중에 대한 보강근의 변위를 결정할 수 있도록 하였다.

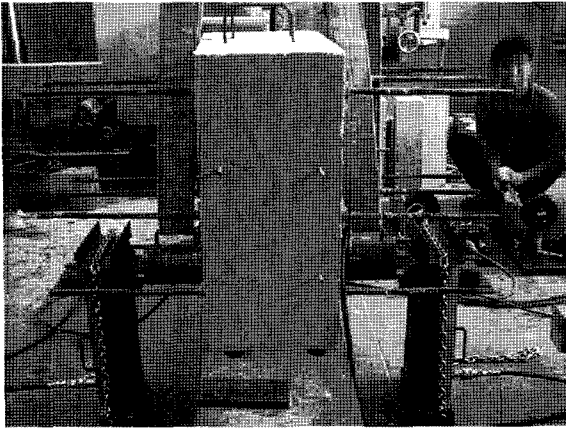
인발실험 및 수정 인발실험에서 모두 GFRP 보강근이 뽑힘파괴 (pullout failure)되거나 또는 콘크리트 쪼갬파괴 (concrete splitting)가 발생할 때까지 가력하였고, 유압계 이치 및 LVDT의 데이터를 초당 10세트씩 data logger를 사용하여 기록하였다.

3. 실험 결과

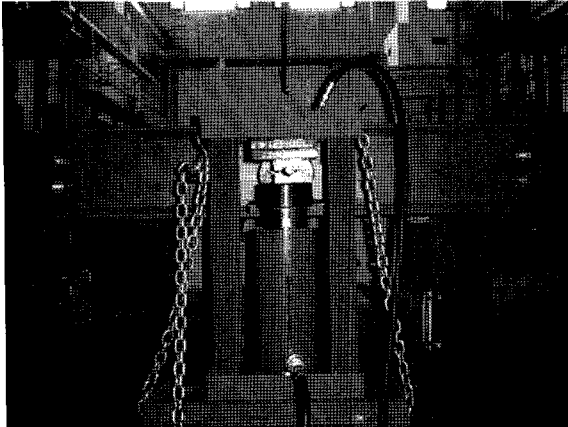
3.1 인발실험

3.1.1 부착강도 : 수직 배근

수직 배근 인발 실험체의 실험 결과 평균 부착강도를 Table 2 및 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a), (b), (c)는 각각 문힘길이가 10, 15, 20 d_b 인 경우, 피복두께 (C)에 대한 평



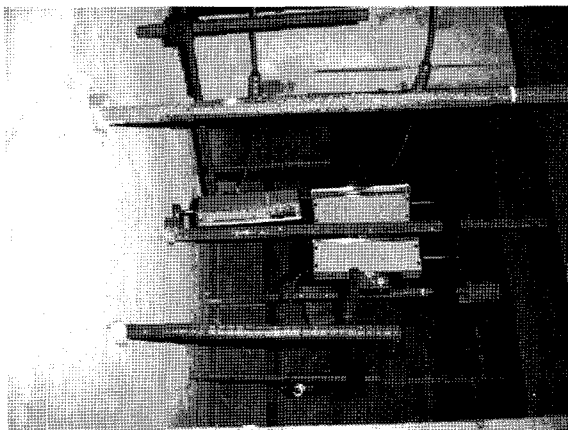
(a) A p/o test in progress



(b) Test grip

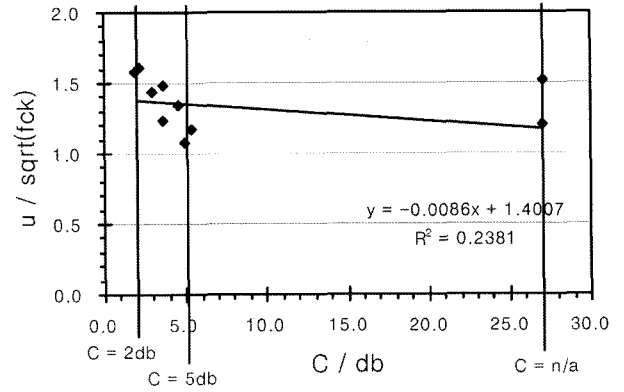


(c) A pure p/o test in progress

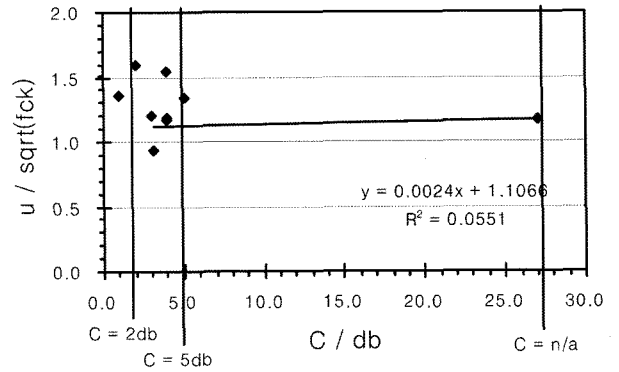


(d) LVDT installation

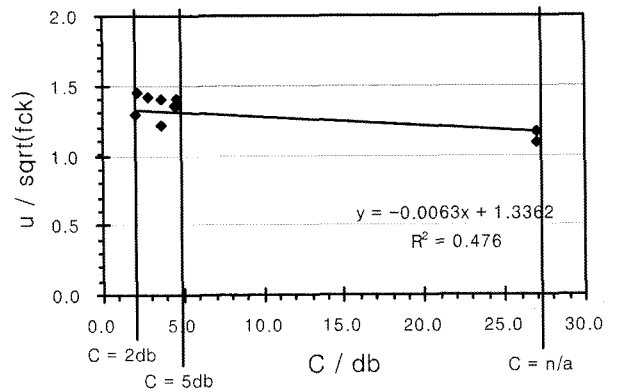
Fig. 4 Pullout (p/o) test setup



(a) L = 10db



(b) L = 15db



(c) L = 20db

Fig. 5 Normalized average bond stress vs. cover thickness: vertically installed bars

균 부착강도 (u)를 나타낸 것이다. 이때 피복두께는 보강근 중심으로부터 콘크리트 면까지의 거리이고, 부착강도는 두 가지 다른 강도의 콘크리트를 사용하였으므로 부착강도를 콘크리트 강도의 제곱근 ($u / \sqrt{f_{ck}}$)으로 나누어 동일한 조건에서 부착강도를 비교하였다. Fig. 5(a), (c)는 모두 피복두께의 증가에 따라서 부착강도가 오히려 감소하는 듯한 경향을 보여 주고 있으나, 이는 실험 개체 수가 충분치 않은 관계로 나타난 옳지 않은 결과로 사료된다. 또한, Fig. 5(b)는 피복두께의 감소에 따라서 부착강도가 약간 감소하는 경향을 보여 주고 있으나 감소율은 아주 작다. 따라서 수직 배근 보강근의 인발실험 결과, 피복두께가 $2d_b$ 이상인 경우, 부착강도는 피복두께의 영향을 받지 않는다는 잠정적 결론에 도달하였다.

또한 Table 2 및 Fig. 6에서 묻힘길이가 각각 10, 15, $20d_b$ 인 경우, 부착강도의 평균값은 6.63, 6.16, 6.39 MPa

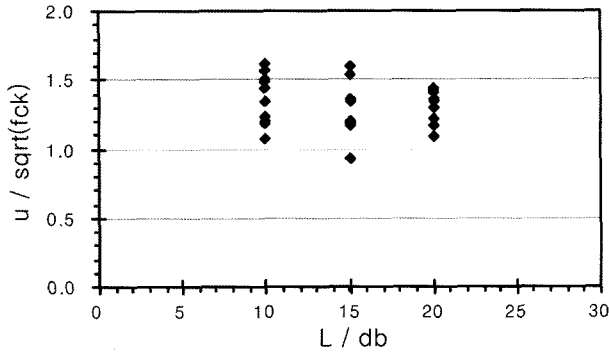


Fig. 6 Normalized average bond stress vs. embedment length: vertically installed bars

이고, 수직 배근된 모든 GFRP 보강근의 인발실험 결과 평균 부착강도는 6.39 MPa인 것을 알 수 있다.

부착강도를 보수적으로 평가하기 위하여 식 (1)과 같이 5% 분위수(실제 강도가 공칭강도를 초과할 확률 95%에 대한 90%의 신뢰도) 개념을 사용할 수 있다¹³⁾.

$$F_{5\%} = F_m(1 - K\nu) \quad (1)$$

여기서 F_m = 강도 평균값, K = 90% 신뢰도로 5% 분위수를 평가하기 위한 계수, ν = 변동계수 (coefficient of variation) 이다.

식 (1), Table 2 및 Figs. 5 및 6으로부터 수직 배근 총 30개 GFRP 보강근의 인발실험에서 평균 부착강도의 5% 분위수는 4.63 MPa이고, 평균 부착강도를 콘크리트 강도의 제곱근으로 나눈 경우의 5% 분위수는 0.964 MPa이다.

3.1.2 상부근 효과: 수평 배근

Table 3에서 100 mm 높이에 설치하고 실험한 보강근의 부착강도의 평균값은 10.3 MPa이고, 300 mm 높이에 설치 및 실험한 경우 부착강도의 평균값은 6.77 MPa이다. 이는 이미 알려진 것과 같이 콘크리트가 타설된 후 굳기까지 침하에 의하여 상부근 하면의 부착이 원활하지 못한 것이 이유이며, 실험 결과로부터 상부근의 정착길이를 하부근보다 약 1.5배 증가시켜야 함을 알 수 있다.

3.2 수정 인발실험

3.2.1 하중-변위 곡선

접침이음한 보강근의 하중단 (loaded end) 및 자유단 (free end)에 각각 LVDT를 사용하여 측정한 변위 데이터로부터 하중단의 실제 변위는 식 (2)와 같이 결정하였다.

$$\delta_a = \delta_m - \delta_e \quad (2)$$

여기서, δ_a , δ_m , δ_e 는 각각 실제 변위, 측정한 변위 및 콘크리트 면으로부터 LVDT 위치까지 보강근의 탄성변형에 의한 변위이다.

실험으로부터 결정된 하중-변위 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a), (b)는 각각 묻힘길이가 15, 30 d_b 인 경우이다. 보강근의 묻힘길이가 15 d_b 인 Fig. 7(a)에서 하중

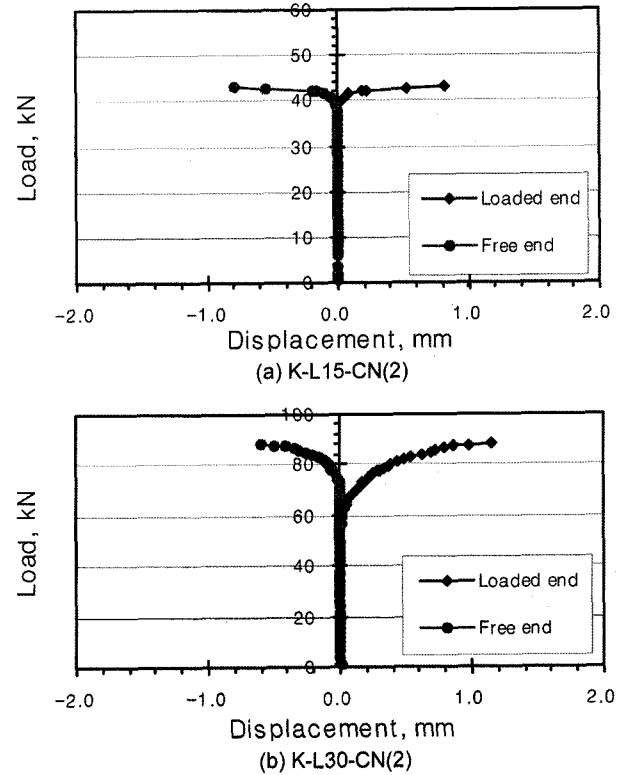


Fig. 7 Load vs. displacement: modified p/o test

단과 자유단의 변위가 거의 대칭인 반면에, 묻힘길이가 30 d_b 인 Fig. 7(b)에서는 하중이 증가함에 따라서 하중단의 변위가 자유단의 변위보다 큰 경향을 보이고 있다.

이는 묻힘길이가 작은 경우 ($L = 15d_b$) 부착응력은 하중단에서부터 자유단에 걸쳐서 비교적 골고루 분포하고, 묻힘길이가 큰 경우 ($L = 30d_b$)는 부착응력의 분포가 하중단에 치우쳐 있는 것을 나타낸 것으로 사료된다. 즉, 묻힘길이가 큰 경우는 하중이 증가함에 따라서 보강근과 콘크리트 간의 부착이 하중단에서부터 시작하여 점차 파괴되고, 부착 저항은 점점 더 부착이 파괴되지 않은 부위로 이동함에 따라서, 부착이 제거된 부분의 탄성변형이 하중단 변위에 포함되는 것으로 사료된다.

3.2.2 인발실험과 수정 인발실험의 비교

수정 인발실험에서 모든 보강근은 350 mm 위치에 설치하고 실험을 수행하였으므로 인발실험의 수평 배근 실험체 중에서 상부근(높이 = 300 mm)의 경우와 유사하고, 따라서 묻힘길이가 동일한 실험체 사이에서 부착강도를 서로 비교할 수 있다. Table 3의 인발실험 결과 높이 300 mm 인 3개 실험체 부착강도의 평균값은 6.77 MPa이고, Table 4의 수정 인발실험에서 묻힘길이가 동일 (15 d_b)하고 피복 두께의 영향을 받지 않는 2개 실험체 부착강도의 평균값은 6.09 MPa이다. 따라서 인발실험의 부착강도가 수정 인발실험의 부착강도를 11.1% 상회한다. 이 결과는 인발실험에서는 유압실린더로부터 콘크리트 면에 직접 작용하는 반력 (압축력)에 의하여 콘크리트에 인장 균열이 발생할 수 없으므로 인장 균열 발생이 허용되는 수정 인발실험에 비하여 비보수적인 부착강도를 나타낸 것으로 사료된다.

3.2.3 피복두께의 영향

Fig. 8에 수정 인발실험의 결과 피복두께와 부착강도의 관계를 나타내었다. Fig. 8에서 상대 부착 강도(relative bond strength)는 각각 피복두께가 2, 4 d_b 인 실험체의 중앙부 실험체에 대한 부착강도 비이다. Fig. 8에서 피복두께가 4 d_b 인 경우는 상대 부착강도가 1.0 이상이다. 이는 인발실험에서 수직 배근된 실험체의 경우에도 나타난 현상이며 실험 개체 수가 충분치 않은 관계로 나타난 결과로 사료된다.

그러나 피복두께가 2 d_b 인 경우에는 상대 부착강도가 1.0 미만으로 나타났고, 동시에 피복두께가 2 d_b 이고 묻힘 길이가 15 d_b 인 실험체에서 콘크리트 쪼갬파괴가 발생하였다 (Table 4의 K-L15-C2(1)). 이는 전술한 3.1.1절의 인발실험 결과와 다른 거동을 보인 것이다. 인발실험에서는 콘크리트에 인장 균열이 발생할 수 없으므로, 인장 균열 발생이 허용되는 수정 인발실험의 결과를 따라야 할 것으로 사료되고, 따라서 피복두께 2 d_b 는 콘크리트 쪼갬파괴를 방지하는데 있어서 비보수적일 수 있다는 결론을 도출하였다. 본 연구에서 피복두께는 보강근 중심으로부터 콘크리트 면까지 거리이므로, 실험 결과를 바탕으로 순 피복두께를 2 d_b 이상 확보하여야 콘크리트 쪼갬파괴를 방지할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 Table 4 및 Fig. 8에 나타난 것과 같이 피복두께가 2 d_b 인 경우 (혹은 순 피복두께가 1.5 d_b)에는 피복두께가 충분한 경우에 비하여 부착강도를 80%로 감소시켜야 한다. 즉, 정착길이를 125%로 증가시켜야 한다.

3.3 정착길이

3.3.1 기본 정착길이

GFRP 보강근의 기본 정착길이는 다음과 같은 보수적인 접근 방법에 의하여 산정하였다. 보강근에 가력된 최대하중 (P)는 보강근 단면적 곱하기 인장강도 ($A_f * f_{fu}$)이고, 묻힘길이에 걸쳐서 보강근 둘레에 작용하는 부착응력에 의하여 식 (3)과 같이 평형을 이룬다.

$$A_f f_{fu} = \pi d_b u L \quad (3)$$

여기서 A_f = 보강근 단면적, f_{fu} = 보강근 인장강도, d_b = 공

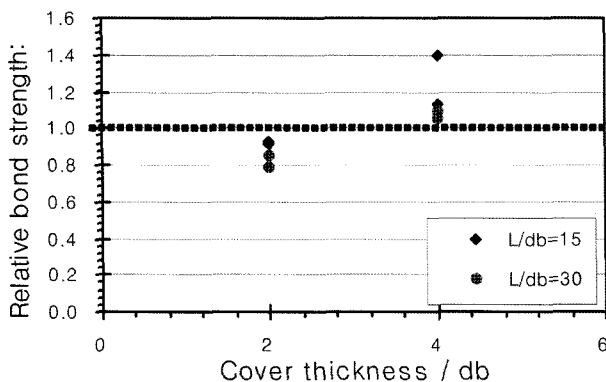


Fig. 8 Cover vs. bond strength: modified p/o test

칭직경, u = 평균 부착강도, L = 묻힘길이이다. 그러므로 보강근의 기본 정착길이 (L_{bf})는 식 (4)와 같다.

$$L_{bf} = \frac{A_f f_{fu}}{\pi d_b u} \quad (4)$$

또는,

$$L_{bf} = \frac{d_b f_{fu}}{4u} \quad (5)$$

식 (5)에서 기본 정착길이를 구하기 위해서는 인발실험의 결과 결정된 평균 부착강도 (u)를 사용하여야 한다. 전술한 3.1.1절에서 수직배근된 총 30개 GFRP 보강근 평균 부착강도의 5% 분위수는 4.63 MPa이므로 이를 식 (5)에 대입하면 식 (6)과 같다.

$$L_{bf} = \frac{d_b f_{fu}}{18.5} \quad (6)$$

식 (6)은 ACI 440 위원회 (2003년)에서 제시한 FRP 보강근의 기본 정착길이에 관한 식과 일치한다⁵⁾. 본 연구에서 인발실험의 경우는 수정 인발실험보다 비보수적인 결과를 나타내었으므로, 전술한 3.2.2절의 결과를 반영하여 정착길이를 11.1% 증가시키면 기본 정착길이는 최종적으로 식 (7)과 같다.

$$L_{bf} = \frac{d_b f_{fu}}{16.5} \quad (7)$$

여기서, L_{bf} = 기본 정착길이 (mm), d_b = 보강근의 공칭직경 (mm), f_{fu} = 환경감소계수를 고려한 보강근의 설계인장강도 (MPa)이다^{5,6,14)}.

3.3.2 상부근 효과 및 피복두께의 영향

GFRP 보강근의 정착길이는 식 (7)의 기본 정착길이에 상부근 및 피복두께의 영향을 고려하여 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{df} = k L_{bf} \quad (8)$$

여기서 L_{df} = 정착길이 (mm), k = 보정계수, L_{bf} = 기본 정착길이 (mm)이다. GFRP 보강근의 정착길이에 관한 최종 식 (8)에서, 보정계수 k 값은 다음과 같이 적용할 수 있다.

- (1) $k = 1.5$, 보강근이 수평 배근되고 하부 콘크리트 두께가 300 mm 이상인 경우
- (2) $k = 1.25$, 위 (1)에 해당되지 않고 보강근의 피복두께 (보강근 중심으로부터 콘크리트 면까지 거리)가 2 d_b 인 경우, 또는 인접 철근 중심 거리가 4 d_b 인 경우
- (3) $k = 1.0$, 위 (1)에 해당하지 않고 피복두께가 2.5 d_b 이상이고 동시에 인접 철근 중심 거리가 5 d_b 이상인 경우

피복두께가 2~2.5 d_b 사이인 경우에는 위에서 제시된 k 값을 직선 보간할 수 있고, 피복두께가 2 d_b 미만인 경우

는 본 연구에서 제안한 정착길이를 적용할 수 없다.

3.4 연구 결과의 고찰

3.4.1 기본 정착 길이 (보강근 뽑힘파괴)

전술한 바와 같이 미국 ACI 440 위원회 (2003년)의 기본 정착길이 식은 식 (6)과 동일하고, 본 연구에서 제안한 기본 정착길이의 식은 식 (7)이다⁵⁾. 캐나다의 경우, ISIS Canada (The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures)에서 제안한 보강근 뽑힘파괴에 대한 정착길이 식은 식 (9)와 같다³⁾.

$$L_{f_{pd}} = 0.054d_b f_{f_{rp}} \quad (9)$$

여기서 $L_{f_{pd}}$ = 정착길이 (mm), d_b = 보강근 공칭직경 (mm), $f_{f_{rp}}$ = 보강근의 극한인장강도 (MPa)이다.

예를 들어서 2.1절에 나타난 연구에 사용한 GFRP 보강근에 대하여 기본 정착길이를 산정한 결과를 Table 5에 나타내었다. 단, Table 5에서 미국 및 본 연구 제안식의 정착길이 평가 시 환경영향계수는 0.8을 사용하였다^{5,6,14)}.

Table 5에서 기본 정착길이는 ACI 440.1R-03 보다 보수적이고 ISIS Canada에 비하여 비보수적이다.

3.4.2 쪼갬파괴

피복두께가 불충분하거나, 보강근이 서로 인접하면 FRP 보강근의 뽑힘파괴 대신 콘크리트 쪼갬파괴가 발생할 수 있다. 이러한 파괴 형태에 대하여 ISIS Canada-01은 다음 식 (10)을 제시하고 있다.

$$L_{f_{pd}} = 0.028 \frac{A_{f_{rp}} f_{f_{rp}}}{\sqrt{f_c}} \quad (10)$$

여기서 $A_{f_{rp}}$ = 보강근 공칭 단면적 (mm^2), f_c = 콘크리트 압축강도 (MPa)이다. ISIS Canada는 식 (9)가 보강근의 뽑힘파괴 모드, 식 (10)은 콘크리트의 쪼갬파괴 모드에 대해 제시된 것이므로 식 (9) 및 식 (10)을 동시에 만족시켜야 한다.

ACI 440.1R-03은 쪼갬파괴에 대한 별도의 식 대신에 피복두께를 $1.5d_b$ 로 제한하고, 이 경우 식 (6)에서 결정한 기본 정착길이에 계수 1.5를 곱하여 정착길이를 결정하도록 하였다. 본 연구에서도 쪼갬파괴에 대한 별도 식을 제시하는 대신에 피복두께를 $2d_b$ 로 제한하고, 식 (7)에서 결정한 기본 정착길이에 계수 1.25를 곱하여 정착길이를 결정하도록 하였다.

피복두께를 $2d_b$ 로 가정하고, 세 가지 다른 강도의 콘크리트에 대하여 ISIS Canada 식과 본 연구에서 제안한

Table 5 Comparison of basic development lengths^{3,5)}

	ACI 440.1R-03	ISIS Canada-01	This study
L_{bf} (mm)	543	678	609

Note) $d_b = 12.7$ mm, $f_{fu}^* = 989$ MPa, $f_{fu} = 0.8 * f_{fu}^* = 791$ MPa

Table 6 Comparison of development lengths (splitting failure mode)³⁾

Develop. length	f_{ck} (MPa)	ISIS ¹⁾ Canada-01 (mm)	This study (mm)
L_{df}	20	700	761
	30	678	
	40	678	

Note 1) the development length is controlled by pullout failure mode when $f_{ck} = 30$ or 40 MPa

식을 이용 결정한 정착길이를 비교하면 Table 6과 같다.

Table 6에 나타난 것과 같이 본 연구에서 제안한 식 (7) 및 (8)은 압축강도 20~24 MPa의 저장도 내지 보통강도 콘크리트 만을 대상으로 하였으므로 콘크리트 강도의 증가에 따른 정착길이의 감소를 반영하지 못하는 단점이 있다. 그러나 식 (7) 및 (8)을 보다 강도가 높은 콘크리트에 적용하는 경우 안전한 결과를 갖는 것으로 판단된다.

3.4.3 상부근 효과

ACI 440.1R-03은 보강근이 수평 배근되고 보강근 하부 콘크리트 두께가 300 mm 이상인 경우, 보정 계수 1.3을 제시하고 있으며, ISIS Canada는 상부근 효과에 대하여 별도로 언급하고 있지 않다. 본 연구에서는 수행된 실험 결과에 기초하여 보강근이 수평 배근되고 하부 콘크리트 두께가 300 mm 이상인 경우, 보정 계수 1.5를 제시하였다.

3.4.4 보강근 표면의 영향

전술한 바와 같이 본 연구에서는 우리나라에서 개발된 GFRP 보강근을 사용하였고, Fig. 1에 나타난 것과 같이 보강근은 인발성형 후 부착강도의 증진을 위하여 alumina zirconia를 코팅시킨 것이다. 일반적으로 코팅 기술이 적절한 경우에 코팅재가 상이하더라도 GFRP 보강근의 부착 특성은 유사한 것으로 알려져 있다¹¹⁾. 따라서 본 연구의 결과는 부착강도의 증진을 위하여 코팅재를 적절히 부착시킨 GFRP 보강근에 대하여 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

- 1) 본 연구에서는 우리나라에서 개발된 GFRP 보강근을 이용하여 총 48개의 인발실험 및 수정 인발실험을 수행하였고, 실험 결과에 의하여 인장을 받는 GFRP 보강근의 정착길이를 식 (7) 및 (8)과 같이 제안하고, 또한 상부근 효과 및 피복두께의 영향에 대한 보정계수를 제시하였다.
- 2) 연구 과정에서 도출된 기본 정착길이 식 (6)은, 본 연구와 같이 인발실험의 결과를 기초로 한 ACI 440.1R-03에서 제시한 식과 결과적으로 일치하였다. 그러나 콘크리트에 인장균열이 발생할 수 있도록 고안된 수정 인발실험의 결과에 기초하여 이보다 다소 보수적

인 새로운 기본 정착길이 식 (7)을 제시하였다.

- 3) GFRP 보강근의 정착길이에 관한 식 (8)은 상부근 효과 및 피복두께의 영향을 포함하고 있으나 압축강도 20~24 MPa의 저강도 내지 보통강도 콘크리트만을 대상으로 한 제약점이 있다. 그러나 콘크리트 강도가 증가함에 따라서 정착길이는 감소하므로, 본 연구에서 개발된 식을 보다 강도가 높은 콘크리트에 적용하는 경우 안전한 결과를 갖는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2005년도 정부재원 (교육인적자원부 학술연구구조성사업비 : KRF-2005-050-D00017)으로 한국학술진흥재단의 지원 및 2004년도 공공기술연구회의 정책연구사업인 “FRP 복합 재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발”의 지원에 의하여 수행되었으며 관계 제위께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), *Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Concrete Engineering Series No.23, 1997.
2. Architectural Institute of Japan, *Design and Construction Guideline of Continuous Fiber Reinforced Concrete*, AIJ, 2001.
3. ISIS Canada, *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*, Design Manual No.3, 2001, 156pp.
4. 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*.
5. 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.
6. 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.
7. 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 1차년도 최종 보고서, 2004, pp.53~209.
8. 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 2차년도 최종 보고서, 2005, pp.35~339.
9. 박석균, 김대훈, “콘크리트 파괴 자가진단을 위한 하이브리드 FRP 보강근의 적용 특성”, 콘크리트학회 논문집, 18권 3호, 2006, pp.439~445.
10. 유영준, 박지선, 박영환, 김공환, “유리와 탄소섬유로 제작된 하이브리드 FRP 로드의 인장특성에 관한 실험연구”, 콘크리트학회 논문집, 18권 2호, 2006, pp.275~282.
11. 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.
12. ASTM D3916-02, *Standard Test Method for Tensile Properties of Pulltruded Glass-Fiber-Reinforced-Plastic Rods*, American Society of Testing Materials, 2002.
13. ACI Committee 355, *Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete (ACI 355.2-04)*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2004.
14. 박찬기, 원종필, 강주원, “콘크리트 보강용 FRP 보강근의 내구성 설계를 위한 환경영향계수의 제안”, 콘크리트학회 논문집, 16권 4호, 2004, pp.529~539.

요 약 본 연구에서 수행된 GFRP 보강근의 인발실험 결과로부터 보강근의 정착길이에 관한 설계식을 제안하였다. 총 48개의 인발실험 및 수정 인발실험을 완료하였다. 실험 변수는 분힘길이 ($L = 10, 15, 20, 30d_b$), 수직 배근 및 수평 배근, 보강근의 높이 ($H = 100, 300 \text{ mm}$) 및 피복두께 ($C = 2\sim 5d_b$)이었다. 실험에는 우리나라에서 개발된 D13 GFRP 보강근을 사용하였다. 수직배근된 모든 보강근 인발실험의 결과 평균부착강도는 6.39 MPa, 5% 분위수는 4.63 MPa이었다. 이 결과로부터 도출된 기본 정착길이에 관한 식은 2003년도 ACI 440 위원회에서 제시한 식과 일치하였다. 그러나 본 연구의 수정 인발실험의 결과는 이 식이 비보수적일 수 있다는 결론을 제시하였으므로, 보수적으로 기본 정착길이를 약 11% 상향 조정하였다. 또한, 상부근 효과 및 피복두께의 정착길이에 관한 영향을 실험 결과로부터 결정하였고, 정착길이 식 제안에 포함시켰다. 본 연구에서 제안한 식은 압축강도 20~24 MPa의 저강도 내지 보통강도 콘크리트만을 대상으로 한 제약점이 있으나 콘크리트 강도가 증가함에 따라서 정착길이는 감소하므로, 이 식을 보다 높은 강도 콘크리트에 적용하는 경우 안전한 결과를 갖는 것으로 판단된다.

핵심용어 : GFRP 보강근, 인발실험, 정착길이, 수정 인발실험, 상부근 효과