

혼화재 및 화학반응제를 혼입한 경량기포콘크리트의 물성 개선

Improvement of Physical Property of Autoclaved Light-Weight Concrete Using Admixtures and Chemical Reactants

송 훈 | Song, Hun

정회원, 한국세라믹기술원 책임연구원, 공학박사

Abstracts

Autoclaved lightweight concrete (ALC), also known as autoclaved aerated concrete (AAC), is a lightweight, precast building material that simultaneously provides structure, insulation. ALC is a unique building material. Because of its cellular nature, it is lightweight, self-insulating, as well as sound and fireproof. ALC products include blocks, wall panels, floor and roof panels, and lintels. Recently, the use of ALC has become increasingly popular. However, ALC have high water absorption, low compressive strength and popout the origin of the low surface strength in its properties. Thus, this study is to improve the fundamental strength by controls of increasing of admixtures and chemical reactants. Admixtures make use of meta kaolin and silica fume, chemical reactants make use of sodium silicate and sodium hydroxide. From the test result, the ALC using admixtures and chemical reactants have a good fundamental properties compared with plain ALC. These good fundamental properties is caused by the admixtures and chemical reactants of ALC by the reason of the micro filling effect and chemical binding of C-S-H gel, tobermolite and quartz.

Keywords

Autoclaved light-weight concrete, Admixture, Chemical reactants, Meta kaolin, Specific strength

키워드

경량기포콘크리트, 혼화재, 화학반응제, 메타카올린, 비강도

1. 서 론

건축물의 고층화에 따라 건물 자중에 대한 문제점이 발생되면서 구조물의 중량 부담을 경감하기 위하여 비구조용 재료로 경량기포콘크리트(이하 ALC) 제품의 사용이 급격하게 증가하고 있다. ALC는 가장 대표적인 제품으로 유럽에서부터 범용화되어 현재는 국내에서도 경량블록 등의 범용화된 건식 건축자재로 사용되고 있다.¹⁾ 국내에서 생산되는 대부분의 ALC는 밀도가 약 0.5~0.7 g/cm³ 수준으로 제조되고 있으며, 일부 주문자의 요청 등에 따라 밀도를 달리한 제품이 생산되고 있다. 현재 국내의 ALC 생산량은 연간 약 35만m³(2008년)인 것으로 파악되며 300억원의 시장규모 및 판매량을 기록하고 있다.²⁾ ALC는 오토크레이브로 고온·고압하의 양생 과정을 거쳐 구조적으로 안정한 판상 구조의 토버모라이트(Tobermorite, C₅S₆Hx) 결정층을 이루는 과정에서 만들어지는 경량의 제품이다. ALC의 밀도는 0.5~0.7g/cm³ 정도로 체적의 대부분이 기포로 구성되어 있으며 그 크기에 따라 거대기공과 미세기공으로 구분된다. 이들 기포는 전체 체적의 70~80%를 차지하며 구성물은 단지 20~30% 밖에 되지 않아 단열성, 내화성, 차음성 등이 우수하다. 일반적으로 ALC는 규산칼슘 단열재로서 CaO-SiO₂-H₂O(C-S-H)계 수화물이다.³⁾ 이 계의 수화물 대부분은 물에 대해 불용성이며, 100°C 이하에서 생성하는 수화물은 불안정한 저 결정상으로 시멘트 수화로 인해 생성되는 CSH(I), CSH(II) 등이 이 부류에 속한다. 이에 반해 ALC는 안정한 결정으로 180°C

전후에서 autoclave를 이용하여 수열(Hydro-thermal) 합성하는 점이 다르다. 이들 가운데에서도 ALC 수화와 관련한 것은 토버모라이트이다.

ALC는 경량이며 단열 및 차열 등의 성능이 우수한 반면 강도가 낮기 때문에 모서리부가 쉽게 깨져 운반 및 취급 시 상당한 주의를 요구한다. 상기의 이유로 ALC의 구성광물인 토버모라이트, 조노토라이트(Xonotolite)의 결정상 조절이나, 주원료인 규석분말의 입도에 따른 강도특성 변화 등 압축강도 및 물성을 개선하기 위한 일련의 연구가 활발하게 연구되고 있지만, 강도 범위는 최대 4MPa 정도로 아직도 미미한 실정이다.⁴⁾

본 연구에서는 ALC의 물리적 성능개선을 위해 메타카올린 및 실리카폼 등의 혼화재나 소듐실리케이트 및 소듐하이드록사이드와 같은 화학반응제를 혼입하여 제조한 ALC의 성능을 평가하였다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료 및 배합

ALC의 성능개선을 위한 사용재료 및 물리적 성질은 표 1과 같다. 사용재료는 보통포틀랜드시멘트, 규석분말, 생석회이며 발포제로서 알루미늄분말을 사용하였다. 규석분말은 결정성이 양호한 국내의 문경산 규석분말과 사용하였다.

또한, 성능개선을 위한 혼화재로는 메타카올린, 실리카폼이며 화학성분은 표 2와 같다. 물성개선을 위한 화학반응제로는 소듐실리케이트(Sodium silicate)와 소듐하이드록사이드(Sodium hydroxide)

표 1. 사용재료

	Material	Symbol	Property
Raw materials	Cement	C	Ordinary portland cement
	Quik lime	CaO	CaO Assay min. 90%, Si+Fe+Mg+Al : 2.7%
	Al powder	Al	Al Purity : 92~96.2%
	Silica powder	SP	SiO ₂ Assay min. 95.0%
Admixture	Meta-kaolin	MK	Density : 2.59 g/cm ³ , Blain : 10,000 cm ² /g
	Silica fume	SF	Density : 2.20 g/cm ³ , Blain : 200,000 cm ² /g
Chemical reactants	Sodium silicate(Na ₂ SiO ₃)	SS	Assay min. 95.0%
	Sodium hydroxide(NaOH)	SH	Assay min. 95.0%

1) 한국세라믹기술원, 다공성 세라믹 소재 취성특성 향상기술 지원, 2005

2) ㈜SYC, ALC 기술자료

3) 한국세라믹기술원, 저고비중 ALC 제품의 고성능화 기술지원, 2008.08

4) 김영엽 외 3인, 경량기포콘크리트의 혼화재 및 규석 입도에 따른 성능개선, 대한건축학회논문집(구조계), pp.107-114, 2007.08

7. ㈜SYC, 복합기능형 ALC 패널시스템용 부품소재 개발, 011

를 사용하였다. 메타카올린 및 실리카폼은 국내의 K사의 제품을 사용하였고 소듐실리케이트와 소듐하이드록사이드는 순도 95%이상의 분말형 시약을 사용하였다. ALC의 성능개선을 위한 시험체의 배

합은 표 3과 같다. 메타카올린 및 실리카폼은 시멘트의 중량에 대해 3, 5, 8%를 사용하였으며 소듐실리케이트와 소듐하이드록사이드는 1, 3, 5%를 사용하였다.

표 2. 사용재료의 화학조성

(unit:wt.%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig. loss
Cement	20.5	5.45	3.03	0.87	62.22	0.80	0.34	1.01
Meta kaolin	52.0	40.21	3.00	0.50	1.20	0.40	0.60	1.85
Silica fume	94.8	0.66	1.06	0.61	0.19	0.45	0.73	1.00

표 3. 시험체의 배합표

Series	Symbol	Admixture (Cement × %)	Unit weight (kg/m ³)					SP Content (90μm), (%)	SO ₃ Content (%)	
			SP Slurry	CaO	Cement	Al	water			Ad.
Plain		-						-		
Meta kaolin	MK-1	3	323.0	47.0	104.0	0.5	100.0	3.12	13~23	4~6
	MK-2	5						5.20		
	MK-3	8						8.32		
Silica fume	SF-1	3						3.12		
	SF-2	5						5.20		
	SF-3	8						8.32		
Sodium silicate	SS-1	1						1.04		
	SS-2	3						3.12		
	SS-3	5						5.20		
Sodium hydroxide	SH-1	1						1.04		
	SH-2	3	3.12							
	SH-3	5	5.20							



(1) Mixing

(2) Molding

(3) Autoclaving

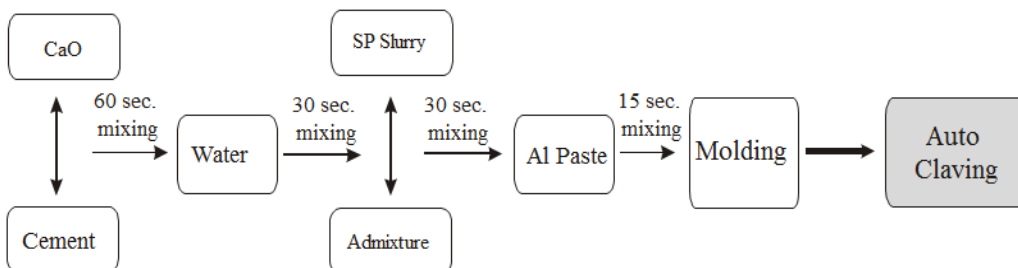


그림 1. 시험체의 제작 및 배합순서

2.2 시험체의 제작

ALC는 일반적으로 규석, 시멘트, 생석회에 발포제로 알루미늄 분말 등을 원료로 사용하고, 혼합수 함량을 분말대비 약 50~100% 혼합하여 슬러리로 제조한다. 제조된 슬러리는 몰드에 주입한 후 약 30~50°C의 습윤양생과 150~200°C의 수열합성을 진행하여 최종 제품으로 제조한다. 본 연구의 시험체 제작에서도 ALC 제조공정과 동일한 온도 및 환경조건을 유지할 수 있도록 하였다. 시험체의 혼합은 모르타르 믹서를 이용하여 생석회와 시멘트를 투입하여 60초간 건비빔을 실시한 후, 혼합수를 투입하여 30초간 비빔을 실시하였다. 다시 규석슬러리와 혼화재료를 각각 투입하여 30초간 비빔을 실시하였다. 그 후 알루미늄 분말을 투입한 후 다시 15초간 비빔을 실시하였다. 시험체는 40~50°C의 온도에서 5시간 동안 건조양생을 실시하였으며, 몰드에서 탈형 후 180°C에서 6~8시간 동안 증기양생을 실시하였으며 제작 및 배합순서는 그림 1과 같다.

2.3 시험방법

메타카올린, 실리카폼, 소듐실리케이트 및 소듐하이드록사이드를 혼입한 ALC 시험체의 물성변화를 평가하기 위한 항목은 밀도, 압축강도 및 비강도와 마모율이며 시험방법은 다음과 같다. 시험체는 100×100×100mm 크기로 제작하여 밀도 및 압축강도를 측정하였으며 KS F 2701(경량 기포 콘크리트 블록)에 준하여 시험을 실시하였다. 마모성능 평가는 40×40×40mm 각주의 시험체를 제작하고 7일간 기건양생을 실시한 후, KS F 2508(로스엔젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모 시험방법)에 준하여 중량변화를 측정하였고 측정은 2, 5, 10, 15분 간격으로 측정하였다.



그림 2. ALC 시험편 및 열전도율 시험기

ALC 시험체의 단열성능을 파악하기 위한 열전

도율 측정은 KS L 9016(보온재의 열전도율 측정 방법)에 규정된 장치로서 200×200×30mm의 시험체를 평판으로 제작하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 밀도변화

혼화재 및 화학반응제의 혼입률에 따른 밀도변화를 그림 3에 나타내었다. 혼화재를 혼입한 시험체의 경우 Plain 시험체에 비해 밀도는 5%이상 높게 나타났다. 또한 혼화재의 혼입률이 증가할수록 밀도도 증가하였다. 이러한 경향은 시험체의 종류와 상관없이 시험체 모두 동일한 경향을 보였다. 메타카올린을 혼입한 시험체의 경우 Plain 시험체에 비해 약 15% 정도 증가하였으며 혼입률이 증가할수록 밀도도 증가하는 경향을 보였다. 실리카폼을 혼입한 시험체의 경우도 메타카올린을 혼입한 경우와 동일하게 혼화재의 혼입률이 증가할수록 밀도가 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 메타카올린 및 실리카폼의 경우 혼입율의 증가에 따라 밀도도 증가하는 경향을 보였는데 이는 메타카올린 및 실리카폼의 충전효과에 기인하는 것으로 판단된다. 메타카올린 및 실리카폼은 토버모라이트로 이루어진 ALC 구조체 입자사이의 공극을 충전시켜 경화체가 치밀해지는 역할을 한다. 화학반응제인 소듐실리케이트는 Plain 대비 밀도가 약 27%까지 증진하였다. 메타카올린이나 실리카폼보다 혼입률이 적었음에도 불구하고 밀도의 증가가 가장 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 시멘트의 수화반응에 의해 생성된 수산화칼슘과 결합하여 불용성의 규산칼슘으로 고정되어 공시체 내부의 공극을 충전하여 치밀한 조직을 형성한 결과에 따른 것이다. 또한 소듐하이드록사이드도 전술한 소듐실리케이트와 동일한 결과를 보였다. 이러한 결과로부터 화학반응제는 수열합성 과정에서 결합제와 반응하고 새로운 조성물을 형성한다.

3.2 강도특성

(1) 압축강도

혼화재 및 화학반응제의 혼입률에 따른 압축강도의 변화를 그림 4에 나타내었다. 혼화재의 혼입에 따라 압축강도도 증가하였다. 압축강도의 증가는 모든 시험체에서 동일한 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 혼화재의 혼입에 따라 밀도가 증가하고 토버모라이트 사이를 충전한 결과에 따른 것으로 ALC의 일반적인 경

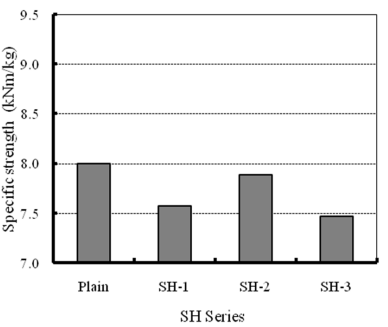
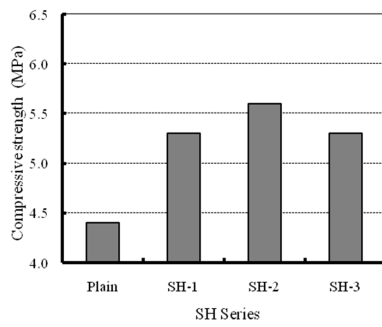
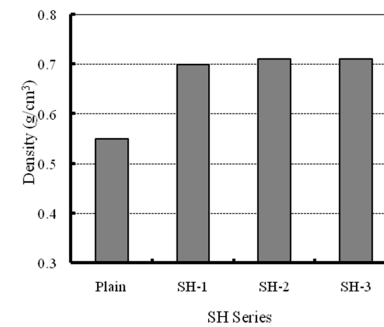
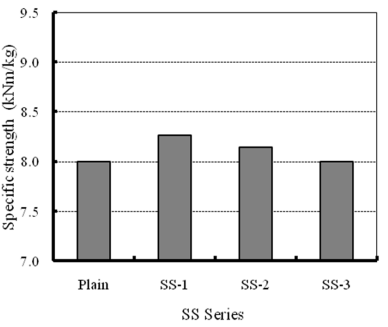
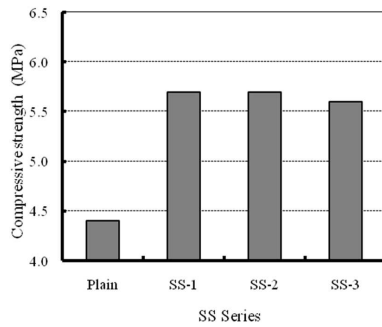
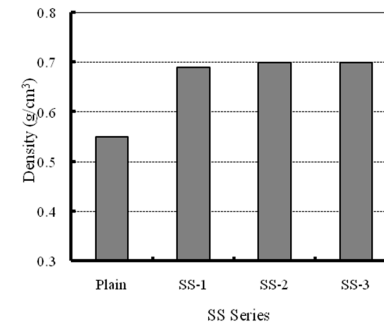
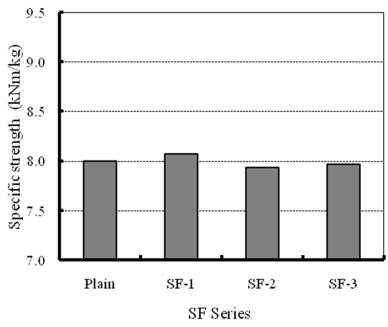
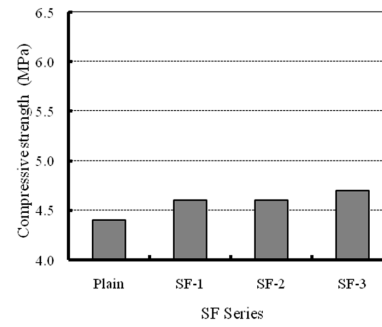
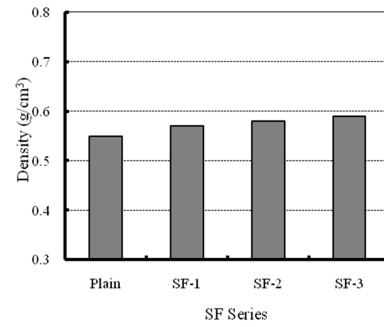
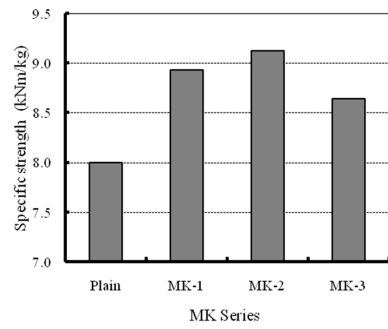
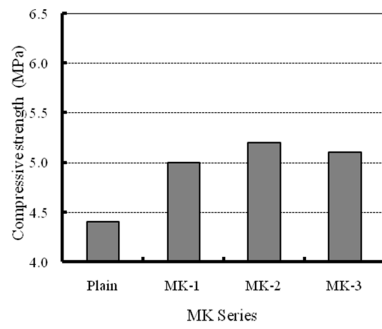
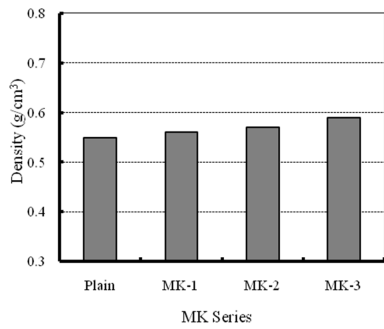


그림 3. 시험체의 밀도변화

그림 4. 시험체의 압축강도

그림 5. 시험체의 비강도

향이다. 메타카올린을 혼입한 시험체의 경우 압축강도도 증가하는 경향을 보였다. 하지만 밀도의 증가경향과 달리 혼입율의 증가에 비례하지는 않고 약 5% 정도를 혼입했을 때 가장 높은 강도를 보였다. 메타카올린 혼입한 시험체 Plain 시험체에 비해 약 10% 정도 강도가 증가하였다. 실리카폼을 혼입한 시험체의 경우 압축강도가 약간 증가하는 경향을 보였지만 메타카올

린에 비해 혼입에 따른 효과가 크지 않았다. 이와 같은 결과는 메타카올린과 실리카폼의 비표면적의 차이에서 오는 것으로 판단된다.

즉 실리카폼의 경우 비표면적이 약 200,000 cm^2/g 으로 메타카올린에 비해 작기때문에 충분히 토버모라이트 구조체 사이를 충전하지 못하는 결과로부터 기인

한다. 실리카폼의 강도를 적절하게 발휘하기 위해서는 혼입량이 더 커져야 될 것으로 판단된다. 하지만 실리카폼의 혼입량이 커지는 경우 밀도도 증가하므로 밀도의 증가와 강도와의 관계를 조절하여 배합비를 설정할 필요가 있다. 메타카올린이나 실리카폼에 비해 화학반응체인 소듐실리케이트나 소듐하이드록사이드를 사용한 경우 강도의 증진이 크게 나타났다. 소듐실리케이트와 소듐하이드록사이드를 혼입한 시험체의 경우 Plain 시험체 대비 약 30%이상 증가하였으나 혼입률이 증가해도 압축강도는 거의 유사한 결과를 보여 혼입률에 따른 강도증진 효과는 확인할 수 없었다. 또한 소듐실리케이트를 사용한 경우 소듐하이드록사이드에 비해 상대적으로 강도의 증진효과가 크게 나타났다.

ALC 제조를 위한 규석이나 규사는 실리카 성분의 함량에 따라 특성이 좌우되는데 실리카 함량이 85% 이상인 경우 유용하며, 95%이상인 경우 이상적이다. 규석은 수열반응(hydrothermal treatment)을 하는 동안 결합제(binding agent)와 반응하여 새로운 광물을 형성하며 분쇄의 정도에 따라 반응성은 달라질 수 있으며 일정시간 내에 반응이 완료되어야 한다. 또한 분말도도 압축강도와 수축(shrinkage)에 영향을 미치는 요인이며 불순물의 함량도 중요한 요소이다. 알칼리 성분, 즉 Na₂O와 K₂O의 함량은 1.5%이하여야만 된다. 알칼리는 대개 장석(feldspar) 또는 운모(mica) 형태로 함유되는데 운모는 적은 함량으로도 강도를 저하시켜 장석보다 더 나쁜 영향을 미치므로 최대 3%로 제한한다. 장석의 최대함량은 15%이다. 점토와 점토질광물은 최대 10%까지 허용되는 반면에 고품위 규석에서는 탄산칼슘(CaCO₃)함량이 20%까지 허용된다. 점토와 점토질광물의 함량이 높은 경우에는 슬러리의 점도가 높아져 품질에 나쁜 영향을 미친다.

(2) 비강도

혼화재 및 화학반응제의 혼입률에 따른 비강도를 그림 5에 나타내었다. 비강도는 일반적으로 밀도가 작고 압축강도가 높으면 비강도도 높게 나타난다. ALC의 경우 경량성 및 단열성 등의 기타 성능과 강도를 고려한 시공성 확보 측면에서 비강도가 높게 나타나는 것이 유리하다. 메타카올린을 혼입한 시험체의 경우 비강도의 증가가 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 여타의 혼화재료 중에서 가장 높은 결과를 보였으며 시멘트 중량비의 5%를 혼입한 MK-2의 시험체가 가장 높은 결과를 보였다. 실리카폼을 혼입한 시험체의 경우 Plain 시험체와 비하여 비강도의 증가가 거의

없거나 적었다. 이와 같은 결과는 실리카폼의 혼입에 따라 밀도는 증가하는 반면 압축강도의 증가폭은 그다지 높지 않았기 때문이며 전술한 바와 같이 실리카폼의 비표면적이 작아 토버모라이트의 공극을 적절하게 충전하기 못하는 결과로부터 기인한다.

소듐실리케이트나 소듐하이드록사이드를 혼입한 시험체의 경우 소듐실리케이트를 혼입한 시험체는 Plain에 비해 비강도가 증가하였으며 소듐하이드록사이드를 혼입한 경우는 비강도가 감소하는 결과를 보였다. 비강도는 소듐하이드록사이드를 제외하고 Plain보다는 높게 나타나는 결과를 보였으며 메타카올린, 소듐실리케이트의 경우 Plain대비 5% 이상의 증진효과를 보였고 일부 시험체의 경우 9%의 비강도 증진효과를 보였다. 이에 따라 압축강도 및 밀도의 측면만을 고려한 압축강도 증진의 경우, 메타카올린이나 실리카폼은 시멘트대비 3%의 혼입이 적절하며 소듐실리케이트를 사용하는 경우는 1%를 혼입하는 것이 유리하다.

3.3 마모성능

혼화재 및 화학반응제의 혼입률에 따른 마모율을 그림 6에 나타내었다. 일반적으로 ALC는 밀도가 작고 다공체이며 강도가 작기 때문에 모서리부에서 파괴가 발생하기 쉽다. 또한 마모에 의한 성능저하도 크게 나타난다. 마모성능은 일반적으로 압축강도가 높은 경우 마모성능도 좋기 때문에 ALC의 강도개선이 가장 중요한 요소이다. 하지만 강도가 높아지는 경우 열전도율도 증가하므로 밀도는 낮고 모서리부의 파괴가 쉽게 발생하지 않을 정도의 경도를 가지고 있어야 한다.

ALC 성능개선을 위해 혼화재 및 화학반응제를 혼입하여 제조한 시험체의 마모성능을 비교한 결과 Plain 시험체에 비해 성능이 우수한 것으로 나타났다. 특히 메타카올린이나 소듐실리케이트를 첨가하는 경우 마모성능이 우수하였다. 특히 소듐실리케이트를 혼입한 시험체의 경우 3% 포인트 이상의 마모에 의한 중량감소가 적었다. 전반적으로 마모성능은 혼화재의 종류에 상관없이 동일하거나 약간은 우수한 경향을 보였으며 큰 차이는 나타나지 않았다.

이와 같은 결과는 압축강도 증진에 따른 마모성능의 향상에 기인한다. 하지만 전반적으로 ALC의 경우 마모율이나 모서리부가 깨지는 취성과파괴 현상이 발생하기 쉬운 재료이고 다른 재료와 비교하여 시공성 측면에서는 큰 약점이므로 개선을 위한 연구가 필요하다.

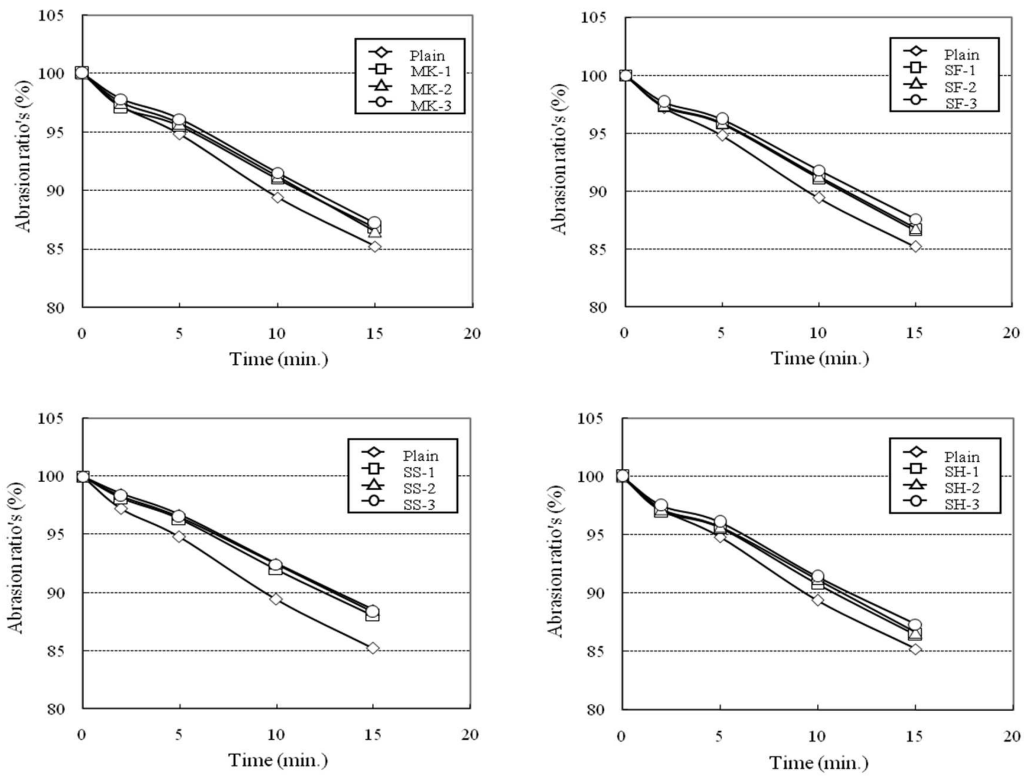


그림 6. ALC 시험체의 마모율

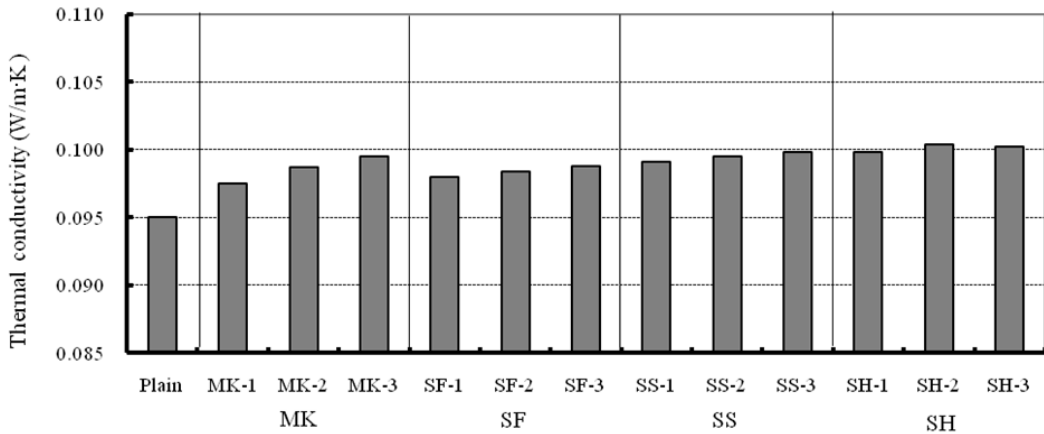


그림 7. ALC 시험체의 열전도율

3.4 열전도율

ALC 시험체의 열전도율을 그림 7에 나타내었다. 측정결과 ALC의 열전도율은 밀도와 상관되어 밀도가 증가할수록 열전도율도 증가하는 경향을 보였다. 시험체 대부분이 0.1W/m·k이하의 낮은 열전도율을 나타내었다. 이는 일반 콘크리트의 열전도율인 1.0W/m·k에 비하여 약 10% 정도에 불과한 것으로서, ALC 특유의 독립적인 기공구조에 의한 것이다.

3.5 내부조직 분석

SEM에 의한 ALC 시험체의 미세구조 관찰 사진을 그림 8에 나타내었다. 미세구조 사진에서 기본적으로 육각판상형의 토버모라이트와 Quartz의 결정상을 확인할 수 있었다. 또한 XRD분석 결과를 그림 9에 나타내었다.

XRD분석은 특성개선을 위해 혼화재를 혼입한 시험편의 XRD패턴 분석을 통해 토버모라이트의 형성 및

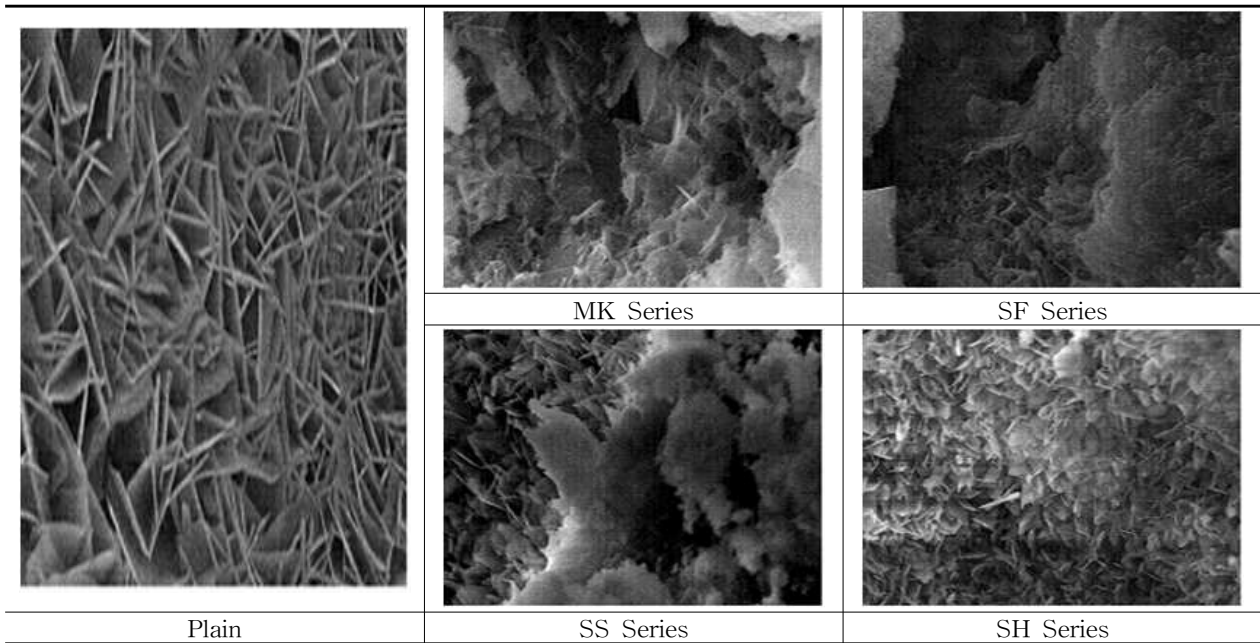


그림 8. SEM에 의한 ALC의 조직분석

다른 결정상의 존재여부를 파악하기 위한 것으로 결정이 양호한 토버모라이트와 C-S-H의 발생, CSH(I)나 CSH(II)과 C-S-H gel이 나타나고 있음을 확인하였다.

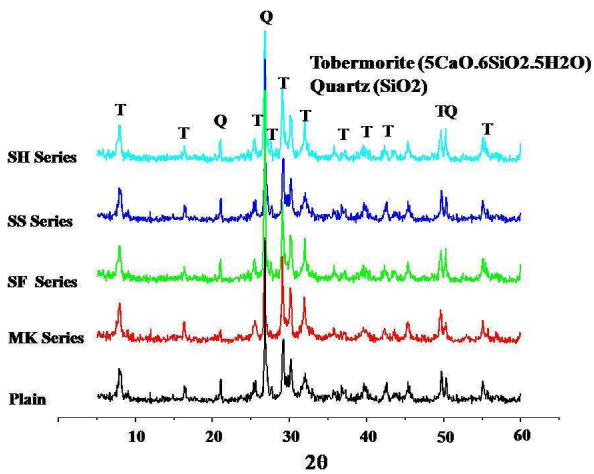


그림 9. ALC 시험체의 XRD

XRD분석을 통해 토버모라이트 형성을 측정된 결과, 시험편 모두 Plain 시험체로 측정된 결과 값과 혼화재 및 화학반응제를 혼입한 ALC의 피크값이 일치함으로서 결정이 양호한 토버모라이트와 퀴츠가 형성되었음을 알 수 있었으며 그 외 다른 상들은 발견할 수 없었다.

4. 결론

ALC 물성향상을 위해 혼화재 및 화학반응제를 사용한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 메타카올린과 실리카폼을 혼입한 경우 혼입률의 증가에 따라 강도도 증가하였다. 또한 혼화재의 종류에 따른 영향이 크게 나타나 메타카올린을 사용한 경우 실리카폼을 사용하는 경우에 비해 강도개선이 현저하였다.

(2) 화학반응제인 소듐실리케이트 및 소듐하이드록사이드를 혼입한 경우 혼입률의 증가에 따른 강도개선은 혼화재를 혼입한 경우와 비교하여 현저하지 않았다.

(3) 혼화재에 의한 강도개선은 마이크로공극 충전효과와 화학반응제에 의한 강도개선은 불용성 규산칼슘의 고정화에 따른 것으로 서로 다른 메커니즘으로부터 기인한 결과이다.

(4) ALC의 물성개선은 메타카올린이나 실리카폼 등의 혼화재의 적용보다 소듐실리케이트를 사용하는 것이 유리하다.

(5) 혼화재 및 화학반응제의 혼입률 증가에 따른 강도개선 효과는 미미하며 압축강도와 비중, 마모성능만을 고려하는 경우의 혼입률은 1~3%가 적절하다.

참고문헌

1. 한국세라믹기술원, 다공성 세라믹 소재 취성특성 향상기술 지원, 2005
2. 한국세라믹기술원, 저고비중 ALC 제품의 고성능화 기술 지원, 2008.08
3. 김영엽 외 3인, 경량기포콘크리트의 혼화재 및 규석 입도에 따른 성능개선, 대한건축학회논문집(구조계), 2007.08
4. 쌍용양회공업(주), ALC개론
5. ALC구조설계 기준 및 표준공법 제정에 관한 연구, 대한건축학회, 1996
6. ㈜SYC, ALC 기술자료
7. ㈜SYC, 복합기능형 ALC 패널시스템용 부품소재 개발, 2011
8. 일본건축학회, 건축공사표준사양서 JASS 21(ALC패널공사), 일본건축학회, 2005

논문접수일 (2012, 11, 20)

심사완료일 (1차 : 2012, 11, 30. 2차 : 해당없음)

게재확정일 (2012, 12, 6)