

섬유보강 시멘트 모르타르의 기계적 특성

정민철 · 남기웅 · 정윤중

명지대학교 공과대학 무기재료공학과

(1994년 3월 5일 접수)

Mechanical Properties of Cement Mortar with Fibers

Min-Chul Chung, Ki Woong Nam and Yun-Joong Chung

Dept. of Inorganic Materials Engineering Myung-Ji Univ.

(Received March 5, 1994)

요 약

보통시멘트 모르타르에 고성능 감수제인 naphthalene sulfonate를 사용하여 일반시멘트 모르타르(plain 시멘트 모르타르)를 제조하고, 이 시멘트 모르타르 속에 폴리프로필렌 섬유(polypropylene fiber : PF)와 탄소섬유(carbon fiber : CF)를 보강하여 섬유보강 시멘트 모르타르 그라우트재(fiber reinforced grouts : FRG)를 제조하였다. 이 그라우트재에 대한 물리적 특성과 파괴거동을 연구하였다. 폴리프로필렌 섬유를 0.03 wt% 첨가시 압축강도와 꺾임강도가 각각 60~63 MPa, 12.2~12.4 MPa, 탄소섬유를 0.03 wt% 첨가시 압축강도와 꺾임강도가 각각 63~68 MPa, 12.2~12.6 MPa이며 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 각각 0.03 wt% 첨가시 Young's modulus는 4.2~4.8 GPa, 4.8~5.1 GPa, 파괴인성치는 0.77~0.82 MNm^{-1/2}, 0.80~0.87 MNm^{-1/2}로 가장 우수하였다. 섬유보강 그라우트재(FRG)의 강도향상은 큰 기공의 제거와 polymer fiber bridging, fiber bridging과 같은 파괴인성효과와 항상 때문인 것으로 생각된다.

ABSTRACT

A fiber reinforced grouts were made using ordinary cement mortar and high effective water reducing agent (naphthalene sulfonate) were made by addition polypropylene fiber and carbon fiber. The physical properties of the grouts were investigated through the observation of the microstructure and the application of fracture mechanics. When the polypropylene fiber and carbon fiber were added respectively with 0.03 wt% to the grouts the compressive strength, flexural strength and Young's modulus were about 60~63 MPa, 12.2~12.4 MPa, 4.2~4.8 GPa and 63~68 MPa, 12.2~12.6 MPa, 4.8~5.1 GPa, and critical stress intensity were about 0.77~0.82 MNm^{-1/2}, and 0.80~0.87 MNm^{-1/2} respectively. It can be considered that the strength improvement of fiber reinforced grouts (FRG) may be due to the removal of macropores and the increase of various fracture toughness, polymer fibril bridging and fiber bridging.

1. 서 론

보통시멘트 모르타르는 작업성을 위하여 시멘트 수화에 필요한 이론 수량보다 과잉의 물을 사용하며, 사용된 물은 증발작용에 의해 없어지기도 하지만 대부분의 수분은 시멘트의 수화반응에 의해서 소비되며 불리당 현상에 의해서 큰 수극이 형성된다. 이러한 문제를 감소시키기 위하여 고성능 감수제를 첨가하여 조직의 강도를 기하였다.

보통시멘트 모르타르로 제조된 경화체의 압축강도 및 꺾임강도는 각각 약 50 MPa, 7.0 MPa 정도의 값을 갖는다. 이러한 시멘트 모르타르의 경화체의 강도향상은 경화체내에 존재하는 큰 기공의 제거와 기공율을 감소 시킴으로써 가능하였다¹⁾. 특히 고성능 감수제와 섬유를 보강시킨 그라우트재(FRG)의 경우 압축강도의 향상에 비하여 꺾임강도의 향상이 우수하게 나타났다^{2,3)}. 그러나 이러한 강도향상에 대한 파괴역학적 개념에 대한 구명이 시도되고 있으나 현재까지는 다소 미흡한 편이다.

본 연구에서는 보통시멘트 모르타르를 사용하여 물/시멘트비를 0.4에서 0.3으로 감소시킬 수 있는 고성능 감수제인 naphthalene sulfonate를 첨가하여 plain 시멘트 모르타르를 제조하였다. 이때 plain 시멘트 모르타르보다 높은 강도특성을 갖도록 plain 시멘트 모르타르에 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 첨가하여 섬유보강 그라우트재를 제조하였다. 이들 그라우트재의 미세구조와 강도와의 관계를 구명하기 위하여 파괴거동시 나타나는 polymer fibril bridging 및 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유와의 fiber bridging 등에 의한 균열억제와 강도와의 관계를 검토하였다.

2. 실험방법

출발원료로는 보통 포틀랜드 시멘트와 여주산 강모래를 사용하였다. 혼합제로서 폴리프로필렌 섬유⁴⁾⁵⁾와 탄소섬유⁶⁾⁷⁾ 5 mm, 10 mm 길이를 가진 두가지의 섬유를 사용하였다. 적은 물/시멘트비로 시멘트 모르타르의 유동성을 유지시킬수 있는 혼합제로서 naphthalene sulfonate(naphthalene formaldehyde condensate, 상품명: suparex M)의 고성능 감수제를 시멘트 중량의 1 wt%

첨가하였다. 이들 출발원료에 대한 화학조성과 물리적 성능은 Table 1에 나타내었다. 특히 탄소섬유는 시멘트와의 흡착관계를 고려하여 표면처리는 하지 않았다.

섬유보강 그라우트재(FRG)의 시편제조시 mixing은 용량 10l의 고성능 Omni-Mixer를 사용하였고, 비빔시간은 (a) Dry blend(cement, 모래, 감수제) : 1~2분, (b) Primary blend(Add Water) : 2~3분, (c) Secondary blend(Add Fiber) : 2~3분으로 하여 평균 7분간 혼합하였고 시편제조방법으로 압축강도시험은 KSL 5105에 준하여 5.08×5.08×5.08 cm의 입방공시체를 제작하였고, 쪼임강도시험은 JIS R 5201에 준하여 4×4×16 cm의 공시체를 제작하였다. 그리고 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 시멘트무게비로 각각 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 wt%씩 첨가하여 보강하였다. 이들 시편은 3, 7, 28일간 수중양생한 후 시험에 임하였으며, 압축강도는 SHIMA-DZU UH-100A로 시험하였고, cross head speed 0.5 mm/min 조건으로 INSTRON 040 H 2588를 사용하여 3 point bending method로서 다음 식들에 의해 쪼임강도(flexural strength : σ_f) 및 Young's modulus(E_b)을 측정하였다.

Table 1. Chemical Composition and Physical Properties of Starting Materials

a) Portland cement (type I)

(wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Free CaO	Ig. loss	Fineness (Blaine: cm ² /g)
22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	1.6	0.7	0.6	3,300

b) Sand

(wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
89.60	6.92	0.90	0.04	0.27	0.08	0.09

c) Naphthalene sulfonate

Total Solids (%)	92
Sodium Sulphate (%)	8
PH (2% Solution)	6.5~8.5

d) Polypropylene fiber

Grade name	Fiber strand 100
Tensile strength	0.53 GPa
Young's modulus	3.7 GPa
Filament diameter	15 μ m
Density	0.92 g/cm ³

e) Carbon fiber

Grade name	Acelan TZ 307
Tensile strength	3.4 GPa
Young's modulus	235 GPa
Filament diameter	6.8 μ m
Density	1.80 g/cm ³

$$\sigma_f = \frac{1.5PL}{d^3W}$$

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

σ_f : flexural strength

E_b : Young's modulus

P : load, d : depth

W : width, L : span

y : maximum deflection

그리고 SENB(single edge notched beam)법¹⁾으로 다 음식에 따라 경화체의 파괴인성(KIC) 및 notch length 별로 쪼임강도를 측정하였다.

$$K_{IC} = Y\sigma_f d^{1/2}$$

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

$$\sigma_f = \frac{1.5PL}{d^3W}$$

여기서 Y는 a/w 및 하중방식에 의존하는 상수이다. 또한 파괴거동과 미세구조를 관찰하기 위해 SEM 관찰을 실시하였다

3. 결과 및 고찰

3.1. 기공률

28일간 양생시킨 시편에 대하여 수은압입법으로 측정 한 w/c=0.4인 보통시멘트 모르타르 경화체의 기공율을 Fig. 1의 (a)에 나타내었고, w/c=0.3이고 기공률 분포가 거의 유사한 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유의 기공율을 Fig. 1의 (b)에 나타내었다. w/c=0.3인 FRG 경화 체의 기공이 w/c=0.4인 보통시멘트 모르타르 경화체보다 치 밀하여 곡선변화가 작은 기공쪽에 위치함을 알 수 있다 그러나 w/c=0.3인 시편들 중에서, 섬유를 첨가하지 않고 고성능 감수제만 첨가한 plain 시멘트 모르타르 경화체 (plain 시편)와 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 각각 0.01 wt% 첨가한 경화체에서는 큰 기공이 거의 존재하지 않으나 0.02~0.05 wt%로 증가함에 따라 큰 기공이 증 가하였다. 이것은 FRG 경화체내에 섬유의 첨가로 인한 공극이 존재하기 때문인것으로 생각된다.

3.2. 압축강도, 쪼임강도 및 Young's modulus

w/c=0.3인 FRG 경화체에 대하여 양생기간별로 폴리

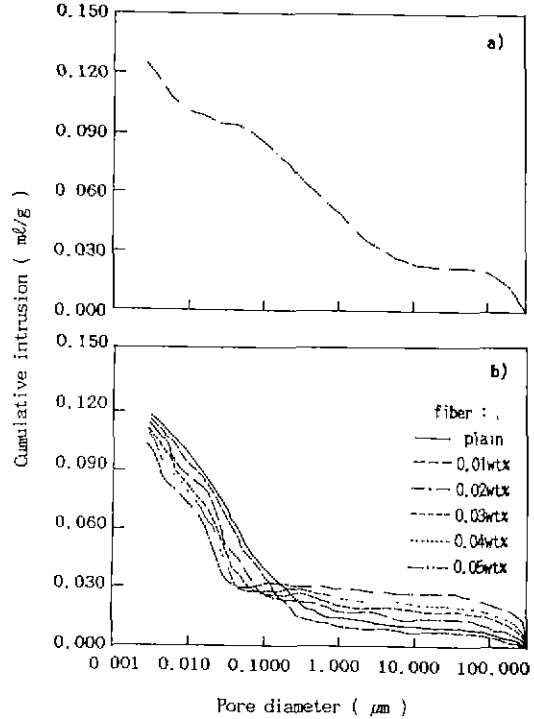


Fig. 1. Pore size distribution of ordinary cement mortar and FRG cement mortar, cured for 28 days. (a) ordinary cement mortar (W/C=0.4) (b) FRG cement mortar (W/C=0.3)

프로필렌 섬유와 탄소섬유의 첨가량에 따른 압축강도를 측정하였다. 첨가량이 0.01, 0.02 wt%에서 압축강도 값은 유사한 경향을 나타내었으며, 0.03 wt%에서 가장 우수한 값을 나타내어 이를 Fig. 2에 나타내었다. w/c=0.4일 때 28일간 양생시킨 보통시멘트 모르타르 경화체의 압축강도가 48 MPa 정도인데 반하여 plain 시편에서는 55 MPa 정도의 강도를 나타냈다. 특히 28일간 양생한 FRG 경화체중에서 폴리프로필렌섬유를 0.03 wt% 첨가한 것은 60~62 MPa 정도의 강도향상을 나타냈으며 탄소섬유를 0.03 wt% 첨가한 것은 63~68 MPa 정도의 값을 나타냈다 이와같은 강도증진현상은 고성능 감수제로 첨가한 naphthalene sulfonate가 시멘트 혹은 섬유에 흡착하여 고도의 분산성을 발휘함으로 경화체의 치밀성과 균질성이 향상되며 이 결과로 결정계면사이의 접촉면적이 증가되어 경화체의 기계적인 물성이 증가된 것으로 생각 된다 첨가량이 0.04, 0.05 wt%일 경우 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유의 압축강도값은 약간의 하락을 나타내었다. 이는 섬유의 과량 첨가에 의한 경화체와 섬유사이

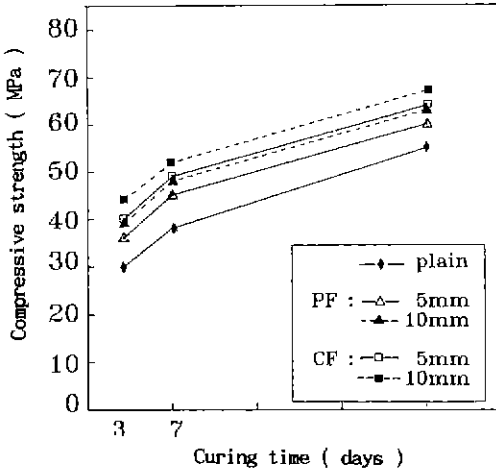


Fig. 2. Compressive strengths of FRG cement mortars added 0.03 wt% PF and CF at various curing time.

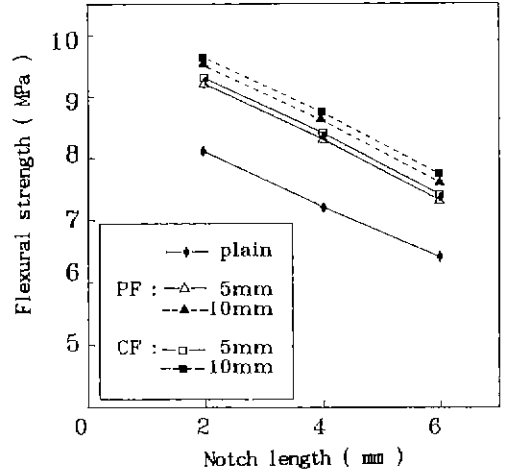


Fig. 4. Flexural strengths of FRG cement mortars added 0.03 wt% PF and CF at various notch length, cured for 28 days.

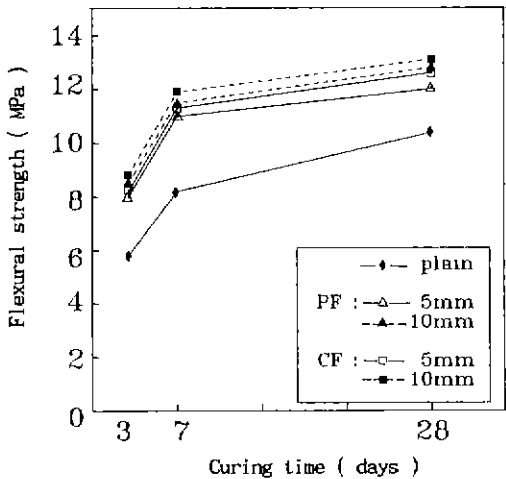


Fig. 3. Flexural strengths of FRG cement mortars added 0.03 wt% PF and CF at various curing time.

존재하는 큰 기공의 영향 때문인 것으로 생각된다.

그리고 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 각각 0.03 wt% 첨가하였을 경우 각각에 대하여 28일간 양생한 FRG 경화체의 꺾임강도값을 Fig. 3에 나타내었는데 그 값은 12.2~12.5 MPa, 12.3~12.7 MPa 정도의 강도값을 나타내었다. 이는 w/c=0.3인 고성능 감수제만 첨가한 plain 시멘트 모르타르 경화체의 꺾임강도값이 10.4 MPa인 것과 비교해보면 FRG 경화체에 대한 꺾임강도 값이 약 15~18% 정도로 상승된 우수한 값을 나타내었다고 생각된다. 특히 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를

각각 0.03 wt%의 섬유를 첨가시 강도가 증가하는 것은 FRG 경화체중의 각 섬유들 사이에 고성능 감수제가 시멘트 혹은 섬유에 흡착하여 고도의 분산성을 발휘함으로써 경화체의 치밀성과 균질성이 향상되며, 이 결과로 결정계면 사이의 접촉면적이 증가되어 경화체의 기계적인 특성이 증가된다. 이는 앞서 실험한 압축강도 결과와도 잘 일치하고 있다.

w/c=0.3인 FRG 경화체에 대하여 28일간 양생한 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 각각 0.01, 0.02 wt%씩 첨가하였을 경우 notch length별 꺾임강도는 8.4~6.8 MPa, 8.9~7.4 MPa 정도로 유사한 경향의 값을 나타내었고, 28일간 양생한 plain 시편의 notch length별 꺾임강도는 8.1~6.4 MPa 정도의 값을 나타내며, 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 각각 0.03 wt% 첨가시 꺾임강도는 9.5~7.4 MPa, 9.7~7.5 MPa 정도로 이를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 각각의 섬유를 0.03 wt% 첨가한 것이 plain 시편의 경우보다 약 11~13% 정도로 상승된 값을 나타내었다. 이는 앞서 실험한 압축강도 및 꺾임강도의 강도증진 이유와 잘 부합되고 있음을 알 수 있다. 또한 섬유첨가량이 0.04 wt%, 0.05 wt% 첨가시 강도변화는 0.03 wt%와 비교하여 약간의 강도하락을 나타내었다. 이는 앞서 실험한 압축강도의 결과에서 나타난 것과 같이 과량의 섬유첨가로 인한 큰 기공의 영향 때문인 것으로 생각된다. 또한 w/c=0.3인 FRG 경화체에 대하여 28일간 양생한 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 각각 0.01, 0.02 wt% 첨가하였을 때 Young's modulus는 3.8~

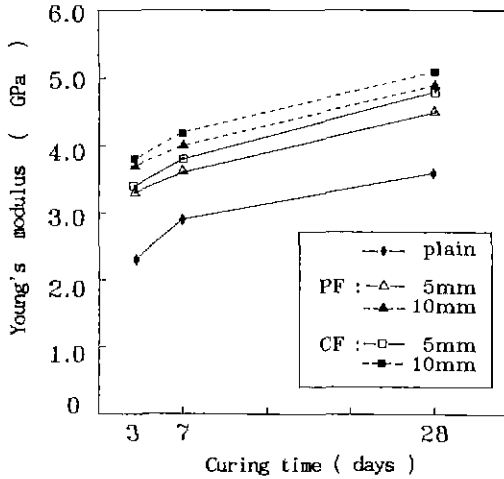


Fig. 5. Young's modulus of FRG cement mortars added 0.03 wt% PF and CF at various curing time.

4.2 GPa, 4.0~4.3 GPa 정도로 유사한 경향의 값을 나타냈으며 28일간 양생한 plain 시편의 Young's modulus의 경우는 3.6 MPa 정도의 값을 나타내며, 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 각각 0.03 wt% 첨가시 Young's modulus는 증가하는 경향을 나타내어 4.4~4.6 GPa, 4.6~4.9 GPa 정도로 이를 Fig. 5에 나타내었다. 이와같은 Young's modulus값의 향상도 앞서 설명한 것과 같이 고성능 감수제가 시멘트 혹은 섬유에 흡착하여 고도의 분산성을 발휘함으로써 경화체의 치밀성과 균질성이 향상되며, 이 결과로 결정체면 사이의 접촉면적이 증가되어 경화체의 기계적인 물성이 증가되는 것으로 생각되며 앞의 실험결과와도 잘 일치하고 있다.

3.3. 파괴인성 측정 및 미세구조 관찰

SENB(single edge notched beam)법으로 측정한 파괴인성치(K_{IC})는 Fig. 6에 나타냈던 같이 28일간 양생한 plain 시편이 0.6 MNm^{-1/2}, 폴리프로필렌 섬유를 각각 0.01, 0.02, 0.03 wt% 첨가한 경우 그 값은 0.65~0.81 MNm^{-1/2}으로 증가하였고, 탄소섬유를 각각 0.01, 0.02, 0.03 wt% 첨가한 경우에는 0.7~0.87 MNm^{-1/2} 정도를 증가하였다. 그러나 0.04, 0.05 wt% 첨가시 약간의 저하를 나타내고 있다. 이는 K_{IC}값은 경화체내의 각 물질 사이의 결합력에 크게 영향을 받는 것으로 섬유의 과량첨가에 따른 경화체와 섬유사이의 큰 기공의 영향때문인 것으로 생각된다. 또한 K_{IC}값의 증가는 앞서 실험결과에서 설명하였듯이 고성능 감수제가 시멘트 혹은 섬유에 흡착하여 고도의 분산성을 발휘함으로써 경화체의 치밀성과

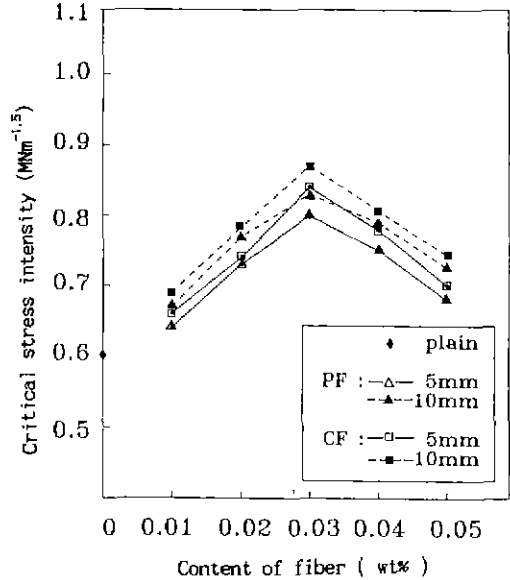


Fig. 6. Critical stress intensity (K_{IC}) of FRG cement mortars, cured for 28 days.

균질성이 향상되어 그 결과로 결정체면사이의 접촉면적이 증가되어 경화체의 기계적인 물성이 증가된것으로 생각된다. 이와같은 작용을 확인하기 위하여 plain 시편 및 FRG 경화체에 대한 주사전자현미경 관찰을 하였다.

보통시멘트 모르타르 경화체와 plain 시편의 파단면에 대한 주사전자현미경 사진을 Fig. 7에 나타내었다. a)는 w/c=0.4인 보통시멘트 모르타르 경화체의 파단면의 기공분포에 대한 주사전자현미경 사진이고, b)는 w/c=0.3인 plain 시멘트 모르타르 경화체의 파단면의 기공분포에 대한 주사전자현미경 사진이다. a)에서는 시멘트 수화물과 모래입자사이의 거대기공을 관찰할 수 있으며, b)에서는 시멘트 수화물과 모래입자사이에 미세기공만이 존재함을 관찰할 수 있었다. 이와같이 보통시멘트 모르타르 경화체에 비하여 plain 시편의 강도특성이 우수하게 나타나는 것은 기공크기의 감소 때문이고, 또한 이 plain 시편에 섬유를 보강함에 따라 강도가 증가함을 알 수 있었다.

w/c=0.3일 때 28일간 양생한 폴리프로필렌 섬유를 첨가한 FRG 경화체의 파괴기구를 모식도와 함께 나타낸 주사전자현미경 사진을 Fig. 8에 나타내었다. FRG 경화체가 파괴될때 균열은 CSH(calcium silicate hydrate) gel의 결합을 끊고 진행하며 모세관 기공을 통해 전파된다. 따라서 w/c=0.3인 FRG 경화체의 파괴인성(K_{IC})

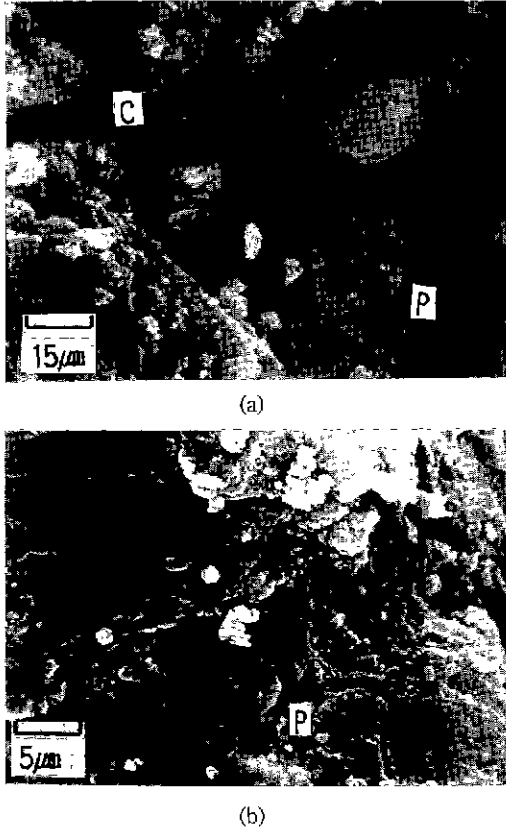


Fig. 7. Scanning electron micrographs of fracture surface of hardened cement mortars (*P: Pore, C: Crack).
 (a) ordinary cement mortar (W/C=0.4)
 (b) plain cement mortar (W/C=0.3)

값의 증가는 고성능 감수제가 시멘트입자 및 섬유에 흡착하여 고도의 분산성을 발휘함으로써 경화체의 치밀성과 균질성이 향상되어 기공의 감소와 입자간의 접촉면적의 증가로 CHS gel의 결합력이 향상되었기 때문인 것으로 생각된다. 또한 입자간의 frictional interlocking을 Fig. 9의 a), b)에 나타내었다. 이것은 두 입자간의 물리적 접촉에 의해 생성된 마찰력으로 인해, 균열발생시키기 위해 가해진 에너지를 일부 흡수하여 균열전파를 방해한다.

또한 w/c=0.3일 때 28일간 양생한 탄소섬유를 첨가한 FRG 경화체의 파괴기중 grain bridging, fiber bridging 및 grain bridging에서의 입자간의 frictional interlocking을 Fig. 10에 나타내었다. a)는 fiber에 의한 균열전파를 방해하는 것을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 이와같이 탄소섬유의 균열전파방해로 파괴인성치가 증가

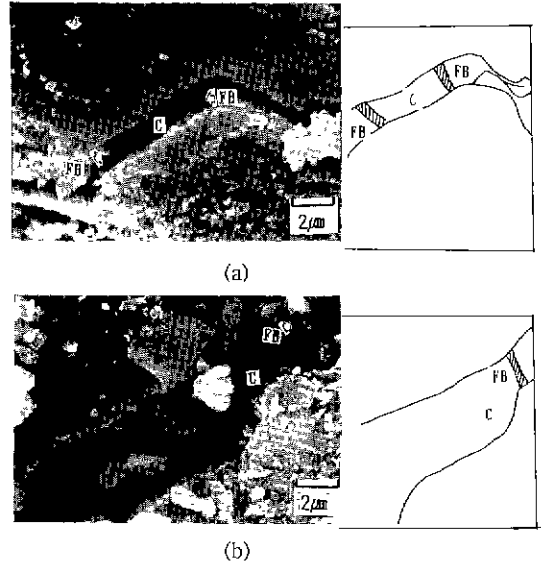


Fig. 8. Scanning electron micrographs of schematic illustrations of FRG cement mortars with PF (W/C=0.3), cured for 28 days (*C: Crack, FB: Fiber Bridging).

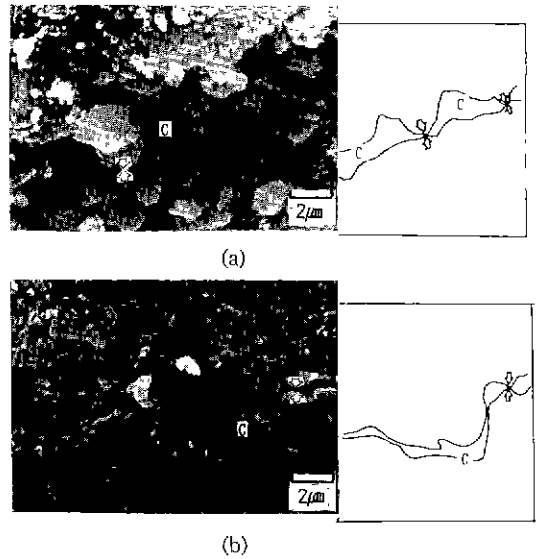


Fig. 9. Scanning electron micrographs of schematic illustrations of FRG cement mortars with PF (W/C=0.3), cured for 28 days (*C: Crack, ⊗: frictional interlocking).

되는 것으로 생각된다¹⁰⁻¹². 그림 b)에서는 탄소섬유에 의한 균열전파 방해와 grain bridging을 나타낸 것이고, Fig. 11 a)에서는 fiber bridging 및 입자간의 frictional

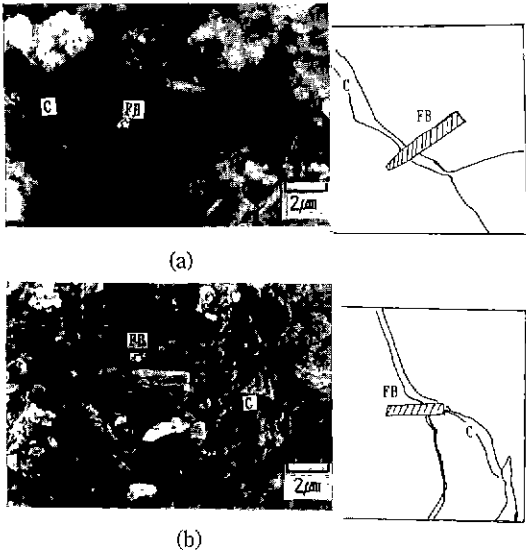


Fig. 10. Scanning electron micrographs of schematic illustrations of FRG cement mortars with CF (W/C=0.3), cured for 28 days (*C: Crack, FB: Fiber Bridging).

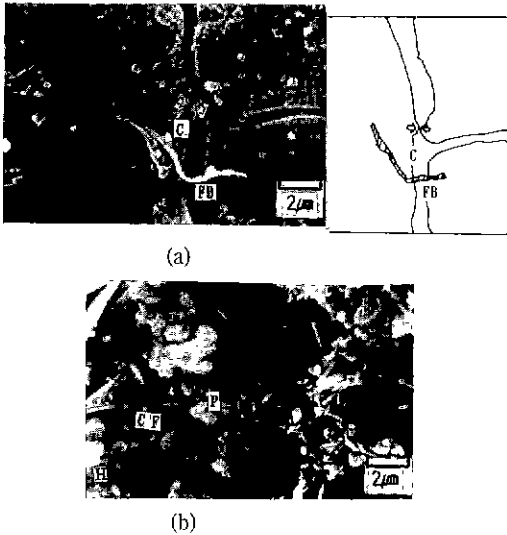


Fig. 11. Scanning electron micrographs of schematic illustrations of FRG cement mortars with CF (W/C=0.3), cured for 28 days. *C: Crack, I: frictional interlocking, P: Polymer, FB: Fiber Bridging, H: Hydrate (C-S-H gel), CF: Carbon Fiber

interlocking을 나타낸 것이다. 이와같은 균열전파 방해와 고성능 감수제가 첨가되어 시멘트입자 및 섬유에 흡착

하여 고도의 분산성에 의한 경화체의 치밀성 및 균질성이 향상되고 이 결과로 결정계면 사이의 접촉면적이 증가 되어 경화체의 파괴인성을 증가시키는 것으로 생각된다. 그림 b)에서는 FRG 경화체 사이에 존재하는 탄소섬유를 관찰한 것이다. 이 그림에서 탄소섬유와 일부 시멘트 수화물(C-S-H gel)이 결합되어 있는것을 관찰할 수 있다.

3.4. 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유의 영향

일반시멘트 모르타르에 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 첨가한 FRG 경화체의 물리적 특성은 향상되었다. 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 각 0.01, 0.02, 0.03 wt% 첨가했을 경우 고성능 감수제의 첨가로 시멘트입자 및 섬유에 흡착하여 고도의 분산성에 의한 경화체의 치밀성 및 균질성으로 인해 경화체의 우수한 물성을 나타내는 것으로 생각된다. 섬유길이를 5 mm, 10 mm 길이로 첨가했을 경우 강도특성상의 차이는 크게 나타나지 않으나 5 mm보다 10 mm 길이를 가진 섬유가 보강효과에 있어서 약간의 우수성을 나타냈으며, 섬유에 있어서는 폴리프로필렌 섬유보다는 탄소섬유로 보강한 경화체가 약간 우수한 경향을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 보통시멘트 모르타르 경화체의 강도특성을 향상시키기 위해 특히 쥐임강도의 향상을 위해 보통시멘트 모르타르에 고성능 감수제를 첨가하여 물/시멘트비를 0.3으로 줄여 plain 시멘트 모르타르(plain 시편)을 제조하였고, 이 plain 시편에 폴리프로필렌 섬유와 탄소섬유를 첨가하여 FRG 경화체를 제조하여 그에 대한 물리적 특성 검토와 파괴역학적으로 파괴기구를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 압축강도는 섬유를 첨가하지 않은 plain 시편의 경우 55 MPa 정도 이었으나 폴리프로필렌 섬유를 0.03 wt% 첨가시 63 MPa 정도로 향상되었고, 탄소섬유의 경우는 68 MPa 정도로 향상되었다. 쥐임강도는 plain 시편의 경우 10.4 MPa 정도이고, 폴리프로필렌 섬유를 0.03 wt% 첨가한 경우 12.4 MPa 정도이고, 탄소섬유를 0.03 wt% 첨가한 경우 12.6 MPa 정도로 향상되었다. 또한 Young's modulus는 plain 시편의 경우 3.6 GPa 정도이었고, 폴리프로필렌 섬유를 0.03 wt% 첨가할 경우 4.8 GPa 정도 이고, 탄소섬유를 0.03 wt% 첨가할시 5.1 GPa 정도로 향상되었다. 그러나 0.04~0.05 wt% 첨가하였을 때 압축 강도, 쥐임강도, Young's modulus는 약간의 저하를 나타냈다. 그 이유는 고성능 감수제와 결합할 수 있는 섬

유의 양이 과잉 첨가로 인한 경화체와 섬유 사이의 큰 기공의 영향 때문인 것으로 판단된다.

2. 파괴인성(K_{IC})은 28일간 양생시킨 FRG 경화체에서 폴리프로필렌섬유를 0.03 wt% 첨가시 $0.81 \text{ MNm}^{-1/2}$ 정도이고, 탄소섬유 0.03 wt% 첨가시 $0.87 \text{ MNm}^{-1/2}$ 정도로 가장 우수한 값을 나타내었다. 이것은 균열전파 방해 효과인 grain bridging, fiber bridging, frictional interlocking과 기공크기의 감소 그리고 입자간의 결합증가 때문으로 판단된다.

3. 폴리프로필렌 섬유 및 탄소섬유의 첨가량은 0.03 wt% 첨가시 가장 우수한 특성을 나타냈으며, 섬유길이에 따른 물성차이는 크지는 않았으나 5 mm보다 10 mm 길이의 섬유가 약간 우수하였으며, 폴리프로필렌 섬유 보다는 탄소섬유가 다소 우수한 특성을 나타내었다.

REFERENCES

1. J.D. Birchall, A.J. Howard and K. Kendall, "Flexural Strength and Porosity of Cements," *Natures*, **289**, 388-390 (1981).
2. 전용희, 한기성, "탄소섬유 보강 고강도 시멘트 복합체의 기계적 특성에 관한 연구," 한국요업학회지, **30**(2), 139-147 (1993).
3. 김정환, 최상훈, 한기성, "고강도 시멘트 경화체의 특성에 미치는 미세구조의 영향(II)," 한국요업학회지, **27**(8), 1034-1042 (1990).
4. 大岸佐吉, 木澤久兵衛, "ポリプロピレン系 繊維混入コンクリートモルタルの性質に関する研究(その2)," 名古屋工業大學學報, **19**, 381-390 (1967).
5. Herbert Krenchel and Surendra Shah, "Applications of Polypropylene Fibers in Scandinavia," *Concrete International*, **3**, 32-34 (1985).
6. M.A. Ali, A.J. Majundar and D.L. Rayment, "Carbon Fibre Reinforcement of Cement," *Cem. Con. Res.*, **2**, 201-212 (1972).
7. 秋浜繁幸, 長谷川壽夫, 末永龍夫, 坂野正, "CFRCの力學的性質," *セメント コンクリート*, **440**, 10, 32-39 (1983).
8. H. Osman, D. Rouby, G. Fantozzi, "Toughness Microstructure and Interface Characteristics for Ceramic-Ceramic Composites," *Composite Science and Technology*, **37**, 191-201 (1990).
9. 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).
10. N. McN. Alford, J.D. Birchall, "Fibre Toughening of MDF Cement," *J. Mater Sci*, **20**, 37-45 (1985).
11. 大岸佐吉, "じん性を高める 繊維補強コンクリートの諸問題," *建築雑誌*, **93**, 1131, 89-93 (1978).
12. N. McN. Alford, G.W. Groves and D.D. Couble, "Physical Properties of High Strength Cement Pastes," *Cem. Con. Res.*, **12**, 349-358 (1982).