

## 탄소섬유 보강 고강도 시멘트 복합체의 기계적 특성에 관한 연구

전용희 · 한기성

인하대학교 무기재료과

(1992년 11월 9일 접수)

### Mechanical Properties of High Strength Cement Composite with Carbon Fiber

Yong-Hee Jeon and Ki-Sung Han

\*Department of Ceramic Eng., Inha Univ.

(Received November 9, 1992)

#### 요 약

포틀랜드 시멘트와 수용성 고분자 물질인 polyacrylamide(PAA)를 사용하여 twin roll mill로 혼합성형하여 2장의 고강도 시멘트 페이스트를 제조하고 그 사이에 탄소섬유층을 삽입 보강하여 고강도 시멘트 복합체를 제조하였다. 이 복합체에 대한 물리적 특성과 파괴거동을 연구하였다. 탄소섬유를 0.2, 0.3 wt% 첨가시 적임강도가 110~116 MPa, Young's modulus는 74~77 GPa, 파괴인성치는 3.14 MPam<sup>1/2</sup>로 가장 우수하였다. MDF 시멘트 복합체의 강도향상은 큰기공의 제거와 grain bridging, frictional interlocking, polymer fibril bridging, fiber bridging과 같은 파괴인성효과와 향상 때문인 것으로 생각된다.

#### ABSTRACT

Two sheets of high strength cement paste using ordinary Portland cement and water soluble polymer (polyacrylamide) were made by kneading with a twin roll mill. A carbon fiber layer was laid out between two sheet of the cement paste, and then carbon fiber reinforced high strength cement composites were prepared by pressing them. The mechanical properties of the composites were investigated through the observation of the microstructure and the application of fracture mechanics. When the carbon fiber was added with 0.2 and 0.3 wt% to the composites the flexural strength and Young's modulus were about 110~116 MPa and 74~77 GPa respectively, and critical stress intensity was about 3.14 MPam<sup>1/2</sup>. It can be considered that the strength improvement of high strength cement fiber composites may be due to the removal of macropores and the increase of various fracture toughness effects; grain bridging, frictional interlocking, polymer fibril bridging and fiber bridging.

#### 1. 서 론

시멘트 경화체는 수화작용에 의해 생성되는 수화생성물이 미수화시멘트 입자사이에 결합시킴으로써 형성된다. 이때 시멘트의 수화작용과 작업성 향상을 위해 첨가된 과잉의 물이 증발하면서 큰기공(macropore)이 나타난다. 경화체의 강도는 gel 기공과 같은 미세한 기공보다는 수는 적으나 큰기공에 의해 큰 영향을 받는다. 시멘트 경화체의 강도를 증진시키기 위해서는 물/시멘트비(W/S)를 감소시켜 경화체내의 기공율을 감소시키고 조직의 치밀화로 높은 응력부분에서의 응력집중을 방지

해준다. Birchall 등은 시멘트에 소량의 물과 적당한 수용성 고분자물질을 첨가시키고, twin roll mill로 전단응력을 가함으로써, 첨가한 고분자물질이 시멘트 입자간의 윤활성과 충전효과를 높이도록 하여 macro-defect-free (MDF) 시멘트 경화체를 제조<sup>1)</sup>하였다.

보통 포틀랜드 시멘트로 제조된 MDF 시멘트 경화체의 적임강도는 약 70 MPa 정도의 값을 갖는다. 이러한 시멘트 경화체의 고강도는 경화체 내에 존재하는 큰기공 즉, 약 100 μm 이상의 기공을 제거하고 기공율을 감소 시킴으로써 가능했다<sup>2)</sup>. MDF 시멘트의 적임강도를 보다 향상시키기 위한 노력으로 혼합체를 첨가한 연구가 진

행되었으며<sup>3-6)</sup> 고강도화 mechanism을 파괴역학적 개념을 도입하여 구명하려고 시도하고 있으나 아직 미흡한 실정이다.

본 연구는 앞에서와 같이 진행시키고 있는 연구의 일환으로서 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 물/시멘트비 0.1에서 수용성 고분자 물질인 polyacrylamide를 첨가하여 twin roll mill로 MDF 시멘트 페이스트를 제조하였다. 이때 MDF 시멘트 경화체가 보다 높은 고강도, 고인성을 갖도록 MDF 시멘트 페이스트에 인장강도와 Young's modulus가 큰 탄소 섬유층을 첨가하여 MDF 시멘트 복합체를 제조하였다. 이들 복합체의 미세구조와 강도와의 관계를 구명하기 위하여 파괴거동시 나타나는 grain bridging, frictional interlocking, polymer fibril bridging 및 탄소섬유에 의한 fiber bridging 등의 crack toughening mechanism과 강도와의 관계를 구체적으로 검토하였다.

2. 실험방법

출발원료는 시중에서 판매되는 보통 포틀랜드 시멘트 (Blaine : 3250 cm<sup>2</sup>/g)를 사용하였다. 혼합제로서 탄소의 함량이 95%이며 각각 3 mm, 6 mm 길이를 가진 두 종류의 탄소섬유를 사용하였다. 고분자 물질로서는 수용

Table 1. Chemical Composition and Physical Properties of Starting Materials

a) Portland cement (type I) (wt%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Free CaO	Ig. loss	Fineness (Blaine; cm <sup>2</sup> /g)
21.59	5.85	3.25	62.39	2.72	2.06	0.78	0.56	3250

b) Polyacrylamide

Average molecular weight	Tg (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (µm)
5,000,000~6,000,000	165	1.302	<45

b) Carbon fiber

Tensile strength	3.3 GPa
Young's modulus	230 GPa
Density	1.80 g/cm <sup>3</sup>
Elongation	1.4%
Carbon content	95%
Filament diameter	6.8 µm

성인 polyacrylamide를 사용하였다. 적은 물/시멘트비로 시멘트 페이스트의 유동도를 유지시킬 수 있는 혼화제로서는 비중이 1.21인 naphthalene계 sulfonate로서 naphthalene formaldehyde condensate(상품명 : Mighty 150)의 액체 고성능 감수제를 3 wt% 첨가하였다. 이들 출발원료에 대한 화학조성과 물리적 성능은 Table 1에 나타내었다.

고성능 MDF 시멘트 복합체의 시편은 전보<sup>3-6)</sup>와 같은 방법으로 제조한 두 장의 MDF 페이스트 sheet 사이에 탄소섬유층을 삽입하여 MDF 시멘트 복합체를 제조하였다. 탄소섬유층은 시멘트에 대하여 무게비로 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5%씩 첨가하여 보강하였다. 탄소섬유층의 제조는 두 장의 MDF 시멘트 페이스트에 소요된 시멘트 양에 대하여 탄소섬유의 각 첨가량을 500 ml의 에틸알콜이 담긴 비이커에 집어넣어 분산시킨다. 탄소섬유 현탁액을 5×10 cm로 제조한 살대기에 부어넣고 진공펌프로 뽑아 여과지위에 탄소섬유층을 얻었다. 5×10 cm 몰드내에서 탄소섬유층을 삽입시킨 복합체에 200 kg/cm<sup>2</sup>의 압력을 가하여 2~3 mm 두께를 가진 샌드위치 형태의 시편을 제조하였다.

이들 시편은 습윤함에서 3, 7, 14, 28일간 양생한 후 60°C oven에서 7일간 건조하였으며, cross head speed 0.05 mm/min의 조건으로 Instron 4302를 사용하여 Fig. 1에서와 같이 3 point bending method로서 다음 식들에 의해 격임강도(flexural strength : σ<sub>f</sub>) 및 Young's modulus(E<sub>b</sub>)을 측정하였다.

$$\sigma_f = \frac{1.5PL}{d^2w}$$

$$E_b = \frac{PL^3}{4w^3dy}$$

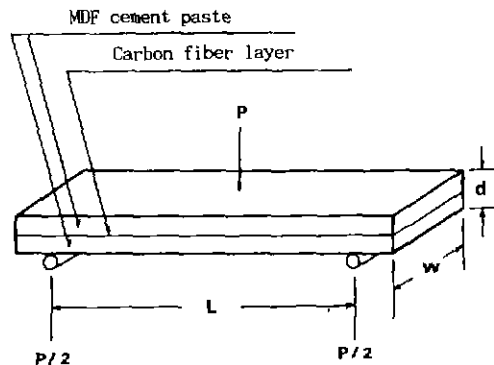


Fig. 1. Three point bending specimen.

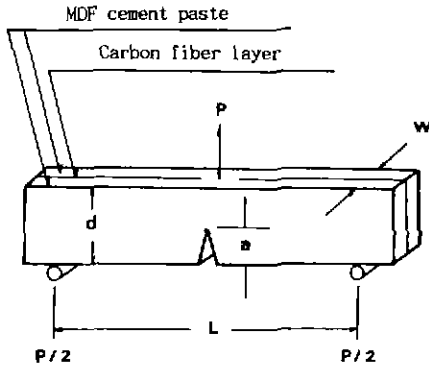


Fig. 2. The single edge notched beam specimen.

$\sigma_f$  : flexural strength  
 $E_b$  : Young's modulus  
 P : load    d : depth  
 w : width    L : span  
 y : maximum deflection

그리고 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 SENB(single edge notched beam)법<sup>7)</sup>으로 다음 식에 따라 경화체의 파괴 인성( $K_{Ic}$ )을 측정하였다.

$$K_{Ic} = Y \sigma_f a^{3/2}$$

$$Y = 1.93 - 3.07(a/w) + 14.53(a/w)^2 - 25.11(a/w)^3 + 25.80(a/w)^4$$

$$\sigma_f = \frac{1.5 PL}{d^2 w}$$

여기서 Y는 a/w 및 하중방식에 의존하는 상수이다. 또한 파괴거동과 미세구조를 관찰하기 위해 DCB(double cantilever beam) 시편으로써 SEM 관찰을 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 기공률

28일간 양생시킨 시편에 대하여 W/C=0.4인 일반시멘트 경화체와 W/C=0.1이고 탄소섬유층을 삽입한 MDF 시멘트 복합체에 대해, 수은압입법으로 측정된 기공 분포를 Fig. 3에 나타내었다. W/C=0.1인 섬유보강 MDF 시멘트 복합체의 기공이 W/C=0.4인 일반시멘트 경화체보다 매우 치밀하여 곡선변화가 작은 기공쪽에 위치함을 알 수 있다. 그러나 W/C=0.1인 시편들 중에서, 탄소섬유를 첨가하지 않은 MDF 시멘트 경화체(plain 시편)와 탄소섬유를 0.1 wt% 첨가한 복합체에서는 크기

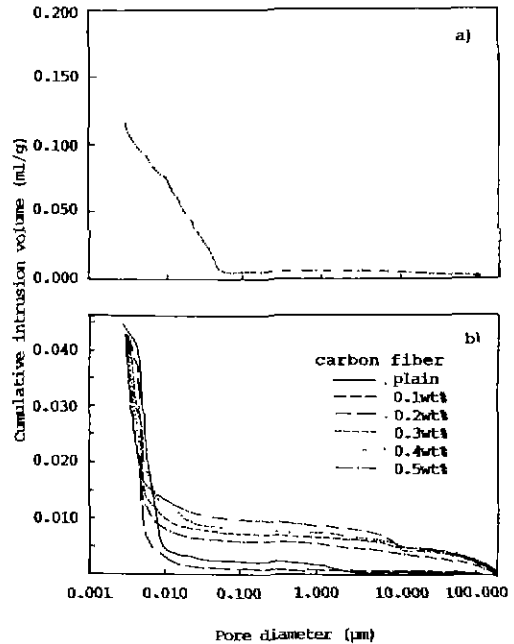


Fig. 3. Pore size distributions of ordinary cement paste and MDF cement composites, cured for 28 days.

(a) ordinary cement paste (W/C=0.4)  
 (b) carbon fiber reinforced MDF cement composites (W/C=0.1)

공이 거의 존재하지 않고 있으나 탄소섬유의 첨가량이 0.2~0.5 wt%로 증가함에 따라 큰기공이 증가하였다.

이것은 MDF 시멘트 경화체 내에 방향성이 없이 평면상으로 배열된 섬유사이에 존재하는 공극 때문일 것으로 생각된다.

#### 3.2. 적임강도 및 Young's modulus

W/C=0.1인 고강도 MDF 시멘트 복합체에 대하여 양생기간별로 탄소섬유의 첨가량에 따른 적임강도를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. W/C=0.4일 때 28일간 양생시킨 일반시멘트 경화체의 적임강도가 10 MPa 정도인데 반하여 plain 시편에서는 97 MPa 정도로 약 10배 정도의 강도증가를 나타냈다. 또한 탄소섬유를 0.1, 0.2, 0.3 wt%씩 첨가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 28일간 양생한 MDF 시멘트 복합체중에서 0.2 wt% 첨가한 것은 약 116 MPa, 0.3 wt% 첨가한 것은 약 111 MPa 정도의 높은 강도값을 나타냈다.

그러나 0.4, 0.5 wt%의 탄소섬유를 첨가했을 경우에는 plain 시편보다도 낮은 적임강도값을 나타내었다.

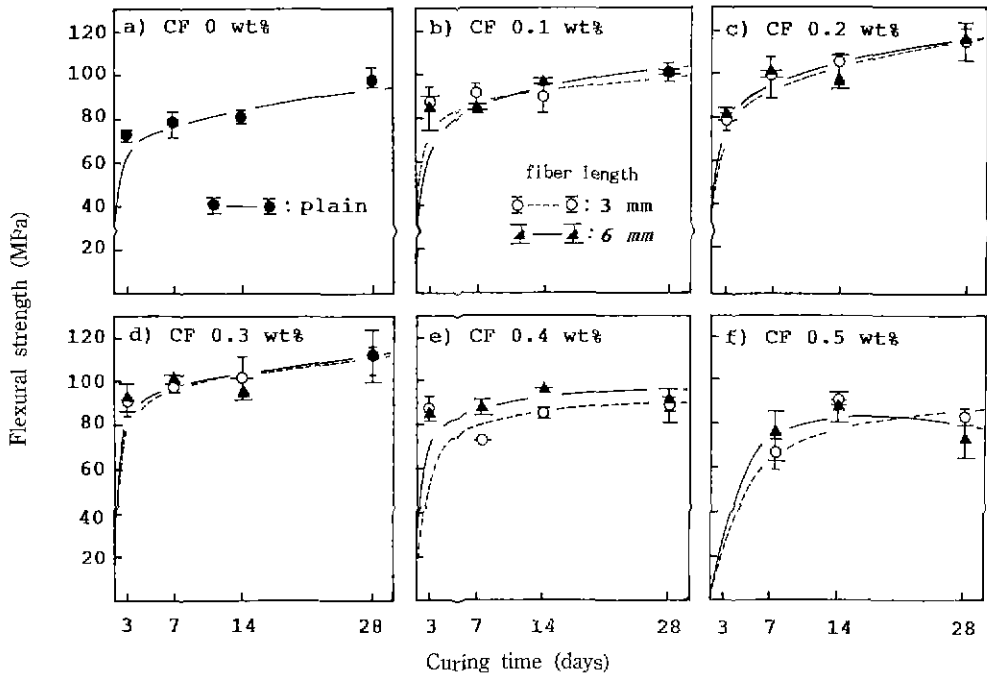


Fig. 4. Flexural strength of MDF cement composites with various content of carbon fiber (CF) at various curing time.

이는 0.1, 0.2, 0.3 wt%의 탄소섬유를 첨가시 강도가 증가하는 것은 MDF 시멘트 복합체중의 탄소섬유사이를 고분자물질이 양호하게 결합작용을 하여 탄소섬유의 보강효과가 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 0.4 wt% 이상 첨가한 것은 같은 양생조건하에서 탄소섬유층으로 용출되어 나오는 고분자물질의 양이 일정하기 때문에 과량의 섬유층 사이에서의 고분자물질의 결합력이 상대적으로 약해져 MDF 시멘트 복합체의 강도가 감소되는 것으로 생각된다. f)에서의 28일 양생시편의 강도가 낮아지는 것은 시편불량에 의한 것이라고 생각된다.

W/C=0.1인 고강도 MDF 시멘트 복합체에 대하여 양생기간별로 탄소섬유의 각 첨가량에 따른 Young's modulus를 Fig. 5에 나타내었다. 28일간 양생한 plain 시편의 Young's modulus는 63 GPa 정도의 값을 나타내며 0.1, 0.2, 0.3 wt%까지 첨가시 Young's modulus는 증가하는 경향을 나타내어 70~77 GPa 정도이었다. 이러한 증가는 matrix보다 Young's modulus가 큰 물질을 첨가할 때 복합체의 Young's modulus가 증가하는 것으로 생각되며, 0.4, 0.5 wt%의 탄소섬유를 첨가했을 때 Young's modulus가 낮아지는 경향을 나타내는 것은 탄소섬유를 과량으로 첨가할 때 상대적인 결합력의 약화와

섬유층내에 존재하는 큰기공의 영향 때문인 것으로 생각된다.

### 3.3. 파괴인성 측정 및 미세구조 관찰

SENB(single edge notched beam)법으로 측정된 파괴인성치( $K_{Ic}$ )는 Fig. 6에 나타낸 것같이 28일간 양생한 plain 시편이  $2.75 \text{ MPam}^{1/2}$ , 탄소섬유를 각각 0.1, 0.2, 0.3 wt% 첨가하였을 경우에는 점차적으로  $2.75 \sim 3.14 \text{ MPam}^{1/2}$  정도로 증가하였다. 그러나 0.4, 0.5 wt% 첨가하였을 경우에는 급격히 낮아지고 있다.

$K_{Ic}$ 값은 경화체내의 각 물질 사이의 결합력에 크게 영향을 받는다. 즉  $K_{Ic}$ 값의 증가는 미수화시멘트와 수화시멘트 gel 사이의 결합력 뿐만 아니라 수화시멘트 gel과 탄소섬유, 탄소섬유와 고분자물질, 시멘트입자와 고분자물질 사이의 결합력 때문에 파괴시 균열전파를 방해하는 정도를 나타내는 균열전파 방해작용에 의해 결정된다<sup>9)</sup>. 이것을 확인하기 위하여 double cantilever beam 시편의 균열전파 방해상태를 주사전자현미경으로 관찰하였다.

일반 시멘트 경화체와 MDF 시멘트 복합체의 파단면에 대한 주사전자현미경 사진을 Fig. 7에 나타내었다. a)와 b)는 W/C=0.4인 일반 시멘트경화체의 파단면의 기공

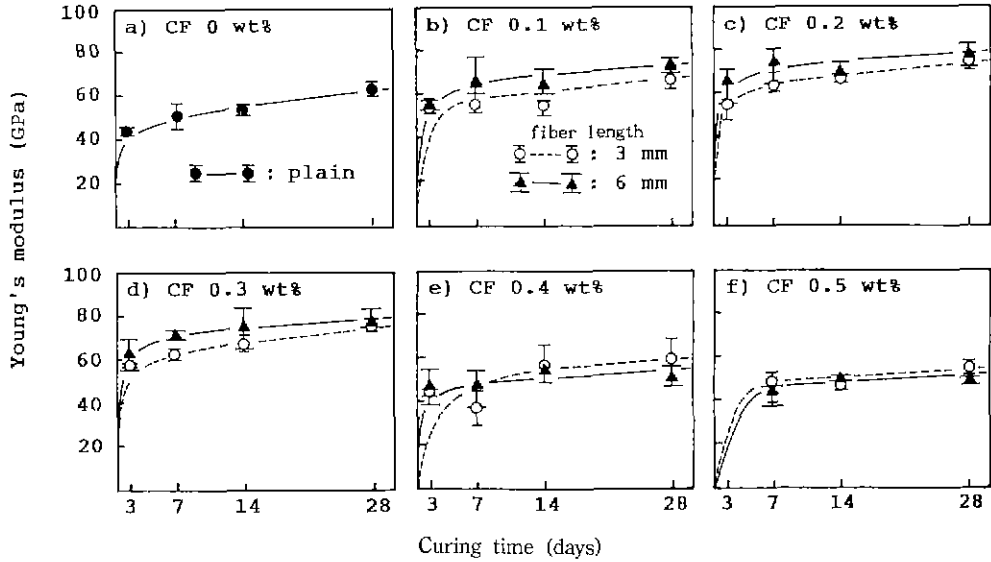


Fig. 5. Young's modulus of MDF cement composites with various content of carbon fiber (CF) at various curing time.

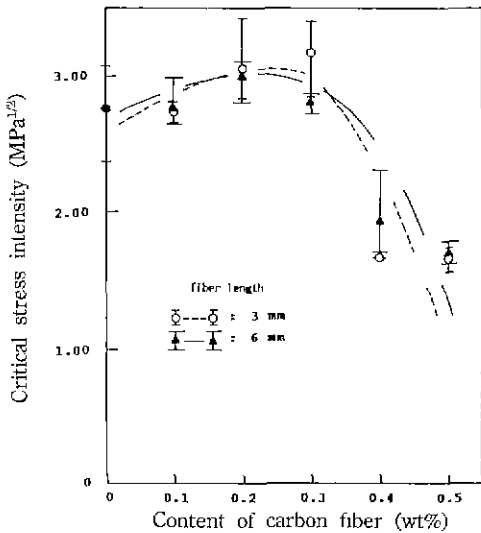


Fig. 6. Critical stress intensity( $K_{Ic}$ ) of MDF cement composites with various content of carbon fiber, cured for 28 days.

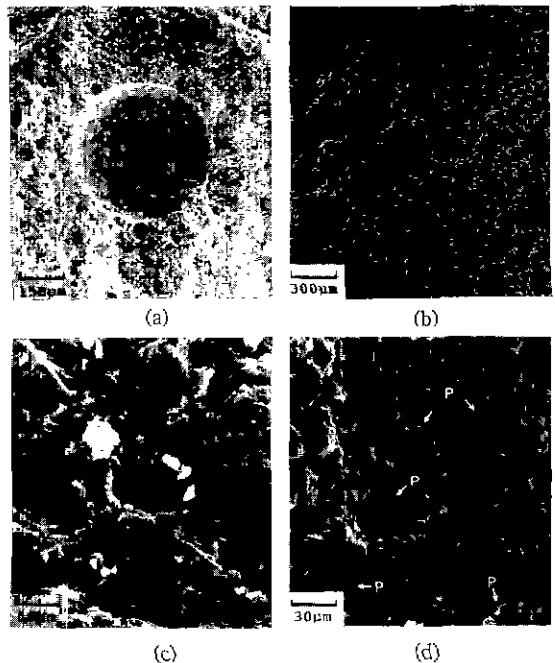
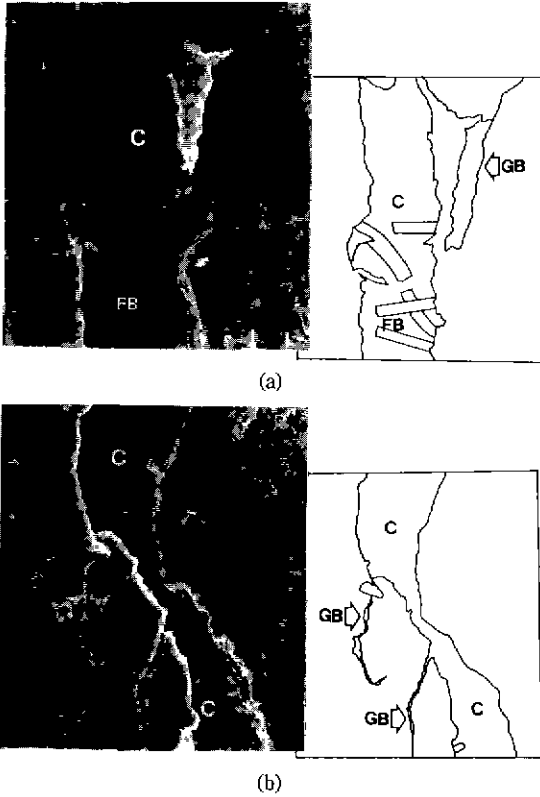


Fig. 7. Scanning electron micrographs of fracture surface of hardened cement paste with  $W/C=0.4$ (a, b),  $W/C=0.1$ (c, d) cured for 28 days. P: pore.

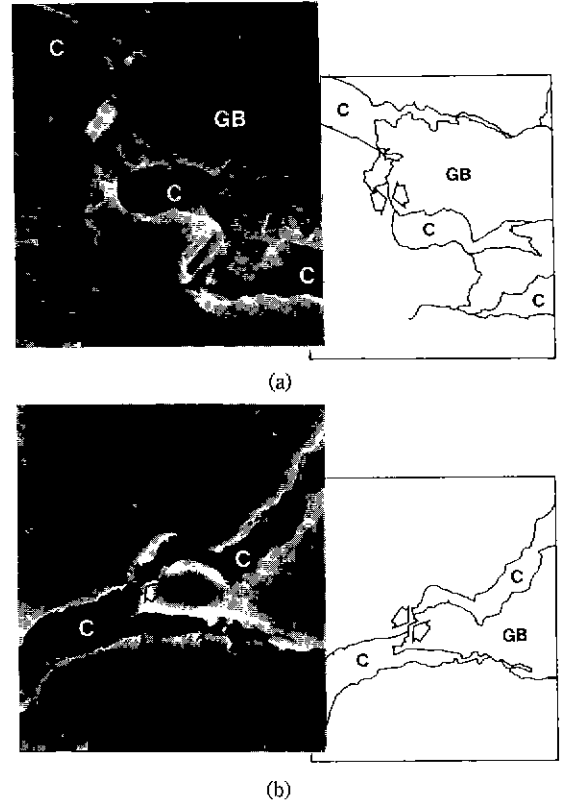
분포에 대한 주사전자현미경 사진이고 c)와 d)는  $W/C=0.1$ 인 MDF 시멘트 복합체의 파단면의 기공분포에 대한 주사전자현미경 사진이다. a)에서는 약  $300\ \mu\text{m}$ 의 큰기공을 관찰할 수 있었으며 c)에서는 약  $20\ \mu\text{m}$  이하의 기공이 존재함을 관찰할 수 있었다.

일반적으로  $W/C=0.4$ 인 일반시멘트 경화체의 적임강

도가  $10\ \text{MPa}$  이하의 값을 가지는 것으로 알려져 있지만  $W/C=0.1$ 인 MDF 시멘트 복합체의 plain 시편이  $97\ \text{MPa}$



**Fig. 8.** Scanning electron micrographs and schematic illustrations of MDF cement composites, showing examples of grain bridging (W/C=0.1, cured for 28 days).  
 C: crack  
 GB: grain bridging  
 FB: fiber bridging



**Fig. 9.** Scanning electron micrographs and schematic illustrations of MDF cement composites, showing examples of frictional interlocking at grain bridging site (W/C=0.1, cured for 28 days).  
 C: crack  
 GB: grain bridging  
 ㉸: frictional interlocking

정도의 높은 적임강도값을 갖는 원인은 주로 기공크기의 감소 때문이다. 또한 이 plain 시편에 탄소섬유를 보강함에 따라 강도가 증가함을 알 수 있었다.

W/C=0.1일 때 28일간 양생한 고강도 MDF 시멘트 복합체의 파괴기구중 입자가교(grain bridging)를 모식도와 함께 나타낸 주사전자현미경 사진을 Fig. 8에 나타내었다. 시멘트 경화체가 파괴될 때 균열은 CSH(calcium silicate hydrate) gel의 결합을 끊고 진행하며 모세관 기공을 통해 전파된다. 따라서 W/C=0.1인 MDF 시멘트 복합체의 파괴인성(K<sub>1c</sub>)값은 고분자물질의 첨가에 의한 윤활작용과 전단응력이 가해짐에 따라 조직의 치밀화로 모세관기공의 감소와 입자간의 접촉면적이 증가되어 CSH gel의 결합력이 향상되었기 때문인 것으로 생각되며, a)와 b)에서와 같이 입자주위를 균열이 전파되어 가는

grain bridging<sup>10)</sup>의 형태를 보여주고 있으며 그림 a)에서 섬유가 두 균열면 사이를 연결시켜 균열전파를 방해하는 fiber bridging<sup>9)</sup>을 나타내고 있다.

Grain bridging 부분에서의 입자간의 frictional interlocking<sup>10)</sup>을 Fig. 9에 나타내었다. 이것은 두 입자간의 물리적 접촉에 의해 생성된 마찰력으로 인해, 균열을 발생시키기 위해 가해준 에너지를 일부 흡수하여 균열 전파를 방해한다. 또한 frictional interlocking이 발생되는 곳에 위치하고 있는 입자에서는 제2차 미세균열(secondary crack)이 발생하는 경우가 많다. 이것은 제1차균열(primary crack)의 응력집중이 분산되어 복합체의 파괴인성을 증가시키는 요인중의 하나라고 생각된다.

Polymer fibril bridging<sup>11)</sup> 효과를 Fig. 10에 나타내었다. Eden과 Bailey의 보고<sup>12)</sup>에 의하면 수용성 고분자물

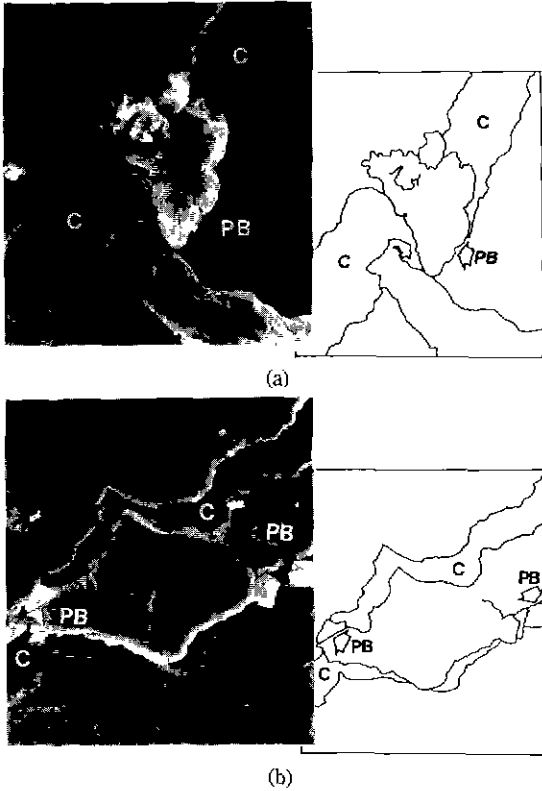


Fig. 10. Scanning electron micrographs and schematic illustrations of MDF cement composites, showing examples of polymer fibril bridging (W/C=0.1, cured for 28 days).

C: crack  
PB: polymer fibril bridging

절은 건조 후 자체적으로 상당한 강도를 지닌다. 즉 고분자물질이 미수화물들을 결합시키는 섬유상의 CSH와 반응하여 CSH-polymer-CSH의 결합을 이루어 미수화입자 주위의 CSH gel 주위를 지나가는 균열전파를 고분자물질이 방해하여 파괴인성을 증가시킨다. 그 이유는 CSH-polymer-CSH 중의 고분자물질이 점탄성을 갖으며 균열을 발생시키는데 가해진 에너지를 흡수하여 파괴인성을 증가시키는 것으로 생각된다. 또한 일반 경화체에서의 Ca(OH)<sub>2</sub>는 결정이 크고 crack initiator로서 작용하지만 고분자물질이 첨가된 경화체에서는 미세 Ca(OH)<sub>2</sub> 결정을 이루며 일반 시멘트보다 균열개시가 적게 일어나는 것 같다는 보고<sup>12)</sup>가 있으며 이들 요인도 파괴인성을 증가시키는 것으로 생각된다.

균열이 일어난 시편의 한쪽면 시멘트 페이스트층을 제거한 후 섬유가교상태를 관찰한 주사전자현미경 사진

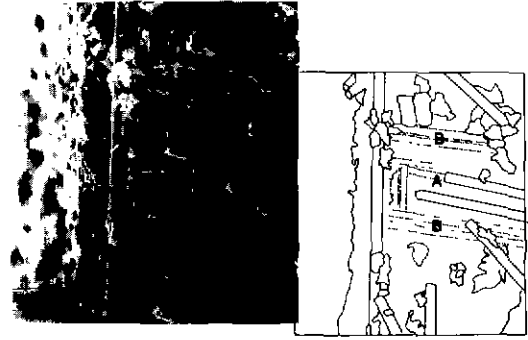


Fig. 11. Scanning electron micrographs and schematic illustrations of fracture surface of MDF cement composites, showing examples of fiber bridging (W/C=0.1, cured for 28 days).

을 Fig. 11에 나타내었다. A에서는 균열시에 섬유가 절단되면서, B에서는 섬유와 시멘트 경화체 matrix와의 분리(debonding)<sup>13)</sup>가 일어났음을 볼 수 있다.

한편 균열경로 내에서 섬유의 여러가지 작용을 Fig. 12에 나타내었다. 절단된 섬유를 관찰할 수 있었고, 균열면을 연결시킨 섬유도 관찰되며 주사전자현미경사진으로 미루어 한쪽 시멘트 경화체 matrix 내에서 섬유가 뽑히거나 절단되어 있으리라 생각된다. 또한 Fig. 12b)의 A 부분에서는 균열면을 연결시켰던 섬유가 가해진 응력으로 인해 섬유에 응력집중이 일어나서 섬유가 절단된 형태가 나타나고 있다.

이상에서 언급한 fiber bridging은 섬유가 두 균열면을 연결시켜 균열전파를 방해하고, 섬유가 절단될 때나 시멘트 경화체 matrix 내에서 섬유가 뽑힐 때는 균열을 일으키기 위해 가해진 응력에너지를 소모시킨다. 즉, 섬유가 파단면 사이에 인장응력으로서 작용하여 균열전단 응력을 감소시키는 효과(stress shielding effect)가 발생하여 균열전파를 방해하기 때문에 파괴인성을 증가시킨 것으로 생각된다.

MDF 시멘트 복합체에서 두 장의 MDF 시멘트 경화체 sheet 사이에 존재하는 섬유층을 관찰한 주사전자현미경사진을 Fig. 13에 나타내었다. 이들 섬유층에 고분자물질이 결합하는 고분자물질-섬유 가교(polymer-fiber bridging)을 이루고 있으며 또한 b)에서는 일부 시멘트 수화물(C-S-H gel)이 섬유사이에 결합되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

#### 3.4. 탄소섬유의 영향

인장강도가 약 3.3 GPa이고 Young's modulus가 230

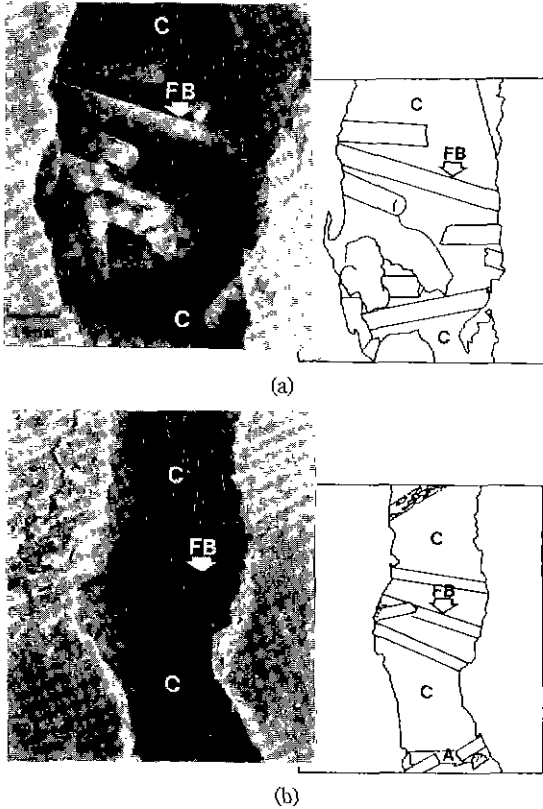


Fig. 12. Scanning electron micrographs and schematic illustrations of MDF cement composites, showing examples of fiber bridging (W/C=0.1, cured for 28 days).

C: crack  
FB: fiber bridging

GPa인 고강도, 고인성의 탄소섬유를 첨가함에 따라 MDF 시멘트 복합체의 물리적 특성은 매우 향상되었다.

시멘트 무제비에 대해 0.1, 0.2, 0.3%의 탄소섬유를 첨가했을 경우 고분자물질의 적당한 용출과 수화물의 결합으로 섬유층의 보강효과를 향상시켜 경화체의 우수한 물성을 나타내는 것으로 생각된다.

각각 3mm, 6mm 길이를 가진 탄소섬유로 제조된 섬유층을 보강한 시멘트 복합체에서, 고강도를 이루었으며 길이에 대해서는 강도특성의 큰 차이는 나타나지 않았지만 3mm보다 6mm 길이를 가진 탄소섬유를 보강한 시멘트 복합체에서 약간 우수한 경향을 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 시멘트 경화체의 낮은 적임강도를 향

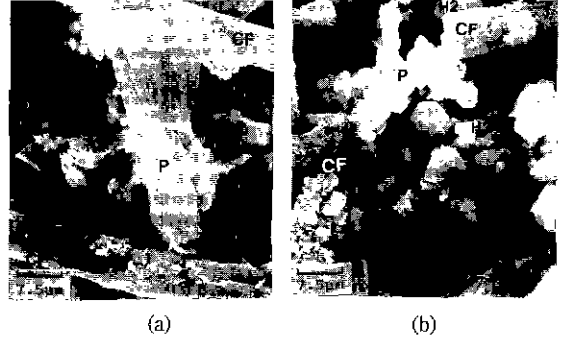


Fig. 13. Scanning electron micrographs fracture surface of MDF cement composites, showing examples of polymer-fiber bridging (W/C=0.1, cured for 28 days).

P: polymer  
CF: carbon fiber  
H1: hydrate(C-S-H gel)  
H2: hydrate(Ca(OH)<sub>2</sub>)

상시키기 위해 보통 포틀랜드 시멘트에 수용성 고분자 물질을 첨가하고, 시멘트 경화체내의 결합으로 작용하는 기공을 및 기공의 크기를 줄이기 위해 물/시멘트비(W/C)를 0.1로 하여 두 장의 MDF 시멘트 페이스트를 제조하고 그 사이에 탄소섬유층을 삽입하여 MDF 시멘트 복합체를 제조하였다. 그리고 이들의 물리적 특성검토와 파괴역학적으로 파괴기구를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 적임강도는 탄소섬유를 첨가하지 않은 plain 시편의 경우 97 MPa 정도이었으나 탄소섬유를 0.1, 0.2, 0.3 wt %씩 첨가할수록 110~116 MPa 정도로 향상되었고, Young's modulus는 plain 시편의 경우 63 GPa 정도이었고, 0.2, 0.3 wt% 탄소섬유를 첨가하였을 때 74~77 GPa 정도로 크게 증가하였다.

그러나 0.4 wt% 이상 첨가하였을 경우에는 적임강도와 Young's modulus의 값이 낮아지는데, 그 이유는 같은 양생일수에서 용출되어 나오는 수용성 고분자물질의 양이 일정한데 반하여 첨가된 과량의 섬유로 인하여 고분자물질과의 결합력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

2. 파괴인성(K<sub>IC</sub>)은 28일 양생시킨 MDF 시멘트 복합체중 0.1, 0.2, 0.3 wt%의 섬유를 첨가할수록 증가하여 0.3 wt% 첨가시 3.14 MPam<sup>1/2</sup> 정도로 가장 우수한 값을 나타내었다. 이것은 균일전파방해효과인 grain bridging, frictional interlocking, polymer fibril bridging, fiber bridging과 기공크기의 감소 그리고 입자간의 결합 증가 때문인 것으로 판단된다.

3. 첨가되는 탄소섬유의 양은 시멘트 무제비에 대해서



0.2, 0.3%일 때 가장 우수한 특성을 나타냈으며 섬유길이에 따른 물성에 큰 차이는 없었으나 3 mm보다 6 mm 길이의 탄소섬유가 첨가된 MDF 시멘트 복합체가 약간 우수한 특성을 나타내었다.

### 감사의 글

이 논문은 1991년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 대학 부설연구소 지원 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

### REFERENCES

1. J.D. Birchall, A.J. Howard and K. Kendall, *European Patent publication*, No. 9921682 (1981).
2. J.D. Birchall, A.J. Howard and K. Kendall, "Flexural Strength and Porosity of Cement", *Nature*, **298**, 388 (1991).
3. 김정환, 최상훈, 한기성, "고강도 시멘트 경화체의 특성에 미치는 혼입재의 영향", *한국요업학회지*, **27**(4), 495-500 (1990).
4. 김정환, 최상훈, 한기성, "고강도 시멘트의 특성에 미치는 미세구조의 영향(I)", *한국요업학회지*, **27**(7), 861-868 (1990).
5. 김정환, 최상훈, 한기성, "고강도 시멘트의 특성에 미치는 미세구조의 영향(II)", *한국요업학회지*, **27**(8), 1034-1042 (1990).
6. J.H. Kim, K.S. Han and S.H. Choi, "Mechanical Properties of MDF Cement Composites with SiC Powder", *Proc. 9th Int. Cong. Chem. Cem., New Delhi, Vol. III*, 380-385 (1992).
7. 西田俊彦, 安田榮一, "セラミックスの力學的性質評價", p. 63-124 *日刊工業新聞社, 東京* (1986).
8. Torben C. Hansen, "Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste", *J. Am. Concr. Inst.*, No. 62-11, 193-215 (1965).
9. N. McN. Alford, G.W. Groves and D.D. Double, "Physical Properties of High Sstrength Cement Pastes", *Cem Conc. Res.*, **12**, 349-358 (1982).
10. Peter L. Swanson, Carolyn J. Fairbanks, Brian R. Lawn, Yiu-Wing Mai and Bernard J. Hockey, "Crack-Interface Grain Bridging as a Fracture Resistance Mechanism in Ceramics; I, Experimental Study an Alumina", *J. Am. Ceram. Soc.*, **70**(4), 279-289 (1987).
11. Yiu-Wing Mai, B. Barakat, B. Cotterell and M. Swain, "Mechanism of Crack Growth Resistance in Macro-Defect-Free Cement Paste", *MRS*, **13**, 187-193 (1988).
12. N.B. Eden and J.E. Bailey, "The Mechanical Properties and Tensile Failure Mechanism of a High Strength Polymer Modified Portland Cement", *J. Mater Sci.*, **19**, 2677-2690 (1984).
13. H. Osmani, D. Rouby, G. Fantozzi and J.M. Lequertier, "Toughness, Microstructure and Interface Characteristics for Ceramic-Ceramic Composites", *Composites Science and Technology*, **37**, 191-206 (1990).