

炭素纖維補強 플라이애쉬-시멘트 複合材의
力學 特性에 關한 實驗的 研究(I)

Experimental Study on the mechanical properties of CF
Reinforced Fly Ash-Cement Composites(I)

오 박 승 범* 은 의 식** 송 용 순***
Seung Bum, Park Eui Sik, Yoon Yong Soon, Song

ABSTRACT

Results of an experimental study on the manufacture and the mechanical properties of carbon fiber reinforced fly ash-cement composites are presented in this paper. The carbon fiber reinforced fly ash-cement composites using silica powder and a small amount of Ethylene vinyl acetate emulsion are prepared with carbon fiber, foaming agents and curing conditions. As a result, the manufacturing process technology of carbon fiber reinforced fly ash-cement composites is developed. And the mechanical properties such as compressive, tensile and flexural strengths and drying shrinkage of lightweight carbon fiber reinforced fly ash-cement composites are improved by using a small amount of Ethylene vinyl acetate emulsion. The development and applications of precast products and the design systems of lightweight carbon fiber reinforced fly ash-cement composites are expected in the near future.

1. 서 론

산업폐기물인 석탄회 및 플라이애쉬는 국내화력발전소에서 연간 200만톤 및 150만톤이상 대량으로 부산되어 이중 대부분은 막대한 경비를 들여바다의 회사장에 폐기되고 있는 실정이며, 웨로실리온 또는 금속규소의 제조시 부산되는 실리카흄도 대부분 폐기되는 실정이다. 또한 '90년대 중반이면 국내의 전력 수요 급증에 따른 화력발전소의 증설로 이들 부산물은 약 400만톤에 이를 것으로 예상되고 있어 부존자원이 없는 우리나라로서는 이들 산업폐기물의 선진국수준으로의 유효이용 및 용도개발이 시급한 실정이다. 이미 미국, 일본, 영국 및 구라파등에서는 이들 산업폐기물인 플라이애쉬 및 실리카흄을 시멘트, 콘크리트에는 물론 산업용재로서의 응용 및 연구개발이 활발히 진행되고 있으며, 우리나라에서도 이에 관한 응용연구가 일부연구자 및 관련연구소등에서 수행된바 있고, 산업용으로 일부활용되고 있으나 선진국에 비하여 그 응용 및 활용연구가 미진한 실정이다.

이에 본 연구에서는 저탄성의 Pitch계 탄소섬유를 보강재로 사용하여 경량용 경량고강도이면서 내화, 내구성이 우수하고 안정성 및 신뢰성이 높은 선진국수준의 플라이애쉬/실리카흄-시멘트복합체를 개발활용하기 위한 기초적 연구로 먼저 탄소섬유보강 플라이애쉬, 시멘트복합체의 최적배합조건과 각 영향인자에 따른 복합체의 역학적 특성을 분석, 고찰하였다.

* 정회원 충남대학교 토목공학과 교수
** 준회원 충남대학교 토목공학과 박사과정
*** 준회원 충남대학교 토목공학과 석사과정

2. 시험개요

2.1 사용재료

(1)시멘트 및 플라이애쉬:시멘트는 H사 제품의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 플라이애쉬는 국내 유연탄화력발전소인 B발전소에서 발생된 것으로, 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 2. Chemical Compositions and Physical Properties of Fly Ash

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Loss (%)	Specific Gravity(20°C)	Surface Area(cm ² /g)
64.10	28.10	4.25	1.20	0.78	1.27	0.07	3.34	2.21	4,951

(2)탄소섬유:탄소섬유는 Kureha(주)제품의 저탄성 Pitch계 탄소섬유를 사용하였다. (직경14.5x10⁻³mm, 비중 1.63, 인장강도 7800kgf/cm²)

(3)골재:골재는 미소한 직경의 탄소섬유를 보강재로 사용하는 것을 고려하여 매트릭스가 섬유와의 접착이 양호하도록 s광업제품의 평균입경 7.1μm의 규사분말을 사용하였다.

(4)기포제 및 시멘트혼화용 폴리머분산제:기포제는 국내의 R사 제품의 고급 알콜규산에스텔계 기포제(Higer Alcohol-Sulfate type Foaming Agent)를 사용하였고, 폴리머분산제는 일본 W사 제품의 EVA(Ethylene Vinyl Acetate)에멀전을 사용하였다.

2.2 배합 및 시험방법

(1)배합 및 피싱:경량 탄소섬유보강 플라이애쉬, 시멘트복합체의 제조를 위한 배합에는 Table 2.와 같이 하였고, 폴리머 분산제사용 경량 탄소섬유보강 플라이애쉬, 시멘트복합체의 배합은 Table 3.과 같이 하였으며, Flow값은 모두 160±5로 하였다.

피싱은 섬유의 매트릭스내에서의 랜덤균분산상을 위하여 용량 10ℓ의 섬유분산용 Omni-Mixer를 사용하였으며, 피싱시간은 a)Dry blend:2분(시멘트, 실리

Table 6. Mix Proportions of Lightweight Carbon Fiber Reinforced Fly Ash-Cement Composites

Fly Ash : Cement (By Wt.)	Silica Fume (Vol. % of Fly Ash + Cement)	Foaming Agent (Wt. % of Fly Ash + Cement)	CF (Vol. %)	Water / (Fly Ash + Cement) (%)	Flow (175 ± 5)
40 : 50	30	0	0	39.4	175
			0.5	41.5	
			1.0	46.5	
			1.5	51.0	
			2.0	57.5	
			2.0	58.0	
		0.1	0	40.5	174
			0.5	43.0	
			1.0	47.0	
			1.5	51.5	
			2.0	58.0	
			2.0	59.0	
0.2	0	41.5	176		
	0.5	43.5			
	1.0	48.0			
	1.5	52.0			
	2.0	59.5			
	2.0	60.7			
0.3	0	42.8	174		
	0.5	44.0			
	1.0	48.5			
	1.5	54.0			
	2.0	60.7			
	2.0	60.7			

Table 7. Mix Proportions of Polymer - Modified Lightweight Carbon Fiber Reinforced Fly Ash - Cement Composites

Type of Polymer	Fly Ash : Cement (By Wt.)	Silica Fume (Vol. % of Fly Ash + Cement)	Premier (Foaming Agent) (Wt. % of Fly Ash + Cement)	CF (Vol. %)	Water / (Fly Ash + Cement) (%)	Flow (175 ± 5)
EVA	40 : 50	30	0.1	2.0	0	58.0
					5.2	55.7
					10.1	54.8
					15.8	51.5
					24.5	48.8

카파우더 및 플라이애쉬), b) primary blend: 3분(물 및 혼화제첨가), c) Secondary blend: 3-5분간 투입 후 탄소섬유투입 후 2분간 믹싱 후 마지막으로 기포제 첨가 후 2분간 믹싱하였으며, 폴리머복합체 사용의 경우 믹싱시간은 a) Dry blend: 2분(시멘트, 플라이애쉬 및 실리카 파우더), b) Primary blend: 3분(폴리머, 혼화제 및 물 첨가), c) Secondary blend: 3-5분간 탄소섬유 투입 후 2분간 혼합하였다.

(2) 공시체의 성형 및 시험방법: 압축 및 인장강도 그리고 단위용적중량시험은 KSL 5104, 5105 및 K SF 2409에 준하여 시험을 행하였고, 휨강도시험은 J IS R 5201에 준하여 4x4x16cm의 공시체를 제작하여 10t Instron 만능시험기를 사용하여 크로스베드 속도 5.5mm/min로 중앙집중재하방식으로 휨시험을 행하고, 이때의 하중-처짐곡선을 레코더로 구하였다.

(3) 양생방법: 공시체양생은 성형후 24시간에 탈형하여 1일 습은양생(23±2°C, RH 80%) 후 기건양생은 23±2°C, RH 60±5%의 조건에서, 그리고 오토클레브양생은 최고온도 180°C, 10kg/cm²의 기압에서 4시간동안 양생을 행하였으며, 재령28일에서 재강도 측정을 행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 굳지않은 탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트 복합체의 성질

탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트 복합체의 탄소섬유혼입을 및 기포제 첨가율과 물-(플라이애쉬+시멘트)비의 관계는 Fig.1 및 2에 나타낸 바와 같다. 탄소섬유혼입을 및 기포제 첨가율의 증가에 수반하여 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 증가한다. 특히, 탄소섬유혼입을의 물-(플라이애쉬+시멘트)비에 미치는 영향은 크고, 기포제 첨가율에 관계없이 CF 혼입을 V_{CF}=2.0%에서 (플라이애쉬+시멘트)비는 V_{CF}=0%인 경우에 비하여 약 1.6배에 달하였다. 또한, CF혼입을 및 기포제첨가율과 기건비중의 관계는 Fig.3

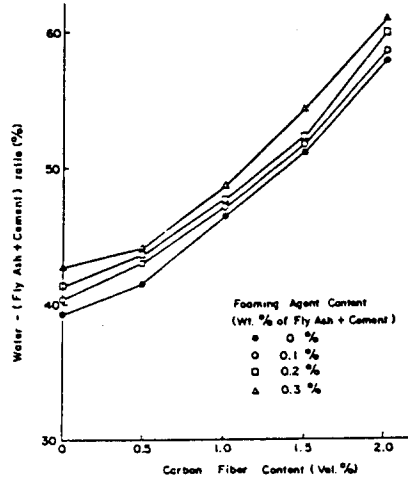


Fig. 1. Relationship between Water - (Fly Ash + Cement) ratio and Carbon Fiber Content of L. Wt. CF reinforced Fly Ash - Cement Composites

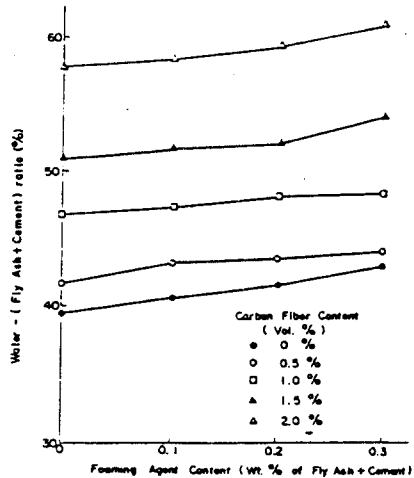


Fig. 2. Relationship between Water - (Fly Ash + Cement) ratio and Foaming Agent Content of L. Wt. CF reinforced Fly Ash - Cement Composites

에 나타낸바와 같고, CF혼입을 및 기포제첨가율의 증가에 수반하여 경량 탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트복합체의 기건비중은 저하한다. 특히, 기포제첨가율의 증가에 수반하여 기건비중은 현저히 저하하는 양상을 보여 Ohama의 보고와 유사한 경향을 나타내었고, 기포제물 0.1% 첨가한 경우 V_{CF}=2.0%까지 사이에 탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트복합체의 기건비중은 1.15-1.21의 경량화경향을 나타내었으며, 여기서 저점 기포제첨가율은 약 0.1-0.2%, CF혼입율은 1.5-2.0%인 것으로 판단된다. 한편, 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비와 물-(플라이애쉬+시멘트)비 및 기건비중의 관계는 Fig.4 및 5에 나타낸바와 같은데, 일반적으로 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비의 증가에 수반하여 물-(플라이애쉬+시멘트)비 및 기건비중은 저하하였으며, 최저 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비는 약 5-6%정도의 EVA혼입이 요망되고

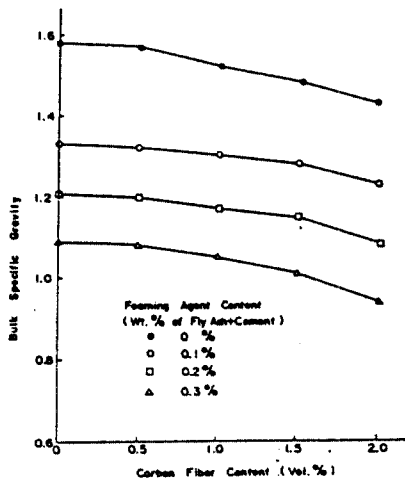


Fig. 3. Relationship between Bulk Specific Gravity and Carbon Fiber Content of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites

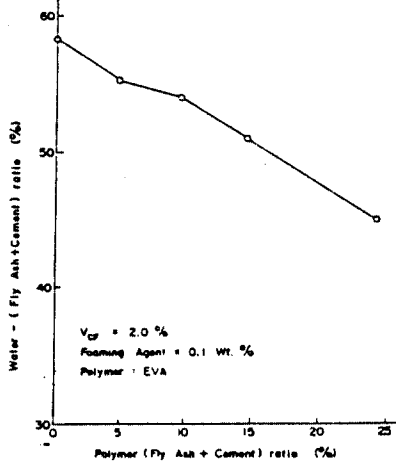


Fig. 4. Relationship between Water - (Fly Ash+Cement) ratio and Polymer (Fly Ash+Cement) ratio of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites

이 경우 기포계를 사용하지 않음이 요망된다. Fig.1은 탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트복합체의 CF혼입율과 물-(플라이애쉬+시멘트)비의 관계를 나타내고, 폴리머의 혼입유무에 관계없이 CF혼입율의 증가에 수반하여 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 증대하며, 또한 폴리머 혼입여부에 관계없이 $V_{CF}=1.0$ 및 1.5%까지 CF의 시멘트 매트릭스중에 균등분산이 용이하였으며 그 워커빌리티도 양호하였다.

3.2 탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트복합체의 압축강도 및 폴리머본산제 혼입의 영향

탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트 복합체의 섬유혼입 및 기포제 첨가율과 압축강도와의 관계는 Fig.6에 나타낸바와 같다. CF혼입율의 증가에 수반하여 압축강도는 저하하였고, 기포제첨가율의 증가에 수반하여 그 압축강도는 현저히 저하하였다. 여기서 현재 사용되고 있는 구조용 기포콘크리트의 압

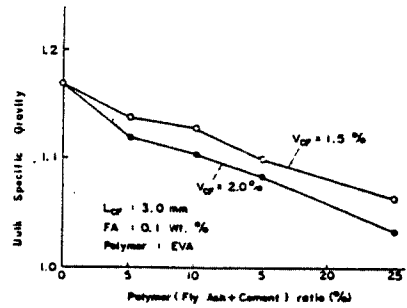


Fig. 5. Relationship between Bulk Specific Gravity and Polymer (Fly Ash+Cement) ratio of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites

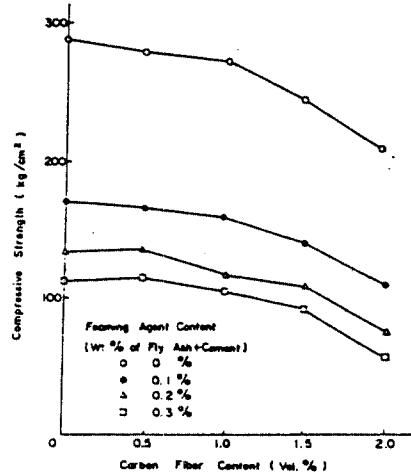


Fig. 6. Relationship between Compressive Strength and Carbon Fiber Content of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites

축강도는 50-200kg/cm²임을 감안할때 본 연구결과와 탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트복합체의 압축강도는 55-171kg/cm²이므로 이 값을 만족하며, 압축강도의 측면에서 기포제첨가율은 0.1-0.2%정도가 양호한 것으로 판단된다. 또한 탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트복합체의 폴리머본산제(EVA)의 첨가 효과는 Fig.4와5에서 나타낸바와 같고, 기포제 첨가율이 0.1%인 경우 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비가 5.20, 10.1, 15.8, 24.5%일때 압축강도는 각각 190, 196, 208, 175kg/cm²를 나타내어 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비가 5.2% 및 15.8%에서 높은 값을 나타내었고, Fig.7에서 폴리머본산제를 사용한 경우 사용하지 않은 경우에 비하여 전반적으로 압축강도는 현저히 증대하는 경향을 나타내었다.

3.3 탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트복합체의 인장, 휨강도 및 처짐특성

탄소섬유보강 플라이애쉬-시멘트복합체의 CF혼입율과 인장강도와의 관계는 Fig.8에 나타낸바와 같다. CF혼입율의 증가에 수반하여 인장강도는 증대하고 CF혼입율 1.5%에서 최대값을 나타내었으며, CF의 혼입율에도 불구하고 폴리머혼입의 경우 인장강

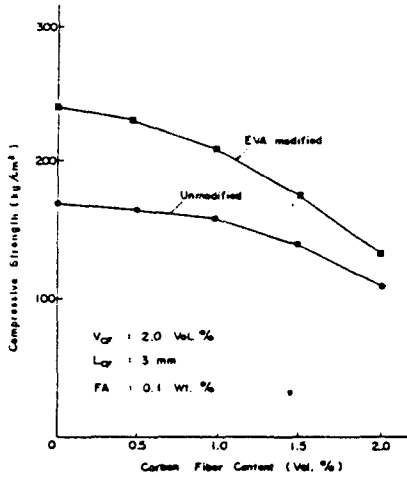


Fig. 7. Relationship between Compressive Strength and Carbon Fiber Content of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites

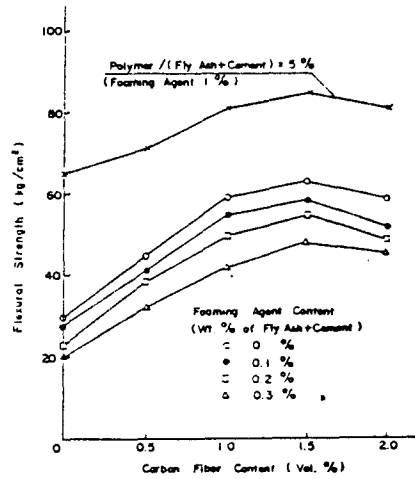


Fig. 10. Relationship between Flexural Strength and CF Content of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites

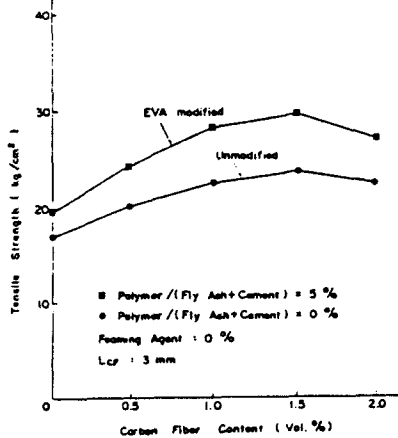


Fig. 8. Relationship between Tensile Strength and CF Content of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites

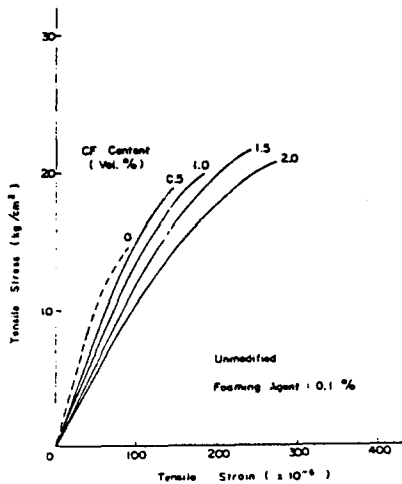


Fig. 9. Tensile Stress - Strain Curves for Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites without Polymer

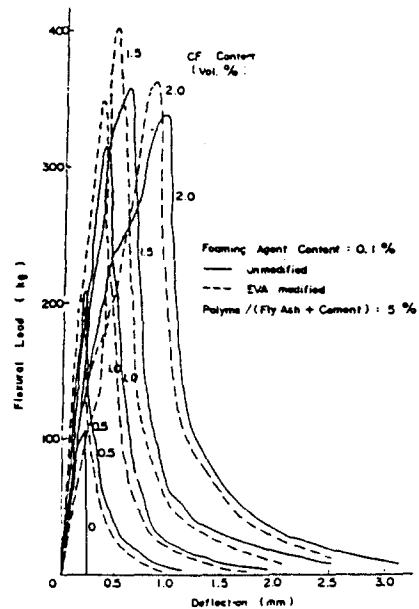


Fig. 11. Flexural Load - Deflection Curves for Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites

도는 혼입하지 않은 경우에 비하여 현저히 증대하여 평균 1.2-1.4배 증가하였고, 이는 폴리머 혼입에 의하여 매트릭스 자체의 강도 및 매트릭스와 섬유와의 부착력 향상에 기인한 것으로 판단된다. 또한 Fig. 9는 CF 혼입율을 변화시킨 경우 탄소섬유보강 플라이에쉬, 시멘트 복합체의 인장응력-변형을 관계줄 나타내는데, CF 혼입을 증가에 수반하여 탄소섬유보강 플라이에쉬, 시멘트 복합체가 현저히 개선되고, 보강하지 않은 경우에 비하여 약 2.8배의 인장능력을 나타내었다. 한편, 탄소섬유보강 플라이에쉬, 시멘트 복합체의 CF 혼입율과 휨강도의 관계는 Fig. 10에 나타낸바와 같다. $V_{CF}=1.5\%$ 까지 CF 혼입율의 증가에 수반하여 휨강도는 증대하는 경향을 보였고, 그 이상의 경우는 다소 저하하는 경향을 나타내었는데

이는 믹싱중 화이버블의 발생에 기인하는 것으로 판단되고, 폴리머혼입의 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 현저한 휨강도 증가경향을 보여 약 1.4-2.1 배에 달하였는데, 이는 인장강도의 경우와 같이 폴리머혼입에 의하여 매트릭스 자체 및 매트릭스와 섬유와의 부착력증대에 기인한 것으로 판단된다. 또한, CF혼입을 변화시킨 탄소섬유보강 플라이애쉬, 시멘트복합체의 휨하중-처짐곡선은 Fig.11과 같고 여기서, CF혼입율의 증가에 수반하여 탄소섬유보강 플라이애쉬, 시멘트복합체의 휨변형특성은 크게 개선되고, 폴리머혼입의 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 휨하중-변형특성의 현저한 차이는 나타나지 않았다.

4. 결 론

(1)CF보강 플라이애쉬, 시멘트복합체는 CF혼입을 및 기포제첨가율의 증가에 수반하여 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 현저히 증가하여 $V_{CF}=2.0\%$ 에서 $V_{CF}=0\%$ 인 경우에 비하여 약 1.6배에 달하였고, 또한 기건비중은 CF혼입을 및 기포제첨가율의 증가에 따라 저하하였으며, 적정 기포제첨가율은 0.1-0.2%, CF혼입율은 1.5-2.0%인 것으로 판단된다. 한편, EVA첨가 효과는 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비의 증가에 따

라 물-(플라이애쉬+시멘트)비 및 기건비중은 저하하였다.

(2)CF보강 플라이애쉬, 시멘트복합체의 압축강도는 CF혼입을 및 기포제첨가율의 증가에 수반하여 현저히 저하하였고, 폴리머를 사용한 경우 사용하지 않은 경우에 비하여 압축강도는 현저히 증가하는 경향을 나타내었다.

(3)CF보강 플라이애쉬, 시멘트복합체의 인장강도는 $V_{CF}=1.5\%$ 까지 CF혼입율의 증가에 수반하여 증대하였고, 그 이상의 경우 다소 저하하였는데 이는 믹싱중 화이버블의 발생에 기인하는 것으로 판단되며, 폴리머혼입의 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 1.2-1.4배의 인장강도 증가경향을 보였다. 또한 CF혼입율의 증가에 따라 신장능력은 현저히 개선되어 보강하지 않는 경우에 비하여 약 2.8배의 신장능력을 나타내었다.

(4)CF보강 플라이애쉬, 시멘트복합체의 휨강도는 $V_{CF}=1.5\%$ 까지 CF혼입율의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였고, 폴리머혼입의 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 약 1.4-2.1배의 증가경향을 보였다. 또한, CF혼입율의 증가에 따라 휨변형특성은 크게 개선되고, 폴리머 혼입에 의한 차이는 거의 나타나지 않았다.