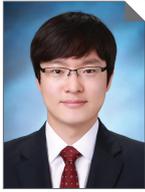


지오폴리머¹⁾ 콘크리트의 배합과 역학적 특성

Critical Review on the Mechanical Properties and Mix Propotion of Geopolymer Concrete



이남곤 Nam-Kon Lee
싱가포르국립대
Research Fellow
E-mail : ceelink@nus.edu.sg

1. 배경

지오폴리머 콘크리트는 알루미늄실리케이트 또는 칼슘알루미늄실리케이트 무기물과 알칼리 활성화제, 물, 잔골재, 굵은골재로 구성되며, 그 밖에 높은 알칼리성 조건에서 성능효과가 입증된 화학혼화제가 사용될 수 있다. 지오폴리머 콘크리트는 OPC(Ordinary Portland Cement)에 비해 훨씬 많은 배합변수가 존재한다. 예를들어, 원재료(플라이애시, 슬래그, 포졸란 재료), 알칼리 활성화제(알칼리 실리카, 알칼리 수산화물, 알칼리 탄산화물, 알칼리 설페이트), 화학 및 무기질 첨가제의 양을 변화시키면서 다양한 성능을 갖는 콘크리트 제조가 가능하다. 그러나, 지난 150년 이상 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 적용되어 왔던 제조방법을 지오폴리머 콘크리트에 적용하는 것은 쉽지 않은 일이다.

지오폴리머 콘크리트의 생산에는 크게 두 가지 방법이 제안된다. 첫째는 알칼리 활성화제를 포함한 지오폴리머 바인더를 먼저 제조하고, 물과 골재, 혼화제를 혼합하여 콘크리트를 제조하는 방법이다(프리믹스 방식). 두번째는 처음부터 직접적으로 바인더, 알칼리 활성화제, 물, 골재를 함께 혼합하여 제조하는 방법이다. 알칼리 활성화제라는 OPC에는 존재하지 않는 변수로 인하여 어떠한 타입의 알칼리 활성화제를 쓰는 것이 지오폴리머 콘크리트 제조에 바람직한가에 대한 논의가 필요하다.

지오폴리머 콘크리트에 대한 연구는 전통적 OPC 콘크리트에 비해 매우 부족하므로, 배합설계시에는 성능기반 설계가 바람직하다. 지오폴리머 재료에 대한 불완전한 이해로 인해 제품의 표준화에 어려움이 존재하므로, 사용자의 목적 및 성능개선을 달성하기 위해서는 성능기반 배합설계 방법이 더 나올 것으로 사료된다.

기존의 수많은 논문들이 지오폴리머의 배합설계를 다루었지만, 재료 및 실험조건이 매우 다르기 때문에 비슷한 조건에서도 결과가 상이하고, 재현성에 문제가 있는 것으로

1) 지오폴리머 콘크리트와 알칼리 활성화 콘크리트에 대한 보다 명확한 정의가 필요하며, 아직까지 이에 대한 다양한 논의가 이루어지고 있으나, 본 고에서는 알칼리 활성화 콘크리트를 지오폴리머 콘크리트에 포함시킴으로써 "지오폴리머 콘크리트"를 보다 포괄적인 의미로 사용하였음을 밝힌다.

나타났다. 따라서, 본고에서는 실제 실용화 되고 있는 사례를 찾아서 지오폐리머 콘크리트 배합설계를 다루었고, 또한 역학적 성능을 살펴보고자 한다.

2. 지오폐리머 콘크리트 배합

2.1 배합 방법

콘크리트의 절대 체적을 구하기 위해서는 플라이애시, 슬래그, 메타카올린 등 원재료의 밀도와 분말도 뿐만 아니라 분말형 알칼리 활성화제의 밀도, 분말형 알칼리 활성화제의 물에 대한 용해도, 그리고 배합 용액의 밀도 등이 고려되어야 한다.

지오폐리머 콘크리트 제조는 일반 OPC 콘크리트 배합의 프로토콜을 그대로 따라가는 것이 일반적이다. 다만, 액상 활성화제의 화학적 위험성 때문에 대량 생산의 경우에는 액상 활성화제 사용을 추천하지 않으며, 대신 분말형 활성화제를 사용하고 그 양을 최소화하는 것이 바람직하다. 분말형 활성화제는 물에 용해될 때 높은 열이 발생할 가능성이 있으며, 그로 인해 다른 배합재료의 반응도를 가속시킬 수 있다. 이것은 초기 반응을 증가시키는 역할도 하지만, 한편으로는 급결과 같이 바람직하지 않은 결과를 초래할 수도 있다. 한편, 낮은 용해도를 갖는 분말 활성화제의 경우에는 충분한 용해도를 확보하기 위해서 냉수보다는 미온수 사용(중동 등 혹서 지역)이 고려 될 수 있다.

2.2 화학 혼화제

지오폐리머의 유동성을 확보하기 위해서 기존 OPC 콘크리트에 사용되는 다양한 혼화제가 사용될 수 있는데, 이에 대한 연구는 아직 충분이 이루어지지 않은 상황이다. 특히, 고성능 감수제의 경우에는 믹싱 초기의 높은 알칼리 환경하에서 성능이 발현되지 않을 수 있다. 배합설계에는 다음과 같은 몇 가지가 고려되어야 한다. 지오폐리머 콘크리트는 물/바인더비에 매우 민감하므로, 액상 혼화제 첨가시

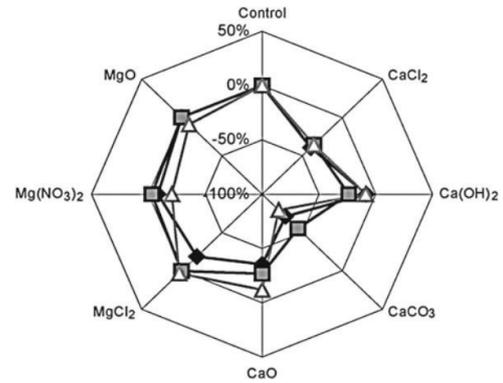


그림 1. 0.09 M 칼슘, 마그네슘염의 첨가에 따른 Vicat needle 응결시험 결과 (플라이애시/메타카올린 혼합 지오폐리머 바인더, Na-K silicate 활성화제 사용) [5, 20]

혼화제에 포함된 H₂O양을 배합에 고려하여야 한다. 또한, 플라이애시 경우는 미연탄소분 존재로 인해 성능에 부정적 영향을 끼칠 수 있다. 예를 들어, 미연탄소분이 많은 플라이애시를 사용할 경우, 유기물질의 미연탄소 흡착으로 인하여 혼화제의 성능이 저하될 수 있다. 지오폐리머 혼화제 사용은 충분한 검토가 이루어지지 않았으며, 긍정적 효과와 부정적 효과가 동시에 존재하므로 이에 대한 충분한 이해가 필요하다.

기존 연구에 의하면, sulfonate hydrocarbon-type 공기 연행제 첨가는 알칼리 실리케이트 활성화 슬래그 콘크리트의 공기량을 6%까지 증진시키는 효과가 있는 것으로 나타났다[1]. 그러나, 적절한 공기연행이 반드시 지오폐리머 콘크리트의 동결융해 향상으로 이어지는 않는다는 연구 결과도 있다[2]. 지오폐리머의 공극 분포특성은 일반 OPC와는 다르기 때문에 (일반적으로 OPC 보다 미세공극이 더 많이 존재함), 같은 공기량 일지라도 동결융해 성능이 다르게 나타날 수 있다. 기존 연구에서는 쇼돔실리케이트 또는 NaOH/Na₂CO₃이 사용된 알칼리 활성화슬래그 콘크리트에서 alkyl aryl sulfonate 공기연행제가 유동성, 수축, 역학 성능을 향상 시키는 것을 확인하였다[3].

알칼리 활성화 슬래그에서는 sodium phosphate 첨가로 인해서 Ca₃(PO₄)₂ precipitation이 발생하고, 이로 인해 반

응 시스템의 응결지연효과를 보였다[4]. <그림 1>은 다양한 응결지연제 사용에 따른 지오폐리머 콘크리트의 응결지연효과를 보여준다.

유동화제는 특히 지오폐리머 콘크리트의 상용화와 성능 향상을 위해서 가장 시급히 개선 되어야 한다. 지오폐리머의 특수성에 적합한 유동화제가 개발되면, 역학적 성능 향상 및 원가 절감에도 긍정적 영향을 끼칠 수 있다. 현재까지 지오폐리머 콘크리트 배합의 핵심은 알칼리 활성화제이며, 이것의 종류와 양에 따라서 다양한 성능을 갖는 배합설계가 가능하였다. 그러나, 역학적 성능을 위해서는 단순히 알칼리 활성화제를 증가시키는 방법뿐만 아니라, 배합수량을 감소시킴으로써 가능하다. 현재 지오폐리머 콘크리트에서 물/바인더비를 0.3~0.35 이하로 낮추는 것은 유동성 확보 관점에서 쉽지 않다. 만약, 지오폐리머 콘크리트용 유동화제가 개발되면, 물/바인더비를 현재보다 더욱 낮추는 배합설계가 가능할 것이고, 역학적 성능도 향상도 기대할 수 있다.

플라이애시 지오폐리머 콘크리트 연구에서 나프탈렌 설펜포네이트 기반 유동화제를 4%까지 첨가한 결과, 유동성 개선 효과를 나타냈으며, 2% 이상 첨가할 경우에는 약간의 압축강도 감소를 나타냈다[6]. 또 다른 연구에서도 유동화제의 효과가 있다는 결과도 있으나 [3,7], 이는 액상 유동화제에 포함된 H₂O로 인해 물/바인더비가 소폭 증가되어, 유동성 개선이 이루어진 것처럼 보이게 하는 효과로 판단된다.

2.3 양생

일반 OPC에 적합한 양생 방법(수중, 기중, 습윤, 스팀)일지라도 지오폐리머 콘크리트 경우에는 수중에서 알칼리 활성화제 성분의 leaching 및 washout이 일어날 수 있기 때문에 적절하지 않을 수 있다. 지오폐리머의 양생시간은 온도와 응결, 활성화제 조건에 따른 다양하게 변한다. OPC의 수화물인 C-S-H, AFm, AFt 및 Ca(OH)₂ 등에 비하여 지오폐리머 calcium-free system의 경우에는 훨씬

적은 양의 물이 화학적으로 결합하고, 결합력도 약하며, 그 반응도 매우 느리다고 알려져 있다[20]. 따라서 지오폐리머 콘크리트는 매우 주의 깊은 양생방법이 요구된다. 만약 충분하지 않은 양생의 경우에는 심각한 탄산화, 균열, 표면 백화 현상 등이 발생할 수 있다. 특히, 지오폐리머 콘크리트 제조시에는 유동성, 응결, 초기강도 발현에 대하여 외기 온도의 영향이 OPC에 비해 훨씬 크다고 알려져 있다[20].

지오폐리머 콘크리트 배합의 표준화는 상당한 어려움이 존재한다. 위에서 언급한 양생 조건의 사례와 같이 어떤 제품에 맞는 양생조건이라 할지라도 다른 제품에서는 적절하지 않을 수 있다. 따라서, 현 시점에서는 구체적인 시방기준 제시보다는 성능기반 기준이 제안되어야 할 것이다. 비록 양생 조건의 다양성이 또 다른 예기치 못한 부정적 결과를 가져올 수 있을지라도, 성능기반 배합설계를 위해서는 현재 OPC 콘크리트에 대하여 명시된 양생 관련 시방기준보다는 좀 더 유연한 양생조건이 제시되는 것이 바람직할 것이다.

2.4 배합사례

네덜란드의 ASCEM® cement[8]는 지오폐리머 콘크리트 생산에 두 가지 개념을 적용하였다. 알루미늄실리케이트 무기재료의 알칼리 활성화와 다양한 성분을 갖는 플라이애시와 같은 부산물의 재사용이다. 구체적으로는 부산물을 추가 melting process를 통하여 품질이 일정하고, 우수한 성능을 갖는 재료로 변화시켜 사용하는 것이다. 이 방법은 지오폐리머 콘크리트의 실용화의 큰 장벽인 재료의 균질성을 확보하는 해결방법이 될 수 있다. ASCEM® cement의 핵심은 바로 부산물의 melting process이다.

지오폐리머 콘크리트의 기본적인 배합 설계 개념은 OPC 콘크리트를 따른다. 유동성을 확보하기 위해서는 물/바인더비가 원재료의 요구수량에 따라서 달라진다. ASCEM cement는 크게 다음과 같이 두 가지로 나뉜다. (A) 액상형 알칼리제 : NaOH solution (50%)와 potassium silicate solution (13.8% K₂O, 26% SiO₂)를 4:3의 비율로 혼합

하여 제조한다. 액상 활성화제 사용시, 원재료 reactive glass와 fly ash는 별도로 프리믹싱 과정을 거친다. (B) 분말형 알칼리제: 분말형 사용시 모든 재료 (알칼리 활성화제 포함)는 프리믹스 되어 사용된다.

[표 1]은 실제 생산에 사용되는 ASCEM® cement 콘크리트의 배합표를 나타낸다.

3. 지오폐리머 콘크리트 역학적 특성

3.1 압축강도

〈그림 2와 3〉은 ASCEM® cement로 제조된 지오폐리머 콘크리트 파이프의 압축강도 및 파괴강도를 나타낸다 (배합표는 [표 1]을 확인). 수중 양생 후에 측정된 압축강도 결과에서, 비록 일반 OPC 콘크리트보다 낮은 압축강도를 나타냈지만, 60 MPa 이상을 확보함으로써 파이프 요구 강도를 모두 만하였고, 향후에 분말도 증가 및 알칼리제 조정

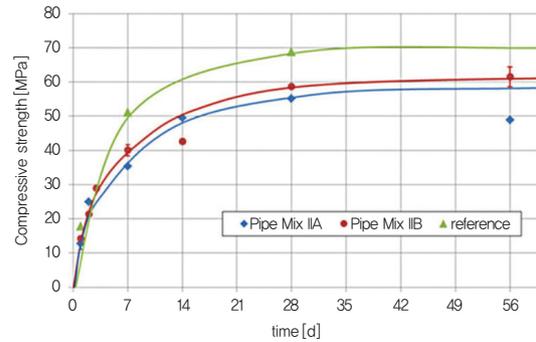


그림 2. ASCEM® cement로 제조된 지오폐리머 콘크리트 압축강도 [8,20]

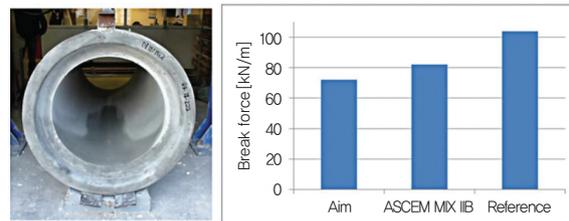


그림 3. 지오폐리머 콘크리트 파이프의 파괴 실험 및 강도 [8,20]

[표 1] ASCEM® cement의 콘크리트 배합 [20]

	Unit	Ref	Plate		Pipe		
			MIX IA	MIX IB	Ref	MIX IA	MIX IIB
Reference cement	kg/m ³	320*			390**		
ASCEM cement plus (inclu. Dry activator)	kg/m ³		-	326			389
ASCEM cement	kg/m ³		310	-		365	-
ASCEM cement (mix of NaOH and K2SiO3)	kg/m ³		43.4	-		51.26	-
Aggregates 0/32 (natural round grains)	kg/m ³	1967	1967	1967		-	-
Aggregates 0/16(partly broken)	kg/m ³		-	-	1823	1800	1807
Water(incl. water in fluid activator)	kg/m ³	134.4	115.4		144.2	143.8	163.4
w/c(exclusive of activator)	-		0.37	0.46		0.39	0.42
Activator content (mass dry content activator/mass cement)	%		6	11.6		6	11.6
Na ₂ O content in the cement (Na ₂ O equivalent)	%		3.4	2.2		3.4	2.2

* CEM I : additional use of superplasticizer 2.08 kg/m³

** CEM III/B : no additives used

등을 통하여 추가적인 강도 향상이 이루어질 것으로 기대하고 있다.

3.2 휨 및 인장강도

[표 2]는 다양한 원재료로 제조된 지오폐리머 콘크리트의 휨강도 및 탄성계수 결과를 보여준다. 슬래그 단독 사용 시 휨강도 및 탄성계수가 가장 높았고, 이는 일반 OPC 콘크리트 결과와 비슷한 수준이었다. 이 결과는 기본적인 배합의 차이가 존재하므로, 바인더의 종류에 따른 결과를 직접적으로 비교하기는 어려우나, 동일한 배합에서 휨강도와 탄성계수를 비교하는 것은 의미가 있다. 플라이애시 기반 지오폐리머의 경우에, 휨강도 대비 탄성계수가 가장 낮게

[표 2] 지오폐리머 콘크리트의 역학적 강도[9]

Binder	Fibres (%)	Flexural strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Deflection (mm)
BFS(slag)	0	7.36	4860	0.1277
	1	5.91	3896	0.1361
Fly ash	0	5.79	4441	0.1071
	1	4.79	3660	0.1084
Fly ash/BFS	0	4.80	4906	0.0852
	1	4.66	3810	0.1068
OPC	0	7.76	5679	0.1136
	1	7.61	6137	0.1051

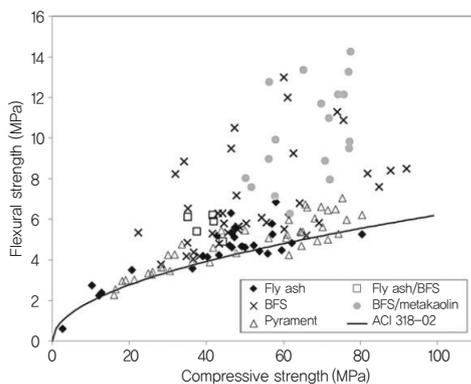


그림 4. 지오폐리머 콘크리트의 휨강도와 압축강도 관계 [21]

나타났다. 플라이애시/슬래그 혼합 지오폐리머는 휨강도가 가장 낮았음에도 오히려 플라이애시 지오폐리머보다 높은 탄성계수를 나타냈다.

<그림 4>는 지오폐리머 콘크리트의 압축강도와 휨강도 관계를 나타낸다. ACI 318-02 기준에서 제시한 값에 비하여 전체적으로 압축강도 대비 높은 휨강도 결과를 보여준다. 그러나, 이 결과는 모두 해외 연구자들에 의한 결과이며, 국내 재료를 사용한 지오폐리머 콘크리트는 이와 다른 양상을 나타낼 수 있다.

3.3 탄성계수

지오폐리머 콘크리트의 구조부재로의 적용을 위해서는 구조설계과정에서 탄성계수가 필요하다. 메타카올린 지오폐리머에 대한 초음파측정법을 사용하여 측정된 탄성계수 결과, Si/Al ratio가 증가할 때 탄성계수는 감소하며, 그 값은 Si/Al ratios가 1.5에서 5.0 사이 일 때 각각 5.5와 9.1 GPa로 측정되었다 [10]. 다른 연구자는 Si/Al ratio가 1.15에서 1.90일 때, 메타카올린 지오폐리머의 탄성계수는 2.3에서 5.2 GPa를 나타냈다[11]. 그 밖에, 알칼리 활성 슬래그 콘크리트는 약 30-35 GPa의 탄성계수가 측정되었다[12].

이러한 탄성계수 결과는 지오폐리머 반응물질의 미세구조와 매우 깊은 관계가 있다. 플라이애시, 메타카올린 지오폐리머에 대한 nanoindentation 분석에서 N-A-S-H 겔은 약 17-18 GPa의 고유탄성계수를 나타냈으며 [13]. 또한, 알칼리 실리케이트 활성 슬래그의 C-A-S-H 겔은 28-50 GPa의 탄성계수를 보였고, 알칼리 활성 슬래그에서는 12-42 GPa의 탄성계수가 측정되었다.

전반적으로 플라이애시 지오폐리머 콘크리트의 탄성계수는 ACI 318에서 제시한 OPC 콘크리트의 탄성계수 예측식보다 동일 압축강도에서 낮게 측정되었다 [14,15,16]. 이에 대한 원인에 대하여, 몇몇 연구자는 사용된 골재의 낮은 탄성계수를 원인으로 들기도 하였으며[6], 또 다른 연구자는 수축에 의한 내부 균열이 낮은 탄성계수의 원인이라고 보

고 하였다 <그림 5> [17].

화학적, 열역학적 관점에서 알칼리 활성 슬래그의 C-A-S-H phases는 OPC의 수화물인 C-(A)-S-H phases 보다 수축이 더 심한 것으로 알려져 있다[18, 19]. <그림 6>에서와 같이 알칼리 활성 슬래그의 수축은 건조수축 보다는 자기수축 (특히, 자기 건조 현상)과 관련성이 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 지오폐리머는 OPC 보다 훨씬 미세한 공극 구조로 이루어져 있으며, 이로 인해 자기 건조현상에 의한 수축응력이 더 큰 것으로 알려져 있다.

앞서 언급한 지오폐리머의 탄성계수는 일반 OPC 와는 다르기 때문에, 일반 OPC의 크리프 모델을 그대로 적용하는 것은 문제가 생길 수 있다. 지오폐리머와 OPC 콘크리트의 미세구조, 겔 구조, 역학적 강도의 차이는 시간의존적

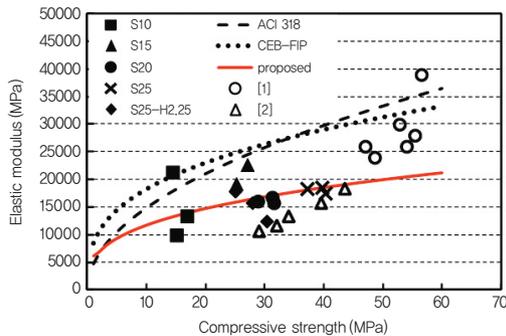


그림 5. 지오폐리머 콘크리트의 탄성계수와 ACI 318 예측식 비교 [17]

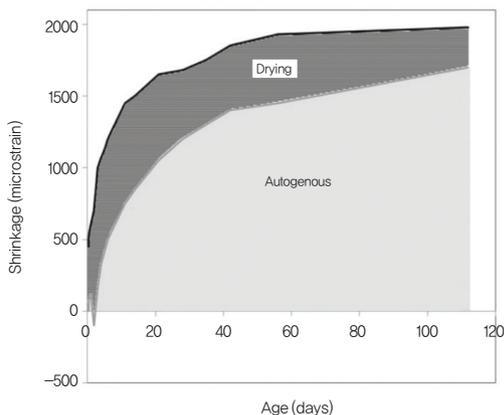


그림 6. 알칼리 활성 슬래그의 건조수축과 자기수축 양 비교. 온도 24°C, 상대습도 50% [20]

현상인 크리프 모델을 제시하는데 있어서도 다른 관점이 필요할 것이다.

4. 결론

본 고에서는 지오폐리머 콘크리트에 대한 배합과 역학적 특성에 대하여 소개하였다. 지오폐리머와 OPC의 고유한 화학적 차이로 인하여, 기존 OPC에 사용되는 고성능 감수제 및 기타 화학혼화제 등은 일반적으로 지오폐리머 시스템에 효과적인 성능을 발휘하지 못하거나, 약간의 효과만 보이는 것으로 나타났다. 따라서 지오폐리머 콘크리트의 상용화를 위해서는 새로운 형태의 화학혼화제 개발이 필수적이며, 지오폐리머의 화학적 반응 메커니즘에 대한 보다 심도 깊은 연구가 요구된다. 또한, 지오폐리머 콘크리트의 탄성계수 및 크리프는 상대적으로 적은 연구가 수행되어 왔으며, 특히, 탄성계수의 경우에는 일반 OPC 콘크리트보다 낮은 경향을 보이기도 하였으므로 이에 대한 micro & macro 관점에서 동시에 면밀한 검토와 검증이 필요하다. 지오폐리머 콘크리트의 상업화를 위해서 필요한 것들과 같이 정리하였다.

첫째, 재료의 안정적 수급 : 바인더 뿐만 아니라, 알칼리 활성화제에 대한 합리적인 가격과 장기적이고 안정적인 재료 수급이 가능하여야 한다.

둘째, 비용 : 지구온난화에 대한 환경문제를 비용적 관점에서 다루기 시작하고 있는 현 시점에서, 탄소배출권 거래를 고려한 생애 전반적인 비용을 OPC와 비교하여 판단하여야 한다.

셋째, 품질 관리, 품질 확보 : 가장 중요하고 까다로운 문제이다. 부산물을 주로 사용하는 지오폐리머 콘크리트는 원재료의 품질 안정화 과정이 반드시 필요하다.

넷째, 장기 내구성능 : 현 ASTM 기준은 가속화된 조건에서 내구성능을 평가하나, 이러한 기준은 OPC에는 적합할 수 있으나, 지오폐리머에서는 적합하지 않을 수도 있다. 때로는 장기 내구성능이 과소평가 되거나 과대평가 될 여지가 있다.

다섯째, 표준화 : 지방서나 특별 기준 없이는 잠재시장 비용이 요구되므로 쉽지 않은 현실적 문제가 있다.에 진출 할 수 없으므로 표준화 작업이 필요하나, 시간과

담당 편집위원 : 고경택(한국건설기술연구원)

참고문헌

1. Douglas, E., Bilodeau, A., Malhotra, V.M. : Properties and durability of alkali-activated slag concrete. *ACI Mater. J.* 89 (5), 509–516 (1992)
2. Rostami, H., Brendley, W. : Alkali ash material : a novel fly ash-based cement. *Environ. Sci. Technol.* 37 (15), 3454–3457 (2003)
3. Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B. : Effect of admixtures on properties of alkaliactivated slag concrete. *Cem. Concr. Res.* 30 (9), 1367–1374 (2000)
4. Gong, C., Yang, N. : Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud-slag cementitious material. *Cem. Concr. Res.* 30 (7), 1013–1016 (2000)
5. Lee, W.K.W., van Deventer, J.S.J. : The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements. *Cem. Concr. Res.* 32 (4), 577–584 (2002)
6. Hardjito D and Rangan B V (2005), Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete, Research Report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, available at espace@curtin.
7. Douglas, E., Brandstetr, J. : A preliminary study on the alkali activation of ground granulated blast-furnace slag. *Cem. Concr. Res.* 20 (5), 746–756 (1990)
8. Buchwald, A. : ASCEM® cement – a contribution towards conserving primary resources and reducing the output of CO₂. *Cem. Int.* 10 (5), 86–97 (2012)
9. Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., Vázquez, T. : Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cem. Concr. Res.* 33 (12), 2031–2036 (2003)
10. Lawson, J.L. : On the determination of the elastic properties of geopolymeric materials using non-destructive ultrasonic techniques. MSc thesis, Rochester Institute of Technology (2009)
11. Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M., van Deventer, J.S.J. : Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids Surf. A* 269 (1–3), 47–58 (2005)
12. Douglas, E., Bilodeau, A., Malhotra, V.M. : Properties and durability of alkali-activated slag concrete. *ACI Mater. J.* 89 (5), 509–516 (1992)
13. Němeček, J., Šmilauer, V., Kopecký, L. : Nanoindentation characteristics of alkali-activated aluminosilicate materials. *Cem. Concr. Compos.* 33 (2), 163–170 (2011)
14. Diaz-Loya, E.I., Allouche, E.N., Vaidya, S. : Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete. *ACI Mater. J.* 108 (3), 300–306 (2011)
15. Fernández-Jiménez, A.M., Palomo, A., López-Hombrados, C. : Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Mater. J.* 103 (2), 106–112 (2006)
16. Sofi, M., van Deventer, J.S.J., Mendis, P.A., Lukey, G.C. : Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cem. Concr. Res.* 37 (2), 251–257 (2007)
17. Lee, N. K., & Lee, H. K. (2013). Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and Building Materials*, 47, 1201–1209.
18. Chen, W., Brouwers, H.: The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag. *J. Mater. Sci.* 42 (2), 428–443 (2007)
19. Thomas, J.J., Allen, A.J., Jennings, H.M. : Density and water content of nanoscale solid C–S–H formed in alkali-activated slag (AAS) paste and implications for chemical shrinkage. *Cem. Concr. Res.* 42 (2), 377–383 (2012)
20. Provis, J., & van Deventer, J. (Eds.). (2013). *Alkali activated materials : state-of-the-art report*, RILEM TC 224–AAM (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
21. Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2009). *Geopolymers : structures, processing, properties and industrial applications*. Elsevier.