



보강섬유의 표면처리에 따른 섬유보강 고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 부착특성

박찬기^{1)*} · 원종필²⁾ · 차상선¹⁾

¹⁾공주대학교 지역건설공학전공 ²⁾건국대학교 사회환경시스템공학과

Bond Properties of CFRP Rebar in Fiber Reinforced High Strength Concrete with Surface Treatment Methods of Reinforcing Fibers

Chan-Gi Park,^{1)*} Jong-Pil Won,²⁾ and Sang-Sun Cha¹⁾

¹⁾Dept. of Rural Construction Engineering, Kongju National University, Yesan 340-702, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

ABSTRACT The effects of surface treatment method of reinforcing fiber on the bonding strength between carbon fiber reinforced polymer rebar (CFRP rebar) and high strength concrete have been evaluated in this study. The structural PVA fiber is coated with a proprietary hydrophobiccoiling agent and crimped type polyolefin based structural synthetic fiber is deformed with a geometrical modification were used for the reinforcing fiber. The compressive tests have been performed to evaluate the strength property of high strength concrete depending on the surface treatment method of fiber. The bonding property between the high strength concrete and the CFRP rebar was evaluated by means of direct bonding test. The test results indicated that the surface treatment method of fiber effect on the bonding behavior of high strength concrete and CFRP rebar. Also, as the development and propagation of splitting cracks were controled by adding fibers into the high strength concrete, the bonding behavior, bond strength and relative bonding strength of CFRP rebar and high strength concrete were significantly improved.

Keyword : high strength concrete, bond property, CFRP rebar, reinforcing fiber, relative bond strength

1. 서 론

최근 들어 보강철근의 부식에 대한 문제를 극복하기 위하여 섬유보강 폴리머 보강근 (fiber reinforced polymer rebar, FRP 보강근)이 개발되어 콘크리트구조물에 적용하기 위한 연구와 검토가 증가하고 있다.¹⁾ 콘크리트구조물의 인장보강재로서 FRP 보강근은 경량이고 인장강도가 큰 장점과 혹독한 환경 조건에 노출되었을 경우 내구성이 우수한 장점을 가지고 있다. 특히 경량이며 인장강도가 크고, 부식에 대한 우려가 없다는 특성은 대형화, 장대화, 초고층화되어 가는 현대 콘크리트구조물의 특성을 고려할 때 자중 및 단면감소를 위한 효과적인 재료로 적용할 가능성을 증가시킨다.²⁾

상기와 같은 콘크리트구조물의 특성은 콘크리트를 고강도화시켜 달성할 수 있으나³⁻⁷⁾ 콘크리트의 고강도화는 한편으로는 취성특성을 강화하는 문제점을 발생시켰다.

이를 해결하고자 섬유보강재를 혼입시키는 방법을 고려하게 되었다.^{2,5)} 콘크리트의 휨성능을 증가시키는 섬유로는 강섬유를 비롯한 구조용 섬유를 적용시키는 방법이 적극적으로 연구되고 있다.^{5,8)} 그러나 강섬유의 경우 일 반철근과 마찬가지로 부식에 대한 우려가 있다. 강섬유의 부식은 팽창으로 인한 콘크리트구조물의 파괴와 더불어 섬유 자체의 단면손실을 발생시켜 구조성능을 감소시키게 된다.⁹⁾ 따라서 비부식성의 구조용 보강섬유를 적용하는 방법을 고려하여야 한다.⁹⁾

합성섬유의 경우 콘크리트와 부착성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 문제의 해결방법으로는 섬유의 표면형상을 변화시켜 콘크리트와 역학적 부착성능을 증가시키는 방법과 섬유의 표면을 친수성 물질로 처리하여 부착성능을 증가시키는 화학적 처리방법이 있다.^{10,11)} 섬유표면의 기하학적 변형을 통한 부착성능을 증가시키는 방법으로 국내에서 널리 사용되는 섬유인 절곡형 (crimped type) 폴리올레핀계 섬유가 있으며, 표면을 친수성 물질로 처리하여 부착성능을 향상시킨 화학적 처리방법의 대표적인 섬유로 직선형의 구조용 PVA섬유가 있다.^{10,11)} 구조용 PVA섬유는 친수성 물질을 섬유의 표면에 중량의

*Corresponding author E-mail : cgpark@kongju.ac.kr

Received July 15, 2008, Revised January 12, 2009

Accepted April 17, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

1.2% 정도 코팅되어 있어 콘크리트와 부착성능을 증가시킨 섬유이다.¹⁰⁻¹²⁾

FRP 보강근은 철근과 비교하여 큰 인장강도를 가지고 있다.¹⁰⁾ 그러나 인장성능을 충분히 발휘하기 위해서는 콘크리트와 FRP 보강근사이의 부착강도가 매우 중요하다.^{2,10)} 그러나 FRP 보강근의 특성상 심부 FRP 보강근과 부착성능을 증가시키기 위하여 형성된 FRP 보강근의 외부표면이 일체거동을 하지 않고 분리되어 충분한 부착성능을 발휘하지 못하는 경우가 있다.^{13,14)} 이와 같은 문제는 FRP 보강근의 생산방법상의 특성에 의한 것이다. FRP 보강근의 일반적인 형상은 표면에 규사를 코팅한 것과 표면에 보강철근 모양의 리브를 폴리머 수지를 이용하여 제조한 것, 그리고 섬유의 표면을 브레이딩과 같은 방법으로 섬유를 이용하여 리브를 만들어준 것 등으로 구분할 수 있다.¹³⁻¹⁶⁾ 이와 같은 형상은 콘크리트와 부착성능을 향상시키기 위하여 개발된 형상으로 콘크리트의 부착거동을 충분히 발휘할 수 있도록 발전되어가고 있다. 고강도콘크리트와 FRP 보강근 및 보강철근의 부착거동은 콘크리트의 할렬균열에 의하여 파괴되는 거동을 보여주고 있다.⁸⁾ 할렬파괴의 주요원인은 리브가 콘크리트에 썸기작용을 하기 때문이다. 따라서 할렬균열이 발생하여 파괴가 발생하게 된다.⁹⁾

이러한 할렬균열을 방지하기 위한 연구로는 고강도콘크리트에 섬유보강재를 첨가하는 방법이 있다. 보강섬유를 첨가하면 FRP 보강근과 콘크리트 사이의 할렬균열을 방지하기 때문에 콘크리트와 FRP 보강근 사이의 부착성능을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 이는 직경 9 mm의 CFRP 보강근과 직경 13 mm의 GFRP 보강근과 고강도콘크리트와의 부착특성에서 후크 타입 강섬유 및 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 혼입률에 따른 영향의 평가에서 알 수 있다. 즉 섬유는 콘크리트와 GFRP 보강근 사이에서 발생하는 할렬균열의 발생 및 성장을 억제하는 효과가 있다.⁹⁾ 섬유 표면의 기하학적 형상변화를 통하여 콘크리트 내부에서 발생 및 성장하는 할렬균열을 섬유의 가교작용을 통해서 억제하고 있다. 이때 균열 발생 및 성장의 조절은 섬유의 기하학적 변형에 따른 역학적 부착성능에 의한 것이다. 그러나 콘크리트내에서 섬유의 부착성능은 역학적 부착성능과 더불어 섬유의 표면을 친수성으로 처리함으로써 발생하는 화학적 부착에 의한 성능 향상도 있다. 현재 국내외에서 널리 사용되고 있는 섬유는 부착성능 향상을 위하여 섬유의 표면에 기하학적 변형을 실시하는 방법과 섬유의 표면을 친수성 물질로 코팅하는 방법이 적용되고 있다.^{11,12)}

본 연구에서는 고강도콘크리트의 취성적 성질과 FRP 보강근의 부착파괴 원인이 되는 할렬균열의 발생 및 파괴를 억제할 수 있는 방법으로 보강섬유의 표면처리방법의 효과를 평가하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 콘크리트의 부착성능 향상을 위하여 표면형상 변화에 의한 역학적 부착성능 향상을 도모한 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유와 표면을 친수성 물질로 처리함으로써 화

학적 부착성능을 향상시킨 구조용 PVA 섬유를 적용하였다. 또한 원주형 공시체를 이용한 직접부착실험을 실시하여 표면처리방법이 서로 다른 보강섬유에 적용에 따른 고강도 콘크리트와 CFRP 보강근과의 부착거동에 미치는 효과를 평가하였다.

2. 실험 계획

2.1 사용 재료

1종 포틀랜드시멘트와 비중 2.61의 잔골재 및 굵은골재, 최대치수 13 mm의 부순골재와 폴리카본산계 고성능감수제, 공기연행제를 사용하였다. 콘크리트 보강섬유로는 표면을 기하학적 변형을 통하여 콘크리트와의 역학적 부착성능을 향상시킨 국내 C사의 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유와 친수성 표면을 가지고 있어 화학적 부착성능을 향상시킨 일본 K사의 RF 5000 구조용 PVA 섬유 (이하 구조용 PVA 섬유)를 적용하였다. 또한 본 연구에서는 국내 D사에 제조한 CFRP 보강근 (carbon fiber reinforced polymer rebar)을 사용하였다. 보강근은 직경 9 mm로 탄소섬유와 함침제로 알칼리에 대한 저항성과 경제성이 우수한 비닐에스터 수지로 심부가 구성되어 있으며 표면은 브레이딩 기술을 이용하여 리브를 주는 방식의 표면처리 방법이 적용되었다. CFRP 보강근의 형상과 재료특성은 각각 Fig. 1 및 Table 1과 같으며, 섬유의 형상 및 특성은 Table 2와 같다.

2.2 배합설계

본 연구에서는 고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 부착거동에 미치는 표면처리효과를 평가하기 위하여 표면을 기하학적으로 변형시킨 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유와 표면을 친수성처리한 구조용 PVA섬유를 사용한 Table 3과 같은 고강도콘크리트 배합을 실시하였다. 섬유의 사용량은 체적비로 1%를 적용하여 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유와 표면친수성 처리 구조용 PVA 섬유를 각각 9 kg/m³ 및 12.6 kg/m³를 사용하였다. 또한 고강도콘크리트 배합에 광물질 혼화제를 사용하지 않음으로써 광물질 혼화제의 점착력에 의한 부착성능 향상을 배제하였다.

Table 1 Tensile test results of FRP rebars⁹⁾

Properties	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Strain (%)	Elastic modulus (MPa)
Value	9	2,048	1.71	120,876

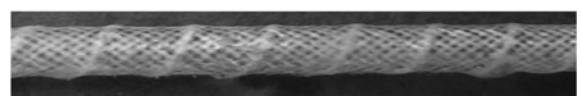


Fig. 1 Photo of CFRP rebar used in this study

Table 2 Properties and structural synthetic fiber



Fiber type	Dimension (mm)	Length (mm)	Density (kg/m ³)	Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate elongation (%)
 Crimped type polyolefin based structural synthetic fiber	0.1×0.3 (width×height)	30	0.91	4,626.6	470.5	15.3
 Hydrophobiccoiling agent treatment structural PVA fiber (RF 5000)	0.66 (diameter)	30	1.3	2,900.0	880.0	7.0

Table 3 Mix proportion of high strength concrete

Type of mix	W/C (%)	S/a (%)	Unit materials contents (kg/m ³)						
			W	C	Coarse. agg	Fing. agg	HRWR*	AE**	Fiber
Control	25.0	42.0	165	660	889.80	597.81	11.88	0.396	-
PSSF***									9
PVAF****									12.6

*: High range water reducer, **: Air entraining admixture, ***: Crimped type polyolefin based structural synthetic fiber, ****: Hydrophobiccoiling agent treatment structural PVA fiber PVA structural fiber (RF 5000)

3. 실험 방법

3.1 압축강도실험

콘크리트 내에서 부착강도 향상을 위한 섬유 표면처리 방법이 고강도콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 KS F 2405에 따라 압축강도실험을 실시하였다. 압축강도를 측정하기 위한 공시체의 크기는 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체를 사용하였으며 실험은 5개의 콘크리트 공시체를 제작한 후 23±2°C의 온도와 상대습도 50±2%의 실내에서 24시간 동안 초기 양생을 실시한 후 탈형하여 1일 강도를 측정 후 나머지 공시체는 23±2°C인 수중에서 양생하였다. 28일간의 수중양생 중 재령 7일 및 28일에 압축강도를 측정하였으며 압축강도실험은 2,000 kN 용량의 UTM을 이용하였다.

3.2 부착실험

부착실험은 GFRP 보강근의 부착실험을 실시한 Vijay¹⁷⁾ 및 AFRP 보강근의 부착실험을 한 Soroushian 등¹⁸⁾에 의해서 실시한 원주형 공시체를 이용하였다. 부착실험용 물

드의 제작을 위해서 CFRP 보강근을 공시체 내부에 넣고 콘크리트를 타설하였는데, 이때 CFRP 보강근과 콘크리트의 정착구간은 CFRP 보강근 직경의 5배로 결정하였다. 즉 정착길이는 45 mm이며 비부착구간은 직경 30 mm의 플라스틱관 (plastic tube)를 이용하였으며 플라스틱관의 중앙에 CFRP 보강근을 위치시키기 위하여 테이프를 이용하여 뚜껑을 씌우고 중앙에 FRP 보강근 직경 크기에 구멍을 뚫어 그 구멍에 FRP 보강근을 정착하였다. 그런 다음 원주형 몰드에 콘크리트를 타설하여 5개의 부착강도 시험체를 제작하였다. 부착실험은 23±2°C의 온도와 상대습도 50±2%의 실내에서 24시간 동안 초기 양생을 실시한 후 탈형하여 28일간 23±2°C의 물속에서 수중양생을 한 후 실시하였다. 수중양생시 FRP 보강근과 콘크리트 공시체 접촉면으로 물의 침투를 방지하기 위하여 에폭시로 플라스틱관의 상부를 코팅하였다. 250 kN 용량의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 이용하였는데 하중 재하속도는 5 mm/min이었다. 부착실험시 지그의 공시체에 대한 영향을 최소화하기 위하여 강판을 콘크리트 공시체의 상부와 하부에 정착하고 너트를 이용하여 강봉으로 공시체가 움직일 수 없도록 고정한 후 CFRP 보강근을 인장하는 방법을 사용하였다. 또한 하부 강판

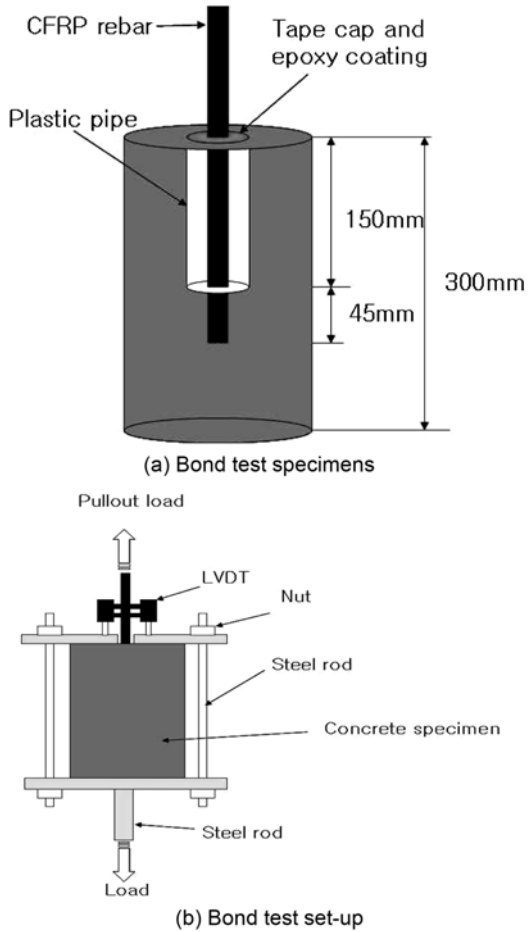


Fig. 2 Bond test methods

의 중앙에는 강봉을 설치하고 지그를 이용하여 CFRP 보강근의 인발시 강판과 공시체가 동시에 들려 움직임이 발생하는 것을 방지하였다. 슬립 (slip)을 측정하기 위해서 LVDT를 이용하였다. 부착강도 공시체 형상 및 실험 모습은 Fig. 2와 같다.

4. 실험 결과

4.1 압축강도

표면을 기하학적 변형을 주어 역학적 부착성능을 증가시킨 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유는 75.1 MPa, 표면을 친수성 처리하여 화학적 부착력을 향상시킨 구조용 PVA 섬유는 74.8 MPa 섬유를 사용하지 않은 기준배합의 경우 74.2 MPa를 나타내었다. 섬유를 첨가하면 압축강도가 약간 증가하는 것으로 나타났으나 압축강도의 차이는 모두 기준공시체와 비교하여 10% 내에 있어 압축강도에 있어서 섬유의 혼입 유무 및 표면처리 방법에 따른 큰 영향은 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 기존의 연구 결과에서도 나타나듯이 콘크리트 압축강도의 경우 합성섬유를 사용하면 섬유자체의 특성보다는 콘크리트 모체에 더욱더 영향을 받는다는 것을 의미하며 섬유의 첨가로 인하여 압축강도가 약간은 증가할 수 있

으나 증가정도는 크지 않다는 것을 보여준다.^{9,12)}

4.2 부착특성

4.2.1 부착하중 vs 슬립거동

섬유의 표면처리 방법에 따른 고강도 콘크리트와 CFRP 보강근 사이의 인발하중과 슬립거동의 관계는 Fig. 3과 같다. 콘크리트와 보강근사이의 부착거동 중 초기 미소슬립 발생 단계와 내부 미소균열 발생 단계가 있는데,¹⁹⁾ 본 연구에서는 명확히 구분하기 어려우나 약 10~14 kN 까지는 부착하중과 슬립거동의 관계가 선형적으로 나타났고, 10~14 kN에서 최고 하중까지는 비선형적으로 거동을 하는 것으로 나타났다. 특히 비선형 구간인 경우 섬유를 사용하지 않은 기준공시체와 비교하여 섬유를 사용한 공시체의 거동이 보다 크게 일어남을 알 수 있다. 이는 고강도콘크리트와 CFRP 보강근사이의 계면에서 발생하는 내부 미세균열의 발생을 섬유가 억제하는 동시에 이미 발생한 미세균열의 성장도 섬유의 가교효과를 통하여 균열을 가로질러 통과하는 인장응력을 섬유가 전달하는 역할을 함으로써 균열의 성장을 억제하는 작용을 하기 때문이다. 최고 인발하중에 도달한 후 CFRP 보강근과 고강도콘크리트사이의 부착거동은 할렬균열에 의한 급격한 인발 하중의 감소를 보여주게 되는데 섬유를 사용하지 않은 고강도콘크리트의 경우 급속한 하중의 감소에 의한 부착파괴가 발생하였다. 특히 인발하중이 일정하게 유지되면서 슬립이 증가하는 잔류거동 단계가 없이 파괴되는 결과를 보여주었다. 그러나 보강섬유를 사용한 경우 기준공시체와 비교해서 인발하중의 감소가 크지 않았다.

섬유의 표면 처리방법에 따라서 거동이 많은 차이를 나타내었다. 섬유의 표면을 친수성 처리하여 콘크리트 내에서 화학적 부착특성을 증가시킨 구조용 PVA 섬유를 사용한 경우 고강도콘크리트와 CFRP 보강근사이에서 최고 인발하중에 도달한 후 하중의 감소가 급격하게 감소하는 거동을 보여주었다. 이와 같은 이유는 구조용 PVA 섬유의 경우 섬유의 형상이 일자형으로, 섬유 표면이 친수성인 특성을 이용하여 고강도콘크리트에서 부착강도를

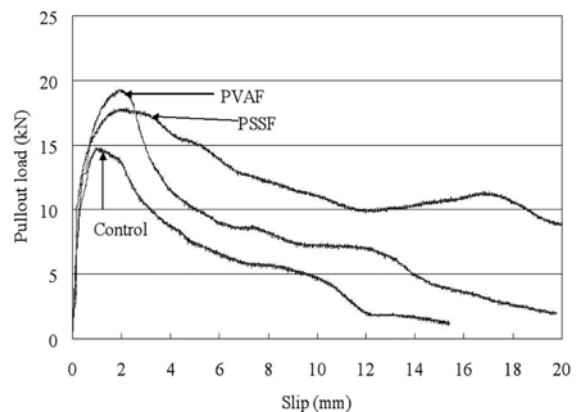


Fig. 3 Pullout load vs slip behavior of CFRP rebar in fiber reinforced high strength concrete

증가시킨다. 따라서 고강도 콘크리트와 화학적 부착력을 이용하여 할렬균열의 발생 및 성장을 억제하는데 일단 균열이 발생하면 섬유유는 균열성장억제 효과가 감소하여 할렬균열의 성장에 의한 CFRP 보강근의 인발하중의 감소가 크게 나타난다.¹²⁾ 특히 표면형상을 절곡형으로 변형시켜 역학적 부착력을 향상시킨 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 거동과 비교하여 최고 부착하중은 큰 값을 보여주어 할렬균열의 발생을 억제하는 능력은 화학적 부착력을 가진 구조용 PVA 섬유유가 우수하지만 일단 발생한 균열의 성장 억제 효과는 표면형상을 기하학적으로 변형시킨 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유가 우수한 것으로 보여진다.

표면형상을 기하학적으로 변형시켜 역학적 부착력을 향상시킨 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 경우 화학적 부착력을 가진 구조용 PVA 섬유유와 비교하여 할렬균열이 발생하는 최고 부착하중은 약간 작게 나타났지만 할렬균열의 성장에 의한 인발거동은 급속한 감소 없이 점차적으로 감소하는 안정적인 거동을 보여주었다. 이는 표면의 기하학적 형상을 변형시킨 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 경우 섬유전체가 절곡형으로 구성되어 있어 콘크리트 내에서 역학적 부착력이 강하기 때문에 할렬균열의 성장을 억제하는 효과가 우수하기 때문이다. 즉 표면을 친수성 처리하여 화학적 부착력을 가지지만 직선 모양을 가지고 있는 구조용 PVA 섬유유와 비교하여 할렬균열이 발생한 후 균열의 성장을 억제하는데 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유가 보다 효과적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과에서는 할렬균열의 발생을 지연하는 효과는 표면을 친수성 처리한 구조용 PVA 섬유유가 화학적 부착효과를 가지고 있어 우수하나 할렬균열의 발생 후 성장단계에서는 표면의 형상 변화를 통하여 역학적 부착력을 향상시킨 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유가 보다 유리한 것으로 보여진다. 따라서 CFRP 보강근과 고강도콘크리트사이의 할렬균열 발생 및 성장을 억제에 따른 부착성능을 향상시키기 위해서는 화학적 부착력과 역학적 부착력을 모두 확보할 수 있도록 기하학적 형상변화와 친수성 표면처리를 모두 고려할 필요가 있을 것으로 보인다.

4.2.2 부착특성

고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 부착특성에 미치는 섬유유의 표면처리 방법에 따른 부착강도 특성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 식 (1)을 이용하여 CFRP 보강근과 고강도콘크리트사이의 부착강도를 계산하였다. CFRP 보강근과 고강도콘크리트의 부착강도는 CFRP 보강근의 정착길이 전 부분에 동등하게 분배되는 것으로 고려하였다.⁹⁾

$$\tau = \frac{P_{\max}}{\pi DL} \quad (1)$$

여기서, τ = 부착강도, P_{\max} = 최대인발하중, D = CFRP 보

강근의 직경, L = CFRP 보강근의 정착 길이이다. 적용 섬유유의 표면처리 방법에 따른 고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 부착실험 결과는 Figs. 4~6과 같다.

Fig. 4(a)는 섬유유의 표면처리 방법에 따른 부착강도 결과를 보여준다. 섬유유를 사용하지 않은 기준배합과 비교하여 섬유유를 사용할 경우 부착강도가 증가하는 결과를 보여주었다. 섬유유를 사용하지 않은 기준배합의 경우 11.52 MPa를 보여주었으며 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유, 친수성 표면 구조용 PVA 섬유유를 적용한 고강도콘크리트의 경우 각각 14.40 및 14.95 MPa를 나타내었다. 고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 부착강도는 고강도콘크리트와 CFRP 보강근 사이의 접촉표면에서 점착성을 가진 시멘트 풀이 CFRP 보강근의 표면에 경화함으로써 얻어지는 교차작용과 고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 마찰작용 및 CFRP 보강근의 표면요철에 의해서 발생하는 기계적 작용에 의해서 발생한다.²⁰⁾ CFRP 보강근과 고강도콘크리트의 기계적 작용에 의한 부착력은 CFRP 보강근의 표면요철과 콘크리트의 맞물림 (inter-locking)에 의한 기계적 저항력이라 할 수 있다.²¹⁾ CFRP 보강근과 고강도콘크리트사이의 부착파괴는 일정한 강도에 도달하게 되면 콘크리트의 표면에 급격한 균열의 성장 및 진행에 의해서 발생하는 할렬파괴에 의해 발생한다.²²⁾ 따라서 할렬파괴를 방지하면 부착강도를 증가시킬 수 있다.^{8,9)} 섬유보강재를 적용하면 섬유유가 콘크리트 내에서 또는 고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 접촉면에서 섬유유의 가교

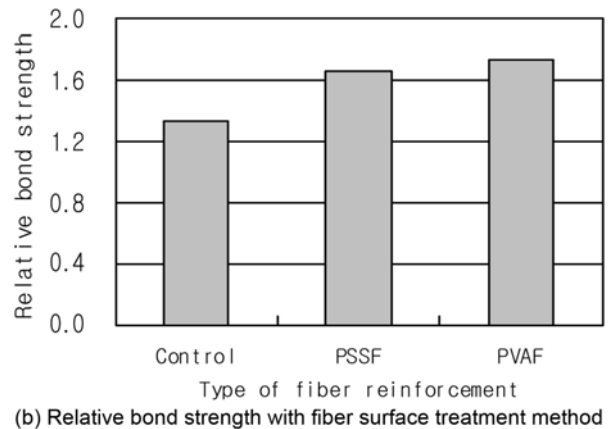
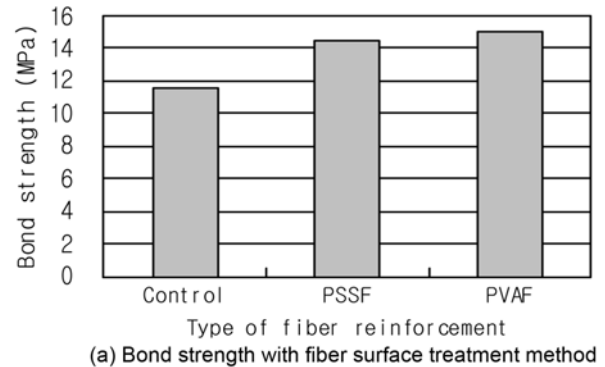


Fig. 4 Bond test results of CFRP rebar in fiber reinforced high strength concrete

효과를 통하여 균열의 성장 및 진행을 억제하기 때문에 할렬 파괴를 방지할 수 있다. 또한 섬유보강재를 사용하면 여러 개의 할렬이 발생할 때 까지 지속적으로 인발 하중에 저항하기 때문에 부착력이 증가하는 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 작용은 철근콘크리트 부재에서 할렬에 의한 부착파괴를 방지하기 위하여 인장철근을 스티럽이나 나선철근으로 둘러 감으면 여러 개의 할렬이 일어날 때 까지 부착파괴를 상당히 지연시킬 수 있다는 것과 같은 결과이다.²²⁾ 섬유보강재의 표면처리 방법에 따른 고강도콘크리트와 부착강도의 영향은 절곡형 폴리에틸렌계 구조용 합성섬유를 사용하였을 때와 비교하여 친수성 표면을 가진 구조용 PVA 섬유가 약 5~9% 정도 증가하는 경향을 나타냈으나 큰 차이가 발생한 것은 아니었다. 이와 같은 결과는 부착강도측면에서는 친수성 표면을 가진 구조용 PVA 섬유가 절곡형 형상을 가진 폴리에틸렌계 구조용 섬유 보다 초기 할렬균열의 발생에는 약간의 효과가 더 있기 때문이다.

4.2.3 상대부착강도

부착강도에 영향을 미치는 고강도콘크리트의 강도영향을 최소화하고 섬유의 효과만을 평가하기 위하여 상대부착강도 개념을 본 연구에서는 도입하였다. 본 연구에서는 Xial¹⁹⁾이 제안한 식 (2)를 이용하여 상대부착강도의 계산을 하였다.

$$\tau_R = \frac{\tau}{\sqrt{f_{cu}}} \quad (2)$$

여기서, τ_R 은 상대부착강도이며, τ 는 부착강도, f_{cu} 는 콘크리트의 압축강도이다.

상대부착강도 시험 결과는 Fig. 4(b)와 같다. 시험 결과 기준공시체는 약 1.33 정도의 값을 나타내었으며 표면형상을 기하학적으로 변형시켜 역학적 부착력을 증가시킨 절곡형 폴리에틸렌계 구조용 합성섬유 및 표면을 친수성처리하여 화학적 부착력을 증가시킨 구조용 PVA 섬유는 각각 1.67 및 1.72의 값을 보여주었다. 기준 공시체와 비교하여 역학적 부착력을 증가시킨 절곡형 폴리에틸렌계 구조용 합성섬유 및 화학적 부착력을 증가시킨 표면 친수성 구조용 PVA 섬유는 각각 약 26% 및 30% 증가한 값을 나타내었다 (Fig. 5).

표면을 기하학적 변형을 통하여 역학적 부착력을 향상시킨 절곡형 폴리에틸렌계 구조용 합성섬유와 표면을 친수성처리하여 화학적 부착력을 증가시킨 구조용 PVA 섬유는 부착강도와 상대부착강도 증가율은 거의 비슷함을 알 수 있다. 즉 압축강도증가에는 섬유의 첨가가 큰 영향을 미치지 못하였지만 부착강도 증가에는 영향을 미쳤다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 고강도콘크리트의 압축강도와 부착강도 및 상대부착강도의 관계를 보여준다. 분석 결과 압축강도의 변화는 거의 없지만 섬유보강재의 혼입에 따라 부착강도 및 상대부착강도는 증가하고 있음

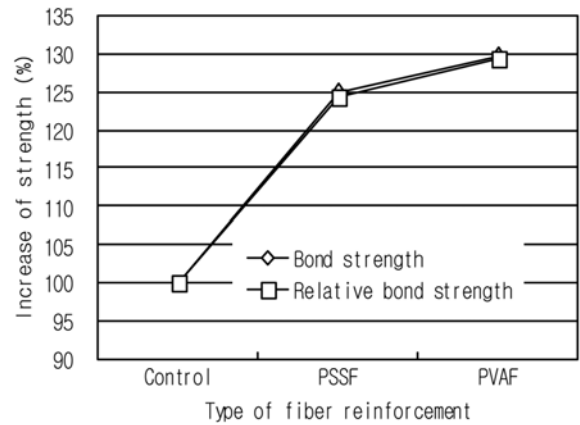
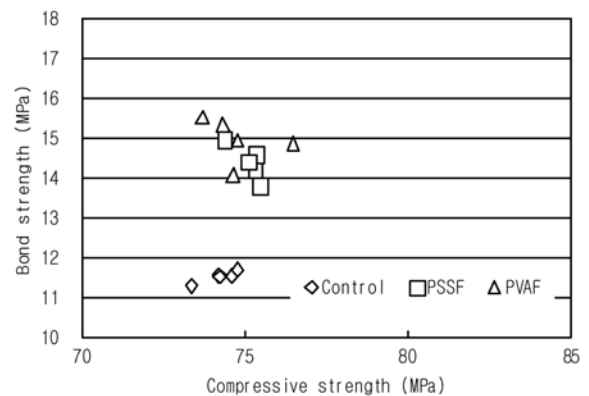
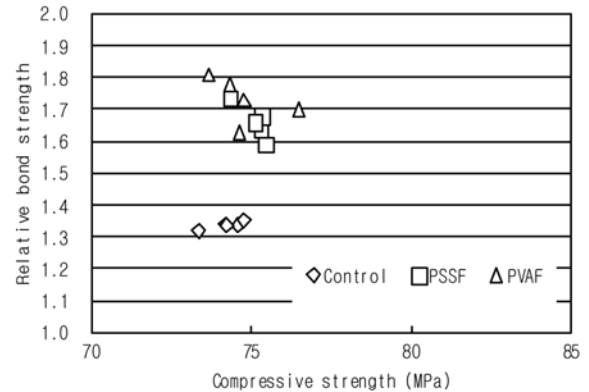


Fig. 5 Increase of strength of CFRP rebar in fiber reinforced high strength concrete



(a) Relationship compressive strength and bond strength



(b) Relationship compressive strength and relative bond strength

Fig. 6 Relationship compressive strength and bond properties of CFRP rebar in fiber reinforced high strength concrete

을 나타낸다. 따라서 섬유를 혼입하면 고강도콘크리트와 CFRP 보강근 사이의 부착강도를 증가시키는 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 콘크리트 내에서 역학적 거동을 향상시키기 위하여 기하학적변형을 한 보강섬유와 화학적 부착을 증가시키기 위하여 표면을 친수성 처리한 보강섬유를 적용

하여 표면처리 방법이 고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 부착거동에 미치는 효과를 평가하였으며 실험을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 내에서 역학적 부착성능을 증가시키기 위하여 사용된 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유와 화학적 부착력을 증가시키기 위하여 친수성 코팅을 한 구조용 PVA 섬유의 압축강도는 각각 75.1 MPa 및 74.8 MPa를 보여주어 기준배합의 74.2 MPa과 비교하여 약간 증가하였으나 큰 영향을 보여주지는 않았다. 섬유의 표면 처리 방법은 압축강도에 큰 영향을 미치지 않았다.
- 2) 화학적 부착성능을 증가시키기 위하여 표면을 친수성 처리한 구조용 PVA 섬유는 할렬균열의 발생을 억제 및 지연하여 초기 부착하중이 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유보다 증가하였다. 그러나 할렬균열 발생 후 급격한 부착하중의 감소가 발생하는 등 할렬균열의 성장을 제어하는 데는 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유보다 효과가 감소하였다.
- 3) 콘크리트 내에서 역학적 부착성능을 증가시키기 위하여 표면형상을 기하학적으로 변형시킨 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유는 발생한 할렬균열의 성장을 절곡된 섬유의 역학적 부착력에 의하여 화학적 부착력을 가진 구조용 PVA 섬유보다 급격한 부착하중의 감소 없이 안정적인 거동을 보여주었다.
- 4) 고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 부착강도는 기준배합의 경우 11.52 MPa를 보여주었으며 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유 및 친수성 구조용 PVA 섬유를 적용한 고강도콘크리트의 경우 각각 14.40 MPa 및 14.95 MPa를 나타내었다. 이는 섬유를 혼입할 경우 섬유의 표면처리 방법의 차이는 있지만 섬유가 가교작용을 통하여 부착파괴에 주요 원인이 되는 할렬균열의 발생 및 성장을 억제하기 때문이다.
- 5) 고강도콘크리트의 강도에 영향을 최소화하여 보강섬유의 종류에 따른 영향을 살펴보기 위한 상대부착강도 분석 결과 기준공시체는 약 1.33 정도의 값을 나타내었으며 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유 및 친수성 구조용 PVA 섬유는 각각 1.67 및 1.73의 값을 보여주어 섬유를 혼입한 경우 콘크리트의 강도에 상관없이 부착강도를 증가시키는 효과가 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원 (교육인적자원부 학술연구구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었고 이에 감사드립니다 (KRF-2008-331-D00776).

참고문헌

1. ACI Report 440R, "State-of-the-Art Report on Fiber Rein-

forced Plastic Reinforcement for Concrete Structure," American Concrete Institute Committee 440, 1996, pp. 1~30.

2. 원종필, 박찬기, 김황희, 이상우, "강섬유 혼입물에 따른 고강도콘크리트와 GFRP 보강근의 부착특성," 대한토목학회 논문집, 27권, 2A호, 2007, pp. 265~270.

3. Mazloom, M., Ramezani-pour, A. A., and Brooks, J. J., "Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High Strength Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, 2004, pp. 37~357.

4. Shannag, M. J., "High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, 2002, pp. 399~406.

5. Chan, Y. W., Chu, S. H., "Effect of Silica Fume on Steel Fibre Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1167~1172.

6. Reda, M. M., Shrive, N. G., and Gillott, J. E., "Microstructural Investigation of Innovative UHPC," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 2002, pp. 323~329.

7. Bonneau, O., Vernet, C., Moranville, M., and Aitcin, P., "Characterization of the Granular Packing and Percolation Threshold of Reactive Powder Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 1861~1867.

8. Won, J. P., Park, C. G., Kim, H. H., Lee, S. W., and Won, C., "Bond Behavior of FRP Reinforcing Bars in High-Strength Steel fibre-Reinforced Concrete," *Polymers & Polymer Composites*, Vol. 15, No. 7, 2007a, pp. 569~578.

9. Won, J. P., Park, C. G., Kim, H. H., Lee, S. W., and Jang, C. I., "Effect of Fibres on the Bonds between FRP Reinforcing Bars and High-Strength Concrete," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 39, No. 7, 2007, pp. 747~755.

10. Sahmaran, M. and Li, V. C., "Durability of Mechanically Loaded Engineered Cementitious Composites under Highly Alkaline Environments," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 2, 2008, pp. 72~81.

11. 원종필, 임동휘, 박찬기, 한일영, 김방래, "구조용 합성섬유의 최적형상함수 결정," 콘크리트학회 논문집, 2002, 14권, 4호, pp. 474~482.

12. 박찬기, 원종필, 이상우, 김종옥, "구조용 폴리비닐알코올섬유보강 고강도 콘크리트와 탄소섬유 보강 폴리머 보강근의 부착강도," 대한토목학회 정기학술대회 논문집, civil expo 대전, 2008. 10, pp. 1452~1455.

13. ACI Report 440H, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars," American Concrete Institute Committee 440, 2000, pp. 10~30.

14. Sombonsong, W., Harris, H. G., and Ko, K., "Ductile Hybrid Fibre Reinforced Plastic Reinforcing Bar for Concrete Structures: Design Methodology," *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 6, 1998, pp. 655~666.

15. Won, J. P. and Park, C. G., "Effect of Environmental Exposure on the Mechanical and Bonding Properties of Hybrid FRP Reinforcing Bars for Concrete Structures," *Journal of Composite Materials*, Vol. 40, No. 12, 2006, pp. 1063~1076.

16. 원종필, 박찬기, "촉진 열화 환경에 노출된 콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 부착 특성," 대한토목학회 논문집, 24권, 5A호, 2004, pp. 969~979.

17. Vijay, P. V., Aging and Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars," PhD. Thesis, Department of Civil Engineering West Virginia University, Morgantown, West

- Virginia, USA, 1990, pp. 100~168.
18. Soroushian, P., Ravanbakhsh, S., and Nagi, M. A., "Laboratory Evaluation and Field Application of Concrete Reinforcement with Aramid Fiber-Reinforced Polymer Bars," *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 6, 2002, pp. 6, 584~590.
 19. Xial, J. and Falkner, H., "Bond Behavior between Recycled Aggregate Concrete and Steel Rebars," *Construction and Building Materials*, Vol. 21, 2007, pp. 395~401.
 20. Cosenza, E., Manfredi, G., and Realfonzo, R., "Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebar to Concrete," *Journal of Composite Construction*, 1987, Vol. 1, No. 2, pp. 40~45.
 21. Tepers, R., "Cracking of Concrete Cover along Anchored Deformed Reinforcing Bars," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 6, 1979, pp. 3~12.
 22. 변도균, 신현묵, 문제길, 철근콘크리트, 제10판, 동명사, 2008, pp. 194~199.

요 약 본 연구에서는 CFRP 보강근과 고강도콘크리트의 부착강도에 미치는 보강섬유의 표면처리 방법의 효과를 평가하였다. 표면을 친수성 물질로 코팅된 구조용 PVA 섬유 및 기하학적 변형으로 변형된 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유를 보강섬유로 사용하였다. 섬유의 표면처리 방법에 따른 고강도콘크리트의 강도특성을 평가하기 위하여 압축강도 실험을 실시하였다. 고강도콘크리트와 CFRP 보강근 사이의 부착특성은 직접 부착강도시험을 의하여 평가하였다. 시험 결과는 섬유의 표면처리 방법은 고강도콘크리트와 CFRP 보강근 사이의 부착거동에 영향을 미쳤다. 또한 고강도콘크리트에 섬유의 첨가는 할렬균열의 발생 및 성장을 조절함으로써 고강도콘크리트와 CFRP 보강근 사이의 부착거동, 부착강도 및 상대부착강도의 증가시켰다.

핵심용어 : 고강도콘크리트, 부착특성, CFRP 보강근, 보강섬유, 상대부착강도