



압축강도 300 MPa 이상의 초고강도 분체콘크리트 개발을 위한 실험적 연구

조병완^{1)*} · 윤광원¹⁾ · 박정훈¹⁾ · 김 현¹⁾

¹⁾한양대학교 건설환경공학과

An Experimental Study on Mechanical Properties of Ultra-High Strength Powder Concrete

Byung-Wan Jo,^{1)*} Kwang-Won Yoon,¹⁾ Jung-Hoon Park,¹⁾ and Heoun Kim¹⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environment Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT In this study, ordinary Portland cement was used and the air void was minimized by using minute quartz as the filler. In addition, steel fibers were used to mitigate the brittle failure problem associated with high strength concrete. This study is in progress to make an Ultra-high strength powdered concrete (UHSPC) which has compressive strength over 300 MPa. To increase the strength of concrete, we have compared and analyzed the compressive strengths of the concretes with different mix proportions and curing conditions by selecting quartz sand, dolomite, bauxite, ferro silicon which have diameters less than 0.6 mm and can increase the bond strength of the transition zone. Ultra-high strength powdered concrete, which is different from conventional concrete, is highly influenced by the materials in the mix. In the study, the highest compressive strength of the powdered concrete was obtained when it is prepared with ferro silicon, followed in order by Bauxite, Dolomite, and Quartz sand. The amount of ferro silicon, when the highest strength was obtained, was 110%, of the weight of the cement. SEM analysis of the UHSPC showed that significant formation of C-S-H and Tobermorite due to high temperature and pressure curing. Production of Ultra-high strength powdered concrete which has 28-day compressive strength upto 341MPa has been successfully achieved by the following factors; steel fiber reinforcement, fine particled aggregates, and the filling powder to minimize the void space, and the reactive materials.

Keywords : ultra high strength powder concrete, ferro-silicon, compressive strength, high temperature-pressure curing

1. 서 론

최근 빌딩, 교량과 같은 건설구조물은 점차 초고층화, 대형화되고 있는 상황이며, 현재 국내에서는 제 2롯데월드(555 m), 서울라이트 빌딩(640 m), 용산드림타워 등 100층 이상의 초고층빌딩과 인천대교, 이순신대교 등 경간장 1 km이상의 초장대 교량이 곳곳에서 추진 중에 있다. 이러한 초대형 건축물을 위한 고강도 건설재료개발은 필수적이며 경제성 및 내구성이 우수한 콘크리트 연구는 전 세계적으로 증가하고 있는 추세이나 아직까지 국내의 기술력은 미미한 상태라고 볼 수 있다.¹⁾ 콘크리트 압축강도 개선의 주요 영향인자로는 시멘트페이스트의 구성과 강도, 골재의 강도, 전이영역의 형성·구조 강도, 양생방법에 따른 강도를 들 수 있다. 기존 일반 콘크리트의 경우, 시멘트페이스트의 강도에 영향을 주는 공극을

최소화 시키기 위하여 또 다른 재료의 충전을 통한 공극감소의 효과를 유도하지 못하고 굵은골재로 인한 계면영역의 부착강도 약화로 강도 특성에 악영향을 미치며 초고강도 콘크리트를 위한 고온고압양생, 가압하양생, 증기양생이 적절히 이루어지지 않은 점 등이 콘크리트 압축강도 개선의 한계라고 볼 수 있다.

이 연구에서는 굵은골재를 사용하지 않고 계면영역의 부착강도를 향상시킬 수 있는 크기 0.6 mm 이하의 규사, 백운석(dolomite), 보크사이트(bauxite), 페로실리콘(ferro silicon)을 선정 후 공극감소 효과를 위한 충전제를 첨가, 초고강도 분체콘크리트에 대한 각각의 배합비, 양생조건을 달리하여 압축강도를 비교분석 하였다. 또한 초고강도 분체콘크리트의 최적 배합을 도출하기 위하여 콘크리트 구성인자들의 압축강도에 대한 영향을 실험을 통하여 알아보았으며 개발된 초고강도 분체콘크리트의 SEM 촬영과 XRD분석을 통한 수화생성물 분석 및 내부구조 분석을 통해 압축강도 증가 원인에 대해 구명하고자 하였다.

*Corresponding author E-mail: joycon@hanmail.net

Received May 26, 2009, Revised August 28, 2009,

Accepted April 26, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

2. 실험 개요

콘크리트 강도를 지배하는 3개의 요인 즉, 시멘트페이스트의 강도, 골재의 강도, 골재와 시멘트페이스트 계면영역(전이영역)의 강도 중에서 가장 취약한 부분은 바로 계면영역이다.^{2,4)} 응력 집중으로 인한 골재-페이스트 계면의 균열 발생은 골재 크기에 비례하는 것으로 알려져 있으므로 콘크리트의 강도를 향상시키기 위하여 가장 중요한 것은 계면영역의 부착강도를 증진시키는 것이다.⁵⁾

따라서 시멘트페이스트와 골재의 부착력을 증가시키기 위해서는 계면영역에 존재하는 많은 공극을 더욱 미소한 재료에 의해서 충전하는 것이 고려될 필요가 있다.

초고강도 분체콘크리트를 개발하기 위해 굵은골재를 사용하지 않고, 0.6 mm 이하의 미립분을 사용함으로써 콘크리트의 균질성을 확보하고, 강도를 향상시키고자 하였다. 미립분으로 규사, 백운석, 보크사이트와 페로실리콘을 사용한 후 비교·분석하였다.²⁾

2.1 사용 재료

2.1.1 시멘트

이 연구에 사용한 시멘트는 비표면적이 3,200 cm²/g 인 보통 포틀랜드 시멘트이며, 시멘트의 광물조성은 Table 1, 화학적 성질과 물리적 성질은 Table 2와 같다.

2.1.2 규사

이 연구에서는 무수규산인 이산화규소(SiO₂) 성분이 포함되어 있는 석영 알갱이로 된 규사를 사용하였다. 이 연구에서는 체가름을 통하여 평균입경 0.2~0.4 size로 사용하였으며, 물리적 특성을 Table 3에 나타내었다.

2.1.3 백운석

이 연구에서 사용한 백운석은 국내 S사의 제품으로서

Table 1 Mineral composition of cement

Mineralogical composition of Type I cement (%)		
	C ₃ S (3CaO · SiO ₂)	53.8
	C ₂ S (2CaO · SiO ₂)	24.6
	C ₃ A (3CaO · Al ₂ O ₃)	2.1
	C ₄ AF (4CaO · Fe ₂ O ₃ · Al ₂ O ₃)	14.4

Table 2 Physical-chemical properties of cement

	Items	Portland cement
Chemical composition (%)	Calcium oxide (CaO)	61.3
	Silicon dioxide (SiO ₂)	21.1
	Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	5.2
	Magnesium oxide (MgO)	4.0
	Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	2.8
	Sulfur trioxide (SO ₃)	2.4
	Loss on ignition	2.0
Physical properties	Specific gravity	3.15

Table 3 Physical properties of quartz sand

Size (mm)	Specific gravity	Unit weight (N/cm ³)	Fineness modulus	Absorption (%)
0.2~0.4	2.64	16,000	1.4~1.6	0.1

화학적 성분은 CaMg(CO₃)₂이며 탄산석회와 탄산마그네슘이 1:1로 복탄산염을 이루고 있고, 백운석의 화학적 성질과 물리적 성질을 Tables 4와 5에 나타내었다.

2.1.4 보크사이트

이 연구에서 사용한 보크사이트는 국내 C사의 제품이며, 보크사이트는 포틀랜드 시멘트의 알루미늄 공급원으로 사용되며 또한 고알루미나 시멘트의 주구성원으로 사용되며, 보크사이트의 물리적 성질과 화학적 성질을 Table 6에 나타내었다.

2.1.5 페로실리콘(ferro silicon)

이 연구에서 사용한 국내 U사의 페로실리콘 합금은 전기 강판으로써 다양한 기계 동력장치의 모터나 변압기의 철심 등에 사용될 뿐 아니라 고효율 및 철심 손실이 많은 전기 재료 분야 특히, 고속 모터, 저소음 변압기 및 고주파 유도자(inductor) 등에 널리 응용되는 재료이다. 페로실리콘은 인장능력이 뛰어나며 시멘트 결합재에 관한 연구는 전무한 상태이고, 페로실리콘(75%)의 화학적 성질을 Table 7에 나타내었다.

Table 4 Chemical properties of dolomite

CaO	29~30%
MgO	20~21%
SiO ₂	0.5~1.5%
Fe ₂ O ₃	0.2~0.5%
Al ₂ O ₃	0.1~0.2%

Table 5 Physical properties of dolomite

Color	Milky white
Specific gravity	2.8~2.9
Hardness (mohs)	3.5~4
PH	9~10
Size (mm)	0.6

Table 6 Physical-chemical properties of Bauxite

Size (mm)	Fineness modulus	Specific gravity	The principal ingredient	Color
0.3	1.1~1.3	3.3	Al ₂ O ₃	Brown

Table 7 Chemical properties of ferro-silicon (75%)

Items	Specification (%)					Size (μm)
	Si	C	S	P	Al	
Ferro-silicon	75	0.2	0.02	0.04	2.0	43

2.1.6 실리카 폼(silica fume)

실리카 폼(silica fume)은 각종 실리콘이나 페로 실리콘 등의 규소합금을 전기아크식 노에서 제조할 때 배출되는 가스에 부유하여 발생하는 미세한 분말이다. 실리카폼은 실리카(SiO₂)가 80~95%를 차지하고 입경이 1 μm 이하로서 평균입경은 0.1 μm 정도이며, 비표면적이 약 20 m²/g로서 보통포틀랜드시멘트의 50~60배이다. 비중이 약 2.1~2.2 정도이고 단위용적 중량은 250~300 kg/m³ 정도이며, 모양은 90% 이상이 구형의 초미립자 분말이다. 실리카폼을 시멘트 중량의 5~15%정도 치환하면 콘크리트가 치밀한 구조로 되어 고강도화 된다. 또한 재료분리 저항성, 수밀성, 내화학약품성이 향상되며 알칼리 골재반응의 억제 효과 및 강도 증진 등을 기대할 수 있다. 한편 단위수량의 증가, 건조수축의 증대 등의 결점이 있어 물-결합재비가 30% 이하로 유지되어야함이 많은 연구보고 결과 알려져 있고 또한 물-결합재비를 낮추기 위해 고성능 감수제의 사용은 필수적이라 할 수 있으며, 고성능감수제는 시멘트와 실리카폼의 적절한 분산 및 수화반응을 촉진시킴으로서 보다 균질한 콘크리트의 형성에 도움이 된다.⁶⁾ SiO₂가 91.2%인 실리카폼의 분말도는 20.4 m²/g, 비중은 2.3이다. 국내 S사의 평균 180 nm 입자 크기를 갖는 실리카폼을 사용하였으며 화학적 성질과 물리적 성질을 Tables 8과 9에 나타내었다.

2.1.7 미세석영

계면과괴를 방지하고, 강도향상을 목적으로 계면영역에 부족한 SiO₂ 성분을 보충하고 미세공극을 충전하기 위한 필러(filler)재로서 미세석영을 사용하였다. 이 연구에서 사용한 미세석영은 SiO₂ 함량 99.7% 이상의 국내의 K사의 고순도 제품을 사용하였고, 미세석영의 물리적 성질과 화학적 성질을 Tables 10와 11에 나타내었다.

Table 8 Chemical properties of silica fume

Specific gravity	Chemical composition (%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
2.33	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3

Table 9 Physical properties of silica fume

Specific gravity	2.3	Fineness (cm ² /g)	204,000
Ph	4.5~6.5	Size (μm)	0.18
Densified	500~700	Color	Gray
Undensified	150~350		

Table 10 Physical properties of minute quartz

Appearance (whiteness)	White powder (> 95)
Hardness (Mohs)	7
Specific gravity	2.65
PH	7~8.5
Size (μm)	4~15

Table 11 Chemical properties of minute quartz

SiO ₂	> 99.7	CaO	Trace
Al ₂ O ₃	< 0.15	MgO	Trace
Fe ₂ O ₃	< 0.03	H ₂ O	< 0.05
TiO ₂	< 0.02	L.o.I	< 0.2

2.1.8 강섬유

강섬유의 제조방법은 일반적으로 ①냉연압출철선 자른 타입, ②철판을 자른 타입, ③용해된 상태에서 추출한 타입으로 나누어진다. 치수는 길이 20~40 mm, 단면적 0.06~0.3 mm² 정도이고, 재질은 탄소강 또는 스테인리스강으로 제조되며, 기본적인 형상, 치수 및 품질특성은 제조법에 의해 크게 영향받는다. 강섬유의 역학적 성질을 살펴보면 인장강도에서는 5 N/mm² 이상으로 우수한 성질을 가지고 있으며, 마이크로 빅커스경도(Hv)는 200~370 정도이다. 강섬유의 보강효과는 콘크리트와의 부착강도에 의해 크게 영향받는데, 강섬유의 형상비를 크게 하는 데는 그 한계가 있으므로, 표면산화, 예폭시 등의 수지에 의한 코팅, 금속도금의 표면처리 등에 의하여 부착성을 개선시킬 수 있다.^{7,8)}

이 연구의 강섬유는 현재 국내에서 상업적으로 생산되고 있는 ASTM C 820 Type 의 강섬유를 사용하였다.

2.1.9 고성능 감수제

고성능 콘크리트의 기본 배합은 낮은 물-시멘트비로 인해 시공성이 불량하므로 적절한 시공성을 확보하기 위해서 감수제 계통의 혼화제 사용이 필수적이다. 시멘트페이스트에 고성능 감수제를 첨가하면 그 분자가 시멘트 표면에 흡착하여 입자 표면에 전기 이중층이라 불리는 대전층을 형성하게 된다. 따라서 그 대전층의 전위에 상응하는 입자사이의 정전기적 상호반발이 생겨 응집한 입자가 분산되면, 그 반발작용에 의해 시멘트페이스트의 유동성이 증대된다.⁹⁾ 이 연구에서는 폴리카본산계 다기능성의 고성능 감수제로 시멘트 분산성이 대단히 우수하여 기존 감수제보다 단위 수량을 크게 감소시키고 슬럼프 손실이 적어 콘크리트의 물성을 크게 향상시킬 수 있는 고성능 감수제를 사용하였다.

2.2 실험변수

2.2.1 배합

이 연구에서 백운석, 보크사이트, 페로실리콘의 혼입량이 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 QS(규사), DOL(백운석), BX(보크사이트), FS(페로실리콘)로 구분하여 실험을 실시하였다. 배합설계는 시멘트 중량 기준하여 미립분의 혼입량을 50%, 70%, 90%, 110%, 130%로 20%씩 변화하였고, 미세석영 35%, 실리카폼 20%, 강섬유 30%, 혼화제 4.3%, 물 15%로 고정하여 설계 하였다. 배합비는 Table 12와 같다.

Table 12 Mix Proportions of ultra high strength powder concrete

	Specimen	Cement	Minute quartz	Silica fume	Steel fiber	Aggregate	Mineral admixture	W/C
Quartz sand	QS05	1	0.35	0.2	0.3	0.5	0.043	0.15
	QS07	1	0.35	0.2	0.3	0.7	0.043	0.15
	QS09	1	0.35	0.2	0.3	0.9	0.043	0.15
	QS11	1	0.35	0.2	0.3	1.1	0.043	0.15
	QS13	1	0.35	0.2	0.3	1.3	0.043	0.15
Dolomite	DOL05	1	0.35	0.2	0.3	0.7	0.043	0.15
	DOL07	1	0.35	0.2	0.3	0.7	0.043	0.15
	DOL09	1	0.35	0.2	0.3	0.9	0.043	0.15
	DOL11	1	0.35	0.2	0.3	1.1	0.043	0.15
	DOL13	1	0.35	0.2	0.3	1.3	0.043	0.15
Bauxite	BX05	1	0.35	0.2	0.3	0.7	0.043	0.15
	BX07	1	0.35	0.2	0.3	0.7	0.043	0.15
	BX09	1	0.35	0.2	0.3	0.9	0.043	0.15
	BX11	1	0.35	0.2	0.3	1.1	0.043	0.15
	BX13	1	0.35	0.2	0.3	1.3	0.043	0.15
Ferro silicon	FS05	1	0.351	0.2	0.3	0.5	0.043	0.15
	FS07	1	0.35	0.2	0.3	0.7	0.043	0.15
	FS09	1	0.35	0.2	0.3	0.9	0.043	0.15
	FS11	1	0.35	0.2	0.3	1.1	0.043	0.15
	FS13	1	0.35	0.2	0.3	1.3	0.043	0.15

2.2.2 미립분

이 연구에서는 초고강도 분체콘크리트를 개발하기 위해 굵은골재를 사용하지 않고, 0.6 mm이하의 미립분만을 사용하였다. 골재의 세립화를 통해 콘크리트의 균질성을 확보하고, 강도를 향상시키고자 하였다. 일반적으로 골재와 모르타르 사이의 계면이 고강도 영역에서 파괴가 발생하여 고강도 콘크리트를 제조하는데 한계가 있을 것으로 사료되어, 골재자체의 강도를 보강하기 위하여 Fe가 함유된 페로실리콘을 사용하였다. 이 연구에서 사용되어진 미립분의 입경을 비교하여 Table 13에 나타내었다.

2.2.3 양생방법

초고강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 포졸란 반응과 수화작용에 의한 화학적 효과와 미세구조의 개선과 같은 물리적 효과의 복합적인 작용이 필요하다. 따라서 더욱 높은 강도의 콘크리트를 얻기 위해 다짐 시 기계적 가압다짐을 실시하였고, 양생조건은 20°C 수중양생, 90°C 열수양생, 280°C-50 MPa 고온고압양생으로 변수를 주었으며, 높은 온도에서는 포졸란 반응과 수화 반응을

Table 13 Grain size of aggregates

Aggregates	Size
Quartz sand (mm)	0.2 ~ 0.4
Dolomite (mm)	0.6
Bauxite (mm)	0.3
Ferro-Silicon (μm)	43

촉진시키시 위해 오토클레이브를 사용하였다.¹⁾ Fig. 1은 고온고압 양생과정을 그림으로 나타낸 것이다.

2.3 실험 방법

2.3.1 공시체 제작

이 연구에서의 배합설계에 따라 미립분, 시멘트, 혼화재, 충전재를 순차적으로 8리터 용량의 강제식 믹서기에 넣고 2분씩 건비빔을 한 다음, 배합수에 고성능 감수제를 혼합하여 8분간 비빔을 실시하였다. 미분의 잔골재가 적용되어 일반콘크리트에 비하여 유동성은 낮은 상태이다. 고강도 콘크리트의 배합순서를 도식화해서 Fig. 2에 나타내었다.

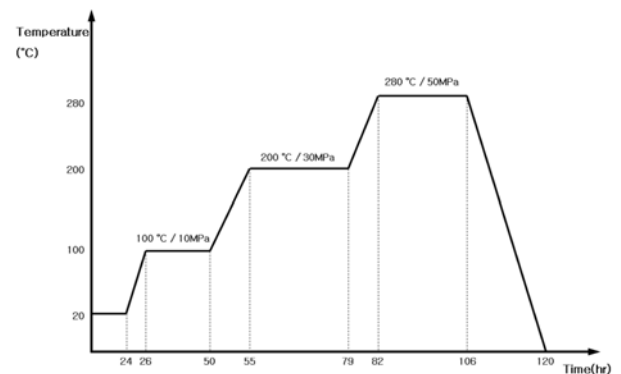


Fig. 1 Curing condition

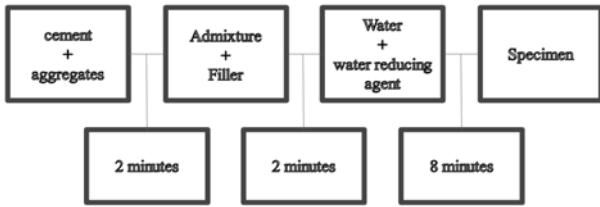


Fig. 2 mixture order

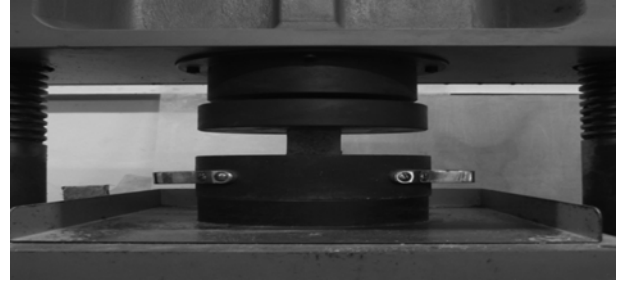


Fig. 3 Compressive strength test

2.3.2 압축강도

각 실험변수의 영향에 따른 압축강도의 변화를 알아보기 위하여 $50 \times 50 \times 50$ mm의 큐브 몰드의 시험체를 제작하였다. 모든 배합에 대하여 3개 시험체의 압축강도를 평균한 값을 사용하였으며, KS L 5105(수경성 모르타르의 압축강도 시험방법)에 준하여 압축강도를 측정하였다 (Fig. 3).

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도 비교 분석

미립분의 종류와 배합량 및 양생 온도 변화에 따른 압축강도를 평가하기 위하여 배합비에 따라 실험체를 만들고 각각의 실험체에 대하여 일반 20°C 수중양생, 90°C 열수양생, $280^\circ\text{C} \sim 50$ MPa 고온고압양생을 실시한 후 7일,

28일 압축강도를 측정하였다. 실험체 3개에 대한 평균값을 취한 결과를 Table 14에 나타내었다.

골재의 강도가 모르타르의 강도보다 작은 경우에는 골재의 용적비가 증가할수록 콘크리트의 강도가 감소하게 되며, 이 경우 콘크리트의 강도를 지배하는 것은 골재의 강도가 된다. 또한 골재 강도가 모르타르의 압축강도보다 큰 고품질 골재를 사용하면 콘크리트의 압축강도는 모르타르의 강도보다 크게 된다. 따라서 콘크리트의 고강도화를 위해서는 골재의 강도가 매우 중요한 역할을 담당하게 되며, 골재의 강도가 콘크리트의 강도 이상일 경우에는 골재 이외의 다른 부분이 강도에 중요한 영향을 미치게 된다. Fig. 4에서 보듯이 미립분에 따른 압축강도를 살펴보면, 페로실리콘 > 보크사이트 > 백운석 > 규소 순으로 미립분의 강도가 압축강도에 큰 영향이 미친다는 것을 알 수 있다.

Table 14 Compressive strength with different curing methods

	Specimen	20°C water curing		90°C water curing		High temperature and pressure-curing	
		Compressive strength (MPa)		Compressive strength (MPa)		Compressive strength (MPa)	
		7 days	28 days	7 days	28 days	7 days	28 days
Quartz sand	QS05	75	98	168	190	189	206
	QS07	83	143	174	203	197	227
	QS09	77	91	157	180	183	205
	QS11	69	86	169	183	180	200
	QS13	71	83	153	175	172	195
Dolomite	DOL05	92	131	163	190	216	252
	DOL07	98	120	169	201	227	259
	DOL09	113	152	183	220	231	272
	DOL11	88	119	150	191	202	246
	DOL13	89	124	153	188	207	241
Bauxite	BX05	87	120	200	237	220	249
	BX07	109	134	198	239	224	267
	BX09	98	127	203	223	230	264
	BX11	114	159	227	246	256	295
	BX13	102	135	201	225	233	276
Ferro silicon	FS05	127	158	220	237	290	307
	FS07	136	141	215	249	295	309
	FS09	147	148	231	260	327	339
	FS11	158	188	250	273	351	378
	FS13	139	153	237	268	323	341

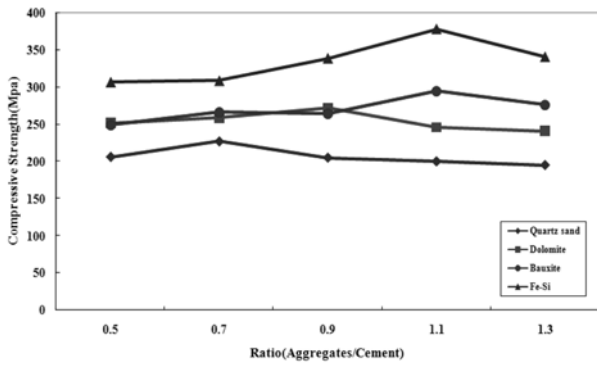


Fig. 4 Effect of aggregate on 28-day compressive strength

미립분의 종류별 압축강도를 살펴보면 미립분의 종류에 따라 적정 투입량이 다르며, 미립분-시멘트 비율이 규사 70%, 백운석 90%, 보크사이트와 페로실리콘 110%에서 가장 높은 압축강도를 나타냈다. 또한 미립분의 양이 적정투입 비율까지 증가할수록 대체로 압축강도는 증가하지만 그이상의 투입비가 되면 강도가 저하되는 현상을 볼 수 있었다. Fig. 5(a)~(d)는 재령일 28일의 3가지의 양생방법에 따른 각 재료별 압축강도를 나타낸다.

콘크리트의 강도는 재령(材齡)과 더불어 증진된다. 콘크리트 타설 후 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 로 습윤양생할 경우 7일 동안에 28일 강도의 70% 정도를 나타내며, 14일후에는 85~90%의 강도가 발휘되는 것이 일반적이다. Fig. 6에서 각 양생법의 재령에 따른 압축강도 변화를 살펴보면, 20°C 수중양생의 경우 72% 정도이며 90°C 열수양생과 280°C -50 MPa 고온고압양생의 경우 90% 정도로 나타났다. 이

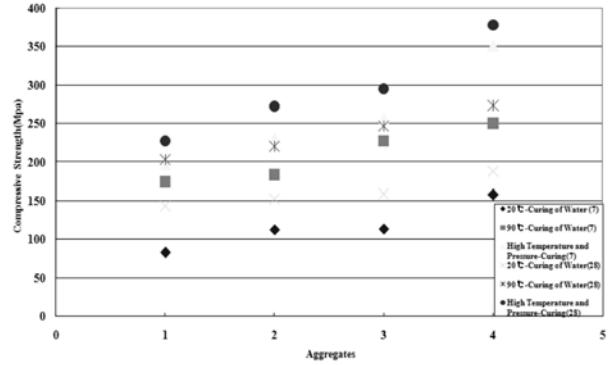


Fig. 6 Compressive strength of aggregates at age

것은 90°C 이상의 고온 양생환경에서 초기수화반응이 활발하게 일어나고 7일 이후에는 완만한 반응을 보이는 것으로 판단된다.

실험 결과를 통하여 양생 온도 및 압력은 분체콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며 280°C -50 MPa의 고온고압 양생 시 가장 높은 압축강도를 나타내었다. 이를 통하여 고온고압 양생이 시멘트 수화물의 전이영역 형성과 생성된 수화물과 미립분과의 결합력을 높여주는 것을 확인할 수 있었다.¹⁰⁾

이 실험을 통하여 굵은골재를 대체하여 미립분을 사용하면 전이영역에 존재하는 수산화칼슘과의 반응을 통하여 탄산칼슘 수화물 등을 생성하고 공극을 충전하여 일반콘크리트에 비하여 전이영역의 강도를 매우 향상시켜 높은 강도가 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 콘크리트의 강도를 지배하는 요인 중 하나인 골재 강도를 향상

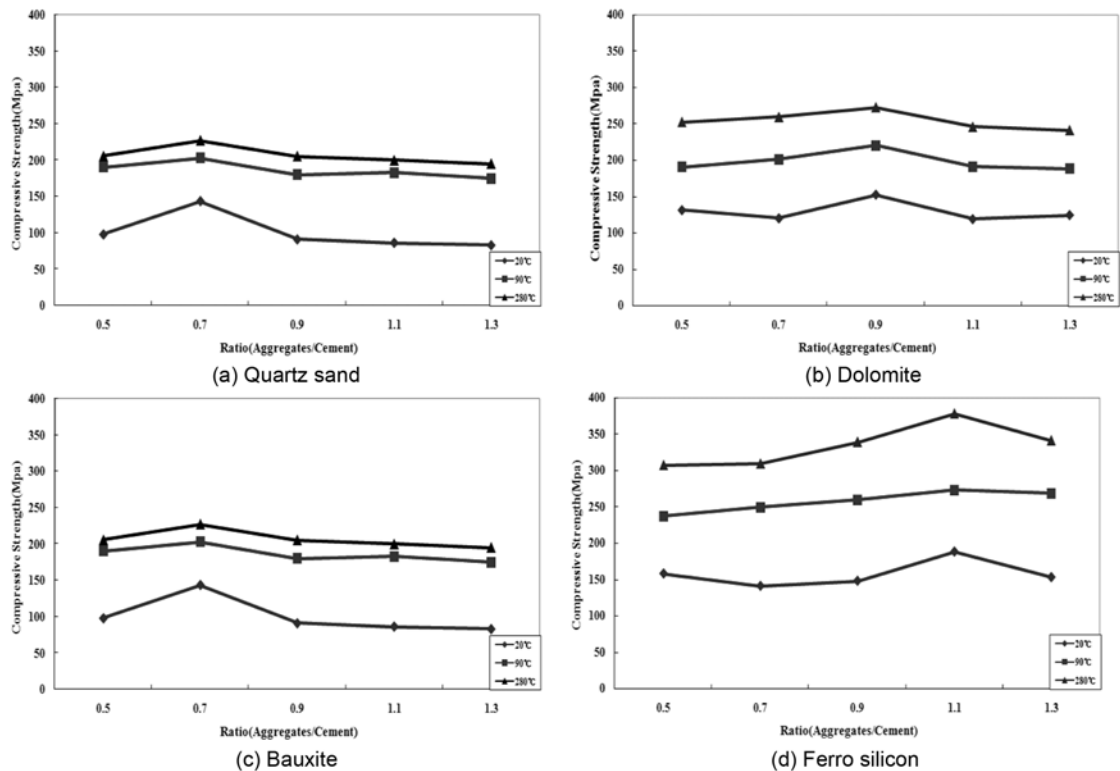


Fig. 5 Compressive strength of aggregates by curing method (28-day)

시키기 위한 페로실리콘의 경우 규사에 비하여 분체콘크리트의 압축강도가 약 1.5~2배로 높게 나타났다.

3.2 전자현미경(SEM)사진 분석

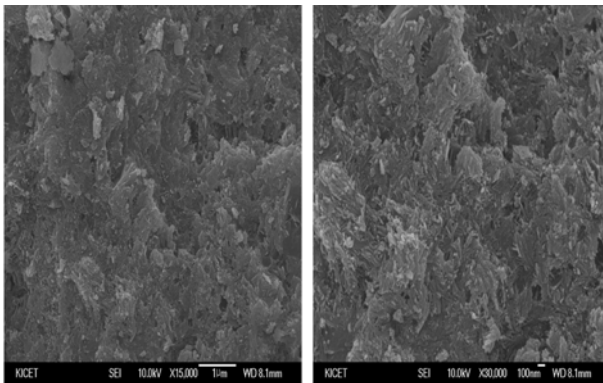
페로실리콘이 강도에 미치는 영향에 대한 메커니즘을 설명하기 위해 재령 7일에 QS07과 FS11의 내부 구조를 전자현미경으로 촬영하여 수화생성물과 미세구조를 분석하였다. 포틀랜드시멘트가 완전히 수화했을 경우 수산화칼슘은 전체 고체량의 20~30%를 차지한다. 화학조성은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 로 거의 일정한 결정질 화합물로 층상 구조를 가지며 칼슘 원자는 팔면체로, 산소 원자는 사면체로 배위하고 층간 결합력은 아주 약하다. 이는 콘크리트의 장기 강도를 감소시키며 화학적 저항성 및 수밀성을 저하시키는 원인이 된다. Fig. 7에 나타나듯이 규사를 통한 분체콘크리트의 경우, C-S-H겔이 독립적으로 형성되어 있고, 많은 침상수화물(에트린자이트)로 상호 연결되어 있으며 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 결정체가 많이 남아 있으며 분체콘크리트 내부에 비결정질 수화물로 밀실하지 못한 내부구조를 나타내고 있다. Fig. 8에는 페로실리콘을 사용한 분체콘크리트의 내부 수화물을 전자현미경으로 촬영한 사진을 나타내었다. 분체콘크리트 경화체의 조직은 다소 치밀하게 구

성되어 있고 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 결정체가 적게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 페로실리콘 분말이 고온고압양생으로 포졸란 반응을 촉진시켜 수산화칼슘과 반응하여 C-S-H겔을 형성함에 기인한다. 규사를 통한 분체콘크리트의 경우보다 경화체의 조직이 더 치밀하게 구성되어 있음을 알 수 있다. 또한 분체콘크리트 전체에 수화 생성물이 고루 분포함을 볼 수 있는데 이는 페로실리콘, 혼화재와 충전재의 사용에 의해 포졸란 반응이 촉진되어 C-H-S, C-A-H, C-A-S-H와 같은 다양한 수화물의 형성에 기인한 것으로 보인다.¹³⁾ 또한 페로실리콘이 고온고압양생을 통하여 기존의 콘크리트에서 볼 수 없었던 수화물을 생성한 걸로 판단되며, 이것은 고강도의 한계를 넘어설 수 있는 치밀한 구조를 나타내고 있다고 판단할 수 있다. 더 정밀하게 관찰하기 위하여 30,000배로 확대한 사진을 다음과 같이 나타내었다.

고온고압의 경우 시멘트의 수화반응을 촉진시키고, 수산화칼슘과 포졸란 물질(혼화재, 충전재)의 포졸란 반응을 활성화 시켜 토버모라이트(tobermorite)를 생성시키며 Fig. 9와 같은 형상을 보여준다. 이를 통하여 콘크리트의 압축강도를 크게 향상시킨 것으로 보인다.^{11,12)} 이와 같은 결과는 충전재를 이용한 고온고압양생에서 토버모라이트(tobermorite)가 생성되어 페이스트 간 결합력을 높여주었기 때문이다.

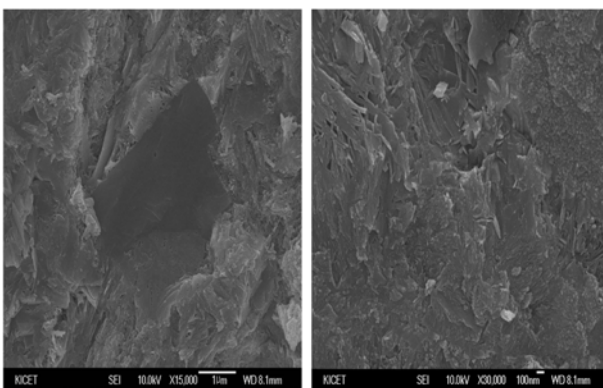
3.3 XRD 분석

280°C-50 MPa 고온고압양생을 통하여 미립분과 충전재에 따른 수화생성물의 구성 성분을 알아보기 위해 재령 7일된 시험체에 대해 XRD 분석을 실시하였다. Fig. 10와 같이 QS에서는 quartz로 주로 구성되어 있으며, 결정질의 일라이트(illite)로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. Fig. 11에서는 전체적으로는 QS에서와 비슷한 입자로 구성되어 있으나, Fe-Si가 고온고압양생을 통하여 FeSi_2 로 변화하여 강도에 영향을 주었다고 판단할 수 있다. 두 결과를 비교하면 QS에서의 intensity가 더 높은 수치로 나왔으나, 이는 QS의 많은 Si성질로 인한 것이다. 또한 intensity



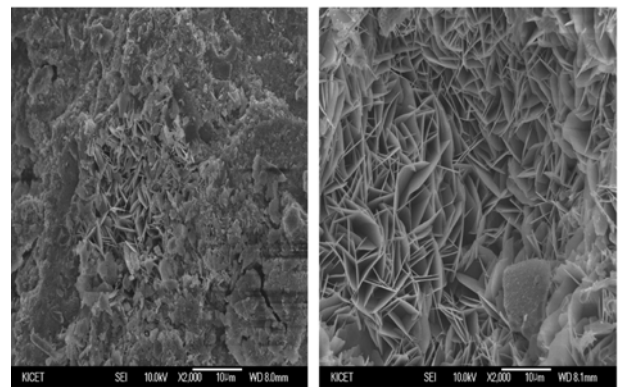
(a) 15000 times (b) 30000 times

Fig. 7 SEM of QS07 hydrate



(a) 15000 times (b) 30000 times

Fig. 8 SEM of FS11 hydrate



(a) QS07 (b) FS11

Fig. 9 SEM of tobermorite

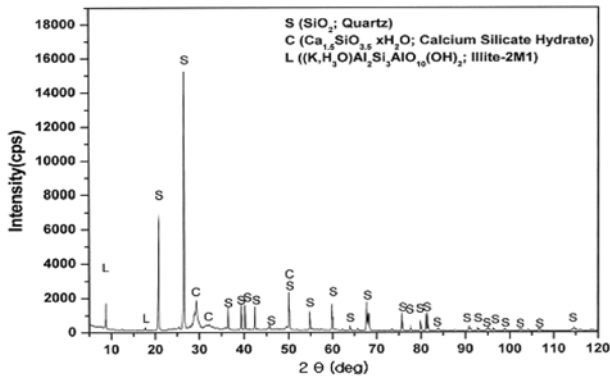


Fig. 10 XRD analysis of QS

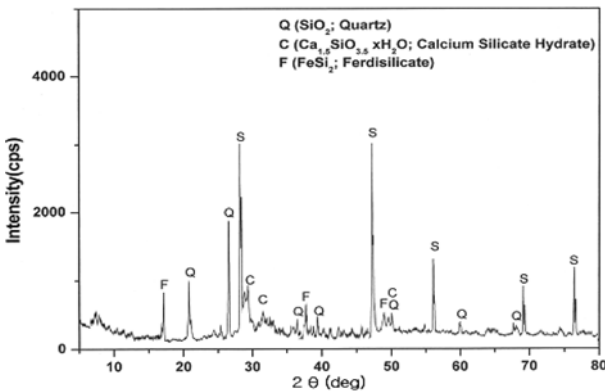


Fig. 11 XRD analysis of FS11

수치는 강도에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

초고강도 콘크리트는 콘크리트공학 분야에 새로운 기술의 전환점이 될 뿐만 아니라 고품질화, 고기능화, 고성능화를 위한 건설용 재료로서 중요한 역할을 할 것으로 사료되며, 이 연구에서는 페로실리콘을 혼합한 초고강도 분체콘크리트의 압축강도 평가, SEM촬영, XRD분석을 통해 특성을 구명하고자 하였다. 또한 양생기간 및 방법에 따른 압축강도를 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초고강도 분체콘크리트를 개발하기 위해 굵은골재를 사용하지 않고, 0.6 mm 이하의 페로실리콘, 보크사이트, 백운석, 규소 미립분을 사용하였고, 페로실리콘>보크사이트>백운석>규소 순으로 미립분의 강도가 압축강도에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한 페로실리콘의 경우 시멘트 중량 기준하여 혼입량 110%일 때 가장 큰 강도를 나타내었다.
- 2) 골재의 영향에서는 콘크리트 균열의 길이를 줄이기 위하여 미립분만을 사용하였으며 미립분의 첨가량이 많을수록 강도가 증가하였지만 일정량 이상을 첨가할 경우 강도는 낮아지는 것으로 나타났다. 이

는 시멘트의 양이 줄어들어 포졸란 반응을 일으킬 수산화칼슘의 양이 적어 포졸란 반응보다는 골재로서의 역할을 함으로써 강도 증진의 효과가 다소 떨어지는 것으로 보이며, 적절한 투입비가 있는 것으로 판단된다.

- 3) SEM촬영을 통해 미세구조를 분석한 결과 QS07의 경우 C-S-H(calcium silicate hydrate paste)보다 크고 결합력이 약한 Ca(OH)₂나 에트링자이트(ettringite) 등을 많이 포함하고 있으며, FS11에서는 많은 양의 C-S-H(calcium silicate hydrate paste)가 복잡하게 형성되어 있었으며 QS07에 비해 밀실한 구조를 보였다. 이는 페로실리콘이 수화에 관여한 결과로 판단되며 Fe-Si는 고온고압양생을 통하여 FeSi₂로 변화하였다. 또한 실리카폼과 미세석영 같은 초미분말 사용이 계면영역에 공극을 충전하여 강도를 향상시킨 것으로 판단된다.
- 4) 공극의 감소를 위해 가압다짐을 하고 고온고압양생을 실시한 결과 공시체를 밀실히 하고, 200°C 이상에서 생기는 수화물, 토버모라이트의 생성으로 더욱 높은 압축강도를 보였다.

참고문헌

1. 고경택, 박정준, 류금성, 강수태, “양생방법이 초고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체의 압축강도에 미치는 영향,” 대한토목학회 논문집, 27권, 3A호, 2004, pp. 427-432.
2. 배수호, “RPC를 사용한 초고강도, 고인성 콘크리트의 기술개발 현황,” 콘크리트학회지, 15권, 3호, 2003, pp. 129-133.
3. Richard, P. and Cheyrezy, M., “Composition of Reactive Powder Concretes,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, Issue 7, 1995, pp. 1501-1511.
4. Richard, P. and Cheyrezy, M. H., “Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength,” *ACI Spring Convention*, San Francisco, SP 144-24, 1994, pp. 507-517.
5. 손유신, 김한준, 김규동, 이승훈, “설계강도 150 MPa 초고강도 콘크리트 개발,” 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 18권, 1호, 2006, pp. 29-32.
6. 윤영기, 윤희석, 홍성길, “Fe-6.5wt% Si 합금의 역학특성에 미치는 어닐링 효과,” 대한토목학회 논문집, 24권, 12A호, 2000, pp. 2909-2916.
7. 박정준, 고경택, 강수태, 김성욱, “초고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체의 구성인자가 압축강도에 미치는 영향,” 콘크리트학회 논문집, 17권, 1호, 2005, pp. 35-41.
8. 한만덕, “강섬유를 혼합한 고강도 콘크리트의 역학적 특징,” 한양대학교 토목공학과 일반대학원, 2005, pp. 21-30.
9. 문한영, 김기형, “고성능감수체를 사용한 시멘트복합체의 유동성 손실에 대한 연구,” 콘크리트학회 논문집, 4권, 2호, 1992, pp. 119-126.
10. Mazloom, M., Ramezani-pour, A. A., and Brooks, J. J., “Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-strength Concrete,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, Issue 4, 2004, pp. 347-357.
11. 임재훈, “Ferro-Silicon을 활용한 초고강도 분체 콘크리트

- 개발에 관한 실험적 연구,” 한양대학교 토목공학과 일반 대학원, 2008, pp. 30~41.
12. 조병완, 박승국, 김창현, 임재훈, 이연진, 오세영, “Ferroalloy 를 활용한 초고강도 콘크리트의 개발에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 19권 1호, 2007, pp. 533~536.
13. 최상훈, Cement Chemistry, 한양대학교 시멘트연구실, 1997, pp. 24~36.

요약 본 연구에 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며, 공극 최소화를 위한 충전제는 미세석영을 사용하였고 고강도화에 따른 취성과파괴 문제를 개선하기위해 강섬유를 사용하여 압축강도 300 MPa 이상의 초고강도 분체콘크리트를 개발 하고자 하였다. 콘크리트의 강도를 크게 향상시키기 위한 연구의 일환으로 계면영역의 부착강도를 향상시킬 수 있는 크기 0.6 mm 이하의 규사, 백운석, 보크사이트, 페로실리콘을 선정한 후 각각의 배합비, 양생조건을 달리하여 압축강도를 비교분석 하였다. 초고강도 분체콘크리트는 보통콘크리트와 달리 사용재료의 영향이 대단히 중요하다. 분체 콘크리트의 압축강도 측정 결과 페로실리콘 > 보크사이트 > 백운석 > 규사 순으로 골재의 강도가 압축강도에 큰 영향을 미치는 경향을 알 수 있었으며 페로실리콘의 경우 시멘트 중량 기준하여 혼입량 110%일 때 가장 큰 강도를 나타내었다. SEM 촬영 결과 C-S-H수화물이 비교적 많이 생성되었고, 고온고압양생으로 토버모라이트와 조놀라이트가 생성된 것을 확인 하였다. 또한 골재의 세립화, 분체의 치밀충전화 및 반응성 재료의 사용으로 인해 페이스트가 고강도화 되고, 강섬유를 사용하여 인성을 보강함으로써, 28일 압축강도 341 MPa의 초고강도 분체콘크리트를 성공적으로 개발 하였다.

핵심용어 : 초고강도 분체콘크리트, 페로실리콘, 압축강도, 고온고압양생