

알카리활성 기포콘크리트의 품질특성 및 환경영향 평가

Quality Characteristics and Environmental Impact Assessment of Alkali-Activated Foamed Concrete

양근혁^{1*} · 유성원² · 이현호³ · 김상철⁴

Keun-Hyeok Yang^{1*} · Sung-Won Yoo² · Hyun-Ho Lee³ · Sang-Chel Kim⁴

(Received August 14, 2013 / Revised September 3, 2013 / Accepted September 12, 2013)

The present study tested 5 concrete mixes to develop reliable mixing proportions for the sustainable alkali-activated(AA) foamed concrete as a thermal insulation material for the floor heating system of buildings. The AA binder used was composed of 73.5% ground granulated blast-furnace slag, 15% fly ash, 5% calcium hydroxide, and 6.5% sodium silicate. As a main variable, the unit binder content varied from 325kg/m³ to 425kg/m³ at a space of 25kg/m³. The test results revealed that AA foamed concrete has considerable potential for practical applications when the unit binder content is close to 375kg/m³, which achieves the minimum quality requirements specified in KS F 4039 and ensures economic efficiency. In addition, lifecycle assessment demonstrated the reduction in the environmental impact profiles of all specimens relative to typical ordinary portland cement foamed concrete as follows: 99% for photochemical oxidation potential, 87~89% for global warming potential, 78~82% for abiotic depletion, and 70~75% for both acidification potential and human toxicity.

키워드 : 기포콘크리트, 알카리활성, 단위결합재양, 환경영향, 경제성

Keywords : foamed concrete, alkali activated, unit binder content, environmental impact, economic efficiency

1. 서론

일반적으로 기포콘크리트는 시멘트계 재료에 기반한 페이스트와 기포로 구성되므로, 매트릭스 내의 공극들로 인한 낮은 압축강도와 밀도특성을 갖는다. 이 낮은 밀도특성으로 인해 기포콘크리트의 열전도율은 보통 콘크리트의 약 1/6~1/10 수준이다. 이러한 특성으로 인해 기포콘크리트는 주로 공동주택의 바닥단열 및 단열간막이 벽 등에 효율적으로 적용되고 있다(Esmaily and Nuranian 2012; Narayanan and Ramamurthy 2000).

건축물에서의 친환경 인증 및 온실가스 저감을 위한 정책적, 사회적 노력으로 인해, 콘크리트 산업에서도 이산화탄소(CO₂) 배

출을 포함한 부정적 환경영향을 최소화하려는 공감대가 높아지고 있다. 특히 콘크리트의 필수 구성재료인 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC)는 소성과정에서의 높은 CO₂ 배출량과 에너지 소비량으로 그 사용량을 줄이기 위한 다양한 기술 개발이 제시되고 있다. 이들 기술 중의 하나로써 1980년대 후반 이후 알카리활성(alkali-activated, AA) 콘크리트 개발에 대한 다양한 접근이 시도되고 있다(Pacheco-Torgal et al. 2008; Duxson et al. 2007). 기포콘크리트에서 OPC를 대체하기 위한 시도로서 Esmaily and Nuranian(2012)는 물유리에 의해 활성화된 고로슬래그를 기반으로 고강도 기포콘크리트의 제조가능성을 제시하였다. 하지만 물유리의 빠른 반응성에 의한 기포콘크리트의 급결 및 기포제의 알루미늄 성분과 물유리의 규산성분의 비율에 따라 기포콘

* Corresponding author E-mail: yangkh@kgu.ac.kr

¹경기대학교 플랜트·건축공학과 (Department of Plant·Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi-do, 443-760, Korea)

²우석대학교 토목환경공학과 (Department of Civil & Environmental Engineering, Woosuk University, Wanju, 565-701, Korea)

³동양대학교 건축소방행정학과 (Department of Architecture and Fire Administration, Dongyang University, Yeongju, 750-711, Korea)

⁴한서대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Hanseo University, Chungnam, 356-706, 305-731, Korea)

크리트의 심한 강도변화 등의 문제, 그리고 경제적 효율성의 개선 등의 애로사항들이 지적되기도 하였다. 따라서 AA 기포콘크리트의 적극적인 실용화를 위해서는 적용처에서 요구하는 명확한 목표 성능의 달성정도, 경제성, 그리고 AA 콘크리트의 가장 중요한 특성인 환경성 등에 대한 정확한 평가가 제시될 필요가 있다.

본 연구의 목표는 AA 결합재를 이용하여 공동주택의 바닥난방 시스템에 이용될 수 있는 기포콘크리트 배합을 제시하는 것이다. 배합된 기포콘크리트의 품질은 KS F 4039(2006)에서 제시하는 최소 요구성능과 비교하였다. AA 기포콘크리트의 생산단계 및 전 과정 환경영향은 OPC 기포콘크리트와 비교하였다.

2. 실험

2.1 재료특성

AA 결합재를 위한 주 원재료(source material)는 고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag, GGBS)이며, 플라이애쉬(fly ash, FA)가 전체 결합재 양의 15% 치환되었다. GGBS의 주요 성분은 45%의 CaO, 31.5%의 SiO₂ 및 13.8%의 Al₂O₃인 반면, FA의 주 성분은 57.7%의 SiO₂와 28.6%의 Al₂O₃이다(Table 1). GGBS와 FA의 비중은 각각 2.9와 2.20이며, 이들 재료의 비표면적은 각각 4,400 cm²/g과 4,200 cm²/g이다. 활성화재로는 5%의

Table 1. Chemical composition of selected source materials (% by volume)

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	LOI*
FA	57.70	28.60	5.08	4.70	0.67	0.57	1.53	0.68	0.1
GGBS	34.70	13.80	0.11	44.60	4.38	0.48	0.74	0.95	0.24

* Loss on ignition.

Ca(OH)₂와 6.5%의 Na₂SiO₃이 사용되었다. Na₂SiO₃의 몰비는 0.9이다. Ca(OH)₂와 Na₂SiO₃의 비중은 각각 2.24와 1.56이다. 선발포를 위해 사용된 기포제의 주요성분은 식물성 기반의 레진이다.

2.2 실험체 및 배합

기포콘크리트의 압축강도와 밀도는 기포 체적비에 의해 중요한 영향을 받는데, 이 기포 체적비는 단위 결합재양과 물-결합재비(W/B)에 의해 결정된다(Song and Yang 2012). 따라서 기포콘크리트 배합에서 단위 결합재양은 목표 압축강도와 밀도를 달성하기 위해 고려되어야 할 중요한 변수 중의 하나이다. 본 연구의 주요 변수는 단위결합재 양으로서 325kg/m³에서 25kg/m³ 간격으로 425kg/m³까지 변화였다(Table 2). 모든 배합에서 W/B는 40%로 고정하였다. ASTM C796-97(2012)에서 제시하는 기포콘크리트 배합절차에 따라 산정된 기포 체적비는 Table 2에 나타난 바와 같이 단위 결합재양이 325kg/m³에서 425kg/m³로 증가할 때 75%에서 68%로 감소하였다. 모든 시험체의 목표 플로우는 자기 충전성을 위해 KS F 4039에서 제시하는 180mm 이상으로 하였다.

2.3 배합, 양생 및 측정

기포 콘크리트 생산을 위하여 ASTM C796-97(2012)의 선발포 배합절차를 따랐다. 기포제는 물과의 체적비를 1:19로 하여 희석하였다. 기포 희석을 위해 사용된 물은 전체 배합수의 일부분으로 고려하여 단위수량에서 보정하였다.

기포콘크리트의 배합과 함께 초기 플로우는 측정하였다. 배합된 콘크리트에서의 실 기포율은 Lee et al.(2001)에 의해 제시된 메스실린더와 메틸알코올을 사용하여 측정하였다. 경화 콘크리트에서는 재령 7일과 28일에서의 압축강도, 그리고 재령 28일에서의 절건밀도와 열전도율을 측정하였다. 열전도율은 KS L 9016(2006)

Table 2. Details of prepared concrete mixes and summary of test results

Specimens	Designed foam volume ratio (%)	W/B (%)	Unit binder content (kg/m ³)	Composition of AA binder by weight (%)				Results of fresh concrete		Results of hardened concrete			
				GGBS	FA	Ca(OH) ₂	Na ₂ SiO ₃	Actual foam volume ratio (%)	Flow (mm)	Dry density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)		Thermal conductivity (W/m·K)
											7 days	28 days	
B-325	75	40	325	73.5	15	5	6.5	76	225	325	0.39	0.50	0.088
B-350	73		350					73	220	346	0.78	0.92	0.091
B-375	71		375					68	195	399	1.18	1.54	0.099
B-400	69		400					67	205	429	1.28	1.75	0.114
B-425	68		425					68	245	444	1.49	1.84	0.12

Note] Specimen notation refers to the unit binder content.

에 따라 측정하였다. 기포콘크리트의 공극분포 및 내부 공극구조는 수은압입법 및 광학현미경을 이용해 측정하였다.

압축강도 및 열전도율 측정을 위한 시험체는 비닐백으로 봉합한 후 항온항습실에서 양생하였다. 절건밀도 측정을 위한 시험체는 재령 1일 후 물드를 탈형하여 재령 28까지 수중양생하였다.

3. 실험결과 및 분석

선발포된 기포의 밀도는 발포시간, 기포발생을 위한 압력 및 대기온도 등에 의해 다소 변동되므로 페이스트에 투입된 실제 기포의 체적비를 정확하게 제어하는 것은 매우 어렵다. 따라서 배합설계에서 계획된 기포 체적비와 실제 투입된 기포 체적비의 차이에 대한 정보는 콘크리트 압축강도 및 밀도에 대한 실험변수의 영향을 평가하는데 있어서 중요하다. 본 연구에서 측정된 결과를 Table 2에 요약하였다. 실제 투입된 기포 체적비와 배합단계에서 계획된 기포 체적비의 차이는 최대 3% 이하로서 대부분 1%였다. 이는 선발포된 기포의 투입 및 페이스트와의 배합이 정상적으로 이루어졌음을 의미한다. 따라서 본 실험결과 분석에서는 실 기포 체적비보다는 배합단계에서 계획된 기포체적비를 이용하였다.

3.1 초기 플로우

모든 시험체는 목표 플로우인 180 mm 이상의 값을 나타내었다 (Table 2). 본 연구에서 선택된 알카리활성화제와 그 첨가량은 기포 콘크리트에서 유동성 저하 및 급결 등의 문제를 나타내지 않았다. 또한 실험된 AA 기포콘크리트의 플로우는 단위 결합재양에 영향을 받지 않았다.

3.2 공극분포 및 공극구조

AA 기포 콘크리트에서 단위 결합재양에 따른 공극크기 분포 및 공극구조를 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 시멘트계 재료의 공극시스템은 일반적으로 겔 공극($\phi < 10\text{nm}$), 미시 공극($10 \leq \phi < 50\text{nm}$), 거시 공극($50\text{nm} \leq \phi < 50\mu\text{m}$) 및 기공($50\mu\text{m} \leq \phi$)으로 분류되는데(Esmaily and Nuranian 2012), 여기서 ϕ 는 공극 직경이다. 단위 결합재양의 감소와 함께 겔 공극의 양은 감소하는 반면 거시 모세공극 및 기공의 양은 증가하였는데, 이는 결국 AA 기포콘크리트의 공극율을 증가시켰다. 이는 낮은 단위 결합재양으로 인해 공극들의 겹침 및 합병현상이 발생함으로써 독립공극의 감소되었기 때문으로 판단된다(Narayanan and Ramamurthy 2000).

Designation	Unit binder content (kg/m ³)			
	350	375	400	425
Gel pores : $\phi < 10\text{ nm}$ (%)	0.83	2.98	1.96	8.44
Micro capillaries : $10 \leq \phi < 50\text{ nm}$ (%)	14.28	10.19	17.51	17.20
Macro capillaries : $50\text{ nm} \leq \phi < 50\text{ }\mu\text{m}$ (%)	43.05	36.26	25.12	17.97
Artificial air pores : $50\text{ }\mu\text{m} \leq \phi$ (%)	9.07	8.24	7.89	6.94
Total porosity (%)	67.24	57.68	52.47	50.57

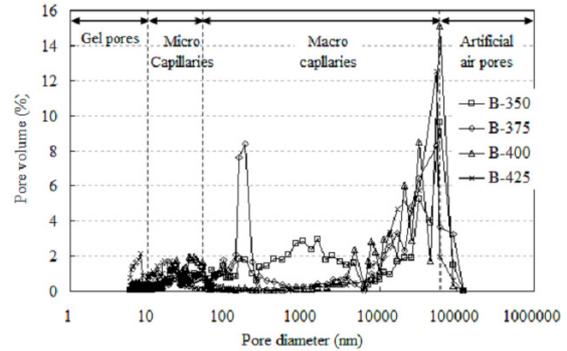


Fig. 1. Effect of unit binder content on pore size distribution

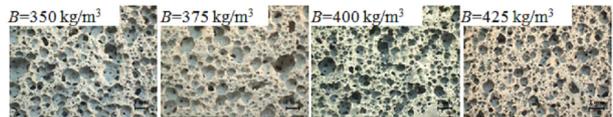


Fig. 2. Effect of unit binder content on air-void structure

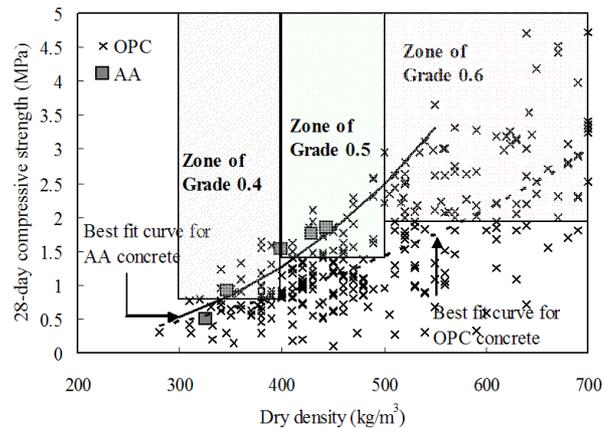


Fig. 3. Relationship of dry density and 28-day compressive strength of foamed concrete

3.3 압축강도와 건조밀도의 관계

Fig. 3에는 AA 기포콘크리트의 압축강도와 절건밀도의 관계를 나타내었다. 비교를 위해 Song and Yang(2012)에 의해 구축된 데이터베이스를 이용하여 OPC 기포콘크리트의 실험결과를 동일 그림에 함께 나타내었다. 기포 콘크리트의 압축강도는 절건밀도의 증가와 함께 증가하는데, 이 증가 기울기는 OPC보다는 AA 결합재

에서 높았다. 이에 따라 AA 기포콘크리트의 압축강도는 동일 밀도의 OPC 콘크리트에 비해 높았다. 본 연구에서 사용된 AA 결합재를 이용할 경우 KS F 4039에서 요구하는 0.4품의 최소 요구강도를 만족시키기 위해서는 375kg/m³ 이상의 단위 결합재양이 필요하였으며, 400kg/m³의 단위 결합재양인 경우 0.5품의 최소 요구강도를 만족하였다.

3.4 열전도율과 건조밀도의 관계

모든 시험체는 KS F 4039의 0.4품에서 요구하는 열전도율을 만족하였다. AA 기포콘크리트의 열전도율은 절건밀도가 375kg/m³인 경우에는 0.099W/m·K, 425kg/m³인 경우에는 0.12W/m·K로 측정되었다. 이 값은 보통중량 콘크리트의 약 1/10수준이다. Weigler and Karl(1980)은 기포 콘크리트의 열전도율은 절건밀도가 100kg/m³ 감소할 때 약 0.04W/m·K씩 감소함을 보였다. 이는 기포콘크리트의 열전도율은 절건밀도의 선형함수로 제시될 수 있음을 의미한다. Table 2에 나타난 실험결과를 회귀분석하면 AA 기포콘크리트의 열전도율 (λ)은 다음 식으로 간단히 나타낼 수 있었다.

$$\lambda = 0.26(\gamma_d/\gamma_0)\lambda_0 \quad (1)$$

여기서 γ_d 는 콘크리트의 절건밀도이며, γ_0 (= 1,000kg/m³)와 λ_0 (= 1W/m·K)는 각각 절건밀도와 열전도율의 참고값이다.

4. 경제성 및 환경성

4.1 경제성 평가

OPC 기포콘크리트에 대한 AA 기포콘크리트의 상대 생산단가비를 Fig. 4에 나타내었다. OPC 기포콘크리트의 배합은 공동주택의 난방시스템을 위해 주로 이용되는 것을 참고로, 물-결합재비는 50%, 단위 결합재양은 425kg/m³, 기포 체적비는 65%를 가정하였다. 각 재료들의 단가(원/톤)는 한국물가정보에서 제공하는 자료를 이용하였다(Table 3). AA 기포콘크리트의 생산단가는 결합재양의 증가와 함께 증가하는데, 단위 결합재양이 375kg/m³일 때의 생산단가는 OPC 기포 콘크리트의 약 1.03배로서 비슷한 수준이다. 따라서 제시된 AA 결합재를 이용할 경우 단위 결합재양을 375kg/m³으로 하면 KS F 4039에서 제시하는 0.4품의 품질을 확보하면서 OPC 기포콘크리트 대비 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

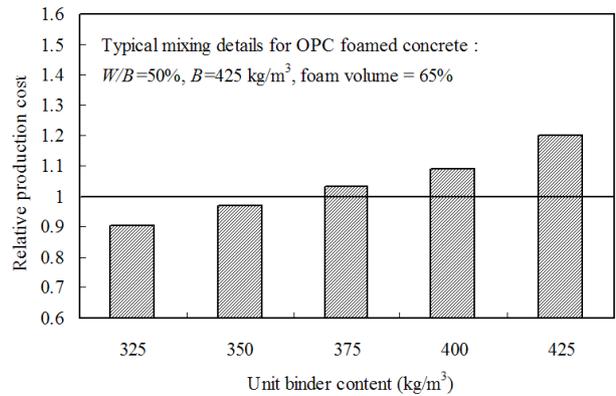


Fig. 4. Product cost ratio of AA foamed concrete relative to typical OPC foamed concrete

Table 3. Commercial unit cost of each constituent material

Material	OPC	GGBS	FA	Ca(OH) ₂	Na ₂ SiO ₃	VFA*
Unit cost (1,000/ton)	75	44.4	29.6	106.5	690.8	1480

* VFA: vegetable-based soap-typed resin foaming agent

4.2 환경영향 평가

Table 4에는 ISO 14040 시리즈(2006)에서 제시하는 전과정 평가(lifecycle assessment, LCA) 절차에 따라 산정한 AA 기포콘크리트의 환경부하량을 나타내었다. 생산단가 비교를 위해 선정한 OPC 기포콘크리트의 환경부하량도 동일 Table에 나타내었다. AA 기포콘크리트의 환경부하량에서 가장 큰 영향을 미치는 요인은 알카리활성화제이다. 이는 알카리활성화제의 CO₂ 배출계수를 포함한 환경부하계수가 FA에 비해 매우 높기 때문이다. 기포콘크리트에서 산정된 환경부하량들 중 가장 큰 값은 CO₂ 배출양이며, 두 번 째로 큰 값은 AA 결합재를 사용한 경우에는 천연가스 소비, OPC를 사용한 경우에는 유연탄이다. AA 기포콘크리트의 CO₂ 배출량은 OPC 기포콘크리트 대비 약 87~89% 감소된다.

산정된 환경부하량으로부터 결정된 환경영향에 대해 OPC 기포콘크리트 대비 AA 기포콘크리트의 저감율을 Fig. 5에 나타내었다. 평가된 환경영향 범주는 자원고갈, 지구온난화, 산성화, 부영양화, 광화학산화물 및 인간독성을 포함한다. 일반적으로 AA 기포콘크리트의 환경영향 저감율은 단위 결합재양의 증가와 함께 미소하게 감소한다. OPC 기포콘크리트 대비 AA 기포콘크리트에서의 환경영향 저감에 대해 다음과 같이 요약할 수 있다: 1) 가장 큰 저감율은 광화학산화물 평가에서 나타났는데, 그 비율은 99%이다; 2) 지구온난화의 저감율은 87~89%이다; 3) 자원고갈 저감율은 78~82%

Table 4. Environmental load inventories of each specimen calculated from LCA procedure

Specimen	Environmental load inventories (kg/m ³)								
	Emissions					Primary energy use			
	CO ₂	CO	SOX	NOX	NH ₃	Anthracite coal	Bituminous coal	Natural gas	Crude oil
B-325	4.55E+01	2.20E-02	3.85E-02	1.60E-01	2.61E-03	3.21E-01	2.44E-03	1.01E+01	5.09E+00
B-350	4.91E+01	2.37E-02	4.16E-02	1.72E-01	2.81E-03	3.44E-01	2.63E-03	1.09E+01	5.50E+00
B-375	5.25E+01	2.54E-02	4.45E-02	1.85E-01	3.01E-03	3.70E-01	2.82E-03	1.17E+01	5.89E+00
B-400	5.59E+01	2.71E-02	4.74E-02	1.97E-01	3.20E-03	3.94E-01	3.00E-03	1.24E+01	6.27E+00
B-425	5.40E+01	2.76E-02	4.91E-02	1.54E-01	2.67E-03	2.10E-01	2.46E-03	8.91E+00	6.30E+00
OPC	4.12E+02	3.58E+01	2.28E-01	8.67E-01	5.92E-02	3.04E+00	7.21E+01	3.25E+00	1.15E+01

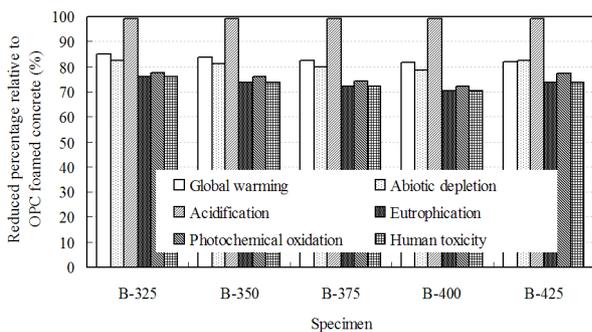


Fig. 5. Reduction ratio of each environmental impact profile of AA foamed concrete relative to the typical OPC foamed concrete

이다; 그리고 4) 산성화와 인간독성의 저감율은 비슷한 수준으로서 약 70~75%이다. 따라서 AA 기포콘크리트는 OPC 기포콘크리트 대비 환경영향이 상당히 감소된(70% 이상) 지속가능 건설재료로서 그 활용성이 높다고 제시될 수 있다.

5. 결론

공동주택의 난방시스템에서 주로 이용되는 기포콘크리트에 알칼리활성(alkali activated, AA) 결합재의 적용성을 평가하였다. 제시된 AA 기포콘크리트 배합에 대해 KS F 4039의 최소 요구조건과의 비교를 통한 품질평가 및 전과정 환경영향 평가에 의한 지속가능성 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기포콘크리트의 압축강도는 절건밀도 증가와 함께 증가하는데, 이 증가 기울기는 보통포틀랜드시멘트(OPC)보다는 AA 결합재에서 높았다. 이에 따라 AA 기포콘크리트의 압축강도는 동일 밀도의 OPC 콘크리트에 비해 높았다.

2. 본 연구에서 사용된 AA 결합재를 이용할 경우 KS F 4039에서 요구하는 0.4품의 강도조건을 만족시키기 위해서는 375 kg/m³ 이상의 단위 결합재양이 필요하였으며, 400 kg/m³의 단위 결합재양인 경우 0.5품의 요구조건을 만족하였다.
3. AA 기포콘크리트의 생산단가는 결합재양의 증가와 함께 증가하는데, 단위 결합재양이 375 kg/m³일 때의 생산단가는 OPC 기포 콘크리트의 약 1.03배로서 비슷한 수준이다.
4. OPC 기포콘크리트 대비 AA 기포콘크리트의 환경영향 저감율은 광화학산화물의 경우 99%, 지구온난화의 경우 87~89%, 자원고갈의 경우 78~82%, 그리고 산성화와 인간독성의 경우 70~75% 수준으로서 매우 높다.

감사의 글

본 연구는 2013년 정부의 재원(산업통상자원부)으로 중소기업청의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. C0095052).

References

ASTM C796-97. (2012). Annual Book of ASTM Standards: V.4.02, ASTM International.

Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., Lukey, G. G., Palomo, A., and van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer Technology: The Current State of the Art, Journal of Material Science, **42**, 2917-2933.

Esmaily, H., and Nuranian, H. (2012). Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali-activated slag. Construction and Building Materials, **26**, 200-206.

ISO 14040. (2006). Environmental Management-Lifecycle

- Assessment—Principles and Framework, International Standardization Organization 2006.
- KS F 4039, KS L 9016. (2006). Korean Industrial Standard: Testing Concrete, Korean Standards Information Center(KS).
- Lee, D. H., Jun, M. H., and Ko, J. S. (2001). Physical Properties and Quality Control of Foamed Concrete with Fly Ash for Cast-in-Site, *Journal of Korea Concrete Institute*, **13(1)**, 69–76.
- Narayanan, N., and Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review, *Cement and Concrete Composite*, **22(5)**, 321–329.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S. (2008). Alkali-Activated Binders: A Review—Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanism and Hydration Products, *Construction and Building Materials*, **22(7)**, 1305–1314.
- Song, J. K., and Yang, K. H. (2012). Development of Environmental-Friendly High-Performance Floor System, Technical Report, Department of Architectural Engineering, Chonnam National University.
- Weigler, H., and Karl, S. (1980). Structural lightweight aggregate concrete with reduced density—lightweight aggregate foamed concrete, *International Journal of Lightweight Concrete*, **2**, 101–104.

알카리활성 기포콘크리트의 품질특성 및 환경영향 평가

본 연구에서는 공동주택의 난방시스템을 위한 단열재로서 지속가능한 알카리활성 기포콘크리트 배합설계를 제시하기 위한 5배합을 실험하였다. 알카리활성 결합재를 위해 73.5%의 고로슬래그와 15%의 고로슬래그가 5%의 수산화칼슘과 6.5%의 규산나트륨에 의해 활성화되었다. 주요 실험변수인 단위 결합재량은 325 kg/m³에서 425 kg/m³까지 25 kg/m³ 단위로 증가하였다. 실험결과 AA 기포콘크리트는 단위 결합재량이 375 kg/m³일 때 KS F 4039에서 제시하는 최소 강도조건 및 경제성을 만족시켰다. 또한 보통포틀랜드시멘트 기포콘크리트 대비 알카리활성 기포콘크리트의 환경영향 저감율은 광화산화물의 경우 99%, 지구온난화의 경우 87~89%, 자원고갈의 경우 78~82%, 그리고 산성화와 인간독성의 경우 70~75% 수준으로서 매우 높았다.