



통계적 방법에 의한 바텀애쉬를 사용한 경량기포 콘크리트의 최적배합 결정

김진만¹⁾ · 박은구¹⁾ · 조성현²⁾ · 강 철^{1)*}

¹⁾공주대학교 건축공학과 ²⁾한일시멘트(주) 중앙연구소

Decision of Optimized Mix Design for Lightweight Foamed Concrete Using Bottom Ash by Statistical Procedure

Jin-Man Kim,¹⁾ Eun-Gu Kwak,¹⁾ Sung-Hyun Cho,²⁾ and Cheol Kang^{1)*}

¹⁾Dept. of Architecture, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

²⁾Central Research Center of Hanil Cement Company Ltd., Daejeon 306-020, Korea

ABSTRACT The increased demand and consumption of coal has intensified problems associated with disposal of solid waste generated in utilization of coal. Major utilization of coal by-products has been in construction-related applications. Since fly ash accounts for the part of the production of utility waste, the majority of scientific investigations have focused on its utilization in a multitude of use, while little attention has been directed to the use of bottom ash. As a consequence of this neglect, a large amount of bottom ash has been stockpiled. However, the need to obtain safe and economical solution for its proper utilization has been more urgent. The study presented herein is designed to ascertain the performance characteristics of bottom ash, as autoclaved lightweight foamed concrete product. The laboratory test results indicated that tobermorite was generated when bottom ash was used as materials for hydro-thermal reaction. According to the analysis of variance, at the fresh state, water ratio affects on flow and slurry density of autoclaved lightweight foamed concrete, but foam ratio influences on slurry density, while, at the hardened state, foam ratio affects on the density of dry and the compressive strength but doesn't affect on flexural and tensile strength. In the results of response surface analysis, to obtain target performance, the most suitable mix condition for lightweight foamed concrete using bottom ash was water ratio of 70~80% and foaming ratio of 90~100%.

Keywords : bottom ash, autoclave, lightweight foamed concrete, statistical analysis

1. 서 론

석탄은 풍부한 매장량, 저렴한 가격 및 공급 안정성 등의 이유로 화력 발전소에서 중요한 연료원으로 널리 사용되고 있으며, 부산물로 발생하는 석탄회(石炭灰) 발생량도 증가하여 2010년경에는 약 600만톤에 이를 것으로 예상된다. 석탄재(coal ash)는 포집되는 장소에 따라 크게 플라이애쉬(fly ash)와 바텀애쉬(bottom ash)로 구분된다. 이중 플라이애쉬는 발생하는 회의 75~80% 정도로서 대부분이 콘크리트 혼화재료 및 시멘트 클링커 제조 원료로 재활용되고 있다. 바텀애쉬는 보통 전체 발생하는 회의 15~20% 정도로 플라이애쉬보다 발생량이 적고¹⁾ 물리·화학적 특성이 열등하고 재활용이 어려워 대부분이 매립·폐기처분되고 있는 실정이다.^{2,3)}

그러나 바텀애쉬는 SiO₂와 Al₂O₃를 다량 함유하고 있

기 때문에 이를 미분화하여 고온·고압의 조건에서 수열반응을 유도하면 우수한 경화체의 제조가 가능하다.

한편 고온·수열반응 조건에서 제조되는 건설재료는 크게 두 가지 형태로 구분되지만, 일반적인 것은 통칭 ALC라고 불리고 있는 후발포형 경량기포콘크리트를 의미한다. 본 연구는 기포를 사전에 제조하여 슬러리재와 혼합하는 선발포 방식으로 기존의 ALC와는 구별되지만, 석회질 재료와 규산질 재료의 반응에 의해 경화체를 구성하는 기본적인 반응 메커니즘은 거의 유사하다. 그러나 ALC가 생산 공정상 고품위의 재료를 요구하므로 원료의 다양성이 제한되어 있고, 또한 재료의 밀도도 0.3에서 0.7 범위로 제한되어 있다. 반면에, 본 제조방식은 재료의 성능 목표에 따라 재료를 유연하게 선택할 수 있으므로 바텀애쉬와 같이 타 공정 부산물의 적용이 가능하다는 장점이 있을 뿐만 아니라 밀도의 범위도 ALC보다 좀더 넓은 범위에 걸쳐 조정이 가능하고 형태의 다양화가 가능하다는 장점이 있다. 하지만, ALC에 비하여 동일 밀도에서의 강도와 단열성 등에 관해서는 열등한 측면도 있으므로 어느 방식이 우수하다고 단정할 수는 없다.

*Corresponding author E-mail : cupiboy@kongju.ac.kr

Received February 22, 2007, Revised October 9, 2007,

Accepted October 20, 2007

©2009 by Korea Concrete Institute

본 연구는 바텀애쉬를 사용하여 건축물 및 공동주택의 비구조용 벽체로 사용될 수 있는 경량기포 콘크리트 2차 제품을 개발하기 위한 실험적 연구 결과의 일부이며, 경화체 제조는 선발포 방식에 의해 만들어진 슬러리를 수열 조건에서 경화시키는 방식을 채용하였으며, 본 반응을 최적화하기 위한 원료의 조성을 구명하는 것이 본 연구의 최종 목표이다. 연구의 프로세스는 먼저 바텀애쉬가 수열합성반응조건에서 우수한 경화체의 제조가 가능한지를 기존 문헌에 의해 고찰하여 이를 예비 실험에 의해 확인한 다음, 다세대 주택의 세대 내 차음재로서 요구되는 목표성능을 설정한 후 요구 성능에 적합한 배합조건을 찾기 위하여 실험계획법을 이용하여 실험을 실시하였다. 또한 최적 성능을 발현하기 위한 배합조건을 결정하기 위하여 분산분석과 반응표면 분석을 통하여 실험 결과를 해석하였다.

2. 바텀애쉬의 수열합성반응 규산질 원료로의 사용 가능성 검토

2.1 규산칼슘 (calcium silicate) 수열합성반응 메커니즘

석회와 실리카 또는 포틀랜드시멘트를 주원료로 오토클레이브를 사용하여 170~250°C의 포화수증기압으로 처리하여 얻은 재료를 오토클레이브 규산칼슘재료라고 하며,^{4,7)} 건축재료 및 단열, 보온재로 사용된다. 이러한 재료들은 상온에서 생성되는 저결정성 시멘트수화물 (C-S-H)과는 달리 결정질로서 콘크리트에 비해 내열성 및 치수안정성이 우수하며, 상온양생체에 비해 강도가 뛰어나다. 수열합성 반응을 통해 생성되는 수화물은 CaO/SiO₂ 및 반응온도, 반응시간, 원료의 입도 등 여러 조건에 크게 영향을 받으며, 그 주요 수화물은 Tobermorite, Xonotlite, Gyrolite 로 구분된다. 이 중 토버모라이트 (Tobermorite)는 층간 거리에 따라 구분될 수 있는데 그 중 대표적인 것이 11Å 토버모라이트이며 이것은 CaO/SiO₂ 몰비 (이하, C/S 몰비로 함) 0.8~1.1에서 180°C 11기압의 포화수증기압의 반응에 의해서만 생성되는 것으로 알려져 있다.⁸⁾

2.2 바텀애쉬의 수열합성 반응성 검토

수열합성반응을 이용한 규산칼슘수화물을 제조하는데 있어 사용되는 규산질 원료를 규석 또는 규사분말을 이용하는 것이 대부분이다. 하지만 일본의 恒松修二·井上憲弘 등⁹⁾은 플라이애쉬를 사용한 규산칼슘수화물의 특성 등을 연구하였다. 이 연구에서는, 수열합성반응에서의 규산질 재료로서의 플라이애쉬 사용성 검토와 기타 혼화재료의 사용에 의한 강도특성 및 몰비 변화에 따른 토버모라이트의 결정 관찰 등을 연구하여 플라이애쉬가 우수한 수열합성 재료임을 확인하였다. 이와 같이 선행된 연구를 참고로 하여, 플라이애쉬와 화학적 조성이 비슷한 바텀애쉬도 규산질 원료로서의 대체가 가능하다고 판단되

어 C/S 몰비 및 기타 혼화재료의 화학적 성분 함량변화에 대한 예비실험을 실시하였다. 상온-상압 수화물인 C-S-H gel은 1~100 nm 범위의 콜로이드 크기의 저결정성 입자들의 집합체이기 때문에 그 형상을 명확히 정의하기 어려운 것에 반하여, 수열합성반응에 의한 수화물은 일반적으로 다공성의 판상형 결정구조를 나타내는 것으로 알려져 있다. 이를 확인하기 위하여 다양한 몰비를 갖는 배합을 대상으로 검토하였다.¹⁰⁾

Fig. 1은 본 연구에 사용한 수열합성 경화체의 미세구조를 나타낸 것으로 다공성의 판상형 결정물이 매우 잘 형성된 것을 알 수 있다. 또한 오토클레이브양생 후의 시험체의 X선회절분석 결과를 나타낸 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 수열합성반응 생성물인 토버모라이트의 존재를 확인할 수 있다. 수열반응에 의한 토버모라이트의 형성은 C/S몰비 1.1에서 가장 우수한 것으로 나타나 이를 이후 실험에 적용하였다. Table 1은 사용재료의 화학적 성분량을 바탕으로 C/S 몰비가 1.1이 되도록 배합 비율을 나타낸 것이다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험 계획

수열합성반응에서 수화물의 각종 물성에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중의 하나인 C/S 몰비는 사전 실험 결

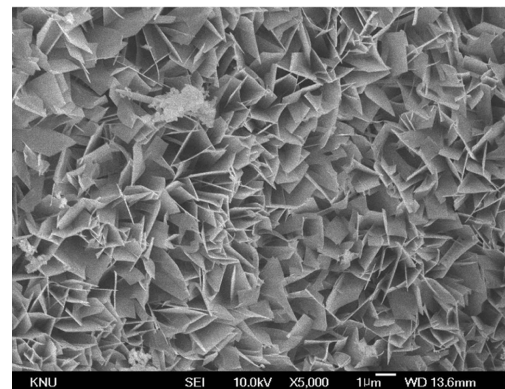


Fig. 1 SEM image of the solid made by hydro-thermal reaction (×5,000)

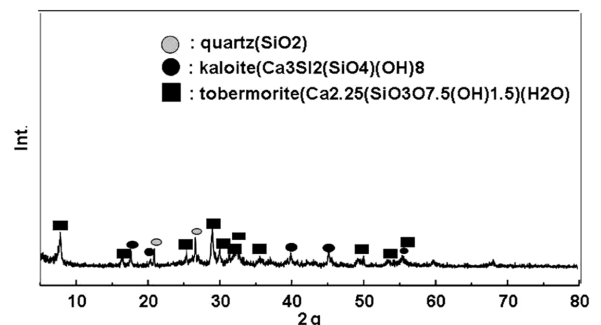


Fig. 2 XRD pattern of the solid made by hydro-thermal reaction

Table 1 The formation of raw materials with C/S mole ratio of 1.1

C/S mole ratio	(wt, %)				
	OPC	AC	CH	A	BA
1.1	45.14	4.51	2.17	3.61	44.57

Remark

- C/S mole ratio is total weight ratio of CaO and SiO₂
- OPC is ordinary portland cement
- AC is alumina cement
- CH is calcium hydroxide(Ca(OH)₂)
- A is anhydrite gypsum(CaSO₄)
- BA is bottom ash

These abbreviations have a same meaning in this paper

과를 반영하고 원료의 종류 및 입도, 조성 및 반응조건
의 변화에 관한 상세한 검토는 본 논문의 범위에 포함
시키지 않았다. 본 연구는 C/S 몰비를 1.1로 고정한 상
태에서 물비 (water ratio), 기포비 (foam ratio), 섬유비
(fiber ratio)의 영향을 검토한 것이다. 물비는 물과 결합
재의 중량비를, 기포비는 기포 혼입전의 슬러리와 투입
한 기포의 용적비를, 그리고 섬유비는 슬러리에 대한 투
입한 섬유의 용적비를 의미한다. 검토한 실험수준은 Table
2에 나타낸 바와 같이 물비 70, 75, 80%, 기포비 80,
100, 120%, 섬유비 0, 0.2, 0.4%이다.

경량기포콘크리트의 성능 측정항목은 굳지 않은 상태
에서 플로우 및 슬러리밀도, 경화 상태에서 경화체 밀도,
압축강도, 휨강도, 인장강도로 하였다.

본 연구와 같이 3개 실험인자에 관하여 각각 3개 실험
수준을 갖는 3인자 3수준의 실험계획은 27개의 다른 배
합을 갖게 되지만, 본 연구에서는 실험계획법에 따라
Table 3과 같이 3인자 3수준의 직교배열법으로 실험을
배열하고 실험인자간의 교호작용을 배제하여 실제 실험
한 배치수를 9회로 저감하여 실험하였으며, 측정된 결과
를 통계적으로 해석하여 각 요인의 영향 및 최적 배합
수준을 결정하였다.

3.2 성능목표

경량기포콘크리트는 그 물성의 수준에 따라 용도가 달
라질 뿐만 아니라 어떤 물성치의 향상은 다른 물성 또
는 성능의 하락을 의미하게 되므로 목표로 하는 제품을
개발하기 위해서는 목표로 하는 성능을 명확히 할 필요

Table 2 Experimental factors & levels

Experimental factor	Experimental level			Test items	
				Fresh state	Hardened state
Water ratio (wt,%)	70	75	80	Flow density	Density Comp. strength Flex. strength Ten. strength
Foam ratio (vol,%)	80	100	120		
Fiber ratio (vol,%)	0.0	0.2	0.4		

Table 3 Design of experiment

Experimental factor	Experimental arrangement			Experimental level		
	Water ratio (wt,%)	Foam ratio (vol,%)	Fiber ratio (vol,%)	Water ratio (wt,%)	Foam ratio (vol,%)	Fiber ratio (vol,%)
Mix no.						
1	0	0	0	70	80	0.0
2	0	1	1	70	100	0.2
3	0	2	2	70	120	0.4
4	1	0	2	75	80	0.4
5	1	1	0	75	100	0.0
6	1	2	1	75	120	0.2
7	2	0	1	80	80	0.2
8	2	1	2	80	100	0.4
9	2	2	0	80	120	0.0

가 있다. 또한 이 성능 목표치에 따라 본 연구의 목표중
의 하나인 최적배합의 결정이 가능하게 된다. 본 연구의
최종 제품은 아파트 세대 간 차음재이므로 연구의 성능목
표는 KS F 4914 「경량기포콘크리트 패널」의 기준에 맞
추어 Table 4와 같이 설정하였다.

3.3 실험 방법

3.3.1 혼합

경량기포콘크리트의 제조방식은 거푸집에 기포를 도입
하는 시점을 기준으로 선발포 방식 (pre-foaming method)
과 후발포 방식 (post-foaming method)으로 구분한다. 선
발포 방식은 거푸집에 타설하기 전에 기포를 도입하는
것이며, 후발포 방식은 타설 후에 기포를 도입하는 것이다.

본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 선발포 방
식을 사용하였으며, 혼합은 수평 드럼에 나선형 블레이
드가 설치되어 있는 리본믹서를 사용하였다.

3.3.2 양생

양생은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 전치양생 (pre-curing,
A구간), 증기양생 (steam curing, B구간), 오토클레이브양
생 (autoclave curing, D구간)을 하고, 증기양생 후에 2시
간 동안의 안정기 (interval, C구간)와 오토클레이브양생
후에 서냉기 (cooling, E구간)를 두는 방식을 채용하였다.
전치양생은 구성재료 중 알루미늄에 의한 에트린자이트
생성 반응에 의해 응결을 유도하여 슬러리를 안정화하기
위한 것이다. 증기양생은 오토클레이브양생시의 압력에
저항하고, 실제 생산 시의 공정 중 취급에 저항하기 위

Table 4 Target performance of product

Division	Standard	Target performance	Remark
Density (kg/m ³)	KS F 4914	0.7~0.9	Dried
Compressive strength (MPa)	KS F 4914	10~12	-
Flexural strength (MPa)	KS F 4914	1.3~1.5	-

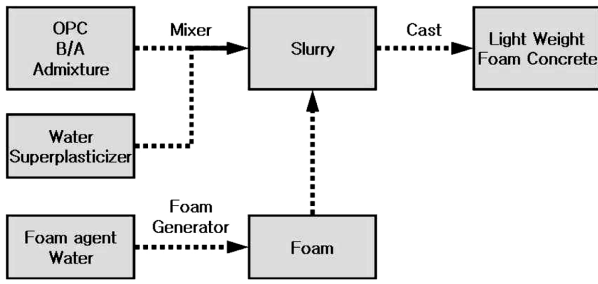


Fig. 3 The making process of lightweight foamed concrete

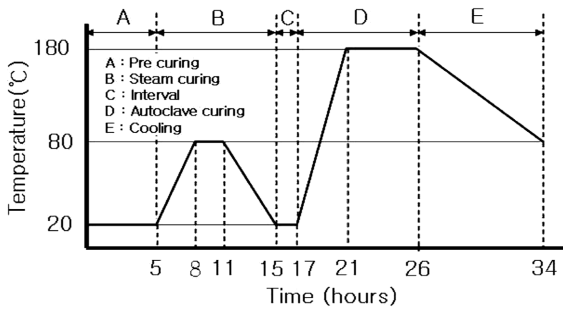


Fig. 4 Curing process

한 강도를 확보하기 위한 것이며, 안정기는 증기양생에 의한 열응력을 해소하기 위한 것이다. 오토클레이브양생은 경량기포콘크리트의 목표 강도를 확보하기 위한 것이며, 오토클레이브양생 후 서냉구간은 열응력에 의한 경화체의 균열 방지를 목적으로 한 것이다.

3.3.3 측정

굳지 않은 경량기포콘크리트의 성능을 확인하기 위하여 실시한 슬러리 밀도 및 플로우 시험은 KS F 4039 「현장 타설용 경량기포콘크리트」에 준하여 실시하였으며, 경화 상태에서는 압축강도는 KS F 4914 경량 기포콘크리트 패널, 휨강도는 KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험방법, 인장강도는 KS F 2423 콘크리트 인장강도 시험방법에 준하여 측정하였다.

3.4 사용 재료

본 연구에 사용된 재료의 물리적 특성을 요약하면 Tables 5~9와 같다. 규산질 재료로 사용한 바텀애쉬는 J 발전의 S화력 발전소의 해사장에 야적되어 있는 것을 반응성 향상을 위해 분말도 6,450 (cm²/g)까지 분쇄한 것을 사용하였다. 바텀애쉬의 화학성분은 XRF를 이용하여 측정하였는데, 수열반응에 필요한 SiO₂와 Al₂O₃의 전체함량이 74.2%를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

칼슘질 재료는 보통포틀랜드시멘트와 소석회를 사용하였다. 시멘트는 경화체의 강도발현을 위한 것으로 밀도 3.15 (kg/m³)의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 소석회는 수열반응 시의 칼슘원으로 사용하기 위한 것으로 C사의 것을 사용하였다.

Table 5 Chemical composition of bottom ash

Sample	Chemical composition (wt,%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Ig.loss
Bottom ash	49.1	25.1	5.7	0.6	0.7	3.3	0.1	15.3

Table 6 Chemical composition of cements and admixtures

Sample	Chemical composition (wt,%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Ig.loss
OPC	25.0	7.7	3.0	61.9	2.1	0.69	0.11	1.8	1.1
AC	4.2	54.7	0.6	36.9	-	0.23	0.2	0.2	0.3
CH	-	-	-	68.3	-	-	-	-	26.7
AG	3.7	0.7	0.0	38.3	0.0	0.03	0.01	54.4	2.9

OPC : ordinary portland cement, AC : alumina cement, CH : calcium hydroxide, AG : anhydrite gypsum

Table 7 Chemical properties of superplasticizer

Item	Density (kg/m ³)	Solidity (%)	pH (neat)	Color
Division				
Naphthalene	1.20	35.6	7 ± 1	Dark brown

Table 8 Physical properties of foam agent

Division	Density (kg/m ³)	Solid (%)	pH
Animal protein foam agent	1.14	35.8	7 ± 1

Table 9 Physical properties of nylon fiber

Division	Density (kg/m ³)	Diameter (mm)	Length (mm)	Melting point (°C)	Tensile strength (MPa)
Nylon	1.16	0.023	7 ± 1	180	896

또한 응결조절을 위해 사용한 알루미늄 시멘트는 U사의 밀도 2.95 kg/m³, 분말도 5,210 cm²/g인 것을 사용하였고, 소석회와 알루미늄시멘트의 급격한 응결을 방지하기 위해 무수석고를 사용하였다.

혼화재료로는 기포콘크리트 슬러리의 유동성을 확보하기 위하여 K사의 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였으며, 기포제는 H사의 동물성 기포제를 사용하였으며 휨인성을 증진시키기 위해 사용한 섬유는 S사의 나일론 섬유를 사용하였다.

3.5 실험 결과 분석

실험 결과의 분석에는 분산분석 (analysis of variance)과 반응표면분석 (response surface analysis)을 이용하였다. 분산분석은 실험 요인 (물비, 기포비, 섬유비)이 각각 경량 기포콘크리트의 유동성 및 강도 특성에 미치는 영향이 유의한지의 여부를 확인하기 위하여 수행하였으며, 반응표면분석은 실험요인의 최적의 배합수준을 결정하기 위하여 수행하였다.

분산분석은 각각 정규분포를 따르는 세 개 이상의 집단 평균을 비교하기 위해 비교 과정에 분산을 사용하는

통계적 기법으로, 여러 모집단의 평균을 주어진 유의수준에서 동시에 비교하여 각 처리집단에서 얻은 표본평균들의 분산과 각 처리집단 내의 분산을 비교함으로써 가설 검증을 통해서 상관관계를 파악하여, 각 요인이 측정치에 미치는 영향이 유의한지의 여부를 90.0, 95.0, 97.5%의 유의수준에서 F-검정 할 수 있다.

반응표면분석은 실험요인인 물비, 기포비, 섬유비를 독립변수로 하고, 밀도 및 압축강도 실험 결과를 반응변수(종속변수)로 하여 1개 종속변수가 3개 독립변수를 갖도록 수식화한 다음 이를 등고선 형태의 2차원 반응표면도로 나타낸 다음, 밀도와 압축강도에 관한 반응표면도를 증첩시켜 최적의 성능 범위를 갖는 배합수준을 결정하는 방법을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Tables 10은 9개 실험배합의 굳지 않은 상태에서의 슬러리 밀도와 플로우 실험 결과를 나타낸 것이다.

4.1 굳지 않은 성상

4.1.1 플로우

Table 11은 굳지 않은 상태에서 실험한 기포콘크리트의 플로우치 측정 결과를 분산분석 하여 그 결과를 실험요인별로 F-검정한 것이다. 실험 요인인 물비, 기포비, 섬유비와 플로우의 F값은 각각 7.18, 1.72, 1.42이며, 실험치가 자유도 2, 에러 2이므로 신뢰한계 95% (유의수준 $\alpha=0.05$) 및 90% (유의수준 $\alpha=0.10$), 기각치 $F_{0.10}$ 및 $F_{0.05}$ 는 각각 19.0, 9.0이다.

3개 실험요인은 신뢰한계 90% (유의수준 $\alpha=0.10$)에서도 모두 유의하지 않은 것으로 나타나 플로우치에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5는 시험 결과를 이용하여 추정된 플로우치 값을 나타낸 것으로 플로우의 평균값은 160~190 mm 사이의 범위에서 변화하고 있다. 플로우에 미치는 각 요인의 영향을 살펴보면, 물비 70~80% 범위에서는 물비의 증가에

Table 10 The physical properties in the fresh state of foamed concrete

No.	Water ratio (wt,%)	Foam ratio (vol,%)	Fiber ratio (vol,%)	Fresh state	
				Flow (mm)	Slurry density (kg/m ³)
1	70	80	0.0	167	1.09
2		100	0.2	165	1.04
3		120	0.4	157	1.04
4	75	80	0.4	190	1.10
5		100	0.0	180	0.93
6		120	0.2	157	0.86
7	80	80	0.2	186	1.05
8		100	0.4	194	0.95
9		120	0.0	192	0.83

Table 11 Analysis of variance on flow

Factor	S	Ø	V	F	F0.05	F0.10
Water ratio	1150.89	2	575.44	7.18	19.0	9.00
Foam ratio	274.89	2	137.44	1.72		
Fiber ratio	228.22	2	114.11	1.42		
Error	160.22	2	80.11	-	-	-

S : the sum of square

Ø : the degree of freedom

V : the mean square

F : the value of F test for the experimental value

F_{0.05} : F value at the significance limit of 0.05

F_{0.10} : F value at the significance limit of 0.10

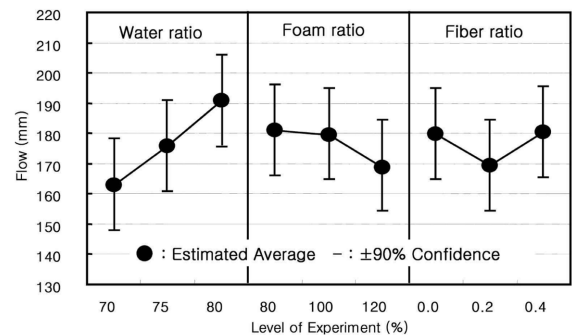


Fig. 5 The variance of flow

따라 플로우치도 증가하고 있는 것으로 나타났다. 또한 기포비 80~120% 범위에서 기포비가 증가함에 따라 플로우치는 감소하고 있으며, 기포비 100%에서 120%의 사이에 그 감소비율이 크게 나타나고 있다. 섬유비에 따라서는 섬유비 0.0~0.4% 범위에서 0.2%가 가장 낮은 플로우치를 나타냈지만, 본 실험에 있어서는 섬유비가 플로우에 유의한 영향을 주지 않고 있다.

4.1.2 슬러리밀도

Table 12는 물비, 기포비, 섬유비에 따른 슬러리의 밀도분산분석 결과를 나타낸 것이다. F-검정을 실시한 결과 각 실험요인에 따른 플로우의 F값은 각각 15.46, 64.92, 5.62로 나타나고 있어, 기포비의 F값은 신뢰한계 95% (유의수준 $\alpha=0.05$)의 기각치인 19.0 보다 크므로, 기포비가 슬러리의 밀도에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나 섬유비는 신뢰한계 90% (유의수준 $\alpha=0.10$)에서도 유의하지 않은 것으로 나타나고 있어 슬러리 밀도에 미치는 영향이 작은 것으로 나타났다.

Fig. 6은 슬러리 밀도에 대한 실험인자의 수준별 모평

Table 12 Analysis of variance on slurry density

Factor	S	Ø	V	F	F _{0.05}	F _{0.10}
Water ratio	0.01	2	0.006	15.46	19.0	9.00
Foam ratio	0.06	2	0.028	64.92		
Fiber ratio	0.01	2	0.002	5.62		
Error	0.00	2	0.000	-	-	-

균 측정치의 변화를 나타낸 것으로 슬러리 밀도의 변화에서 물비와 기포비가 증가할수록 슬러리 밀도는 감소하지만, 섬유비의 증가에 따라서는 슬러리의 밀도가 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

기포콘크리트는 분체계 재료에 물과 기포를 혼합한 것이므로 본 실험과 같이 액상 및 기체상 재료의 혼입에 의해 밀도가 변화하게 되는 것은 당연한 결과일 것이지만, 본 연구 결과 기포의 혼입이 수량의 증가보다 슬러리의 밀도에 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

또한 섬유 사용량이 낮은 범위에서 검토한 것이 주요인일 것으로 사료되지만, 본 실험과 같은 범위의 섬유비에서는 섬유의 혼입은 슬러리 밀도에 미치는 영향이 작다는 것을 알 수 있다.

4.2 경화 특성

경화상태에서의 경화체의 각종 물성 실험 결과를 Table 13에 나타내었다.

4.2.1 절건밀도

Table 14는 물비, 기포비, 섬유비에 따른 절건밀도의 분산분석 결과를 나타낸 것이다. F-검정을 실시한 결과 F_0

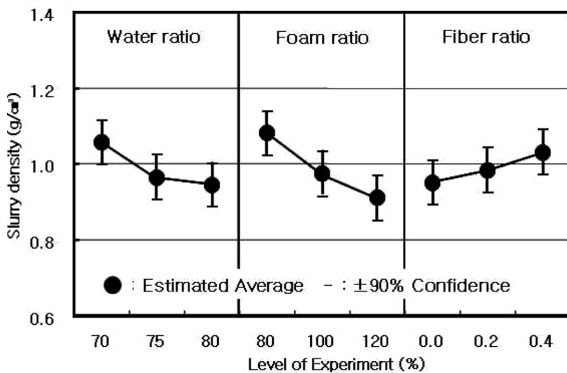


Fig. 6 The variance of slurry density

Table 13 The physical properties in hardened state of lightweight foamed concrete

No.	Water ratio (wt, %)	Foam ratio (vol, %)	Fiber ratio (vol, %)	Hardened state			
				Oven dry density (g/cm ³)	Comp. strength (MPa)	Flex. strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
1	70	80	0.0	0.84	16.2	1.2	0.9
2		100	0.2	0.83	12.6	1.3	0.9
3		120	0.4	0.75	11.0	1.5	0.6
4	75	80	0.4	0.79	15.3	1.2	1.0
5		100	0.0	0.69	11.4	1.4	0.6
6		120	0.2	0.63	8.2	1.1	0.6
7	80	80	0.2	0.88	14.7	1.3	0.6
8		100	0.4	0.78	12.1	1.3	0.5
9		120	0.0	0.58	9.7	0.6	0.6

Table 14 Analysis of variance on oven dry density

Factor	S	Ø	V	F	F _{0.05}	F _{0.10}
Water ratio	0.02	2	0.008	6.67	19.0	9.00
Foam ratio	0.05	2	0.025	21.20		
Fiber ratio	0.01	2	0.005	4.47		
Error	-	2	0.001	-	-	-

값은 물비 6.67, 기포비 21.20, 섬유비 4.47로 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서의 기각치인 19.0보다 큰 것은 기포비인 것으로 나타나 기포비는 유의수준 5%에서 절건밀도에 미치는 영향이 유의하지만, 물비와 섬유비는 유의수준 10%에서도 유의하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 7은 절건밀도 변화에 대한 인자들의 수준별 모평균의 추정치를 나타낸 것이다. 예측한 바와 같이 시험체의 밀도는 기포비가 증가할수록 감소하였으며, 감소비는 기포비가 증가할수록 약간 증가하고 있다.

4.2.2 압축강도

Table 15는 물비, 기포비, 섬유비에 따른 압축강도의 분산분석 결과를 나타낸 것이다. F-검정을 실시한 결과 F_0 값은 물비 20.66, 기포비 257.864, 섬유비 7.29로 물비 및 기포비는 유의수준 $\alpha = 0.10$ 에서의 유의한 것으로 나타났다, 특히 기포비는 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서도 유의하게 나타나 기포비는 압축강도에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 반면 섬유비는 압축강도에 미치는 영향이 매우 낮은 것으로 나타났다. 이러한 원인으로 인성 강화를 위해 사용한 섬유가 고온고압의 오토클레이브 양생 과정에서 녹아 매트릭스의 강성에 기여를 못한 것

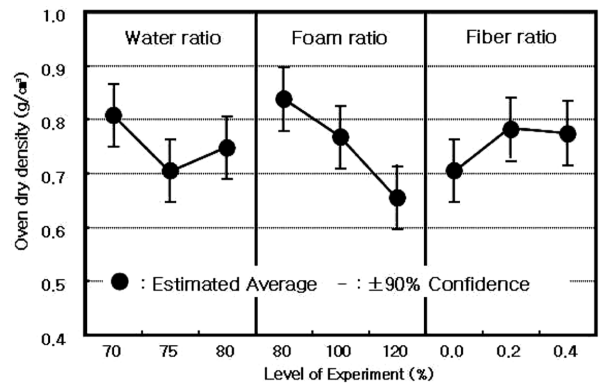


Fig. 7 The variance of oven dry density

Table 15 Analysis of variance on compressive strength

Factor	S	Ø	V	F	F _{0.05}	F _{0.10}
Water ratio	401.61	2	200.80	20.66	19.0	9.0
Foam ratio	5012.83	2	2506.42	257.86		
Fiber ratio	141.76	2	70.88	7.29		
Error	19.44	2	9.72	-	-	-
Total	-	-	-	-	-	-

으로 판단된다.

Fig. 8은 물비, 기포비, 섬유비 변화에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 기포비가 증가할수록 압축강도는 크게 감소하고 있는데, 이는 기포콘크리트가 다공질로 매트릭스의 강도보다 공극률의 영향을 지배적으로 받기 때문이다.¹¹⁾

4.2.3 휨강도

Table 16은 물비, 기포비, 섬유비에 따른 휨강도의 분산분석 결과를 나타낸 것이다. F-검정 결과 F_0 값은 물비 0.62, 기포비 0.62, 섬유비 0.58로 유의수준 $\alpha = 0.05$ 및 0.1에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 또한 휨강도 변화에 대한 인자들의 수준별 모평균의 추정치를 나타낸 Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 휨강도에 미치는 물비, 기포비, 섬유비의 영향이 매우 작음을 알 수 있다.

섬유비의 경우 휨강도에 미치는 영향이 클 것을 기대하였으나 경화체가 다공성으로 이루어져 있고, 압축강도의 결과에서 기술한 내용과 같이 고온·고압조건에서 섬

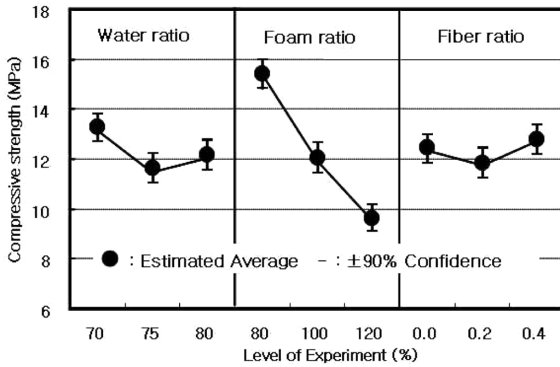


Fig. 8 The variance of compressive strength

Table 16 Analysis of variance on flexural strength

Factor	S	Ø	V	F	$F_{0.05}$	$F_{0.10}$
Water ratio	12.56	2	6.289	0.62	19.0	9.00
Foam ratio	11.966	2	5.988	0.60		
Fiber ratio	11.696	2	5.85	0.58		
Error	20.106	2	10.05	-	-	-

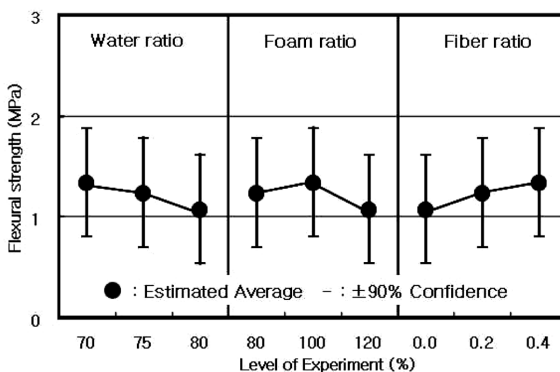


Fig. 9 The variance of flexural strength

유가 녹아 휨강성의 증진효과가 없었던 것으로 사료된다.

4.2.4 쪼갬 인장강도

Table 17은 물비, 기포비, 섬유비에 따른 인장강도의 분산분석 결과를 나타낸 것이다. F-검정을 실시한 결과 F_0 값은 물비 1.16, 기포비 1.05, 섬유비 0.03으로 유의수준 $\alpha = 0.05$ 및 0.1에서의 기각치 보다 낮아 휨강도에 미치는 물비, 기포비, 섬유비의 영향이 유의하지 않음을 알 수 있다.

특히 섬유비의 경우에는 인장강도에 영향을 미칠 것으로 기대하였으나 본 실험의 범위 내에서는 섬유량의 증진에 의한 인장강도의 증진은 전혀 나타나지 않았다. 이와 같은 원인은 앞에서 고찰한 바와 같이 고온고압의 수열합성조건에서 섬유가 녹아 인장강도 증진효과가 없었기 때문으로 사료된다.

4.3 목표성능을 만족하는 최적배합조건 도출

직교배열법을 적용하여 도출된 결과를 바탕으로 앞에서 밝힌 목표성능에 적합한 배합조건을 찾기 위하여 반응표면분석법을 이용하여 최적배합조건을 도출하였다. 최적배합을 찾기 위하여 선정된 종속변수는 밀도와 압축강도이었다. 종속변수 중 밀도는 추후 시제품 및 제품 생산 시 벽체 칸막이로 사용될 것을 감안하여 시공성의 용이 및 차음성능을 고려하여 밀도를 선정하였으며, 강도는 시공과정 및 내충격성을 고려하여 변수로 선정하였다.

본 실험에서 실시한 실험인자인 물비, 기포비, 섬유비의 밀도 및 압축강도에 대한 분산분석 결과 섬유비는 밀도와 압축강도에 미치는 유의성이 매우 낮아 제외하고 물비 및 기포비만을 검토 대상으로 하였다.

Table 18은 물비와 기포비를 독립변수로 하고 절건밀도를 종속변수로 했을 때의 독립변수와 종속변수간의 분산분석 결과를 나타낸 것이다. 분산분석 결과 독립변수의 F값은 유의수준 2.5% ($\alpha = 0.025$)에서 유의한 것으로 나타나 두 독립변수가 절건밀도의 변화에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Table 17 Analysis of variance on tensile strength

Factor	S	Ø	V	F	$F_{0.05}$	$F_{0.10}$
Water ratio	11.24	2	5.62	1.16	19.0	9.00
Foam ratio	10.20	2	5.10	1.05		
Fiber ratio	0.34	2	0.17	0.03		
Error	9.72	2	4.86	-	-	-
Total	-	8	-	-	-	-

Table 18 Anova table of oven dry density

Factor	S	DF	Mean square	F	$F_{0.025}$
Regression	0.0785	5	0.0157	21.23	9.01
Residual	0.0022	3	0.0007	-	-
Total	0.0808	8	-	-	-

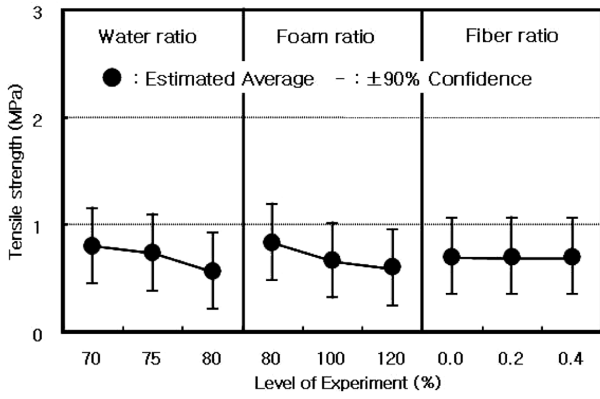


Fig. 10 The variance of tensile strength

$$Y = 0.7178 - 0.0917X_2 - 0.03X_1 - 0.0217X_2^2 - 0.0525X_1X_2 + 0.0733X_1^2 \quad (1)$$

- R² = 0.97
- Y = Dried density
- X₁ = Water ratio
- X₂ = Foam ratio

또한 종속변수인 절건밀도에 대한 독립변수인 물비 및 기포비의 회귀식은 식 (1)과 같으며, 본 회귀식의 결정계수 R²=0.97로서 매우 높은 신뢰도를 보이고 있다. 본 회귀식을 절건밀도의 반응표면으로 나타낸 것이 Fig. 11이며, 그림 내에서 숫자는 밀도를 의미하며, 해칭한 부분은 목표 밀도를 만족하는 범위를 나타낸 것이다.

Table 19는 종속변수인 물비와 기포비에 대한 독립변수인 압축강도에 대한 분산분석 결과를 나타낸 것이다. 분산분석 결과 절건밀도의 경우와 유사하게 독립변수의 F값은 유의수준 2.5% (α = 0.025)에서 유의한 것으로 나

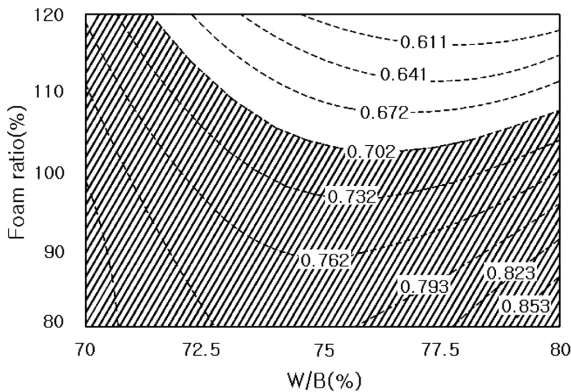


Fig. 11 Response surface plotting of oven dry density (kg/l) according to W/B and foaming ratio

Table 19 Anova table of compressive strength

Factor	S	DF	Mean square	F	F _{0.025}
Regression	54.52	5	10.90	20.18	9.01
residual	1.62	3	0.54		
Total	56.14	8			

타나 두 독립변수가 압축강도의 변화에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

또한 종속변수인 압축강도에 대한 독립변수인 물비 및 기포비의 회귀식은 식 (2)와 같으며, 본 회귀식의 결정계수 R²=0.97로서 매우 높은 신뢰도를 보이고 있다. 본 회귀식을 절건밀도의 반응표면으로 나타낸 것이 Fig. 12이며, 그림 내에서 숫자는 MPa로 나타낸 압축강도를 의미하며, 해칭한 부분은 목표 강도를 만족하는 범위를 나타낸 것이다.

$$Y = 11.3111 - 2.8833X_2 - 0.5500X_1 - 0.4833X_2^2 - 0.0500X_1X_2 + 1.833X_1^2 \quad (2)$$

- R² = 0.97
- Y = Compressive strength
- X₁ = Water ratio
- X₂ = Foam ratio

Fig. 13은 밀도와 압축강도의 반응표면도를 중첩시켜 나타낸 것으로 중복 해칭된 부분이 목표 성능을 만족하는 범위를 의미하며, 전반적으로 절건밀도 보다는 압축강도의 범위가 좁게 나타나 압축강도가 적정 범위 설정의 주요 지표인 것으로 나타났다.

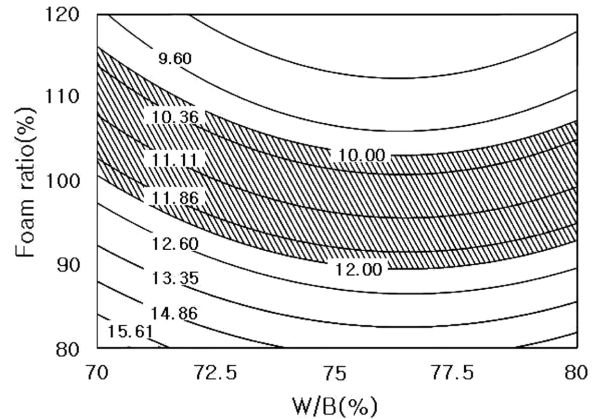


Fig. 12 Response surface plotting of compressive strength (MPa) according to W/B and foaming ratio

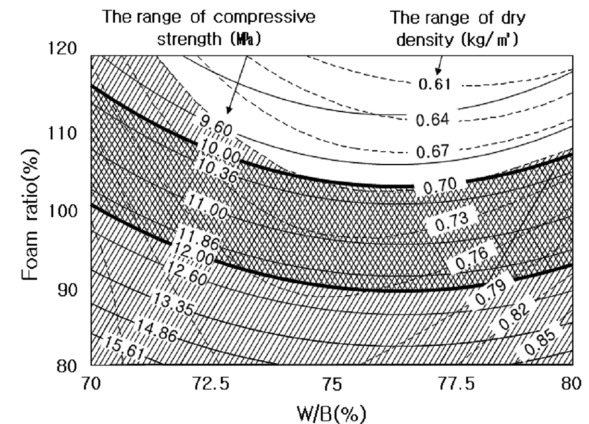


Fig. 13 Response surface plotting of target performance range

바텀애쉬를 사용한 오토클레이브 경량기포콘크리트(ALFC)의 최적 배합비 결정에 관한 실험적인 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 미분쇄한 바텀애쉬를 규산질 원료로 사용하고 석회질원료와 고온고압의 수열반응 조건에서 반응시킨 결과 토버모라이트 수화물을 매우 잘 형성하고 있어 바텀애쉬를 오토클레이브에 의한 경화체 제조용 원료로 사용 가능한 것으로 나타났다.
- 2) 바텀애쉬를 사용한 기포슬러리의 굳지 않은 상태에서 플로우에 영향을 미치는 주요 인자는 물비이고, 슬러리의 밀도에 영향을 미치는 주요인자는 기포비와 물비인 것으로 나타났으며, 기포비는 플로우에, 섬유비는 플로우 및 슬러리 밀도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 3) 바텀애쉬를 사용한 오토클레이브 경량기포콘크리트의 경화상태에서 분산분석 결과 기포비는 절건밀도 및 압축강도에 매우 유의한 영향을 미치는 인자이며, 물비는 압축강도에서만 유의한 인자로 나타났지만, 휨강도 및 쪼갠인장강도에는 두 요인 모두 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 섬유비의 경우에는 절건밀도, 압축강도, 휨강도, 쪼갠인장강도의 모든 측정치에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 4) 휨강도 및 인성 증진을 위해 사용한 나일론 섬유는 고온고압의 수열합성의 양생과정을 거치는 동안 섬유의 분해로 인해 강도 발현 및 증진효과가 거의 없는 것으로 나타남에 따라 고온·고압조건에 적합한 섬유에 대한 선정 및 후속 실험이 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 기포비와 물비를 독립변수로 하여 압축강도와 절건밀도의 반응표면분석을 행한 결과, 반응표면에서 절건밀도 보다는 압축강도의 범위가 좀 더 좁게 나타나 압축강도가 최적 배합비 결정에 있어서 좀 더 지배적인 요인인 것으로 나타났다.

요 약 석탄의 수요증가와 소비는 석탄의 이용과정에서 생성되는 고품폐기물의 처리와 관련된 문제들을 증대시켰다. 석탄 부산물의 주요한 이용은 건설과 관련돼 적용되었다. 석탄부산물의 하나인 플라이애쉬는 폐기물 재활용 생산의 일부분으로 설명될 수 있기 때문에, 과학적인 조사의 대다수는 많은 사용에서 플라이애쉬의 활용에 관하여 초점이 맞춰졌다. 반면에, 바텀애쉬의 재활용에 관해서는 관심을 기울이지 않았다. 이러한 소홀함의 결과로서, 많은 양의 바텀애쉬가 처리장에 쌓여왔다. 따라서, 바텀애쉬의 적당한 이용을 위한 안전하고 경제적인 해결을 얻기 위한 필요성이 좀 더 긴급하게 되었다. 논문에 나타난 연구는 오토클레이브 경량기포콘크리트를 제조하기 위해 사용된 바텀애쉬의 성능 특성을 확인하기 위해 계획되었다. 실험실 측정 결과, 토버모라이트는 수열합성반응을 위한 재료로서 바텀애쉬가 사용되었을 때 생성되는 것으로 나타났다. 분산분석에 따른 결과로서, 기포슬러리의 굳지 않은 상태에서 물비는 플로우와 슬러리의 밀도에 영향을 미치는 것으로 나타났지만, 기포비는 슬러리의 밀도에만 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 굳은 상태에서 기포비는 경량기포콘크리트의 절건밀도와 압축강도에 영향을 끼쳤지만 휨강도와 인장강도에는 영향을 끼치지 않았다. 반응표면분석의 결과에서, 목표성능을 얻기 위한, 바텀애쉬를 사용한 경량기포콘크리트의 최적배합조건은 물비 70~80%, 기포비 90~100%로 나타났다.

핵심어 : 바텀애쉬, 오토클레이브, 경량기포콘크리트, 통계분석

본 연구는 전력산업연구개발의 연구비 지원에 의해 공주대학교 자원재활용신소재지역혁신센터 (RIC/NMR)가 수행한 연구 결과의 일부로 관련기관에 감사의 말씀을 전하며, 또한 저자의 일부는 공주대학교 BK21 “친환경 건설산업인력양성 사업”에 참여하고 있음을 밝힙니다.

참고문헌

1. 오성원, “석탄회처리 현황과 대책,” 석탄회 활용 국제 워크숍, 1996, pp. 3~16.
2. 손양훈, 전력산업의 장기한계비용-장기전력수급계획에 기초하여, 에너지경제연구원, 1992, pp. 5~11.
3. Zhang, Q., Li, Z. L., and Wang, H., “A Study on the Beneficiation and Application of Fly Ash from Power Plants,” *XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney*, 1993, pp. 1447~1452.
4. 光田 式, “オートクレーブ 処理ケイ酸カルツウム材料,” *セラミクス*, Vol. 12, No. 8, 1988, pp.748~752.
5. 光田 式, “水熱反応とケイ酸カルツウム工業,” *セラミクス*, Vol. 15, No. 3, 1990, pp. 184~196.
6. Sudo, N. and Akiba, T., *Introduction to Cement Chemistry*, Japan Cement Industry Association, 1991, pp. 15~20.
7. Tada, M., “Autoclaved Lightweight Concrete,” *Gypsum & Lime*, No. 222, 1989, pp. 27~34.
8. Taylor, H. F. W., *The Chemistry of Cements*, Vol. 1, Academic Press, London and New York, 1964, pp. 186~190.
9. 恒松修二, 井上憲弘, 原 尚道, “フライツシコと石灰, セツコウとの水熱反應性,” *Gypsum & Lime*, No. 211, 1987, pp. 12~18.
10. 산업자원부, 비정제 석탄회를 이용한 소음저감재 개발, 산업자원부, 2005, pp. 179~272.
11. 오세출, 서치호, 지석원, “플라이애쉬를 혼입한 기포콘크리트의 압축강도 특성에 관한 실험적 연구,” *대한건축학회논문집*, 19권, 4호, 2003, pp. 125~129.