

고강도 시멘트 경화체의 특성에 미치는 미세골재 및 혼화재료의 영향

Effect of Micro-aggregate and Admixtures on the Properties of High Strength Hardened Cement Paste

김정환*

Kim, Jung Hwan

요 약

보통 포틀랜드 시멘트와 수용성 고분자 물질인 hydroxy propyl methyl cellulose(HPMC), 미세골재 및 혼화재료를 사용하여 W/C=0.1이 되도록 물을 첨가하고 twin roll mill로 혼합 성형한 후 60일간 양생하여 고강도 시멘트 경화체를 제조하였다. 이 경화체에 대한 휨강도 및 파괴인성을 검토하였다.

SiC 분말 및 백색시멘트를 첨가한 경우 휨강도는 약 100MPa정도, 탄성계수는 80-95GPa의 값을 나타내었다. 실리카흄을 첨가한 경우 휨강도는 80MPa, 탄성계수는 60GPa의 값을 나타내었다.

Abstract

An investigation for the development of high strength hardened cement paste using ordinary portland cement, hydroxy propyl methyl cellulose(HPMC) with micro-aggregate and admixtures was carried out. The cement paste was mixed with water-cement ratio of 0.1 by twin roll mill and cured 60 days in humidity chamber.

When the SiC powder or white cement was added to the paste, the flexural strength was 100MPa and the Young's modulus was 80-95GPa. When the silicafume was added, the flexural strength was 80MPa and the Young's modulus was 60GPa.

Keywords : MDF cement, high strength cement, silicafume, microaggregate, white cement, SiC powder, admixtures, low water-cement ratio

* 정회원, 한일시멘트 대천연구소 시멘트연구실

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 1995년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

현재 토목, 건축 분야에서 구조용 재료로서 가장 널리 사용되고 있는 포틀랜드 시멘트는 압축강도는 우수하나, 인장 및 휨강도가 낮아 철근과 같은 보강재로 없이는 사용분야가 극히 제한되어 있는 실정이다. 또한 최근의 시멘트 콘크리트 분야에서 포틀랜드 시멘트의 압축강도 역시 점점 고강도화를 요구하는 추세에 있다.

일반적으로 시멘트 경화체의 강도 증진 및 물성 향상을 위해서는 조석을 치밀화시키는 방법, 즉 기공율을 감소시키는 방법이 주로 사용되어 왔다. 최근까지 이러한 조석의 치밀화를 위하여 물-시멘트 비를 감소시키면서 고성능감수제 등을 이용하여 작업성을 확보하는 보편적인 방법과 미세한 실리카질 분말을 혼화재료 혹은 충전제로서 공극 내에 충전시키거나¹⁾, 시멘트 수화시 생성되는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 포졸란 반응을 일으켜 결정성이 낮고 비표면적이 큰 CSH 겔 수화물을 형성하여 조석을 치밀화시키는 방법²⁾, 혹은 강도 및 탄성계수가 크고 입자가 미세한 분말을 미세알제로 첨가하는 방법이 사용되어 왔다.³⁾

한편, 1980년에 Birchall 등⁴⁾은 시멘트 경화체 강도는 기공율과 관계가 있는 것이 아니라, 경화체 내에 존재하는 $100\mu\text{m}$ 이상의 큰 기공이 Griffith 결함으로 작용해, 이러한 큰 기공을 제거하면 시멘트 경화체의 강도 특히, 휨강도를 크게 증진시킬 수 있다는 MDF(Macro-Defect Free)시멘트를 개발하였다. 이러한 MDF 시멘트의 개발로 시멘트는 일반적인 토목, 건축용 구조재료로서의 개념에서 탈피하여, 특수 용도로의 응용이 가능하게 되었으며, 이를 MDF 시멘트 경화체에 대해서는 그동안 많은 연구가 진행되어 왔다.^{5,6)}

본 연구에서는 이러한 MDF 시멘트 경화체에 대한 연속적인 연구^{7,8)}의 일환으로, 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하여 MDF 시멘트 경화체를 제조시 혼화재료 및 미세알제를 첨가하여 이들이 시멘트 경화체의 특성, 특히 휨강도 및 파괴인성 등에 미치는 영향을 검토하였다. 먼저 시멘트 혹은 시멘트 수화물과 반응성이 없고 강도 및 탄성계수가 큰 SiC 미세분말을 미세알제로 사용하였고, 포

졸란 반응성이 있는 조미립의 실리카흙과 일반적으로 보통 포틀랜드 시멘트 보다 분말도가 높고 C_3S 성분이 많은 백색시멘트를 혼화재료로 사용하여 연구를 진행하였다. 또한 MDF 고강도 시멘트 경화체와 비교하기 위하여 물-시멘트 비를 0.4로 하여 제작한 일반 시멘트 경화체와 비교시험도 병행하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 제조

MDF 고강도 시멘트 경화체 시편은 Birchall 등⁴⁾의 MDF 시멘트 제조 공정과 동일한 방법으로 제작하였다. 즉 보통 포틀랜드 시멘트에 수용성 고분자 물질 hydroxy propyl methyl cellulose의 비중이 1.21인 나프탈렌계 고성능감수제를 각각 시멘트에 대해 무게비로 3%씩 첨가 하였다. 이를 사용재료에 대한 화학성분 및 물리성능을 표 1.에 나타내었다. 여기에 미세알제인 SiC 분말, 포졸란 물질인 실리카흙, 백색시멘트를 각각 10%씩 시멘트에 대해 무게비로 치환 첨가한 후, 물-시멘트 비가 0.1이 되도록 물을 첨가하여 혼합하였다. 이것을 twin roll mill로 전단력을 가하여 혼합 성형한 후, 아크릴판으로 압력을 가하여 두께 2mm 정도의 판상 경화체를 제조하였다. 이들 시편을 습윤함에서 3, 7, 14, 28 및 장기강도를 위해 60일간 양생한 후 60℃로 7일간 건조하였다. 또한 비교실험을 위한 일반 시멘트 경화체는 물-시멘트 비가 0.4가 되도록 물을 첨가한 후 볼트에 주입 성형하였다. 이것을 습윤함에서 24시간 양생 후 탈형하여 25℃ 수중에서 3, 7, 14, 28, 60일간 양생하였다. 사용한 SiC 순수 분말은 평균 입경이 $12\mu\text{m}$ 인 미세분말로서 탄성계수가 약 420GPa 정도인 제품(상품명 : 아란담)을 사용하였으며 표 2.에 사용한 실리카흙 및 백색시멘트에 대한 화학, 물리성능을, 그림 1., 2.에 각각 재료의 입자 크기를 관찰한 주사전자현미경 사진 및 그림 2.에 입도분석 결과를 나타내었다.

2.2 측정 방법

2.2.1 휘강도 및 탄성계수 측정

제조된 시편의 휘강도(σ_{11})는 KSL 1591(고성능 요업제품의 시험방법)에 의한 3점 굽힘 시험법(Three point bending method)으로 다음식에 따라 구하였다.

$$\sigma_{11} = \frac{3PL}{2d^2W}$$

여기서 σ_{11} 은 휘강도, d는 시편의 높이(depth), P는 하중 W는 시편의 폭(width) 그리고 L은 지지 간 거리이다.

휘강도와 탄성계수의 측정에는 Instron 4302를 사용하였다. cross head speed는 0.05mm/min으로 하였고 두 지지대간 거리는 40mm로 하였으며 시편의 크기는 길이 100mm, 높이 10mm, 폭 2mm로 하여 측정하였다. 또한 탄성계수(E_b)는 KSL 1594(고성능 요업제품의 탄성율 측정방법)에 따

Table 1 Chemical composition and physical properties of materials

a) Ordinary portland cement (wt.%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Free CaO	Ig. loss
21.39	5.85	3.25	62.39	2.72	2.06	0.78	0.56

Blaine(m ² /g)	Fineness		Compressive strength(kg/cm ²)		
	80um(%)	4um(%)	3days	7days	28days
210	98	5.9	21	32	32

b) Hydroxy propyl methyl cellulose(HPMC)

Hydrxypropyl content	Methyl content	Average Mn	Viscosity (25% solution)
10%	30%	86000	4000 cp.

Table 2 Chemical composition and physical properties of materials

a) Silica fume (wt.%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	Ig. loss	BET(m ² /kg)
92.0	1.5	1.2	0.6	0.1	0.3	0.2	4.1	20,000

b) White Cement (wt.%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	NaO	SO ₃	Free CaO	Ig. loss	Blaine(m ² /g)
22.40	1.53	0.31	64.97	0.77	2.60	1.59	3.75	380

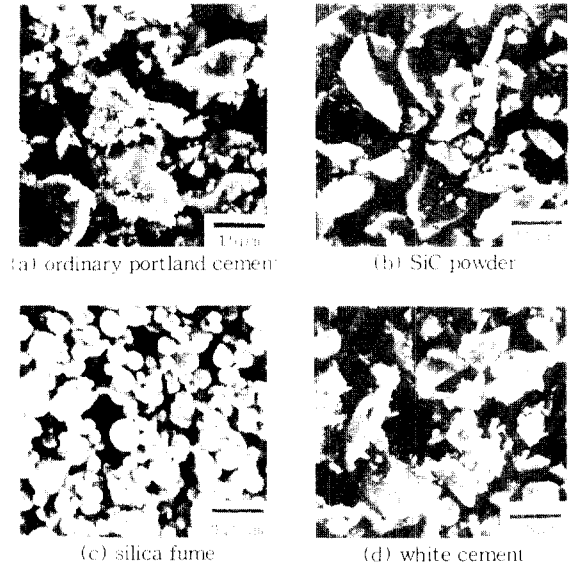


Fig. 1 Scanning electron micrographs of materials

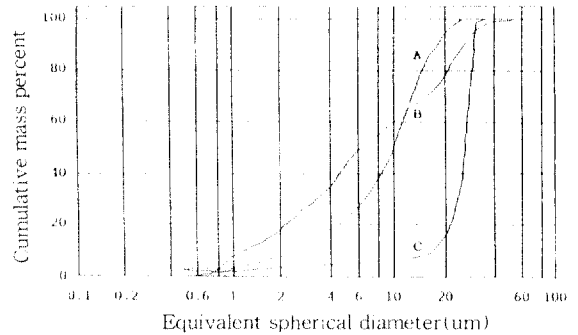


Fig. 2 Particle size distribution of materials

라 다음식으로 계산하였다.

$$E_b = \frac{PL^3}{4Wd^3y}$$

여기서 E_b 는 탄성계수이며 d는 시편의 높이, P는 하중, W는 시편의 폭, L은 지지거리, y는 비틀림이다.

2.2.2 파괴인성(K_{IC})의 측정

파괴인성(K_{IC}) 값은 KSL 1591에 의한 시편으로 SENB(Single edge method beam)법에 따라 그림 3과 같은 시편을 사용하여 다음의 Brown 공식으로부터 계산하였다.¹³⁾

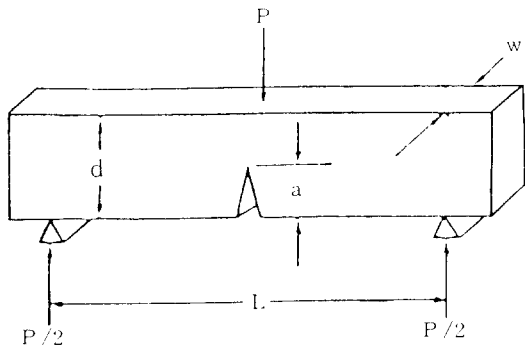


Fig. 3 The single edge notched beam specimen

$$K_{IC} = Y\sigma_{II}a^{1/2} (\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$$

$$\sigma_{II} = \frac{3PL}{2d^2W}$$

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

여기서 a는 notch의 길이이며, Y는 a/w 및 하중 방식에 의존하는 상수이다. 또한 L/d=4, a/d=0.5가 되도록 하였다. 이 방법은 굽힘시험 방식이 사용된다는 점에서 세라믹스의 적용이 용이하고 또한 고온이나 각종 분위기중에서의 측정에도 사용하기 쉬운 잇점이 있다.¹¹⁾

2.2.3 균열발생 및 미세구조 관찰

강도 및 파괴인성에 대하여 미세구조를 관찰하기 위하여 그림 4와 같이 double cantilever beam시편을 사용하여 인위적으로 균열을 발생시켰으며 균열성장시 일어나는 균열성장방해기구를 주사 전자현미경으로 관찰하였다. 일반적으로 균열성장역제기구는 균열선단에서 판단하는 것이 마땅하나, 측정에 많은 어려움이 있어 본 연구에서는 균열이 성장한 균열선단 후면을 관찰하여 균열성장역제기구를 관찰하였다.^(15,16)

2.2.4 기공률 측정

기공률은 수은압입법을 사용하여 측정하였다. 사용기기는 Micromeritics사의 AutoPore II 9220형으로 수은의 최대압입압력은 413.64MPa이고 기공의 측정 범위는 0.002-1,000μm이다.

2.2.5 주사 전자현미경 관찰

시멘트 강화체의 균열 성장 과정을 관찰하기 위

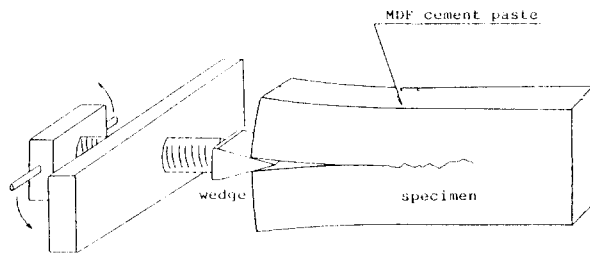


Fig. 4 Schematic diagram of double cantilever beam specimen for the crack growth

해 과단면을 IB-2 ion coater내에서 금으로 코팅한 후 Hitachi 사의 X-650 주사 전자현미경으로 가속전압 25KV, 배율 500-15,000으로 하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 휨강도 및 탄성계수

시멘트 강화체의 강도 및 탄성계수에 미치는 미세골재 및 혼화재료의 영향을 규명하기 위하여 SiC 분말, 실리카흙 및 백색시멘트를 시멘트에 대하여 무게비로 각각 10% 씩 치환 첨가한 시료에 대한 양생기간별 휨강도 측정 결과를 그림 5에 나타내었다. (a)는 미세골재 및 혼화재료를 첨가하지 않은 시편에 대한 측정결과이며, (b), (c), (d)는 각각 SiC 분말, 실리카흙 및 백색시멘트를 10% 치환 첨가한 시편에 대한 휨강도 측정결과이

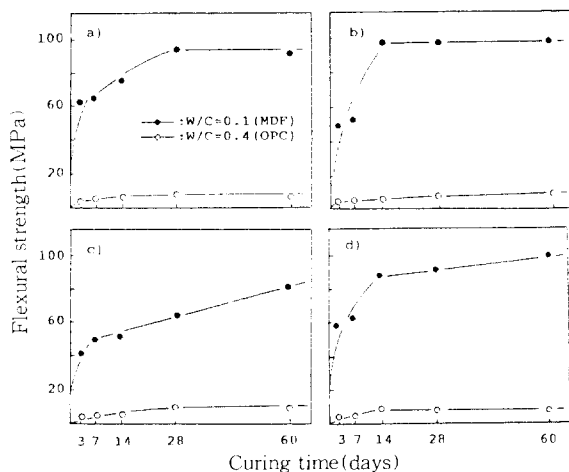


Fig. 5 Flexural strength of hardened cement paste added micro-aggregate and admixtures with various curing time

다. 먼저 $W/C=0.4$ 인 일반 시멘트 경화체는 첨가제의 종류에 관계없이 60일 양생시 약 10MPa 정도의 값을 나타내었으나, $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체는 첨가제가 없는 경우(a), 60일 양생시 약 96MPa, SiC 분말 첨가시 약 100MPa, 실리카흙 첨가시 80MPa, 백색시멘트를 첨가시에는 약 100MPa 정도의 값을 나타내었다.

그림 6은 혼화재료를 첨가하지 않은 시편과 미세골재 및 혼화재료를 각각 10% 씩 치환첨가한 시편에 대한 양생기간별 탄성계수 측정결과를 나타낸 것이다.(b)의 SiC 분말을 첨가한 시편의 경우, $W/C=0.4$ 인 일반 시멘트 경화체는 60일 양

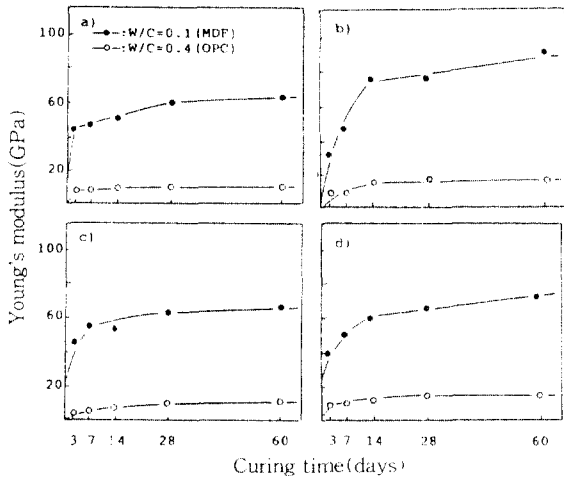


Fig. 6 Young's modulus of hardened cement paste added micro-aggregate and admixtures with various curing time

생시 SiC 분말을 첨가하지 않은 $W/C=0.4$ 인 일반 시멘트 경화체의 10GPa 보다 높은 18GPa 정도의 값을 나타내었다. 특히 $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체에서는 60일 양생시 95GPa 정도로 SiC 분말을 첨가하지 않은 고강도 시멘트 경화체의 60GPa 보다 아주 우수한 특성을 나타내었다. 이것은 탄성계수가 420GPa 정도인 미분말 SiC 입자가 미세골재로 첨가되어 mixture rule⁽¹⁷⁾에 따라 높은 탄성계수를 나타낸 것으로 생각된다.(c)의 실리카흙을 첨가한 경우, $W/C=0.4$ 인 일반 시멘트 경화체에 실리카흙을 첨가하여 60일 양생하였을때에도 실리카흙을 첨가하지 않은 시멘트 경화체의 탄성계수인 10GPa과 동일한 값을 나타내었으며, $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체에 실리카흙을 첨가하였을 때는 휘강도 측정결과와 비슷한 경향을 나타내었다. 이와같이 실리카흙을 첨가하였을 때 탄성계수가 실리카흙을 첨가하지 않은 $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체와 동일한 값을 나타낸 것은 평균입경이 0.1 μ m 정도의 초미립인 실리카흙의 충전효과와 양생기간이 경과함에 따라 포졸란 반응에 의한 조직의 치밀화로 기공율이 감소하게 되어 그림 5.의 휘강도 측정결과에서 알 수 있듯이 휘강도의 하락에도 불구하고 실리카흙을 첨가하지 않은 시멘트 경화체와 유사한 값을 나타낸 것으로 생각된다. 한편 Birchall⁽¹⁸⁾은 시멘트 경화체를 제작할 때 물-시멘트 비가 작으면 수분이 시멘트 경화체에 골고루 분산되지

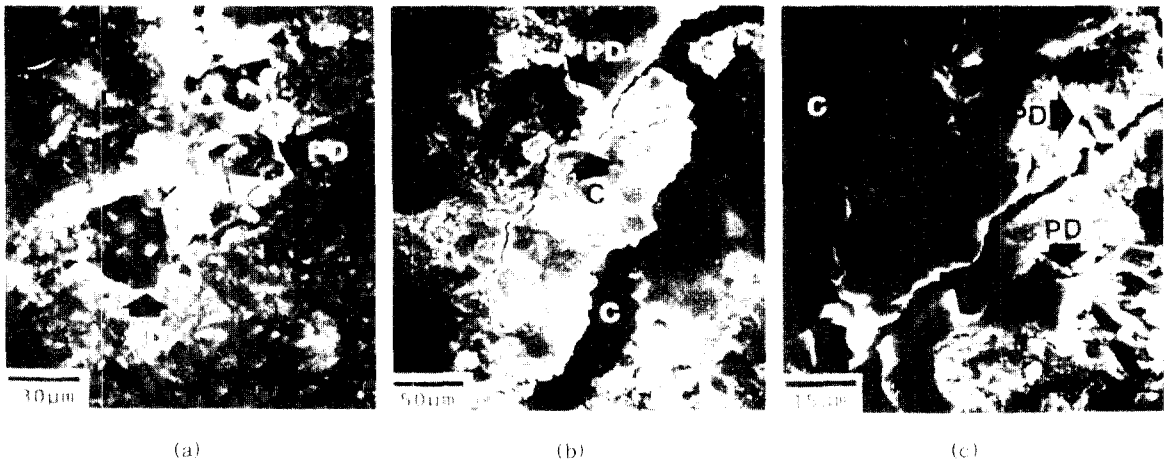


Fig. 7 Scanning electron micrographs of MDF cement paste added silica fume, showing examples of packing defect. ($W/C=0.1$, cured for 60 days) C : Crack PD : Packing defect

못하여 부분적으로 수화가 진행되지 못하는 충전 결함(packaging defect)이 발생할 수가 있다고 하였다. 더우기 실리카흙과 같이 극히 미세한 입자가 첨가되면 실리카흙의 수분 흡수에 의한 충전결함이 발생할 수가 있다. 그림 7.에 이러한 충전결함을 나타내었다. 충전결함은 결국 Birchall이 제시한Griffith 결함(혹은 macro defect)로 작용하여 휨강도 하락의 주원인으로 작용하게 되어 실리카흙을 첨가한 경우 휨강도가 하락한 것으로 판단되며, 결국 시멘트 수화에 필요한 이론적인 물-시멘트 비 0.25보다 수분이 작은 경우 실리카흙과 같은 혼화재료는 사용에 주의할 필요가 있을 것으로 판단된다. 백색시멘트를 혼화재료로 첨가한 시편의 탄성계수는 $W/C=0.4$ 인 경우, 60일 양생했을 때 약 15GPa, $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체 시편은 70-80GPa의 값을 얻었다. 이것은 앞서의 Blaine 값에서도 알 수 있듯이 백색시멘트의 입도가 사용한 보통 포틀랜드 시멘트의 입도보다 미세하여 충전작용에 의한 기공을 감소에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 일반적으로 백색시멘트는 Fe 성분을 제거한 원료를 사용하기 때문에 포틀랜드 시멘트가 4대 성분인 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF 중 C_4AF 성분이 거의 없으며, C_3A 성분이 일반 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 약 3-4%, C_3S 는 5-10%정도 많은 것으로 알려져 있다. 또한 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하여 MDF 시멘트 경화체를 제작하면 물-시멘트 비가 적고, 습윤양생을 시킴으로 인해 60일 양생시켜도 약 30% 정도만 수화가 진행되고 70%는 미수화 시멘트로 남아 있게 된다.⁽¹⁰⁾ 더우기 일반적으로 C_3A 성분의 급격한 수화에 비해 수화가 느린 C_3S 가 많은 경우 미수화 시멘트량은 더욱 늘게 된다. 따라서 백색시멘트를 치환 첨가하면, 수화결 보다 탄성계수가 약 3GPa 정도 큰⁽¹⁹⁾ 미수화 시멘트양이 증가하게 되고, mixture rull⁽¹⁷⁾에 의해 경화체 전체의 탄성계수 역시 증가한 것으로 판단된다.

3.2 파괴인성(K_{IC}) 및 미세구조

미세골재로 SiC분말을 첨가할 때 $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체의 파괴인성 값은 1.

19MPa·m^{1/2} 로서 첨가하지 않은 고강도 시멘트 경화체의 1.28MPa·m^{1/2}⁽⁶⁾보다 오히려 낮은 값을 나타내었다. 이것은 SiC 분말의 첨가로 Fig. 8과 같은 SiC 입자의 입자 가교 혹은 입자간의 마찰 맞물림에 의한 균열성장 방해요인의 증가 현상이 나타나나, SiC 분말의 치환 첨가량만큼 결함에 관여하는 시멘트량이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

실리카흙을 혼화재료로 첨가한 $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체의 파괴인성 값은 1.15MPa·m^{1/2} 정도로서 실리카흙을 첨가하지 않았을 때보다 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 SiC 분말을 첨가하였을 때와 마찬가지로 실리카흙의 치환 첨가량 만큼 결함에 관여하는 시멘트량의 감소에 기인한 것으로 판단된다. 또한 실리카흙과 같이 극히 미세한 입자의 첨가로 인해

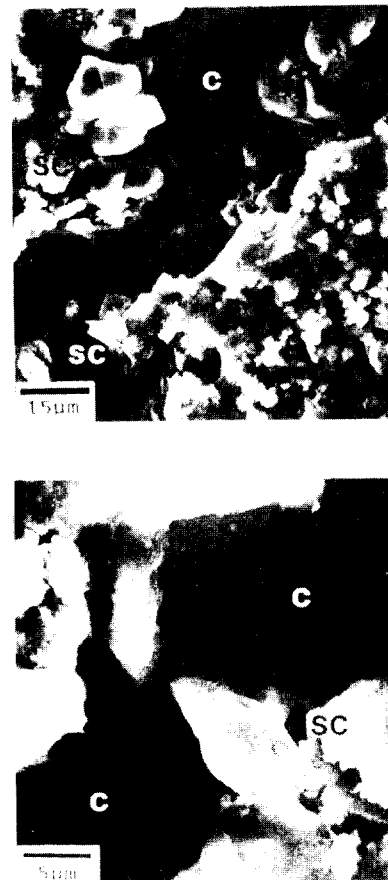


Fig. 8 Scanning electron micrographs of MDF cement paste, showing examples of SiC grain bridging. ($W/C=0.1$, cured for 60 days)
SC : SiC grain

수분 부족에 의한 충전결합이 발생하고 결국 이러한 충전결합이 휘강도 및 파괴인성 저하에 큰 영향을 미친 것으로 생각된다. 그림 7.의(b),(c)에 이러한 충전결합을 통해서 균열이 성장한 것을 나타내었다.

백색시멘트를 혼화재료로 첨가한 $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체의 파괴인성 값은 $1.20\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 정도로서 백색시멘트를 첨가하지 않았을 때보다 약간 감소하였으나 거의 유사한 값을 나타내었다.

3.3 고찰

MDF 고강도 시멘트 경화체의 강도에 관한 Birchall의 식에서 Birchall은 경화체의 강도는 기공율과 결합크기(큰 기공, macropore)에 의해서 좌우되며, 탄성계수와 파괴 에너지는 고정된 값으로 생각하였다. 그러나 탄성계수가 크고 시멘트 입자보다 미세한 미세분재 및 혼화재료를 첨가하여 고강도 시멘트 경화체를 제조한 본 실험의 결과를 고찰해 보면 다음과 같다.

1) 탄성계수가 크고 입자크기가 시멘트 입자보다 작은 SiC 분말을 미세분재로 사용한 경우, 경화체 전체의 탄성계수는 mixture rule에 의하여 크게 증진되었으며 그에 비하여 휘강도는 SiC 분말을 첨가하지 않은 고강도 시멘트 경화체에 비해 약간 증진하는 경향을 보였다. 그러나 그림 9. 와 그림 10.에 나타났듯이 $W/C=0.1$ 로 하여 60일간 양생시킨 고강도 시멘트 경화체를 수은압입법에 의하여 측정된 total intrusion volume을 탄성계수, 휘강도의 관계로 나타내 보면 비록 기공율이 같더라도 탄성계수가 클수록 휘강도가 커지고 있는 것을 볼 수 있어, 기공율이 같은 경우 탄성계수의 증가는 결국 강도증진에 기여하고 있음을 알 수 있다.

2) 실리카흄을 첨가한 경우, 그림 11. 과 그림 12.에 나타낸 것과 같이 실리카흄을 첨가하지 않은 경우와 유사한 특성을 나타내었으나 실리카흄을 첨가하였을 때 약 20MPa정도의 강도 저하가 나타난 것은 그림 7.(a)와 같은 충전결합이 Griffith 결함으로 작용하거나, 그림 7.(b)에 나타났듯

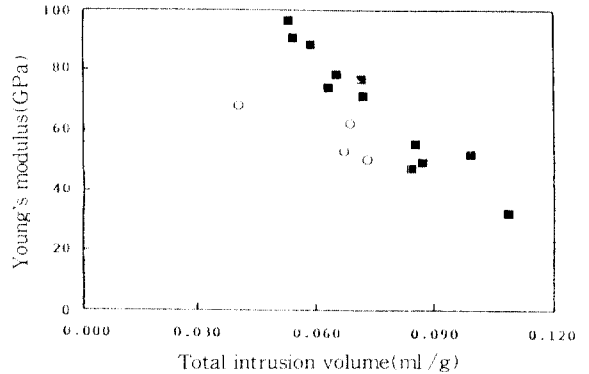


Fig. 9 Young's modulus plotted against total intrusion volume of hardened cement paste.
○ : ordinary portland cement paste
■ : MDF cement paste added SiC powder

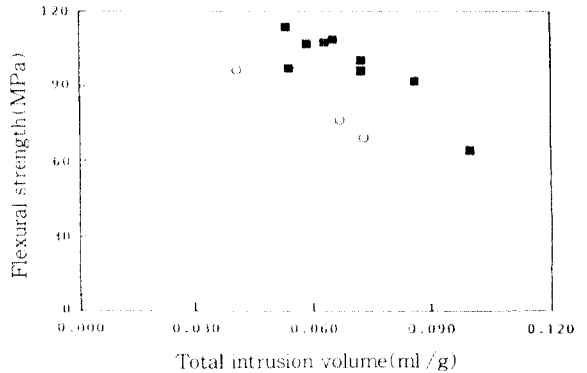


Fig. 10 Flexural strength plotted against total intrusion volume of hardened cement paste.
○ : ordinary portland cement paste
■ : MDF cement paste added SiC powder

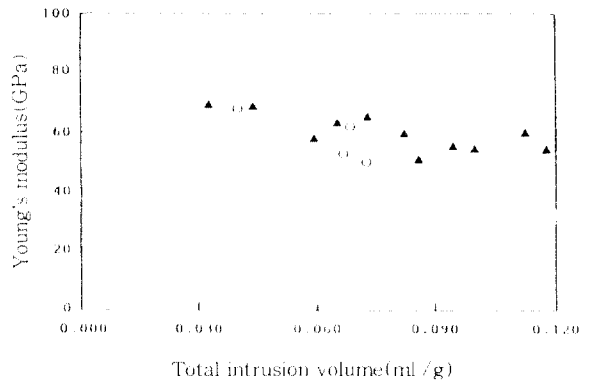


Fig. 11 Young's modulus plotted against total intrusion volume of hardened cement paste.
○ : ordinary portland cement paste
▲ : MDF cement paste added silica fume

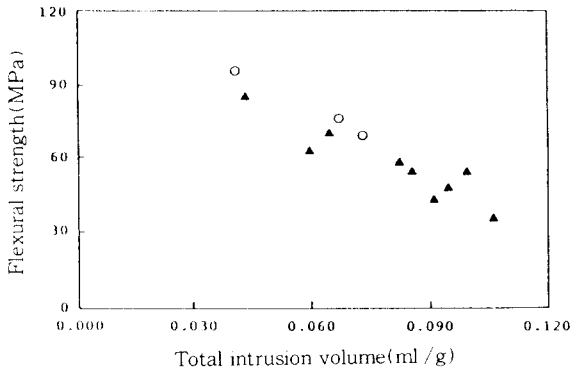


Fig. 12 Flexural strength plotted against total intrusion volume of hardened cement paste.

○ : ordinary portland cement paste
▲ : MDF cement paste added silica fume

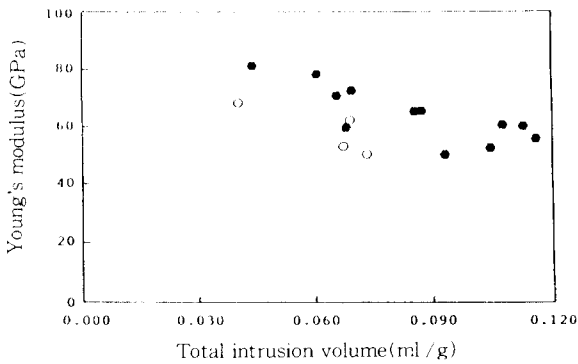


Fig. 13 Young's modulus plotted against total intrusion volume of hardened cement paste.

○ : ordinary portland cement paste
● : MDF cement paste added white cement

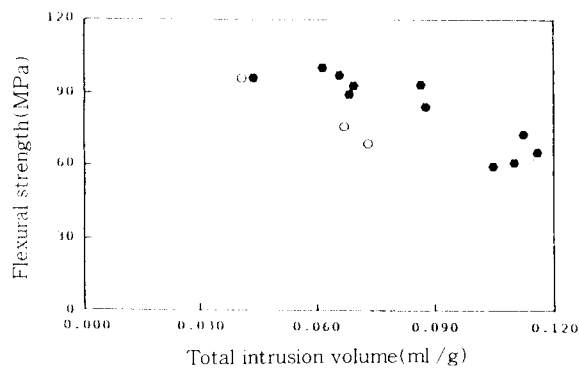


Fig. 14 Flexural strength plotted against total intrusion volume of hardened cement paste.

○ : ordinary portland cement paste
● : MDF cement paste added white cement

이 crack 진행에 영향을 주어 강도가 저하된 것으로 생각된다.

3) 백색시멘트를 첨가한 경우는 그림 13. 과 그림 14.에 나타난 바와 같이 SiC분말을 첨가하였을 때와 탄성계수가 낮은 것을 제외하고는 유사한 특성을 나타내었다.

4. 결 론

시멘트 경화체의 고강도화 및 물성 향상을 위하여 미세골재인 SiC 분말, 혼화재료인 실리카흄 및 백색시멘트등을 첨가한 W/C=0.4인 일반 시멘트 경화체와 W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체의 물성 및 고강도화 기구를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SiC 분말 및 백색시멘트를 첨가한 W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체의 60일 양생 휨강도는 약 100MPa 정도의 높은 값을 나타내었으며 탄성계수는 SiC 분말을 첨가한 경우 95GPa정도로서 우수한 특성을 나타내었다.

2) 실리카흄을 첨가한 W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체의 60일 양생 휨강도는 70-80MPa정도로서 실리카흄의 입자 충전 효과 및 포졸란 반응에 의한 조직의 치밀화에도 불구하고 수분 부족으로 인한 충전결함이 발생하여 오히려 강도가 저하되는 현상을 나타내었다.

3) 고강도 시멘트 경화체에서 미세골재 및 혼화재료가 고강도화에 미치는 영향은 기공율이 같은 경우, 첨가된 미세골재 및 혼화재료의 탄성계수가 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Buil, M., Paillere, A.M. and Roussel, B, "High Strength Mortars Containing Condensed Silica Fume," Cem. Concre. Res., 14, 1984, pp693-704
2. Asgeirsson, H. and Gudmundsson, G., "Pozzolanic Activity of Silica Dust," Cem. Concre. Res., 9, 1979, pp249-252
3. Alford, N. McN., Groves, G.W. and Double, D. D., "Physical Properties of High Strength

- Cement Pastes," *Cem. Concre. Res.*, 12, 1982, pp349-358
4. Birchall, J. D., Howard, A. J. and Kendal, K., European Patent Publication, No.0021628, Imperial Chemical Industries Ltd., 1981
 5. Sinclair, W. and Groves, G. W., "High Strength Cement Pastes, Part I. Microstructure," *J. Mater. Sci.*, 20, 1985, pp2846-2852
 6. Rodger, S. A., Brooks, S. A., Sinclair, W., Groves, G. W., and Double, D. D., "High Strength Cement Pastes, Part II. Reactions during Setting," *J. Mater. Sci.*, 20, 1985, pp2853-2860
 7. 田澤榮一, "MDF セメント," *セメント コンクリト*, No. 441, 1983, pp8-9
 8. Berg, M. and Young, J. F., "Introduction to MDF Cement Composites," *ACBM*, 1(2), 1989, pp1-4
 9. Kim, J. H., Choi, S.H. and Han, K.S., "Effect of Water soluble Polymer on the Properties of High Strength Hardened Cement Paste", *J. Kor. Ceram. Soc.*, 26(5), 1989, pp698-704
 10. Kim, J. H., Choi, S.H. and Han, K.S., "Effect of Microstructure on the Properties of High Strength Hardened Cement Paste(I)", *ibid.*, 1990, pp861-868
 11. Kim, J. H., Choi, S.H. and Han, K.S., "Effect of Microstructure on the Properties of High Strength Hardened Cement Paste(II)", *ibid.*, 27(8), 1990, pp1034-1042
 12. Kim, J. H., Choi, S.H. and Han, K.S., "A Study on the Strength and Fracture and Fracture Toughness of High Strength Hardened Cement Paste," *J. Kor. Concr. Inst.*, 투고중.
 13. Irwin, G., Paris, P. and Tada, H., *The Stress Analysis of Crack Handbook*, Del Research Corporation, 1973, pp1.1-2.21
 14. 西田俊顔, 安田榮一, "セラミックスの力學的特性評價," *日刊工業新聞社*, 1986, pp63-124
 15. Swanson, P.L., Fairbomks, C. J., Lawn, B. R., Mai, Y. U. and Hocky, B. J., "Crack-Interface Grain Bridging as a Fracture Resistance Mechanism in Ceramics., I, Experimental Study an Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, 70(4), 1987, pp279-289
 16. Mai, Y. W., Baraket, B., Cotterel, B. and Swain, M., "Mechanism of Crack Growth Resistance in Macro-Defect Free Cement Paste," *MRS*, 13, 1988, pp187-193
 17. Hansen, T. C., "Influence of Aggregate and Void on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste," *J. Am. Concr. Inst.*, No.62 11, 1965, pp193-215

(접수일자 : 1994. 8. 2)