

論文

비원형 단-탄소섬유 보강 시멘트 복합체의 물리, 역학적 특성(I)

김태진* · 이승규* · 오복진* · 오희갑* · 이영석** · 심환보** · 이보성**

The mechanical and physical properties of non circular type-carbon fiber reinforced cement composites (I)

T.J. Kim, S.K. Lee, B.J. Oh, H.K. Oh, Y.S. Lee*, H.B. Shim* and B.S. Rhee*

ABSTRACT

To investigate the effect of shape factors, the mechanical and the physical properties of cement composites randomly distributed with short non circular type carbon fibers were studied. The results are following; Compressive strength of both round(R) and non-circular(c-type(C), hollow (H)) carbon fiber(CF) reinforced cement composites(CFRC) was decreased as increasing with fiber length and content, and these were lower than that of those. On the other hand, C-CFRC was about 30~34% higher to R-CFRC in tensile strength, flexural strength and toughness, and H-CFRC were decreased as increasing with fiber length. C-CF was penetrated very wall to matrix by capillary phenomena and its surface area was higher than that of R-CF but H-CF was not penetrated easily because of its fiber structure. Tensile strength shows the same mechanical properties with flexural strength also. Tensile strength of C-CFRC was increased about 40% than that of R-CFRC.

초 록

단면적이 비원형(non circular type)인 탄소섬유의 형상에 의한 보강 효과를 파악하기 위하여, 실험실적으로 제조한 비원형 단-탄소섬유를 시멘트매트릭스에 랜덤 분산 보강한 복합체(carbon fiber reinforced cement composite; CFRC)를 제조하여 물리적 역학적 특성을 연구하였다. 그 결과 압축 강도는 섬유 길이가 길수록, 섬유 혼입율이 클수록 저하되었다. 섬유 형상에 의한 영향으로는 비원형 탄소섬유가 원형(circular or round type) 탄소섬유보강시 보다 낮으며, 중공형(hollow type) 탄소섬유보강시 물성이 가장 낮았다. 휨강도 및 휨인성은 C형 탄소섬유가 원형 보다 30~34% 높았으며 반면에 중공형의 경우는 길이가 길어질수록 휨강도가 크게 저하되었다. 이것은 C형 섬유의 경우 원형 섬유보다 표면적이 크고 매트릭스가 섬유 형상 내부로 모세관 현상에 의하여 잘 충전되지만 중공형의 경우에는 구조상 치밀한 충전이 어렵기 때문이다. 인장강도 역시 휨강도와 유사한 역학적 특성을 나타냈으며 C형 탄소섬유의 경우 원형 탄소섬유 보강의 경우보다 약 40%정도 높은 강도 증진 효과를 가져왔다.

1. 서 론

탄소섬유(carbon fiber ; CF)는 고성능 복합재료

의 보강재로서 종래부터 우주, 항공 분야와 스포츠 용품 분야에서 사용되어 왔으나 최근에는 철도, 자동차, 선박, 해양 구조물, 토목, 건축 등의 기능성

* 쌍용중앙연구소

** 충남대학교 화학공학과

산업용 재료로 전환 움직임이 활발히 진행되고 있다[1,2]. 건축·토목분야에 사용되고 있는 장섬유는 콘크리트 구조물, 구조물의 진단 기능, 내·외장재 및 연도, 교각, 보, 터널 등의 보수·보강분야에 활용되고 있으며, 단섬유의 경우는 타일 및 디자인 패널, 내·외장재, 바닥재, 창틀, 열전도성 및 전자파 차폐·흡수콘크리트, 건조물탈류등 많은 부분에 사용되고 있다.

탄소 단섬유보강 시멘트 복합재료는 시멘트의 최대 약점인 취성을 개선코자 1981년 Akihama가 연구를 시작한 이래 chop 또는 short섬유를 3~18mm크기로, 섬유 함량 1~3 V%를 시멘트 매트릭스에 랜덤 또는 1방향 배향시켜 복합체를 구성하고 습윤 양생 후 기건 양생, 증기 또는 autoclave양생시켜 제품을 제조하는 공정이 현재 상품화 되어 있다[3,4]. 이와같은 CFRC의 보강 효과는 인장강도, 휨강도가 종래의 콘크리트 대비 2~5배, 인성은 10~20배 높으며, 양생중 건조수축 크랙 방지, 치수안정성 우수, 기타 지진파의 내진 억제능력이 1.5~2.0배 높아 최근 일본에서는 내진재료로서 주목받고 있다. 그러나 원형섬유로 복합체 구성시 압축강도는 우수하나, 휨강도 및 인장강도, 충격강도등은 매트릭스와 섬유간의 계면접착 표면적이 한정되어 있기 때문에 섬유를 표면처리해서 관능기를 도입하여 계면부착강도를 증진시키고 있으나, 단면적이 원형 형상인 섬유로는 복합체 물성 향상에 한계가 있어왔다. 한편 계면 부착 표면적을 증가시켜 복합체 물성을 개선하기 위하여 Rhee등은[5] 비원형 탄소섬유를 에폭 시수지에 보강재로 사용하여 복합체(CFRP)를 구성시 C형의 섬유가 원형 섬유 보강보다 2배이상

물성이 향상됨을 발표한바 있다.

따라서 본 연구에서는 취성재료인 시멘트 몰탈 매트릭스에 비원형 단-탄소섬유를 보강재로 사용하여 섬유의 형상 효과에 의한 보강효과를 파악하고자 방향족 피치계 메소페이즈피치(mesophase pitch)로부터 형상별(C형, 중공형, 원형) 탄소섬유를 실험실적으로 제조, 절단하여 단섬유를 만들고 시멘트 복합체를 제작하여 기계적 물성(압축 강도, 휨강도 및 휨인성, 인장강도)과 계면구조, 기공률 등을 측정하여 비원형 탄소섬유의 형상별, 길이별, 함량별 보강효과를 검토하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2-1. 실험 재료

복합체의 매트릭스는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트(OPC, blaine: 3250 cm²/g)를 사용 하였으며 경량 골재로는 Sirasu Balloon(일본 Calceed Co MSB 301)과 Micro cell(호주 Micro cell Co SL- 150)을 사용하였고, 섬유의 분산성 및 충전성 향상을 위해 실리카흙(호주 silica fume ; SF (Blain:210,000 cm²/g)를 첨가하였다.

또한 화학 혼화제류는 첨가 수량 감소를 위한 고 유동화제(일본 Mighty-150)와 섬유의 분산및 재료 분리 방지용 증점제(독일 CST-324)를 사용하고 거대기공 감소를 위해 소포제(미국 Agitan-803)를 첨가 하였다.

방향족계 메소페이즈피치(일본 Mitubishi 가스 화학사)로부터 용융방사, 산화, 탄화 공정을 거쳐 제조된 탄소섬유(C형(C), 중공형(H), 원형(R) 물성

Table 1. properties of AR-mesophase pitch based carbon fiber

Fiber Shape	Tensile strength (Kg/cm ²)	Elastic modulus (Kg/cm ²)	Elongation (%)	Dia. (μm)	Cross sectional area (μm ²)	Specific gravity	Surface area (m ² /g)	L _c (nm)	d ₀₀₂ (Å)
C	9,220	794,800	1.2	Do 40.2 Di 22.8	574.0 open θ=120°	1.76	2.3036	8.39	3.4839
H	8,300	943,200	0.9	Do 36.1 Di 23.8	589.8	1.78	2.8267	7.63	3.5014
R	8,590	1,130,500	0.7	26.8	564.1	1.74	1.7545	9.80	3.4424
*KR	7,340	306,000	2.2	18.0	254.5	1.65	-	-	-

* KR : Kureha chemical co C-101S

은 표1에 나타내었으며 섬유 물성은 JIS R 7601방법에 의거 측정하였다.

2-2. 공시체 제조

CFRC 공시체 제조를 위한 배합비는 표2와 같으며 혼합은 omni mixer를 이용 건조 시료를 모두 넣고 1차 5분 동안 혼합후 2차로 고유동화제와 물량을 넣고 5분동안 습식 혼합을 했으며 혼합후 섬유 분산 상태는 육안으로 관찰하였다. 경화되지 않은 CFRC의 흐름성(flow)(JIS R 5201)과 단위 용적 중량(JIS A 1116)을 측정하고 JIS R 5201에 의거 40×40×160mm크기 휨강도용 공시체를 제작하고 직접 인장 공시체는 Kajima건설 연구소 방법에 준하여 수준별 3EA씩 제작하였다. 양생 공정은 2일 동안 습기함에서 양생 후 탈형 시켜 autoclave(180℃, 10atm, 4시간)에서 양생하고 실온에서 7일간 보관 후 측정에 사용했다.

mercury porosimeter(autopore II 9220)로 측정하였다. 인장강도 시험도 재하속도 0.5mm/min의 변위제어 방식으로 측정했다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 경화되지 않은 CFRC의 특성

탄소섬유의 길이, 혼입율, 실리카흙 첨가 유·무에 따른 흐름성(flow)을 Fig.1-2에 나타내었고 단위 용적 중량은 Fig.3-4에 나타내었다. 이를 고찰하여 보면 섬유 혼입율이 증가될수록 섬유 길이가 길수록 흐름성과 단위 용적 중량이 감소되었다.

특히 Fig.1에서 섬유 혼입율 Vf=2%이상의 경우 실리카흙 첨가시에 저하폭이 커지는데 이유는 실리카흙이 섬유의 분산성 증대 및 조직의 치밀화를 위해 사용되고 있으나 비표면적이 시멘트에 비하여 매우 크기 때문에 첨가수량의 증대가 요구되어

Table 2. Mixing ratios of cement matrix for CFRC(cement base)

Cement (OPC)	Aggregates			Admixtures (wt.%)			Carbon fibers	W/C	Remarks
	S.Ball	M.Cell	S.Fume	BMC	A-803	M-150			
1.0	0.15	0.05	0.16	0.25	0.5	3.0	1-3 V% 3-25.4 mm C,H,R,KR	0.465	with S.Fume
	0.36								
1.0	0.31	0.05	-	0.25	0.5	3.0	1-3Vf% 3-25.4 mm C,H,R,KR	0.465	without S.Fume
	0.36								

2-3. 실험 방법

휨강도는 3점 재하시험 방법으로 span 100mm, 재하속도(cross-head speed) 0.5 mm/min의 변위제어 방식으로 각 수준별 3EA씩 실험했으며, 장치는 일본S사 Instron (capa 5.0 ton UTM)을 사용하였고, 휨강도 측정 후 6EA의 잔여 시편으로 압축 강도 시험을 하였다. 또한 휨강도 측정시 하중-처짐 곡선을 이용하여 ACI 544 위원회 추천 방법인 휨인성 지수(flexural toughness Index)를 측정했으며 최대 휨하중시까지 흡수 에너지와 매트릭스 균열시 면적비를 지수로 사용하였다. 또한 시험 후 파단면은 전자현미경(SEM) 및 실체 현미경을 통하여 섬유와 매트릭스간 계면구조 및 pull out 상태의 전반적인 부분을 관찰하였고 기공율은

유동성을 저하시키며 또한 섬유 길이 및 혼입율이 증대될수록 일부의 fiber ball이 형성되어 유동성을 저하시키는 것으로 추정된다.

이 현상은 Fig.3-4에서와 같이 섬유 혼입율과 길이가 증가될수록 단위 용적 중량이 감소되는 현상과 일치되며 섬유 형상에 의한 영향은 매우 적게 나타나고 있으나, 비원형 탄소섬유의 경우가 원형 섬유의 보강에 비하여 감소되는데, 이는 비표면적 증대[6]에 의해 섬유 형상 내부로 혼합중 공기가 다량 유입되는 것으로 추정되며, 경화된 후에 CFRC의 기공율과 계면구조, 압축강도 등에도 영향을 미치고 있다.

3-2. CFRC 물리적 역학적 특성

3-2-1. 압축 강도

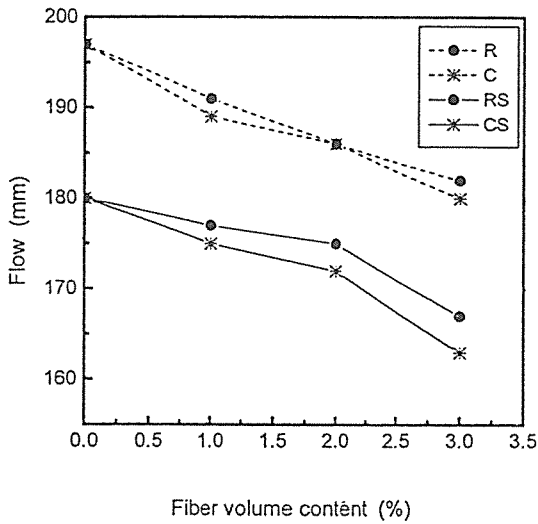


Fig. 1. Relationship between the fiber volume and flow according to fiber shapes in fresh CFRC added with or without silica fume. (Fiber length=3 mm, R: R-CF, C: C-CF, S: silica fume addition)

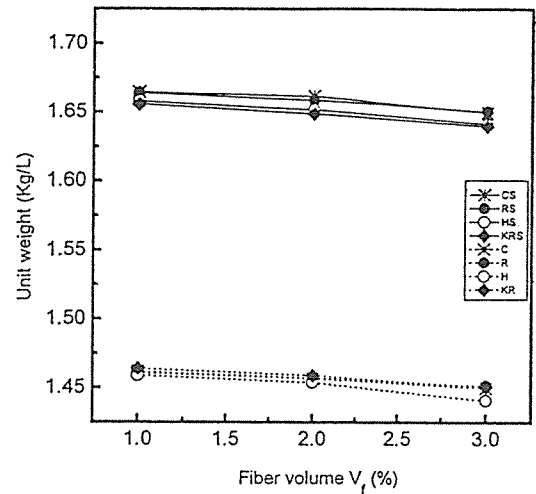


Fig. 3. Relationship between fiber volume and unit weight according to fiber shapes in fresh CFRC added with or without silica fume. (Fiber length=3 mm, C: C-CF, R: CF, H: H-CF, KR: Kureha R-CF, S: silica fume addition)

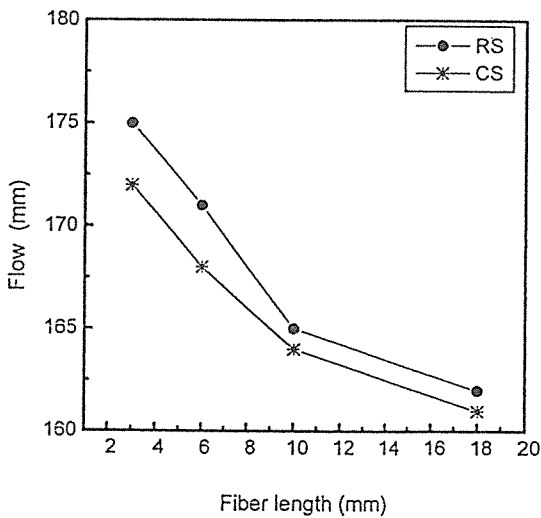


Fig. 2. Relationship between fiber length and flow according to fiber shapes in fresh CFRC using silica fume. ($V_f=2\%$, R: R-CF, C: C-CF, S: silica fume addition)

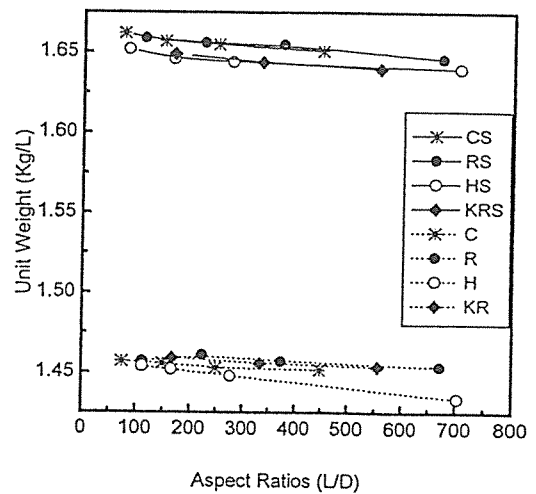


Fig. 4. Relationship between fiber aspect ratio and unit weight according to fiber shapes in fresh CFRC added with or without silica fume. ($V_f=2\%$, C: C-CF, R: R-CF, H: H-CF, KR: Kureha R-CF, S: silica fume addition)

섬유 혼입율(Vf) 2%일 때 섬유의 길이에 따른 압축 강도의 영향을 Fig.5에 나타내었는데, 섬유의 길이가 증가함에 따라 섬유의 종류에 관계없이 압축 강도는 저하되었다. 이는 섬유 분산용 증점제 사용에 따라 연행 공기량 증대가 압축 강도 저하에 크게 영향을 미치는 것으로 추정되며[7] 특히 원형 대비 증공형 및 C형 섬유가 압축 강도 저하폭이 큰 것은 섬유 형상 내부가 매트릭스에 의해 완전히 충전되지 않고 미세공극이 원형보다 많이 존재하기 때문이며 또한, 섬유 길이가 길어질수록 섬유 함량이 증가될수록 랜덤 배향에 악영향을 미쳐 소량의 fiber Ball이 생겨 감소되는 것으로 추정된다.[6] 관찰 결과 섬유 길이 10mm이상에서 더욱 두드러지게 나타나고 있으며 Fig.6에서도 섬유 길이 3mm에서 섬유 혼입율이 증가함에 따라 비례적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이 현상을 파악하기 위하여 CFRC복합체의 기공 분포도 및 기공율을 측정했으며 그 결과를 Fig.7-8 및 표3-4에 나타냈다. 이를 고찰하여 보면 표3 에서 총 기공 면적과 평균 기공 크기 측면에서 C형 및 증공형이 섬유 무첨가형 시편 (Plain 시편 Vf=0인 공시체)이나 원형 섬유 보강 복합체에 비하여 크며, Fig.7에서 보는 바와 같이 미세기공의 양이 적게 분포하고 있음을 알 수

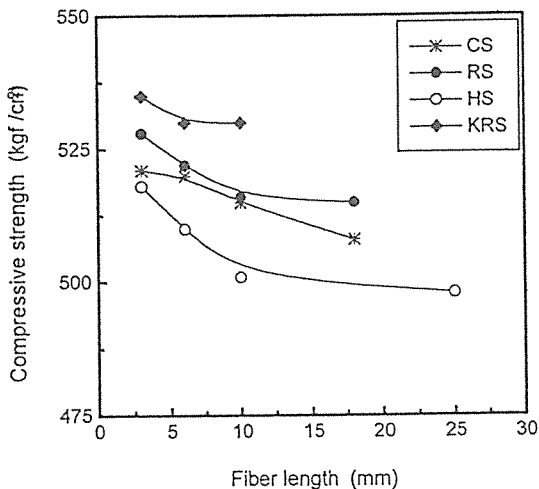


Fig. 5. Compressive strength versus fiber length of CFRC using silica fume according to fiber shapes. (fiber volume content=2%, C:C-CF, R:R-CF, H:H-CF, KR:Kureha R-CF, S:silica fume addition)

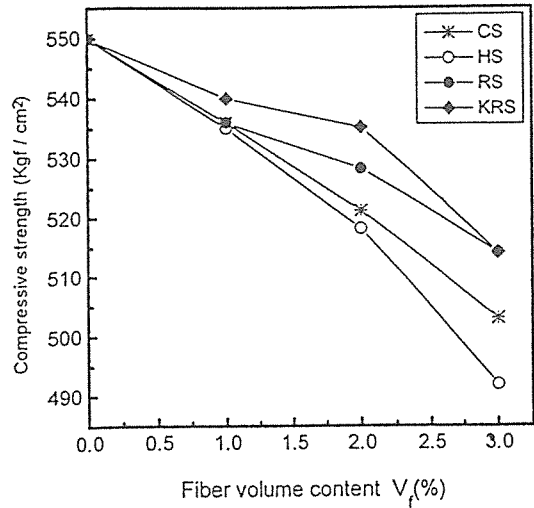


Fig. 6. Compressive strength versus fiber volume content of CFRC using silica fume according to fiber shapes. (fiber length 3mm, C:C-CF, H:H-CF, R:R-CF, KR:Kureha R-CF, S:silica fume addition)

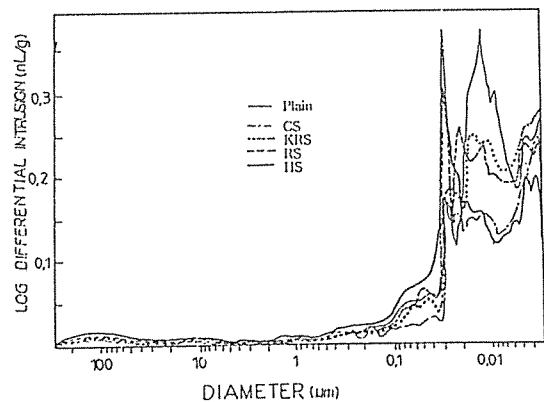


Fig. 7. Pore size distribution of CFRC according to fiber shapes (fiber length: 6mm, fiber volume content: 2%)
C:C-CF, KR:KR-CF, R:R-CF, H:H-CF
S:silicafume addition, plain: OPC matrix.

있다. 또한 표4 및 Fig. 8에서도 C형 섬유 보강 복합체의 경우에 섬유 길이가 길어질수록, 섬유 혼입

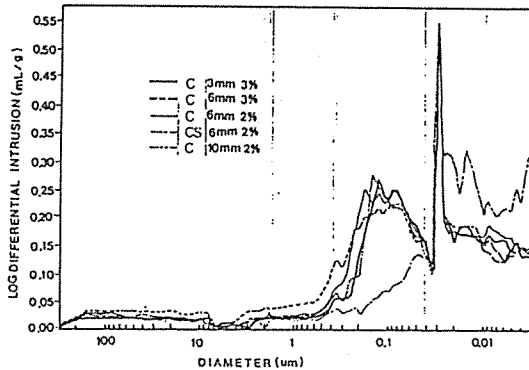


Fig. 8. Pore size distribution of C-CFRC according to fiber length and fiber volume content with or without SF(S: Silica fume addition).

Table 3. Pore volume and median pore diameter in CFRC (from fig.7)
(fiber length 3mm, Fiber volume content 2% , silica fume addition)

Fiber shapes	Plain (V _f =0)	C-CF (CS)	H-CF (HS)	R-CF (RS)	KR-CF (KRS)
Total pore area (m ² /g)	91.005	116.580	117.848	92.137	112.506
Median pore diameter (4V/A)	0.0131	0.0225	0.0312	0.0201	0.0180

Table 4. Pore volume and median pore diameter in C-CFRC (from fig. 8)

Fiber shapes	C-CF (C) 6mm-2%	C-CF (CS) 6mm-2%	C-CF (C) 3mm-3%	C-CF (C) 6mm-3%	C-CF (C) 10mm-2%
Total pore area (m ² /g)	88.891	83.479	92.293	95.650	90.578
Median pore diameter (4V/A)	0.0579	0.0215	0.0672	0.0739	0.0705

율이 증가될수록, 평균 기공 크기 및 총 기공율이 증가되었는데, 이는 Akihama등이[7] 매트릭스별

섬유 혼입율(V_f)증가 실험에서 CFRC의 압축 강도 저하 현상을 혼합중 연행 공기 영향으로 검토한바와 일치된다.

한편 실리카흙을 첨가시에는 첨가하지 않은 경우에 비하여 압축 강도가 크게 증가되었는데, 그 이유는 거대 기공 및 공극이 충전되어 치밀한 조직을 갖기 때문이다. 이는 기공율 측정 결과 평균 기공 크기와 총 기공율이 작은 점과 일치된다.

또한 첨가된 실리카흙은 포졸란 반응을 유도하고 autoclave양생시 tobermorite광물을 형성하여 강도 향상을 꾀하며 반응하지 않은 잉여의 실리카흙은 골재 역할을 한다.

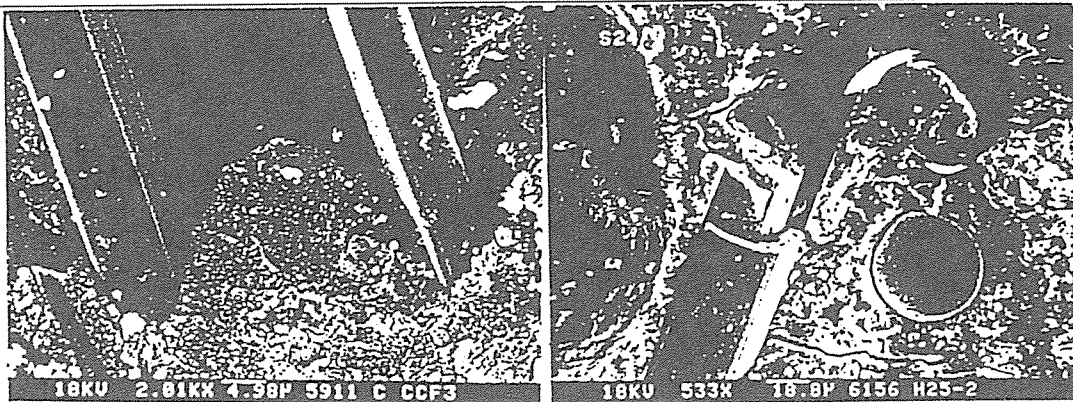
3-2-2 휨강도

Fig.10-11은 섬유 혼입율 및 섬유 길이에 따른 휨강도 특성을 나타낸 것으로 섬유 혼입율이 증가될수록 휨강도는 비례적으로 증가되었으며, V_f=2%에서 섬유 길이의 영향은 중횡비(aspect ratio: L/D)가 150~350에서 변곡점이 생기고, 이 범위에서 최대 휨강도를 나타내고 있다. 실리카흙이 첨가된 복합체는 첨가 되지 않은 복합체에 비해 매우 높은 물성치를 나타내는데 그 이유는, 섬유의 분산성을 증대시키고 공극을 충전시켜 CFRC복합체 계면구조의 치밀성을 증대시키기 때문으로 해석된다.

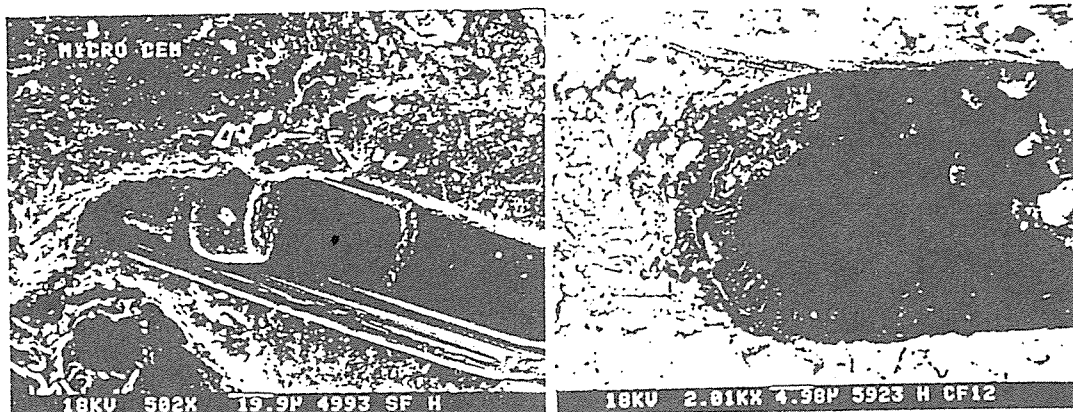
그리고 Fig.10에 의하면 실리카흙을 첨가하지 않은 경우에 섬유 길이 3mm에서, V_f=2%의 경우 Plain보다 원형은 54%, C형은 100%증대되며, 특히 V_f=3%에서는 원형은 103%, C형은 138% 증가하며 C형 섬유 보강 CFRC가 원형 섬유 보강 대비 30~34% 더 증가되었다.

한편 실리카흙 첨가시(S/C=0.16) 섬유 길이 3mm에서 V_f=2%의 경우 Plain보다 원형은 118%, C형은 156%, V_f=3%에서는 원형은 140%, C형은 187% 증가하며, 역시 원형 섬유보다 C형의 경우 32~34% 더 증가되는데 이는 Fig. 9의 ㉠항에서와 같이 원형 형상 ㉠과 비교하여 비표면적 증가에 의한 형상 효과(shape effect)로 부착력이 향상되어 보강 효과가 증대되는 것으로 고려되었다.

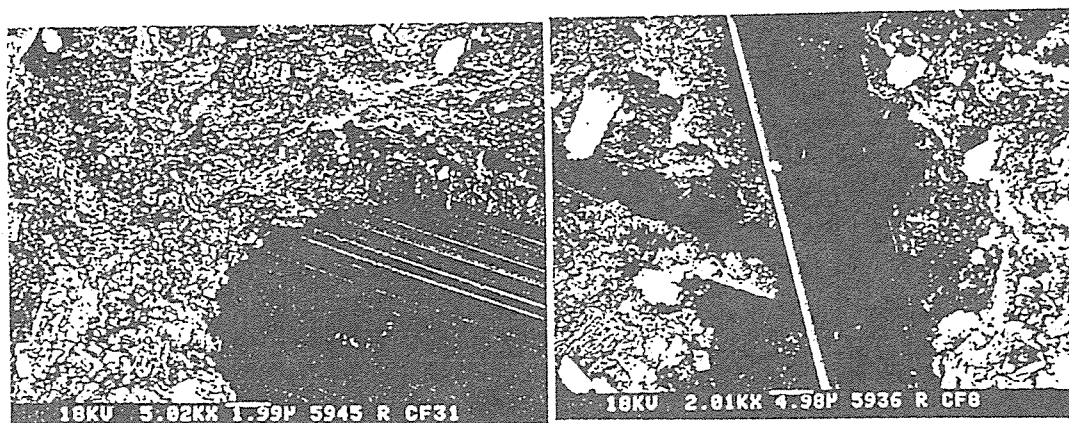
반면 중공형 섬유 보강의 경우 섬유 길이 3mm에서는 hole내부로 모세관 현상에 의한 매트릭스가 침투되어 일부 충전되나, 섬유 길이가 길어질수록 내부로 침투가 어렵게 되어 휨강도가 감소되는데, 이 현상은 Fig. 9의 ㉡항에서 좌·우측 사진에



㉠ C type carbon fiber reinforced cement composite(C-CFRC)



㉢ Hollow type carbon fiber reinforced cement composite(H-CFRC)



㉡ Round type carbon fiber reinforced cement composite(R-CFRC)

Fig. 9. Microstructure of fracture surface after flexural test.

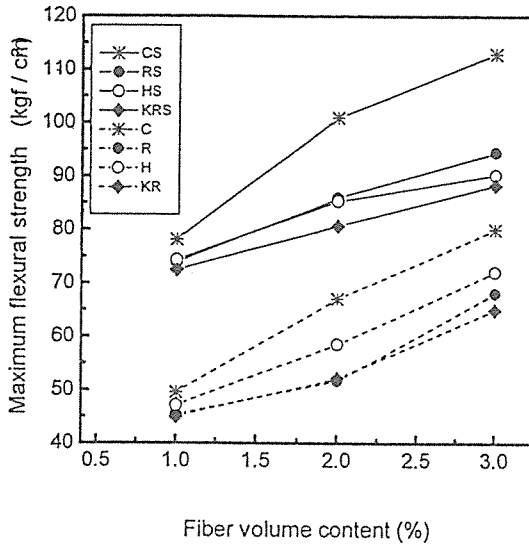


Fig. 10. Relationship between the fiber volume and flexural strength of CFRC added with or without silica fume according to fiber shapes. (fiber length=3mm, C: C-CF, R: R-CF, H: H-CF, KR: Kureha R-CF, S: silica fume addition)

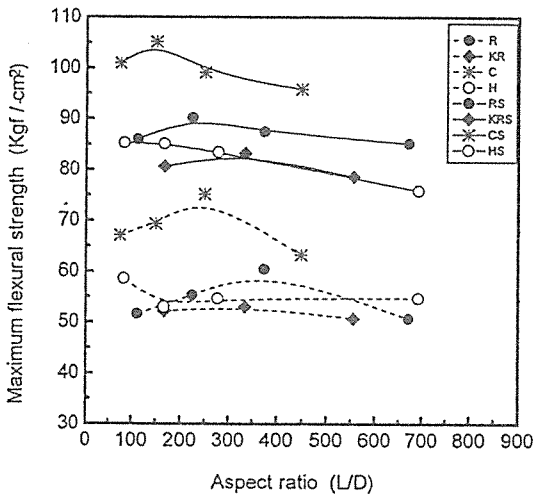


Fig. 11. Maximum flexural strength versus aspect ratio of CFRC added with or without silica fume according to fiber shapes. ($V_f=2\%$, R: R-CF, KR: Kureha R-CF, C: C-CF, H: H-CF, S: silica fume addition)

서 관찰되며 섬유 길이가 3mm이상의 경우에 관통 크랙을 일으킨 섬유의 내부에는 대부분 매트릭스가 충전되지 않았음을 알 수 있었다.

3-2-3 휨인성

휨강도 시험시 측정되는 하중-처짐 곡선은 Fig. 12-13에 나타내었으며, 이를 고찰하여 보면 실리카흙을 첨가한 경우에는 섬유 특성에 관계없이 곡선이 주로 급증가하여 최대 휨강도 이후에는 취성 파괴의 성격을 나타내고 있다.

이와 같이 시멘트와 같은 취성재료의 인성 증가를 위해 사용되는 섬유가 실리카흙과 같은 초미분말의 첨가제와 병행 사용될 때에는 1차 매트릭스의 균열발생없이 선형적으로 증가하여, 최대강도에 도달되는 경향이 있으며 도달 이후 급격히 감소되는 것은 섬유가 pull-out에 의하여 파단되지 않고 섬유가 관통크랙을 일으키기 때문이다. 따라서 이때 물성이 낮은 섬유를 보강재로 사용하면 인성 증대 목적의 섬유 보강 효과가 저하되는 경향이 있다[8-11].

한편 Fig.12에서와 같이 섬유의 형상 효과는 C

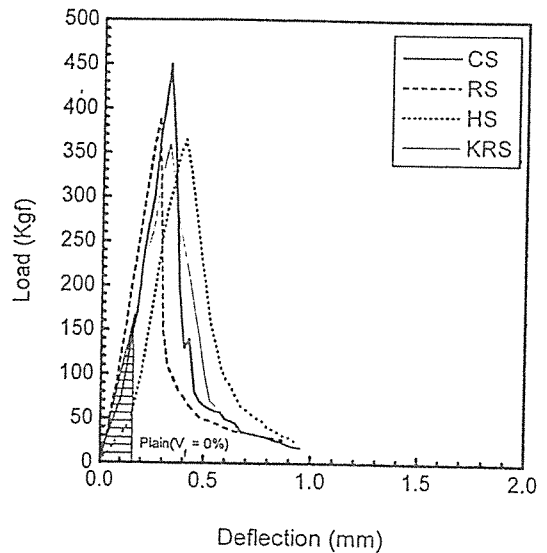


Fig. 12. Flexural load versus deflection of CFRC using silica fume according to fiber shapes. (fiber length=6mm, $V_f=2\%$, C: C-CF, R: R-CF, H: H-CF, KR: Kureha R-CF, S: silica fume addition)

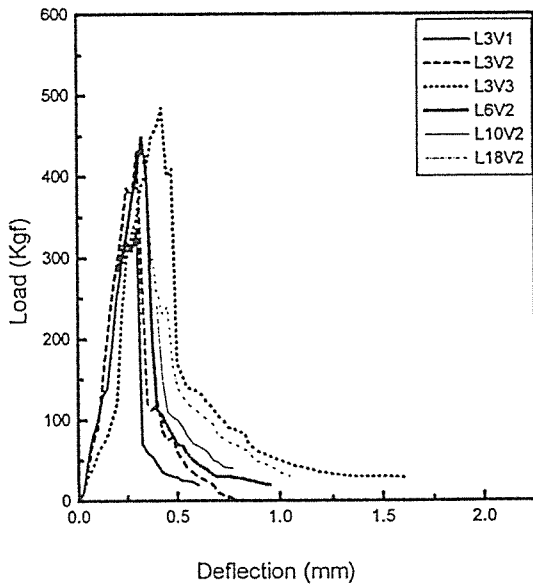


Fig. 13. Flexural load versus deflection of C-CFRP using silica fume according to fiber length and fiber volume content (V_f) 1%, L3V2: 3mm-2%, L3V3: 3mm-3%, L6V2: 6mm-2%, L10V2: 10mm-2%, L18V2: 18mm-2%.

형이 가장 크게 되며 중공형의 경우는 원형보다 최대강도는 낮으나 인성 증가폭은 증가됨을 알 수 있는데, 이는 섬유 구조물성에 관련된 것으로 고려된다.

3-2-4 인장강도

일반적으로 인장강도 역시 휨강도처럼 섬유 길이가 길어질수록, 섬유 혼입율이 증가될수록, 실리카흙 사용시에 증가폭이 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다.

섬유의 형상에 의한 인장강도의 관계를 중형비에 따라 고찰한 결과를 Fig.14에 나타낸다. 섬유 길이 10mm[중형비 250~300]인 경우에 인장강도가 가장 크게 나타났으며, 10mm보다 크게 되면 감소되는데 이는 섬유가 너무 길기 때문에 인장강도 공시체 두께(12mm)에 대하여 랜덤 배향성이 떨어지기 때문이다. 또한 섬유 혼입율과 인장강도 관계(Fig.15)에서도 섬유 혼입을 증가에 따라 인장강도 증가가 비례적으로 증가되며, 실리카흙 첨가

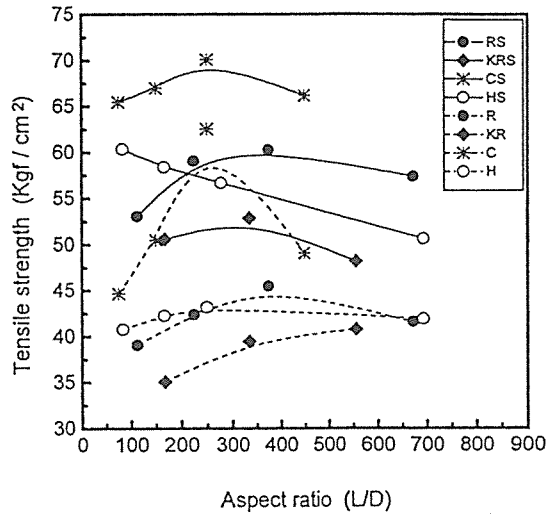


Fig. 14. Relationship between tensile strength and aspect ratio of CFRP added with or without silica fume according to fiber shapes. ($V_f=2\%$, R: R-CF, KR: Kureha R-CF, C: C-CF, H: H-CF, S: silica fume addition).

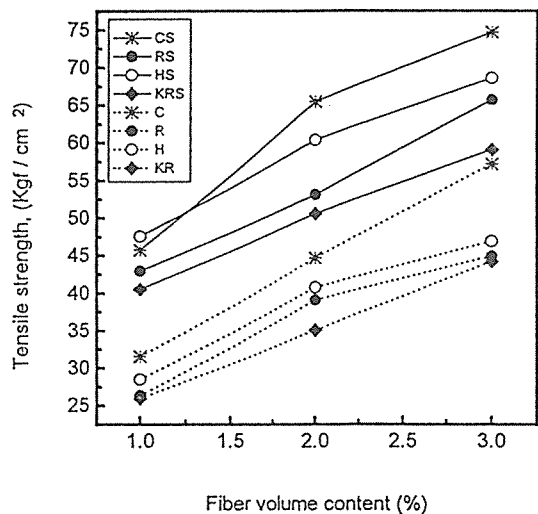


Fig. 15. Relationship between the fiber volume content and tensile strength of CFRP added with or without silica fume. (fiber length=3mm, C: C-CF, R: R-CF, H: H-CF, KR: Kureha R-CF, S: silica fume addition).

시 섬유 길이 3mm에서 $V_f = 2\%$ 의 경우에 Plain보다 원형의 경우 184%, C형의 경우 250%증가하는데, 원형보다 C형의 경우가 1.4배 정도 증가하는 것은 섬유의 형상 효과에 의한 보강 효과로 추정된다.

한편 원형보다 C형 섬유의 경우 이론적 보강 효과가 1.66배로 볼 때[12] 섬유 혼입을 고려시 매우 크게 향상됨을 볼 수 있는데, 이것은 섬유의 배향성 및 길이 유효성 계수 외에 복합적인 요소가 작용되는 것으로 추정된다. 실리카흙 사용시는 휨강도 특성과 유사하게 섬유 분산성이 개선됨은 물론 섬유 내부로 충전되어, 섬유와 매트릭스와의 부착력이 향상되어 보강 효과가 증대되는 것으로 검토되었으며, 계면 부착력이 매우 크기 때문에 매트릭스 파괴 후 섬유의 pull-out에 의한 파괴보다는 섬유의 관통파단에 의한 최종 파괴를 일으켰다. 반면 실리카흙 미사용시는 섬유의 부착력이 보다 낮기 때문에 섬유의 pull-out에 의한 섬유파단이 일어났다. 이와 같이 인장강도는 시멘트 매트릭스의 품질과 섬유 특성, 길이, 함량등에 영향을 받지만 특히 단섬유의 경우 임계길이 이상에서는 실리카흙 및 섬유 함량에 크게 지배를 받는다.

4. 결 론

비원형 형상을 갖는 탄소섬유의 형상에 의한 보강 효과를 파악하기 위하여 취성파괴가 최대 단점인 시멘트 매트릭스에 보강제로 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축 강도의 경우에는 섬유 혼입율이 증가될수록 비례적으로 낮아지며 또한 형상에 의한 영향으로는 비원형 탄소섬유(C, H)의 경우가 섬유 함량 및 섬유 길이의 증가에 따라 원형 대비 저하되며 저하폭은 매우 낮았다. 이유는 혼합중 연행 공기가 일부 혼입되어 매트릭스와 섬유간 계면구조가 치밀하게 충전되지 않고 일부 기공이 존재하기 때문이며, 굳지 않은 CFRC의 흐름성 및 단위 용적 중량과 경화체의 기공율, 계면 구조 관찰 등을 통하여 추론할 수 있었다.
- 2) 휨강도 및 휨인성에서는 실리카흙 사용시 섬유 혼입을 증가에 따라 직선적으로 증가되며, 섬유 함량 2%에서는 섬유 길이가 6mm에서 최대를 보이고, 원형 대비 C형의 경우 30~34%증가되

었는데 이는 비표면적 증가에 따른 섬유 형상에 의한 보강 효과로 간주된다. 또한 실리카흙 미사용 시에도 동일 효과를 나타내며 섬유 길이가 길어질수록 보강 효과가 커지는 것으로 나타났다. 중공형의 경우는 섬유 길이가 짧아질수록 hole내부로 매트릭스가 침투하기 용이하여 최대 휨강도가 증가되나, 길이가 길어질수록 최대 휨강도는 낮아지는데, 이는 길이가 길어질수록 hole내부로 매트릭스가 침투하기 어렵기 때문이다.

- 3) 인장강도의 경우 섬유 혼입율이 증가될수록, 섬유 길이가 길어질수록, 인장강도는 증가되는데, 이는 섬유 길이가 길어질수록, 배향성이 랜덤배향보다는 1 또는 2방향 배향이 쉽게 일어나기 때문이며, 또한 섬유 길이가 길어질수록 섬유의 pull-out이 어렵기 때문이다. 일정 길이 이상에서는 섬유 함량에 의한 보강 효과가 크며, 섬유 길이 3mm, 섬유 혼입율 $V_f = 2\%$ 에서 C형섬유 보강의 경우 원형 보다 약 40% 강도 증진 효과가 있었다.

참 고 문 헌

1. Ohama, Y., et. al., "Carbon-Cement composites", Carbon, Vol. 27(5), 1989, pp.729-737.
2. Batia, N., Gonois, I., "Pitch based carbon fiber reinforced cement with silica fume.", ACI SP 154-17, Advanced in concrete technology, proceedings, 1995, pp.315-333.
3. Toutanji, H.A., Korchi, T.E., Katz, R.N., "Behaviour carbon fiber reinforced cement composites in direct tension.", Cement and concrete reasearch, Vol.23, 1993, pp.618-626.
4. Fukushima, T., Shirayama, K., Hitotsuya, K., "Mechanical characteristics of chopped fiber reinforced cement composites mainly using carbon fiber.", Fiber reinforced cement and concrete, RILEM, 1992, pp.965-979.
5. Rhee, B.S., et al., "Potential of noncircular fiber as reinforcing material I. C-type carbon fiber", Korean journal of material research, Vol.4(7), 1994, pp.817-822.
6. T.J.Kim, B.S.Rhee et al., "Shape effect of mechanical properties of non circular type car-

bon fiber reinforced cement composites", 3th TCIBC International symposium, 1996, pp.489-497.

7. Akihama,S., Suenage,T., Banno, T., " Mechanical properties of carbon fiber reinforced cement composites.", International journal of cement composite and lightweight concrete, Vol.8(1), 1986, pp.21-33.

8. Ohama,Y., Amano,M., Endo,M., "Properties of carbon fiber reinforced cement with silica fume.", ACI, Concrete international, 1985, pp.58-62.

9. Katz,A., Bentur, A., "Mechanical properties

and pore structure of carbon fiber reinforced cementitious composites.", cement and concrete research, Vol 24(2), pp.214-220.

10. Chen,P.W., Chung,D.D.L., "Concrete reinforced with up to 0.2vol% of short carbon fibers.", Composites, Vol.24(1), 1993, pp.33-52.

11. Katz, A., Li,V.C., Kazmer,A., "Bond properties of carbon fibers in cementitious matrix.", Journal of materials in civil engineering, May, 1995, pp.125-128.

12. T.J.Kim, Thesis of doctor degree, chemical eng. Chungnam national univ. Korea 1996.