

탄소섬유 보강시멘트 복합체(CFRC)의 공학적 특성에 관한 실험적 연구(I)

A Study on the Engineering Properties of
Carbon Fiber Reinforced Cement Composites (I)

오 박 승 범 *
Park, Seung Bum

ABSTRACT

In order to discuss the engineering properties of carbon fiber reinforced cement composites with silica fume and silica powder, experimental studies on the CFRC were carried out.

The types of fiber used which are in CFRC are PAN-based carbon fiber and Pitch-based carbon fiber. To examine the effects of types, lengths, contents of carbon fiber and matrices, their properties of fresh and hardened CFRC were tested.

According to the test results, the process technology of light-weight CFRC is developed and their optimum mix proportions are successfully proposed. Also, it can be concluded that the reinforcement of carbon fiber is considerably effective in improving tensile strength, flexural strength, toughness and loss of shrinkage of CFRC compared with conventional mortar.

1. 서론

시멘트계 매트릭스의 섬유강화 소재중 탄소섬유에 의한 CFRC는 그 성능이 극히 우수하여 일본, 미국 등지에서 많은 주목과 각광을 받으면서 경량, 고강도 및 고내구성, 내열성의 고성능 건재로서의 연구개발이 이루어지고 있다. 우리나라에서도 최근 150톤 규모의 PAN계 CF가 생산되고 있고 곧이어 Pitch계 CF가 공업화되기 시작할 것으로 예견되므로 본 연구에서는 선진국 수준의 고성능의 CFRC의 제조 응용을 위하여 조강시멘트, PAN 및 Pitch계 CF 그리고 실리카의 종류에 따른 CFRC의 배합 및 믹싱, 제조 및 형성, 물리적 역학적 성능에 관한 실험적 연구를 수행하였으며 그 결과를 단계적으로 보고한다.

2. 시험개요

2.1 사용재료

2.1.1 탄소섬유

제철화학(주) 제품의 PAN계 탄소섬유 및 Kureha (주) 제품의 Pitch계 탄소섬유를 사용하였으며 그 물성은 표 1.과 같다.

2.1.2 시멘트 및 골재

시멘트는 S사 제품의 조강포틀랜드시멘트를 사용하였고 골재는 S광업제품의 규사분말을 사용하였고 이와 비교고찰을 위하여 남아프리카 A사 제품의 초미분말의 실리카 폼을 사용하였다.

2.1.3 혼화제

고유동화제는 나프탈렌 설판산염계 고흡수물인 일본 K사 제품의 Mighty-150을 사용하고 증점제는 M사 제품의 메틸셀룰로오스 그리고 R사 제품의 Antifoam을 사용하였다.

2.2 배합 및 시험방법

2.2.1 배합

시멘트 매트릭스의 배합은 표 2.와 같이 하였고, 이를 용량 30ℓ의 섬유분산용 Omni-Mixer를 사용하여 혼합하였다.

2.2.2 공시체 성형 및 시험방법

압축 및 인장강도, 단위용적 중량시험은 KSL5104, 5105 및 KSF2409에 준하였고 시험기는 100톤 UTM 및 10톤 Instron 만능시험기를 사용하였으며 직접 인장 변형 측정용 공시체는 그림 1.과 같이 하여 공시체 중앙의 양면에 30mm 와이어 스트레인 게이지를 접부하여 하중-변형 곡선을 X-Y 레코더로 구하였다. 한편 휨시험은 4×4×16cm 공시체를 제조하여 Instron 만능시험기를 사용하여 크로스베드 속도 0.5 mm/min로 중앙집중 재하방식으로 휨시험을 행하고 이때의 하중-처짐 곡선을 레코더로 구하였다.

2.2.3 양생방법 및 시험재령

공중양생은 공시체 형성후 21°C±3°C, 습도 60%의 항온습도에서 재령7일후 시험을 행하였고 오토클래브 양생은 1일간 공중양생후 최고온도 185°C의 조건에서 5시간 고온고압 양생을 행하였다.

3. 시험결과에 대한 고찰

3.1 굳지않은 CFRC의 특성

탄소섬유 혼입율과 탄소섬유 보강시멘트 매트릭스의 flow값과의 관계는 그림 2.에 나타난 바와 같고 실리카의 종류에도 불구하고 탄소섬유 혼입율 증가에 수반하여 flow값은 저하하는 경향을 나타내었다. 또한 골재로 규사분말을 사용한 경우 섬유혼입율과 단위용적 중량과의 관계는 그림 3.에 나타난 바와 같이 섬유혼입율 3%까지는 현저한 중량감소현상을 보였고 그 이상의 혼입율의 경우는 오히려 다소 증가하는 경향을 나타냈으며 PAN계 CF를 사용한 경우가 Pitch계 CF를 사용한 경우에 비하여 약간 높은 경향을 나타

* 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

표 1. 탄소섬유의 물성

Type of Fiber	Fiber Diameter (10 ⁻³ mm)	Specific Gravity	Tensile Strength (kgf/cm ²)	Modulus of Elasticity (10 ⁵ kgf/cm ²)	Elongation (%)
Pitch-based Carbon Fiber	14.5	1.63	7,800	3.8	2.1
Pan-based Carbon Fiber	6.8	1.78	35,000	23.0	1.6

표 2. 시멘트 매트릭스의 배합

W/C (%)	S/C	Unit Weight (kg/m ³)					
		Water	Cement	Silica	S. P.	M. C.	Antifeam
30*	0.40	388	1295	518	77.8	-	-
30**	0.40	375	1250	500	75.0	-	-
33*	0.50	508	981	400	9.6	4.8	-
113*	0.70	658	582	400	-	2.9	5.8

Note : * Silica Powder, ** Silica Fume

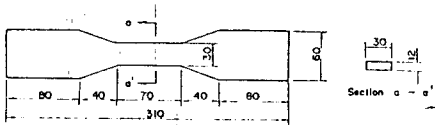


그림 1. 직접 인장 변형 측정용 공시체

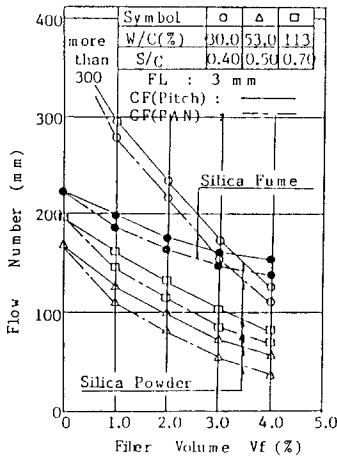


그림 2. CF 혼입율과 flow값과의 관계

내었다.

3.2 CFRC의 기전비중 및 압축강도

고순도의 미립 규사분말을 사용한 CF 혼입율에 따른 CFRC의 기전비중은 그림 4.와 같이 오토클래브 양생의 경우 공중양생 경우에 비하여 다소 경량화 경향을 나타내었다. 한편 그림 5.는 탄소섬유 혼입율에 따른 압축강도의 시험결과를 실리카의 차이에도 불구하고 CF 혼입율의 증가에 수반하여 전반적으로 압축강도는 약간 저하하는 경향이 있으나, 실리카 함을 사용한 CFRC의 압축강도는 W/C=30%, S/C=0.40의 경우 1000kg/cm² 이상의 고강도를 나타내었고, 고순도의 규사분말을 사용한 경우에는 Vf=1.0~5.0%에서 800kg/cm² 이상의 고강도를 나타내었다.

이는 매트릭스중에 공극이 일정 0.55mm 정도의 초미립분말에 의해 충전되어 조직이 밀실화되고 오토클래브 양생에 의한 반응생성물에 의한 것으로 추정된다.

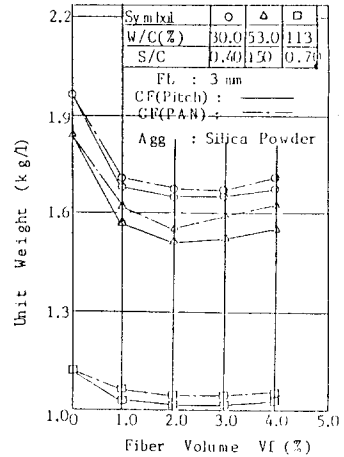


그림 3. CF 혼입율과 단위용적중량과의 관계

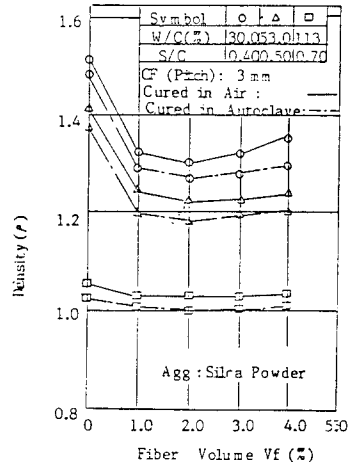


그림 4. CF 혼입율에 따른 CFRC의 기전비중

3.3 CFRC의 인장강도 및 변형특성

그림 6.는 탄소섬유 혼입율과 CFRC의 인장강도의 관계를 나타낸 것으로, 탄소섬유 혼입율의 증가에 따라 CFRC의 인장강도는 거의 직선적으로 증대하는 경향을 나타내었고 PAN계 탄소섬유를 사용한 경우가 Pitch계 탄소섬유를 사용한 경우보다, 그리고 실리카 함의 경우가 규사분말을 사용한 경우보다 인장강도가 높게 나타났다.

한편, 그림 7.는 CFRC의 인장응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로 탄소섬유 혼입율의 증가에 수반하여 CFRC의 신장능력은 증가하는 경향이 있다. 그러나 섬유혼입을 증가에 따라 탄성계수는 다소 저하하는 경향을 나타냈는데 이는 탄소섬유 혼입율의 증가에

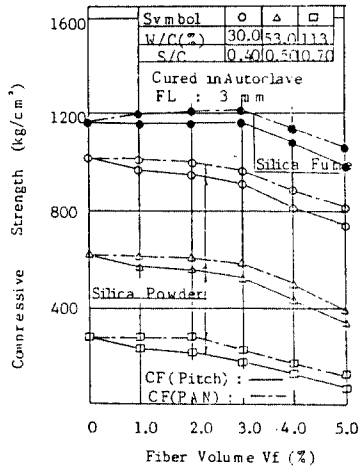


그림 5. CF 혼입율에 따른 압축강도의 시험결과

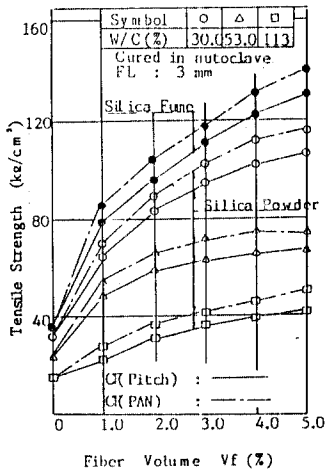


그림 6. CF 혼입율과 인장강도와의 관계

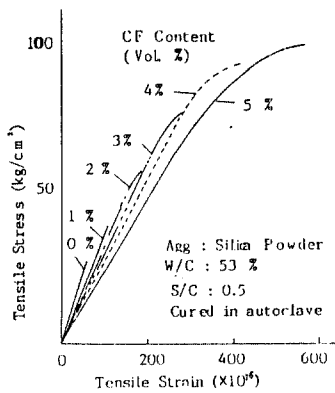


그림 7. CFRC의 인장응력-변형을 곡선

따라 혼입할때 연행공기량이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

3.4 CFRC의 휨강도 및 변형특성

CF 단섬유 혼입율과 휨강도와와의 관계는 그림 8.에 나타난 바와 같이 탄소섬유 혼입율 증가에 따라 CFRC의 휨강도는 실리카의 종류에 관계없이 전반적으로 현저히 증가하는 경향을 나타내었으나 섬유혼입율 3%이상에서는 강도 증가율이 둔화되거나 다소 저하하는 경향을 나타내었다.

한편 그림 9.는 CFRC를 혼합하여 형틀에 충전한 후 다시 가압하여 재령 1주 및 4주의 강도를 측정하고 탄소섬유의 길이를 3, 6, 10, 12mm로 하여 휨강도의 변화를 측정한 것으로 성형압력이 0.1~90kg/cm²의 범위에서 성형압력이 높을수록 휨강도는 다소 증가하는 경향을 보였고, 섬유길이는 3~6mm의 경우가 섬유분산성이 우수하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 그림 10.은 CFRC의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것으로 탄소섬유의 증가에 따라 휨변형 성능은 현저히 개선됨을 알 수 있다.

오토클래브 양생의 경우 매트릭스 자체가 고강도화됨과 함께 섬유와 매트릭스로부터 인발이 감소하고 파단섬유가 증가하기 때문인 것으로 추정된다.

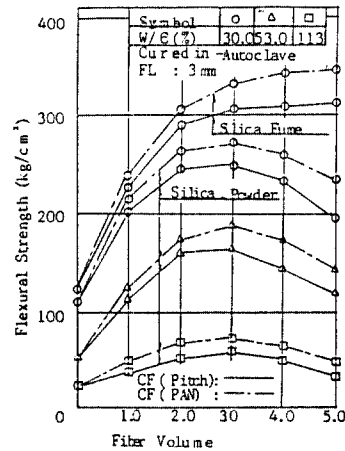


그림 8. CF 단섬유 혼입율과 휨강도와의 관계

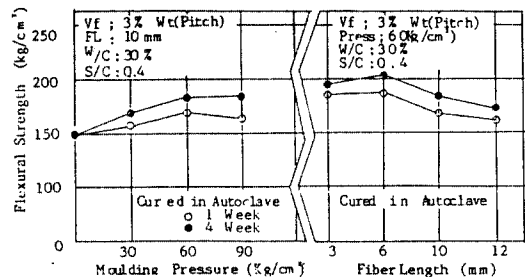


그림 9. 섬유길이에 따른 휨강도의 변화

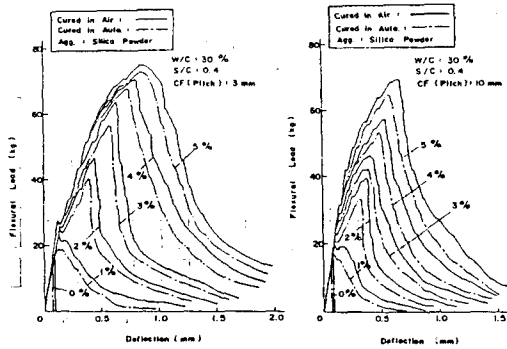


그림 10. CFRC의 하중-처짐 곡선

3.5 CFRC의 건조수축

CFRC 제품을 제조함에 있어 변형, 비틀림 및 곡률변화등이 생기면 구조적 미관상의 문제가 발생되므로 CFRC의 건조수축 변화를 최소화할 양생방법 채용이 중요하다. 따라서 그림 11.은 탈형직후를 건조수축 측정의 기점으로 한 경우 오토클래브 양생, 수중양생, 공중양생의 3가지 조건에 대한 재령 6개월까지의 건조수축 변화를 측정한 것이다. 따라서 CFRC의 건조수축을 최소화하기 위하여는 오토클래브 양생이 요망되며 섬유길이에 의한 영향은 CF 10mm에 비하여 3mm의 경우가 수축저감효과가 다소 우수한 경향을 보였고, 또한 전반적으로 건조재령의 증가에 수반하여 건조수축은 증가하나 오토클래브 양생 CFRC는 건조수축이 양생시 거의 끝나고 그후의 변화는 매우 작다.

한편 CF종류에 따른 영향은 PAN계 CF를 사용한 경우가 Pitch계 CF를 사용한 경우에 비하여 다소 수축저감효과가 큰 양상을 나타내었다.

4. 결론

탄소섬유 보강시멘트 복합체(CFRC)의 재조성형, 재강도, 응력-변형 및 건조수축등 공학적 특성은 섬유판계요인, 매트릭스 관계요인, 릭스판계요인에 크게 영향을 받고, 또한 양생조건에서도 상당한 영향을 받음이 확인되었으며, 본 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사용 실리카의 종류에 불구하고 탄소섬유 혼입율의 증가에 수반하여 flow값은 거의 직선적으로 저하하고, 실리카 흙을 사용한 경우 Silica powder를 사용한 경우에 비하여 유동성과 섬유 분산성 그리고 증점효과가 양호하였으며 섬유혼입율 3%까지

는 현저한 질량감소현상을 나타내었으나 그 이상의 혼입율에서는 다소 증가하였고, PAN계 CF를 사용한 경우가 Pitch계 CF를 사용한 경우보다 약간 높은 경향을 나타내었다.

- (2) CFRC의 기전비중은 물시멘트비가 클수록 현저히 작고 섬유혼입율 약 3%까지는 감소하는 경향을 보였고, 오토클래브 양생의 경우가 공중양생의 경우보다 다소 경량화 경향을 보였으며, 압축강도는 전반적으로 동등수준이거나 감소하는 경향을 나타내었으며 실리카 흙을 사용한 경우가 규사분말을 사용한 경우보다 우수하였다.
- (3) 탄소섬유 혼입율의 증가에 따라 CFRC의 인장강도는 혼입율 약 5%까지는 실리카의 종류에 불구하고 거의 직선적으로 증대하는 경향을 보였고, 초기립의 실리카 흙을 사용한 경우가 규사분말을 사용한 경우보다 다소 높게 나타났다. 또한 섬유혼입율의 증가에 따라 그 신장능력도 증가하는 경향을 보였고, 인장 탄성계수는 다소 감소하는 경향을 보였으며, 이는 혼합할때 섬유혼입율 증가에 수반하여 연행공기의 증가에 기인한 것으로 판단된다.
- (4) CFRC의 휨강도는 섬유혼입율의 증가에 수반하여 현저히 증가하고, 특히 실리카 흙을 사용한 경우는 $W/C=30\%$, $S/A=0.4$, $V_f=5.0\%$ 인 경우 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 약 5배이상의 휨강도를 나타내었으며, 규사분말에 비하여 현저한 경향을 나타내었다. 또한 성형압력이 $0.1\sim 90\text{kg/cm}^2$ 범위에서 성형압력이 높을수록 다소 증가하는 경향을 보이고, 섬유길이 3, 6mm를 사용한 경우가 10, 12mm를 사용한 경우보다 약간 증가하는 경향을 보였다.
- (5) 탄소섬유 혼입율 증가에 수반하여 CFRC의 휨변형성능은 현저히 개선되며, 섬유길이 3mm를 사용한 경우가 10mm를 사용한 경우보다, 그리고 공중양생의 경우가 오토클래브 양생의 경우보다 우수한 휨인성을 나타내었다. 이는 오토클래브 양생시 매트릭스의 고강도화에 따른 부착력 증대로 섬유의 인발이 감소하기 때문인 것으로 생각된다.
- (6) 건조수축 변화는 오토클래브 양생의 경우 재령 6개월에서 공중양생의 경우에 비해 약 1/4, 수중양생의 경우보다 1/6정도로 작고, 또한 PAN계 CF의 경우가 Pitch계 CF의 경우보다 작았으며, 또한 섬유길이 3mm의 경우가 10mm보다 약간 작았다. 따라서 CFRC에 의한 박판제품등의 2차제품 제조시 건조수축을 최소화하기 위하여 오토클래브 양생이 매우 중요한 것으로 생각된다.

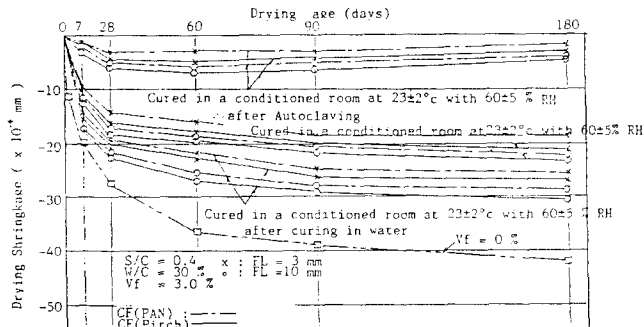


그림 11. 양생조건에 따른 건조수축의 변화