

## 폴리머 모르타르의 기계적 특성

정민철 · 정윤중

명지대학교 무기재료공학과  
(1994년 3월 16일 접수)

### Mechanical Properties of Cement Mortar with Polymers

Min-Chul Chung and Yun-Joong Chung

Dept. of Inorganic Materials Engineering Myung-Ji Univ.

(Received March 16, 1994)

#### 요 약

보통시멘트 모르타르에 수용성 고분자 물질인 polyvinyl alcohol(PVA), styrene-butadiene rubber(SBR) 및 ethylene-vinyl acetate copolymer(EVA)를 사용하여 폴리머 보강 그라우트재(polymer reinforced grouts : PRG) 시편을 제조하였다. 이 시편에 대한 물리적 특성과 파괴거동을 연구하였다. PVA, SBR 및 EVA를 각각 1.5 wt% 첨가시 압축강도는 54 MPa, 63 MPa 및 68 MPa, 꺾임강도는 11 MPa, 12.8 MPa 및 13.6 MPa, Young's modulus는 3.8 GPa, 4.4 GPa 및 4.6 GPa, 파괴인성치는  $0.73 \text{ MNm}^{-1/2}$ ,  $0.85 \text{ MNm}^{-1/2}$  및  $0.9 \text{ MNm}^{-1/2}$  정도로 가장 우수하였다. PRG 시편의 강도향상은 큰 기공의 제거, grain bridging, frictional interlocking, polymer bridging과 같은 파괴인성 효과의 향상 때문인 것으로 생각된다.

#### ABSTRACT

A polymer reinforced grouts using ordinary portland cement mortar and water soluble polymer{polyvinyl alcohol(PVA), styrene-butadiene rubber(SBR), ethylene-vinyl acetate copolymer(EVA)} were made. The mechanical properties of the hardened specimens were investigated through the observation of the microstructure and application of fracture mechanics. When the PVA, SBR and EVA was added with 1.5 wt% to the grouts, the compressive strength were about 54 MPa, 63 MPa and 68 MPa respectively, and the flexural strength was about 11 MPa, 12.8 MPa and 13.6 MPa respectively. and Young's modulus was about 3.8 GPa, 4.4 GPa and 4.6 GPa respectively, and critical stress intensity was about  $0.73 \text{ MNm}^{-1/2}$ ,  $0.85 \text{ MNm}^{-1/2}$  and  $0.9 \text{ MNm}^{-1/2}$  respectively. It can be considered that the strength improvement of polymer mortar grouts may be due to the removal of macropores and the increase of various fracture toughness effects, such as grain bridging, frictional interlocking and polymer bridging.

#### 1. 서 론

보통시멘트 모르타르 시편의 강도는 gel 기공과 같은 미세한 기공보다는 수는 적으나 큰 기공에 의해 큰 영향을 받는다. 보통시멘트 모르타르 경화체의 강도를 향상시키기 위해서는 감수제를 통한 W/C(물/시멘트비)를 감소시켜 경화체내의 기공율을 감소시키고, 조직의 치밀화 및 응력집중의 방지를 위하여 수용성 고분자 물질을 사용하여 시멘트와 모래 사이의 충전효과를 높이는 데 있다.

보통시멘트 모르타르로 제조된 시편의 압축강도 및 꺾임강도는 각각 40 MPa 및 7.5 MPa 정도의 값을 갖는다. 이러한 보통시멘트 모르타르 시편의 강도증진은 경화체내에 존재하는 큰 기공 즉, 약  $2 \mu\text{m}$  이상의 기공을 제거하고 기공율을 감소시킴으로써 가능했다<sup>1,2)</sup>. 이러한 혼합재 첨가에 따른 강도증진 효과를<sup>3-5)</sup> 파괴학적 개념을 도입하여 구명하려고 시도되고 있다.

본 연구에서는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 수용성 고분자 물질인 polyvinyl alcohol(PVA), styrene-butadiene rubber(SBR) 및 ethylene-vinyl acetate copoly-

mer(EVA)를 첨가하여 PRG 시멘트 모르타르 경화체 (PRG 시편)를 제조하였다. 이들 시편의 미세구조와 강도의 관계를 구명하기 위하여 파괴거동시 나타나는 grain bridging, frictional interlocking 및 polymer bridging 등의 crack toughening mechanism과 강도와와의 관계를 구체적으로 검토하였다.

## 2. 실험방법

출발원료로 사용한 시멘트와 모래는 보통 포틀랜드 시멘트와 여주산 강모래를 사용하였고, 혼합재로서 사용한 고분자 물질로서는 수용성인 polyvinyl alcohol, styrene-butadiene rubber 및 ethylene-vinyl acetate copolymer를 사용하였다<sup>6-10</sup>. 적은 W/C로 시멘트 모르타르의 유동성을 유지시킬 수 있는 혼합재로서는 naphthalene계 sulfonate인 naphthalene formaldehyde condensate(상품명 : Suparex M)의 감수제를 모르타르에 대하여 1.5 wt% 첨가하였다. 이들 출발원료에 대한 물리적 성질은 Table 1에 나타내었다.

W/C=0.3인 plain 시멘트 모르타르 경화체(plain 시편)은 보통시멘트 모르타르에 감수제만 첨가하여 제조하였고, W/C=0.3인 PRG 시편은 이 plain 시멘트 모르타르에 PVA, SBR 및 EVA를 각각 모르타르에 대하여 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5 wt%씩 첨가하여 제조하였다. 제조된 시편은 3, 7 및 28일간 수중 양생한 후 강도시험을 하였다. 압축강도시험으로는 SIMADZU UH-100A을 이용하여 시험하였고, cross head speed 0.5 mm/min의 조건으로 INSTRON 040 H 2588를 사용하여 3point bending method로서 다음 식들에 의해 꺾임강도(flexural strength :  $\sigma_f$ ) 및 Young's modulus( $E_b$ )을 측정하였다.

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

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

$\sigma_f$  : flexural strength

$E_b$  : Young's modulus

P : load

d : depth

W : width

L : span

y : maximum deflection

그리고 SENB(single edge notched beam)법<sup>11</sup>)으로 다음식에 따라 시편의 파괴인성( $K_{IC}$ )을 측정하였다.

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

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

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

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

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 기공율

28일간 양생시킨 W/C=0.4인 보통시멘트 모르타르 시편과 폴리머가 1.5 wt% 첨가된 W/C=0.3인 PRG 시편에 대해, 수은압입법으로 측정된 기공분포를 Fig. 1에 나타내었다. PRG 시편의 기공이 보통시멘트 모르타르 시편보다 치밀하여 곡선변화가 작은 기공쪽에 위치함을 알 수 있다. 이는 폴리머 첨가에 의해 시멘트 수화물 CSH와의 치밀한 충전성에 의한 것으로 생각된다.

### 3.2. 압축강도, 꺾임강도 및 Young's modulus

폴리머가 1.5 wt% 첨가된 W/C=0.3인 PRG 시편에 대하여 양생기간별로 압축강도 측정된 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Physical Properties of Starting Materials

Starting Materials Test item	Polyvinyl alcohol	Styrene-butadiene rubber	Ethylene-vinyl acetate copolymer
Appearance	white powder	white liquid	white liquid
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.2~1.3	1.03	-
pH	5~7 (4%)	8.0 (25°C)	4.0~6.0
Viscosity (cp)	20~25(4%)	85	250~750
Solded content (%)	-	48	54.5~55.5

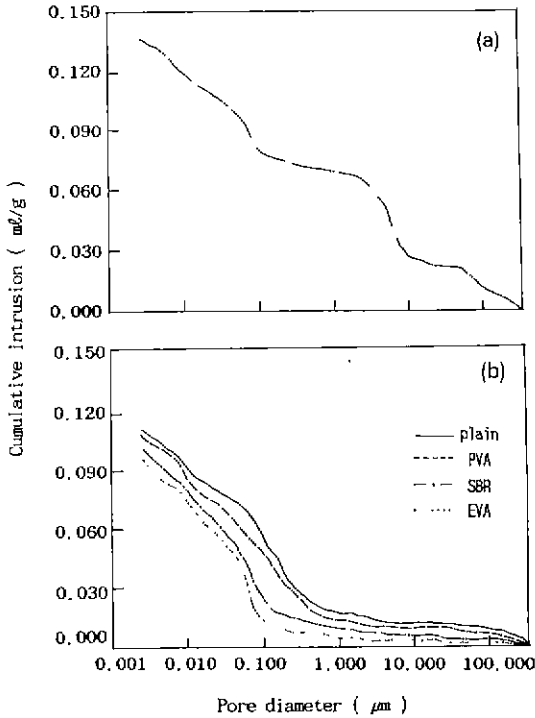


Fig. 1. Pore size distribution of ordinary cement mortar and PRG cement mortars added 1.5 wt% PVA, SBR and EVA, cured for 28 days. (a) ordinary cement mortar (W/C=0.4) (b) PRG cement mortars added 1.5 wt% PVA, SBR and EVA (W/C=0.3)

W/C=0.4인 28일간 양생시킨 보통시멘트 모르타르 시편의 압축강도가 38 MPa 정도인데 반하여 감수제만 첨가된 plain 시편에서는 45 MPa 정도로 약간의 강도 증가를 나타내었다. 또한 28일간 양생한 PRG 시편중에서 PVA를 첨가한 것은 55 MPa 정도의 강도증진을 나타내었고, SBR를 첨가한 것은 63 MPa 정도를 나타내었고, 그리고 EVA를 첨가한 것은 67 MPa 정도로 가장 높은 강도증진을 나타내었다. 이는 감수제와 수용성 고분자 물질 첨가에 의한 윤택작용 및 전단응력이 가해짐에 따라 조직의 치밀화로 큰 기공의 감소와 입자간의 접촉면적이 증가되어 CSH gel의 결합력이 향상되었기 때문인 것으로 생각된다.

폴리머가 1.5 wt% 첨가된 W/C=0.3인 PRG 시편에 대하여 양생기간별로 쪼임강도 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

W/C=0.4인 28일간 양생시킨 보통시멘트 모르타르 시편의 쪼임강도가 7.5 MPa 정도인데 반하여 plain 시

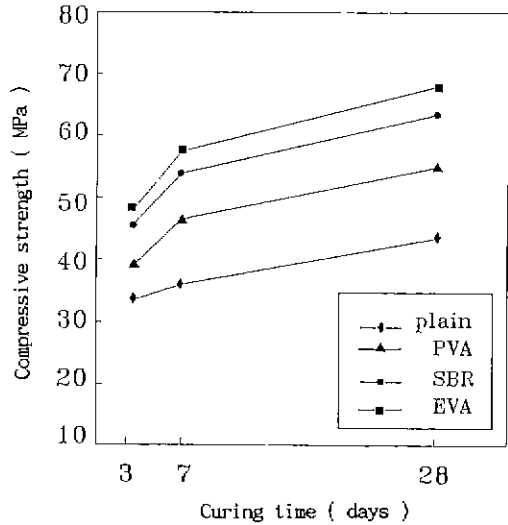


Fig. 2. Compressive strength of PRG cement mortars added to 1.5 wt% PVA, SBR and EVA at various curing time.

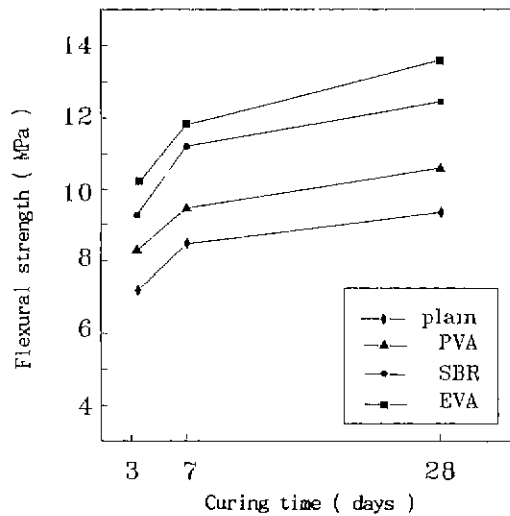


Fig. 3. Flexural strength of PRG cement mortars added 1.5 wt% PVA, SBR and EVA at various curing time.

편에서는 8.6 MPa 정도로 약간의 강도증가를 나타내었다. 또한 28일간 양생한 PRG 중에서 PVA를 첨가한 것이 11.0 MPa 정도의 값을 나타내었고, SBR를 첨가한 것이 12.8 MPa 정도의 값을 나타내으며, EVA를 첨가한 것이 13.3 MPa 정도로 가장 높은 강도값을 나타내었다. 이는 감수제와 수용성 고분자 물질 첨가에 의한 윤택작용 및

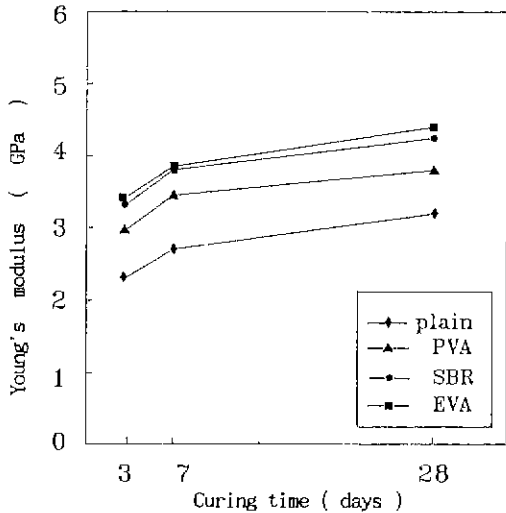


Fig. 4. Young's modulus of PRG cement mortars added 1.5 wt% PVA, SBR and EVA at various curing time.

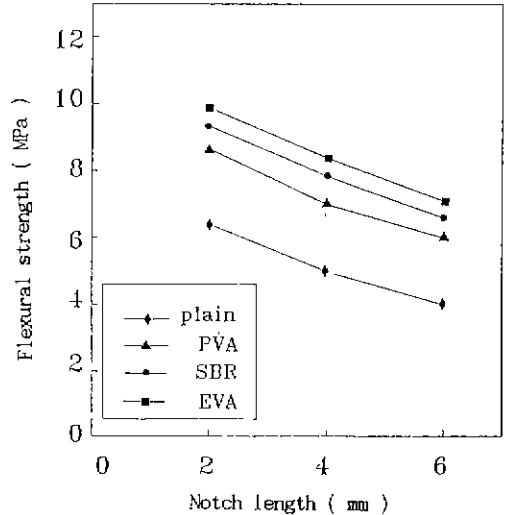


Fig. 5. Flexural strength of PRG cement mortars added 1.5 wt% PVA, SBR and EVA at various notch length, cured for 28 days.

전단응력이 가해짐으로 인한 조직의 치밀화로 큰 기공이 감소되고 입자간의 접촉면적이 증가되어 강도가 증진된 것으로 생각되며, 앞서 설명한 것과 잘 일치한다.

폴리머가 1.5 wt% 첨가된 W/C=0.3인 PRG 시편에 대하여 양생기간별로 Young's modulus 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 28일 양생한 plain 시편의 Young's modulus는 3.2 GPa 정도의 값을 나타내었으며, PVA를 첨가한 것은 3.9 GPa 정도이고, SBR를 첨가한 것은 4.3 GPa 정도였고, EVA를 첨가한 것은 4.5 GPa 정도로 가장 높은 강도값을 나타내었다. 이러한 증가는 matrix 보다 Young's modulus가 큰 물질을 첨가할 때 경화체의 Young's modulus가 증가하는 것<sup>12)</sup>으로 생각된다. 또한 폴리머가 1.5 wt% 첨가된 notch 길이 변화에 따른 꺾임강도를 Fig. 5에 나타내었다. W/C=0.3인 시편에 대하여 28일간 양생한 경우, plain 시편은 6.4~4.2 MPa 정도의 값을 나타내며, PVA 첨가시 8.5~5.7 MPa 정도를 나타내었고, SBR 첨가시 9.5~6.0 MPa 정도였고, 그리고 EVA 첨가시 12.0~6.2 MPa 정도의 가장 높은 값을 나타내었다. 이와같은 증진은 앞서 꺾임강도에서 나타난 감수제와 수용성 고분자 물질의 첨가에 의한 조직의 치밀화 및 입자간의 접촉면적의 증가에 의한 것으로 생각된다.

### 3.3. 파괴인성 측정 및 미세구조 관찰

SENB(single edge notched beam)법으로 측정된 파괴인성치( $K_{IC}$ )는 Fig. 6에 나타냈으며, 28일간 양생한 경우에 있어서 plain 시편은  $0.6 \text{ MNm}^{-1.5}$ 인데 반하여, PVA를 0.5, 1.0 및 1.5 wt% 첨가한 파괴인성치는  $0.68 \sim 0.78 \text{ MNm}^{-1.5}$  정도이고, SBR을 0.5, 1.0 및 1.5 wt% 첨가한 파괴인성치는  $0.75 \sim 0.85 \text{ MNm}^{-1.5}$  정도였고, 그리고 EVA를 0.5, 1.0 및 1.5 wt% 첨가한 파괴인성치는  $0.79 \sim 0.9 \text{ MNm}^{-1.5}$  정도로 가장 높은 값을 나타내었다.

$K_{IC}$ 값은 경화체내의 각 물질 사이의 결합력에 크게 영향을 받는다. 즉  $K_{IC}$ 값의 증가는 미수화 시멘트와 수화시멘트 gel 사이의 결합력 뿐만 아니라 시멘트 입자와 고분자물질, 시멘트 모르타르와 고분자물질 사이의 결합력 때문에 파괴시 작용하는 균열전파 방해작용에 의해 결정된다<sup>13)</sup>. 이와같은 균열전파 방해상태를 주사전자현미경으로 관찰하였다.

보통시멘트 모르타르 시편과 감수제만 첨가된 plain 시편의 파단면에 대한 주사전자현미경 사진을 Fig. 7에 나타내었다. (a)는 W/C=0.4인 보통시멘트 모르타르 경화체의 파단면에 대한 주사전자현미경 사진이고 (b)는 W/C=0.3인 plain 시편의 파단면에 대한 주사전자현미경 사진이다. (a)에서는 약  $2 \mu\text{m}$ 의 큰 기공을 관찰할 수 있었으며 (b)에서는 약  $0.4 \mu\text{m}$  이하의 기공이 존재함을 관찰할 수 있었다.

또한, W/C=0.4인 보통시멘트 모르타르 시편의 압축

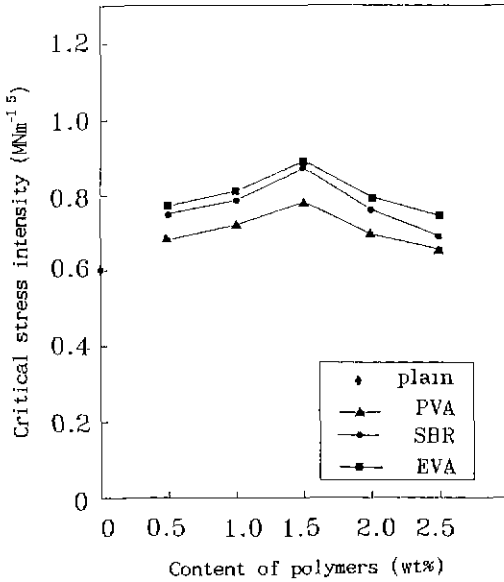


Fig. 6. Critical stress intensity ( $K_{IC}$ ) of PRG cement mortars with content of PVA, SBR and EVA, cured for 28 days.

강도 및 쪼임강도가 38 MPa 및 7.5 MPa 정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있지만 W/C=0.3인 plain 시편의 압축강도 및 쪼임강도는 45 MPa 및 8.6 MPa 정도인데, 이와같이 상승된 값을 갖는 원인은 주로 기공크기의 감소 때문이다. 또한 이 plain 시편에 폴리머로 보강함에 따라 강도가 증가함을 알 수 있었다.

28일간 양생한 W/C=0.3인 PRG 시편의 파괴기구중 입자가교(gram bridging)를 모식도와 함께 나타낸 주사 전자현미경 사진을 Fig. 8에 나타내었다. 시멘트 모르타르 경화체가 파괴될 때 균열은 CSH(calcium silicate hydrate) gel의 결합을 끊고 진행하며 모세관 기공을 통해 전파된다. 따라서 W/C=0.3인 PRG 시편의 파괴인성( $K_{IC}$ ) 값은 수용성 고분자 물질 첨가에 의한 윤활작용과 전단응력이 가해짐에 따른 조직의 치밀화로 모세관 기공의 감소와 입자간의 접촉면적이 증가되어 CSH gel의 결합력이 향상되었기 때문인 것으로 생각되며, (a)와 (b)에서와 같이 입자주위를 균열이 전파되어가는 gram bridging<sup>14)</sup>의 형태를 보여주고 있다.

Grain bridging 부분에서의 입자간의 frictional interlocking<sup>14)</sup>을 Fig. 9에 나타내었다. 이것은 두 입자간의 물리적 접촉에 의해 생성된 마찰력에 의해 균열을 발생시키기 위해 가해진 에너지를 일부 흡수하여 균열전파를 방해한다. 또한 frictional interlocking이 발생되는

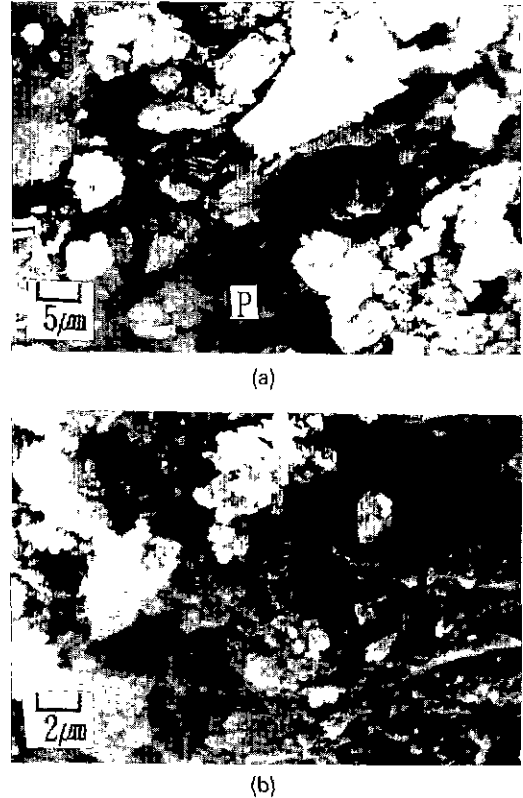
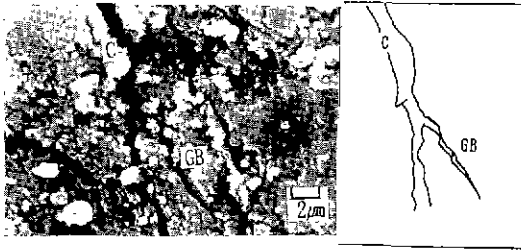


Fig. 7. Scanning electron micrographs of fracture surface of hardened cement mortar, cured for 28 days (\*P: pore).  
(a) ordinary cement mortar (W/C=0.4)  
(b) plain cement mortar (W/C=0.3)

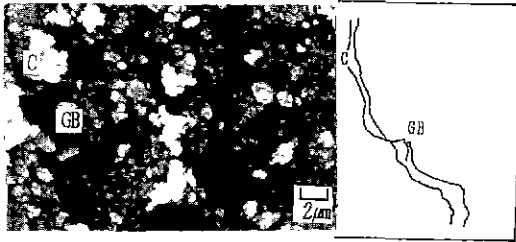
곳에 위치하고 있는 입자에서는 제 2차 미세균열(secondary crack)이 발생하는 경우가 많다. 이것은 1차 균열(primary crack)의 응력집중이 분산되어 경화체의 파괴인성을 증가시키는 요인중의 하나라고 생각된다.

Polymer bridging 효과를 Fig. 10에 나타내었다. Eden과 Baily의 보고<sup>15)</sup>에 의하면 수용성 고분자 물질은 건조후 자체적으로 상당한 강도를 지닌다. 즉 고분자 물질이 미수화 물질들과 결합하여 CSH-polymer-CSH의 결합을 이루어 미수화 입자주위의 CSH gel 주위를 지나는 균열전파를 고분자 물질이 방해하여 파괴인성을 증가시킨다. 그 이유는 CSH-polymer-CSH 중의 고분자 물질이 점탄성을 갖으며 균열을 발생시키는데 가해진 에너지를 흡수하여 파괴인성을 증가시키는 것으로 생각된다.

### 3.4. 염화물에 대한 저항성

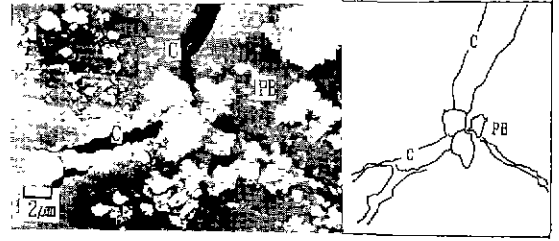


(a)

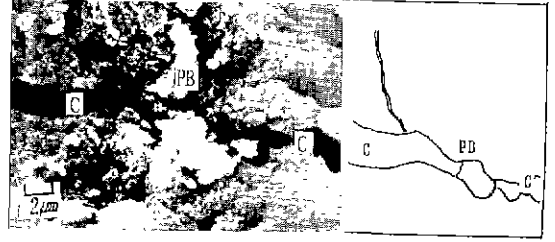


(b)

Fig. 8. Scanning electron micrographs of schematic illustrations of PRG cement mortars, showing examples of grain bridging (W/C=0.3), cured for 28 days (\*C: crack, GB: grain bridging).

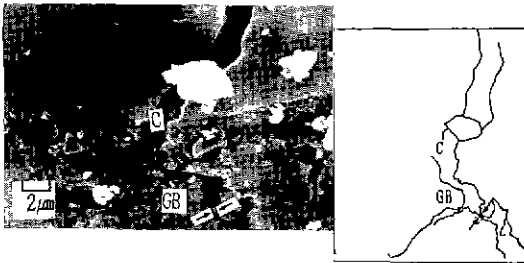


(a)

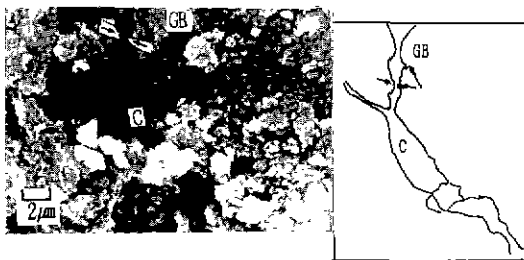


(b)

Fig. 10. Scanning electron micrographs of schematic illustrations of PRG cement mortars, showing examples of polymer bridging (W/C=0.3), cured for 28 days (\*C: crack, PB: polymer bridging).



(a)



(b)

Fig. 9. Scanning electron micrographs of schematic illustrations of PRG cement mortars, showing examples of frictional interlocking at grain bridging site (W/C=0.3), cured for 28 days (\*C: crack, GB: grain bridging, †: frictional interlocking).

28일간 양생한 W/C=0.3인 plain 시편과 수용성 고분자 물질 PVA, SBR 및 EVA를 각각 1.5 wt% 첨가한 W/C=0.3인 PRG 시편에 대한 염화물 침투 깊이 및 시편의 질량변화에 대한 것을 Fig. 11, 12에 나타내었다. 폴리머 첨가에 따른 PRG 시편의 염화물에 대한 저항성<sup>10)</sup> 및 시편의 질량 변화율이 plain 시편과 비교하여 우수하게 나타났다. 그 이유는 고분자 물질중에 함유된 계면활성제 분산작용과 전단응력이 가해짐에 따른 조직의 치밀화로 염화물에 대한 저항성이 우수하게 나타나고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 보통시멘트 모르타르 경화체의 낮은 압축강도 및 휨임강도를 향상시키기 위해 보통시멘트 모르타르에 감수제를 첨가하고, 시멘트 모르타르 경화체의 결함으로 작용하는 기공율 및 기공의 크기를 줄이기 위해 W/C(물/시멘트비)를 0.3으로 하고 폴리머를 첨가하여 PRG 시편을 제조하였다. 그리고, 이들의 물리적 특성 검토와 파괴역학적으로 파괴메카니즘을 통한 결론은 다음과 같다.

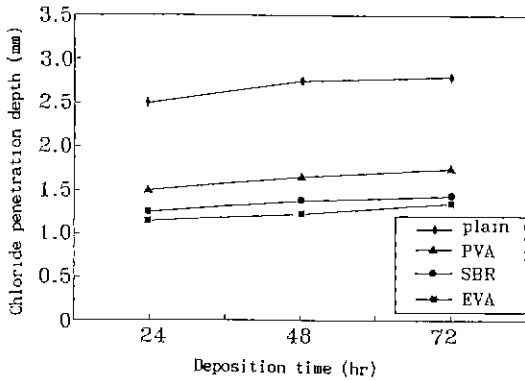


Fig. 11. Chloride penetration depth of plain cement mortar and PRG cement mortars added 1.5 wt% PVA, SBR and EVA, cured for 28 days.

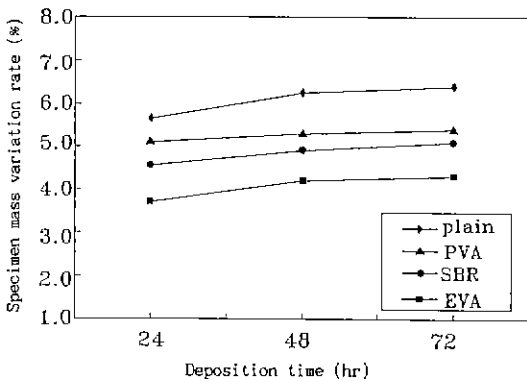


Fig. 12. Specimen mass variation rate of plain cement mortar and PRG cement mortars added 1.5 wt% PVA, SBR and EVA, cured for 28 days.

1. 압축강도 및 쪼임강도는 폴리머를 첨가하지 않은 plain 시편의 경우 45 MPa 및 8.6 MPa 정도이었으나 폴리머 1.5 wt% 첨가시 가장 우수한 값을 나타낸 EVA의 압축강도 및 쪼임강도는 67 MPa 및 13.3 MPa 정도로 가장 큰 향상을 보였다. Young's modulus는 plain 시편의 경우 3.2 GPa 정도이었고, EVA를 1.5 wt% 첨가하였을 때 4.5 GPa 정도로 가장 큰 향상을 나타내었다.

2. Notch 길이 변화에 따른 28일간 양생시킨 plain 시편과 PRG 시편의 쪼임강도는 notch 길이가 길어질 수록 쪼임강도가 떨어지는데, plain 시편은 notch의 길이가 2, 4, 6 mm일 경우 쪼임강도가 6.4~4.2 MPa이었고, EVA를 1.5 wt% 첨가시 PRG 시편은 notch 길이가 2, 4, 6 mm일 경우 12.0~6.2 MPa 정도로 가장 우수한 값을 나타내었다.

3. 파괴인성( $K_{IC}$ )은 28일간 양생시킨 PRG 시편중 EVA를 1.5 wt% 첨가시  $0.9 \text{ MNm}^{-1/2}$ 로 가장 큰 증가값을 나타내었다. 이것은 균열전파 방해효과인 frictional interlocking 및 polymer bridging과 기공크기의 감소 그리고 입자간의 결합증가 때문인 것으로 판단된다.

4. 첨가되는 수용성 고분자 물질인 폴리머의 양은 EVA 1.5 wt%일 때가 우수한 특성을 나타내었고, 염화물에 대한 저항성도 우수하였다.

REFERENCES

1. J.D. Birchall, A.J. Howard and K. Kendall, "Flexural Strength and Porosity of Cement," *Nature*, **298**, 388-390 (1981).
2. K. Kendall, A.J. Howard and J.D. Birchall, "The relation between porosity, microstructure and strength, and the approach to advanced cement-based materials," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **310**, 139-153 (1983).
3. 김정환, 최상훈, 한기성, "고강도 시멘트의 특성에 미치는 미세구조의 영향(II)," *한국요업학회지*, **27**(8), 1034-1042 (1990).
4. M. Moukwa, D. Youn, M. Hassanali, "Effects of Degree of Polymerization of Water Soluble Polymers on Concrete Properties," *Cem. Conc. Res.*, **23**, 122-130 (1993).
5. O.Z. Tyler, R.S. Drake, "Superior Strength Properties with Polymer-Modified Portland Cements," *Adhesives Age*, **9**, 30-39 (1961).
6. 河野俊夫, "ポリマー-セメントモルタルおよびコンクリートの特性," *コンクリートジャーナル*, **11**(4), 4, 18-26 (1973).
7. 大浜嘉彦, 伊部博, "市販の各種セメント配合用ポリマーを混入したセメントモルタルの性質比較," *小野田研究報告*, **15**, 4, 58, P. 242-258 (1963).
8. 小谷田秀雄, 後藤誠史, 木村脩七, "PVA-セメント硬貨體の機械的性質に及ぼす湿度の影響," *セメント技術年報* **39**, 396-399 (1985).
9. Jacob M. Geist, Servo V. Amagna and Brian B. Mellor, "Improved Portland Cement Mortars with Polyvinyl Acetate Emulsions," *Industrial and Engineering Chemistry*, **45**(4), 759-767 (1953).
10. 大濱嘉彦, 能登谷恭一, 森脇貴志, "カチオン界面活性剤を含むスチレンブクジエンゴムラテックスを用いたポリマー-セメントモルタルの性能比較," *セメント技術年報* **39**, 400-403 (1985).
11. H. Osmani, D. Rouby, G. Fantozzi, "Toughness, Microstructure and Interface Characteristics for Ceramic-Ceramic Composites," *Composite Science and Technology*, **37**, 191-201 (1990).

12. 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).
13. N. McN. Alford, G.W. Groves and D.D. Couble, "Physical Properties of High Strength Cement Pastes," *Cem. Conc. Res.*, **12**, 349-358 (1982).
14. 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).
15. 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).
16. 複合材料研究委員會, "ポリマ-セメントモ ルタル 試験方法規準(案)(その 2)," *コンクリ-ト工學*, **25**(8), 4-14 (1987).