

炭素纖維補強 플라이애쉬·시멘트 복합體의 力學的 特性에 關한 實驗的 研究(II)

Experimental Study on the Mechanical Properties of Carbon
Fiber Reinforced Fly Ash-Cement Composites (II)

박 승범* 윤 의식**

ABSTRACT

Result of an experimental study on the manufacture, the mechanical properties and watertightness of pitch-based carbon fiber reinforced fly ash-cement composites are presented in this paper. The carbon fiber reinforced fly ash-cement composites using early strength cement, silica powder and a small amount of styrene butadiene rubber latex are prepared with carbon fiber, foaming agents and mixing conditions. As a result, the mechanical and physical properties such as compressive, tensile and flexural strengths, watertightness and cement composites are improved by using a small amount of styrene butadiene rubber latex.

1. 서 론

산업폐기물인 석탄회 및 플라이 애쉬는 국내 화력발전소에서 연간 각각 200만톤 및 150만톤 이상 대량으로 발생되어, 이중 대부분은 막대한 경비를 들여 바다의 회사장에 폐기되고 있는 실정이고, 또한 '90년대 중반이면 국내의 전력수요 급증에 따른 화력발전소의 증설로 이들 부산물은 크게 증대할 것으로 예상되고 있어, 부존자원이 없는 우리나라에서도 선진국에서와 같이 이들 산업폐기물의 유효이용 및 개발이 시급한 실정이다. 이미 미국, 일본 및 유럽 등지에서는 이들 산업 부산물인 플라이애쉬를 콘크리트는 물론 산업용재료로서의 연구개발 및 응용이 활발히 진행되고 있으며, 우리나라에서도 일부 연구진에 의해 그 연구가 수행된 바 있고 일부 활용되고 있으나 선진국에 비해 대단히 미진한 실정이다. 이에 본 연구에서는 저탄성의 피치계 탄소섬유를 보강재로 사용하여 경량·고강도 이고 내화·내구성 이 우수하며 안정성이 높은 건재용 플라이애쉬·시멘트 복합체를 개발하기 위한 기초적 연구로서, 탄소섬유 보강 플라이애쉬 시멘트 복합체의 최적 배합조건과 각 영향인자에 따른 복합체의 역학적 특성과 수밀성을 구명코자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용 재료

(1) 시멘트 및 플라이애쉬

시멘트는 S사제품의 조강포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 플라이애쉬는 국내 유연탄 화력발전소인 B발전소에서 발생된 것으로, 그 화학 성분 및 물성은 Table 1 과 같다

(2) 탄소 섬유

탄소섬유는 Kureha(주) 제품의 저탄성 Pitch계 탄소섬유(직경 14.5×10^{-3} mm, 비중 1.63, 인장강도 7800 Kgf/Cm^2)를 사용하였다.

(3) 골재

골재는 미소한 직경의 탄소섬유를 보강재로 사용하는 것을 고려하여 매트릭스와 섬유와의 접착이 양호하도록 C 광업 제품의 규사분말(비중 2.60, 평균입경 $7.1\mu\text{m}$)을 사용하였다.

(4) 기포제 및 시멘트 혼화용 폴리머분산제

기포제로는 국내 R사제품의 고급 알콜규산에스테르계 기포제(Higer Alcohol-Sulfate type Foaming Agent)를 사용하였고, 폴리머분산제는 일본 H사 제품의 SBR(Styrene-Butadiene Rubber Latex) 에멀존을 사용하였으며, 그 물성을 Table. 2에 나타내었다.

* 정희원, 충남대학교 공과대학 토목과 교수

** 정희원, 충남대학교 대학원 박사과정

Table. 1 Chemical Composition and Physical Properties of Fly Ash

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	lg. loss (%)	Specific Gravity	Blaine (cm ² /g)
64.10	28.10	4.25	1.20	0.76	1.27	0.07	5.34	2.21	4,451

Table. 2 Properties of Polymer Dispersion

Type of Polymer Dispersion	Appearance	Specific Gravity(20°C)	pH (20°C)	Viscosity Mpa.s(20°C)	Total Solids(%)
S B R	Milky-White, Without Coarse Particle, Coagula and the others	1.020	7.82	147	44.6

Table. 3 Mix Proportions of Lightweight Carbon Fiber Reinforced Fly Ash-Cement Composites

Fly Ash: Cement (by Wt)	Silica Powder (Vol. % of Fly Ash+Cement)	Foaming Agent (Wt. % of Fly Ash+Cement)	C F (Vol. %)	Water/ (Fly Ash +Cement)(%)	Flow (175±5) (Cm)
40 : 50	30	0	0	38.5	173
			0.5	40.4	
			1.0	45.6	
			1.5	49.6	
			2.0	56.0	
		0.1	0	39.6	175
			0.5	42.1	
			1.0	46.0	
			2.0	58.6	
		0.2	0	40.6	176
			0.5	42.5	
			1.0	47.0	
2.0	51.0				
0.3	0	41.5	178		
	0.5	43.0			
	1.0	47.1			
	2.0	59.1			

Table. 4 Mix Proportions of Polymer-Modified Lightweight Carbon.Fiber Reinforced Fly Ash-Cement Composites

Type of Polymer	Fly Ash :Cement (by Wt)	Silica Powder (Vol. % of Fly Ash+Cement)	Foaming Agent (Wt. % of Fly Ash+Cement)	C F (Vol. %)	Polymer/ (Fly Ash +Cement)	Water/ (Fly Ash +Cement)	Flow (175±5) (Cm)
S B R	40:50	30	0.1	1.5	0	58.6	172
					5.0	54.5	174
					10.0	53.2	176
					15.0	49.8	175
					20.0	45.0	176
					25.0	42.0	177

2.2 배합 및 시험방법

(1) 배합 및 믹싱

경량 탄소섬유보강 플라이애쉬·시멘트 복합체의 제조를 위한 배합 예는 Table. 3과 같이 하였고, 폴리머 분산제를 사용한 경우 복합체의 배합 예는 Table. 4와 같이 하였으며, 이때 Flow값은 모두 175 ± 5 로 하였다. 또한, 믹싱은 매트릭스내에서의 섬유 분산의 균등분산을 위하여 용량 10ℓ의 섬유분산용 Omni-Mixer를 사용하였으며, 믹싱시간은 Dry blend : 2분 (시멘트, 플라이 애쉬 및 규사분말), Primary blend : 3분 (물 및 혼화제 첨가), Secondary blend : 3-5분간 탄소섬유를 투입하여 2분간 믹싱후, 기포제를 첨가하여 2분간 믹싱하였다. 또 폴리머 분산제를 사용한 경우의 믹싱시간은 Dry blend : 2분 (시멘트, 플라이 애쉬 및 규사분말), Primary blend : 3분 (폴리머, 혼화제 및 물 첨가), Secondary blend : 3-5분간 탄소섬유 투입후 2분간 혼합하였다.

(2) 공시체의 성형 및 시험방법

압축 및 인장강도 그리고 단위용적 중량 시험은 KS L 5105, 5104 및 KS F 2409에 준하여 시험을 행하였고, 휨강도시험은 JIS R 5201에 준하여 $4 \times 4 \times 16$ Cm의 공시체를 제조해 10 ton Instron 시험기를 사용하여 크로스 베드 속도 5.5 mm / min 로 중앙 집중 재하 방식으로 휨강도 시험을 행하였으며, 이때의 하중-처짐곡선을 레코더로 구하였다. 또한 흡수율은 $4 \times 4 \times 16$ Cm의 공시체를 제조하여 오토클래브양생후 7일 건조 양생($20 \pm 1^\circ\text{C}$, 50% RH)한 기건상태의 공시체에 대하여 다음 식으로 구하였다.

$$\text{흡수율 (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100$$

[여기서, W_0 : 수중침적전 공시체 중량(g), W_1 : 수중침적후 공시체 중량(g)] 그리고 투수시험은 일본 M사 제품의 투수시험기를 사용하여, 직경 15Cm, 길이 30Cm, 중심공 2.0Cm의 중공 원통형 공시체를 제조하여 아웃·푸트방법으로서 24시간후의 투수량을 측정하였다. 한편, 건조수축시험은 기건양생 및 오토클래브 양생후를 기준길이로 하여 KS F 2424의 콤퍼레터 방법에 준하여 재령 6개월까지의 길이변화 및 중량변화율을 측정하였다.

(3) 양생 방법

공시체 양생은 성형후 24시간에 탈형하여 1일 습윤양생 ($23 \pm 2^\circ\text{C}$, 80% RH) 후 기건양생 ($23 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 5\%$ RH) 및 오토클래브 양생 (최고온도 180°C , 10 kg/cm^2 의 기압에서 4시간 양생)을 실시하였으며, 재령 7일에서 각종 강도를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 굳지않은 CF 보강 플라이 애쉬·시멘트 복합체의 물성

CF 보강 플라이애쉬·시멘트 복합체의 CF 혼입을 및 기포제 첨가율과 물-(플라이 애쉬+시멘트)비의 관계는 Fig. 1 및 2에 나타난 바와 같이 CF 혼입을 및 기포제 첨가율의 증가에 따라 물-(플라이 애쉬+시멘트)비는 현저히 증가하여 워커빌리티는 불량해지는 것으로 나타났으며, 특히, CF 혼입율이 물-(플라이 애쉬+시멘트)비에 미치는 영향은 커서 기포제 첨가율에도 불구하고 $V_{CF} = 2.0\%$ 에서 물-(플라이 애쉬+시멘트)비는 Plain의 경우에 비하여 약 2.8배에 달하였다.

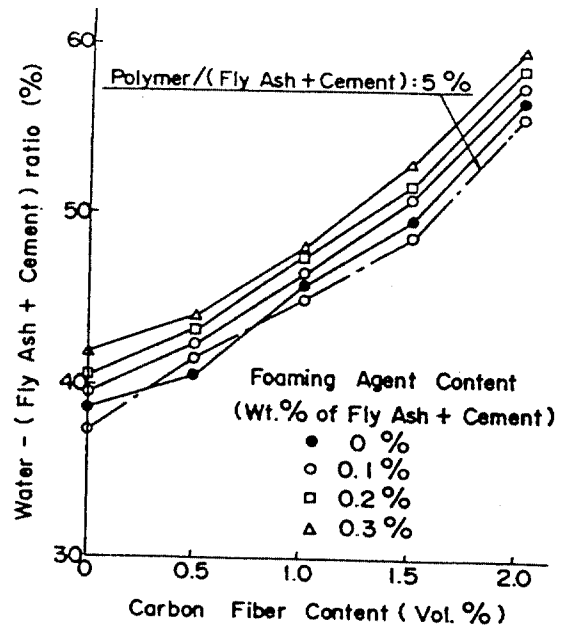


Fig. 1. Relationship between Water-(Fly Ash+Cement) ratio and Carbon Fiber Content of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash-Cement Composites

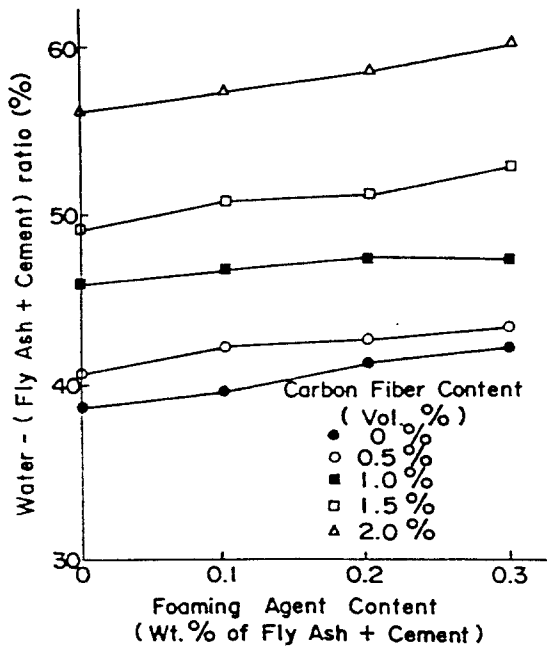


Fig. 2 Relationship between Water-(Fly Ash+Cement) ratio and Foaming Agent Content of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash - Cement Composites

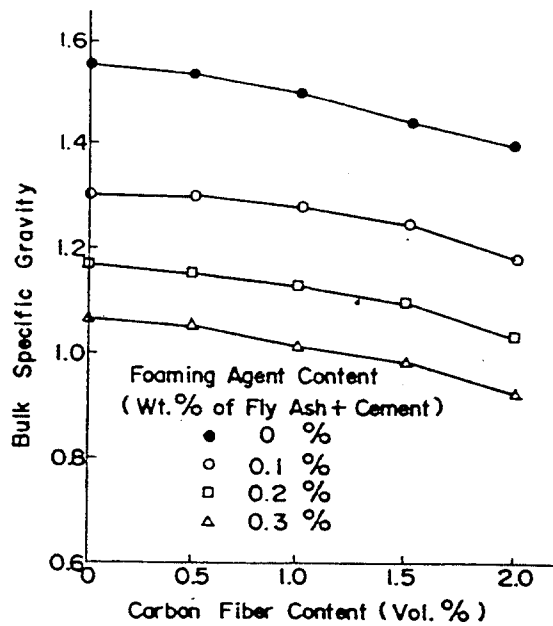


Fig. 3 Relationship between Bulk Specific Gravity and Carbon Fiber Content of Lt. Wt. CF reinforced Fly Ash - Cement Composites

또한, CF 혼입을 및 기포제 첨가율과 기건비 중의 관계는 Fig. 3에 나타난것 처럼, CF 혼입을 및 기포제 첨가율의 증가에 따라 기건비 중은 저하되었다. 특히, 기포제 첨가율의 증가에 수반하여 기건비중은 현저히 저하하는 경향을 나타내었고, 기포제를 0.1% 첨가한 경우 $V_{CF} = 2.0\%$ 까지 기건비중은 1.20-1.31 정도의 경량화 경향을 나타내었으며, $V_{CF} = 1.5\%$ 까지는 시멘트 매트릭스 중에서 Fiber Ball 이 생기지 않고 균등분산이 가능해 워커빌리티는 양호하였다.

한편, SBR 사용의 경우, 일반적으로 폴리머-(플라이 애쉬+시멘트)비의 증가에 따라 물-(플라이 애쉬+시멘트)비 및 기건비중은 저하하는 경향을 나타내었다. 또 SBR의 사용에 의하여 시멘트 매트릭스의 유동성이 현저히 증가하는 경향을 보여 이경우는 기포제를 사용하지 않아도 될것으로 판단된다. 또한 SBR 혼입여부에 관계없이 $V_{CF} = 1.5\%$ 까지는 CF가 시멘트 매트릭스중에 균등분산이 용이하였고, 그이상의 혼입에서는 Fiber Ball의 발생이 현저하게 나타나 CF의 혼입율은 1.5%정도가 적정량인 것으로 판단된다.

3.2 CF 보강 플라이애쉬·시멘트 복합체의 압축강도

CF보강 플라이애쉬·시멘트 복합체의 섬유 혼입을 및 기포제 첨가율과 압축강도와와의 관계는 Fig. 4에 나타난 바와 같이, CF 혼입율의 증가에 수반하여 압축강도는 저하하였고, 기포제 첨가율의 증가에 따라서는 그 압축강도가 현저히 저하하였다. 또한 기포제 첨가율이 0.1%이고 SBR을 사용하지 않은 경우의 압축강도는 $V_{CF} = 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\%$ 일때 각각 182, 178, 170, 152, 143 Kg/Cm^2 이고, 압축 탄성계수는 각각 0.81, 0.60, 0.57, 0.53, 0.50 ($\times 10^5 Kg/Cm^2$), 포아슨비는 각각 0.28, 0.20, 0.18, 0.17, 0.15를 나타내어, CF혼입율의 증가에 수반하여 압축탄성계수 및 포아슨비도 저하하는 경향을 나타내었다. 또한 Fig. 5, 6에서 보는바와 같이 탄소섬유 혼입율의 증가에 수반하여 최대변형 및 동일응력하에서의 변형은 작게되는 경향을 나타내었다. 따라서 현재 사용되고 있는 구조용 기포 콘크리트의 압축강도가 50-200 Kg/Cm^2 임을 감안할때 본 연구결과에서 나타난 압축강도는 이 값을 만족하며, 압축강도의 측면에서 볼때 기포제 첨가율은 플라이애쉬와 시멘트 중량의 0.1-0.2%정도가 적당한것으로 판단된다.

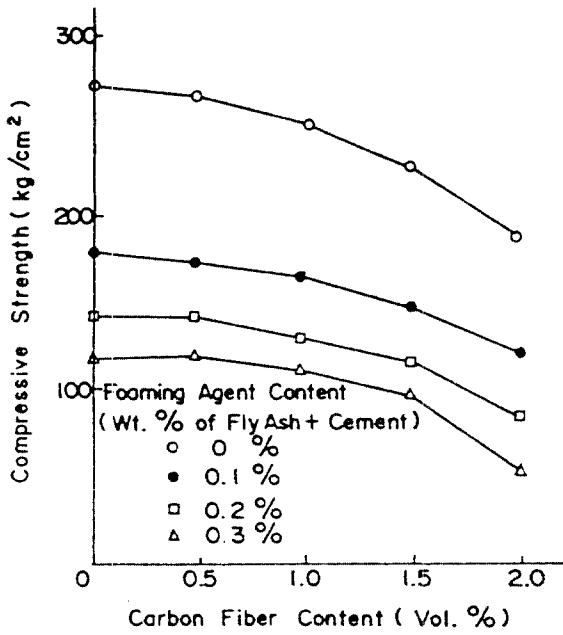


Fig. 4 Relationship between Compressive Strength and Carbon Fiber Content of LL WL CF reinforced Fly Ash - Cement Composites

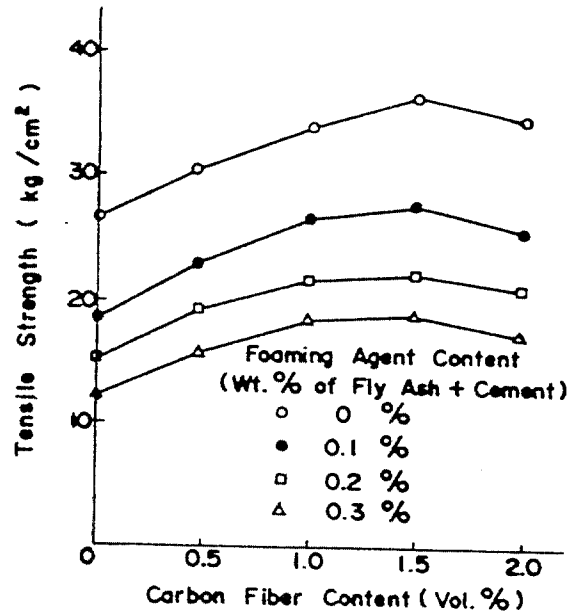


Fig. 7. Relationship between Tensile Strength and CF Content of LL WL CF reinforced Fly Ash - Cement Composites

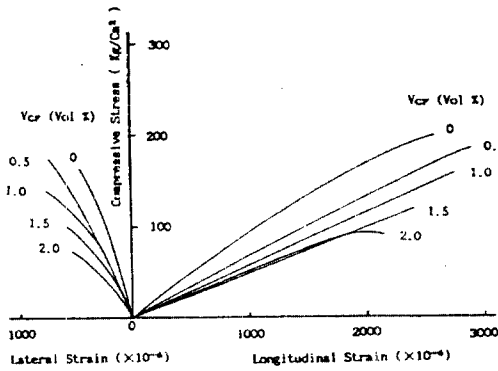


Fig. 5 Compressive Stress-Strain Curves for LL WL CF Reinforced Fly Ash - Cement Composites with Polymer/(Fly Ash + Cement) Ratio of 0%

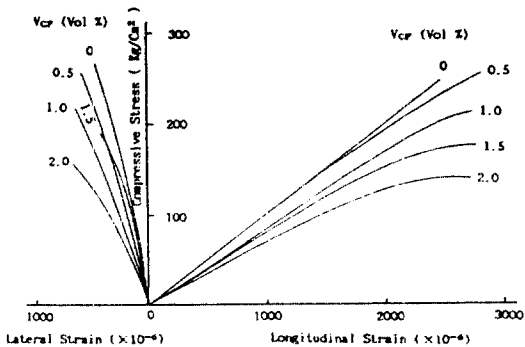


Fig. 6 Compressive Stress-Strain Curves for SBR-Modified LL WL CF Reinforced Fly Ash - Cement Composites with Polymer/(Fly Ash + Cement) Ratio of 5%

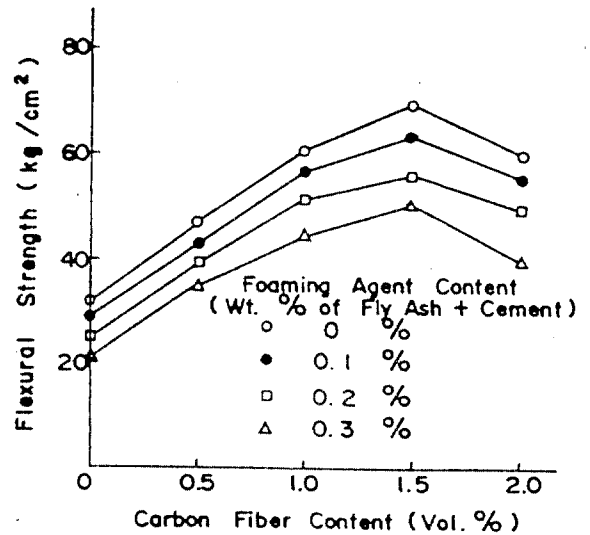


Fig. 8. Relationship between Flexural Strength and CF Content of LL WL CF reinforced Fly Ash - Cement Composites

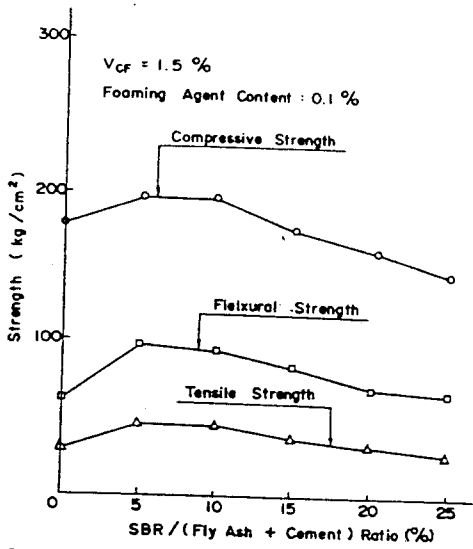


Fig. 9. Relationship between Strengths and Polymer / (Fly Ash + Cement) Ratio

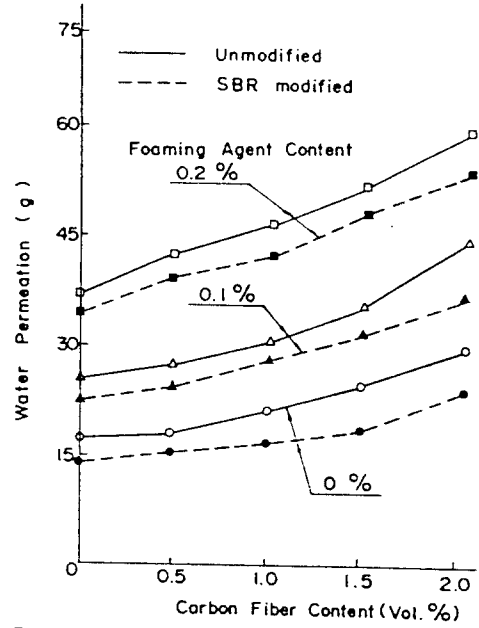


Fig. 12. Relationship between Water Permeation and Carbon Fiber Content

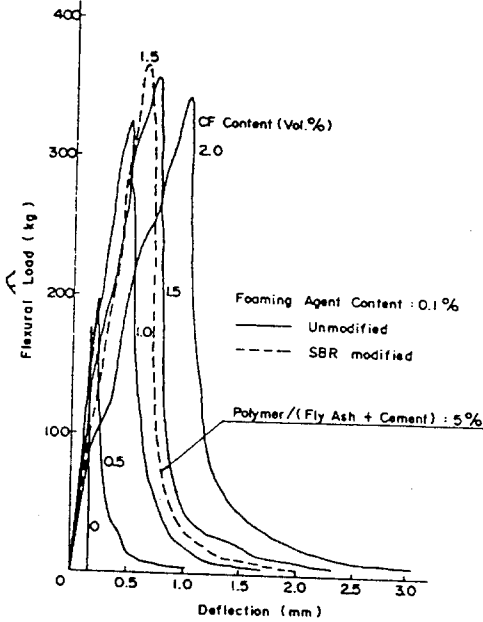


Fig. 10. Flexural Load-Deflection Curves for LL WL CF reinforced Fly Ash - Cement Composites

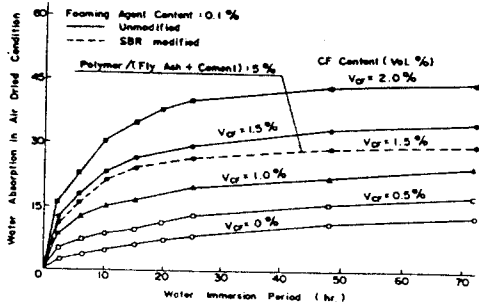


Fig. 11. Relationship between Water Absorption and Water Immersion Time

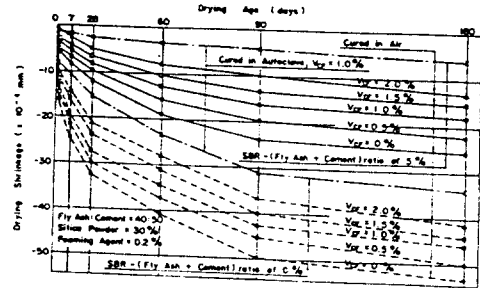


Fig. 13. Relationship between Drying Age and Drying Shrinkage of CF reinforced Fly Ash - Cement Composites without Polymer and with Polymer

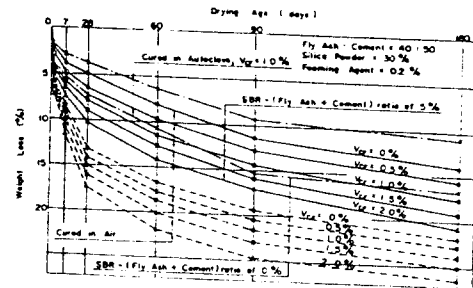


Fig. 14. Relationship between Weight Loss and Drying Age of CF reinforced Fly Ash - Cement Composites without Polymer and with Polymer

한편, Fig 9에서 $V_{CF}=1.5\%$, 기포제 첨가율 0.1%인 경우, 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비가 0, 5, 10, 15, 20, 25% 일때, 압축강도는 각각 182, 192, 190, 175, 166, 146 Kg/Cm^2 를 나타내어, 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비 5% 및 10%에서 SBR을 사용한 경우가 사용하지 않은 경우에 비해 압축강도는 증가경향을 나타내었으나, 과다한 SBR의 사용은 오히려 압축강도 저하경향을 나타내어, SBR의 적정사용량은 5-10%인것으로 판단된다.

3.3 CF 보강 플라이애쉬·시멘트 복합체의 인장·휨강도 및 변형특성

CF보강 플라이애쉬·시멘트 복합체의 탄소섬유 혼입율과 인장강도와와의 관계는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이, $V_{CF}=1.5\%$ 까지는 CF 혼입율이 증가함에 따라 인장강도가 증가하나 $V_{CF}=2.0\%$ 에서는 다소 저하하는 경향을 나타내었다. 이는 $V_{CF}=2.0\%$ 에서는 현저한 Fiber Ball의 발생에 따른 섬유유 균등분산이 불량한데 기인하는것으로 판단된다. 또한 SBR 혼입의 경우 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비 5.0-10.0%에서 인장 및 휨강도는 SBR을 혼입하지 않은 경우에 비하여 현저히 증대하는 경향을 나타내었다. 이는 SBR 혼입에 의하여 매트릭스 자체의 강도 및 매트릭스와 섬유유 부착력 향상에 기인한 것으로 생각된다. 한편, CF혼입율과 휨강도의 관계는 Fig.8에 나타낸 것처럼, $V_{CF}=1.5\%$ 까지 CF혼입율 증가에 따라 휨강도는 증대하는 경향을 보였으나, 그이상의 그이상의 경우는 다소 저하하는 경향을 보였다. 또한 SBR 혼입의 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 약 1.2-1.6배로 현저히 증대하는 경향을 나타내어 인장강도의 경우와 유사한 양상을 나타내었다. 그리고, CF혼입율의 변화에 따른 휨하중-처짐곡선은 Fig.10과 같이, CF혼입율 증가에 따라 휨변형 특성은 크게 개선되었으나, SBR 혼입의 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 휨하중 변형특성의 현저한 차이는 나타나지 않았다.

3.4 탄소섬유보강 플라이 애쉬·시멘트 복합체의 흡수성 및 투수성

기건상태에서의 CF 보강 플라이애쉬·시멘트 복합체의 수증침적 시간과 흡수율과의 관계는 Fig.11에 나타낸바와 같이, 침적시간의 증가에 수반하여 흡수율도 현저히 증가하여

침적시간 24시간에서 $V_{CF}=2.0\%$ 의 경우 $V_{CF}=1.0\%$ 에 비해 약 3배에 달하였고, SBR 혼입의 경우 혼입하지 않은 경우보다 흡수율은 현저히 저하하는 경향을 나타내었으며, 이는 SBR 혼입에 의해 시멘트 매트릭스내에 폴리머 필름이 형성되어 방수성이 개선되기 때문으로 생각된다. 한편, Fig.12은 기건상태에서의 CF 혼입율과 투수량과의 관계를 나타낸 것으로 CF혼입율 증가에 따라 투수량은 현저히 증가하였고 SBR 혼입의 경우는 혼입하지 않은 경우에 비해 투수량은 현저히 작았으며, 이는 흡수율의 경우와 같이 SBR혼입에 의해 매트릭스내의 폴리머 필름이 형성으로 방수성이 증대되기 때문인 것으로 판단된다.

3.5 CF 보강 플라이 애쉬·시멘트 복합체의 건조수축

CF보강 플라이애쉬·시멘트 복합체의 재령에 따른 건조수축과 중량감소율의 관계는 Fig.13,14에서 보는바와 같이, CF 혼입율에 관계없이 건조재령의 증가와 함께 건조수축은 전반적으로 증가하며, 이는 CF혼입율의 증가에 따라 작아지는 경향을 나타내었다. 또한, 오토클레브 양생의 경우 기건 양생의 경우에 비하여 재령 6개월에서 $V_{CF}=1.0\%$ 일때 약 1.6배 감소하였고, 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비 5% 혼입시는 약 3.3배의 현저한 감소경향을 나타내어, 건재용 2차제품에 응용할 경우 오토클레브 양생이 바람직한 것으로 판단된다. 한편, CF 혼입율에 불구하고 SBR 혼입의 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 건조수축은 평균 2.4배 정도 현저히 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 폴리머 혼입에 의한 보수성의 향상에 기인하는 것으로 판단된다. 그리고 재령이 경과와 함께 중량감소율은 증가하며, CF 혼입율의 증가에 따라 현저히 커지는 경향을 나타내었다.

4. 결 론

(1) Flow 값은 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 CF 혼입율 및 기포제 첨가율의 증가에 따라 현저히 증가하여 $V_{CF}=1.5\%$ 의 경우 Plain에 비하여 약 2배에 달하여 워커빌리티가 크게 불량해졌고, 기건비중은 전반적으로 저하하여 $V_{CF}=1.5\%$, 기포제 첨가율 0.3%인 경우 CF 및 기포제를 첨가하지 않은 경우에 비해 약 2.1배 저하하였다. 또한, $V_{CF}=2.0\%$, 기포제

첨가율 0.1%인 경우 폴리머 - (플라이애쉬+시멘트)비가 0%에서 25%로 증가시키면, 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 57%에서 44%로, 그리고 기건비중은 1.13에서 1.03으로 각각 저하하였다.

(2) 압축강도는 CF 혼입율 및 기포제 첨가율의 증가에 따라 저하하였다. 또한 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비 5-10%의 경우 압축강도는 현저히 개선되었으나 그 이상에서는 오히려 저하하는 경향을 나타내어, CF 혼입율은 $V_{CF} = 1.0-1.5\%$, 기포제 첨가율은 0.1-0.2%, 폴리머 분산제는 5.0-10.0% 정도 사용함이 적당한 것으로 판단된다. 한편, CF 혼입율의 증가에 수반하여 최대변형 및 동일 응력하에서의 변형은 전반적으로 저하하는 경향을 나타내었다.

(3) 인장 및 휨강도는 $V_{CF} = 1.5\%$ 까지 CF 혼입율의 증가에 따라 증대되었으나, 그 이상의 혼입율에서는 다소 저하하는 경향을 나타내었는데 이는 섬유유 의 과다혼입으로 인한 Fiber Ball의 발생과 섬유유 의 균등분산이 이루어지지 못함에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 폴리머 분산제의 혼입에 의해 인장 및 휨강도는 현저한 증가경향을 나타내었고, CF 혼입율의 증가에 따라 휨변형특성은 크게 개선되었다.

(4) CF 혼입율 및 기포제 첨가율의 증가에 따라 흡수율 및 투수량은 현저히 증대되고 또한 폴리머 분산제의 혼입에 의해 흡수율 및 투수량은 현저히 저하하는 경향을 나타내었으며, 이는 폴리머 혼입에 의한 시멘트 매트릭스내에 폴리머 필름이 형성되기 때문인 것으로 판단된다.

(5) 건조수축은 재령이 증가함에 따라 전반적으로 증가하나, CF의 혼입율의 증가에 따라 작아지는 경향을 나타내었으며, 오토클래브 양생의 경우 기건 양생의 경우에 비하여 재령 6개월에서 $V_{CF} = 1.0\%$ 일때 약 1.6배 감소하였다. 또한 폴리머를 혼입함에 의해 건조수축특성은 개선되어 폴리머-(플라이애쉬+시멘트)비 5% 혼입시 $V_{CF} = 1.0\%$ 에서 약 3.3배의 현저한 수축저감 효과를 나타내었다. 그리고 재령의 경과 및 CF 혼입율의 증가에 따라 증량 감소율은 증대하는 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Seung Bum Park, "Experimental Study on the Engineering Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites", Int.J., Cement and Concrete Research, Vol.21, No.4, pp.589-600, 1991
2. Kasci, Y., Matsui, I., "Autoclave curing of various kinds of Fly Ash - Ordinary Portland Cement - Water Composition", Transaction of JCI, Vol.7, pp.9, 1985
3. Diamond, Sidney, "The utilization of Fly Ash", Cement and Concrete Research, Vol.14, No.4, pp.455-462, 1984
4. Seung Bum Park, "Experimental Study on the Development and Application of High - Performance Composite Utilizing Industrial Waste Products for Construction Works", J. of KCI, Vol.3, No.3, 1991