



초고성능 섬유보강 콘크리트에 혼입된 강섬유의 부착강도 평가

강수태 ^{1)*}

¹⁾대구대학교 토목공학과

Bond Strength of Steel Fiber Incorporated in Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete

Su-Tae Kang ^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 712-714, Korea

ABSTRACT This study was intended to estimate the bond strength of steel fiber in UHPFRC through pullout test. The pullout test was carried out with the double-sided pullout specimens with multiple fibers. First, the effect of fiber density on the bond strength was investigated, and the experimental result presented that the density range considered in this study was proved not to produce fiber-to-fiber interaction. The bond strength was estimated from several methods, which are based on the pullout load or energy at peak load, and the total energy absorbed until fibers are pulled out completely. The estimated bond strength obtained from the total energy was shown to be under the influence of the embedded length of fiber. The bond strengths obtained from peak load condition was 6.64 MPa in average, which had little difference compared to 6.46 MPa calculated by peak load only. Considering simplicity of test and analysis, it may be no matter to estimate the bond strength from peak load in pullout test.

Keywords : UHPFRC, steel fiber, pullout test, bond strength

1. 서 론

콘크리트는 압축강도에 비해 상대적으로 매우 낮은 인장강도를 보이며, 그 때의 변형률도 작은 값을 나타낸다. 콘크리트와 같은 취성재료들은 균열 발생 이전의 변형성능이 아주 적고 균열발생 이후에도 급속한 파괴로 균열에 대한 저항성이 매우 낮다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 섬유보강 콘크리트에 대한 연구가 1950년대 이후로 꾸준히 진행되어 오고 있다. 일반적으로 콘크리트에 섬유를 혼입하게 되면 콘크리트의 균열발생을 늦추고, 균열진전을 억제하는 효과가 있어 인장에 대한 강도 증가와 인성향상을 크게 기대할 수 있다. 이와 같은 현상은 매트릭스 내 섬유의 부착거동에 따른 것으로, 섬유보강 효과의 주된 메커니즘을 이루고 있다.

섬유보강 콘크리트에 인장력이 작용하게 되면, 인장력의 일부는 매트릭스에 의해, 일부는 섬유에 의해 저항하게 되며, 각각의 저항력은 매트릭스와 섬유 사이 계면의 응력전달에 의해 결정된다. 섬유와 매트릭스 사이에서의

응력전달은 섬유와 매트릭스의 계면에 작용하는 부착에 의해 이루어지게 된다. 그러므로 섬유보강 콘크리트의 인장강도 및 변형률, 휨인성과 같은 역학적 특성은 섬유와 매트릭스 계면의 부착특성에 의해 크게 영향을 받는다.¹⁻⁶⁾ 따라서 섬유보강 콘크리트의 여러 가지 역학적 특성을 파악하기 위해 앞서 섬유의 부착거동에 관한 연구가 선행되어야 한다. 이에 지금까지 다양한 종류의 섬유보강 콘크리트에 대해 섬유의 부착강도 및 인발거동 특성을 밝히기 위한 많은 연구들이 여러 가지 실험 방법과 해석 방법을 이용하여 수행되어 왔다.⁷⁻¹⁴⁾

한편 최근 국내에서도 활발하게 연구가 진행되고 있는 초고성능 섬유보강 콘크리트(*ultra high performance fiber-reinforced concrete*, 이하 UHPFRC)는 압축강도 200 MPa 이상, 탄성계수 약 45~55 GPa의 초고강도 콘크리트의 특성을 가지고 있다. 또한 강섬유의 혼입을 통해 인장거동과 인성을 크게 향상시켜 고인성 콘크리트의 특성도 확보하고 있다. 따라서 갈수록 그 효용성이 크게 부각되며 활용분야가 점차적으로 확대되고 있다. 특히 UHPFRC의 여러 가지 장점 중에서도 높은 인장강도와 인성을 효과적으로 활용할 수 있는 내진, 방폭 등과 같은 기능성 부재에 대한 관심도 크게 증가하고 있다. 이러한 개념의 구조부재를 고려할 때, 가장 중요한 UHPFRC의 역학적 특

*Corresponding author E-mail : stkang@daegu.ac.kr

Received April 12, 2013, Revised July 17, 2013,

Accepted July 29, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

성은 인장거동 특성이 되며, 이것은 앞서 설명한 바와 같이 섬유와 매트릭스 계면에서의 부착특성에 의해 결정되어진다. 따라서 UHPFRC의 부착특성을 명확히 밝히는 것은 제반 역학적 특성의 구명 및 개선을 위해서 반드시 선행되어야 할 연구이다.

따라서 이 연구에서는 UHPFRC에 대해 강섬유의 인발 실험을 수행하고, 그 결과로부터 매트릭스에 대한 강섬유의 부착강도를 정량적으로 평가하고자 하였다.

2. 인발실험

일반적으로 섬유와 매트릭스 계면의 부착특성은 섬유의 인발실험을 통해 확인할 수 있는데, 섬유의 인발실험에는 인장력 작용 방법 및 섬유의 개수에 따라 여러 가지 방법이 있다. Fig. 1은 일반적으로 사용되는 대표적인 인발실험 방법들을 나타낸 것으로, 인장력 작용 방법에 따라 일면 인발실험과 양면 인발실험이 있고 섬유의 개수에 따라 한 개의 섬유에 대한 인발실험과 여러 개의 섬유를 이용한 인발실험이 있을 수 있다.¹⁵⁾

지금까지의 섬유의 인발실험은 대부분 상대적으로 실험이 간편한 한 개의 섬유에 대한 일면 인발실험을 통해 구해지고 있다. 하지만 한 개의 섬유를 이용한 인발실험은 인발하중이 매우 작아서 정밀한 실험 장비를 필요로 하고, 각각의 실험 결과에 많은 편차를 보이므로 실험 결과의 신뢰성을 위해서는 많은 수의 시편을 필요로 한다.^{16,17)} 따라서 이 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해서 여러 개의 섬유를 이용한 양면 인발실험을 이용하였으며, 하나의 섬유에 대한 평균값을 이용하여 부착거동을 파악하고자 하였다.

2.1 사용재료

실험에 사용한 UHPFRC 매트릭스의 배합구성은 Table 1과 같다.¹⁸⁾ 시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 실리카폼은 UHPFRC의 재료성능 향상을 위해 시멘트 중량대비 25%를 사용하였다. 실리카폼은 우선 공극 충전

효과와 포졸란 반응을 통하여 재료의 밀도를 향상시킴으로써 강도증진의 효과가 있으며, 또한 경화 전 상태에서 다른 입자들 사이에서 윤활작용을 하여 유동성을 향상시키는 효과가 있다.¹⁹⁾ 시멘트와 실리카폼의 물리·화학적 성질은 Table 2와 같다.

잔골재는 밀도 2.62 g/cm³, 평균입경이 0.5 mm이하의 모래를 사용하였고, 굵은골재는 사용하지 않았다.

UHPFRC는 매우 낮은 물결합재비를 가지는데, 이로 인한 작업성 문제는 고성능 감수제를 사용하여 충분한 유동성을 확보하였다. 배합에 사용된 고성능 감수제는 폴리칼본산계의 고성능 감수제(밀도 1.01g/cm³, 암갈색)이다.

충전재(filler)는 물리적·화학적 효과로 UHPFRC의 강도향상에 도움이 되는 재료로서, UHPFRC 제조 시에 일반적으로 사용되고 있다. 이 실험에서 사용한 충전재는 입자의 평균입경이 약 4 μm 정도이며, SiO₂의 함유율은 98% 이상이고, 밀도는 2.60 g/cm³이다. Table 2에 충전재의 화학적 성질을 나타내었다.

그리고 섬유는 인장강도 2500 MPa, 직경 0.2 mm의 강섬유를 사용하였으며, 실험에서 섬유길이를 고려하기 위

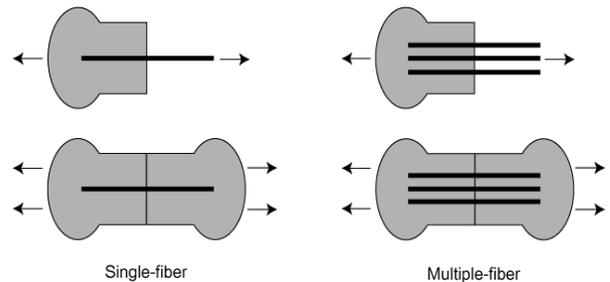


Fig. 1 Common experimental methods used to estimate the matrix-fiber bond strength¹⁵⁾

Table 1 Mix proportion of UHPFRC matrix (ratio in weight)¹⁸⁾

Water/binder	Cement	Silica fume	Filler	Sand	Superplasticizer
0.2	1	0.25	0.3	1.1	0.018

Table 2 Physical & chemical properties of cement and silica fume

Item	Specific surface area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Cement	3413	3.15	1.40	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.3
Silica fume	200000	2.10	1.50	96.00	0.25	0.12	0.38	0.1	-

Table 3 Chemical properties of filler

Item	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)				
		Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
Filler	0.01	0.06~0.5	< 0.02	< 0.02	0.01~0.07	99.3~99.8

해 13 mm는 기성제품으로 재단된 섬유를 사용하였으며, 20, 25, 30 mm 길이의 강섬유는 동일 재료의 코드(chord)를 원하는 길이만큼 잘라서 사용하였다.

2.2 실험체 제작

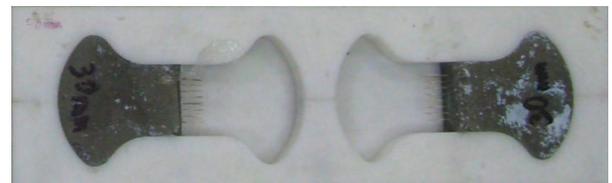
실험체는 섬유의 개수와 길이를 실험변수로 하여 제작하였다. 먼저 동일단면에 섬유의 개수가 많아서 섬유의 분포밀도가 높게 되면 인접한 섬유들에 의한 간섭효과가 발생하여 부착강도가 저평가될 수 있다. 이러한 영향범위를 확인하기 위하여 섬유의 개수를 실험설계에 고려하였다. 그리고 섬유의 길이를 실험변수로 고려한 것은 매트릭스와 섬유의 부착강도는 섬유의 길이와 관계없는 재료적 특성이므로 여러 가지 섬유길이에 대한 결과들을 종합적으로 판단하여 부착강도를 보다 합리적으로 결정할 수 있을 것으로 기대하여 실험설계에 반영하였다. Table 4는 실험에서 고려한 실험변수의 종류 및 그 값과 함께 실험체명을 보여주고 있다.

인발실험을 위한 실험체는 여러 개의 섬유를 사용한 양면인발 실험체로 제작되었다. 실험체를 제작하는 과정을 설명하면 다음과 같다. Fig. 2와 같이 가로, 세로 각각 4 mm 간격으로 하여, 가로방향으로 8개, 세로방향으로 4개씩을 직경 0.3 mm로 천공하여 제작한 철제 플레이트에 폴리에틸렌 쉬트를 붙인 다음, 강섬유를 전체 섬유길이의 1/2이 나오도록 플레이트에 끼운다. 그런 후 플레이트를 PVC 몰드의 중앙에 위치시켜 양쪽으로 나눈 후, 한쪽 면을 매트릭스를 타설한다. 24시간동안 20±3℃ 상온에서 습윤양생을 실시한 후, 중앙의 철제 플레이트를 제거하

며, 이때 폴리에틸렌 쉬트와 강섬유는 매트릭스와 부착하여 그대로 형상을 유지하고 있다. 그런 후 나머지 한 면에 대해 매트릭스 타설하고, 동일하게 24시간동안 상온 습윤양생 후, 탈형을 실시한다.¹⁴⁾ 탈형 후 실험체는 90℃에서 48시간동안 증기양생을 실시하게 된다. Fig. 3은 일면 및 양면 타설 후의 실험체의 모습을 보여주고 있다.

2.3 실험방법

실험은 Fig. 4와 같이 10000 N 용량의 UTM을 이용하여 변위제어를 통해 실험을 수행하였으며, 실험으로부터 하중-슬립량 관계의 실험결과를 얻었다. 슬립량은 중앙부에서 설치한 클립게이지를 이용하여 측정하였으며, 클립게이지의 측정변위 범위가 5 mm 내외로 작기 때문에, 그 이후의 변위는 외부변위를 이용하였다. 외부변위는 측정면에서의 슬립변위 외에 매트릭스의 변형이나 가력장치의 변형 등을 모두 포함하고 있지만, 부착거동이 0.1 mm 내외의 매우 적은 슬립량에서 최고하중에 도달하고, 이후 거동에서 클립게이지의 측정 범위를 넘는 구간에서의 실제 슬립량과 외부변위와의 차이는 부착거동이나 흡수 에너지에 미치는 영향이 아주 미미하므로 부착거동을 분석하는데 문제가 없을 것으로 판단하였다.



(a) After placing single-side



(b) After placing double-side

Fig. 3 Manufacturing of specimens for pullout test

Table 4 The variables and their values for steel fiber

Designation	Variables	
	Fiber length (mm)	Fiber number (ea)
L13-N16	13	16
L13-N24	13	24
L13-N32	13	32
L20-N32	20	32
L25-N32	25	32
L30-N32	30	32

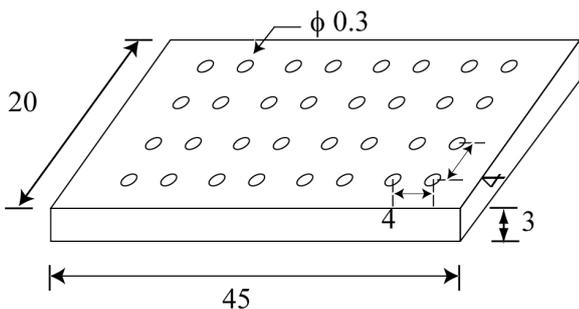


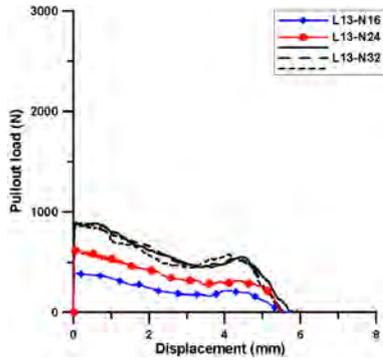
Fig. 2 Details of steel plate for positioning fibers (unit: mm)



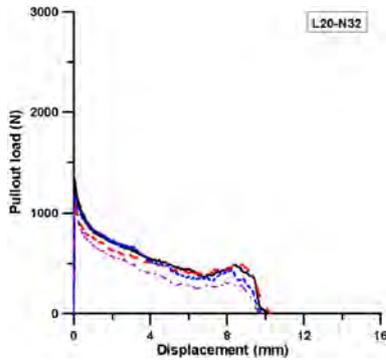
Fig. 4 Pullout test

2.4 실험 결과

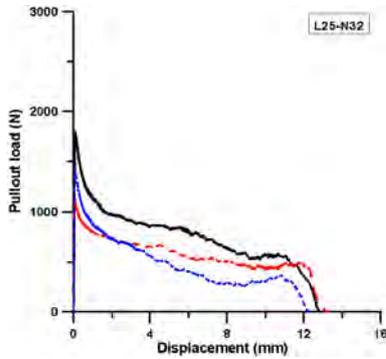
Fig. 5는 실험을 통해 얻은 인발하중과 슬립변위 관계 곡선을 섬유길이에 따라 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 섬유



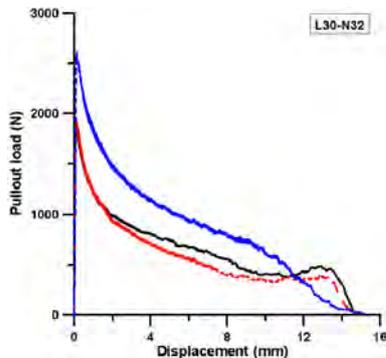
(a) $L_f=13$ mm



(b) $L_f=20$ mm



(c) $L_f=25$ mm



(d) $L_f=30$ mm

Fig. 5 Pullout load vs. slip curves according to the embedded len

길이 13 mm에 대해 섬유밀도분포의 변화에 따른 인발거동을 비교하여 나타낸 것이고, Fig. 5(b)~(d)는 섬유길이 20, 25, 30 mm에 대한 인발거동을 보여주고 있다. 대부분의 인발거동에서 초기 0.1 mm 이내의 아주 작은 슬립변위에서 최대 인발하중을 나타내었으며, Fig 5(a)에서는 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 섬유의 분포밀도가 증가함에 따라 최대 인발하중이 증가함을 확인할 수 있다. 또한 섬유의 길이에 따른 인발거동을 비교했을 때, 섬유길이 길수록 최대 인발하중이 증가하고, 최대 인발하중 이후의 거동은 섬유길이가 늘어남에 따라 하중감소 기울기가 더 큰 경향을 볼 수 있다.

Table 5는 인발실험의 결과를 최대 인발하중, 그 때의 슬립변위량, 섬유 한 개에 대한 값으로 환산한 최대 인발하중, 최대 인발하중까지의 에너지 및 완전히 뽑힐 때까지의 에너지 등의 항목으로 구분하여 정리한 것이다.

3. 부착강도 평가

3.1 부착강도 평가의 접근방법

Table 5의 실험 결과로부터 몇 가지 방법으로 부착강도를 산정하였으며, 그 결과들을 토대로 종합적인 검토를 통해 UHPFRC 내 강섬유의 부착강도를 평가하고자 하였다. 부착거동의 기본적인 가정은 Fig. 6과 같다. 즉, 초기에 섬유와 매트릭스 사이의 부착상태가 떨어지는데 작용하는 최대부착강도는 무시하고 마찰부착강도가 지배

Table 5 Pullout test results

	Peak load (N)	Work to peak load (N · mm)	Unit peak load (N)	Slip at peak load (mm)	Pullout work (kN · mm)
L13-N32*	881.9	21.48	27.56	0.034	3.390
	893.7	22.85	27.93	0.047	3.462
	890.7	36.24	27.83	0.061	3.460
L20-N32	1326.3	26.49	41.45	0.048	5.607
	1150.7	25.47	35.96	0.039	5.292
	1186.0	29.66	37.06	0.044	5.271
L25-N32	1067.3	32.45	33.35	0.057	4.169
	1794.2	93.54	56.07	0.114	9.976
	1164.4	33.39	36.39	0.052	7.573
L30-N32	1427.4	59.67	44.61	0.087	6.095
	1947.3	106.82	60.85	0.102	10.061
	1927.7	139.45	60.24	0.114	8.980
L13-N24	2607.5	196.60	81.48	0.140	13.437
	620.2	20.11	25.84	0.045	2.257
L13-N16	396.5	16.66	24.78	0.042	1.420

*The test results of L13-32 were cited from ref. (14), and the specimens were made simultaneously with the others.

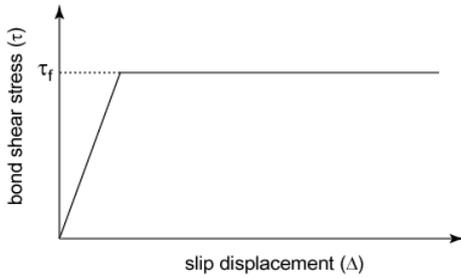


Fig. 6 Assumed bond shear stress-slip curve

적으로 작용한다고 보았으며, 마찰부착강도는 슬립량에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 첫 번째 방법은 최대 인발하중으로부터 구하는 방법으로, 매트릭스에 매입된 섬유 전체길이에 대해 마찰부착강도로 전단력이 작용하는 상태가 최대 인발하중상태임을 고려한 것이다. 따라서 식 (1)에 의해 부착강도를 계산할 수 있다.

$$\tau_{f1} = \frac{P_{\max}}{n\pi d_f l_e} \quad (1)$$

위 식에서 P_{\max} 는 최대인발하중, n 은 섬유의 개수, d_f 는 섬유의 직경을 의미하여, l_e 는 매트릭스에 매립된 섬유의 길이로서 여기서는 섬유길이(l_f)의 1/2이 된다.

두 번째 방법으로는 실험을 통해 얻어진 인발하중-슬립변위 거동에서 최대 인발하중 상태에서의 흡수에너지의 변화율로부터 부착강도를 구하는 것이다. 이때 변화율은 계측값의 민감도를 고려하여 최대인발하중 상태 전후의 5개 데이터의 평균값을 사용하였다.

$$\tau_{f2} = \left. \frac{dE}{d\Delta} \right|_{\Delta = \Delta_{\text{peak}}} \quad (2)$$

여기서 Δ_{peak} 는 최대인발하중 도달 시의 슬립변위를 의미한다.

그리고 세 번째 방법은 섬유가 완전히 뽑힐 때까지의 흡수에너지(E_{pullout})를 기준으로 부착강도를 계산하는 방법으로, 근사적으로 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\tau_{f3} = \frac{2E_{\text{pullout}}}{n\pi d_f l_e^2} \quad (3)$$

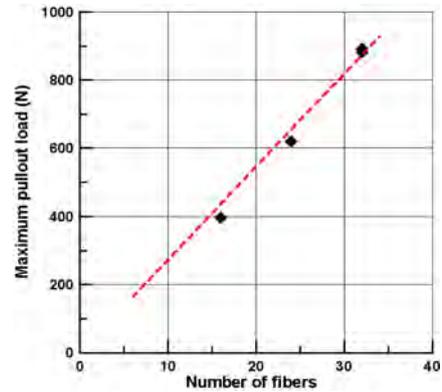
이상의 세 가지 방법에 의해 계산된 부착강도는 Table 6을 통해 비교하여 보여주고 있다.

3.2 섬유분포밀도의 영향

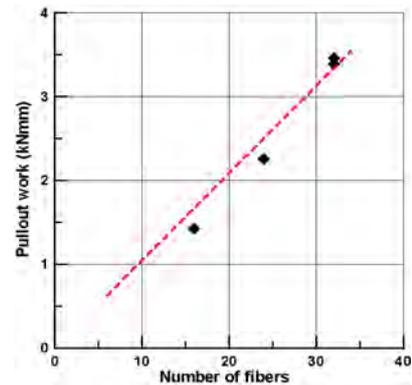
Fig. 7은 동일한 면적의 매트릭스 내 매립된 섬유의 개수와 최대인발하중 및 인발 시까지의 흡수에너지와의 관계를 보여주고 있다. 이를 통해 섬유와 매트릭스 사이에 작용하는 응력전달이 주변에 분포하는 다른 섬유들로 인

Table 6 Summary of estimated bond strengths

	Embedded length	τ_{f1} by Eq. (1)	τ_{f2} by Eq. (2)	τ_{f3} by Eq. (3)
L13-N32	6.5	6.75	7.56	7.98
	6.5	6.84	7.26	8.15
	6.5	6.82	7.33	8.15
L20-N32	10	6.60	6.60	5.58
	10	5.72	6.15	5.26
	10	5.90	6.56	5.24
L25-N32	12.5	7.14	7.87	6.35
	12.5	4.63	5.09	4.82
	12.5	5.68	6.29	3.88
L30-N32	15	6.46	6.97	4.45
	15	6.39	7.08	3.97
	15	8.65	9.31	5.94



(a) Peak pullout load



(b) Pullout work

Fig. 7 The effect of fiber distribution density

해 영향을 어느 정도 받는지 확인하고자 하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 섬유의 개수와 최대인발하중 또는 흡수에너지가 거의 선형성을 나타내고 섬유밀도가 증가함에 따라 섬유의 부착강도가 저하되는 경향은 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. 오히려 16개 또는 24개의 섬유에 대해 수행한 인발실험 결과에 비해 32개의 섬유에 대

한 최대인발하중이 섬유 한 개당 인발하중으로 환산했을 때 더 큰 값을 보이는데, 만약 섬유의 분포밀도가 높아서 섬유와 매트릭스 사이에 작용하는 응력전달에 대한 응력장이 섬유와 섬유 사이에서 서로 간섭효과를 보였다면 섬유 한 개당 인발하중이 줄어드는 것이 타당하다. 하지만 실험 결과에서는 오히려 32개 섬유에 대한 평균인발하중이 더 크게 나타났으므로 섬유간의 간섭작용이 아닌 다른 실험적 요인에 의한 오차로 보는 것이 바람직하고, 이 실험에서 고려한 섬유분포 밀도는 상호 응력간섭을 일으키지 않은 것으로 판단하였다.

3.3 섬유길이를 고려한 부착강도 평가

Table 10은 섬유의 문힘길이에 따라 식 (1)~(3)을 이용하여 계산한 부착강도 값을 나타낸 것이고, Fig. 8은 각 부착강도 값을 섬유의 문힘길이별로 구분하여 비교한 것이다. 우선 최대 인발하중 상태를 기준으로 계산한 τ_{f1} 과 τ_{f2} 을 비교했을 때, 최대 인발하중만을 고려하여 구한 τ_{f1} 이 그 때까지의 흡수에너지지를 기준으로 구한 τ_{f2} 에 비해 다소 작게 평가되는 것을 볼 수 있다.

한편 Fig. 8에서 보는 바와 같이, 같은 문힘길이에 대해 대체적으로 τ_{f1} 과 τ_{f2} 의 평균값은 유사한 값을 보이나, τ_{f3} 은 문힘길이가 증가함에 따라 τ_{f1} , τ_{f2} 와 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 실제 섬유의 부착거동이 Fig. 6과는 다르기 때문이다. 실제 섬유의 부착거동은 마찰에 대한 부착강도가 슬립량이 증가함에 따라 일정한 것이 아니라, 점차적으로 부착강도도 감소하게 된다. 따라서 식 (4)에 의해 계산된 τ_{f3} 은 인발 전과정에서의 평균적인 부착강도로 평가되며, 섬유의 길이가 증가함에 따라 점차적으로 감소하게 된다. 그러므로 섬유의 길이와는 무관하게 섬유와 매트릭스의 부착특성을 나타내는 부착강도의 평가방법으로 적절하지 못하다.

섬유의 부착강도가 슬립량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 고려할 때 일반적으로 τ_{f3} 의 값은 다른 값들에 비

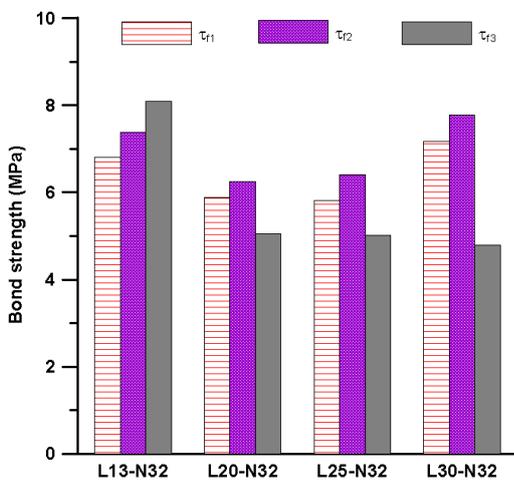


Fig. 8 Comparison of calculated bond strengths

해 작게 나타난다. 하지만 이 실험에서는 문힘길이 6.5 mm의 경우에 τ_{f1} , τ_{f2} 으로 계산된 값에 비해 τ_{f3} 의 값이 오히려 더 큰 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 5(a)에서 그 원인을 찾을 수 있는데, 섬유의 문힘길이가 짧은 경우에 상대적으로 인발거동의 비선형성이 적게 나타났고, 인발거동에서 슬립변위 4 mm 이후에 다시 인발하중이 다소 증가했다가 감소하는 거동으로 인해 평균적인 부착강도가 상대적으로 크게 나타났다. 인발 시 끝부분에서 일시적인 하중증가 경향은 섬유가 경사지게 놓여진 경우에 섬유의 인발이 진행되면서 매트릭스와 마찰슬립을 일으키게 되는 섬유의 길이가 짧아짐에 따라 휨강성이 증가하여 발생하는 일반적인 현상으로, 섬유를 인장방향에 나란하게 놓는 경우에도 섬유가 제조과정에서 완전한 선형을 가지지 못하거나 섬유를 인장력 작용방향과 완전히 일치하게 놓지 않았을 때 조금 나타나게 된다.^{20,21)}

섬유의 문힘길이에 따른 계산된 부착강도를 비교해 보면, τ_{f3} 를 제외한 나머지 두 방법에 의한 부착강도를 비교했을 때, 섬유의 문힘길이가 6.5 mm일 때가 10 mm와 12.5 mm일 때에 비해 부착강도가 크게 평가되고, 문힘길이가 15 mm일 때는 다시 10 mm와 12.5 mm인 경우에 비해 부착강도가 커지는 것을 볼 수 있다. 섬유의 길이에 따른 부착강도 변화의 뚜렷한 경향성을 파악할 수 없고, 또한 계산된 부착강도는 섬유길이와 무관하기 때문에, τ_{f1} 과 τ_{f2} 의 평균값을 부착강도로 고려하였으며, 계산된 부착강도는 6.64 MPa를 나타내었다. Fig. 9는 최대 인발하중의 측정값에 대한 회귀분석을 통해 얻어진 부착강도 (6.46 MPa)와 계산값을 이용하여 나타낸 섬유문힘길이와 최대 인발하중과의 관계를 비교하여 보여주고 있다. 최대인발하중만으로 부착강도를 평가하는 방법은 가장 일반적으로 사용되는 방법으로, 최대 인발하중 시의 슬립변위를 함께 고려한 방법과 비교했을 때 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있으며, 슬립변위에 대한 정밀한 측정이 요구되는 에너지 기준 방법의 번거로움을 고려할 때, 최대인발하중만으로 부착강도를 평가해도 무방할 것으로 보인다. 한편, 완전 인발까지의 에너지의 측정값을 기준으로 회귀분석을 통해 구한 부착강도는 4.95 MPa로 나타

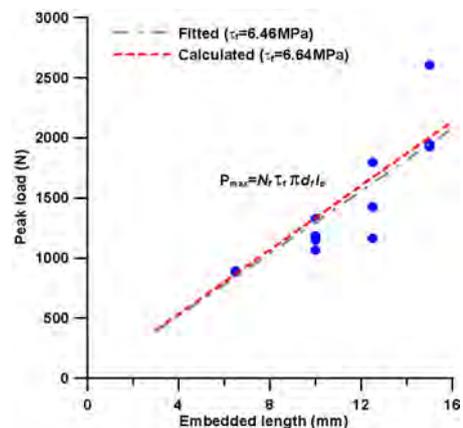


Fig. 9 Peak load vs. embedded length

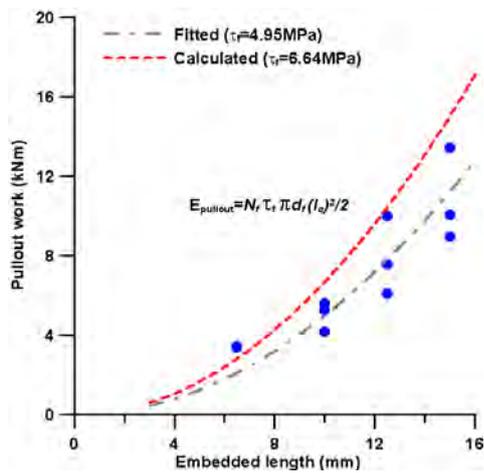


Fig. 10 Pullout work vs. embedded length

났다. 인발에너지의 회귀분석을 통해 추정된 부착강도가 계산값에 비해 훨씬 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 10은 서로 다른 두 가지 값의 부착강도에 대해 섬유 문힘길이에 따른 인발에너지 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 계산값을 이용한 인발에너지를 실제 측정된 에너지와 비교했을 때 문힘길이가 증가할수록 과대평가되는 경향을 확인할 수 있었으며, 이와 같은 결과는 앞서 설명한 바와 같이 부착강도가 슬립이 진행됨에 따라 점차적으로 감소함을 의미한다.

4. 결 론

이 연구에서는 UHPFRC에 대해 강섬유의 인발실험을 수행하고, 그 결과로부터 매트릭스에 대한 강섬유의 부착강도를 정량적으로 평가하고자 하였으며, 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 효과적인 인발실험 방법으로 여러 개의 섬유를 이용한 양면 인발실험을 적용하였으며, 적은 개수의 시편으로도 신뢰성 있는 실험결과를 얻을 수 있었다.
- 2) 인발실험에서 동일한 면적의 매트릭스 내 매립된 섬유의 개수와 최대인발하중 및 인발 시까지의 흡수에너지와의 관계 분석을 통해 이 연구에서 고려한 섬유분포밀도의 범위는 섬유 간 상호간섭효과를 나타내지 않는 범위임을 확인하였다.
- 3) 최대 인발하중 상태의 하중 또는 흡수에너지, 완전 뿔힘 상태의 흡수에너지를 고려한 몇 가지 방법들로 부착강도를 평가한 결과, 완전 뿔힘 상태의 흡수에너지로부터 구한 부착강도는 섬유의 문힘길이에 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 4) 최대 인발하중 상태의 하중 또는 흡수에너지로부터 구한 부착강도는 유사한 결과를 보였으며, 평균적으로 약 6.64 MPa의 부착강도를 나타내었다. 이 값은 최대 인발하중만으로 구한 부착강도 6.46 MPa와 비교했을 때 큰 차이가 없었다. 실험 및 평가의 용이성을 고려할 때 최대 인발하중만으로 부착강도를

평가해도 무방할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되고 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mandel, J., Wei, S., and Said, S., "Studies of the Properties of the Fiber-Matrix Interface in Steel Fiber Reinforced Mortar," *ACI Materials Journal*, Vol. 84, 1987, pp. 101-109.
2. Stang, H. and Shah, S. P., "Failure of Fiber-Reinforced Composites by Pull-out Fracture," *Journal of Materials Science*, Vol. 21, 1986, pp. 953-957.
3. Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., and Saito, T., "Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composites (PVA-ECC)," *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 5, 2002, pp. 463-472.
4. Kim, D. J., "Influence of Number of Twist on Tensile Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Twisted Steel Fibers," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 4, 2010, pp. 575-583. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.4.575>)
5. Lee, H. H. and Lee, H. J., "Characteristic Strength and Deformation of SFRC Considering Steel Fiber Factor and Volume Fraction," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 6, 2004, pp. 759-766.
6. Kim, M. H., Kim, J. M., and Nam, S. I., "An Experimental Study on the Development and Application of Steel Fiber Reinforced Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 6, No. 1, 1994, pp. 142-151.
7. Morton, J. and Groves, G. W., "The Cracking of Composites Consisting of Discontinuous Reinforced Concrete," *Journal of Material Science*, Vol. 9, No. 9, 1974, pp. 1436-1445.
8. Ezeldin, A. S. and Balaguru, B. N., "Bond Behavior of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 5, 1989, pp. 515-524.
9. Shannag, M. J., Brincker, R., and Hansen, W., "Interfacial (Fiber-Matrix) Properties of High-Strength Mortar (150 MPa) from Fiber Pullout," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 5, 1996, pp. 1-7.
10. Shannag, M. J., Brincker, R., and Hansen, W., "Pullout Behavior of Steel Fibers from Cement-Based Composites," *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 6, 1997, pp. 925-936.
11. Orange, G., Acker, P., and Vernet, C., "A New Generation of UHP Concrete: Ductal Damage Resistance and Micro-mechanical Analysis," *Proceedings of Third International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC3)*, Mainz, Germany, 1999, pp. 101-111.
12. Nammur, G. G. and Naaman, A. E., "A Bond Stress Model for Fiber Reinforced Concrete Based on Bond Stress Slip Relationship," *ACI Materials Journal* Vol. 86, No. 1, 1989, pp. 45-57.

13. Lin, Z., Kanda, T., and Li V. C., "On Interface Property Characterization and Performance of Fiber-Reinforced Cementitious Composites," *Concrete Science and Engineering*, Vol. 1, 1999, pp. 173-174.
14. Lee, Y., Kang, S. T., and Kim, J. K., "Pullout Behavior of Inclined Steel Fiber in an Ultra-High Strength Cementitious Matrix," *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 10, 2010, pp. 2030-2041. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.009>)
15. Gray, R. J., "Experimental Techniques for Measuring Fibre/Matrix Interfacial Bond Shear Strength," *Testing, Evaluation and Quality Control of Composites*, Butterworth Scientific Ltd. UK, 1983, pp. 3-11.
16. Armelin, H. S. and Banthia, N., "Predicting the Flexural Postcracking Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete from the Pullout of Single Fibers," *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 1, 1997, pp. 18-31.
17. Chan, Y. W. and Chu, S. H., "Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1167-1172. (doi: <http://dx.doi.org/doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.023>)
18. Park, J. J., Koh, K. T., Kang, S. T., and Kim, S. W., "Influence of Constitute Factor on the Compressive Strength of Ultra-High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 1, 2005, pp. 35-41.
19. Richard, P. and Cheyrezy, M. H., "Reactive Powder Concrete with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength," *Concrete Technology: Past, Present, and Future*, SP-144, American Concrete Institute, Farmington Hills, 1994, pp. 507-518.
20. Leung, C. K. Y. and Shapiro, N., "Optimal Steel Fiber Strength for Reinforcement of Cementitious Materials," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 2, 1999, pp. 116-123. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:2\(116\)](http://dx.doi.org/10.1016/(ASCE)0899-1561(1999)11:2(116)))
21. Fantilli, A. P., Mihashi, H., and Vallini, P., "Effect of Bond-Slip on the Crack Bridging Capacity of Steel Fibers in Cement-Based Composites," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 9, 2008, pp. 588-598. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:9\(588\)](http://dx.doi.org/10.1016/(ASCE)0899-1561(2008)20:9(588)))

요 약 이 연구에서는 UHPFRC에 대해 강섬유의 인발실험을 수행하고, 그 결과로부터 매트릭스에 대한 강섬유의 부착강도를 정량적으로 평가하고자 하였다. 실험은 여러 개의 섬유를 이용한 양면 인발실험을 적용하였다. 섬유분포밀도에 따른 영향을 파악해 본 결과, 이 연구에서 고려한 섬유분포밀도의 범위는 섬유 간 상호간섭효과를 나타내지 않는 범위임을 확인하였다. 최대 인발하중 상태의 하중 또는 흡수에너지, 완전 뿔힘 상태의 흡수에너지를 고려한 몇 가지 방법들로 부착강도를 평가한 결과, 완전 뿔힘 상태의 흡수에너지로부터 구한 부착강도는 섬유의 묻힘길이에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 최대 인발하중 상태에서 구한 부착강도는 평균적으로 약 6.64 MPa의 부착강도를 나타냈으며, 이 값은 최대 인발하중만으로 구한 부착강도 6.46 MPa와 비교했을 때 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 실험 및 평가의 용이성을 고려할 때 최대 인발하중만으로 부착강도를 평가해도 무방할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 초고성능 섬유보강 콘크리트, 강섬유, 인발실험, 부착강도