



Geopolymerization을 적용한 천연황토 페이스트의 특성

김백중¹⁾ · 최희복²⁾ · 강경인¹⁾ · 이종구^{1)*}

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학부 ²⁾두산건설(주) 기술연구소

Characteristics of Natural Loess (Hwangtoh) Paste Subjected to Geopolymerization

Baek-Joong Kim,¹⁾ Hee-Bok Choi,²⁾ Kyung-In Kang,¹⁾ and Chong-Ku Yi^{1)*}

¹⁾School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Seoul 136-713, Korea

²⁾Doosan Engineering & Construction Technology Research Institute, Seoul 135-714, Korea

ABSTRACT In this study, possible use of indigenous natural loess (Hwangtoh) as a new binding material via geopolymerization process is examined. Hwangtoh pastes with four different mix proportions of varying alkali liquid concentrations (6 M, 8 M) and the constituents of the binder as well as the alkali liquid at a constant liquid-to-binder ratio of 0.55 were prepared. Analysis of the natural loess (Hwangtoh) paste was carried out as follows : 1) Measurement of compressive strength and weight of cubic specimens versus curing time; 2) Analysis by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) about reaction product; 3) Porosity analysis of hardened Hwangtoh paste. The result showed that it is possible to prepare Hwangtoh paste with 29.1 MPa at the age of 7 day by using alkali solution (made as 1 : 4.5 the mass ratio of liquefied Na₂SiO₃ and NaOH solution and applying the curing temperature of 60°C). Compressive strength development with respect to the degree of moisture evaporation from the paste seems to be independent of curing temperature. Therefore, it seems that higher early strength of the paste specimens cured at higher temperature can be attributed to both higher rate of reaction and moisture evaporation.

Keywords : hwangtoh, geopolymerization, alkali activator, compressive strength

1. 서 론

콘크리트의 주요 구성물 중 결합재인 시멘트는 건설현장에서 요구하는 시공성, 내구성 및 경제성을 충족시키며 광범위하게 활용되고 있다. 하지만, 최근 환경문제에 대한 관심이 높아지면서 1,400°C의 높은 온도에서 생산되는 시멘트는 높은 에너지 소비와 그에 따른 막대한 양의 CO₂ 발생으로 인해 지구온난화의 주요 요인으로 인식되면서 대체 재료의 개발과 사용량 절감 등이 요구되고 있다. 이에 따라, 시멘트 사용량 절감과 콘크리트의 성능 개선을 위해 잠재수경성을 가진 산업부산물(플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카 폼)을 콘크리트 혼화재로 활용하고 있으며, 대체 결합재 개발을 위해 반응성 산화물(규사, 규산알루미늄, 생석회) 함량이 높은 재료의 경화를 알칼리 자극제로 유도하는 지오폴리머 반응법(geopolymerization)이 여러 연구자들의 관심을 끌고 있다.

지오폴리머 반응법 관련 연구는 Kuhl, Chassevent,

Feret,¹⁾ Fudon²⁾ 등이 슬래그와 알칼리용액의 반응을 고찰한 1930년대에 시작되었다. Glukhovsky³⁾는 알칼리 성분이 있는 제올라이트를 다량 포함하는 천연광석의 분석을 통해 알칼리 활성 시멘트(alkali activated cement)에 대한 이론을 정립하고, 이를 토대로 Davidovits⁴⁾는 소성된 카올리나이트와 석회석을 사용하여 알칼리성 시멘트(alkaline cement)를 제조하였으며, 이를 “지오폴리머(geopolymer)”라 명명하였다. 이 후의 알칼리성 시멘트 개발을 위한 지오폴리머 반응법 관련 연구는 사용되는 재료의 성분적 특성을 토대로 다음과 같이 크게 두 가지로 구별되었다.^{5,6)}

- 1) Si + Ca를 주성분으로 하는 재료와 낮은 알칼리성 자극제를 반응시켜 경화를 유도하는 방법
- 2) Si + Al을 주성분으로 하는 재료와 높은 알칼리성 자극제와 반응시키는 방법

첫 번째 경우는 대부분의 연구가 고로슬래그를 사용⁷⁻¹¹⁾하여 진행된 것으로 지오폴리머 반응법 관련 연구 중 가장 다양하게 진행되었으며 반응생성물은 상온(20°C)에서 40 MPa 이상의 강도발현이 가능하지만 빠른 경화에 의한 시공성 저하와 건조수축 등의 단점이 지적되고 있다.

*Corresponding author E-mail: chongku@korea.ac.kr

Received September 30, 2010, Revised November 25, 2010,

Accepted December 10, 2010

©2011 by Korea Concrete Institute

두 번째 경우는 플라이애쉬, 실리카 폼, 메타카올린 등¹²⁻¹⁷⁾을 주요 재료로 사용하였으며, 50°C 이상의 고온양생을 필요로 하지만 60 MPa 이상의 높은 강도발현 및 내구성의 장점을 가지고 있다. 하지만, 콘크리트 혼화재로 사용되고 있는 고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카폼, 메타카올린 등에 의한 콘크리트 성능 향상이 널리 알려지며 최근 그 수요의 증가와 함께 가격상승이 발생하였다. 이에 따라, 이러한 재료를 사용한 알칼리성 시멘트 개발에 있어 경제성 확보에 대한 재고가 요구되고 있으며, 친환경 재료에 대한 관심의 고조와 함께 알칼리성 시멘트 개발에 Si + Al 성분을 다량 포함하는 카올린(kaolin)계 천연 자원의 활용을 위한 연구가 시도되고 있다.

특히, 국내는 카올린계 천연자원인 황토가 국내토양의 15%를 차지하여 그 매장량이 풍부하고 공급이 용이한 장점을 가지고 있다. 황토 관련 연구는 천연황토를 잔골재나 시멘트의 혼화재로 사용한 콘크리트에 대한 연구^{18,19)}와 천연황토를 소성하여 제작한 활성황토에 무기재료를 혼합하여 시멘트 혼화재나 대체재로 사용하는 연구²⁰⁻²⁴⁾가 진행되었다. 하지만, 천연황토는 건조수축에 의한 균열 및 낮은 강도특성의 결점이 제기되었고, 활성황토는 600~1,200°C의 소성 온도가 필요하여 환경적 측면에서 볼 때 에너지 소비량 및 CO₂ 발생량 저감이 제한적이라는 한계를 가지고 있다. 따라서, 천연황토의 이러한 한계점을 극복하고 친환경적인 건설재료로 사용하기 위해서는 새로운 활용기술의 개발이 필요할 것으로 보인다.

이러한 측면에서 이 연구는 알칼리 자극제의 사용량과 양생온도를 실험 변수로 하여 지오폐리머 반응법을 적용한 천연황토 페이스트의 특성을 분석함으로써 콘크리트 결합재로서 천연황토의 활용 가능성을 파악하였다.

2. 실험

천연황토 페이스트의 특성을 분석하기 위해 천연황토와 알칼리 자극제를 혼합하여 천연황토 페이스트 시험체를 제조하여 재령에 따른 압축강도를 측정하였다. 또한, X-ray 회절분석(XRD)을 통해 반응 생성물을 확인하고 그 형상을 주사전자현미경(SEM)으로 촬영하였으며, 수은압입법으로 경화체의 공극률을 분석하였다.

2.1 실험 재료

2.1.1 천연황토의 특성

이 연구에서 사용된 천연황토는 경남 창원에서 생산된 것이다. 천연황토는 Table 1과 같이 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 등의 반응성 산화물을 다량 포함하고 있으며, 이 반응성 산화물은 천연황토의 97% 이상을 차지한다.

Table 1 Chemical properties of Hwangtoh (mass%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MgO
46.20	42.91	8.39	1.15	0.60	0.41

천연황토는 구형입자와 부정형입자의 혼합물로서 입자의 크기는 대부분 직경 3 mm 이하이다. 이 연구에서는 알칼리 자극제와의 반응성 향상을 위해 천연황토를 200 μm 이하로 분쇄하여 사용하였으며, 입도분포는 Table 2와 같다.

분쇄 후 천연황토의 형상은 Fig. 1과 같이 거친 표면을 가지고 있으며 다각형 입자가 모여 다공질의 cluster를 형성하고 있다. 또한, Fig. 2는 천연황토의 XRD 결과로서 주요 결정상은 Quartz, Kaolinite, Halloysite 및 Gibbsite로 되어 있음을 알 수 있으며, 20~28°(2θ)에서 최대 광학값을 나타낸다.

2.1.2 자극제 및 대체재

지오폐리머 반응법에 의한 천연황토의 잠재수경성 발현을 위한 자극제로 수산화나트륨(NaOH) 수용액과 액상 규산나트륨(Na₂SiO₃)을 사용하였으며, 액상 규산나트륨의 화학조성은 다음 Table 3과 같다.

또한, 시험체의 조기강도 증진을 위해 사용된 시멘트는 KS L 5201에 의거한 A사 제품으로 비중 3.14, 분말

Table 2 Particle size distribution of Hwangtoh (mass%)

Smaller than particle size (μm)	1.0	5	10	50	100	150	200
Cumulative rate (%)	1.26	11.44	39.31	73.99	97.31	99.68	100

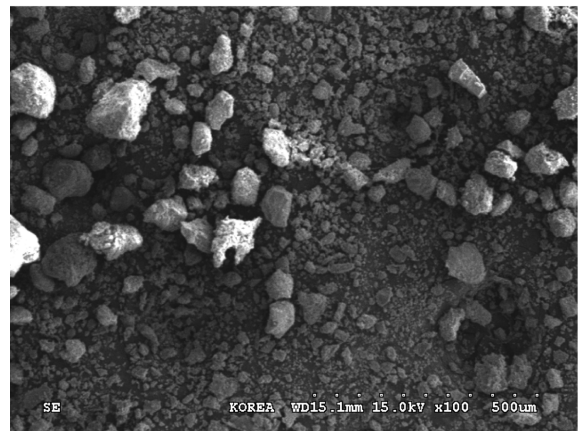


Fig. 1 SEM micrograph of natural Hwangtoh

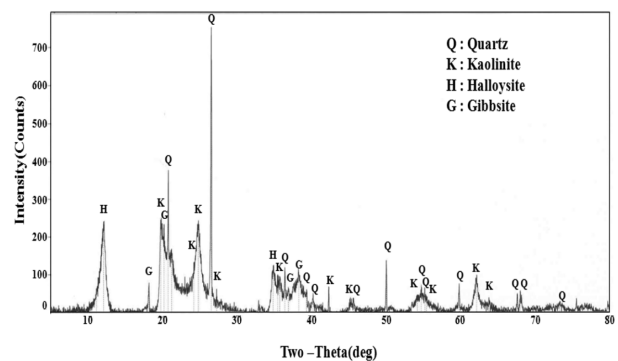


Fig. 2 X-ray pattern of natural Hwangtoh

Table 3 Chemical properties of liquefied Na_2SiO_3 (mass%)

SiO_2	Na_2O	Water (H_2O)
28.1	9.2	62.7

Table 4 Chemical properties of cement (mass%)

SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Al_2O_3	Ig-loss
21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	2.58

도 $3,200 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 제품을 사용하였으며, 그 화학조성은 Table 4와 같다.

2.2 실험 방법

2.2.1 천연황토의 유동성

이 실험에서 시험체의 배합을 결정하기 위해 천연황토 페이스트의 유동성 변화를 파악하였다. 천연황토의 유동성 파악을 위해 KS F 2574의 플로 값 측정 방법에 따라 천연황토 페이스트의 플로우를 물-천연황토비 0.45~0.65 범위내에서 0.05단위로 측정하였으며, 그 결과는 다음 Fig. 3과 같다.

물-천연황토비의 증가에 따라 플로우 값은 증가하는 경향을 보이고 있으며, 플로우 실험 결과 천연황토는 시공성을 확보하기 위해 최소 0.55~0.60 이상의 물-천연황토비를 사용하여야 할 것으로 사료된다. 이 연구에서는 시공성 확보를 위해 혼화제 등이 접목되어질 향후 연구와의 연계성 확보를 위해 배합에 있어 물-천연황토비 0.55를 사용하였다.

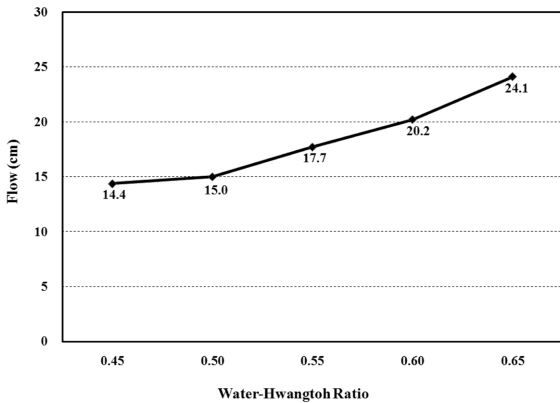


Fig. 3 Average flow of natural Hwangtoh paste

2.2.2 압축강도 및 증량변화

지오폐리머 반응법을 적용한 천연황토 페이스트의 특성을 분석하기 위해 이 연구에서 사용한 실험변수와 배합비는 Table 5와 같다. 천연황토의 잠재수경성 발현을 위한 자극제는 수산화나트륨(NaOH)을 6 M과 8 M 수용액으로 제조한 후, 액상 규산나트륨(Na_2SiO_3)을 결합재 증량 대비 나트륨산(Na_2O)의 증량비를 기준으로 0.0046, 0.0092로 첨가하였으며, 전체 배합의 용액/결합재(liquid/binder)비는 유동성 실험 결과를 토대로 0.55로 유지하였다. 또한, 초기강도 증진에 의한 영향을 분석하기 위해 IV계열은 결합재로 사용되는 천연황토의 5%를 시멘트로 치환하였다.

시험체는 KS L 5105에 따라 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 로 성형하였으며, 성형 후 6시간 뒤 탈형하여 7일간 압축강도 및 증량변화를 재령에 따라 3개씩 측정하였다. 압축강도 측정시점까지 I-IV 시험체는 $60 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 항온양생(양생조건 A) 하였으며, IV* 계열은 IV계열과 동일한 배합으로 시험체를 제작하고 탈형 후 24시간까지 $60 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 항온양생한 후 압축강도 측정시까지 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 기건양생(양생조건 B) 하였다.

2.2.3 반응생성물 및 공극률 분석

천연황토와 알칼리 자극제에 의해 생성된 반응 생성물의 확인을 위해 D/Max-2200장비를 사용하여 X-ray 회절 분석(XRD)을 실시하였다. XRD는 상온에서 2θ scan을 $5^\circ \sim 80^\circ$ 범위내에서 측정하였으며, 40 kV의 가속전압과 150 mA의 전류조건하에서 X-ray source로 Cu/K- α hal ($\lambda =$

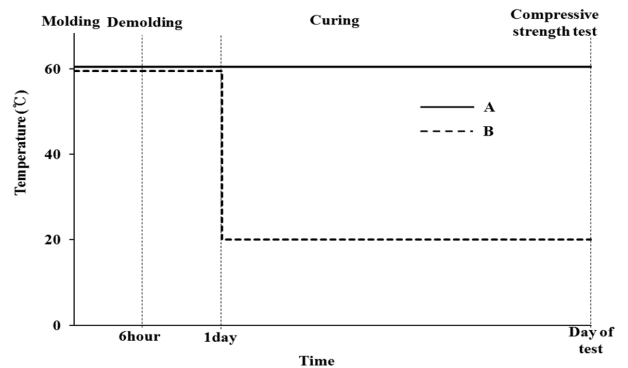


Fig. 4 Curing condition

Table 5 Mixture proportions of Hwangtoh paste

Series	Liquid/Binder (L/B)	Binder		Liquid						Curing condition
				NaOH solution			Liquefied Na_2SiO_3			
		Hwangtoh	Cement	Molarity	NaOH	Water	Na_2O	SiO_2	Water	
I	0.55	100	-	6M	10.20	39.80	0.46	1.405	3.135	A
II		100	-	8M	13.10	36.90	0.46	1.405	3.135	
III		100	-	8M	11.79	33.21	0.92	2.81	6.27	
IV		95	5	8M	11.79	33.21	0.92	2.81	6.27	
IV*		95	5	8M	11.79	33.21	0.92	2.81	6.27	B

1.54059 Å)를 사용하였다. 이와 함께 시험체 내의 반응 생성물의 형상을 관찰하기 위해 Hitachi S-4300 장비를 사용하여 주사전자현미경(SEM) 촬영을 실시하였다. 또한, 경화된 천연황토 시험체의 다공성 및 누적세공부피 측정을 위해 공극률 분석을 실시하였다. 공극률 분석은 Micrometrics Auto IV 9500 장비를 이용하여 수은압입법에 의해 수행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 천연황토 페이스트의 압축강도 측정 결과

천연황토와 알칼리 자극제에 의해 경화된 I-IV계열 시험체의 재령에 따른 압축강도 측정값은 Table 6과 같으며, 그 평균값은 Fig. 5와 같다.

결합재 대비 액상 규산나트륨의 나트륨산(Na_2O) 중량비를 0.0046으로 유지한 시험체의 압축강도는 재령 7일에 수산화나트륨 6M 수용액을 사용한 I계열에서 11.50 MPa, 8M 수용액을 사용한 II계열에서 13.23 MPa를 가진다. 그리고 II계열과 동일한 수산화나트륨 몰농도에서 나트륨산(Na_2O) 중량비를 0.0092로 증가시킨 III계열의 압축강도는 재령 7일에 18.02 MPa를 가져 수산화나트륨(NaOH)

에 비해 규산나트륨(Na_2SiO_3)에 의한 압축강도 발현에의 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한, 재령에 따라 규산나트륨(Na_2SiO_3)을 상대적으로 적게 사용한 I, II계열은 재령 5일 이후 압축강도 증가율이 감소하는 반면 III계열은 재령 3일부터 압축강도 증가율이 감소한다. 이것은 수분 증발에 따라 상대적으로 빠르게 결합력을 발생시키는 규산나트륨의 특성이 초기재령의 압축강도 발현에 크게 영향을 주었기 때문으로 보인다.

III계열과 동일한 알칼리 자극제를 사용하면서 결합재인 천연황토의 5%를 시멘트로 치환한 IV계열의 압축강도는 초기재령에 큰 증가율을 가지며 재령 3일에 21.77 MPa를 발현하였다. IV계열은 III계열과 유사하게 재령 3일째부터 강도 증가율이 감소하였으며 재령 7일에 압축강도 29.10 MPa를 가져 III계열에 비해 61.5% 높은 압축강도를 보였다.

천연황토 시험체의 압축강도는 재령 7일에 I계열은 KS F 4004에 규정된 콘크리트 벽돌의 A종 허용압축강도 82 kgf/cm^3 (8.04 MPa)를, II계열은 B종 허용압축강도 122 kgf/cm^3 (11.96 MPa)를, III계열은 C종 허용압축강도 163 kgf/cm^3 (15.98 MPa)를 만족하였다. 특히, IV계열은 29.10 MPa의 압축강도를 나타냄으로서 강도적 측면에서 콘크리트 벽돌과 유사한 강도를 요구하는 건설재료에 지오폴리머 반응법을 적용한 천연황토 페이스트의 활용이 가능할 것으로 보인다.

Table 6 Compressive strength of Hwangtoh paste

Specimen		Compressive strength (MPa)			
		1 day	3 days	5 days	7 days
I	a	3.17	5.88	9.37	11.25
	b	3.20	6.20	9.89	11.72
	c	3.14	6.07	9.78	11.53
II	a	3.13	6.28	11.23	13.50
	b	3.39	7.15	11.67	13.22
	c	3.18	7.21	11.44	12.96
III	a	4.50	13.88	16.96	17.95
	b	5.28	14.09	17.06	18.09
	c	4.88	13.65	17.14	18.01
IV	a	9.01	22.08	26.28	30.09
	b	9.37	21.79	26.46	29.15
	c	9.20	21.45	26.37	28.06

3.3 중량 변화에 따른 강도발현에의 영향

지오폴리머 반응법에 의한 천연황토의 경화 과정에서 시험체의 중량은 성형시와 비교하여 Fig. 6과 같이 변화한다. 모든 계열의 시험체에서 초기 재령에 중량 감소가 크게 나타났으며, 재령 7일에 모든 계열의 실험체에서 23~27%의 중량 감소가 발생되었다. 이는 배합시 투입한 수분의 대부분이 60°C에서 양생시 재령 7일째까지의 경화 과정에서 증발함에 의해 발생된 것이다.

시험체의 중량 변화에 따른 압축강도 발현에의 영향을 파악하기 위해 가장 높은 압축강도를 발현하였던 IV계열의 배합을 사용하여 양생온도를 변화시켜 초기 배합시

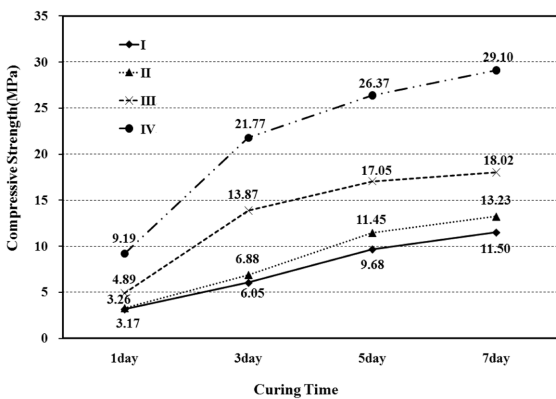


Fig. 5 Compressive strength development versus curing time

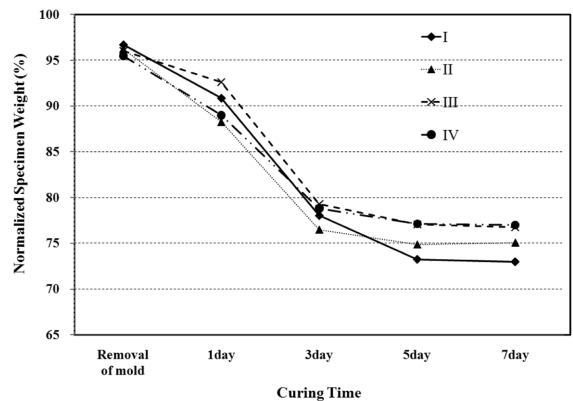


Fig. 6 Normalized specimen weight versus curing time

투입한 총 수분량 대비 수분증발 비율과 이에 따른 압축강도 변화의 경향을 측정하였다. IV계열의 결과와 비교할 대조군 시험체인 IV*계열은 IV계열과 동일한 배합으로 성형하여 탈형 후 24시간 동안 60°C에서 양생한 후 상온(20°C)에서 기건양생을 실시하였다. IV계열 실험체의 경우 앞에서 기술한 바와 같이 대부분의 수분이 증발되는 제령 7일, 상대적으로 수분증발이 늦은 IV*계열은 제령 28일까지 수분증발 비율과 압축강도를 측정하였다. 수분증발에 따른 압축강도 변화의 경향은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서와 같이 수분증발 비율의 증가에 따라 압축강도는 지속적으로 증가하며, IV*계열은 V계열에 비해 수분증발에 필요한 총 양생기간은 증가하지만 수분증발 비율에 따른 압축강도의 변화는 V계열과 유사한 경향을 나타낸다.

3.2 반응생성물과 미세구조 분석

지오폴리머 반응법에 의해 경화된 시험체 내 반응 생성물의 형상을 관찰하기 위한 주사전자현미경(SEM) 촬영은 결합제로 천연황토 만을 사용한 시험체 중 가장 높은 강도를 발현한 III계열 시험체와 초기강도 발현을 위해 천연황토의 일부를 시멘트로 대체한 IV계열의 시험체를 대상으로 하였다.

Fig. 8은 제령 7일의 III계열 시험체로서 알칼리 용액

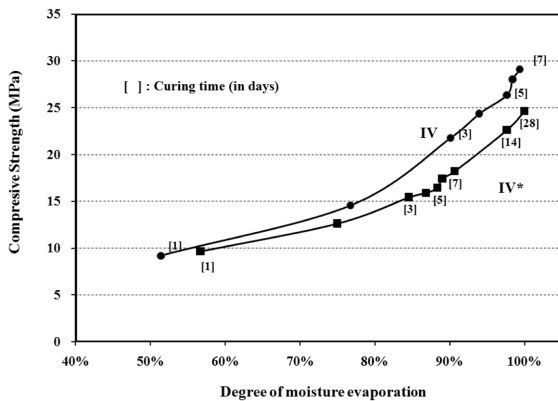


Fig. 7 Compressive strength development versus degree of moisture evaporation

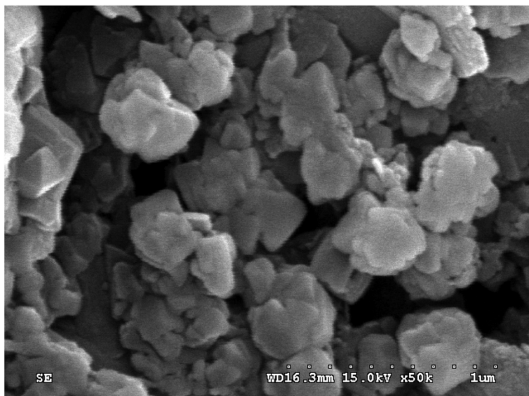


Fig. 8 SEM micrograph of III series at 7 days

에 의해 천연황토로부터 생성된 반응생성물, 규산나트륨 및 천연황토가 혼합된 형태를 보여주고 있다. 부정형의 거친 표면을 가지고 있던 황토입자는 자극제와의 반응을 통해 거친 표면이 제거되었으며, 하나의 덩어리 형태가 아닌 입자간 접촉면을 통해 부착 되어있다. III계열 시험체의 XRD 결과인 Fig. 10을 천연황토의 XRD 분석 결과인 Fig. 2와 비교했을 때 Halloysite는 대부분 Kaolinite로 전환되고 Na를 포함하고 있는 알칼리 자극제의 영향으로 Faujasite-Na가 형성되었다. 다른 반응생성물은 소량이거나 비결정질로서 XRD 분석 결과에는 확실한 피크가 나타나지 않은 것으로 보인다.

또한, 다음 Fig. 9는 제령 7일의 IV계열 시험체로서 III계열보다 입자간 조직이 치밀해지고 다공성이 줄어들었음을 확인할 수 있으며, 이에 따라 압축강도가 증진된 것으로 보인다. 이러한 강도증진은 Fig. 11의 XRD 결과를 볼 때 소량 사용된 시멘트의 Ca 성분에 의해 생성된 Ca(OH)₂의 영향으로 보이며, 이를 통해 Ca 성분이 거의 없는 천연황토를 Ca 성분을 다량 포함하는 혼화제로 일부 치환함으로써 지오폴리머 반응법 적용시 압축강도의 증진을 유도할 수 있을 것으로 보인다.

3.4 다공성 및 평균세공 직경

지오폴리머 반응법에 의한 천연황토 페이스트의 다공성 및 누적세공부피는 micromeritics auto IV 9500을 이



Fig. 9 SEM micrograph of IV series at 7 days

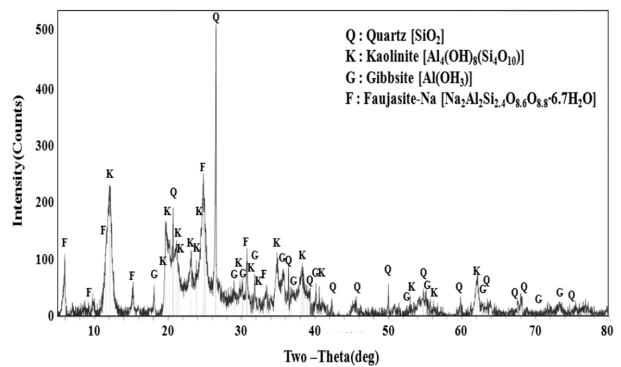


Fig. 10 X-ray pattern of III series at 7 days

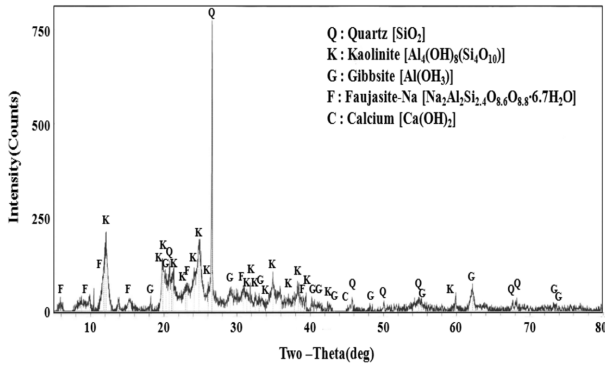


Fig. 11 X-ray pattern of IV series at 7 days

용하여 수은압입법으로 분석하였다. 다공성 및 평균세공 직경의 측정은 황토를 100% 사용한 III계열과 황토의 5%를 시멘트로 대체한 IV계열의 시험체 중 재령 3일과 7일의 시험체를 대상으로 하였다.

III, IV계열 시험체의 평균세공직경과 공극률은 Table 7과 같으며 세공직경에 따른 누적세공 부피는 Fig. 12와 같다.

III계열은 재령 3일에 누적세공부피 0.312 mL/g 평균 세공직경 0.091 μm 을, 재령 7일에 누적세공부피 0.269 mL/g, 평균 세공직경 0.067 μm 을 가지며, 공극률은 42.25%에서 38.90%로 감소하였다. 또한, IV계열은 재령 3일에 누적세공부피 0.234 mL/g 평균 세공직경 0.055 μm 을, 재령 7일에 누적세공부피 0.202 mL/g, 평균 세공직경 0.047 μm 을 가지며 공극률은 37.25%에서 33.90%로 감소하였다. 또한, 시멘트 페이스트 관련 연구²⁵⁾에서 강도저하에 영향을 줄 수 있는 것으로 보고되고 있는 50 nm이상의 세공이 III계열은 재령 3일에 0.274 mL/g에서 재령 7일에 0.223 mL/g으로 감소하였으며, IV계열은 재령 3일에

Table 7 Average pore diameter and porosity

Items	III series		IV series	
	3 days	7 days	3 days	7 days
Total pore volume (mL/g)	0.312	0.269	0.234	0.202
Average pore diameter (μm)	0.091	0.067	0.055	0.047
Porosity (%)	42.25	38.90	37.25	33.90

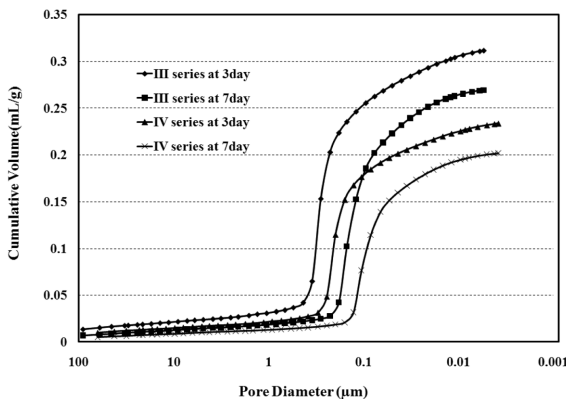


Fig. 12 Cumulative pore volume versus pore-size

0.197 mL/g에서 재령 7일에 0.152 mL/g으로 감소하였다. 전 반적으로 재령에 따라 누적세공부피와 평균 세공직경은 감소하고, 계열에 비해 높은 압축강도를 보인 IV계열에서 낮은 공극률을 나타냈다. 이를 통해 지오폐리머 반응법에 의해 황토 입자간 조직이 점차 치밀해지고 다공성이 감소함에 따라 압축강도가 증진되었음을 알 수 있으며, 이러한 결과는 SEM 관찰 및 XRD 분석 결과와 일치한다.

4. 결 론

이 연구는 친환경적인 콘크리트 결합재로서 천연황토의 적용 가능성을 알아보기 위해 지오폐리머 반응법을 적용한 천연황토 페이스트의 특성을 분석하였으며, 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 천연황토는 물-천연황토비의 증가에 따라 플로우 값은 증가하는 경향을 보이고 있다. 혼화제를 사용하지 않는 경우, 시공성의 확보를 위해 최소 0.55이상의 물-천연황토 비가 요구된다.
- 2) 양생온도에 따라 천연황토 페이스트의 수분증발에 요구되는 양생기간은 변화한다. 하지만, 개별 양생 온도에서 수분증발 비율에 따른 압축강도 발현은 유사한 경향을 나타내므로 높은 양생 온도에서 반응을 유도하는 것이 조기 강도 발현에 유리한 것으로 보인다.
- 3) 지오폐리머 반응법을 적용한 천연황토 모르타르의 압축강도 발현에 있어 알칼리 자극제 중 수산화나트륨에 비해 규산나트륨에 의한 영향이 크다.
- 4) 부정형의 거친 표면을 가지고 있던 황토입자는 알칼리 자극제와의 반응을 통해 거친 표면이 제거된 형태로 변화되고 입자간 접촉면을 통해 부착되면서 압축강도를 발현하였다.
- 5) 반응생성물은 대부분 XRD 분석 결과 확실한 피크가 나타나지 않는 비결정질 또는 낮은 결정질 구조를 가지고 있다. 재령에 따라 반응생성물이 증가하면서 누적세공부피와 평균 세공직경이 감소함에 따라 조직이 치밀해지고 다공성이 감소하였다.
- 6) 이 연구의 시험체 배합을 통해 재령 7일째에 29 MPa의 압축강도를 가진 천연황토 시험체의 제작이 가능하였다. 강도적 측면에서 볼 때 지오폐리머 반응법을 적용한 천연황토 페이스트는 콘크리트 벽돌과 유사한 강도를 요구하는 건설재료에 활용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구이고(2010-0013540), 연구자의 일부는 2단계 연구중심대학(BK21)육성사업에 의한 BK21 건설산업 글로벌리더 양성사업단의 연구비 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Feret, R., "Slags for the Manufacture of Cement," Rev. Mater. Constr. Trav., 1939, 145 pp.
2. Purdon, A. O., "The Action of Alkalis on Blast Furnace Slag," *J. Soc. Chem. Ind.*, Vol. 24, 1940, pp. 191~202.
3. Glukhovskiy, V. D., "Soil Silicates," Kiev, USSR, Gostroi-izdat Publish, 1959.
4. Davidovits, J., "Synthesis of New High Temperature Geopolymers for Reinforced Plastics/Composites," SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brrokfield Center, 1979, pp. 151~154.
5. Fernando Pacheco-Torgala, João Castro-Gomesb, and Said Jalalic, "Alkali-Activated Binders: A Review: Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, 2008, pp. 1305~1314.
6. Fernando Pacheco-Torgala, João Castro-Gomesb, and Said Jalalic, "Alkali-Activated Binders: A Review. Part 2. About Materials and Binders Manufacture," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, 2008, pp. 1315~1322.
7. Majumdar, A. J., Singh, B., and Edmonds, R. N., "Hydration of Mixtures of C12A7 and Granulated Blastfurnace Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, 1989, pp. 848~856.
8. Wu, X., Jiang, W., and Roy, D. M., "Early Activation and Properties of Slag Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, 1990, pp. 961~974.
9. Wang, S. D. and Scrivener, K. L., "Hydration Products Microstructure of Alkali Activated Slag Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, 1995, pp. 561~571.
10. Fernández-Jiménez, A. and Puertas, F., "Alkali-Activated Slag Cements: Kinetic Studies," *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, 1997, pp. 359~368.
11. Fernández-Jiménez, A., Palomob, J. G., and Puertas, F., "Alkali-Activated Slag Mortars : Mechanical Strength Behaviour," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1313~1321.
12. Katz, A., "Microscopic Study of Alkali-Activated Fly Ash," *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, 1998, pp. 197~208.
13. Palomo, A., Grutzeck, M. W., and Blanco, M. T., "Alkali-Activated Fly Ashes. a Cement for the Future," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1323~1329.
14. Criado, M., Palomo, A., and Fernández-Jiménez, A., "Alkali Activation of Fly Ashes. Part 1 : Effect of Curing Conditions on the Carbonation of the Reaction Products," *Fuel*, Vol. 84, 2005, pp. 2048~2054.
15. Palomo, A., Blanco-Varela, M. T., Granizo, M. L., Puertas, F., Vazquez, T., and Grutzeck, M. W., "Chemical Stability of Cementitious Materials Based on Metakaolin," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 997~1004.
16. Alonso, S. and Palomo, A., "Calorimetric Study of Alkaline Activation of Calcium Hydroxide-Metakaolin Solid Mixtures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 25~30.
17. Alonso, S. and Palomo, A., "Alkaline Activation of Temperature, Activator Concentration and Solids Ratio," *Materials Letters*, Vol. 47, 2001, pp. 55~62.
18. 황혜주, 노태학, 양준혁, "황토결합재를 이용한 콘크리트의 적정배합 도출에 관한 연구," 대한건축학회논문집 구조계, 23권, 2호, 2007, pp. 73~80.
19. 황혜주, 강남이, "친환경 무시멘트 황토결합재의 적용가능성에 관한 연구," 한국생태환경건축학회논문집, 8권, 2008, pp. 81~84.
20. 최성우, 최희용, 황혜주, 김문한, 김무한, "혼화제로서 황토를 사용한 콘크리트의 기초 물성에 관한 실험적 연구," 대한건축학회 학술발표논문집, 20권, 2호, 2000, pp. 419~422.
21. 이현철, 고성석, "활성황토를 혼입한 모르타의 물리적 특성에 관한 연구," 대한건축학회논문집 구조계, 23권, 3호, 2007, pp. 77~88.
22. 최희용, 황혜주, 김무한, 김문한, "시멘트 모르타로의 적용을 위한 황토 혼화재 개발에 관한 연구," 대한건축학회 논문집 구조계, 16권, 6호, 2000, pp. 95~102.
23. 양근혁, 황혜주, 김성영, 송진규, "황토결합재를 사용한 무시멘트 모르타의 배합특성에 따른 압축강도 및 건조수축 거동," 대한건축학회논문집 구조계, 22권, 6호, 2006, pp. 87~94.
24. Yang, K. H., Hwang, H. Z., Kim, S. Y., and Song, J. K., "Development of a Cementless Mortar Using Hwangtoh Binder," *Building and Environment*, Vol. 42, 2007, pp. 3717~3725.
25. Kumar Metha, P. and Paulo J. M. Monteiro, "Concrete : Microstructure, Properties, and Material," McGraw- Hill, New York, 2006, pp. 32~33.

요 약 이 연구는 친환경적인 콘크리트 결합재로서 천연황토의 적용 가능성을 알아보기 위해 지오폴리머 반응법(geopolymerization)으로 얻어진 천연황토 경화체의 특성을 분석하였다. 이를 위해 천연황토와 알칼리 용액을 1:0.55 비율로 혼합하여 천연황토 페이스트를 제조하고 60°C와 20°C에서 양생시켜 재령에 따른 압축강도와 중량변화를 측정하였다. 또한, X-ray 회절분석(XRD)을 통해 반응 생성물을 확인하고 그 형상을 주사전자현미경(SEM)으로 촬영하였으며 수은압입법으로 경화체의 공극률을 분석하였다. 그 결과, 지오폴리머 반응법으로 얻어진 천연황토 경화체는 액상 규산나트륨(Na₂SiO₃)와 8 M 수산화나트륨(NaOH) 수용액을 1:4.5비율로 제조한 알칼리 용액을 사용하고 60°C에서 7일간 양생하였을 때 압축강도 29.1 MPa을 발휘하는 천연황토 페이스트의 제조가 가능하였다. 또한, 개별 양생온도(20°C, 60°C)에서 압축강도 발현은 수분증발 비율에 따라 유사한 경향을 나타내므로 수분증발에 유리한 높은 양생 온도에서 반응을 유도하는 것이 조기 강도 발현에 유리한 것으로 사료된다.

핵심어 : 황토, 지오폴리머 반응법, 알칼리 자극제, 압축강도