

# 쪼갬파괴된 GFRP 하부근과 상부근의 정착길이 산정식 비교

## Comparison of Development Length Equation of Bottom and Top GFRP Bars with Splitting Failure

하 상 수\*      윤 준 선\*\*  
Ha, Sang-Su      Yoon, Joon-Sun

### Abstract

The objective of this study was to propose a development length equation for bottom and top GFRP bars. Including the bottom and top GRPP bars, a total of 104 modified pullout tests were completed. The test variables were embedment length (15, 30, 45db), net cover thickness (0.5~2.0db), different GFRP bar types, and bar diameters (10, 13, 16mm). The average bond stresses were determined based on the modified pullout test results. Two variable linear regression analyses were performed on the results of the average bond stresses. Utilizing the 5% fractile concept, a conservative development length design equation was derived. The design equation of the development length for bottom and top GFRP bars was proposed and the design equation derived in this study was compared to the ACI 440.1R-06 committee equation.

Keywords : GFRP bar, development length, modified pullout test, two variable linear regression analysis

### 1. 서 론

유리섬유보강폴리머(Glass Fiber Reinforced Polymer, 이하 GFRP) 보강근은 인장강도, 내부식성, 비자기성 등 우수한 재료적 특성을 가지며, 철근에 비해 약 1/5정도 가볍기 때문에 시공성이 우수하여 향후 철근을 대체할 수 있는 건설 재료로 여겨진다.

이러한 재료적 장점으로 인하여 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.<sup>1)~6)</sup> 우리나라에서도 FRP 보강근에 대한 연구와 관심이 높아지고 있으며 학회를 중심으로 여러 연구자들이 FRP 보강근의 시공 및 설계지침을 제시하기 위해 노력하고 있다. 정착길이 설계식은 ACI 440 Committee<sup>1),2)</sup>, JSCE<sup>3)</sup>, JCI<sup>4)</sup>, ISIS Canada<sup>5)</sup>, CAN/CSA S806-02<sup>6)</sup>에서 제안하고 있다.

본 연구에서는 수정인발실험을 통해 GFRP 보강근의 부착 특성 및 거동을 실험적으로 고찰하고, 실험결과를 토대로 하부근 GFRP 보강근과 상부근 GFRP 보강근의 정착길이 설계식을 각각 제안하고, 상부근과 하부근의 정착길이를 비교하였다. 또한, 국외

의 정착길이 설계식 중 ACI 440.1R-06 기준과 비교하였다. 정착길이 설계식은 2변수 선형 회귀분석을 통해 제안하였으며, 쪼갬파괴가 발생된 실험체를 대상으로 하였다.

### 2. 실험계획

#### 2.1 재료 물성파악

본 연구에서 사용된 보강근은 그림 1. 에 나타난 바와 같이 3종류의 보강근을 사용하였다. K2KR과 K3KR은 우리나라에서 개발된 보강근이며, 그림 1 (c)의 AsUS<sup>7),8)</sup>는 현재 해외에서 상용화되고 있는 보강근이다. 그림 1. 에서 K2KR은 콘크리트와 보강근 간 부착을 향상시키기 위하여 별도의 코팅재료를 사용하였고, K3KR 및 AsUS는 나선형 형태로 마디를 제작한 것이다. GFRP 보강근의 재료적 물성을 파악하기 위하여 그림 2.에 나타난 바와 같이 1,200kN 용량의 만능시험기를 이용하여 인장시험을 실시하였다.



(a) K2KR                      (b) K3KR                      (c) AsUS

그림 1. GFRP 보강근 형상

\* 강남대학교 건축공학과, 전임교수, 공학박사  
(knuhss@kangnam.ac.kr)

\*\* 강남대학교 건축공학과, 부교수, 공학박사, 시공기술사  
(jsyun@kangnam.ac.kr)

인장시험편은 CAN/CSA S8066)에 따라서 시험 그립(이하 CSA 그립)을 제작하였으며, CSA 그립은 GFRP 보강근을 강재 튜브 안에 넣고 접착제(H사, RE500)를 주입하였다. 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 GFRP 보강근이 인장파괴되는 것이 확인된 경우의 시험결과만을 사용하였다. 인장시험 결과와 ACI 440.1R-06<sup>1)</sup>에서 제안하고 있는 GFRP 보강근의 재료적 물성을 표 1.에 비교하여 나타내었다. 표 1.에서 극한강도는 재료시험결과 값이며, 설계인장강도는 극한강도에 환경저감계수 0.7을 곱한 값이다. 탄성계수와 극한 변형률은 보강근에 부착한 변형계이지(그림 2(b) 참조)로 측정된 값을 근거로 한 것이다.

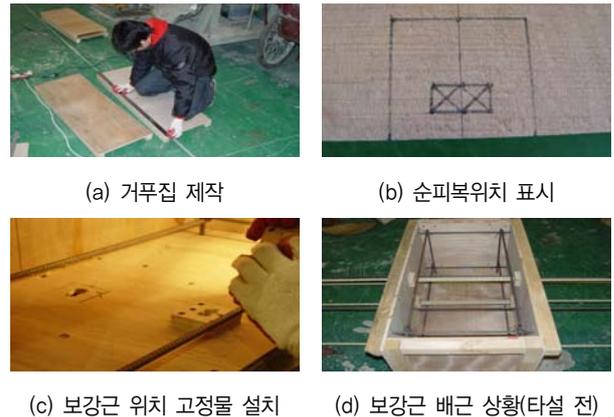
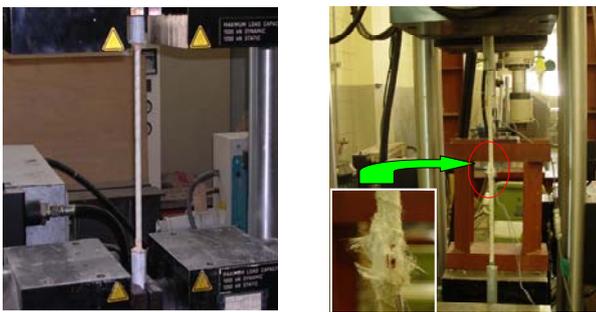


그림 3. 실험체 제작



(a) CSA 그립 (b) 파괴상황

그림 2. GFRP 보강근의 인장시험

표 1. 인장시험 결과 및 GFRP 보강근의 재료물성

재료특성)	ACI 440	this study				
		AsUS D13	K2KR D13	K3KR		
				D10	D13	D16
극한강도 $f_{fu}^*$ , (MPa)	483-1,600	—	989	1,178	1,059	1,045
설계인장강도 $f_{fu}$ , (MPa)	—	690	692	825	741	732
탄성계수, (GPa)	35.0-51.0	40.8	37.2	49.9	49.3	45.0
극한변형률, (%)	1.2-3.1	1.69	1.86	—	1.5	—
단면적, (mm <sup>2</sup> )	—	145	113	78.5	127	201

Note : 설계 인장강도 (ffu) = 극한강도 (ffu\*) x 환경저감계수(0.7)

## 2.2 실험계획

실험변수는 보강근 위치(B or T), 문힘길이(L), 순피복두께(c), 보강근 지름( $d_b$ )을 변수로 하여 하부근과 상부근 각각 52개씩 총 104개의 수정인발실험을 계획하였다. 문힘길이는  $15 d_b$ ,  $30 d_b$ ,  $45 d_b$  이며, 순피복두께는  $0.5 d_b$ ,  $1.0 d_b$ ,  $1.5 d_b$ ,  $2.0 d_b$  이다. K2KR, AsUS는 D13 만을 사용하였고, K3KR은 3종류의 지름(D10, D13, D16)을 사용하였다.

수정인발실험에서 실험변수는 보강근의 부착특성 및 정착길이에 큰 영향을 주기 때문에 실험체 제작시 주의를 기울이면서 정밀하게 제작하였다. 특히, 순피복두께는 보강근 배근시와 타설시 위치가 바뀌지 않도록 하였다(그림 3 (b), (c)참조).

실험체는 그림 3(d)와 같이 직육면체 형태의 콘크리트 안에 문힘길이만큼 GFRP 보강근을 겹침이음하였으며, 부착강도를 안전측으로 평가하기 위하여 겹치이음된 위치에서 횡보강근은 설치하지 않았다. 하부근은 콘크리트 바닥면으로부터 100mm 높이 위치에 수평방향으로 배근되어 있으며, 상부근은 바닥면으로부터 300mm에 위치하고 있다. 일반적으로 보강근이 수평방향으로 설치되고 하부에 300mm 이상의 콘크리트가 있는 경우에는 굳지 않은 콘크리트의 침하로 인하여 콘크리트와 보강근 간 부착강도가 감소하게 된다. 그러므로 콘크리트구조설계기준에서는 이형철근의 경우 상부근의 부착강도가 낮은 것을 고려하여 정착길이를 130%로 수정하도록 정하고 있다. 표 2.에 동일한 실험변수를 갖는 하부근과 상부근의 실험체를 나타내고 있으며, 파괴모드와 평균부착강도 등 실험결과도 같이 나타내었다. 콘크리트 강도는 28MPa로 계획하였으며, 실험당시 콘크리트 강도는 32.1MPa 및 35.5MPa로 나타났다.

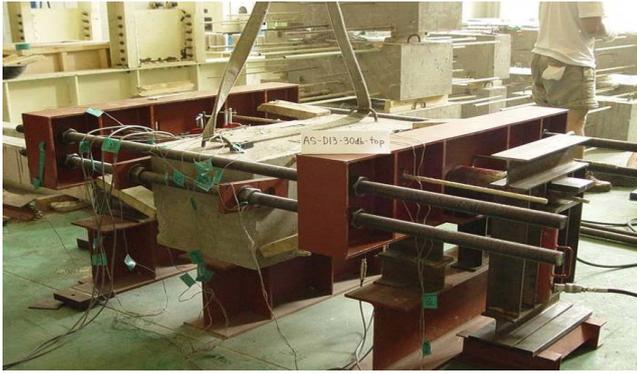
## 2.3 수정인발실험

실험체 설치상황은 그림 4,와 같다. 그림 4.에 나타난 바와 같이 보강근이 배근된 콘크리트 블록은 강재 프레임과 강봉으로 고정되어 있고, 보강근은 양 옆으로 강재 프레임 웨브를 관통하여 외부로 돌출되어 있다. 돌출된 보강근에 중공식 유압 실린더를 끼우고, 중공식 유압 실린더를 관통하는 보강근 양 단부에는 ASTM 그립을 사용하여 그림 4(c)와 같이 추가로 ASTM 그립에 일정한 압축력을 가력하여 그림 부분에서 미끄러짐이 발생되지 않도록 계획하였다. 일반적으로 인발실험(pullout test)에서는 보강근이 배근되어 있는 콘크리트 면에 직접 중공식 유압 실린더를 설치하므로 가력 시 콘크리트에 작용하는 반력(압축력)으로 인하여, 콘크리트 인장 균열의 발생을 억제하고, 이에 따라서부착응력이 실제보다 높게 평가되어 비보수적인 실험결과를 초래하게 되지만, 본 연구에서는 유압 실린더가 콘크리트 면과 직접 접촉하지 않는 상태에서 순수한 인발력의 가력이 가능하기 때문에 실제와 동일한 인장균열이 발생되고 합리적인 실험결과를 기대할 수 있다.

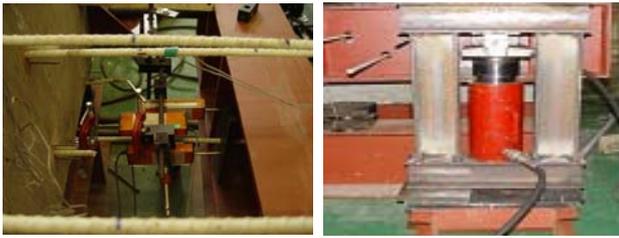
표 2. 실험체 일람 및 실험결과

No.	Specimen index1)	d <sub>b</sub>	A	L	P <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>max</sub> (MPa)	u (MPa)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Failure mode	No.	Specimen index1)	P <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>max</sub> (MPa)	u (MPa)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Failure mode
1	K3(B)-D10-L15-c0,5	10,0	78,5	150	24,97	318,09	5,30	32,1	S	1	K3(T)-D10-L15-c0,5	17,81	226,88	3,78	32,1	S
2	K3(B)-D10-L15-c1,0	10,0	78,5	150	25,29	322,17	5,37	32,1	ditto	2	K3(T)-D10-L15-c1,0	19,88	253,25	4,22	32,1	ditto
3	K3(B)-D10-L15-c1,5	10,0	78,5	150	27,59	351,46	5,86	32,1	ditto	3	K3(T)-D10-L15-c1,5	22,43	285,73	4,76	32,1	ditto
4	K3(B)-D10-L15-c2,0	10,0	78,5	150	35,39	450,83	7,51	32,1	ditto	4	K3(T)-D10-L15-c2,0	25,45	324,20	5,40	32,1	ditto
5	K3(B)-D10-L30-c0,5	10,0	78,5	300	34,04	433,63	3,61	32,1	ditto	5	K3(T)-D10-L30-c0,5	21,87	278,60	2,32	32,1	ditto
6	K3(B)-D10-L30-c1,0	10,0	78,5	300	36,82	469,04	3,91	32,1	ditto	6	K3(T)-D10-L30-c1,0	36,74	468,03	3,90	32,1	ditto
7	K3(B)-D10-L30-c1,5	10,0	78,5	300	48,67	620,00	5,17	32,1	ditto	7	K3(T)-D10-L30-c1,5	38,17	486,24	4,05	32,1	ditto
8	K3(B)-D10-L30-c2,0	10,0	78,5	300	51,05	650,32	5,42	32,1	ditto	8	K3(T)-D10-L30-c2,0	45,8	583,44	4,86	32,1	ditto
9	K3(B)-D10-L45-c0,5	10,0	78,5	450	39,44	502,42	2,79	32,1	ditto	9	K3(T)-D10-L45-c0,5	31,01	395,03	2,19	32,1	ditto
10	K3(B)-D10-L45-c1,0	10,0	78,5	450	46,52	592,61	3,29	32,1	ditto	10	K3(T)-D10-L45-c1,0	40,24	512,61	2,85	32,1	F
11	K3(B)-D10-L45-c1,5	10,0	78,5	450	48,35	615,92	3,42	32,1	F	11	K3(T)-D10-L45-c1,5	62,35	794,27	4,41	32,1	ditto
12	K3(B)-D10-L45-c2,0	10,0	78,5	450	56,62	721,27	4,01	32,1	ditto	12	K3(T)-D10-L45-c2,0	54,08	688,92	3,83	32,1	ditto
13	AS(B)-D13-L15-c0,5	12,7	145	195	24,81	171,10	3,19	32,1	S	13	AS(T)-D13-L15-c0,5	20,36	140,41	2,62	32,1	ditto
14	AS(B)-D13-L15-c1,0	12,7	145	195	35,63	245,72	4,58	32,1	ditto	14	AS(T)-D13-L15-c1,0	24,17	166,69	3,11	32,1	ditto
15	AS(B)-D13-L30-c0,5	12,7	145	390	56,62	390,48	3,64	32,1	ditto	15	AS(T)-D13-L30-c0,5	38,17	263,24	2,45	32,1	S
16	AS(B)-D13-L30-c1,0	12,7	145	390	64,25	443,10	4,13	32,1	ditto	16	AS(T)-D13-L30-c1,0	48,35	333,45	3,11	32,1	ditto
17	K3(B)-D13-L15-c0,5	12,7	127	195	36,26	286,39	4,66	32,1	ditto	17	K3(T)-D13-L15-c0,5	22,27	175,89	2,86	32,1	F
18	K3(B)-D13-L15-c1,0	12,7	127	195	52,80	417,02	6,79	32,1	ditto	18	K3(T)-D13-L15-c1,0	40,72	321,61	5,24	32,1	S
19	K3(B)-D13-L15-c1,5	12,7	127	195	61,84	488,39	7,95	32,1	ditto	19	K3(T)-D13-L15-c1,5	43,26	341,67	5,56	32,1	F
20	K3(B)-D13-L15-c2,0	12,7	127	195	78,89	623,08	10,15	32,1	F	20	K3(T)-D13-L15-c2,0	49,62	391,90	6,38	32,1	ditto
21	K3(B)-D13-L30-c0,5	12,7	127	390	59,16	467,25	3,80	32,1	S	21	K3(T)-D13-L30-c0,5	45,17	356,76	2,90	32,1	S
22	K3(B)-D13-L30-c1,0	12,7	127	390	64,25	507,45	4,13	32,1	ditto	22	K3(T)-D13-L30-c1,0	57,89	457,22	3,72	32,1	ditto
23	K3(B)-D13-L30-c1,5	12,7	127	390	88,67	700,32	5,70	35,5	ditto	23	K3(T)-D13-L30-c1,5	66,88	528,23	4,30	32,1	ditto
24	K3(B)-D13-L30-c2,0	12,7	127	390	91,77	724,81	5,90	35,5	ditto	24	K3(T)-D13-L30-c2,0	83,98	663,28	5,40	32,1	F
25	K3(B)-D13-L45-c0,5	12,7	127	585	64,81	511,88	2,78	32,1	ditto	25	K3(T)-D13-L45-c0,5	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	F	26	K3(T)-D13-L45-c1,0	76,26	602,31	3,27	32,1	S
27	K3(B)-D13-L45-c1,5	12,7	127	585	81,43	643,14	3,49	32,1	ditto	27	K3(T)-D13-L45-c1,5	86,52	683,34	3,71	32,1	F
28	K3(B)-D13-L45-c2,0	12,7	127	585	89,06	703,41	3,82	32,1	ditto	28	K3(T)-D13-L45-c2,0	84,61	668,26	3,63	32,1	ditto
29	K2(B)-D13-L15-c0,5	12,7	113	195	47,07	416,64	6,05	32,1	S	29	K2(T)-D13-L15-c0,5	48,99	433,54	6,30	32,1	ditto
30	K2(B)-D13-L15-c1,0	12,7	113	195	59,16	523,54	7,61	32,1	ditto	30	K2(T)-D13-L15-c1,0	48,99	433,54	6,30	32,1	ditto
31	K2(B)-D13-L15-c1,5	12,7	113	195	75,07	664,34	9,65	32,1	ditto	31	K2(T)-D13-L15-c1,5	60,44	534,87	7,77	32,1	S
32	K2(B)-D13-L15-c2,0	12,7	113	195	78,89	698,14	10,15	32,1	ditto	32	K2(T)-D13-L15-c2,0	53,44	472,92	6,87	32,1	F
33	K2(B)-D13-L30-c0,5	12,7	113	390	68,07	602,39	4,38	32,1	ditto	33	K2(T)-D13-L30-c0,5	55,98	495,40	3,60	32,1	S
34	K2(B)-D13-L30-c1,0	12,7	113	390	79,52	703,72	5,11	32,1	ditto	34	K2(T)-D13-L30-c1,0	64,25	568,58	4,13	32,1	ditto
35	K2(B)-D13-L30-c1,5	12,7	113	390	86,52	765,66	5,56	32,1	ditto	35	K2(T)-D13-L30-c1,5	66,8	591,15	4,30	32,1	F
36	K2(B)-D13-L30-c2,0	12,7	113	390	87,79	776,90	5,64	32,1	F	36	K2(T)-D13-L30-c2,0	94,79	838,85	6,09	32,1	ditto
37	K2(B)-D13-L45-c0,5	12,7	113	585	83,34	737,52	3,57	32,1	S	37	K2(T)-D13-L45-c0,5	69,34	613,63	2,97	32,1	S
38	K2(B)-D13-L45-c1,0	12,7	113	585	96,06	850,09	4,12	32,1	ditto	38	K2(T)-D13-L45-c1,0	73,8	653,10	3,16	32,1	ditto
39	K2(B)-D13-L45-c1,5	12,7	113	585	82,06	726,19	3,52	32,1	F	39	K2(T)-D13-L45-c1,5	94,15	833,19	4,04	32,1	ditto
40	K2(B)-D13-L45-c2,0	12,7	113	585	83,98	743,19	3,60	32,1	ditto	40	K2(T)-D13-L45-c2,0	89,7	793,81	3,85	32,1	F
41	K3(B)-D16-L15-c0,5	16,0	201	240	59,80	297,57	4,96	35,5	S	41	K3(T)-D16-L15-c0,5	38,81	193,12	3,22	35,5	ditto
42	K3(B)-D16-L15-c1,0	16,0	201	240	67,43	335,54	5,59	35,5	ditto	42	K3(T)-D16-L15-c1,0	55,35	275,43	4,59	35,5	S
43	K3(B)-D16-L15-c1,5	16,0	201	240	73,57	366,11	6,10	35,5	ditto	43	K3(T)-D16-L15-c1,5	73,07	363,60	6,06	35,5	ditto
44	K3(B)-D16-L15-c2,0	16,0	201	240	78,92	392,71	6,55	35,5	ditto	44	K3(T)-D16-L15-c2,0	85,17	423,82	7,06	35,5	ditto
45	K3(B)-D16-L30-c0,5	16,0	201	480	92,25	459,05	3,83	35,5	ditto	45	K3(T)-D16-L30-c0,5	80,95	402,82	3,36	35,5	ditto
46	K3(B)-D16-L30-c1,0	16,0	201	480	129,78	645,80	5,38	35,5	ditto	46	K3(T)-D16-L30-c1,0	118,95	591,91	4,93	35,5	ditto
47	K3(B)-D16-L30-c1,5	16,0	201	480	146,23	727,66	6,06	35,5	ditto	47	K3(T)-D16-L30-c1,5	130,18	647,79	5,40	35,5	ditto
48	K3(B)-D16-L30-c2,0	16,0	201	480	158,12	786,82	6,56	35,5	ditto	48	K3(T)-D16-L30-c2,0	167,5	833,50	6,95	35,5	F
49	K3(B)-D16-L45-c0,5	16,0	201	720	110,22	548,47	3,05	35,5	ditto	49	K3(T)-D16-L45-c0,5	94,23	468,90	2,60	35,5	S
50	K3(B)-D16-L45-c1,0	16,0	201	720	126,44	629,18	3,50	35,5	ditto	50	K3(T)-D16-L45-c1,0	112,68	560,71	3,12	35,5	ditto
51	K3(B)-D16-L45-c1,5	16,0	201	720	153,56	764,13	4,25	35,5	ditto	51	K3(T)-D16-L45-c1,5	135,66	675,06	3,75	35,5	ditto
52	K3(B)-D16-L45-c2,0	16,0	201	720	175,19	871,77	4,84	35,5	ditto	52	K3(T)-D16-L45-c2,0	146,48	728,90	4,05	35,5	F

Note 1, specimen index: K2(T)-D13-L15-c0,5, K2 = K2KR, (B) = 하부근, (T) = 상부근, D13 = 지름 13mm, L15 = 묻힘길이가 지름의 15배(15d<sub>b</sub>), c0,5 = 순회복두께로서 지름의 0,5배(0,5d<sub>b</sub>), u = 평균부착강도, failure moed, S=쪼갸파괴, F=보강근 파단



(a) 실험체 설치상황



(b) 변위계 위치 (c) 축력가력(미끄럼 방지)

그림 4. 실험체 설치

그림 4.에 나타난 실험방법을 본 연구에서는 수정인발실험(modified pullout test)으로 칭하였다.<sup>12),13)</sup>

실험이 진행되는 동안 인발하중(P)의 증가에 따른 콘크리트에 대한 보강근의 미끄러짐을 결정하기 위하여 보강근의 하중단(loaded end)과 자유단(free end)에 각각 2개 및 1개(그림 4 (b) 참조)의 변위계(LVDT)를 설치하였다. 보강근의 탄성변형률을 확인하기 위하여 콘크리트 표면으로부터 150mm 위치에 변형률계 이지 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. 실험결과

#### 3.1 파괴형태

실험체 파괴는 크게 콘크리트 쪼갬파괴와 보강근 인장파괴 두 가지로 나타났다. 쪼갬파괴는 피복두께가 작거나 또는 인접 보강근 사이의 거리가 작을 때 주로 발생하는 파괴 형태로서 순피복두께를 0.5~2.0  $d_b$ 로 제한한 본 연구에서는 대부분의 나타나는 파괴형상이다. 그림 5.에 나타난 바와 같이 쪼갬파괴는 보강근 감싸고 있던 콘크리트 피복이 완전히 분리되었으며, 쪼갬파괴가 발생되지 전까지 자유단의 변위는 발생하지 않고, 하중단에서는 탄성변형에 의한 변위만 발생하는 것으로 나타났다.



(a) 하부근 실험체 (b) 상부근 실험체

그림 5. 쪼갬 파괴 상황

보강근 인장파괴는 그림 6.에 나타난 바와 같이 보강근 종류에 따라서 약간씩 서로 다른 양상을 보였다. K2KR은 GFRP 표면의 부착강도 증진을 위한 코팅재료가 일부 탈락한 후 이어서 섬유 필라멘트가 서로 분리되면서 최종적으로 파괴되었다. K3KR은 ASTM 그림으로 감싸여진 나선형의 마디가 손상된 후 파단되었으며, AsUS는 섬유 필라멘트가 각각 분리되면서 파단되었다. 각 실험체의 최대 인발하중( $P_{max}$ ), 최대 응력( $\sigma_{max}$ ), 평균부착강도( $u$ ) 등의 실험결과를 표 2.에 요약하여 나타내었다.



(a) K2KR (b) K3KR (c) AsUS

그림 6. 보강근 인장파괴

#### 3.2 하중-변위 곡선

##### 1) 자유단(free end)의 하중-변위 곡선

보강근 자유단에서의 변위는 발생되지 않았다. 그림 7.은 D13 K3KR 보강근을 보강근 지름의 15배로 묶은 경우이고, 순피복두께를 0.5 $d_b$ ~2.0 $d_b$ 로 변화시킨 시험체의 하중-변위 곡선을 비교하여 나타난 것이다.

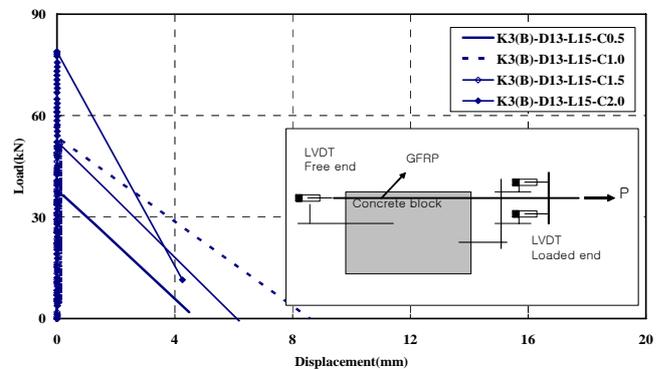


그림 7. 자유단(free end)에서의 하중-변위 곡선

그림 7.에서와 같이 최대하중에 도달될 때까지 변위는 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 그래프 양상은 상부근과 하부

근, 파괴양상관계(조갠파괴, 보강근인장파괴) 없이 모든 실험체에서 동일하게 나타났다.

2) 하중단(loaded end)의 하중-변위 곡선

그림 8.에 하중단에서 측정한 하중-변위 곡선을 나타내었다. 그림 8.에 나타낸 4개의 실험결과는 D13 K3KR 보강근을 지름의 15배로 묻은 경우이고, 순피복두께가 1.0d<sub>b</sub>인 상부근과 하부근에 대한 것이다. 그림에서와 같이 하중단에서는 가력의 증가에 따라서 변위가 선형으로 증가하는 양상을 보였으며 최대하중에 도달한 후 갑작스런 하중 감소를 보이며 최종적으로 파괴되었다.

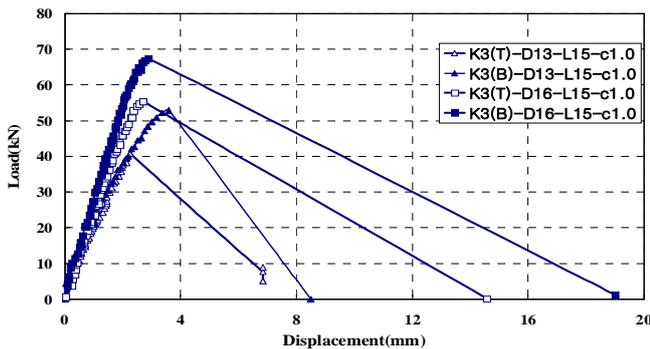


그림 8. 하중단(loaded end)에서의 하중-변위 곡선

식 (2)와 (3)에서 R<sup>2</sup>으로 표시된 결정계수(coefficient of determination)는 하부근과 상부근이 각각 0.74, 0.75로 유사하게 나타났다. 결정계수는 회귀분석에 의해 예측된 평면(예측값)과 실험값(실제값) 사이의 신뢰정도를 나타내는 계수로서 결정계수가 1.0인 경우 예측값과 실험값이 100% 일치하는 것을 의미한다. 그림 9.는 회귀분석(하부근)에 의한 예측 평면이며 점으로 표시된 부분은 실험값으로서 예측 평면과 실험값 사이의 오차를 시각적으로 보여주고 있다.

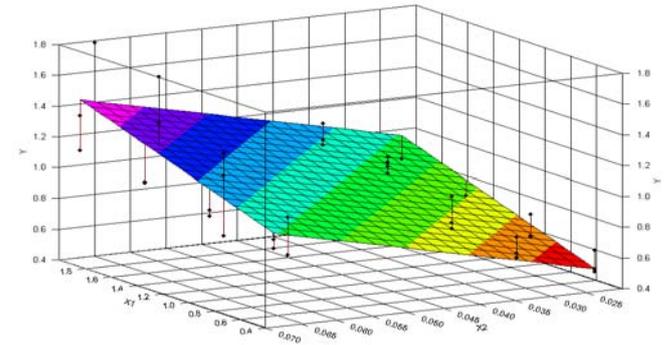


그림 9. 회귀분석 결과에 의한 예측값과 실험값 오차

4. 정착길이 설계식

4.1 2변수 선형회귀분석에 의한 설계식 제안

2변수 선형회귀분석은 식 (1)과 같이 콘크리트 압축강도를 무차원화시킨 평균부착강도를 종속변수( $u_{calc.}/\sqrt{f_{ck}}$ )로 하고, 피복두께 및 묻힘길이( $c/d_b, d_b/L$ )를 독립변수로 결정한다. 종속변수와 독립변수는 ACI 440 Committee<sup>1)</sup>와 비교하기 위하여 동일한 기본식을 채택하여 회귀분석을 실시하였다.

$$\frac{u_{calc.}}{\sqrt{f_{ck}}} = a_1 + a_2 \frac{c}{d_b} + a_3 \frac{d_b}{L} \quad (1)$$

여기서,  $u_{calc.}$  : 예측 평균부착강도,  $c$  : 피복두께,  $d_b$  : 보강근 지름,  $L$  : 묻힘길이이다.

회귀분석 대상 실험체는 표 2.에 나타나 있는 하부근과 상부근 중에서 조갠파괴가 발생된 하부근 43개 실험체와 상부근 31개 실험체를 대상으로 하였다. 회귀분석 결과 식 (2)와 식 (3)과 같이 하부근과 상부근에 대한 각각의 회귀분석식을 얻었다.

$$\frac{u_{calc.}}{\sqrt{f_{ck}}} = 0.135 + 0.302 \frac{c}{d_b} + 10.295 \frac{d_b}{L_s}, R^2 = 0.74 \text{ (하부근)} \quad (2)$$

$$\frac{u_{calc.}}{\sqrt{f_{ck}}} = 0.177 + 0.272 \frac{c}{d_b} + 6.338 \frac{d_b}{L_s}, R^2 = 0.75 \text{ (상부근)} \quad (3)$$

또한, 식 (2)와 (3)에 대해 실제값에 대한 예측값의 신뢰도를 안전측으로 확보하기 위해 5% 분위수(5% fractile) 개념을 사용할 수 있다.<sup>16)</sup> 5% 분위수란 실제값이 예측값을 초과할 확률 95%에 대한 90%의 신뢰도를 뜻한다. 2변수 선형회귀분석으로부터 결정한 5% 분위수 계수값은 하부근과 상부근 각각 0.72와 0.73으로 결정되어 식 (2)와 (3)은 각각 식 (4)와 (5)와 같이 보수적으로 평균부착강도를 산정하였다.

$$u_{design} = [0.72(0.135 + 0.302 \frac{c}{d_b} + 10.295 \frac{d_b}{L})] \sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

$$u_{design} = [0.73(0.177 + 0.272 \frac{c}{d_b} + 6.338 \frac{d_b}{L})] \sqrt{f_{ck}} \quad (5)$$

한편 일반적인 정착식은  $L = (d_b f_s) / 4u$ 로 나타낼 수 있으므로 식 (4)와 (5)를 이 식에 적용하면 식 (6)과 식 (7)을 구할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 하부근과 상부근에 대한 GFRP 보강근의 정착길이 설계식은 각각 식 (6)과 식 (7)로 제안하였다.

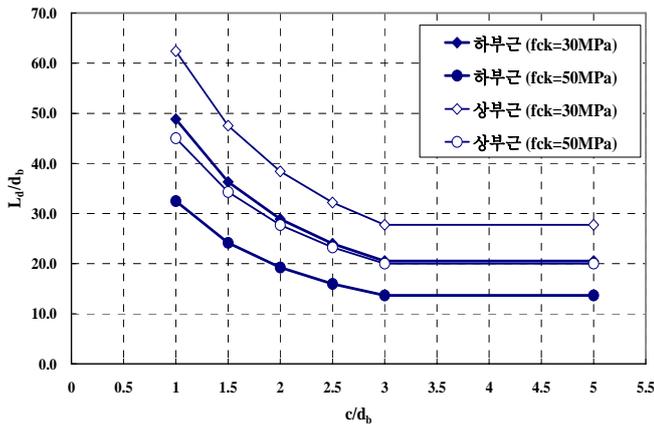
$$L_d = \left( \frac{1.15 f_{fu} - 34.2}{\sqrt{f_{ck}} \left( 0.45 + \frac{c}{d_b} \right)} \right) d_b \text{ 하부근 정착길이 설계식} \quad (6)$$

$$L_d = \left( \frac{1.35f_{fu} - 23.4}{\sqrt{f_{ck}} + \frac{c}{d_b}} \right) d_b \quad \text{상부근 정착길이 설계식} \quad (7)$$

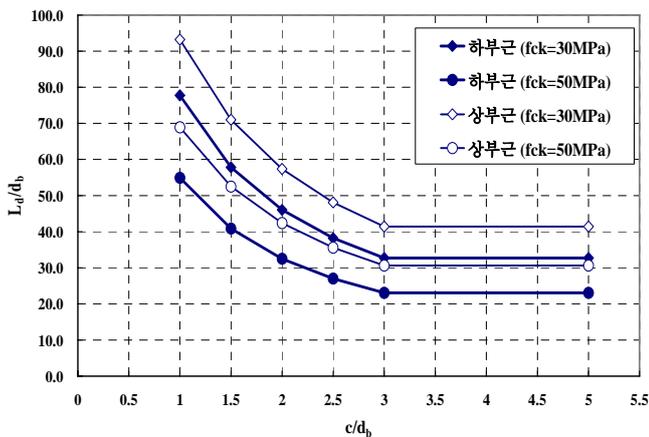
여기서,  $L_d$  = GFRP 보강근의 정착길이(mm),  $\alpha$  = 상부근 수계수,  $f_{fu}$  : 보강근의 설계인장강도(MPa),  $f_{ck}$  = 콘크리트 설계기준강도(MPa),  $c$  : 순피복두께(mm),  $d_b$  : 보강근 지름

**4.2 GFRP 하부근과 상부근의 정착길이 산정식 비교**

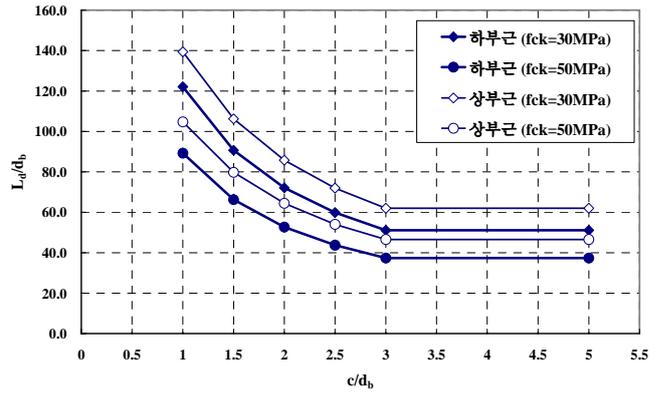
본 연구에서 제안한 GFRP 하부근과 상부근의 정착길이 설계식을 비교하였다. 제안된 식 (6)과 (7)에서 알 수 있듯이 보강근의 설계인장강도와 콘크리트 압축강도 등 사용재료에 따라 달라지므로 그림10.에 나타난 바와 같이 보강근의 설계인장강도(500MPa, 700MPa, 1,000MPa)와 콘크리트 압축강도(30MPa와 50MPa)를 변수로 하여 각각 비교하였다.



(a) 보강근 설계인장강도가 500MPa 일때



(b) 보강근 설계인장강도가 700MPa 일때



(c) 보강근 설계인장강도가 1,000MPa 일때

그림 10. GFRP 하부근과 상부근의 정착길이 설계식 비교

표 3. 하부근과 상부근의 정착길이 설계식 비교

ffu (MPa)	f <sub>ck</sub> (MPa)	c/d <sub>b</sub>	하부근 식 (6) (L <sub>d</sub> /d <sub>b</sub> )	상부근 식 (7) (L <sub>d</sub> /d <sub>b</sub> )	식 (7) 식 (6)		
500	30	0.5	48.8	62.4	1.28		
		1.0	36.3	47.5	1.31		
		1.5	28.9	38.4	1.33		
		2.0	24.0	32.2	1.34		
		3.0	20.5	27.7	1.35		
		50	0.5	32.5	45.0	1.39	
	50	1.0	24.2	34.3	1.42		
		1.5	19.2	27.7	1.44		
		2.0	16.0	23.4	1.46		
		3.0	13.7	20.0	1.47		
		700	30	0.5	77.8	93.1	1.20
				1.0	57.8	71.0	1.23
1.5	46.0			57.4	1.25		
2.0	38.2			48.1	1.26		
50	3.0		32.7	41.4	1.27		
	0.5		54.9	68.9	1.25		
1000	30	1.0	40.8	52.5	1.29		
		1.5	32.5	42.4	1.30		
		2.0	27.0	35.6	1.32		
		3.0	23.1	30.6	1.33		
		50	0.5	122.1	139.4	1.14	
			1.0	90.6	106.2	1.17	
	1.5		72.1	85.8	1.19		
	2.0		59.8	72.0	1.20		
	50	3.0	51.1	62.0	1.21		
		0.5	89.3	104.7	1.17		
1.0		66.3	79.8	1.20			
1.5		52.7	64.4	1.22			
50	2.0	43.7	54.0	1.24			
	3.0	37.4	46.5	1.25			

그림 10.에 나타난 바와 같이 정착길이(L<sub>d</sub>)는 일반적으로 알고 있듯이 피복두께(c)가 증가할수록 감소하고, 콘크리트 압축강도가 증가할수록 상대적으로 정착길이가 작아지는 경향을 알 수 있다. 또한, 하부근에 비해 상부근의 정착길이가 높게 요구됨을 알 수 있다. ACI 440.1R-03과 06에서는 상부근의 정착길이를 보다 안

전하게 평가하기 위하여 각각 1,3과 1,5의 수정계수를 적용하고 있다.

본 연구에서 하부근에 대한 상부근의 정착길이 비는 1.14 ( $f_{fu} = 1,000MPa, f_{ck} = 30MPa$ ) ~ 1.47 ( $f_{fu} = 500MPa, f_{ck} = 50MPa$ )로 나타나 사용재료와 피복두께에 따라 다르게 나타났다. 그림 10.에 대한 비교값을 정리하여 표 3.에 나타내었다.

### 4.3 제안식과 기준식(ACI 440.1R-06)의 비교

ACI 440 Committee1)에서 제안하고 있는 정착길이 산정식은 식 (8)과 같다.

$$L_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0.083\sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (8)$$

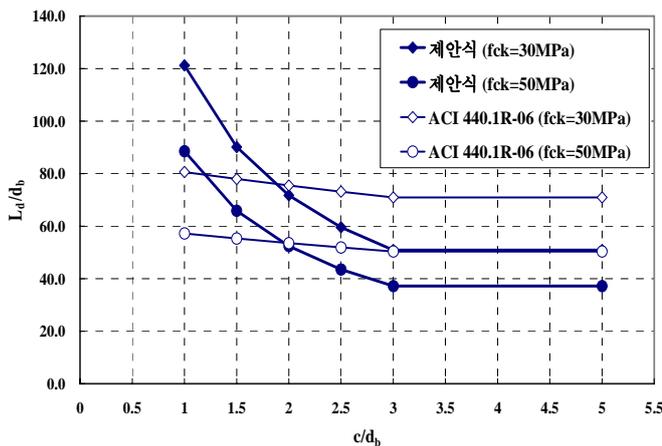
여기서,

$$f_{fr} = \min[f_{fu}, f_f, f_{fe}]$$

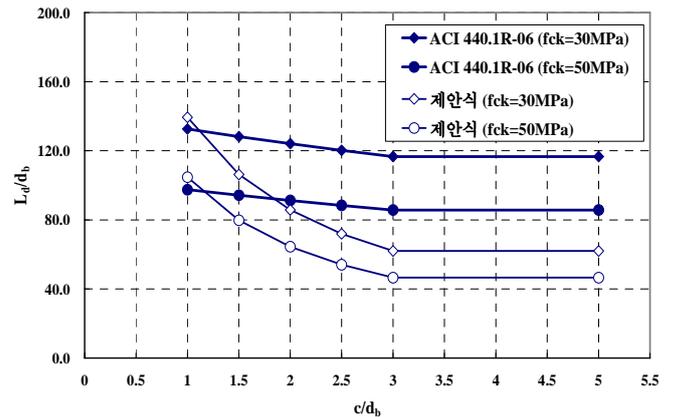
$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \right) \leq f_{fu}$$

$$f_{fe} = \frac{0.083\sqrt{f'_c}}{\alpha} \left( 13.6 \frac{L_c}{d_b} + \frac{C}{d_b} \frac{L_c}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu}$$

여기서,  $\alpha$ 는 상부근 효과(=1.5),  $C$ 는 보강근 중심까지의 피복두께이다. 본 연구에서 제안한 식 (6) 및 (7)과 ACI 440.1R-06의 식 (8)을 그림 11.에 비교하여 나타내었다.



(a) 하부근 GFRP



(b) 상부근 GFRP

그림 11. 제안식과 기준식(ACI 440.1R-06) 비교

비교 결과, 제안식은 피복두께에 따라 정착길이가 큰 폭으로 감소하는 반면, ACI 440.1R-06에서는 그 감소폭이 크지 않은 것을 확인 할 수 있다. 또한, 하부근에 대해서 순피복두께가 2.0 d<sub>b</sub> 미만인 GFRP 하부근 제안식이 기준식보다 더 큰 정착길이를 필요로 하므로 보수적인 설계가 가능하며, 2.0 d<sub>b</sub>를 초과한 경우에는 반대로 작은 정착길이를 필요로 하므로 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다. 상부근에 대해서는 순피복두께가 1.0 d<sub>b</sub>를 기준으로 보수적인 설계와 경제적인 설계가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 하부근 GFRP 보강근과 상부근 GFRP 보강근의 부착특성을 파악하고, 각각의 보강근에 대한 정착길이 설계식을 제안하기 위해 수정인발 실험을 수행하였으며, 2변수 회귀분석에 의한 설계식을 제안하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 변수(문힘길이, 순피복두께, 보강근 지름, 상부근 효과 등)에 따른 수정인발실험 결과, 부착강도는 문힘길이 증가할수록 감소하고, 순피복두께가 증가할수록 비례관계에 있음을 알 수 있다.
- 2) 콘크리트 쪼갠파괴가 발생한 실험체를 대상으로 2변수 선형 회귀분석을 실시하여, 하부근과 상부근에 대한 정착길이 설계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$L_d = \left( \frac{1.15f_{fu} - 34.2}{\sqrt{f_{ck}}} \right) d_b \quad \text{하부근 정착길이 설계식}$$

$$L_d = \left[ \frac{1.35f_{fu} - 23.4}{\sqrt{f_{ck}}} - 0.60 + \frac{c}{d_b} \right] d_b \text{ 상부근 정착길이 설계식}$$

- 3) 본 연구에서 제안된 하부근과 상부근 정착길이( $L_d$ ) 설계식 비교에서, 일반적으로 알고 있듯이 피복두께( $c$ )가 증가할수록 감소하고, 콘크리트 압축강도가 증가할수록 상대적으로 정착길이가 작아지는 경향을 알 수 있다. 또한, 보강근의 설계인장강도와 콘크리트 압축강도등 사용재료에 따라 다르게 나타났지만, 하부근에 비해 상부근의 정착길이가 더 많이 요구(1.14~1.47) 됨을 알 수 있다.
- 4) 제안식과 기준식(ACI 440.1R-06)비교에서, 제안식은 피복두께에 따라 정착길이가 큰 폭으로 감소하는 반면, 기준식에서는 그 감소폭이 크지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 제안식이 기준식에 비해 순 피복두께에 따라 보수적인 설계(하부근 : 순피복두께가 2.0  $d_b$  미만, 상부근 : 순피복두께가 1.0  $d_b$  미만)와 경제적인 설계(하부근 : 순피복두께가 2.0  $d_b$  이상, 상부근 : 순피복두께가 1.0  $d_b$  이상)가 가능하기 때문에 보다 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

**참 고 문 헌**

1. 박찬기, 원종필, 강주원, 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 내구성 설계를 위한 환경영향계수의 제안, 콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 제16권 제4호, pp.529~539, 2004
2. 유영찬, 박지선, 유영준, 박영환, GFRP 보강근의 인장강도 분석을 위한 시험방법 비교 연구, 콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 제18권 제3호, pp.303~312, 2006
3. 최동욱, 하상수, 이창호, 인발실험에 의한 GFRP 보강근의 정착길이 제안, 한국콘크리트학회논문집, 제19권 제3호, pp.323~331, 2007, 6
4. 최동욱, 하상수, 천성철, RC 부재 휨 실험에 의한 GFRP 보강근의 이음길이 제안, 한국콘크리트학회논문집, 제21권 제1호, pp.65~74, 2009, 2
5. 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 1차년도 최종 보고서, 2004.
6. 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 2차년도 최종 보고서, 2005.
7. 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
8. 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
9. ACI Committee 355, Qualification of Post - Installed Mechanical Anchors in Concrete (ACI 355.2-04), American

Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2004

10. Architectural Institute of Japan, Design and Construction Guideline of Continuous Fiber Reinforced Concrete, 2001
11. ASTM D3916-02, Standard Test Method for Tensile Properties of Pulltruded Glass-Fiber-Reinforced-Plastic Rods, American Society of Testing Materials, 2002
12. CAN/CSA S806-02, Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers, Annex H, Test Method for Bond Strength of FRP Rods by Pullout Testing, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2002
13. 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, Mar, pp. 247~254, 1996
14. ISIS Canada, "Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers," Design Manual No.3, pp.156, 2001
15. 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
16. Wambeke B. W. and Shield C. K., Development Length of Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars in Concrete, ACI Structural Journal, American Concrete Institute, Vol.103, No.1, pp.11~17, 2006

(접수 2009. 10. 16, 심사 2009. 12. 2, 게재확정 2009. 12. 9)

---

## 요 약

본 연구에서는 GFRP 하부근과 상부근의 정착길이 설계식을 제안하기 위하여 실험적 연구를 수행하고 실험결과와 통계적 분석을 실시하였다. 상부근과 하부근 각각 52개의 수정인발실험을 계획하였으며, 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)이다. 하부근과 하부근 각각에 대하여 수정인발실험을 통하여 평균부착강도를 결정하고, 평균부착강도에 대한 2변수 선형회귀분석을 실시하였다. 2변수 선형 회귀분석의 결과에 대하여 5% 분위수를 적용하여 보수적인 방법으로 정착길이 설계식을 제안하였다. 2변수 선형 회귀분석에 의한 하부근과 하부근의 정착길이 설계식을 제안하고 상부근과 하부근의 정착식을 비교하고, ACI 440.1R-06 식과 비교하였다.

---

키워드 : GFRP 보강근, 정착길이, 수정인발실험, 2변수 선형회귀분석

---