



기포제 종류 및 희석 농도에 따른 기포 콘크리트의 특성

김진만¹⁾ · 정지용¹⁾ · 황의환²⁾ · 신상철^{1)*}

¹⁾공주대학교 건축공학과 ²⁾공주대학교 화학공학과

Properties of Foamed Concrete According to Types and Concentrations of Foam Agent

Jin-Man Kim,¹⁾ Ji-Yong Jeong,¹⁾ Eui-Hwan Hwang,²⁾ and Sang-Chul Shin^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

²⁾Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

ABSTRACT Recently, the government has been working feverously to save energy and reduce greenhouse gas emission by enacting Basic Act on Low Carbon Green Growth at the national level. Improving the insulation performance of building exterior and insulator can reduce the energy in the building sector. This study is about developing light-weight foamed concrete insulation panel that can be applied to buildings to save energy and to find the optimal condition for the development of insulation materials that can save energy by enhancing its physical, kinetic and thermal characteristics. Various experimental factors and conditions were considered in the study such as foam agent types (AES=Alcohol Ethoxy Sulfate, AOS=Alpha-Olefin Sulfonate, VS=Vegetable Soap, FP=Fe-Protein), foam agent dilution concentration (1, 3, 5%), and foam percentage (30, 50, 70%). Experiment results indicated that the surface tension of aqueous solution including foam agent, was lower when AOS was used over other foam agents. FP produced relatively stable foams in 3% or more, which produced unstable foams containing high water content and low surface tension when diluted at low concentration. Depending on foam agent types, compressive strength and thermal conductivity were similar at low density range but showed some differences at high concentration range. In addition, when concentrations of foam agent and foaming ratio increased, pore size increased and open pores are formed. In all types of foam agent, thermal conductivity were excellent, satisfying KS standards. The most outstanding performance for insulation panel was obtained when FP 3% was used.

Keywords : foam agent, foam, surface tension, foamed concrete, thermal conductivity

1. 서 론

우리나라의 총 에너지소비량 중 건물 부문은 약 25%로서 작지 않은 비중을 차지하고 있다. 건물 부문에서의 에너지사용량을 줄이는 가장 쉬운 방법은 에너지 손실을 줄이는 것이다. 이는 설비기구의 탄력적 사용, 냉·난방 연료의 효율적 관리 등으로 해결할 수 있고 건물외피와 단열재의 열적 특성을 검토하여 건물 자체의 단열성능을 높이는 것도 하나의 방법이 될 수 있다.

단열재란 열전달을 방해할 목적으로 사용하는 열전도율이 낮은 물질로서 크게 유기질 단열재와 무기질 단열재로 구분된다. 유기질 단열재는 스티로폼이나 폴리우레탄, 폴리에틸렌, PVC, 고무 등의 고분자물질을 발포시킨 단열재로서 흡수성이 작고 시공성이 좋으나 화재에 취약

한 단점을 가지고 있다.¹⁾ 실례로, 2010년 부산에서 발생한 초고층 오피스텔 건물의 화재는 건물 외벽에 미관을 위해 사용된 알루미늄 페널과 그 심재인 가연성 폴리에틸렌이 원인으로 나타났다. 이를 계기로 내화성능이 우수한 무기질 단열재에 대한 관심이 더욱 높아지고 있는 실정이며 에너지 절감이 그 어느 때보다도 절실한 시점에서 최적의 단열시스템을 설계하고 검토하여 개선하는 과제는 매우 중요한 의미를 가진다.

한편, 무기질 재료 중 하나인 경량기포 콘크리트는 기포제를 사용하여 다량의 공극을 발생시켜 제조하는 규산칼슘 경화체로서 매트릭스 내에 무수히 많은 기공들이 형성되어 있어 셀형 단열(cellular insulation) 특성을 갖고 있기 때문에 단열재로서 충분한 가능성을 내포하고 있다.

기포 콘크리트의 공극형상은 흡음, 투수성에 효과적인 열린공극(continuous pore)과 차음, 단열성능이 우수한 닫힌공극(closed pore)으로 구분된다. 시멘트 페이스트 속에 혼합된 기포는 처음에는 연결된 부분 없이 구 모양을 형성하고 있다가 기포 교차점(plateau border)에서의 배액현

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

Received October 5, 2011, Revised December 2, 2011,

Accepted December 2, 2011

©2012 by Korea Concrete Institute

상과 함께 기포 상호간에 서로 붙으려고 하는 응집력에 의하여 연결된 공극을 형성하게 된다.^{2,5)} 기포 콘크리트를 단열재로서 활용하기 위해서는 단힌공극의 형성을 유도해야한다. 기포의 양이 많을 경우에는 기포간 결합을 촉진시킴으로써 열린공극을 형성하지만 시멘트의 양이 많거나 기포의 양이 적을 경우에는 단힌공극을 만들 수 있다.^{6,7)} 그러나 공극의 형상을 자유롭게 컨트롤하여 기포 콘크리트를 제조하기란 쉽지 않다. 현재 실용화되어 있는 경량기포 콘크리트에서도 소포에 의한 체적 안정성 손상, 낮은 강도발현, 과다한 균열, 높은 흡수율 등의 많은 문제점이 있어 이의 개선이 필요한 실정이다. 또한 에너지 절감 측면에서 열적 성능을 갖는 최적 경량기포 콘크리트에 대한 연구가 전무한 실정이며, 기술적인 측면에서도 제조기술과 배합설계에 대한 표준화 및 시방화가 미비한 실정이다.

이 연구는 건물부문의 에너지 절감을 목적으로 건물에 적용가능한 경량기포 콘크리트 단열패널을 개발하기 위한 연구의 일부로서 현재 상용화되어 있는 4종류의 기포제를 대상으로 최적의 기포 콘크리트 제조조건을 검토한 것이다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

이 연구의 실험 계획은 Table 1과 같다. 기포제 종류 및 희석농도가 기포 콘크리트에 미치는 영향을 파악하기

Table 1 Plan of experiment

Factors	Levels	Test items
Types of foam agent	AES ⁽¹⁾ , AOS ⁽²⁾ VS ⁽³⁾ , FP ⁽⁴⁾	· Surface tension · Foaming rate · Unit weight of foam
Concentrations of foam agent (%)	0.5 ⁽⁵⁾ , 1, 3, 5	· Flow · Density (slurry, oven-dried)
Percent of foam (%)	30, 50, 70	· Compressive strength · Thermal conductivity · Pore shape

⁽¹⁾AES : alcohol ethoxy sulfate, ⁽²⁾AOS : α -clefin sulfonate
⁽³⁾VS : vegetable soap, ⁽⁴⁾FP : Fe-protein
⁽⁵⁾0.5% is applicable only to surface tension, foaming rate and unit weight of foam.

Table 2 Mixing design of experiment

W/B (%)	C/S mol ratio	Types of foam agent	Concentrations of foam agent (%)	Percent of foam (%)	Water (kg/m ³)	Unit volume (l/m ³)						Unit weight (kg/m ³)					
						PC ⁽¹⁾	Q ⁽²⁾	AC ⁽³⁾	CH ⁽⁴⁾	AG ⁽⁵⁾	Foam	PC	Q	AC	CH	AG	
40	1.0	AES	1	70	160	60	64	6	4	6	700	189	168	19	9	15	
		AOS		3	50	267	100	108	10	6	9	500	315	280	31	15	25
		VS FP		5	30	374	140	150	14	9	13	300	441	393	44	21	35

⁽¹⁾PC : portland cement, ⁽²⁾Q : quartz, ⁽³⁾AC : alumina cement ⁽⁴⁾CH : calcium hydroxide, ⁽⁵⁾AG : anhydrite gypsum

위하여 우선 기포제 자체의 재료특성을 검토하였다. 기포제는 국내 시장에서 유통 중인 음이온계 계면활성제가 주성분인 AES와 AOS, 식물성 수지 비누계의 VS, 가수분해 단백질계인 FP의 4종을 대상으로 하였다. 각 기포제의 농도를 0.5%, 1%, 3%, 5% 증량비로 희석한 후, 기포 희석액의 표면장력을 측정하였고 기포발생기에서 제조된 기포의 발포율과 단위중량을 측정하였다.

또한, 상기 실험에서 도출된 기포의 특성이 기포 콘크리트의 물리적 특성 및 열적 특성 변화에 미치는 영향을 검토하였다. 기포제 4종을 1%, 3%, 5%의 희석농도로 하여 제조된 기포를 슬러리 용적 대비 30%, 50%, 70%로 혼합하여 기포 콘크리트의 밀도영역을 세 수준으로 설정하였으며 굳지 않은 상태에서 플로우와 슬러리 밀도를, 경화상태에서 절건밀도와 압축강도, 열전도율, 공극형상을 측정하였다. Table 2는 실험배합을 나타낸 것으로 물·결합재 40%, CaO/SiO₂ mol ratio는 1.0으로 하였다.

2.2 사용 재료

기포제의 물리·특성은 Table 3과 같다. Table 4는 사용된 재료의 화학조성을 나타낸 것이다. 기포 콘크리트의 강도발현을 위한 수열합성반응에서 칼슘질 원료로 사용되는 시멘트는 KS L 5201 규정에 만족하는 국내 H사의 보통 포틀랜드 시멘트(밀도 3.15 t/m³, 분말도 약 3,000 cm²/g)를 사용하였다. 실리카질 원료로는 분말도가 3,000 cm²/g 이상이며 SiO₂ 함량이 약 88%인 규사미분을 사용하였다. 또한 초기 응결촉진 및 재료분리 방지를 위해 Al₂O₃ 함량이 약 60%인 알루미늄 시멘트(밀도 2.65 t/m³, 분말도 4,000 cm²/g)를 사용하였다. 소석회는 calcium silicate 화합물의 수화 촉진을 위해, 무수석고는 알루미늄 시멘트에 의한 믹싱 중 응결방지를 목적으로 첨가하였다. 고성능 감수제는 나프탈렌계로써 시멘트 증량의 1% 사용하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 기포 및 기포 콘크리트 제조 방법

Fig. 1은 기포 콘크리트를 제조하기 위한 혼합방법을 나타낸 것으로 선발포 방식으로 제조하였다. 선발포 방식은 미리 제조한 기포를 기포 콘크리트 슬러리에 첨가하는 것

Table 3 Physical and chemical properties of foam agent

Types	Active matter (%)	Free oil (%)	Na ₂ SO ₄	Klett color ⁽¹⁾ (5%AM)	PH (Neat, 25°C)	Specific gravity (20°C)
AES	28.17	0.30	4.00	0.15	7.53	-
AOS	35.25	1.10	0.24	25.00	12.90	-
VS	25.70	-	-	-	7.47	1.02
FP	35.80	-	-	-	7.44	1.16

⁽¹⁾Klett color : color scale for measuring detergent of surfactant

Table 4 Chemical composition of binders

Types	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	SiO ₃	K ₂ O	SrO	ZrO ₂	TiO ₂
PC	72.1	11.2	2.3	0.1	5.5	5.2	2.7	0.1	-	0.3
AC	37.1	2.8	59.8	-	0.2	-	-	-	-	-
Q	1.2	88.1	5.0	0.1	3.5	-	1.8	-	-	0.4
CH	93.8	1.4	0.6	0.1	1.4	1.5	-	0.1	-	-
AG	38.0	2.3	0.8	-	0.2	58.7	-	0.1	-	-

으로 기포의 조절이 자유로워 경화체의 밀도를 컨트롤할 수 있으며, 시공성이 양호하고 구형의 기포를 생성할 수 있다. 기포 제조는 공기압출방식으로 기포제 희석 수용액을 유입시킨 후 발포기를 통해 제조하였고, 시멘트페이스트는 수열합성반응을 유도하기 위해 보통 포틀랜드 시멘트와 규사미분을 기본으로 기타 혼합재를 아스팔트믹서를 사용하여 30초간 건비빔한 후, 배합수를 첨가하여 저속에서 1분, 고속에서 1분간 혼합하여 제조하였다.

시험체는 시멘트페이스트에 미리 발생시켜 놓은 기포를 넣어 리본믹서를 이용하여 충분히 혼합한 후 제작하였다. 시험체의 밀도, 압축강도는 100 mm 큐빅 몰드, 휨·인장강도는 100 mm×100 mm×400 mm 빔 몰드, 열전도율은 300 mm×300 mm×50 mm 프리즘 몰드에 성형하여 측정하였다.

2.3.2 양생 방법

Fig. 2는 이 실험의 양생방법을 나타낸 것으로 전치양생, 증기양생, 오토클레이브양생의 3단계로 실시하였다. 몰드에 타설한 기포 콘크리트는 기포의 안정성을 확보하기 위하여 상온에서(20±2°C) 5시간 동안 양생하였다. 증기양생은 몰드 탈형후 시험체의 핸들링 가능한 강도확보를 위해 20°C에서 승온 4시간(15°C/hour) 후, 80°C에서 5시간동안 양생하였다. 오토클레이브양생은 CaO와 SiO₂의 수열합성반응을 유도하여 토버모라이트에 생성에 의한 최종강도 발현을 위하여 승온 4시간(40°C/hour) 후 180 °C, 10 atm 조건에서 5시간 동안 유지한 후, 자연감압·냉각하였다.

2.3.3 측정 방법

기포 자체의 재료특성을 알아보기 위한 기포 희석액의 표면장력실험은 <KS M ISO 304 계면활성제 - 액체막을 끌어올림에 의한 표면장력의 측정>에 준하여 Du nouy

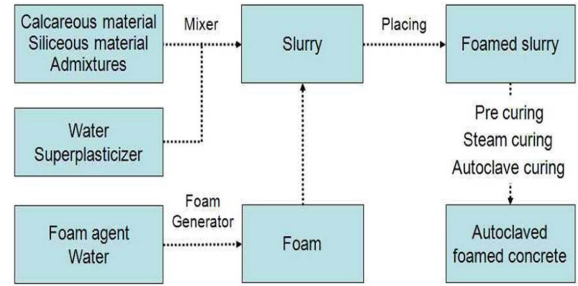


Fig. 1 Mixing method

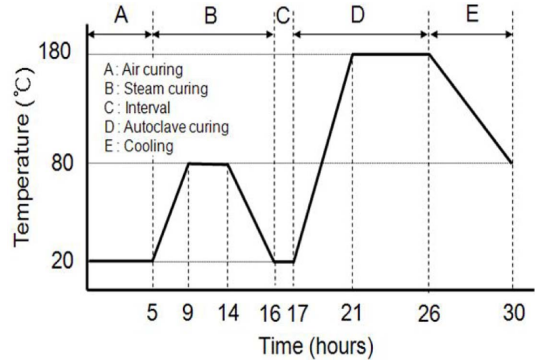


Fig. 2 Curing process

tensiometer를 이용해 측정하였다. 압축공기에 의해 발생된 기포의 발포율은 3 L 단위용적용기의 중량 대비 용적으로 측정하였다.

기포 콘크리트의 플로우는 <KS F 4039, 현장 타설용 기포 콘크리트>, 절건 밀도는 <KS F 2701, 경량 기포 콘크리트 블록>에 준하여 실시하였다. 압축강도는 <ASTM C 495-99a standard test method for compressive strength of lightweight insulating concrete>에 의하여 측정하였다. 열전도율은 300 mm×300 mm×50 mm 형태로 성형한 기포 콘크리트 패널을 독일 N사의 HFM436을 이용해 <KS L 3808, 발포 폴리스티렌(PS) 단열재>에 의거하여 실시하였고, 평균온도 21±3°C 범위에서 열류방향은 위쪽으로 향하게 하였다. 또한, 시험체의 중앙을 절단한 후 절단면의 공극형상을 광학현미경을 통해 10배율로 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

이 연구에서 실시한 기포제 종류 및 희석농도에 따른 기포 콘크리트의 특성은 Table 5와 같다.

3.1 표면장력

기포의 안정성은 기포를 생성하는 용액의 표면장도, 표면탄성 등과 관련이 있으며, 표면장력이 작으면 기포의 생성이 용이하고 안정성이 뛰어나다고 할 수 있다. Fig. 3은 기포제 종류 및 희석농도에 따른 표면장력의 변화를 나타낸 것이다. 표면장력은 일반적인 물에서 72.15 mN/m인데 비하여 기포제를 첨가한 희석액의 경우 저하하고 있

Table 5 Results of experiment

Types of foam agent	Concentration of foam agent (%)	Percent of foam (%)	Foam			Foamed concrete				
			Surface tension (mN/m)	Foaming rate (%)	Unit weight of foam (kg/m ³)	Flow (mm)	Slurry density (t/m ³)	Oven-dried density (t/m ³)	Compressive strength (MPa)	Thermal conductivity (W/mK)
AES	(0.5) ⁽¹⁾ 1	70	(42) 47	(556) 1,763	(152) 54	168	0.53	0.37	1.56	0.10
		50				195	0.96	0.76	4.89	0.18
		30				240	1.35	1.12	12.22	0.28
	3	70	47	2,679	36	174	0.50	0.37	1.32	0.09
		50				203	0.91	0.71	4.19	0.18
		30				229	1.32	1.08	11.84	0.24
	5	70	46	2,573	37	206	0.50	0.37	0.90	0.10
		50				215	0.90	0.72	4.12	0.18
		30				246	1.33	1.09	11.75	0.30
AOS	(0.5) 1	70	(31) 29	(316) 796	(240) 112	189	0.52	0.36	1.19	0.09
		50				169	0.92	0.69	5.38	0.25
		30				228	1.35	1.04	13.46	0.30
	3	70	29	2,340	41	180	0.49	0.35	0.93	0.09
		50				175	0.89	0.68	5.14	0.27
		30				217	1.33	1.02	13.19	0.37
	5	70	30	3,020	32	165	0.48	0.34	0.79	0.09
		50				171	0.88	0.67	4.33	0.27
		30				219	1.31	1.00	11.56	0.39
VS	(0.5) 1	70	(40) 39	(527) 1,445	(159) 65	214	0.59	0.46	2.66	0.11
		50				223	1.00	0.82	6.45	0.19
		30				223	1.42	1.23	15.81	0.29
	3	70	45	2,877	34	193	0.53	0.44	1.35	0.11
		50				199	0.98	0.81	6.50	0.24
		30				238	1.37	1.16	14.70	0.37
	5	70	46	2,883	34	197	0.51	0.39	1.02	0.11
		50				204	0.92	0.77	5.24	0.27
		30				243	1.31	1.11	13.07	0.33
FP	(0.5) 1	70	(70) 69	(114) 221	(466) 311	280	0.73	0.42	-	-
		50				307	1.09	0.75	6.91	0.17
		30				309	1.40	1.06	12.01	0.26
	3	70	66	1,982	48	167	0.50	0.35	1.05	0.09
		50				180	0.91	0.70	5.04	0.20
		30				218	1.29	1.07	12.54	0.27
	5	70	61	2,638	37	154	0.47	0.36	0.70	0.09
		50				179	0.88	0.67	4.48	0.16
		30				208	1.29	1.07	9.12	0.26

⁽¹⁾ : Bracket is the result of 0.5% aqueous solution

으며 기포제의 종류에 따른 차이는 FP>AES≒VS>AOS의 순서로 나타나고 있다. FP는 농도 5%에서 60.94 mN/m로 농도의 증가에 따라 완만하게 표면장력이 감소하였지만, AES와 VS, AOS의 경우 농도 0.5%에서 각각 42.08, 39.60, 30.92 mN/m로 감소하여 매우 적은 양으로도 수용

액의 표면장력을 저하시킬 수 있었다. 그러나 그 이상의 농도 증가에 따른 표면장력 감소는 없었으며 오히려 약간 증가하는 경향을 나타냈다.

기포제 종류에 따른 표면장력의 차이는 친수기와 소수기로 이루어진 분자활성도가 다르기 때문에 발생하며, 기

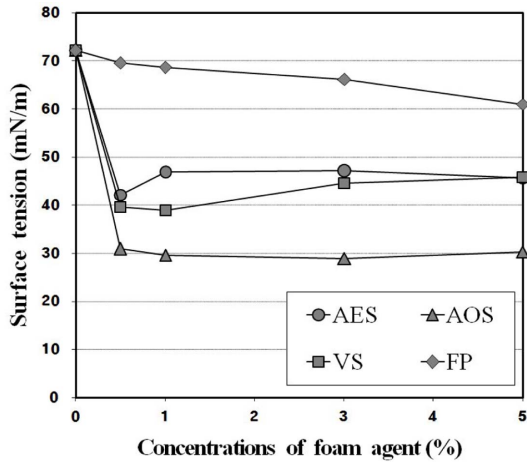


Fig. 3 Variance of surface tension by concentrations of foam agent

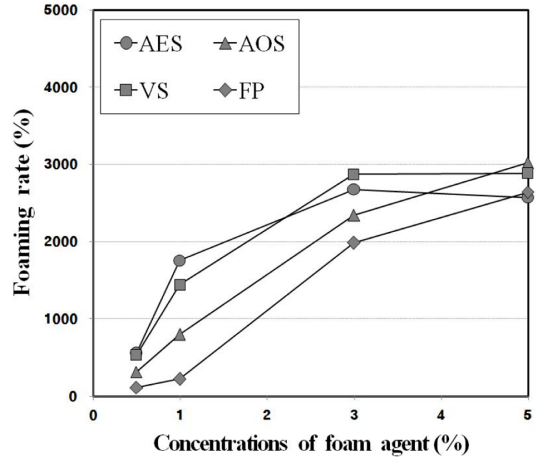


Fig. 4 Variance of foaming rate by concentrations of foam agent

포제 희석농도가 지속적으로 높아져도 표면장력의 변화가 비례적이지 않은 원인은 계면에 층을 이루는 활성분자가 포화상태가 되는 CMC(critical micelle concentration)에 의한 것으로 판단된다.^{8,9)}

3.2 기포 발포율 및 단위 중량

물에 희석한 기포제의 농도가 증가해도 전기전도율이 더 이상 증가하지 않고 미셀이라는 집합체가 형성되는 시기의 농도를 임계미셀농도(critical micelle concentration, CMC)라 한다.¹⁰⁾ 일반적으로 용액의 성질은 CMC를 경계로 하여 현저하게 변한다. CMC는 기포제 각각의 고유값이며 공존하는 이온의 농도나 온도는 CMC에 영향을 미친다. 기포 발포율을 높이려면 기포 희석액의 농도를 CMC 이상으로 유지하여야 한다.

Fig. 4는 기포제 희석농도에 따른 기포제 종류별 발포율을 나타낸 것으로 농도가 높을수록 발포율은 증가하였다. 농도 1% 수준에서는 AES>VS>AOS>FP 순으로 기포의 발포율이 높게 나타났으며 농도 2%를 기점으로 VS가 AES보다 약간 높은 값을 나타내었다. FP의 경우 다른 실험군에 비해 발포율이 낮은 경향을 보이며 안정적인 기포를 얻기 위해서는 기포제 희석농도를 더 증가시켜야 할 것으로 판단된다. 희석농도에 따른 발포율 증가 추이를 살펴보면, AES와 VS는 농도 3%까지는 발포율이 증가하지만 그 이후에는 2,600~2,800%를 유지하는 것으로 나타났으며, AOS와 FP는 농도 5%까지 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 5는 기포의 단위중량을 나타낸 것으로 발포율과 반비례적으로 나타나고 있다(FP>AOS>VS>AES). AES와 VS는 1% 농도까지 감소하지만 이후에는 거의 변화가 없었으며, AOS와 FP는 3% 농도까지 단위중량이 감소하는 것으로 나타났다. 3% 이상에서는 34~48 kg/m³로 4종의 기포제가 모두 유사하게 나타났다. 한편 FP를 저농도로 희석하여 제조한 기포는 다량의 수분을 함유한 액상의

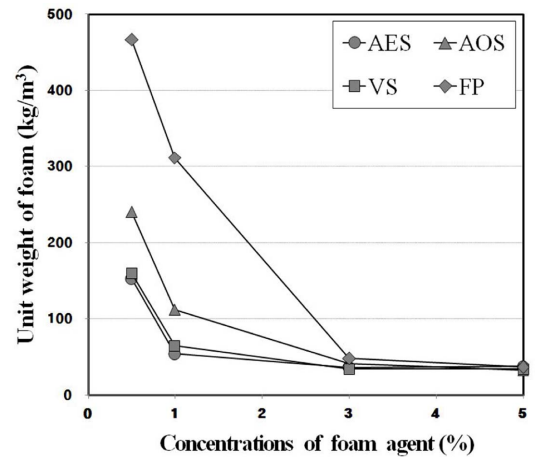


Fig. 5 Variance of unit weight by concentrations of foam agent

형태를 나타냈으며, 이에 따라 0.5%에서 466 kg/m³, 1%에서 311 kg/m³ 수준의 높은 단위중량이 나타났다. 따라서 FP의 경우 기포의 안정성을 높이기 위해서는 3% 이상의 농도로 희석하여 사용해야 할 것으로 사료된다.

3.3 플로우

기포제 희석농도 및 기포율에 따른 유동성 실험 결과는 Fig. 6과 같다. 1%의 경우 기포제 종류별로 차이가 발생하고 3% 이상의 경우 표면장력이 낮은 기포제가 다소 높은 값이 나타나지만 그 차이는 매우 미비하여 전체적으로 유사한 경향이 나타났다. 희석농도 1%의 조건에서 기포제 종류별 플로우의 차이는 기포의 단위중량과 표면장력의 영향을 받은 것으로 AES, AOS, VS는 기포제의 표면장력과 유사한 변화가 나타나고, FP는 표면장력이 높음에도 플로우가 높은 것은 발포율이 낮아 물을 많이 함유하고 있어 발생된 것으로 판단된다. 희석농도 3% 이상의 조건에서 플로우는 기포제의 CMC에 의해 안정적인 기포가 형성되어 유사한 경향이 나타난 것으로

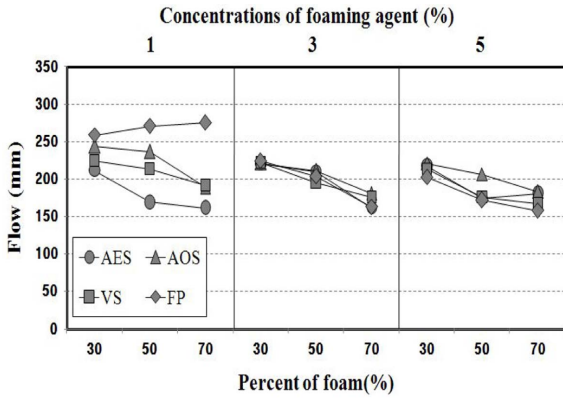


Fig. 6 Variance of flow according to percent of foam and concentrations of foam agent

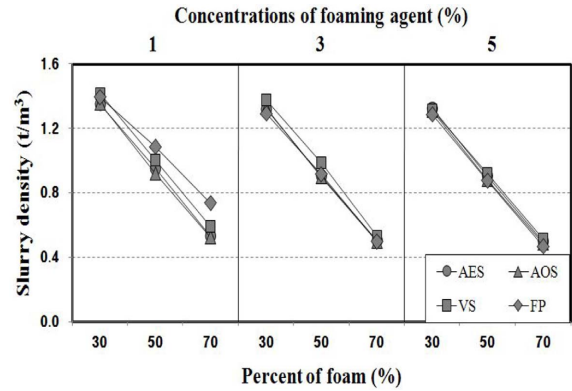


Fig. 7 Variance of slurry density according to percent of foam and concentrations of foam agent

판단된다.

기포율 증가에 따른 플로우 저하는 밀도가 낮아지면서 유동에너지가 상대적으로 감소되고 긴 사슬구조의 소수기의 기포제 분자가 물의 계면에 배열되면서 기포 막막내의 액체 흐름과 배수 속도를 감소시켜 액체의 점성이 증가되어 발생된 것으로 판단된다.

3.4 밀도

기포제 종류에 따라 다르긴 하지만 기포는 단위중량이 34~48 kg/m³로 매우 가볍기 때문에 기포 콘크리트 제조시에 주로 용적으로 계량하여 투입하게 되며 기포혼입슬러리 내에서의 중량 비중도 매우 작다. 또한, 경화 후에는 공극난 남게 되고 포막을 형성하던 액체는 증발하여 없어지게 되므로 경화한 기포 콘크리트의 중량은 주로 분체계 재료와 배합수로 이루어지는 시멘트 슬러리의 무게에 의존하게 된다.¹¹⁾ 따라서 이 연구에서는 재료와 배합비를 동일하게 설정하여 오직 기포의 특성에 의한 밀도 변화에 대해 검토하였다.

Fig. 7은 기포제 종류와 희석농도에 따른 슬러리 밀도를 나타낸 것이다. 슬러리 밀도는 모든 시험체가 거의 일정한 범위 내에 있지만 기포제 희석농도가 낮을수록 기포 자체의 특성 차이가 크기 때문에 기포제 간의 차이가 다소 발생하였다. 특히 FP 농도 1% 조건의 경우 기포율 50%, 70%에서 다소 높은 값을 나타내었다. 이러한 현상은 Figs. 4, 5와 같이 FP 1%로 제조된 기포는 발포가 잘 되지 않으며 단위중량은 311 kg/m³로써 다량으로 함유되어 있는 물의 무게 때문인 것으로 사료된다. 또한 기포농도가 증가할수록 밀도가 다소 감소하는 것은 기포의 탄성, 즉 안정성이 높아 기포 콘크리트의 혼합과정에서 발생하는 기포의 손실이 적게 발생하여 나타난 것으로 판단된다.

이 연구에서 사용한 선발포 방식의 기포 제조는 기포율 30%, 50%, 70%에 대하여 절건밀도는 각각 1.00~1.20, 0.67~0.82, 0.34~0.44 t/m³로 일정하게 나타나 기포율의 조절을 통한 밀도 컨트롤이 가능하였다.¹²⁾

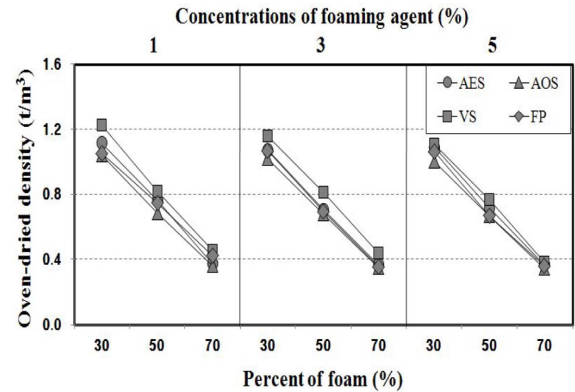


Fig. 8 Variance of oven-dried density according to percent of foam and concentrations of foam agent

절건밀도 측정 결과는 Fig. 8과 같다. 슬러리 밀도 대비 절건밀도의 차이는 AES, FP, AOS의 경우 약 0.20~0.22 t/m³, VS의 경우 0.16 t/m³로 나타났고, 기포제 종류에 따른 절건밀도는 VS가 다소 높고 AES, FP, AOS는 서로 유사하게 나타났다. VS가 다소 높은 현상은 전치양생과정 중에 굳지 않은 기포 콘크리트 내의 기포가 일부 소포되고, 그 결과 용적의 감소량이 보다 많아 발생된 것으로 판단된다. 한편, FP를 1% 농도로 제조한 시험체의 슬러리밀도는 상대적으로 컸지만 절건밀도는 다른 기포제와 비슷한 수준을 나타냈다.

3.5 압축강도

압축강도는 기포 콘크리트의 밀도와 매우 밀접한 관계가 있다.¹³⁾ 즉, 밀도가 높다는 것은 경화 매트릭스의 공극율이 작으며 단위 시멘트량이 상대적으로 많다는 것으로써 압축강도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이 연구에서도 밀도는 압축강도에 지배적으로 영향을 미치고 있어 이에 대한 변화를 분석하였고 그 결과는 Fig. 9와 같다.

0.4 t/m³ 이하의 저밀도 영역에서의 압축강도는 기포제의 종류에 상관없이 유사하게 나타났다. 하지만 밀도가 증가할수록 기포제 종류에 따라 압축강도의 차이가 발생하였다. 0.8 t/m³ 수준에서 AOS와 FP를 사용한 시험체의

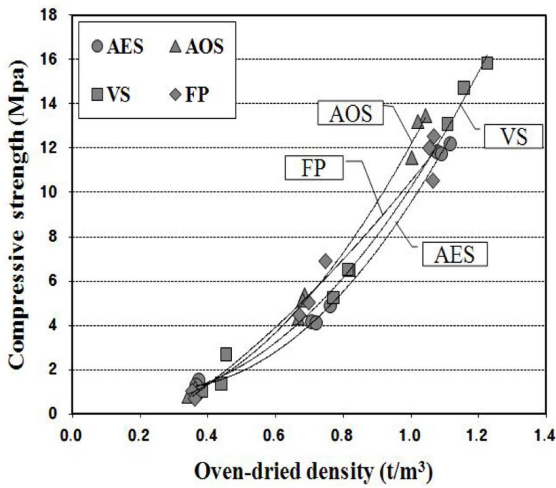


Fig. 9 Relationship between of compressive strength and oven-dried density

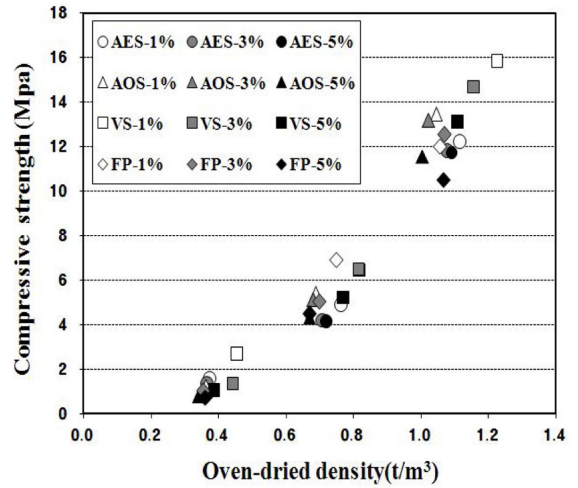


Fig. 10 Variance of compressive strength by concentrations of foam agent

압축강도는 약 7MPa로 가장 큰 값을 나타냈고 VS, AES의 경우 약 5MPa 수준의 강도를 갖는 것으로 나타났다. 1.0 t/m³ 수준에서는 FP와 VS가 약 11MPa로써 비슷한 강도를 나타냈으며 AOS와 다른 기포제와의 강도 차이는 더 크게 나타났다. 기포 콘크리트 제조용 기포제로서 AOS와 FP가 압축강도에 가장 효과적인 것으로 판단되며, 가장 낮은 압축강도를 나타낸 AES와 비교하면 약 2~3MPa 정도의 강도 차이가 나타났다. 밀도 증가에 따른 강도발현 추이는 기포제 종류에 따라 다른 양상으로 나타났으며 기포제 자체의 특성이 결과적으로 기포 콘크리트 경화체의 강도 특성에도 영향을 주는 것으로 판단된다.

기포제 희석농도에 따른 기포 콘크리트의 압축강도는 Fig. 10과 같으며 희석농도가 높을수록 압축강도는 낮게 나타났다. 동일 밀도 그룹에서 기포제 희석농도가 증가하면 단일 기포의 크기가 커지고 기포간 계면이 파괴되어 연속공극을 형성하며 결과적으로 낮은 압축강도를 나타낸 것으로 사료된다. 또한 밀도가 높을수록 기포농도에 따른 압축강도의 차이는 다소 증가되는 것으로 나타났다.

한편, FP 농도 1%, 기포율 70% 조건의 경우 Fig. 11과 같이 기포가 불안정하여 재료분리와 침하현상으로 인해 측정할 수 없었다.

3.6 열전도율

일반적으로 공극을 많이 함유한 재료의 열전도율과 선팅창율은 작다.¹⁴⁾ 이는 공기의 열전도율이 보통 재료 중에서 최소($\lambda=0.022 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$, 상온)이므로 재료 중에 있는 기포의 상태에서는 대류 및 복사에 의한 열 이동이 적기 때문이다. 기포 콘크리트의 열전도율은 밀도 및 공극량, 공극분포 및 형상에 의해서 결정된다. 기포 콘크리트는 다공극으로 되어있어 흡습과 흡수를 방지하여야 하나 이 공극이 수증기 상태나 물의 상태에 있으면 단열효과가 떨어진다. 따라서 이 실험에서는 각 시험체를 100°C

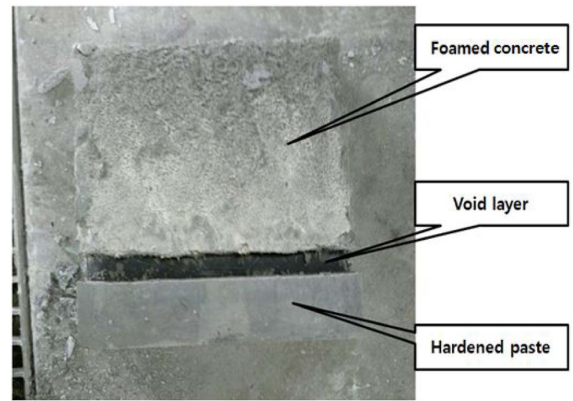


Fig. 11 Photo of specimen (FP-1%-70%)

로 건조시켜 절대건조상태에서 열전도율을 측정하였다.

Fig. 12는 기포제 종류에 따른 각 기포 콘크리트 패널의 열전도율을 측정한 결과이다. AOS와 AES, VS, FP를 사용한 시험체의 열전도율은 각각 0.09~0.39, 0.11~0.35, 0.10~0.30, 0.09~0.27 W/mK의 범위로 나타났으며 기포율이 증가할수록 열전도율은 감소하는 것으로 나타났다. 저밀도 영역에서는 기포제 종류에 따른 열전도율의 차이는 거의 없지만 밀도가 증가할수록 큰 차이를 나타내고 있다.

AES, VS, FP를 사용한 패널은 비교적 완만하게 직선적으로 증가하는 경향을 나타내고 있지만 AOS의 경우 그래프의 기울기가 가장 크게 나타나 밀도 증가에 따른 단열성능은 다른 실험군에 비하여 떨어지는 것으로 나타났다. 또한, 일부 AOS를 사용한 시험체를 제외한 모든 시험체가 <KS F 4039, 현장 타설용 기포 콘크리트>에서 규정하고 있는 기포 콘크리트의 열전도율(0.4 t/m³-0.13 W/mK 이하, 0.5 t/m³-0.16 W/mK 이하, 0.7 t/m³-0.19 W/mK 이하) 기준을 모두 만족하였으며 특히 FP와 VS를 사용한 경우에 가장 우수한 단열성능을 나타냈다.

Fig. 13은 기포제 희석농도와 열전도율의 상관관계를 나타낸 것이다. 동일 밀도 상에서 희석농도가 작을수록 열

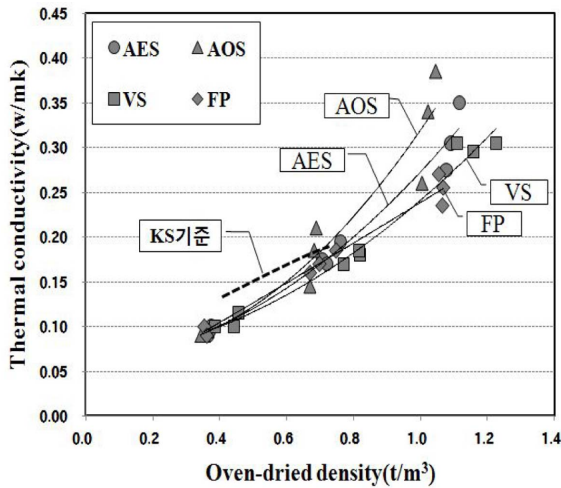


Fig. 12 Relationship between of thermal conductivity and oven-dried density

전도율은 증가하는 것으로 나타났다. 농도 3%와 5%로써 제조한 패널의 열전도율은 거의 유사하게 나타났으나 1% 농도를 사용한 시험체의 경우 비교적 높은 열전도율 값을 나타냈다. 이는 기포제 희석농도 1%만으로 제조된 기포는 단위중량이 크고 발포율이 낮아 기포 콘크리트 경화체의 기포구조를 적절히 만들지 못하여 나타난 것으로 사료된다. 또한 밀도가 증가할수록 그 차이는 커지는데 0.4 t/m^3 수준에서는 기포제 희석농도에 따른 열전도율의 차이는 크지 않지만 1.0 t/m^3 이상의 밀도조건에서 농도 1%와 5%의 차이는 최대 0.15 W/mK 가 발생하였다.

결과적으로 FP와 VS를 3% 이상 희석하여 사용하였을 경우 기포 콘크리트 단열패널로서 가장 우수한 단열성능을 가질 것으로 판단된다.

3.7 공극 형상

Fig. 14는 공극분포 및 특성을 파악하기 위하여 시험체의 중앙을 절단한 후 절단면을 광학현미경으로 10배 확대하여 촬영한 사진이다.

모든 조건에서 기포율이 증가할수록 상대적으로 시멘트 페이스트의 양이 감소함에 따라 공극은 증가하며 이러한 경향은 단면 사진으로도 확인할 수 있었다. 또한, 기포농도가 증가할수록 기포의 크기는 커지고 기포 계면이 파괴되면서 열린공극이 형성되었다. 열린공극은 기포율과 기포농도에 의해 영향을 받게 되는데 특히, 기포농도 5%, 기포율 70% 조건에서 시험체의 공극은 아주 커지고 기포간의 결합이 활발하게 발생하면서 열린공극을 많이 형성하였다. 기포제 희석농도의 증가에 따른 큰 공극과 열린공극의 형성은 기포막의 두께에 의해 가속화된 것으로 판단된다. 희석농도가 높으면 기포의 단위중량이 낮아지는데, 이러한 현상은 적은 수량으로 많은 기포를 형성하는 것으로서 기포 박막의 두께가 얇은 것을 의미한다. 큰 공극의 형성은 기포의 결합에 의한 것으로

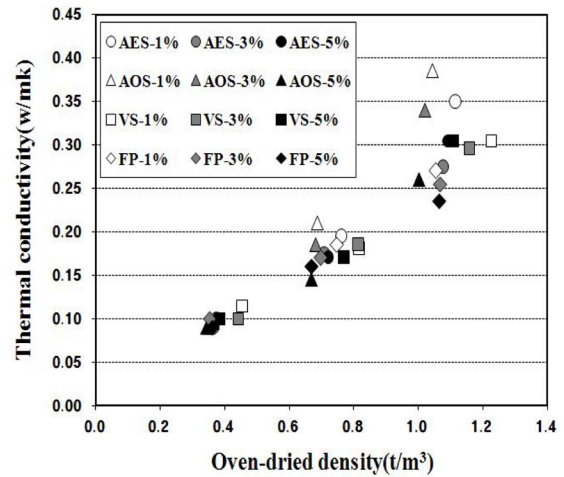


Fig. 13 Variance of thermal conductivity by concentrations of foam agent

기포양이 많아지면서 기포간 간섭이 증가되고 기포 박막의 두께가 얇을수록 결합이 용이해져 증가된다. 열린공극의 형성은 기포 박막의 두께가 얇아지면서 기포의 박막이 붕괴되어 형성되는 것으로 기포제 희석농도가 높을수록 박막의 두께가 얇아 가속화된다.^{3,4)}

천연소재의 기포제가 합성소재의 기포제보다 더 크고 많은 공극을 형성하였다. FP는 기포율이 증가함에 따라 공극의 크기가 훨씬 더 커지는 것으로 나타났으며 농도 3%까지는 비교적 닫힌공극을 형성하였지만 5%에서는 공극의 크기가 가장 큰 열린공극을 나타내었다. AES와 VS는 비교적 유사한 공극 형상을 나타냈지만 VS의 경우에 더 많은 공극을 형성하였다. AOS는 다른 기포제에 비해 공극의 양이 적고 크기가 작으며 기포농도와 기포율에 따른 각 시험체간의 차이가 크지 않았다.

4. 결 론

- 1) 기포 희석액의 표면장력은 FP를 사용한 경우 기포제 희석농도가 증가할수록 완만하게 감소하여 가장 큰 값을 나타낸 반면 AOS의 경우 매우 적은 양으로도 표면장력을 용이하게 낮출 수 있었다.
- 2) AES와 VS를 사용하여 제조한 기포의 발포력이 더 우수하여 단위중량은 낮은 값을 나타냈으며 FP의 경우 농도 1%로써 제조된 기포는 다량의 수분을 함유하기 때문에 3% 이상의 농도를 사용해야 안정적인 기포를 생성할 수 있다.
- 3) 굳지 않은 기포 콘크리트의 유동성에 대한 기포제 희석농도의 영향은 나타나지 않았고 기포농도 1% 조건에서는 기포의 특성이 유동성에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한, 3% 이상의 조건에서 기포제 종류에 따른 영향은 나타나지 않았다.
- 4) 슬러리 밀도는 기포 단위중량에 의해 영향을 받아 유사한 값을 나타냈지만 양생과정에서 기포의 손실

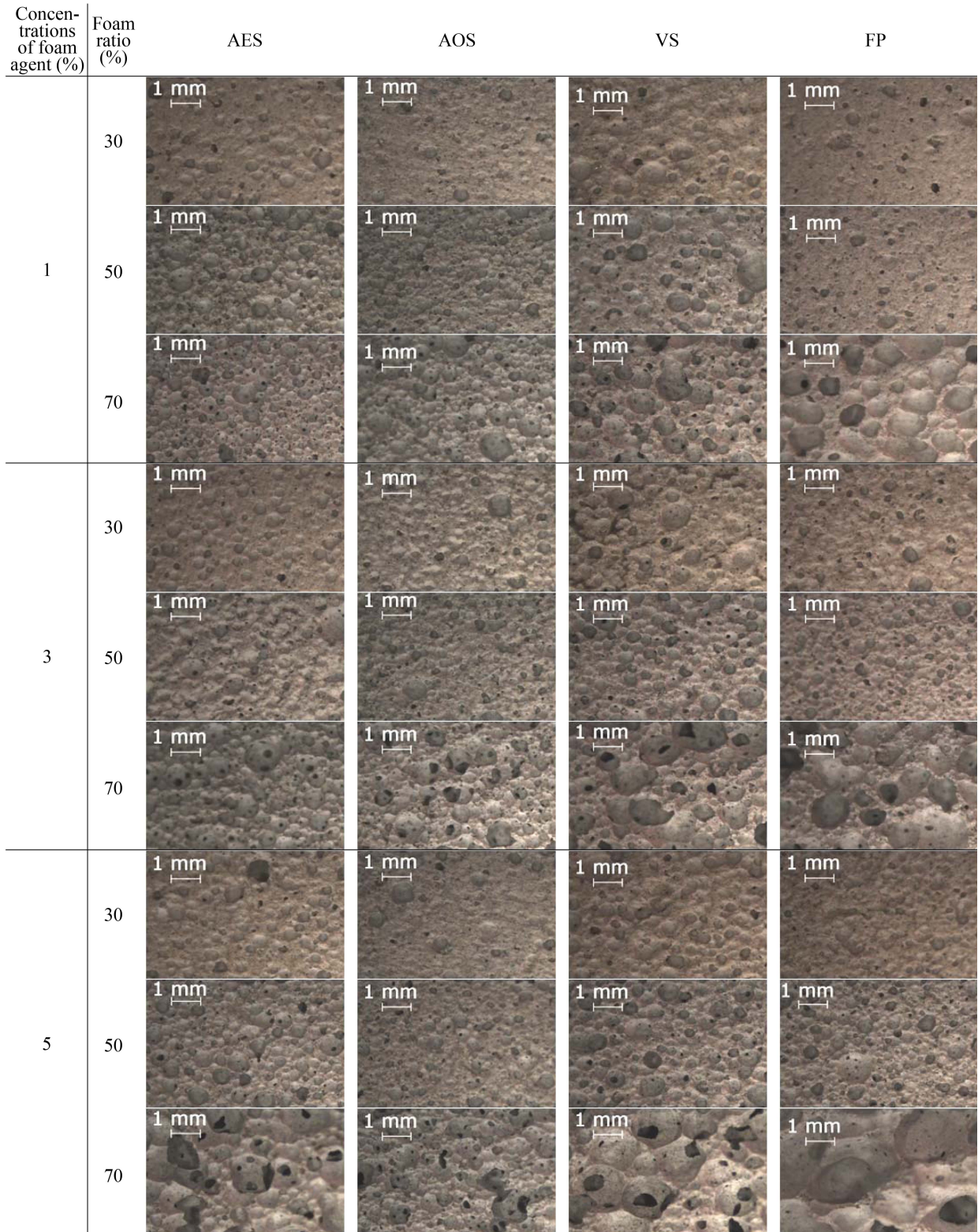


Fig. 14 Photos of pore shape

작용에 의해 기포제 종류에 따른 절건밀도의 차이가 나타났다.

- 5) 밀도의 증가에 따른 강도발현 추이는 기포제 종류 별로 다르게 나타났으며 AOS와 FP가 강도 발현에 가장 효과적인 것으로 나타났다.
- 6) 기포 콘크리트에서의 열전도율은 밀도보다는 기포 자체의 특성에 의해 차이를 나타내고 천연소재의

기포제를 사용한 시험체의 경우에 가장 우수한 열전도율을 나타냈으며 4종의 기포제 모두 KS기준을 만족하였다.

- 7) 기포제 희석농도와 기포율이 증가할수록 공극의 양과 크기는 커지며 기포간 결합이 활발해져 열린공극이 형성된다.
- 8) 제조된 기포의 특성과 기포 콘크리트 경화체의 물

리·역학적, 열적 특성 등을 고려할 때, 기포제는 FP, 기포제 희석농도는 3%를 사용할 경우 안정적인 강도와 뛰어난 단열성능을 확보할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구(지역거점연구단육성사업/에너지자립형 그린빌리지 핵심기술사업단)와 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEPP)의 지원을 받아 수행한 연구(No. 20114010203040) 성과의 일부입니다.

참고문헌

1. 박민화, “부산석고를 이용한 무기단열재 제조에 관한 연구,” 강원대학교, 석사학위논문, 2010, pp. 6~11.
2. 이승한, “경량기포 콘크리트의 연속공극 형성에 미치는 기포제의 영향,” 콘크리트학회 논문집, 14권, 5호, 2002, pp. 742~749.
3. Moore, W. J., *Physical Chemistry*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1972, 220 pp.
4. Karsa, D. R., *Surfactants in Polymers, Coatings, Inks and Adhesives*, Blackwell Publishing, UK, 2003, pp. 95~99.
5. 笠井芳夫, 坂井悦郎, 新セメント・コンクリ用混和材料, 技術書院, 東京, 2007, pp. 272~280.
6. 이승한, 박정준, 황보광수, “연속공극을 갖는 기포 콘크리트의 흡음특성에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, 12권, 2호, 2000, pp. 567~571.
7. 김진만, 최훈국, 박선규, “기포제 종류에 따른 경량기포 콘크리트의 기포구조 및 열적특성에 관한 연구,” 한국건축시공학회 논문집, 9권, 4호, 2009, pp. 63~73.
8. Karsa, D. R., *Surfactants in Polymers, Coatings, Inks and Adhesives*, Blackwell Publishing, UK, 2003, pp. 219~220.
9. Holmberg, K., Jansson, B., Kronberg, B., and Lindman, B., *Surfactants and Polymers in Aqueous Solution*, John Wiley and Sons, England, 2003, pp. 1~2.
10. 남기대, 계면활성제(I)-기계적 특성, 수서원, 1991, 220 pp.
11. 서치호, 오세출, 김대희, “고로슬래그 미분말을 혼입한 기포 콘크리트의 물리적 특성에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 18권, 7호, 2002, pp. 59~67.
12. 강철, “바탕에서 및 폐콘크리트 미분말을 이용한 오토클레이브 경량기포 콘크리트의 개발,” 공주대학교, 박사학위논문, 2010, 155 pp.
13. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., *Concrete : Micro-Structure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill, San Francisco, 2004, pp. 49~67.
14. 손장열, 박진우, 안병욱, “경량기포 콘크리트의 에너지 절약 효과 향상을 위한 연구,” 대한건축학회 논문집, 17권, 2호, 1997, pp. 735~740.

요 약 최근 정부는 ‘저탄소 녹색성장 기본법’을 시행하여 국가 총체적 차원에서 에너지 절감, 온실가스 저감을 위한 노력을 기울이고 있다. 건물부문에서는 건물외피와 단열재의 열적 특성을 검토하여 건물 자체의 단열성능을 높임으로써 에너지를 절감할 수 있다. 이 연구는 건물부문의 에너지 절감을 목적으로 건물에 적용 가능한 경량기포 콘크리트 단열패널을 개발하기 위한 연구로서, 기포제 종류(AES, AOS, VS, FP)와 기포제 희석농도(1%, 3%, 5%), 기포율(30%, 50%, 70%)에 따른 기포 콘크리트의 물리·역학적 특성 및 열적 특성을 검토하여 에너지 절감을 위한 단열재로서의 최적조건을 찾고자 하였다. 실험 결과, 발포율에 영향을 미치는 기포제가 포함된 수용액의 표면장력은 AOS를 사용한 경우가 다른 기포제를 사용한 경우보다 낮게 나타났다. FP는 표면장력의 저하량이 크지 않고 발포율이 낮기 때문에 저농도로 희석한 경우 다량의 수분을 함유하고 있는 안정적이지 못한 기포가 생성되어 3% 이상 사용하여야만 비교적 안정적인 기포를 만드는 것이 가능하였다. 또한, 압축강도와 열전도율은 저밀도 영역에서는 기포제 종류에 따른 차이는 발생하지 않았으나, 상대적으로 고밀도영역에서 압축강도는 AOS와 FP, 열전도율은 VS와 FP가 더 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 기포농도와 기포율이 증가할수록 공극 크기는 커지며 열린공극을 형성하는 것으로 나타났으며 모든 기포제에 대한 열전도율은 KS기준을 만족하여 우수한 단열재로서의 가능성을 보였다. 종합적인 분석 결과, FP를 농도 3%로 사용하여 제조한 시험체가 건물에 적용시 기포 콘크리트 단열패널로서 가장 우수한 성능을 발휘할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기포제, 기포, 표면장력, 기포 콘크리트, 열전도율