

기포제 종류에 따른 경량기포콘크리트의 기포구조 및 열적특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Pore Structure and Thermal Properties of Lightweight Foamed Concrete by Foaming Agent Type

김진만* 최훈국** 박선규***
Kim, Jin-Man Choi, Hun-Gug Park, Sun-Gyu

Abstract

Recently, the use of lightweight panels in building structures has been increasing. Of the various lightweight panel types, styrofoam sandwich panels are inexpensive and are excellent in terms of their insulation capacity and their constructability. However, sandwich panels that include organic material are quite vulnerable to fire, and thus can numerous casualties in the event of a fire due to the lack of time to vacate and their emission of poisonous gas. On the other hand, lightweight foamed concrete is excellent, both in terms of its insulation ability and its fire resistance, due to its inner pores. The properties of lightweight concrete is influenced by foaming agent type. Accordingly, this study investigates the insulation properties by foaming agent type, to evaluate the possibility of using light-weight foamed concrete instead of styrene foam.

Our research found that non-heating zone temperature of lightweight foamed concrete using AP (Aluminum Powder) and FP (animal protein foaming agent) are lower than that of light-weight foamed concrete using AES (alkyl ether lactic acid ester). Lightweight foamed concrete using AES and FP satisfied fire performance requirements of two hours at a foam ratio 50, 100. Lightweight foamed concrete using AP satisfied fire performance requirements of two hours at AP ratio 0.1, 0.15. The insulation properties were better in closed pore foamed concrete by made AP, FP than with open pore foamed concrete made using AES.

Keywords : Light-Weight foamed concrete, AES, FP, AP, Insulation Property

1. 서론

최근 건설생산현장에서는 경제가 성장함과 동시에 사회적으로 급격하게 증가하는 건축물의 수요를 충족시키기 위해서 표준화, 대량 생산화가 가능한 건식 공법이 각광을 받고 있다. 이러한 현실에 부응하여 에너지 절감효과 및 공사기간 단축, 다양한 형태로 적용이 가능하고 경제성을 가지는 샌드위치 패널이 많이 사용되고 있다.¹⁾

샌드위치 패널의 형태는 양면 도장 강판 사이에 유기계 및 무기계 단열재를 합성한 복합 자재이다. 유기계 단열재는 PUR(Poly-urethane foam) 및 EPS(Expanded poly-styrene

foam) 등이 사용되며, 무기계 단열재는 Glass wool 및 Mineral wool 등이 사용된다. 유기계 단열재는 화재 시 불이 잘 붙어 대피할 수 있는 시간 부족과 유독가스의 발생으로 인명피해가 크게 발생할 수 있지만, 무기계보다 가격이 싸서 유기계 재료를 사용한 샌드위치 패널이 많이 사용되고 있다. 반면, 무기계 단열재 중 경량기포콘크리트는 단열성과 내화성, 경량성 등이 뛰어나기 때문에 샌드위치 패널에 적용하여 유기계의 단점을 해결하기 위한 많은 연구가 수행되어져 왔다.²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾ 단열성 및 내화성, 경량성이 뛰어난 경량기포콘크리트는 기포제를 활용하여 시멘트 경화체 내에 다량의 공극을 발생시켜 제조한 것으로서 역학적 특성은 사용되는 기포제와 발포제의 종류에 따라 많은 영향을 받게 된다.⁷⁾ 기포제는 계면활성작용에 의해 물리적으로 기포를 도입하는 것으로서 공기량은 최고 85%까지 생성될 수 있으며, 크게 계면활성제계, 가수분해 단백질계로 구분될 수 있다.⁸⁾ 계면활성제계 기포제

* 공주대학교 건축공학과 교수, 공학박사
** (주)에코마이스터 기술연구소 연구원, 공학석사
*** 목원대학교 건축학부 건축공학전공 전임강사, 공학박사

는 수용액 상에서 기포시키면 안정되고, 점성이 높은 기포가 생기지만 시멘트 슬러리와 혼합 시 안정성이 저하되어 서로 연속된 형태의 기포를 형성한다. 가수분해 단백질계 기포제는 계면활성제계 기포제와는 달리 시멘트 슬러리와 혼합 시 안정되고 서로 독립적인 형태의 기포를 형성하게 된다. 발포제는 금속분말이 알칼리 용액과 접촉하여 수소가스를 발생시키는 원리를 이용하는 것으로써 현재 Autoclaved Light-Weight Concrete(ALC)의 제조에 사용되고 있다.

이와 같이 경량기포콘크리트 제조에 사용되는 기포제 및 발포제는 특성이 각기 다르기 때문에 내부 공극이 변화되고 이에 따라 경량기포콘크리트의 물리적, 단열특성이 변화될 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 기포제와 발포제를 사용한 경량기포콘크리트를 샌드위치 패널의 내부 단열재로 활용하기 위한 일련의 연구로서, 경량기포콘크리트의 단열성능을 확보하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 즉, 경량기포콘크리트를 제조하는데 가장 일반적으로 사용하고 있는 기포제 및 발포제를 대상으로 하여 각각의 첨가량에 따른 경량기포콘크리트의 기포구조 및 열적특성을 검토함으로써 경량기포콘크리트의 높은 단열성능을 확보하기 위한 최적조건을 제시하기 위한 실험·실증적 연구를 수행하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1에 나타난 바와 같다. 기포를 발생시키기 위한 기포제의 종류는 계면활성제(AES)와 동물성 기포제(FP), 알루미늄 파우더(AP)를 사용하였다. AES와 FP의 기포수의 농도는 각각 0.6, 5.0%를 사용하였으며, 기포수를 사용하여 제조한 기포는 분체에 대하여 용적비로 50%씩 증가시켜 0~300%를 혼입하였다. AP의 첨가량은 일반적인 ALC의 제조에 사용되는 양과 동일하게 분체에 대하여 중량비로 0.10, 0.15% 2수준으로 실험을 하였다. 또한 본 연구에서 제조한 시험체의 성능은 S사에서 생산되는 ALC 제품과 표 1에 나타난 실험을 동일하게 실시함으로써 검토하였다.

표 1. 실험계획

Factors	Levels	Testing items
AES*	0, 50, 100,	· Oven dried density(g/cm ³) · Compressive strength(MPa) · Image analysis
FP*	150, 200,	
	250, 300%	
AP*	0.10, 0.15%	· Thermal conductivity(W/mK) · Non-heating zone temperature(°C)

* AES(Alkyether lactic acid ester), FP(Animality protein foaming agent), AP(Aluminum powder)

2.2 실험방법

1) 사용재료

경량기포콘크리트를 제조하기 위하여 시멘트는 KS L 5201에 규정된 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 규사 미분은 밀도 2.65g/cm³, 분말도 3,600cm²/g의 금평산을 사용하였으며, 소석회, 무수석고, 알루미늄 시멘트를 사용하였다. AES는 국내 A사의 계면활성제, FP는 H사의 동물성 기포제, 알루미늄 파우더는 일본에서 수입한 Y제품을 사용하였으며, 기포제 및 발포제의 물리적 특성은 표 2와 같다.

표 2. 기포제 및 발포제의 물리적 특성

Types	Density (g/cm ³)	Active mater(%)	pH	Boiling Point(°C)	Melting Point(°C)
AES	.	28.2	8.39	.	.
FP	1.14	35.8	7.36	.	.
AP	2.70	.	.	2,450	660

2) 배합

본 실험의 배합은 기존 연구의 결과를 바탕으로 W/B 75%, C/S mole ratio 0.85를 기준으로 실험을 실시하였다.⁹⁾

표 3. 배합표

W/B (%)	C/S	Foam ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)						Water (kg/m ³)	Foam (ℓ / m ³)
			OPC ¹⁾	AC ²⁾	CH ³⁾	AG ⁴⁾	S ⁵⁾	SP ⁶⁾		
75	0.85	0	18.63	1.86	0.67	1.12	13.60	0.20	16.71	0
		50	12.42	1.24	0.45	0.75	9.07	0.14	11.14	10.00
		100	9.32	0.93	0.34	0.56	6.50	0.10	8.36	15.00
		150	7.45	0.75	0.27	0.45	5.44	0.08	6.68	18.00
		200	6.21	0.62	0.22	0.37	4.53	0.07	5.57	20.00
		250	5.32	0.53	0.19	0.32	3.89	0.06	4.78	21.43
		300	4.66	0.47	0.17	0.28	3.40	0.05	4.18	22.50

1) OPC(Ordinary Portland Cement) 2) AC(Alumina Cement) 3) CH(Slacked lime) 4) AG(Anhydrite Gypsum) 5) S(Silica Powder) 6) SP(Superplasticizer)

3) 혼합방법

그림 1은 경량기포콘크리트를 제조하기 위한 혼합방법을 나타낸 것이다. 시멘트와 물은 먼저 아스팔트 믹서에서 2분 동안 혼합하여 슬러리 상태로 만든 후 AP를 첨가하고 균일하게 분포되도록 1분간 믹싱을 하였다. 또한 AES와 FP를 사용한 경량기포콘크리트의 제조는 슬러리 상태로 만든 후 기포발생기와 일체형인 리본 믹서에 투입하여 각각의 기포를 첨가하고 균일하게 분포되도록 1분간 믹싱을 실시하였다. 시험체는 밀도, 압축강도 측정을 위하여 ϕ 100×200mm, 단열특성을 측정하기 위하여 300×300×50mm의 크기로 제작하였다.

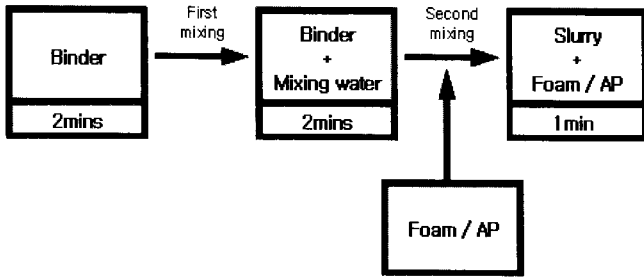


그림 1. 혼합방법

4) 양생방법

그림 2는 양생방법을 나타낸 것으로 기건양생, 증기양생, Autoclaving 양생의 총 3단계로 이루어져 있다. 우선 타설 후, 페이스트에 첨가된 기포의 손실을 최소화하기 위해서 기건양생을 20±2℃에서 4시간 동안 실시를 하였다. 증기양생은 몰드 탈형 후 Autoclaving 양생을 위한 작업에서 요구되는 시험체의 강도를 발현시키기 위해 승온 시간 4시간(20℃/hour)후 80℃로 5시간 동안 실시하였다. Autoclaving 양생은 최종 강도발현과 수열반응을 시키기 위해 승온 시간 6시간(27℃/hour)후 180℃로 6시간 동안 실시하였다.

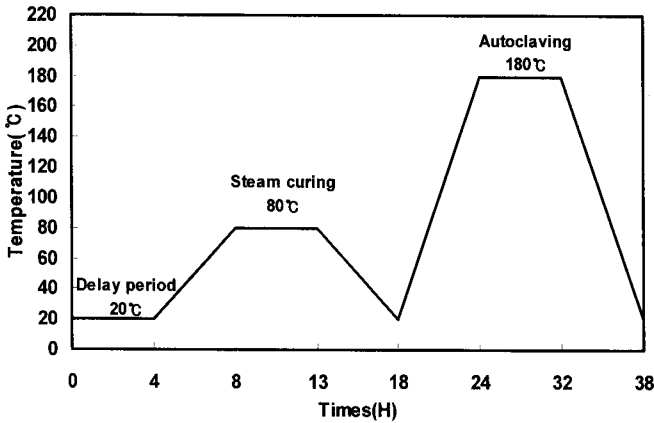
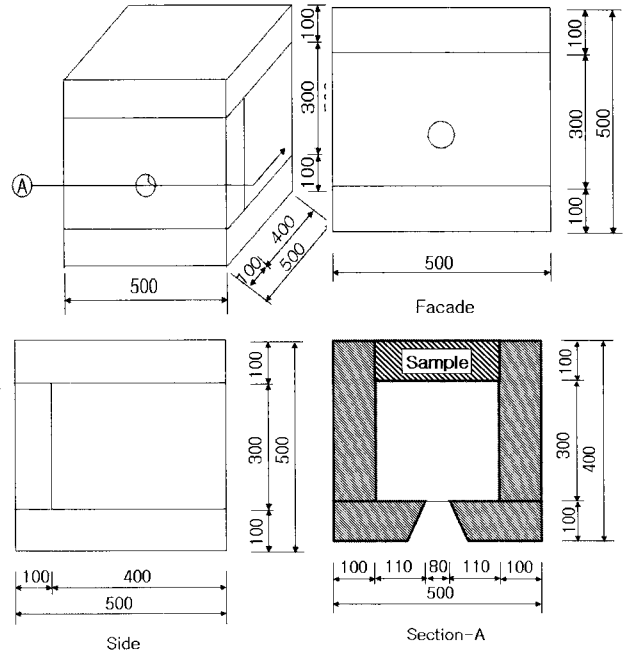


그림 2. 양생방법

5) 측정방법

절건밀도와 압축강도는 KS F 4914 「경량기포콘크리트 패널 (ALC 패널)」에 준하여 측정하였으며, 시험체 표면에 paraffin을 주입시켜 표면을 평활하게 연마한 후 현미경 및 이미지 분석 프로그램(Tomoro Scope Eye)을 이용하여 공극면적, 둘레, 지름과 동등한 원 정도에 대한 분석을 실시하였다. 열전도율은 KS L 9016 「보온재의 열전도율 측정방법」에 준하여 측정하였다. 내화실험은 KS F 2257-8 「건축부재의 내화 시험 방법-수직 비 내력 구획부재의 성능조건」에 준하여 실시하였다. 열전대는 그림 3에 나타난 바와 같이 내화시험장치 내부에 1개소, 비가열면의 온도를 측정하기 위해 시험체 중앙 1개소에 설치하였다. 열전대로부터 온도데이터를 수집하기 위하여 데이터 로거(TDS-601)를 이용하였다.



(단위 : mm)

그림 3. 내화시험장치

3. 실험결과 및 고찰

3.1 밀도

그림 4는 기포제 종류에 따른 경량기포콘크리트의 밀도를 나타낸 것이다. 기포혼입율 0~300%까지 증가함에 따라 밀도의 변화는 AES의 경우 1.38~0.30g/cm³, FP의 경우 1.38~0.31g/cm³로 측정되었다. AP를 0.10, 0.15% 첨가한 시험체의 밀도는 각각 1.16g/cm³, 1.06g/cm³, ALC는 0.60g/cm³로 측정되었다. AES와 FP를 사용한 시험체의 밀도차이는 기포혼입율 150%에서 최대인 0.07g/cm³, 300%에서 최소인 0.01g/cm³로 거의 유사한 것으로 나타났다. ALC와 AP를 사용한 시험체의 밀도차이는 0.46~0.56g/cm³로 AP를 사용한 시험체의 밀도가 더 높은 것으로 나타났다.

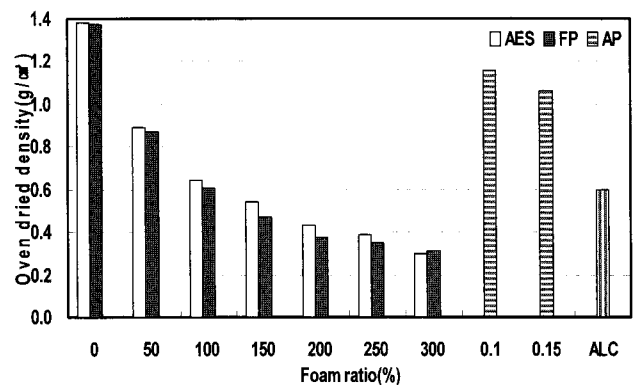


그림 4. 기포제 종류에 따른 경량기포콘크리트의 밀도

3.2 압축강도

그림 5는 기포제 종류에 따른 경량기포콘크리트의 압축강도를 나타낸 것이다. 기포혼입율 0~300%로 증가함에 따라 압축강도의 변화는 AES의 경우 31.6~1.2MPa, FP의 경우 31.0~0.9MPa로 측정되었다. AP를 0.10, 0.15% 첨가한 시험체는 1.0, 3.2MPa로 측정되었으며, ALC는 3.2MPa로 측정되었다. AES와 FP를 사용한 시험체의 압축강도의 차이는 기포혼입율 150%에서 1.4MPa로 가장 큰 차이를 보였지만 대체적으로 유사하게 나타났다. ALC와 AP를 사용한 시험체의 압축강도 차이는 최대 0.8MPa로 유사하게 나타났다.

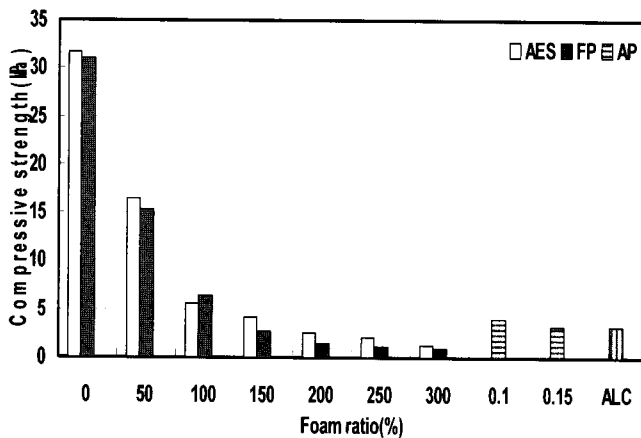


그림 5. 기포제 종류에 따른 경량기포콘크리트의 압축강도

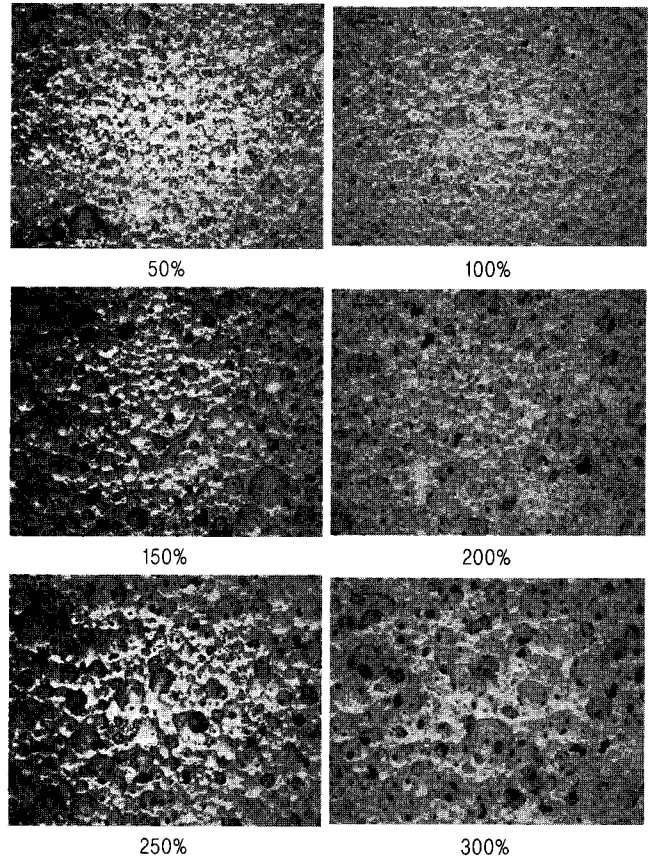


그림 6. AES를 사용한 시험체의 공극형상(×10)

3.3 공극특성

1) 공극형상

기포의 분포와 크기가 경량기포콘크리트의 물성 및 역학적 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 시편의 단면형상을 촬영하였으며, 그림 6~8은 기포제 종류에 따른 공극의 형상을 10배율의 현미경으로 촬영한 것이다. 일반적으로 안정성이 낮은 기포는 소포현상으로 인하여 독립기포간의 합쳐짐을 발생시킨다. 이로 인하여 독립된 기포군을 형성하지 못하면 합쳐진 기포군 단면에 집중되는 응력으로 인하여 경량기포콘크리트의 강도특성이 현저히 저하되며, 경량기포콘크리트의 제반 성능이 저하된다. 촬영 결과, AES와 FP는 기포혼입율 50, 100%에서 1mm이하의 공극이 대체로 조밀하게 분포되어 있는 것으로 나타났으며, 150% 이상에서는 1mm 이상의 공극이 증가하였으며, 공극들의 계면이 서로 파괴되어 연속된 공극이 형성된 것으로 나타났다. 따라서 150% 이상의 시험체에서는 독립된 공극이 아닌 연속된 공극을 형성함으로써 경량기포콘크리트의 강도가 많이 저하된 것을 알 수 있다. AP를 사용한 시험체의 경우 공극의 형상과 크기가 불규칙적인 것으로 관찰되며, 공극이 서로 독립되어 있는 것으로 관찰되었다. ALC는 원형에 가까운 1mm 내외의 공극이 서로 독립적으로 분포되어 있는 것으로 나타났으며, 일부 연속된 공극이 생성되어 있는 것으로 관찰되었다.

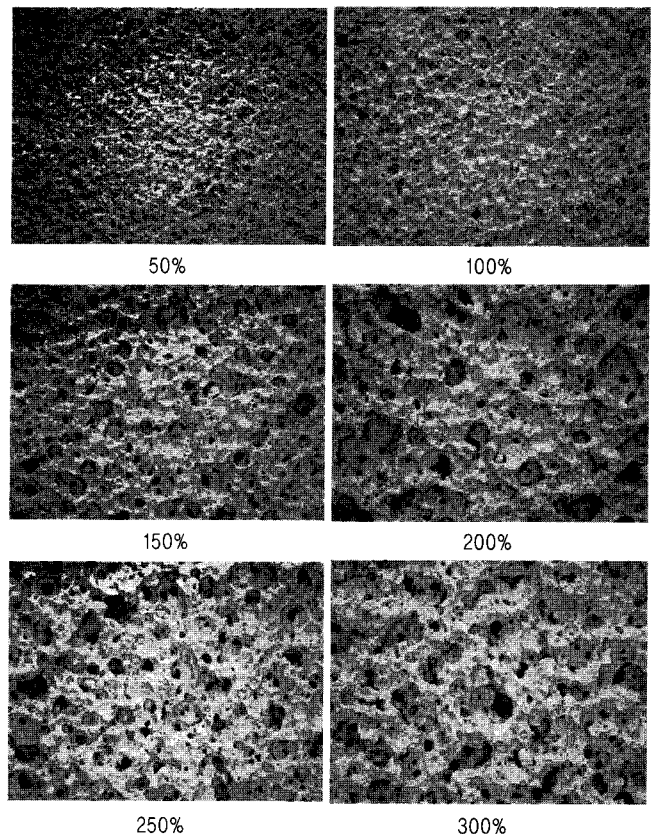


그림 7. FP를 사용한 시험체의 공극형상(×10)

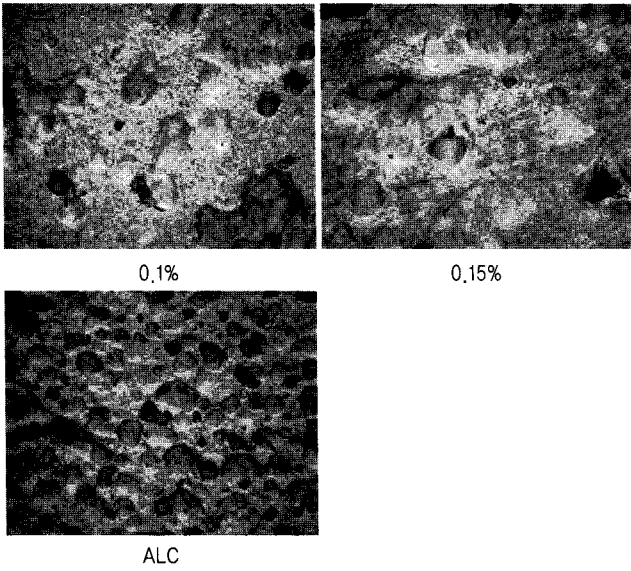


그림 8. AP를 사용한 시험체의 공극형상(×10)

2) 이미지 분석

그림 9, 10 및 11은 이미지 분석프로그램(Tomoro Scope Eye)을 이용하여 기포제 종류에 따른 공극면적, 공극둘레, 동등한 원정도, 지름(최대, 최소, 평균), 공극이 차지하는 면적에 대하여 분석한 사진을 나타낸 것이며, 시험체의 이미지 분석 데이터를 표 4~6에 나타내었다.

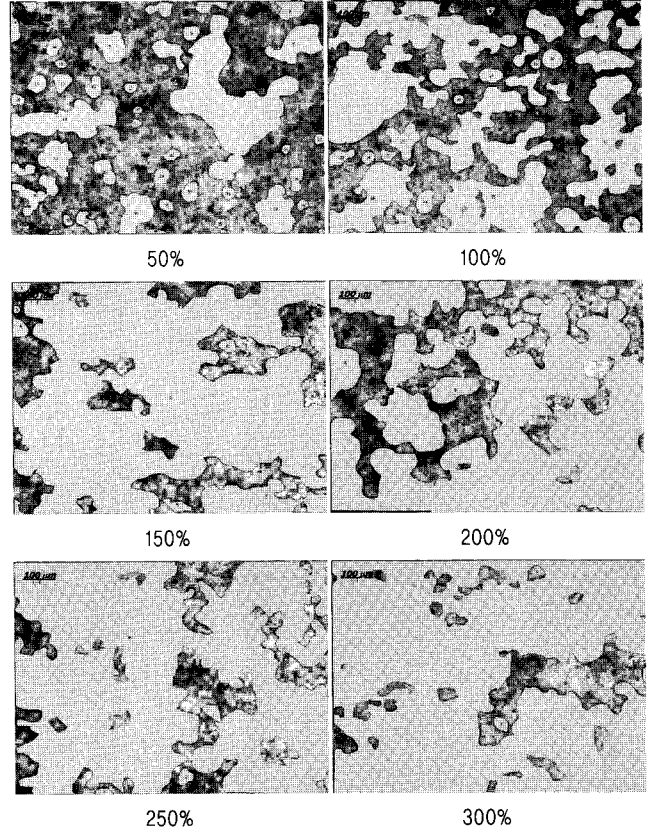


그림 10. FP를 사용한 시험체의 이미지 분석(×10)

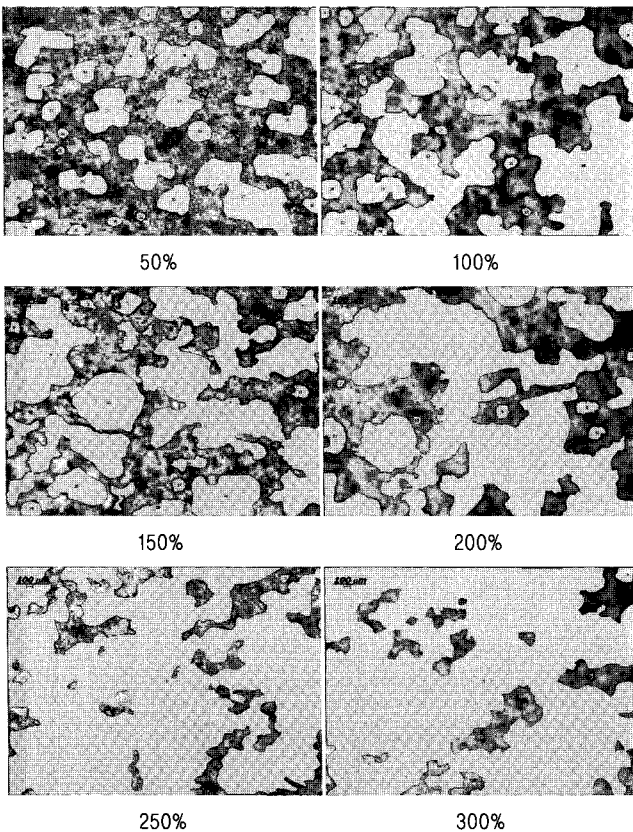


그림 9. AES를 사용한 시험체의 이미지 분석(×10)

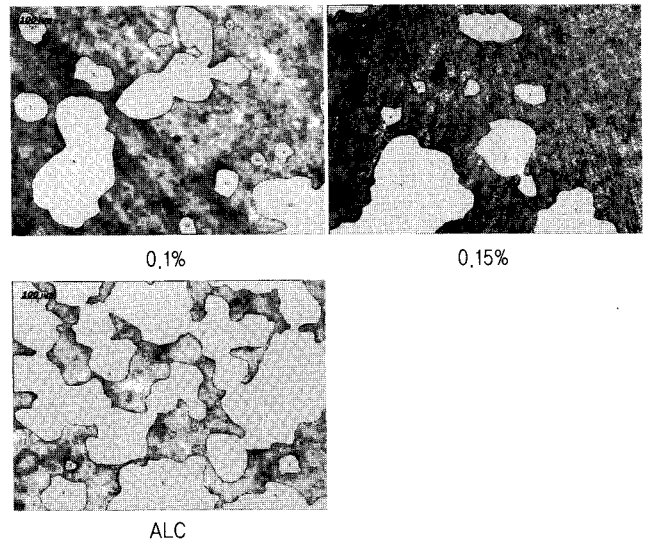


그림 11. ALC와 AP를 사용한 시험체의 이미지 분석(×10)

표 4. AES를 사용한 시험체의 이미지 분석 데이터

		Min value	Max value	Mean value	Sum	
AES 50%	Area(mm ²)	0.01	1.08	0.22	7.90	
	Perimeter(mm)	0.53	6.10	2.04	71.52	
	Roundness	0.36	0.94	0.62	-	
	Diameter (mm)	max	0.15	1.96	0.64	22.54
		min	0.07	0.63	0.31	10.82
		mean	0.11	1.12	0.47	16.56
Per area(%)	0.05	5.02	1.05	36.72		
AES 100%	Area(mm ²)	0.009	3.04	0.46	11.04	
	Perimeter(mm)	0.37	1.83	3.23	77.55	
	Roundness	0.28	0.86	0.59	-	
	Diameter (mm)	max	0.13	2.91	0.85	20.31
		min	0.10	1.12	0.36	8.57
		mean	0.11	1.97	0.59	14.20
Per area(%)	0.05	14.15	2.14	51.36		
AES 150%	Area(mm ²)	0.016	5.47	0.59	1.71	
	Perimeter(mm)	0.77	37.89	4.45	88.91	
	Roundness	0.27	0.88	0.54	-	
	Diameter (mm)	max	0.24	4.74	0.95	19.01
		min	0.07	1.92	0.45	8.96
		mean	0.15	2.99	0.67	13.49
Per area(%)	0.08	25.39	2.72	54.37		
AES 200%	Area(mm ²)	0.015	10.11	0.93	12.15	
	Perimeter(mm)	0.48	50.67	5.51	71.64	
	Roundness	0.35	0.83	0.60	-	
	Diameter (mm)	max	0.16	6.03	0.98	12.68
		min	0.12	2.13	0.39	5.12
		mean	0.14	3.90	0.68	8.80
Per area(%)	0.07	46.93	4.34	56.39		
AES 250%	Area(mm ²)	0.019	17.28	5.77	17.32	
	Perimeter(mm)	0.55	43.53	14.90	44.71	
	Roundness	0.51	0.71	0.59	-	
	Diameter (mm)	max	0.18	6.64	2.35	7.05
		min	0.10	3.53	1.25	3.76
		mean	0.15	5.02	1.78	5.33
Per area(%)	0.09	80.30	26.83	80.48		
AES 300%	Area(mm ²)	0.006	17.78	5.96	17.88	
	Perimeter(mm)	0.31	31.08	10.96	32.87	
	Roundness	0.55	0.84	0.67	-	
	Diameter (mm)	max	0.10	6.40	2.32	6.96
		min	0.07	3.61	1.31	3.94
		mean	0.09	5.01	1.81	5.44
Per area(%)	0.03	82.64	27.69	83.08		

표 5. FP를 사용한 시험체의 이미지 분석 데이터

		Min value	Max value	Mean value	Sum	
FP 50%	Area(mm ²)	0.007	2.17	0.15	6.25	
	Perimeter(mm)	0.32	10.75	1.49	63.86	
	Roundness	0.23	0.87	0.61	-	
	Diameter (mm)	max	0.10	2.65	0.47	20.02
		min	0.06	0.62	0.21	9.08
		mean	0.09	1.65	0.33	14.35
Per area(%)	0.03	10.79	0.72	31.09		
FP 100%	Area(mm ²)	0.014	3.66	0.38	11.66	
	Perimeter(mm)	0.48	21.21	2.98	92.34	
	Roundness	0.32	0.97	0.58	-	
	Diameter (mm)	max	0.16	3.23	0.76	23.45
		min	0.09	1.60	0.32	9.81
		mean	0.13	2.32	0.52	16.19
Per area(%)	0.07	17.04	1.75	54.26		
FP 150%	Area(mm ²)	0.014	14.92	1.79	16.08	
	Perimeter(mm)	0.45	34.06	5.21	46.91	
	Roundness	0.22	0.77	0.48	-	
	Diameter (mm)	max	0.15	6.04	1.18	10.61
		min	0.08	3.12	0.52	4.65
		mean	0.13	4.57	0.80	7.16
Per area(%)	0.12	77.60	25.99	77.98		
FP 200%	Area(mm ²)	0.050	10.61	1.79	14.35	
	Perimeter(mm)	0.85	31.39	7.04	56.28	
	Roundness	0.31	0.79	0.53	-	
	Diameter (mm)	max	0.29	5.81	1.66	13.30
		min	0.21	2.34	0.61	4.90
		mean	0.25	3.91	1.08	8.66
Per area(%)	0.23	49.35	8.35	66.77		
FP 250%	Area(mm ²)	0.027	16.68	5.59	16.76	
	Perimeter(mm)	0.75	38.45	13.38	40.14	
	Roundness	0.38	0.81	0.57	-	
	Diameter (mm)	max	0.30	6.67	2.42	7.26
		min	0.09	3.51	1.27	3.82
		mean	0.19	4.92	1.79	5.37
Per area(%)	0.12	77.60	25.99	77.98		
FP 300%	Area(mm ²)	0.029	17.94	6.00	18.01	
	Perimeter(mm)	0.75	31.41	11.01	33.03	
	Roundness	0.37	0.60	0.51	-	
	Diameter (mm)	max	0.31	6.61	2.42	7.25
		min	0.11	2.97	1.09	3.28
		mean	0.20	5.03	1.83	5.48
Per area(%)	0.13	83.45	27.94	83.81		

표 6. AP를 사용한 시험체의 이미지 분석 데이터

		Min value	Max value	Mean value	Sum	
AP 0.1%	Area(mm ²)	0.023	2.19	0.48	6.26	
	Perimeter(mm)	0.60	8.95	2.62	34.07	
	Roundness	0.32	0.88	0.68	-	
	Diameter (mm)	max	0.20	2.31	0.79	10.27
		min	0.14	1.03	0.43	5.58
		mean	0.17	1.60	0.61	7.93
Per area(%)	0.11	10.16	2.24	22.72		
AP 0.15%	Area(mm ²)	0.038	2.44	0.54	4.89	
	Perimeter(mm)	0.80	7.40	2.87	25.79	
	Roundness	0.23	0.85	0.57	-	
	Diameter (mm)	max	0.27	2.40	0.94	8.50
		min	0.10	1.51	0.52	4.70
		mean	0.22	1.74	0.68	6.13
Per area(%)	0.18	11.31	2.52	29.07		
ALC	Area(mm ²)	0.015	7.24	1.68	13.47	
	Perimeter(mm)	0.51	31.22	7.91	63.27	
	Roundness	0.22	0.84	0.54	-	
	Diameter (mm)	max	0.20	5.20	1.76	14.05
		min	0.08	1.52	0.59	4.75
		mean	0.14	3.19	1.10	8.83
Per area(%)	0.07	33.62	7.82	62.52		

그림 12는 기포제 종류에 따른 평균 공극지름을 나타낸 것으로, AES는 0.47~1.81, FP는 0.33~1.83mm로 나타났으며, 기포혼입율이 증가하면서 공극의 지름이 증가하였으나 기포제 종류에 따른 지름의 크기는 유사한 것으로 나타났다. 기포혼입율 250%를 기점으로 AES는 1.78mm, FP는 1.79mm로 크게 증가하였으며, 이는 공극량이 증가함에 따라 공극들이 서로 연속되어 공극 지름이 증가하는 것으로 판단된다. AP의 경우 0.61~0.68mm, ALC는 1.10mm로 AP의 경우 첨가량이 증가하면서 공극이 지름이 증가하였다. 이는 AP 첨가량이 증가함에 따라 AP의 반응성이 활발하게 이루어져 공극의 크기가 커지는 것으로 판단된다.

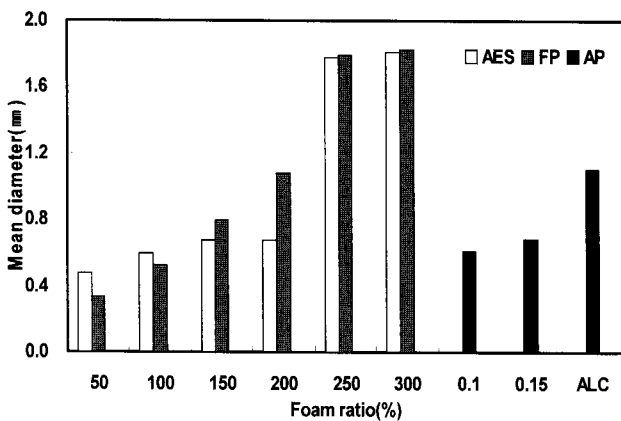


그림 12. 기포제 종류와 기포혼입율에 따른 평균 지름

그림 13은 기포제 종류에 따른 평균 공극둘레를 나타낸 것으로, AES는 2.04~10.96mm, FP는 1.49~11.01mm로 기포혼입율이 증가함에 따라 둘레는 증가하였으나, 기포제 종류에 따른 둘레

는 유사한 것으로 나타났다. 기포혼입율 250%를 기점으로 AES는 14.90mm, FP는 13.38mm로 크게 증가하였으며, 공극량이 증가함에 따라 공극들이 서로 연속되어 공극둘레가 증가하는 것으로 판단된다. AP는 2.62~2.87mm, ALC는 7.91mm로 나타났다. AP의 경우 첨가량이 증가함에 따라 둘레가 증가하는 것으로 나타났다. AP도 AES, FP와 마찬가지로 첨가량이 증가함에 따라 AP의 반응성이 활발하게 이루어져 공극의 크기가 커져 둘레도 증가하는 것으로 판단된다.

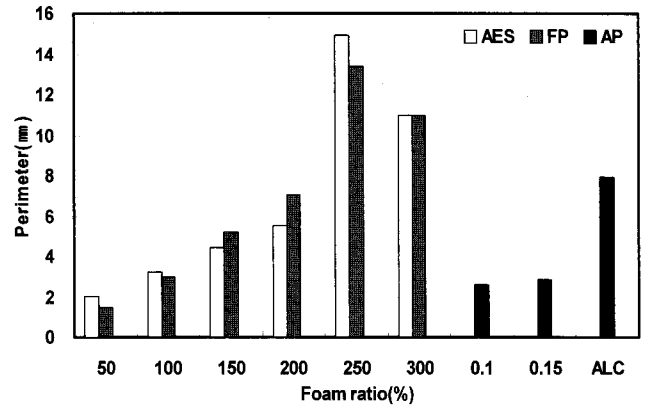


그림 13. 기포제 종류와 기포혼입율에 따른 평균 공극둘레

그림 14, 15는 평균 공극면적과 공극률을 나타낸 것이다. 평균 공극 면적의 경우 AES는 0.23~5.96mm², FP는 0.15~6.00mm², AES와 FP의 경우 기포혼입율 250%에서 증가가 크게 나타났다. 이는 공극의 지름과 둘레와 동일한 이유 때문인 것으로 사료된다. AP는 0.48~0.54mm², ALC는 1.68mm²로 나타났으며, AP의 경우 첨가량이 증가함에 따라 면적이 증가하는 것으로 나타났다. AP도 AES, FP와 마찬가지로 첨가량이 증가함에 따라 AP의 반응성이 활발하게 이루어져 공극의 크기가 커져 면적도 증가하는 것으로 사료된다. 공극률의 경우 AES는 36.72~83.08%, FP는 31.09~83.81%, AP는 22.72~29.07mm², ALC는 62.52%로 나타났으며, 기포혼입율이 증가할수록 모두 증가하는 것으로 나타났다.

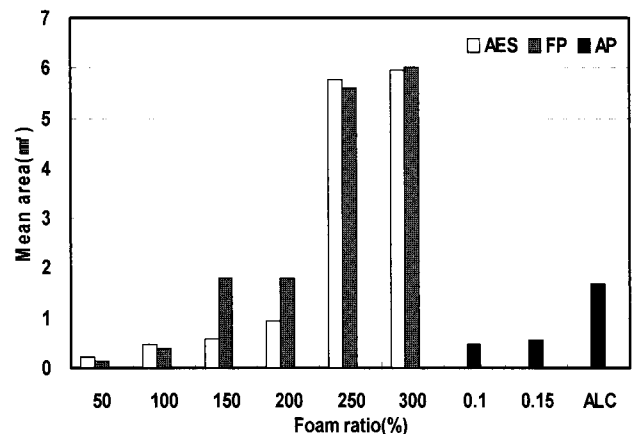


그림 14. 기포제 종류와 기포혼입율에 따른 평균 공극면적

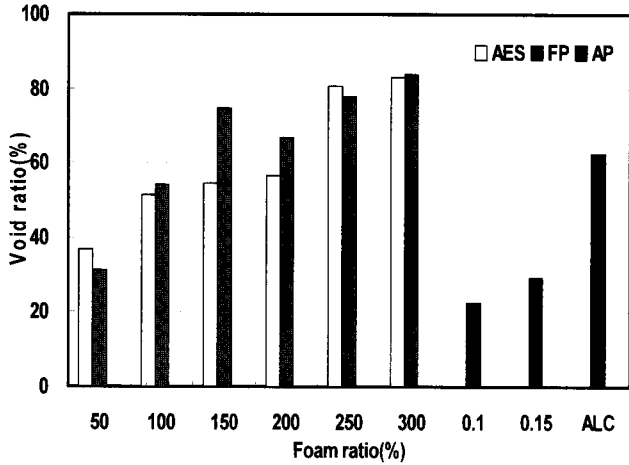


그림 15. 기포제 종류와 기포혼입율에 따른 공극률

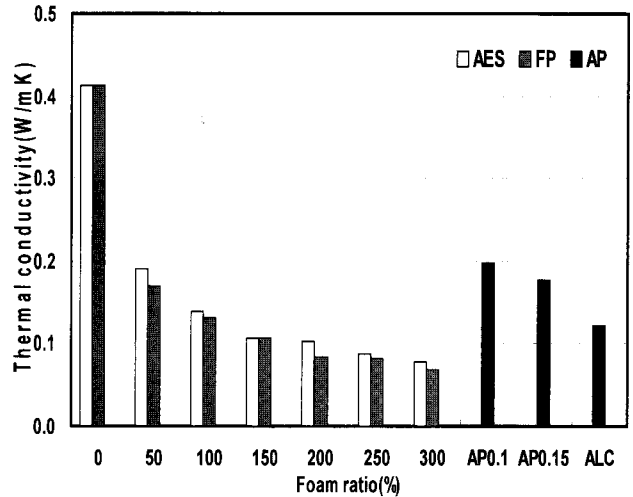


그림 18. 열전도율 측정 결과

3.4 열전도율

표 7과 그림 18은 기포제 종류에 따른 경량기포콘크리트의 열전도율을 측정된 결과이다. AES와 FP를 사용한 시험체의 열전도율은 각각 0.078~0.412W/mK, 0.068~0.412W/mK로 나타났으며, 기포혼입율이 증가할수록 열전도율은 감소하는 것으로 나타났다. 기포혼입율 150%를 제외하고 모두 AES보다 FP의 열전도율이 더 낮은 것으로 나타났다. 이는 경량기포콘크리트 내부의 공극이 열전도율이 낮으므로 공극이 증가할수록 열전도율이 낮아지는 것으로 판단되며, FP를 사용한 시험체가 AES로 제조한 시험체 보다 독립된 공극이 많이 분포하여 대류 및 복사에 의한 열이동이 적어 열전도율이 낮은 것으로 판단된다.

AP를 사용한 시험체는 AP0.1, 0.15%로 증가함에 따라 열전도율은 0.198, 0.176W/mK로 감소하였다. 이는 AP양이 증가하면서 AP의 반응이 증가함에 따라 독립된 공극의 생성이 증가하여 열전도율이 감소하는 것으로 판단된다.

표 7. 열전도율 측정 결과

Type	Thermal conductivity(W/mK)		
	AES	FP	AP
0	0.412	0.412	
50	0.190	0.170	
100	0.138	0.132	
150	0.107	0.107	
200	0.102	0.083	
250	0.088	0.081	
300	0.078	0.068	
0.10			0.198
0.15			0.176
ALC			0.122

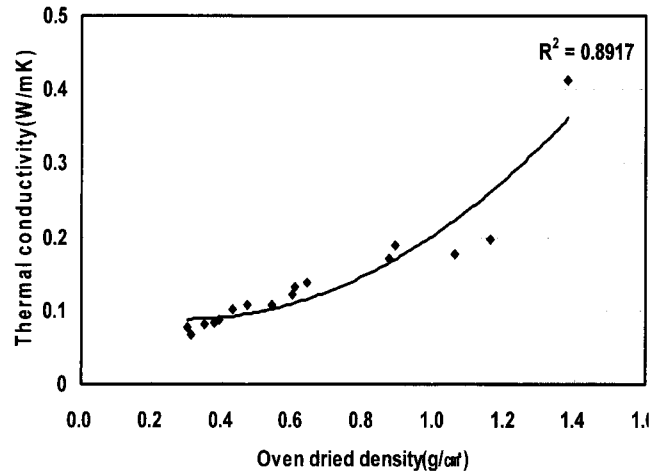


그림 19. 밀도와 열전도율의 상관관계

3.5 비가열면의 온도

그림 20은 AES로 제조한 시험체의 비가열면 온도곡선을 나타낸 것이다. 기포 혼입율이 0~300%로 증가함에 따라 120분 가열 후에 시험체의 비가열면 온도는 각각 125.7, 93.0, 92.5, 160.5, 193.7, 201.2, 212.2℃로 측정되었다. 모든 시험체에서 가열 시작 후 약 8분을 기준으로 비가열면 온도가 상승하였으며, 기포혼입율 50, 100%는 약 22분, 그 이외의 시험체에서는 약 18분을 기준으로 온도가 일정하게 유지되었고, 기포혼입율 50, 100%는 약 110분, 150, 200, 250%는 약 80분, 300%는 약 60분을 기준으로 다시 온도가 상승되었다. 가열 중 온도가 일정하게 유지되는

현상을 보이는 이유는 시험체 내부의 공극을 경유하여 수분이 증발함으로써 열에너지가 소모되어 일어나는 것으로 판단된다.

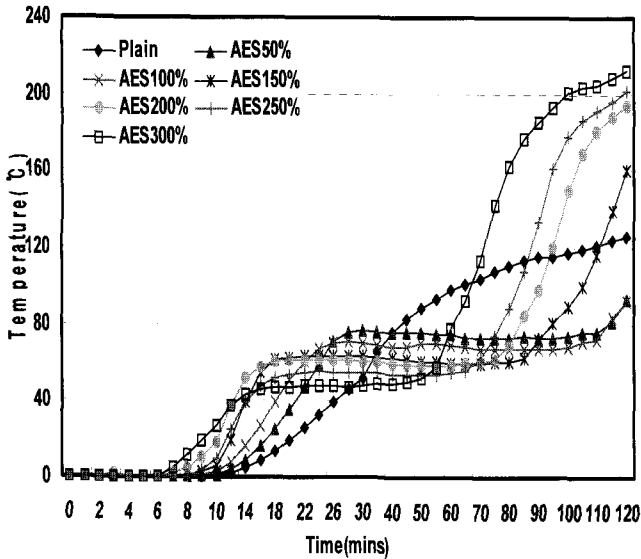


그림 20. AES로 제조한 경량기포콘크리트의 비가열면 온도곡선

그림 21은 FP로 제조한 시험체의 비가열면 온도곡선을 나타낸 것이다. 기포혼입율이 0~300%로 증가함에 따라 120분 가열 후에 시험체의 비가열면 온도는 각각 125.7, 85.0, 87.8, 171.2, 188.1, 192.0, 199.7°C로 측정되었다. 기포혼입율 50, 100, 200%의 경우 가열 시작 후 약 14분, 150, 250, 300%는 약 8분을 기준으로 온도가 상승하였고, 기포혼입율 50, 100, 200%는 약 22분, 그 외 시험체는 약 14분을 기준으로 온도가 일정하게 유지되었으며, 기포혼입율 50, 100%는 약 110분, 그 외는 약 90분을 기준으로 온도가 상승하였다.

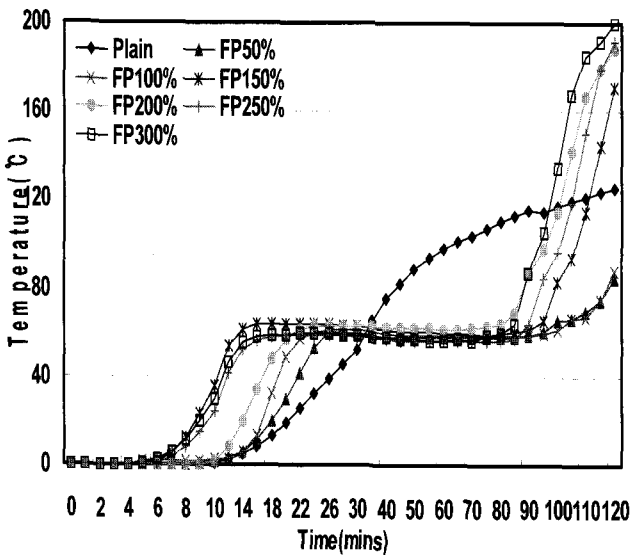


그림 21. FP로 제조한 경량기포콘크리트의 비가열면 온도곡선

그림 22는 ALC와 AP를 사용한 시험체의 비가열면 온도곡선을 나타낸 것이다. 120분 가열 후에 시험체의 비가열면 온도는 AP 첨가량 0.1, 0.15%에 따라 각각 82.7, 120.4°C, ALC는 212.4°C로 측정되었다. AP로 제조한 시험체와 ALC의 경우 가열 시작 후 약 10분을 기준으로 온도가 상승하였으며, AP 0.1%는 약 26분, 0.15%와 ALC는 22분을 기준으로 온도가 일정하게 유지되었으며, 0.1%는 약 110분, 0.15%는 약 100분, ALC는 약 90분을 기준으로 온도가 다시 상승하였다.

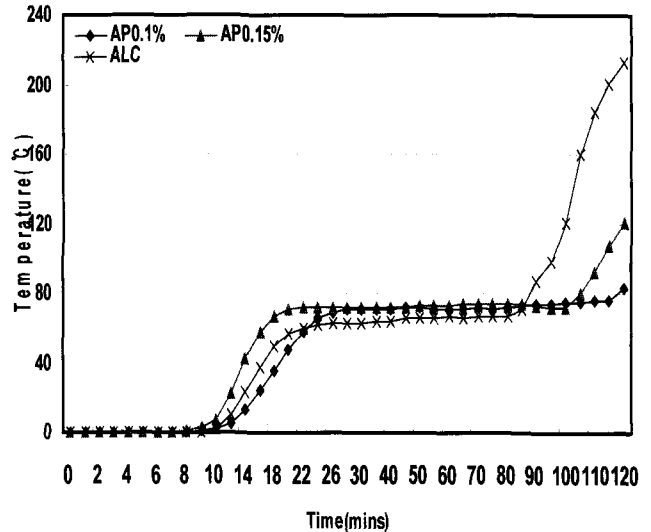


그림 22. AP로 제조한 경량기포콘크리트의 비가열면 온도곡선

기포제 종류에 따른 비가열면 온도를 살펴보면 AP, FP, AES 순으로 온도가 낮게 측정되었다. 이러한 이유는 사용한 기포제의 종류에 따라 경화체 내부에 생성된 공극의 차이 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 AP와 FP는 독립된 형태의 공극을 형성하고, AES는 서로 연속된 형태의 공극을 형성한다고 알려져 있다. 연속된 공극의 경우 공극 내부로 열전달이 용이한 반면, 독립된 공극의 경우 공극 내부의 정지된 공기에 의하여 비가열면으로의 열전달이 효과적으로 차단되기 때문에 AP와 FP를 사용한 시험체의 비가열면 온도가 AES를 사용한 시험체 보다 낮게 측정된 것으로 판단된다.

KS 2257-8 「건축 부재의 내화시험 방법-수직 비내력 구획 부재의 성능조건」에 준하여 120분 가열조건에 대한 각 시험체의 차열성을 살펴보면, AES를 사용한 시험체의 경우 기포혼입율 50, 100%에서 93.0, 92.5°C로 만족하는 것으로 나타났다. FP를 사용한 시험체의 경우도 기포혼입율 50, 100%에서 85.0, 87.8°C로 만족하는 것으로 나타났다. AP를 사용한 시험체는 AP 첨가량 0.1, 0.15% 모두 82.7, 120.4°C로 만족하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

기포제 종류에 따른 경량기포콘크리트의 기포구조 및 열적특성에 관한 실험적 연구 결과, 본 연구의 범위에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AES와 FP의 공극형상은 기포혼입율 50, 100%에서 1mm 이하의 공극이 조밀하게 분포되어 있었으며, 150%이상에서는 1mm 이상의 공극과 함께 연속된 공극이 형성되었다. AP는 공극의 형상과 크기가 불규칙한 독립공극이 존재하였으며, ALC는 1mm 내외의 원형에 가까운 독립공극이 분포되어 있는 것으로 나타났다.
- 2) 평균공극지름과 둘레 및 공극면적은 AES와 FP의 경우 기포혼입율에 따라 크기가 유사한 것으로 나타났으며, 250%를 기점으로 크게 증가하였다. AP는 첨가량이 증가함에 따라 증가하였으나 ALC보다는 모두 낮은 것으로 나타났다.
- 3) 열전도율은 AES와 FP의 경우 FP가 더 낮게 나타났으며, 기포혼입율이 증가할수록 감소하였다. 기포제의 종류와 상관없이 밀도가 감소할수록 열전도율도 감소하는 것으로 나타났으나, 감소폭은 적어지는 것으로 나타나 공극의 형상이 단열성에 영향을 주는 것을 알 수 있었다.
- 4) 비가열면의 온도는 AP와 FP가 AES보다 낮게 나타났으며, KS 2257-8에 따른 2시간 내화성능은 AES와 FP 50, 100%에서 각각 93.0, 92.5 85.0, 87.8K, AP 0.1, 0.15%에서 82.7, 120.4K로 2시간 내화성능의 기준인 140K를 만족하는 것으로 나타났다.
- 5) 열전도율 및 내화시험을 통하여 연속공극을 형성하는 AES보다 독립공극을 형성하는 AP, FP의 단열성능이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

8. 정해구, 공극성상이 경량기포콘크리트의 물성에 미치는 영향, 석사학위논문, 1996
9. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트 공학, 2005

(접수 2009. 4. 20, 심사 2009. 5. 27, 게재확정 2009. 6. 3)

참 고 문 헌

1. 강기웅, 바텀애쉬를 사용한 기포콘크리트의 흡음 특성에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 2006
2. 건축물 내화설계 기술개발, 교부 R&D보고서, 2004
3. 김상배, 경량골재를 사용한 콘크리트 패널 심재의 내열성능에 관한 연구, 석사학위논문, 2003
4. 김연홍, 경량골재를 사용한 레진콘크리트 패널 심재의 개발에 관한 연구, 석사학위논문, 2003
5. 송승영, 경량골재를 사용한 콘크리트 복합체의 단열성능에 관한 연구, 한국건축시공학회 논문집 제4권 제3호, 2004
6. 소양섭, 인공경량골재를 이용한 경량패널 심재의 열전도 특성, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, pp.131~136, 2002
7. 이명호, 샌드위치 패널 대체형 현장타설 기포콘크리트 패널 개발 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제26권 제1호, pp.389~392, 2006

요 약

최근 건설생산현장에서는 경제가 성장함과 동시에 사회적으로 급격하게 증가하는 건축물의 수요를 충족시키기 위해서 표준화, 대량 생산화가 가능한 건식 공법이 각광을 받고 있다. 이러한 현실에 부응하여 에너지 절감효과 및 공사기간 단축, 다양한 형태로 적용이 가능하고 경제성을 가지는 샌드위치 패널이 많이 사용되고 있다.

샌드위치 패널의 형태는 양면 도장 강판 사이에 유기계 및 무기계 단열재를 합성한 복합 자재이다. 유기계 단열재는 PUR(Poly-urethane foam) 및 EPS(Expanded poly-styrene foam) 등이 사용되며, 무기계 단열재는 Glass wool 및 Mineral wool 등이 사용된다. 유기계 단열재는 화재 시 불이 잘 붙어 대피할 수 있는 시간 부족과 유독가스의 발생으로 인명피해가 크게 발생할 수 있지만, 무기계보다 가격이 싸서 유기계 재료를 사용한 샌드위치 패널이 많이 사용되고 있다. 반면, 무기계 단열재 중 경량기포콘크리트는 단열성과 내화성, 경량성 등이 뛰어나기 때문에 샌드위치 패널에 적용하여 유기계의 단점을 해결하기 위한 많은 연구가 수행되어져 왔다. 단열성 및 내화성, 경량성이 뛰어난 경량기포콘크리트는 기포제를 활용하여 시멘트 경화체 내에 다량의 공극을 발생시켜 제조한 것으로서 역학적 특성은 사용되는 기포제와 발포제의 종류에 따라 많은 영향을 받게 된다. 기포제는 계면활성작용에 의해 물리적으로 기포를 도입하는 것으로서 공기량은 최고 85%까지 생성될 수 있으며, 크게 계면활성제계, 가수분해 단백질계로 구분될 수 있다. 계면활성제계 기포제는 수용액 상에서 기포시키면 안정되고, 점성이 높은 기포가 생기지만 시멘트 슬러리와 혼합 시 안정성이 저하되어 서로 연속된 형태의 기포를 형성한다. 가수분해 단백질계 기포제는 계면활성제계 기포제와는 달리 시멘트 슬러리와 혼합 시 안정되고 서로 독립적인 형태의 기포를 형성하게 된다. 발포제는 금속분말이 알칼리 용액과 접촉하여 수소가스를 발생시키는 원리를 이용하는 것으로서 현재 Autoclaved Light-Weight Concrete(ALC)의 제조에 사용되고 있다. 이와 같이 경량기포콘크리트 제조에 사용되는 기포제 및 발포제는 특성이 각기 다르기 때문에 내부 공극이 변화되고 이에 따라 경량기포콘크리트의 물리적, 단열특성이 변화될 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 기포제와 발포제를 사용한 경량기포콘크리트를 샌드위치 패널의 내부 단열재로 활용하는 기초적자료를 제공하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 즉, 경량기포콘크리트를 제조하는데 가장 일반적으로 사용하고 있는 기포제 및 발포제를 대상으로 하여 각각의 첨가량에 따른 경량기포콘크리트의 기포구조 및 열적특성을 검토함으로써 경량기포콘크리트의 높은 단열성능을 확보하기 위한 최적조건을 제시하기 위한 실험·실증적 연구를 수행하였다.

키워드 : 경량기포콘크리트, 계면활성제, 동물성기포제, 알루미늄 파우더, 단열특성