

슬러리법에 의한 탄소섬유보강 시멘트복합체의 제조에서 보강섬유와 계면결착제와의 상관특성

Characteristics Correlations Between Fiber-Reinforced and Interfacial Adhesion in Carbon fiber reinforced Cement composite Prepared by Slurry Method.

최응규*
Choi, Eung-Kyoo

Abstract

The objective of the study is to examine the characteristic correlations between reinforcing carbon fiber and interfacial adhesion agent since the interfacial adhesion strength between reinforcing carbon fiber and matrices is believed to be an essential element influencing the physical properties in carbon fiber reinforced cement composite using slurry method.

The integrity of interfacial adhesion between reinforcing fiber and cement not only affects the quality of fiber reinforced cement composite but also influences to a large degree the physical properties of the cement composite when producing carbon fiber reinforced cement composite using slurry method. Having analyzed the physical properties i.e., water content, tensile strength, flexural strength and flexural toughness of carbon fiber reinforced cement composite specimens, C-PAM(cation polyacrylamide) was determined to be an optimum interfacial adhesion agent. The study has also demonstrated that interfacial adhesion strength varies largely on the content and type of the reinforcing fiber.

Judging from magnified view of the tensile shear cross-section using VMS(video microscope system), interfacial adhesion strength between reinforcing fiber and matrices is affected by the type of interfacial adhesion agent.

According to the result of the experiments, C-PAM was determined to be an ideal interfacial adhesion agent when using carbon fiber in producing carbon fiber reinforced cement composite with the optimum content of carbon fiber being established.

키워드 : 슬러리법, 시멘트복합체, 탄소섬유, 계면결착제, 섬유함량

Keywords : Slurry method, Cement composite, Carbon fiber, Interfacial adhesion, Fiber content

1. 서론

건축물이 고층화 및 고기능화되면서 건축자재에 요구되는 성질도 복잡다양하게 되어가고 있으므로, 각종 건축자재의 장·단점을 보완하는 건축복합재료의 연구개발이 활성화되고 있다. 또한 건축자재로서 사용되고 있는 시멘트복합재료분야에 있어서도 건축용 섬유강화복합재료(FRC)에 관한 연구도 활발하여 섬유보강 시멘트복합체의 개발도 매우 의욕적이다.

과거에는 시멘트매트릭스의 보강섬유로 석면이 보편적으로 사용되고 있었으나, 미세한 석면분체가 폐암의 원인이 된다는 문제가 제기됨에 따라서 석면을 거의 사용하지 않고, 현재에는 무기섬유를 이용한 섬유보강 시멘트복합체를 개발하여 시멘트복합판넬로서 시판되고 있다.

본 논문은 탄소섬유가 무기질섬유로서 석면처럼 내알칼리성이며 내열성, 고강도 및 고인성을 지니고 있으므로 탄소섬유를 보강섬유로 사용하는 것이 적합하다고 판단하여 시멘트복합체의 소재로 사용하였다. 또한 계면결착제는 섬유보강 시

멘트복합체의 매트릭스 밀실성 뿐만 아니라 물리적 특성 및 역학적 물성을 좌우하는 주요한 계면부착 인자이므로 계면결착제를 사용하는 것이 보강섬유와 매트릭스와의 계면결착을 강화하는데 가장 핵심적인 요소라고 판단되었다. 따라서 본 실험에서는 탄소섬유의 함량을 변화시키면서 각 계면결착제(PAM : polyacrylamide)에 따른 탄소섬유강화 시멘트복합체의 시편을 제작하여 그에 따른 물리적 특성 및 역학적 물성을 고찰하여 탄소섬유의 최적함량을 결정하였다. 또한 탄소섬유의 함량변화와 계면결착제가 내부의 계면구조에 미치는 영향을 VMS(Video Microscope System)로 관찰하여 단면파쇄 형상을 분석 고찰하였다.

따라서 본 논문은 슬러리법을 이용한 탄소섬유보강 시멘트복합체에서 보강탄소섬유와 매트릭스사이의 계면결착제 특성, 특히 탄소섬유 표면의 성질을 파악한 후, 계면결착제에 따른 섬유표면처리 효과를 고찰함과 아울러 최적 계면결착제(Coupling agent)를 선정하고, 탄소섬유보강 시멘트복합체의 제조에 있어서 각 구성소재의 최적조건을 제시하는 것이 본 연구의 주된 목적이다.

* 정회원, 현대건설(주) 건축사업본부, 공학박사

2. 탄소섬유보강 시멘트복합체의 실험재료

2.1. 시멘트

본 연구에 사용한 시멘트는 국내의 H사 시멘트를 선택하였다. <표 1>은 H사 시멘트에서 시판하는 보통 포틀란드시멘트의 성분을 분석한 것이다. H사 시멘트의 입자크기 분포는 5~10 μ m 이상이 약 20%이며, 평균 비표면적(분말도)은 3229 cm²/g이었다.

표 1. 보통 포틀란드시멘트의 성분

성분	함량(%)	성분	함량(%)
SiO ₂	20.90	Na ₂ O	0.28
Al ₂ O ₃	5.73	MgO	3.02
Fe ₂ O ₃	3.03	SO ₃	2.07
CaO	62.61	K ₂ O	1.12

2.2. 플라이애쉬(Fly ash : FA)

현재 콘크리트 혼화재로 사용되고 있는 플라이애쉬는 천연의 화산재를 대체하는 인공 Pozzolan재로서 화력발전소의 미분탄회가 천연 Pozzolan보다 우수하다는 것이 발견되어 플라이애쉬라고 칭하고 콘크리트의 혼화재로 이용하고 있다.

<표 2>는 플라이애쉬의 성분 및 함량을 나타낸 것이다.

표 2. 플라이애쉬의 성분 및 함량

화학생분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	기타
함량(%)	55.3	26.0	2.17	0.78	0.29	15.46

2.3. 탄소섬유(Carbon Fiber : CF)

탄소섬유는 탄소의 함량이 95% 이상인 무기질섬유로서, 내열성이 우수하고 강도와 탄성율이 뛰어난 보강섬유이다. 장섬유 형태의 탄소섬유는 유기매트릭스와 사용하여 스포츠용품, 우주항공기의 고성능 복합재료로 많이 이용되며, 단섬유는 브레이크 등의 마찰재료나, 시멘트 등의 보강소재로 사용되고 있다.

탄소섬유는 폴리아크릴로니트릴(PAN) 섬유를 열처리하여 얻어지는 PAN계 탄소섬유로써, 일본 도레이사에서 구입한 PAN계 탄소섬유를 본 실험에서 사용하였다. 그에 대한 물성은 <표 3>과 같다.

표 3. 탄소섬유의 물성

직경(d) (μ m)	길이(l) (mm)	형상비 (l/d)	밀도 (g/cm ³)	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	신장 (%)
10	6	600	1.78	1000 ~1200	3000 ~3300	1.0

또한, 본 실험에서 사용한 탄소섬유는 폴리아크릴로니트릴(Polyacrylonitril : PAN) 섬유를 열처리하여 얻어지는 탄소 단섬유로서 주사현미경(SEM)으로 관찰한 단면형태 <사진 1>은 아래와 같다. 건축용 탄소 단섬유의 단면형태가 톱니바퀴 모양의 단면형상을 가지고 있음을 알 수가 있었다.

사진 1. 단면형상 : 탄소섬유의 단면형상

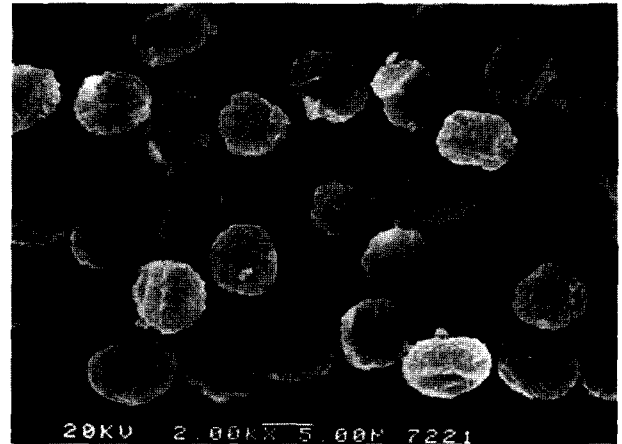


사진 1. 단면형상 : 탄소섬유의 단면형상

2.4. 재생 아황산펄프(Sulfite pulp : SP)

재생 아황산펄프는 목재의 리그닌을 비롯한 비섬유소 물질을 용해 제거한 순수한 상태의 펄프를 중급지, 신문지, 포장지, 비스코오스 인견 및 셀로판등의 원료로 사용한 후에 폐지로 된 종이를 회수하거나, 연질목재 펄프로 만든 Kraft용지를 사용한 후에 폐지로 된 종이를 회수한 뒤, 다시 펄프상태로 해면하여 만든 재생펄프를 건축자재 혼합용 펄프로 사용하고 있다. 이것을 재생 아황산 펄프라고 하며 또는 공업용 아황산 펄프라고도 한다. 시멘트 복합재료용 재생 아황산펄프는 재생 펄프이므로 피브릴이 잘 발달되어 있지만 피브릴화된 펄프길이가 짧다. 그러나 보강섬유와 함께 사용하면 펄프효과가 훨씬 더 증진된다. 따라서 본 연구에서는 피브릴이 잘 발달되어 있는 재생 아황산펄프(Sulfite Pulp)를 사용하였다.

2.5. 계면결착제(Interfacial adhesion : PAM)

폴리아크릴아미드(Polyacrylamide : PAM)는 고분자계 계면결착제(Polymer Coupling Agent)로서 고분자 결착제라고도 한다. PAM은 소수성 무기물에 효과적인 것과 친수성 유기물에 유효한 것, 상당히 부피가 큰 응집성(Floc)을 형성하는 것, 조밀한 응집성을 형성하는 것, 그 중간적인 성질을 갖는 것, 오히려 무기물과 병용하면 효과가 특히 현저한 것 등 여러 종류가 있다. 본 실험에서는 탄소 보강섬유의 표면처리제로서 수용성인 Nonion성(N-PAM), Anion성(A-PAM) 및 Cation성(C-PAM)의 3종류 PAM을 사용하였다.

N-PAM은 폴리아크릴아미드를 주성분으로 하는 고분자물질이고, A-PAM은 폴리아크릴아미드의 아미드기를 부분적으로 가수분해하여 Anion기로 치환하는 것이다. 또, C-PAM은 아크릴아미드기를 부분적으로 Cation기로 치환한 고분자 결착제이다.

3. 시멘트복합체의 시편제작 및 물성시험방법

3.1. 탄소섬유와 시멘트와의 결착도 조사방법

탄소섬유표면에 시멘트의 부착성을 조사하기 위하여 시멘트와 보강섬유를 과량의 물에 혼합한 후, 40메쉬의 필터로 거른 다음 VMS 현미경으로 배율 500배로 관찰하였다. 현미경영상을 모니터로 관찰하고 컬러 프린터로 화상을 얻었다. 보강섬유에 대하여 PAM 결착제의 종류를 변화시켜가면서 결착성을 관찰하므로써 보강탄소섬유에 적합한 PAM 결착제의 종류를 결정하는 근거로 삼았다.

결착특성을 정량적으로 비교하기 위하여 다음과 같은 실험을 하여 결착율을 얻었다. 물 1ℓ에 시멘트와 섬유를 각각 13.5g 및 1.5g을 혼합한 후에 PAM의 종류와 함량을 변화시켜가면서 혼합물을 제조한 후에 이를 40메쉬 필터로 거른 다음, 100±5℃에서 24시간 건조한 후에 무게를 측정하고 다음 식에 의하여 보강섬유와 충전재와의 결착도를 계산하였다.

$$\text{결착율} = \frac{\text{여과/건조 후의 시멘트의 잔류량(g)}}{\text{시멘트의 초기 함량(g)}} \times 100\%$$

3.2. 탄소섬유보강 시멘트복합체의 배합 및 성형

탄소섬유보강 시멘트복합체의 공시체 제조과정에서 슬러리법(Slurry method)은 다음과 같다. 먼저, 혼합용 믹서에 물 1ℓ를 넣고 건조된 펄프를 고품분 총무게에 대해 3.0% 혼합한 후, 30초 동안 해면하여 균일하게 분산시킨 다음, Al₂(SO₄)₃와 보강섬유 계면결착제인 폴리아크릴아미드를 넣는다. 여기

멘트 및 충전재의 총 무게합은 휩시편 경우에는 150g, 인장시편 경우에는 100g으로 일정하게 하였다. 양생은 상온 자연양생법을 이용하였는데, 성형된 시멘트복합체 시편을 온도 22±2℃, 상대습도 70±5%의 항온항습기내에서 28일간 시편을 양생하여 보존하였다.

3.3. 탄소섬유보강 시멘트복합체의 시편배합조건

본 연구는 3.2 항목에 의한 시편제작 배합을 <표 4>와 같이 배합조건으로 하였다.

3.4. 탄소섬유보강 시멘트복합체의 물성시험방법

양생한 시편을 사용하여 다음과 같은 방법으로 물성을 측정하였다. 이때, 결착도 조사와 함수율의 시험값은 5개 시편의 평균값으로 구하였으며, 휩강도 및 인장강도 시험값은 10개의 시편 평균값으로 계산하였다.

1) 시멘트복합체의 결착도 조사

시멘트복합체에 있어서 시멘트와 보강섬유, 펄프 및 섬유에 결합되어 여과되지 않은 시멘트 및 충전재의 결착도는 다음 식으로 계산하였다.

$$R(\%) = \frac{W_0 - W_{loss}}{W_0} \times 100$$

R : 결착도

W₀ : 처음에 투입한 시멘트와 충전재의 무게

W_{loss} : 과량 물과 함께 손실된 시멘트와 충전재의 무게

표 4. 탄소섬유보강 시멘트복합체의 시편배합조건

시편 Code	시멘트 함량(wt%)	탄소섬유		계면결착제		충전재		재생펄프	
		종류	함량(wt%)	종류	함량(wt%)	종류	함량(wt%)	종류	함량(wt%)
CC2	70%	CF	2%	C-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CC2.5	70%	CF	2.5%	C-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CC3	70%	CF	3%	C-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CC3.5	70%	CF	3.5%	C-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CA2	70%	CF	2%	A-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CA2.5	70%	CF	2.5%	A-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CA3	70%	CF	3%	A-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CA3.5	70%	CF	3.5%	A-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CN2	70%	CF	2%	N-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CN2.5	70%	CF	2.5%	N-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CN3	70%	CF	3%	N-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%
CN3.5	70%	CF	3.5%	N-PAM	0.1%	FA	25%	SP	3.0%

에 탄소보강섬유를 함량별로 넣고 2분간 완전하게 혼합시켜서 균일한 분산물을 만든 후, 플라이에쉬 충전재(고형분에 대한 무게비로 25%)와 시멘트를 넣고 2분동안 혼합시킨다. 슬러리 상태로 완전하게 분산된 혼합 슬러리를 가로 20cm, 세로 5cm, 높이 20cm의 성형압축시험용 형틀 및 인장시험용 형틀에 넣고, 최대하중 30톤의 압축기(Press)를 이용하여 50kg/cm²의 압력을 가하여 압축 성형하였다. 이때 탄소섬유, 펄프, 시

2) 인장강도시험(Tensile strength test)

인장강도 시험용 시료는 덤벨모양의 형틀을 이용하여 시편을 제작하고, Instron社의 M1127장치를 이용하여 파지간 길이 130mm로 하여 차트속도 100mm/min, 인장속도 5mm/min과 최대하중 500kg로 측정하여 인장파괴될 때까지 하중을 가하여 인장시험 곡선을 얻었다.

3) 함수율시험(Water content test)

함수율은 성형하여 양생한 뒤에 기건상태로 만들고, 3일간 상온의 물속에 방치시킨 다음, 복합체 내부에 함유된 물의 양을 무게 백분율로 나타낸 것으로서 50×200×tmm (두께 t는 시편의 구성에 따라 일정 압력하에서 변함) 크기로 시편을 만들고, 그 시편의 무게를 측정해 건조 전, 기건상태 시편무게(W1)로 하고 W1을 100±2℃ 건조기 속에서 24시간 건조시킨 후 일정한 무게가 유지되었을 때, 그 무게를 측정해서 건조 후, 표건상태 시편무게(W2)로 하여 다음과 같은 식으로 함수율을 측정하였다.

$$\text{함수율(\%)} = \frac{W1 - W2}{W2} \times 100\%$$

4) 휨강도시험(Flexural strength test)

휨시험은 Instron社의 M4250장치를 이용하여 3점 시험법(3-Point method)으로 시험하였다. 스패ن길이를 100mm로 하여 차트속도 200mm/min와 휨속도 5mm/min 및 최대하중 설정을 100kg으로하여 파괴될 때까지 하중을 가하면서 휨시험 곡선을 얻었다.

5) 휨인성(Flexural toughness)

휨인성은 플라스틱재료의 휨물성 시험을 응용한 것으로서 본 연구에서 섬유 뽑힘성(Pull-out) 시험을 대비한 대안 실험값이다. 휨인성의 실험값은 휨강도의 실험측정차트를 이용하여 산출한 시험값으로서, 휨강도 측정된 차트를 보고, 최대 파괴점까지의 면적을 최대 파단점 길이로 나눈 수치를 계산한 값이다.

4. 실험결과 및 고찰

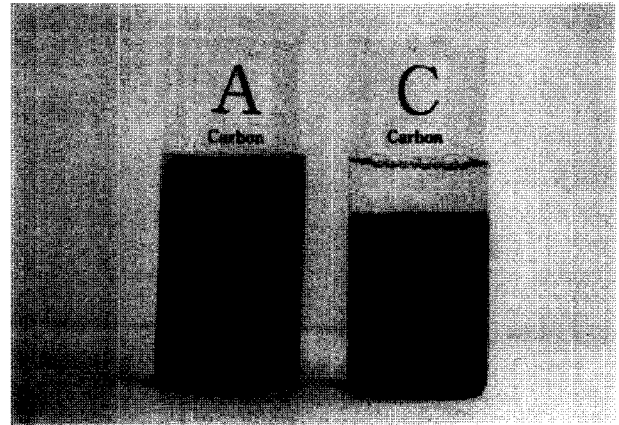
4.1. 계면결착제 첨가에 따른 탄소섬유와

시멘트와의 결착도 고찰

탄소섬유보강 시멘트복합체의 제조에서 계면결착제 첨가에 따른 탄소섬유와 시멘트와의 결착도 특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

<사진 2>과 <사진 3>는 물 1ℓ에 시멘트 13.5g, 탄소섬유 1.5g을 혼합하고 여기에 각 PAM 결착제를 첨가하고 교반한 후 1분간 방치한 다음 사진촬영하여 얻은 것이다. <사진 3>에서 A로 표시된 것은 결착제가 전혀 들어가지 않은 경우이며, B는 A-PAM 결착제가 첨가된 경우이고, <사진 4>에서 C로 표시된 것은 C-PAM 결착제가 첨가된 경우이다.

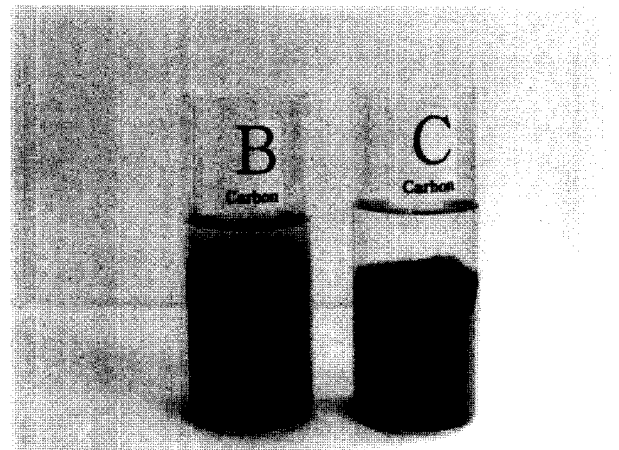
PAM을 사용하지 않은 A의 경우 물에 분산되어 있는 시멘트 때문에 전체가 불투명하게 보이는 반면에, A-PAM 결착제가 혼합된 B의 경우와 C-PAM 결착제가 혼합된 C의 경우에는 시멘트와 탄소섬유가 결착하여 침강하므로써 윗 부분의 물이 맑게 보임을 알 수 있다. 이 경우에 C-PAM 결착제가 혼합된 C의 경우는 침강현상이 보다 뚜렷하게 나타났다.



A : Cement + Carbon Fiber

C : Cement + Carbon F. + Cation PAM

사진 2. 물속에서 시멘트와 탄소섬유와의 응집 및 분산상태
(A : PAM으로 처리하지 않는 경우,
B : C-PAM으로 처리한 경우)

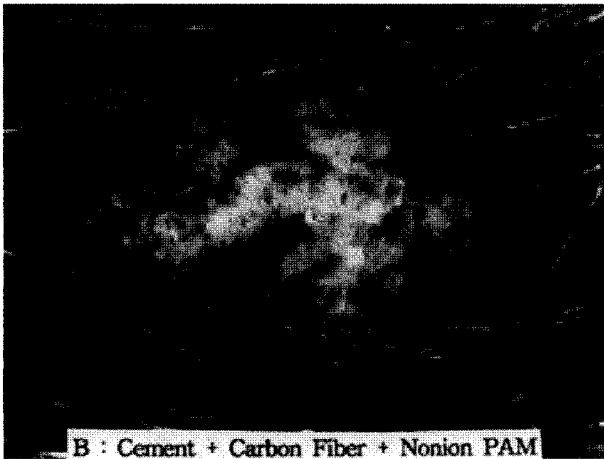


B : Cement + Carbon F. Anion PAM

C : Cement + Carbon F. Cation PAM

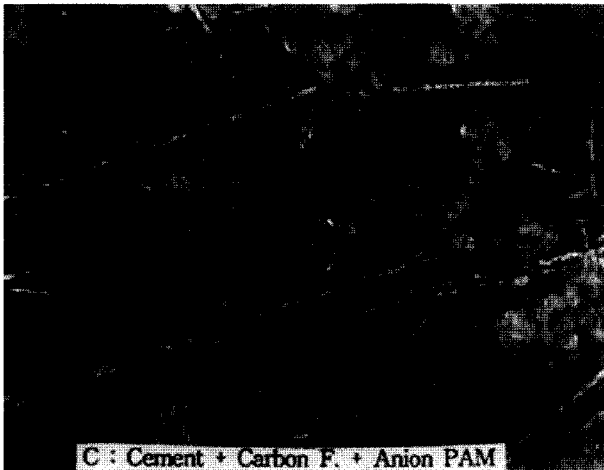
사진 3. 물속에서 시멘트와 탄소섬유와의 응집 및 분산상태
(B : A-PAM으로 처리하지 않는 경우,
C : C-PAM으로 처리한 경우)

<사진 4>, <사진 5> 및 <사진 6>은 시멘트와 탄소섬유 및 PAM의 혼합물을 5mm메쉬로 여과한 후에 시멘트와 탄소섬유의 결착상태를 VMS 현미경으로 관찰한 것이다. N-PAM을 첨가한 <사진 4> B의 경우에는 시멘트가 뭉쳐져 있어 탄소섬유와 균일한 결착을 나타내지 못함을 볼 수 있었다. 반면에, A-PAM 결착제를 첨가한 경우 <사진 5>의 C와 C-PAM 결착제가 첨가된 경우 <사진 6>의 D에는 시멘트가 탄소섬유 표면에 균일하게 결착되어 있음을 관찰할 수가 있었다. 위와 같이 물속에서의 분산을 촬영한 <사진 2>과 <사진 3>의 결과와 VMS 현미경으로 관찰한 <사진 4>, <사진 5> 및 <사진 6>의 결과는 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.



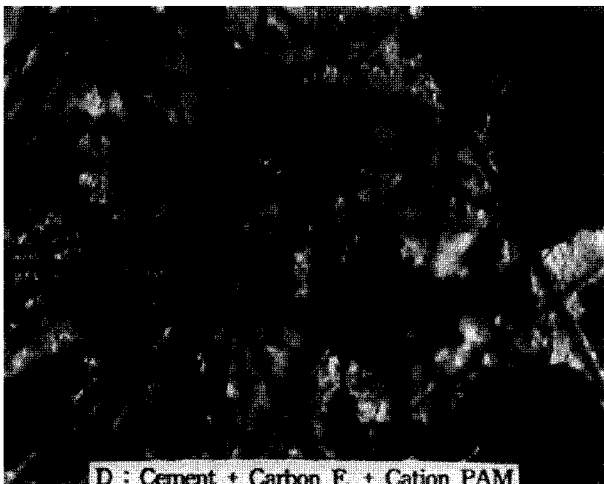
B : Cement + Carbon Fiber + Nonion PAM

사진 4. N-PAM 처리한 시멘트와 탄소섬유와의 결합상태(VMS : 500배)



C : Cement + Carbon F. + Anion PAM

사진 5. A-PAM 처리한 시멘트와 탄소섬유와의 결합상태(VMS : 500배)



D : Cement + Carbon F. + Cation PAM

사진 6. C-PAM 처리한 시멘트와 탄소섬유와의 결합상태(VMS : 500배)

<그림 1>과 <표 5>는 탄소섬유에서 PAM의 종류 및 함량에 따른 탄소섬유와 시멘트의 결합효과를 나타낸 것이다. 탄소섬유의 경우에 PAM 결합제를 넣지 않았을 경우의 결합도는 24.1%였다. N-PAM 결합제 경우, PAM 함량이 100mg에 대

하여 52.6%의 결합도를 나타내었다. A-PAM 결합제 경우에는 최대 결합도가 A-PAM의 함량이 66.7mg일 때 65.8% 이었으며, 함량은 100mg으로 하였을 때에는 오히려 61.9%로 약간 줄어들었다. 탄소섬유의 경우에도 C-PAM 결합제가 가장 효과적인 것으로 나타났다. C-PAM의 함량이 33.3mg일 때까지 급격히 시멘트와의 결합도가 증가하였으며, 그 이상의 함량에서는 결합도 증가폭이 많이 줄었다. C-PAM 결합제의 함량이 100mg일 때 최대 결합도인 89.1%를 얻었다.

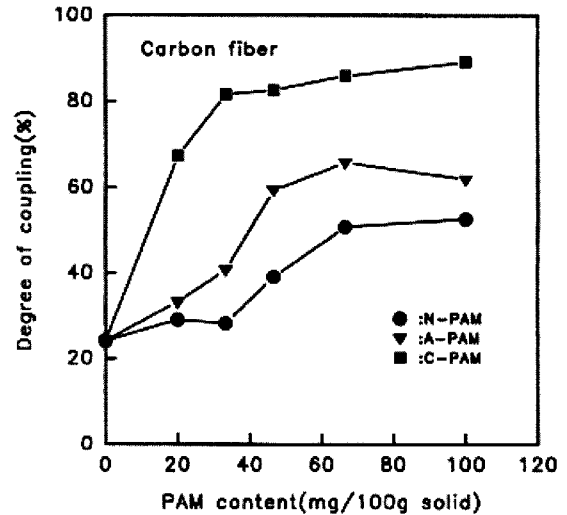


그림 1. PAM의 종류 및 함량에 따른 탄소섬유와 시멘트와의 결합도 변화

표 5. PAM 종류 및 함량에 따른 탄소섬유와 시멘트의 결합도(%)

PAM함량 (mg/100g 고형분)	PAM 종류		
	N-PAM	A-PAM	C-PAM
0	24.1	24.1	24.1
20	29.0	33.2	67.4
33	28.2	40.7	81.6
47	39.1	59.4	82.6
67	50.8	65.8	85.9
100	52.6	61.9	89.1

4.2. 탄소섬유보강 시멘트복합체에서 보강섬유와 계면결착제와의 상관특성 분석

탄소섬유보강 시멘트복합체의 시편을 제작하여 물리적 성질 및 역학적 물성을 측정하여 보강섬유와 계면결착제와의 상관특성을 고찰하였으며, 아울러 시편의 파쇄단면을 VMS(200배)로 사진촬영하여 탄소섬유보강 시멘트복합체의 계면구조를 고찰하였다. 또한 탄소섬유 함량과 PAM 종류에 따른 계면구조와 물성과의 상관관계도 분석하였다.

1) 함수율(Water content)

탄소섬유보강 시멘트복합체에서 탄소섬유 자체는 흡수성이 전혀 없다. 그러나, 탄소섬유강화 시멘트복합체에서는 내면의 계면결착력에 따른 미세공간 함량 및 미세공간 크기에 따라

함수량이 영향을 받는다. <그림 2>는 탄소섬유에 있어서 최적 충전재로서 선정된 플라이애쉬와 재생아황산펄프를 사용한 탄소섬유보강 시멘트복합판넬의 함유율에 대한 섬유함량과 PAM 종류가 미치는 영향을 나타내는 것이다. 탄소함량이 증가함에 따라서 함수량이 상당히 크게 증가함을 알 수 있고, 함유율에 있어서는 N-PAM의 경우가 약간 높으로 것으로 나타났다.

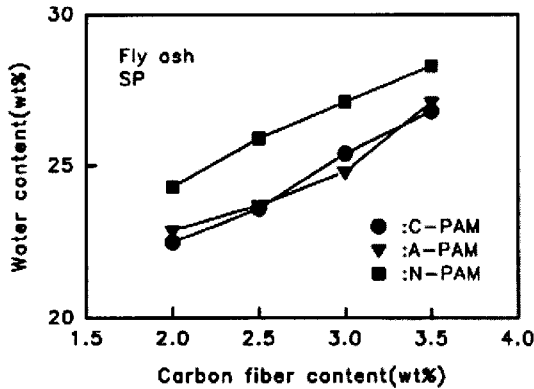


그림 2. 탄소섬유 함량에 따른 탄소섬유강화 시멘트복합체의 함수율 변화

탄소섬유의 함량을 변화시키면서 플라이애쉬를 25% 혼입했을 때, 물리적 특성을 분석하면 탄소섬유의 과소량인 2.0% 혼입하고 C-PAM 결착제를 첨가했을 때 함수율이 22.52%이고 적정함량인 탄소섬유가 2.5%일 때 23.36%이며 과량인 3.5%에서는 26.82% 로서 나타났다. 상기 실험결과에 의하면 탄소섬유의 함량이 2.0~2.5%까지 함유율 차이가 대략 2~3%에 비하면, 과량인 4.0%에서는 약 5%임을 감안할 때 탄소섬유의 함량이 과량인 경우에는 탄소섬유강화 시멘트매트릭스 내부에 미세공간 함량이 많이 증가되었음을 알 수 있었다.

또한 탄소섬유의 적정함량인 2.5%를 혼입하고 A-PAM 결착제를 첨가했을 때 함수율이 23.72%이고 N-PAM을 첨가하면 함수율이 25.92%로 나타난 것을 보면 함수율은 탄소섬유의 결착제인 PAM 종류보다는 탄소섬유의 함량변화와 내부의 계면결착력에 민감한 반응이 있음을 알 수 있다. 탄소섬유강화 시멘트복합판넬의 적정 섬유함량은 2.5~3.0%이며 적합한 계면결착제는 C-PAM이 입증되었다.

따라서 탄소섬유와 시멘트와의 계면결착력이 우수한 C-PAM 결착제를 사용하므로써 내부치밀도가 향상되어 함수율이 낮아질 수 있음을 알 수 있었다.

2) 인장강도(Tensile strength)

탄소섬유보강 시멘트복합체의 파괴될 때까지의 인장강도(Tensile Strength)를 고찰한 결과를 분석하면, <그림 3>은 최적 충전재로서 선정된 플라이애쉬와 재생아황산펄프를 사용한 탄소섬유보강 시멘트복합판넬의 인장강도에 대한 섬유함량과 PAM 종류가 미치는 영향을 나타내는 것이다. 인장강도에 있어서는 섬유함량이 3.0%일 때 가장 높게 나타났다.

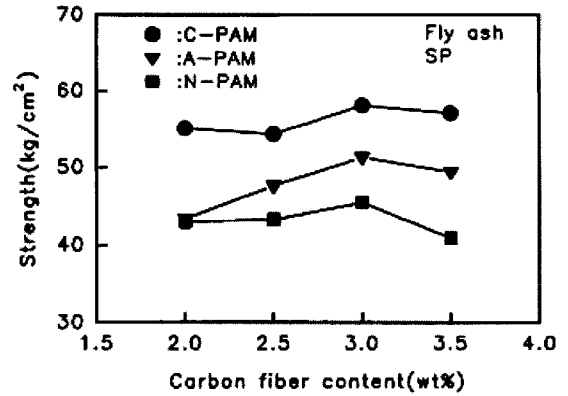


그림 3. 탄소섬유 함량에 따른 탄소섬유강화 시멘트복합체의 인장강도 변화

계면결착제에 있어서는 C-PAM을 사용한 경우가 가장 높게 나타났다. 탄소섬유의 함량변화를 시키면서 플라이애쉬를 25% 혼입했을 때 탄소섬유강화의 인장물성을 분석하면, 탄소섬유의 과소량인 2.0%를 혼입하고 C-PAM 결착제를 첨가하면 인장강도가 55.17kg/cm²이며, 적정함량인 탄소섬유가 2.5%에서는 54.38kg/cm² 이고 과량인 3.5%는 57.13kg/cm² 로 나타났다. 탄소섬유의 적정함량인 2.5%를 혼입하고 A-PAM 결착제를 첨가했을 때 인장강도가 47.69kg/cm² 이었으며, N-PAM를 사용하면 43.36kg/cm²로 저하된 것을 알 수 있었다.

결과적으로, 슬러리법에 의한 탄소섬유보강 시멘트복합체에 있어서 두 성분간의 계면결착력이 인장강도하에서의 역학적 성능에 결정적 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

3) 휨강도(Flexural strength)

시멘트에 섬유를 혼합하는 주목적은 사실상 휨강도를 높이는 보강효과 뿐만 아니라 시멘트의 최대 결점인 취성을 보완하는 것이다. 특히 시멘트 재료는 휨에 약하므로 휨물성이 우수하면 할수록 시멘트복합체의 섬유혼합효과가 우수하게 된다. 섬유와 시멘트의 계면결착력은 복합체의 인장특성보다도 휨 특성에서 더 잘 발휘된다.

<그림 4>는 탄소섬유에 있어서 최적 충전재로서 선정된 플라이애쉬와 재생 아황산펄프를 사용한 탄소섬유보강 시멘트복합판넬의 휨특성에 대한 섬유함량과 PAM 종류가 미치는 영향을 나타낸 것이다. 휨특성에 있어서는 섬유함량이 3.0%일 경우가 휨강도가 우수하게 나타났다. 계면결착제에 있어서는 휨강도의 경우 최적인 C-PAM과 부적절한 N-PAM과의 차이가 매우 크게 나타났다. 탄소섬유의 함량변화를 시키면서 적합한 충전재인 플라이애쉬를 25% 혼입했을 때 탄소섬유강화 시멘트복합체의 휨물성을 보면, 탄소섬유의 과소량인 2.0%를 혼입하고 C-PAM 결착제를 첨가하면 휨강도가 167.46kg/cm² 이고, 적정함량인 탄소섬유 2.5%를 혼입하면 176.92kg/cm²이며, 과량인 3.5%에서는 167.06kg/cm² 로 나타났다. 상기 실험결과에 의하면 탄소섬유의 함량변화에 따라 휨강도가 현저하게 높았다. 이것은 탄소섬유가 각 구성소재와의 계면결착력에 기인하므로 탄소섬유의 보강역할을 할 수 있는 적정 탄소섬유

함량을 결정하는 중요한 요소라고 판단된다.

또한 탄소섬유의 적정함량인 2.5%를 혼입하고 A-PAM 결착제를 첨가했을 때 휨강도가 151.39kg/cm²이며, N-PAM 결착제를 사용하면 136.39kg/cm²으로 나타내어 PAM 결착제에 따라서 휨강도도 현저한 차이가 발생했다.

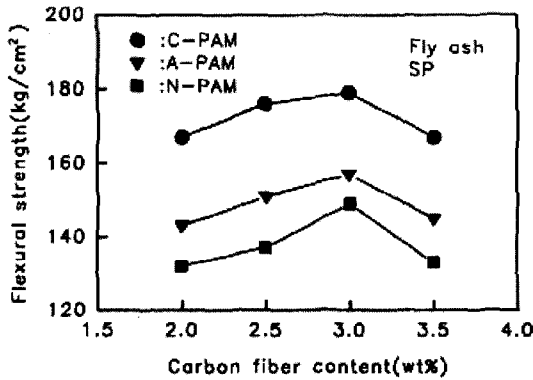


그림 4. 탄소섬유 함량에 따른 탄소섬유강화 시멘트복합체의 휨강도 변화

4) 휨인성(Flexural toughness)

휨인성(Flexural toughness)은 섬유보강 시멘트복합체에서 섬유결착성능 및 보강섬유의 신장을 측정하는 실험으로서 섬유의 뽑힘성(Pull-out) 정도를 알 수 있다. 또한 충전재의 적정 혼입함량과 관계가 깊으며, 취성에 대비한 섬유보강을 보완하는 역할정도를 나타낸다.

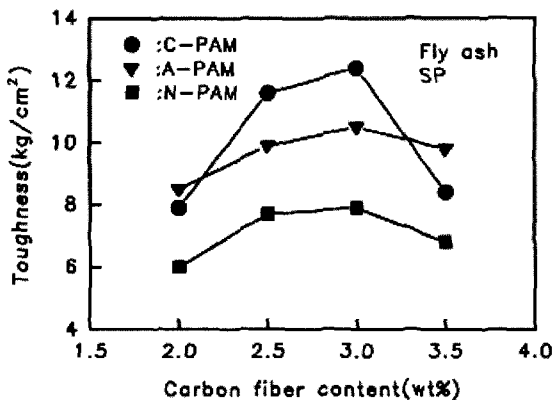


그림 5. 탄소섬유 함량에 따른 탄소섬유강화 시멘트복합체의 휨인성 변화

<그림 5>는 탄소섬유보강 시멘트복합체에 있어서 섬유함량이 3.0%일 경우가 휨인성이 우수하게 나타났다. 계면결착제에 있어서는 휨인성인 경우, 최적인 C-PAM과 부적절한 N-PAM과의 차이가 매우 크게 나타났다. 탄소섬유의 함량변화를 시키면서 적합한 충전재인 플라이애쉬를 25% 혼입했을 때 탄소섬유강화 시멘트복합체의 휨물성을 보면 탄소섬유의 과소량인 2.0%를 혼입하고 C-PAM 결착제를 첨가하면 휨인성이 7.95kg/cm² 이고, 적정함량인 탄소섬유 2.5%를 혼입하면

11.67kg/cm²이며, 과량인 3.5%에서는 8.42kg/cm²로 나타났다. 상기 실험결과에 의하면 탄소섬유의 함량변화에 따라 휨인성은 적정함량인 2.5~3.0%에서 훨씬 강화되었고, 탄소섬유의 함량이 과소량이거나 과량인 경우에는 저조하였다. 이것은 탄소섬유가 각 구성소재와의 계면결착력에 기인하므로 탄소섬유의 보강역할을 할 수 있는 적정 섬유함량을 결정하는 중요한 요소라고 판단된다. 또한 탄소섬유의 적정함량인 2.5%를 혼입하고 A-PAM 결착제를 첨가했을 때 휨인성이 9.96kg/cm²이며, N-PAM 결착제를 사용하면 7.72kg/cm²으로 나타내어 PAM 결착제에 따라서 휨인성도 현저한 차이가 발생했다.

4.3. 탄소섬유보강 시멘트복합체의 인장파쇄단면 관찰에 의한 계면특성 고찰

<사진 7>, <사진 8> 및 <사진 9>는 각각 탄소섬유를 과량인 3.5%, 적정함량인 2.5%, 과소량인 2.0%를 혼입하고 최적 결착제인 C-PAM을 사용하여 제조한 시멘트복합판넬의 인장파쇄단면을 VMS로 200배 확대하여 관찰한 사진이다. 섬유함량이 과량인 3.5% 혼입한 경우에는 섬유와 매트릭스와의 계면결착력이 인장하중을 견디지 못하여 복합재료의 파쇄가 섬유의 절단과 함께 일어나지 않고 섬유가 인발(Pull-out)되는 현상이 발생된 것을 잘 알 수 있다. 또한, 섬유의 함량이 과소량인 2.0% 경우에도 섬유에 의한 보강효과가 부족하여 제대로의 물성이 발휘되지 못함을 보여주고 있다. 반면에 적정 섬유함량인 2.5% 경우 복합체의 파괴단면에서 섬유의 절단현상이 주로 관찰되므로써 계면결착력이 복합체의 파괴하중보다 큰 경우라는 것을 알 수 있었다.

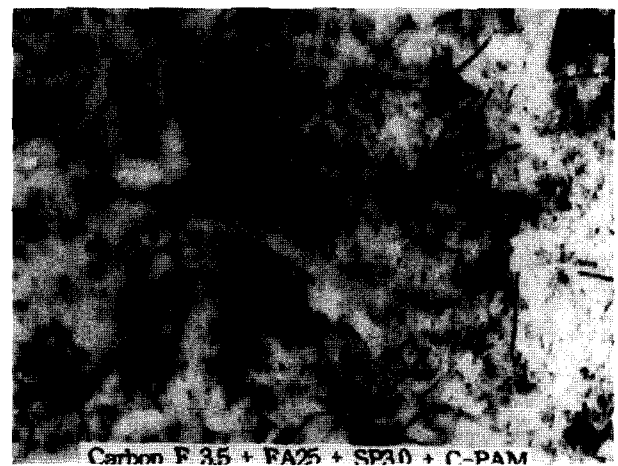


사진 7. 탄소섬유 과량인 3.5% 혼입한 탄소섬유강화 시멘트복합체의 파쇄단면(VMS : 200배)

따라서, 탄소섬유보강 시멘트복합체의 물성을 최대화하기 위해서는 섬유의 함량을 최적화함과 적절한 계면결착제를 사용하는 것이 필수적이라는 결론을 얻을 수 있었다

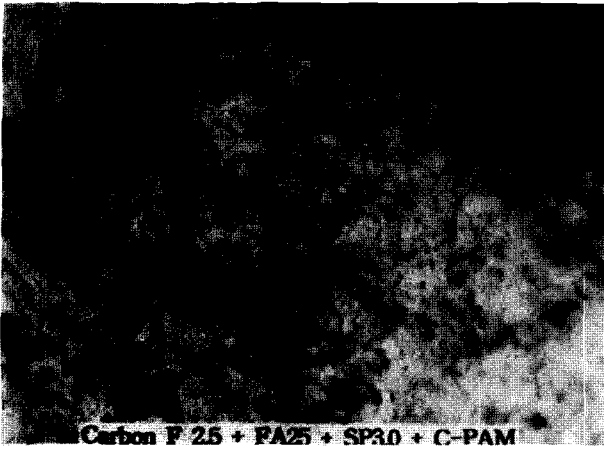


사진 8. 탄소섬유 적정함량인 2.5% 혼입한 탄소섬유강화 시멘트복합체의 파쇄단면(VMS : 200배)

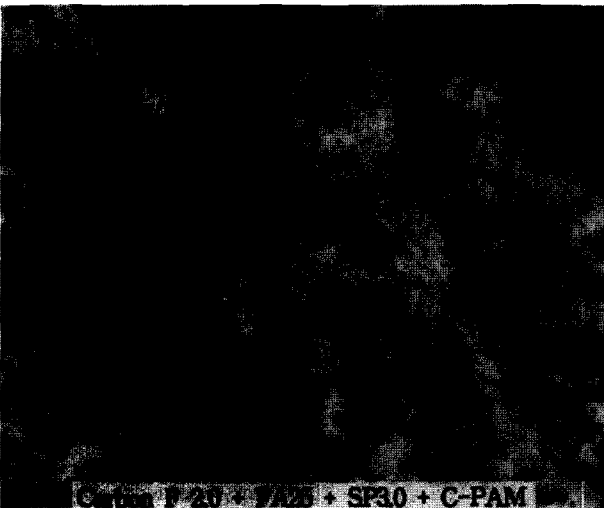


사진 9. 탄소섬유 과소함량인 2.0% 혼입한 탄소섬유강화 시멘트복합체의 파쇄단면(VMS : 200배)

5. 결론

슬러리법에 의한 탄소섬유보강 시멘트복합체의 계면구조에서 결합력을 좌우하는 보강섬유와 계면결착제와의 상관특성을 분석한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 슬러리법으로 섬유보강 시멘트복합체를 제조하는데 있어서는 보강섬유와 시멘트사이의 결합이 절대적인 필요조건이다. 두 소재사이의 결합이 이루어지지 않으면, 여과시에 시멘트 및 충전제가 그대로 유출되어 버림으로서 복합체를 제조할 수 없었다.
- 2) 슬러리법에 의한 탄소섬유보강 시멘트복합체의 제조에 있어서는 계면결착제의 존재가 복합체 제조뿐만 아니라, 제조된 복합체의 물성에도 결정적인 영향을 미친다는 결론을 얻었다.
- 3) 탄소섬유보강 시멘트복합체의 제조에 있어서 탄소섬유는 C-PAM 결착제를 첨가하였을 때 계면결착도가 90.9%로 가장 높은 실험결과로 보면, 탄소섬유에는 C-PAM 결착제가

최적의 계면결착제라는 결론을 얻었다.

- 4) 탄소섬유보강 시멘트복합체에서 보강섬유와 계면결착제와의 상관특성을 분석한 결과, 탄소섬유를 보강섬유로서 사용할 경우 함수율, 인장강도, 휨강도 및 휨인성 등 물성시험에서도 C-PAM 결착제가 적합한 계면결착제로 입증되었다.
- 5) 탄소섬유보강 시멘트복합체의 인장파쇄단면을 관찰한 결과, 탄소섬유의 함량을 최적화하고 적절한 C-PAM 결착제를 사용한 시멘트복합체가 보강섬유와 매트릭스와의 계면결착도가 매우 강화되었음을 알 수 있었다.
- 6) 본 실험적연구의 부수적인 결과로서, 탄소섬유강화 시멘트복합체의 최적 구성소재 및 그 최적함량을 요약하면, 탄소섬유는 2.5~3.0%, 충전제는 플라이애쉬를 25~30%, 펄프는 재생 아황산펄프를 2.5~3.0%를 혼입하고 계면결착제로는 C-PAM(Cation polyacrylamide)등을 사용하면, 품질이 우수한 탄소섬유강화 시멘트매트릭스를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Wells R.A., "Future Developments in Fiber-reinforced Cements, Mortar and Concrete", Composites, Apr. 1982, pp.169-172.
2. Johnston C.D., "Inside the Outside : Glass Fibers gain Popularity as Reinforcement for Precast Concrete Panels". Concrete Int, Mar. 1985, pp.26-31.
3. Laird J.A., et al, "Glass Surface Chemistry Relating to the Glass-Finish-Resin Interface", the Society of the Plastics Industry, Inc., Section 11-C, 1964.
4. Barr B.I.G. et al, "Shear Strength of FRC Materials", Composites, Vol.16, No.4, 1985, pp.326-334.
5. Harper S., "Developing Asbestos-free Calcium Silicate Building Boards", Composites, Apr. 1982, pp.123-128.
6. Krenchel H. et al, "Applications of Polypropylene Fibers in Scandinavia", Concrete Int, Mar. 1985, pp.32-34.
7. Malisch W.R., "Polypropylene Fibers in Concrete", Concrete Constr., Apr. 1986, pp.363-368.
8. Razi I., "Fiber Reinforced Mortars in the Resurfacing of Concrete", Concrete Int, Mar. 1985, pp.41-44.
9. Smith J.W., "The Replacement of Asbestos Cements by GRC", Composites, Apr. 1982, pp.161-163.
10. Ali M.A., Majumdar A.J. and Rayment D.L., "Carbon Fiber Reinforcement of Cement", Cement and Concrete Research, Vol. 2, No. 2, pp.201-212, 1972
11. Waller J.A., "Carbon Fiber Cement Composites", Civil Engineering and Public Works Review, pp.357-361, April, 1972
12. Agbin C.C., "Concrete Reinforced with Glass Fibers", Mag. Concr. Res. Vol. 16, No. 49, 1964
13. 吉田良三, "耐アルカリ性ガラス繊維と複合材料", 「日本複合材料學會誌」, Vol. 2, No. 1, 1976
14. 岩崎訓明, 富山泰全, "セメントモルタルと材料の界面の微視構造と強度", セメント年報, 1992