

슬러리법에 의한 탄소섬유보강 시멘트복합체의 제조에 있어서 계면구조가 물성에 미치는 영향

민병길, 최응규*, 손태원**

금오공과대학교 고분자·섬유디자인공학부, *삼성건설(주) 기술연구소, **영남대학교 섬유학부

1. 서론

탄소섬유보강 콘크리트(CFRC)는 시멘트나 몰탈에 길이 3-10mm, 직경 15-20 μ m의 탄소섬유를 부피비로 2-4% 균일하게 분산시킨 것으로서, 종래의 콘크리트에 비하여 각종 역학적 성질이나 내구성, 형태안정성이 우수하여 신뢰성이 높은 건축용 신소재이다.[1,2] 이것은 탄소섬유가 내구성이 우수하고, 시멘트나 모르타르의 강알칼리중에서도 안정하여 열화되지 않기 때문에 이러한 탄소섬유로 보강시킨 CFRC는 장기간 강도변화가 생기지 않고, CFRC의 양생법으로서 콘크리트제품의 형태안정성에 유리한 고온고압 증기양생법(180°C, 10기압)의 적용이 가능하기 때문이다. 이러한 CFRC의 연구개발은 1980년대 초에 일본에서 시작되어, 1982년에는 이라크 바그다드시에 건설된 이라크알샤이드 기념비 및 박물관의 마누먼트돔(철골조, 높이40m)의 외장타일 및 경량판넬로서 세계에서 최초로 이 CFRC가 일본 녹도건설에 의하여 대량(10,000m²) 시공되었다. 그 후, 일본에서 CFRC는 빌딩의 내장타일이나, WTA(Wall Through Air Condition)용 창태 등의 용도로 많이 적용되어오고 있다.

탄소단섬유로 시멘트계 매트릭스중에 3차원 무방향성으로 배향시킨 CFRC는 단섬유의 배향이나 섬유길이의 효과(섬유와 매트릭스의 부착력 효과)의 영향을 받기 때문에 혼입한 섬유의 유효성은 연속섬유에 의한 일축보강이나 단섬유의 2차원 랜덤 보강의 경우에 비하여 상당히 낮다. 그러나, 실제로는 연속섬유를 이용한 건축부재의 양산기술은 확립되어 있지 않고, 단섬유의 2차원 무방향성으로 보강의 경우는 뿔칠공법에 한정되어 있는 것이며, 단섬유를 혼합믹서내에서 3차원 무방향성으로 분산배향시키고, 이것을 종래의 콘크리트와 같은 모양의 형틀내에 부어 넣어 가압성형하는 것이 가능하면, 역학적 성질이 다소 저하하는 것은 생산성의 향상효과나 그 외의 물리적 특성의 효과 향상(건조 수축에 기인하는 균열발생의 억제 효과)에 의하여 충분한 보상이 얻어진 다.

탄소섬유는 무기질섬유이므로 석면처럼 내알칼리성이면서 내열성, 고강도 및 고인성을 지니고 있으므로 매우 뛰어난 보강섬유이다. 따라서, 고강도 건축용 판넬은 탄소섬유를 보강섬유로 사용하면 적합하다고 할 수 있다. 그러나 탄소섬유는 가격이 비싼 결점이 있고, 시멘트와 계면결착력이 불량하다는 문제점이 있다. 탄소섬유는 현재 콘크리트 보강섬유로써 널리 사용되고 있지만 시멘트복합판넬의 보강섬유로서는 아직 실제로 사용되고 있지는 않다. 탄소섬유는 시멘트 및 무기충전재와 계면결착력이 부족한 취약점을 지니고 있으므로, 이를 보완하기 위하여 표면에 에폭시로 처리한 것이 에폭시코팅 탄소섬유이다.

본 논문은 무기계 보강섬유로서 탄소섬유와 에폭시코팅 탄소섬유로 강화시킨 FRC를 다량의 물에 각 성분을 분산시킨 슬러리로부터 제조하는데 있어서, 보강섬유와 매트릭스와의 결합을 높이기 위하여 계면구조를 강화하는 방법에 관한 연구이다.

2. 실험

본 연구에 사용할 시멘트는 국내의 한라시멘트를 선택하였다. 한라시멘트의 입자크기 분포는 5 ~ 100 μm 사이였으며, 40 μm 이상이 약 20%, 평균 표면적은 3229 cm^2/g 이었다. 시멘트보강용 섬유로 사용한 탄소섬유는 일본 도레이사에서 구입한 PAN계 탄소섬유로서 표면에 에폭시코팅 처리하지 않는 탄소섬유(CF)와 에폭시코팅 표면처리가 처리된 에폭시코팅 탄소섬유(E-CF) 등 두가지를 사용하였다. 두 종류의 탄소섬유 물성은 동일하며, 단지 표면특성만 다를 뿐이다. 그 물성은 table 1과 같다.

Table 1. Physical properties of carbon fibers used for FRC

Diameter (d) (μm)	Length (l) (mm)	Aspect ratio (l/d)	Density (g/cm^3)	Tensile strength (kg/cm^2)	Initial modulus (kg/cm^2)	Elongation (%)
10	6	600	1.78	1,000~1,200	3,000~3,300	1.0

섬유와 시멘트의 계면결착제 (coupling agent)로는 고중합도의 폴리아크릴아미드 (PAM)를 사용하였다. 수용성인 nonion성 (N-PAM)과, 아미드기를 부분적으로 가수분해하여 anion기와 cation기로 치환한 anion성 (A-PAM) 및 cation성 (C-PAM)의 3 종류 PAM을 사용하였다. 충전제로서는 국내의 공영분체회사로부터 제공받은 카올린 (kaolin)을 사용하였다.

섬유표면에 시멘트의 부착성을 조사하기 위하여, 물 1/에 시멘트와 섬유를 각각 13.5g, 1.5g (고형분 합계 15g)을 혼합한 후에 PAM의 종류와 함량을 변화시키면서 혼합물을 제조한 후에, 이를 40메쉬 필터로 거른 다음, 100 \pm 5 $^\circ\text{C}$ 에서 24시간 건조한 후에 무게를 측정하여 섬유와 시멘트의 결합도를 계산하였다.

FRC시편은 다음과 같은 과정을 거쳐 제조하였다. 혼합용 믹서에 물 1/를 넣고 펄프를 고형분 총무게에 대해 2.5% 혼합한 후, 30초 동안 헤면하여 균일하게 분산시킨 다음, 계면결착제인 폴리아크릴아미드와 보강섬유를 함량별로 넣고 2분간 완전하게 혼합시켜서 균일한 분산물을 만든 후, 충전제 (고형분에 대한 무게비로 20%)와 시멘트를 넣고 2분 동안 혼합시켰다. 슬러리 상태로 완전하게 분산된 혼합 슬러리를 가로 20cm, 세로 5cm, 높이 20cm의 성형압축시편용 형틀 및 인장시편용 형틀에 넣고 최대 하중 30톤의 압축기를 이용하여 50 kg/cm^2 의 압력을 가하여 압축 성형하였다. 이때 보강섬유, 펄프, 시멘트 및 충전제의 총 무게합은 휨시편 경우에는 150g, 인장시편 경우에는 100g 으로 일정하게 하였다. 양생은 상저온 자연 양생법을 이용하였는데, 성형된 시멘트 복합체 시편을 온도 22 \pm 2 $^\circ\text{C}$, 상대습도 70 \pm 5%의 항온항습기내에서 28일간 시편을 양생하였다.

제조한 복합체를 사용하여 고형분의 결합도, 함수율 및 흡수율, 선팽창률 및 선수축률, 휨강도시험, 인장 강도시험을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

고강도의 탄소섬유로 강화시킨 FRC를 다량의 물에 각 성분을 분산시킨 슬러리로부터 제조하는데 있어서, 보강섬유와 매트릭스와의 결합도를 높이는 것이 가장 중요한 인자이다. 매트릭스 성분과 섬유상 성분으로 구성된 일반적인 복합재료에 있어서, 과피거동이나 탄성율은 매트릭스와 섬유의 상대적 강직성, 매트릭스와 섬유의 변형도의 상용성과 섬유의 치수 및 섬유-매트릭스의 계면접착강도에 달려 있다. 본 연구에서 사용한 슬러리법에서는 과량의 물에 슬러리 상태에서 섬유와 시멘트 입자가 물리적, 화학적인 인력으로 결합하지 않으면 섬유와 시멘트의 분리가 일어나므로 시멘트복합체의 제조가 용이하지 않을 뿐만 아니라, 건축재료로써 사용할 수 있는 물성도 얻을 수 없다. 따라서, 슬러리법으로 FRC를 제조하는 경우에 있어서, 섬유와 매트릭스 사이의 계면결합력은 복합체의 물성에 영향을 미치는 인자중에서 가장 핵심적인 인자이다.

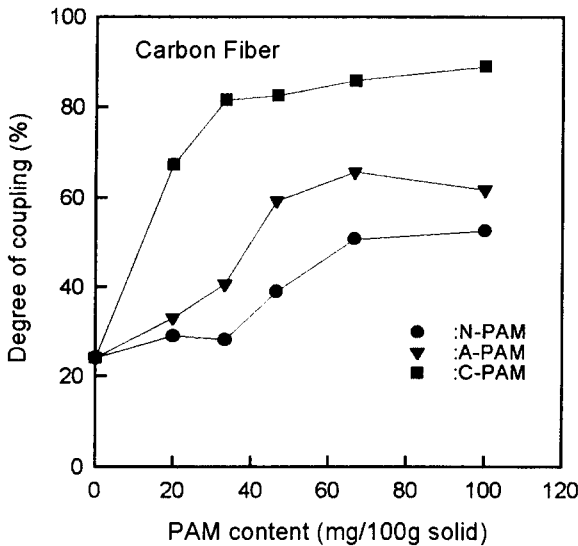


Figure 1. Effect of polyacrylamide on the coupling of the cement to the carbon fibers in slurry state.

별로 없었다. PVA섬유나 PAN섬유와 같은 유기섬유로 보강한 FRC보다 함수율은 약간 낮은 경향을 보였다.

건축외장 판재에 있어서 선펡창을 및 선수축율은 시공상 및 건축외장에 미치는 영향이 매우 크다. 선펡창을 및 선수축율은 보강섬유와 매트릭스와의 계면결착력 및 계면치밀도에 따라 좌우된다. 선펡창을 및 선수축율은 $0.10 \pm 2\%$ 이내가 시공간극면에서 용인될 수 있는 범위이다. 탄소섬유 종류에 관계없이 섬유의 함량이 증가할 수록 선펡창을 및 선수축율이 모두 커짐을 알 수 있다. 이것 역시 섬유의 함량이 높아질수록 복합체 내부에 빈 공간이 많이 생겨 치밀도가 낮아지므

Figure 1과 2는 각각 표면처리하지 않은 탄소섬유와 표면처리한 탄소섬유에 있어서 PAM의 종류 및 함량에 따른 탄소섬유와 시멘트의 결합효과를 나타낸 것이다. 미표면처리 탄소섬유의 경우에는 C-PAM결착제가 가장 효과적으로서 최대 결합도가 약 90%정도로 나타났으며, 에폭시코팅 탄소섬유의 경우에는 A-PAM이 최적 결착제로서 최대 86%의 결합도를 나타내었다.

이 결과로부터 미처리 탄소섬유는 C-PAM결착제를, 에폭시표면처리 탄소섬유는 A-PAM을 적용하여 슬러리법으로 FRC 시편을 제작하여 그 물성을 조사하였다.

건축외장 판재인 경우에는 흡수율 및 함수율이 매우 민감하며, 흡수율과 함수율과의 차이가 거의 없는 것이 내후성 측면에서는 대단히 유리하다고 판단된다. 탄소섬유나 에폭시코팅 탄소섬유에 따른 함수율 및 흡수율의 차이는

로서 흡수율이 커짐에 따른 효과와 섬유와 시멘트의 계면결착력의 강도에 좌우되는 것으로 생각된다.

FRC의 비중에 있어서는 최적 PAM결착제를 사용하고 섬유함량을 전체에 대해 무게비로 2.5%로 하였을 경우에 약 1.5-1.6 g/cm³로 나타났으며, 에폭시코팅 탄소섬유가 코팅하지 않은 탄소 섬유보다 약간 높게 나타남으로써 내부구조가 보다 치밀한 것으로 생각된다.

인장강도의 경우, 섬유함량이 2%에서 3%로 증가하여도 큰 변화는 나타나지 않았다. 에폭시코팅 탄소섬유 복합체의 인장강도가 탄소섬유 복합체의 인장강도 보다 상대적으로 높게 나타났다. 섬유의 함량이 2.5%일 때 신도가 가장 높고 탄성율은 가장 낮게 나타났다. 신도가 높다고 하는 것은 파괴가 쉬게 일어나지 않는다는 것을 의미하므로, 섬유와 매트릭스사이의 계면 결착력에 의하여 복합체가 인장력에 견디는 능력이 우수하다고 볼 수 있다. 이것은 인장하중하에서 파괴된 복합체의 파쇄단면을 관찰한 사진에서 잘 알 수 있었다.

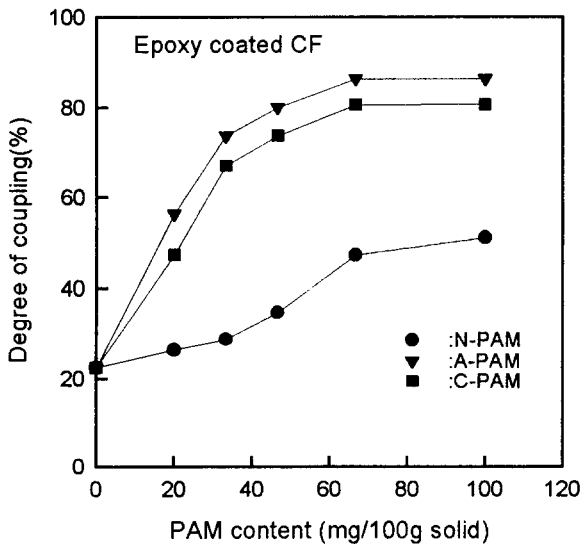


Figure 2. Effect of polyacrylamide on the coupling of the cement to the carbon fibers coated with epoxy in slurry state.

복합체의 보강섬유로는 유기섬유가 유리하고, 고강도 및 고탄성을 요구하는 시멘트 복합체의 보강 섬유로는 탄소섬유가 바람직한 것임을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 小林一輔, “纖維補強 エンクリート-特性と應用-,” 오ーム社, 1981. 6
- [2] 複合材料 研究委員會, “纖維強化 セメント エンクリート 複合材料の技術の現狀と將來”, 日本 엔クリート 工學協會, 1986. 10
- [3] 민병길, 최응규, 손태원, 한국섬유공학회지, 인쇄중.