

섬유보강 시멘트재료에 있어서의 ARG 보강효과

정문영* · 류동우 · 송종택 송태협 · 김기승

〈 단국대학교 〉

〈 (주)주일 기술연구소 〉

1. 서 론

시멘트 재료는 압축강도, 내구성, 강성 등이 우수하고 경제성을 가지고 있는 건축재료로서 가장 널리 사용되고 있으나 취성재료라는 결점 때문에 시멘트 제품은 압축강도에 비해 휨강도 및 인성이 매우 취약하다. 이러한 결점을 보완하기 위해 시멘트계 건축재료의 대부분은 보강 섬유를 혼합하여 휨강도와 인성을 증가시킨 시멘트계 복합재료로 생산되고 있다.

현재까지 가장 많이 사용되고 있는 FRC용 보강섬유는 석면으로서 인장강도, 내알칼리성, 내구성, 경제성 면에서 우수하다. 그러나 석면은 호흡기에 흡입될 경우 암을 유발할 수 있는 물질로 규정되어 그 사용량이 점차로 규제될 전망이다. 반면에 이 외의 보강섬유로 알려져 있는 것들은 무기계의 ARG, slag wool, rock wool 등이 있고 유기계로는 polypropylene, polyethylene, polyacryl, polyvinyl alcohol, nylon, rayon 및 천연 유기섬유로서 아마, cellulose 등¹⁻²⁾이 있어 이에 대한 상업적 적용이 부분적으로 시작되고 있다.

한편 시멘트 건축자재의 생산에 있어 양생 시간의 단축, 조기강도 발현, 고른 품질 유지, 제품의 치수 안정성, free CaO의 감소 등을 이유로 autoclave로 처리를 한다. 이때 위에서 언급한 섬유 중 유기계 섬유의 대부분은 내열성 면에서 취약하여 autoclave 양생 조건인 고온, 고압의 수증기압하에서 사용이 제한된다.

따라서 본 연구에서는 autoclave 처리 조건에서 비

교적 안정한 ARG를 선택하여 배합 비율과 길이에 따른 시편을 제작해서 휨강도, elastic modulus를 측정하고 섬유의 열화 상태를 SEM으로 관찰하였다. 또한 160℃ 및 180℃의 수증기압하에서 E-glass fiber 및 유기섬유인 PP, PVA계 섬유와도 비교검토 하였다.

2. 섬유 보강 이론

섬유보강재료란 인장하중을 섬유가 분담한다는 측면에서 섬유의 특성에 따라 이 복합재료는 큰 차이를 보이게 된다.

이에 대한 주인자로는,

- 1) 섬유의 인장강도 (matrix와의 상대성)
- 2) matrix와의 부착강도
- 3) 섬유의 배향성 등을 들 수 있다.

우선 섬유보강 시멘트재료를 복합재료로 보아 강도에 관한 결합법칙을 적용하면,

$$\sigma_t = \sigma_m V_m + \eta_i \eta_\theta \sigma_f V_f \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

σ_t = 복합재료의 인장강도

σ_m = 매트릭스의 인장강도

V_m = 매트릭스의 부피비율

σ_f = 섬유의 인장강도

V_f = 섬유의 부피비율

η_i = 섬유의 길이 효과 인자

η_θ = 섬유의 배향 효과 인자

한편 섬유의 인장력과 matrix와의 섬유의 부착강

사용원료의 화학조성 및 blaine value

〈표 1〉

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	Ig-loss	Blaine (cm ² /g)
시멘트	21.5	5.3	3.1	64.2	3.0	—	—	3,350
규석분	93.10	2.48	2.42	1.23	0.47	0.30	—	2,750
fly ash	68.10	20.40	2.98	0.99	—	0.6	3.89	4,050

도를 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$lc = 6f \frac{d}{2\tau}$$

$$6f = \frac{lc 2\tau}{d} \dots\dots\dots ②$$

- lc = 섬유 길이
- τ = 섬유의 부착강도
- d = 섬유의 직경

Mixture rule에 의해 ① ② 식을 다시 정리하면.

$$6_b = A 6_{bm} (1-V_f) + B V_f l/d$$

- 6_b = 복합재료의 곡강도
- 6_{bm} = 매트릭스의 곡강도
- l = 섬유의 길이
- d = 섬유직경
- A, B = 상수

위 식에서 주 변수는 V_f, l 이 되며 이 실험에서 V_f, l을 변화시켜 시험하였다.

3. 실험

보강섬유의 특징

〈표 2〉

	ARG	E-glass	PP	PVA
밀도(g/cm ³)	2.78	2.54	0.91	1.3
직경(μm)	14-16	16	15-17	15-18
길이(mm)	6, 12	6	6	6
Aspect ratio	490, 860	460	355	375
인장강도 ((kgf/mm ²)	250	350	77.5	150
탄성계수 ((kgf/mm ²)	7200	7400	480	3770
Elongation at rupture(%)	3.6	4.8	26.1	7-11
Incombustibility	melting	melting	decomposition (pyrolysis gas)	decomposition (pyrolysis gas)

Plasticizer(Hydroxy Propyl Methyl Cellulose)의 특성
〈표 3〉

Bulk Density	점도	점도측정조건
0.40	30,000 cps	수용액 2% 20℃ RV type 20 rpm

3.1 사용원료

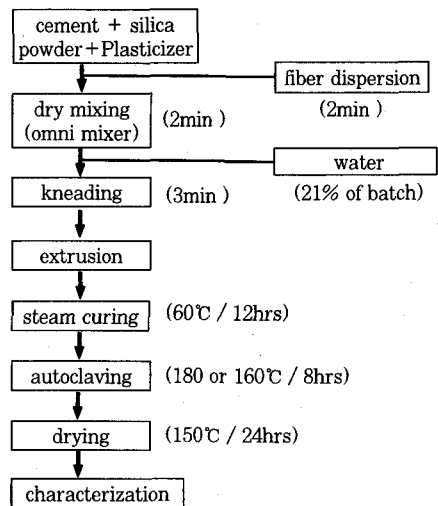
본 실험에 사용된 시멘트, 규석분 및 fly ash의 화학조성과 blaine 값은 〈표 1〉과 같으며, 보강섬유와 plasticizer의 물리적 특성을 〈표 2, 3〉에 나타내었다.

3.2 실험방법

3.2.1. 시편제조

본 실험은 3점 지지점에 의한 휨강도 시험을 수행하기 위하여 크기가 10×80×400mm인 plate상의 시편을 토출직경 100mm의 진공압출성형기를 이용하여 제작하였으며 스팀양생과 autoclave에서 처리하였다. 그 순서와 조건을 〈그림-1〉에 나타냈다.

시편의 배합 설계에 있어 시멘트와 규석분의 비율은 C/S mole ratio를 0.86으로 고정하였고 fly ash를 투입한 것은 fly ash 5%로 규석분을 대체하여 C/S mole ratio를 일정하게 조정하였다. 한편 변화인자인 보강섬유는 ARG의 경우 섬유길이 6, 12mm



〈그림-1〉 시편 제조의 flow chart

를 volume % 기준으로 각각 1, 2, 3 % 씩 투입하였다. 또한 비교 시험으로 PP와 PVA계 섬유는 6mm 인 것으로 2%를 투입하여 제조하였다. 그리고 모든 배합에 있어 plasticizer와 배합수는 batch wt.% 기준 각각 0.8%와 21%로 일정하게 조정하였다.

변수 조정 범위를 섬유길이 12mm, 투입범위 3% 이내로 한 것은 이 이상의 범위에서 압출 성형 상태가 불량하여 정확한 결과를 얻는데 곤란하였으므로 시험 진행에서 제외시켰다. 그 이유는 길이와 혼합 비율 증가에 따른 고른 섬유의 분산이 어렵다는 것과 압출기의 기계적 특성 및 capacity와도 관계가 있는 것으로 생각된다.

3.2.2. 물성 시험 방법

a) 휨강도 : 양생이 끝난 시편을 105℃에서 항량건 조시켜 3점 지지점으로 측정하였으며 (시험기:SIMADZU AUTOGRAPH AG-10TE) 이때의 시험 조건은 span 300mm, loading speed 5mm/min를 유지시켰다. 각 조건별로 시편 5개를 선택해서 다음 식에 의하여 측정값을 구하였다.

$$6f = \frac{3PL}{2BT^2}$$

6 = 휨 강도
 P = 파괴하중
 L = span
 B = 시편의 폭
 T = 시편의 두께

b) Elastic Modulus : 선형 구간내에서의 휨하중의 변화를 휨의 변형길이를 나누어서 탄성 영역의 기울기를 구하였다.

c) 밀도, 흡수율, 선변화율 : 각 조건별 5개씩의 시편을 채취하여 각 물성을 측정하였으며 계산 식은 다음과 같다

$$\text{밀도} = \frac{\text{절건중량}}{\text{부피}} \times 100$$

$$\text{흡수율} = \frac{\text{포수중량} - \text{절건중량}}{\text{절건중량}} \times 100$$

$$\text{선변화율} = \frac{\text{포수길이} - \text{절건길이}}{\text{절건길이}} \times 100$$

4. 시험결과 및 고찰

4.1. ARG 첨가량에 따른 강도변화

4.1.1. 휨강도의 변화

섬유의 투입비율별, 길이별에 따른 휨강도의 변화를 <그림-2>에 나타냈다. 본 시험에서 C/S mole비를 0.86으로 하고 autoclave를 180℃로 처리한 plain 경화체의 휨강도가 226kgf/cm²인데 비하여 ARG가 혼합된 시편의 휨강도는 모두 증가하였으며 6, 12mm 모두 투입량 2%에서 가장 양호한 강도보강 효과를 보여주고 있다.

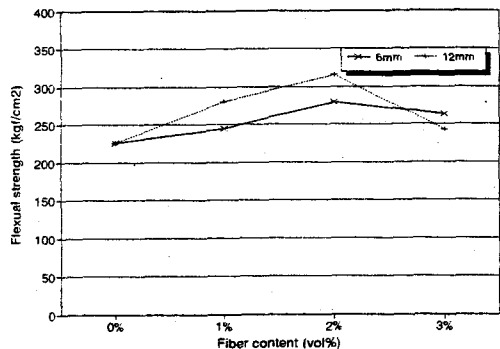
1%-2% 구간에서는 섬유길이 6, 12mm 모두 휨강도가 증가하였으며 섬유길이의 차이에 따라 6mm보다 12mm가 더 증가한 것으로 나타났다. 이는 섬유의 aspect ratio 측면에서 12mm가 6mm에 비하여 유리하므로 섬유와 matrix와의 결합력이 상대적으로 큰 것이라고 생각된다.

섬유보강 이론에 따른 휨강도는 혼합비율의 증가와 길이의 증가에 비례하여 증가하는 것으로 되어있는데 시험결과 휨강도는 혼합 비율에 따른 차이보다 섬유의 길이에 따른 차이에 더 영향을 받는 것으로 보여진다.

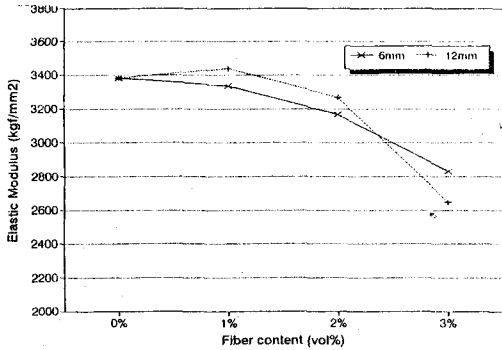
한편 2%-3% 구간에서는 모두 휨강도가 감소하였다. 특히 12mm의 시편이 그 차이가 뚜렷했는데 그 이유는 혼합 비율이 많고 섬유의 길이가 길어 고른 분산이 불리했거나 섬유의 종방향 비율 및 압출시 배합의 유동성 감소로 인한 성형상태가 나빠진 것 등이 영향을 준 것으로 생각된다.

4.1.2. Elastic modulus의 평가

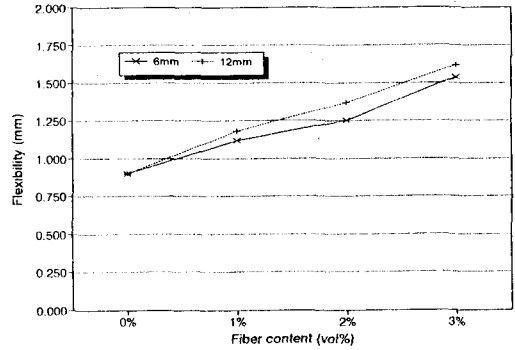
실제로 섬유 보강 효과를 비교하기 위해선 휨강도



<그림-2> ARG 혼합비율에 따른 휨강도



(a) Elastic modulus의 변화



(b) 휨의 변화

〈그림-3〉 ARG 혼합비율에 따른 elastic modulus와 휨의 비교

외에 elastic modulus를 평가하는 것이 중요한데 그 결과를 〈그림-3〉에 나타냈다. 〈그림-3〉(a)에서 ARG가 1% 혼합된 시편의 경우는 plain 시편과 큰 차이를 보이지 않다가 2%이하부터 elastic modulus 값이 작아지고 있다. 한편 휨강도와 달리 섬유 길이보다는 혼합 비율에 의해 elastic modulus가 더 작아지는 경향을 보이고 있다.

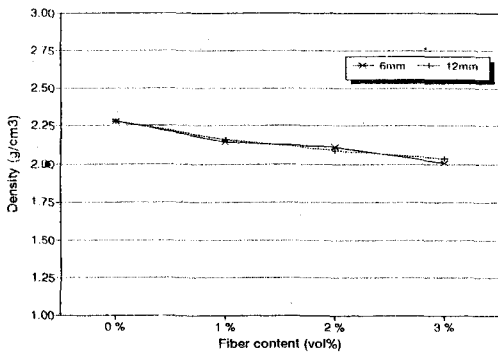
대등한 휨강도라면 섬유의 보강효과에 의해 파괴에 이르는데 필요한 에너지 양이 커진다는 의미에서 elastic modulus가 작은 것이 제품의 휨을 증가시킬 수 있어 유리하다고 볼 수 있다.

〈그림-4〉(b)는 최대하중에 따른 휨 변화를 나타냈고 섬유의 혼합 비율의 증가에 따라 휨이 증가함을 알 수 있다. 또 (a)와 비교할 때 휨 변화의 증가에 따라 elastic modulus가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

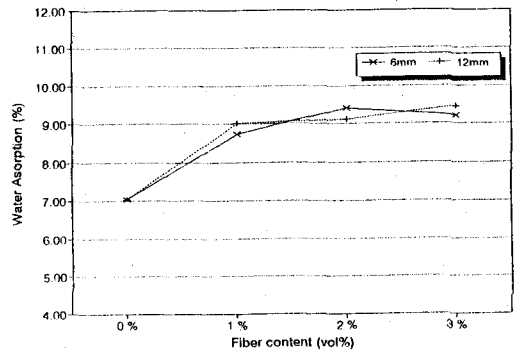
한편 시편의 파괴 형태는 최대하중 시에 crack의 전파가 순간에 이루어지는 취성적 형태를 취하고 있어 first crack 후에 섬유의 bridging현상이 나타나지 않았다. 따라서 ARG의 경우 휨강도와 휨은 증가시킬 수 있으나 제품의 취성적인 파괴를 완화시키고 균열을 제어할 수 있는 측면에서는 충분하지 못한 것으로 보인다.

4.1.3. 밀도와 흡수율의 변화

〈그림-4〉에서 나타난 바와 같이 섬유의 혼합 비율이 증가함에 따라 밀도가 감소하였으며 흡수율은 증가하였다. 이는 ARG가 strand 상태로 되어 있어 섬유의 혼합 비율이 높을 수록 ARG가 개개의 섬유로 분리되지 않고 fiber rich layer¹⁾로 남아있는 경우가 많으므로 섬유와 섬유사이에 void가 존재할 확률이

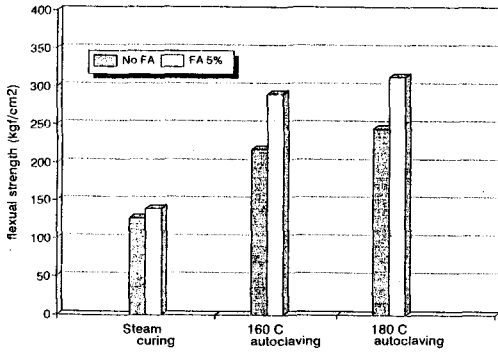


(a) 밀 도



(b) 흡 수 율

〈그림-4〉 ARG 혼합비율에 따른 밀도와 흡수율의 비교



(그림-5) Fly ash 혼합시 양생조건에 따른 휨강도 변화 (첨가량 5%)

많아지기 때문인 것으로 생각된다.

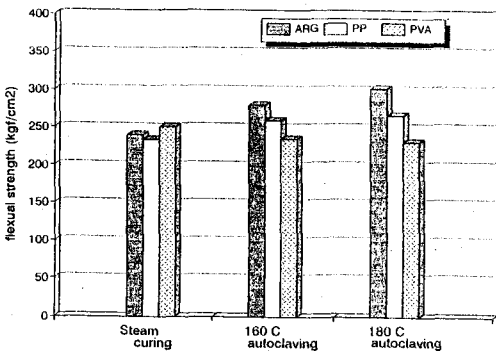
또한 압출 성형면에서 작업성과 관계하여 섬유유 증가에 따라 배합수량도 다소 증가한 것에도 기인한 것으로 생각된다.

4.1.4. Fly ash의 영향

규석 미분말을 fly ash로 5% 대체하였을 경우 휨강도 측정 결과를 (그림-5)에 나타내었다. Autoclave로 양생하고 fly ash를 혼합한 시편이 비교적 큰 폭으로 휨강도가 증가하였다. 이는 fly ash가 규석미분말에 비하여 입자가 작고 포졸란 특성이 있으므로 동일한 autoclave 조건에서 더 많이 반응에 참여했기 때문인 것으로 보여진다.

4.2. ARG와 유기계 섬유와의 비교

4.2.1. Autoclave 처리 조건에 따른 비교



(그림-6) 섬유종류별 휨강도 변화

섬유 종류에 따른 휨강도 및 elastic modulus를 비교하기 위해 각각의 섬유를 2%씩 혼합하여 시편을 제조하였으며 그 결과를 (그림 6, 7)에 나타냈다.

휨강도에서 자연양생의 경우에는 3종류의 시편 모두 큰 차이를 보이지 않다가 autoclave 처리 온도에 따라서 차이를 보인다. 즉 autoclave 처리 온도에 많은 영향을 받지 않는 ARG를 혼합한 시편의 경우는 계속 상승하나 내열도가 약한 PVA 섬유를 혼합한 시편은 autoclave 처리 후 오히려 휨강도가 감소하는 경향을 보이고 있다. PP의 경우는 160℃까지는 증가하다가 이후부터는 증가하지 않았다.

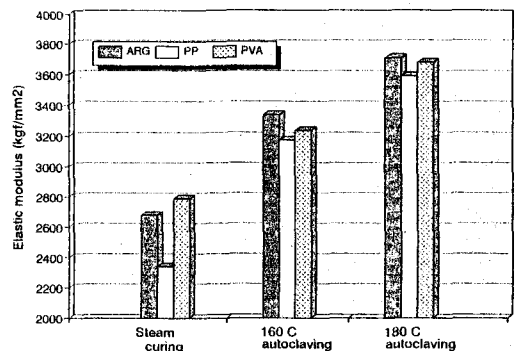
Elastic modulus는 3종류의 섬유 모두 양생온도가 증가함에 따라서 elastic modulus가 증가하였는데 이는 autoclave 처리온도의 증가에 따라 matrix의 elastic modulus가 증가하고 반대로 섬유의 보강효과가 작아지는데 기인하는 것으로 생각된다.

4.2.2. Load-deflection curve의 비교

ARG와 PVA, PP계 섬유로 제조한 시편의 Load-deflection curve를 (그림-8)에 나타냈다. 이 그림은 본 시험에서 사용한 AUTOGRAPH-10TE에 PC로 연결된 화면을 screen capture하여 image file로 출력한 그림이다.

시멘트 matrix는 elastic modulus가 큰 취성재료이고 상대적으로 PP, PVA계 섬유자체의 elastic modulus가 작으므로 first crack까지의 하중값은 matrix의 최대하중에 주로 좌우되어 큰 차이가 없는 것으로 보여진다.

양생조건에 관계없이 ARG를 혼합한 시편은



(그림-7) 섬유종류별 elastic modulus

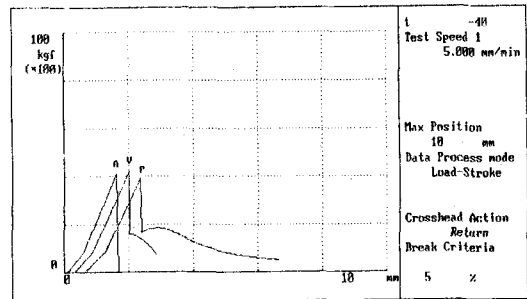
elastic-brittle curve를 나타내고 있는데 그 이유는 ductile fiber인 유기계 섬유와 달리 ARG 섬유는 brittle fiber의 특성을 가지고 있으므로 이와 같은 파괴형태를 갖는 것으로 보여진다. 반면에 steam curing에서 유기계 섬유인 PVA, PP 섬유를 혼합한 시편은 최대하중인 first crack 이후에도 계속적으로 하중을 받는 elastic-plastic curve를 보여준다. 이와 같이 유기계 섬유가 혼합된 시편이 파괴 후에도 일정한 힘을 지속적으로 받는 것은 섬유가 plastic deformation에 의해 끊어지는 elongation이 큰데 따른 necking과 섬유가 matrix에서 뽑히는 pull-out에 의한 것⁴⁾으로 생각된다.

한편 양생온도가 높아짐에 따라 유기섬유를 혼합한 시편 모두 elastic modulus가 증가하고 최대하중 시 순간적인 파괴를 보여주는 elastic-brittle curve를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 autoclave 처리 온도의 상승에 따라 matrix도 더욱 취성적으로 변하고 PP, PVA의 열화로 인해 bridging 현상이 없어진 것으로 생각된다.

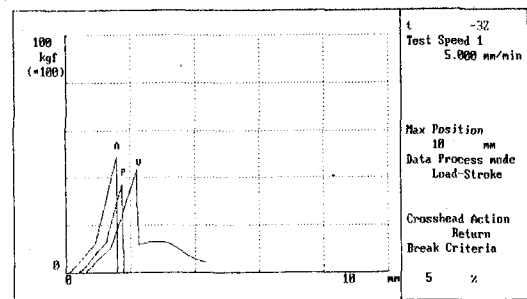
〈그림-8 (b)〉와 같이 PP를 혼합한 시편의 경우는 PVA와 달리 autoclave 처리 온도 160℃ 까지에서 melting이 일어나지 않음으로 elastic-plastic curve를 보여주고 있으나 PVA 섬유는 160%에서부터 elastic-brittle curve를 나타내고 있다.

4.2.3 시편단면의 관찰

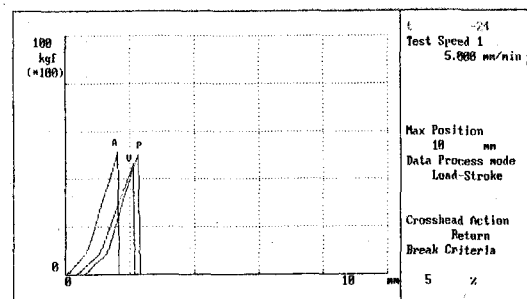
위의 결과를 확인하기 위해 SEM으로 관찰한 섬유의 열화상태를 〈그림-9〉에 나타내었다. 〈그림-9〉에서 보듯이 160℃에서 PVA 섬유는 거의 섬유전체가 용착되어 보강 효과를 가질 수 없는 것이 확인되었고 PP 섬유



a) Steam curing at 60°C

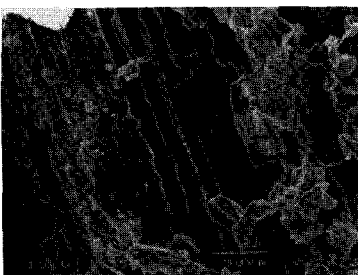


b) Autoclaving at 160°C

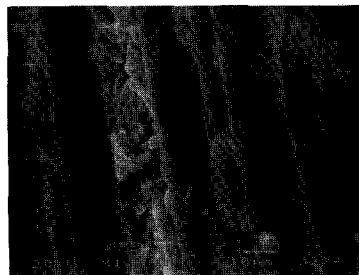


c) Autoclaving at 180°C

〈그림-8〉 시편의 휨하중 시험의 load-deflection curve



a) Autoclave 160°C로 처리한 PVA 섬유

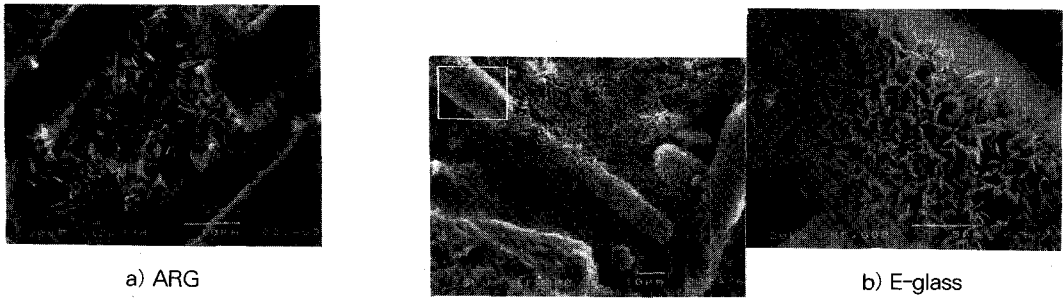


b) Autoclave 160°C로 처리한 PP 섬유



c) Autoclave 180°C로 처리한 PP 섬유

〈그림-9〉 Autoclave 처리 후의 유기섬유의 열화상태



〈그림-10〉 E-glass와 ARG와의 비교(autoclave 180℃)

유는 섬유의 상태가 비교적 보존이 되어 열화가 조금밖에 되지 않은 것을 알 수 있다. 또한 180℃에서는 PP섬유까지 상당 부분 열화가 일어나서 보강효과를 나타낼 수 없음이 확인⁵⁾되었으며 이 SEM 결과와 elastic modulus 측정 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

또한 autoclave 조건하에서 E-glass와 ARG의 내알칼리성을 비교하기 위해 180℃에서 처리한 시편의 SEM관찰 결과를 〈그림-10〉에 나타냈다. ARG의 표면은 비교적 반응성이 적어 표면의 침식이 약간 일어난 것으로 보여지나⁶⁾ E-glass는 섬유자체가 알칼리에 거의다 침식되고 수열반응이 진행됨에 따라 수화물이 생성되는데 필요한 SiO₂원으로서 소모된 것으로 보여진다.

5. 결 론

1) ARG를 첨가함에 따라 휨강도와 휨이 증가했으며 섬유를 혼합하지 않은 plain의 휨강도가 226kg/cm²인데 비하여 길이 12mm로 2%혼합한 시편의 휨강도는 315kg/cm²으로 가장 높게 나왔다. 반면 elastic modulus는 섬유의 첨가량이 늘수록 감소하는데 이는 섬유의 보강 효과로 파괴에 필요한 에너지가 커지는 것으로 볼 수 있다.

2) 섬유보강 이론식에 따르면 보강효과는 섬유의 길이와 혼입율에 영향을 받는데 휨강도는 섬유의 길이에 대해 더 영향을 받고 elastic modulus는 첨가비율에 더 영향을 받는 것으로 보인다.

Fly ash를 혼합한 시편의 경우 fly ash를 혼합하지 않은 시편에 비해 autoclave 온도에 따라 휨강도가 더 증가했다. 이는 fly ash가 규석 미분말에 비해 입자 크기가 작고 포졸란반응성이 있어 비교적 수열반

응이 많이 진행된 것과 충전효과에 의한 것으로 보여진다.

3) ARG를 혼합한 시편의 경우 양생온도에 관계없이 elastic-brittle curve로 나타났고 이에 비하여 PP, PVA계 섬유를 혼합한 시편의 경우 steam curing조건에서 모두 elastic-plastic curve를 보였다. 그러나 autoclave 처리온도에 있어서 PVA섬유를 혼합한 것은 160℃에서 PP섬유를 혼합한 것은 180℃에서 elastic-brittle curve로 변화되어 나타났다. 이는 유기계 섬유의 열적안정성인 섬유의 열화와 관계가 있음이 SEM으로 확인되었다.

〈참고문헌〉

1. A. Bentur & S. Mindness "Fiber Reinforced Cementitious Composite" Elsevier Applied Science Publishers Ltd (1990)
2. 신회덕, 문영호 "섬유강화 콘크리트의 기술현황과 전망" 산업연구원(1988)
3. 김경수, 김재욱, 이용우, 배주성 "강섬유보강재가 콘크리트의 파괴인성과 강도에 미치는 영향" 콘크리트학회지 6(1) 131-141 (1994)
4. B.D. Agarwal & L. J. Broutman "Analysis and Performance of Fiber Composite" Wiley-Interscience Publication (1990)
5. 박승범 "산업부산물 및 규산칼슘계를 이용한 건축용 경량고강도복합체의 개발평가에 관한 실험적 연구" 콘크리트학회지 6(4)141-152 (1994)
6. V.T. Yilmaz & F.P. Glasser "Reaction of Alkali-Resistance Glass fibres with Cement" Glass Technology 32(4) 138-147 (1991)