



황토결합재를 이용한 콘크리트의 수화열과 수축특성

강성수^{1)*} · 이성로¹⁾ · 황혜주²⁾ · 조민철³⁾

¹⁾목포대학교 토목공학과 ²⁾목포대학교 건축학과 ³⁾Grenoble 건축학

Hydration Heat and Shrinkage of Concrete Using Hwangtoh Binder

Sung-Soo Kang,^{1)*} Seong-Lo Lee,¹⁾ Hey-Zoo Hwang,²⁾ and Min-Chol Cho³⁾

¹⁾Major in Civil Engineering, Mokpo University, Muan-gun 534-729 Korea

²⁾Dept. of Architecture, Mokpo University, Muan-gun 534-729 Korea

³⁾Maison Levrat, Parc Fallavier, Rue de la Buthière-BP 53, 38092 Villefontaine Cedex, France

ABSTRACT In this paper, the applicability of Hwangtoh, as an alternative of cement paste, is investigated for the solution of internal heat and shrinkage caused by the hydration of cement paste. Several small-sized specimens of Hwangtoh and ordinary portland concrete (OPC) were compared as to compressive strength, heat of hydration, and shrinkage strain. Moreover, the applicability to the construction structures was reviewed through the test of large-size specimens. The 28-day compressive strength of Hwangtoh concrete (HBC), ranged 18 to 33 MPa, can reach that of OPC. Not only the maximum internal temperature of HBC was read about 1/4 of OPC as it is cured, but also its shrinkage decreased more than the OPC did. Therefore, Hwangtoh binder is more favorable than cement binder in terms of its hydration heat and shrinkage under the construction of concrete.

Keywords : hwangtoh binder, shrinkage, hydration heat

1. 서 론

1.1 연구 배경

최근 지구환경문제가 심각해짐에 따라 건설재료분야에서도 환경부하를 저감시키기 위한 연구가 관심을 모으고 있다. 특히, 건설분야의 주요 재료인 시멘트는 CO₂ 배출, 높은 에너지 소비, 분진과 소음 등으로 인해 환경오염 산업으로 지목되면서 시멘트를 대체하기 위한 연구개발 노력이 많이 이루어지고 있다.¹⁾

대표적인 시멘트 대체 방법으로는 고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카폼과 같은 재료를 시멘트 혼화재로 사용하는 것이 있으며, 이것은 산업폐기물의 재이용, 콘크리트의 성능 개선 등을 목적으로 이미 활발히 이용되고 있다. 그리고 산업부산물을 활용하여 시멘트를 완전히 대체할 수 있는 방법들이 제안되고 있다. 잠재수경성을 지니고 있는 고로슬래그를 알칼리 자극에 의해 수화반응을 진행시켜 경화시키는 AAS (alkali activated slag cement), 자체 수화할 수 있는 잠재수경성을 거의 지니고 있지 못하는 플라이애쉬를 알칼리 활성화하여 알루미늄 실리케이트

겔을 생성시켜 시멘트와 같이 바인더로 사용하는 방법 등이 연구되거나 활용되고 있다.²⁾ 이밖에도 다양한 산업부산물, 광물 등을 활용해 친환경적인 재료를 개발하기 위한 연구들이 진행되고 있으며, 특히 국내에서는 매장량이 풍부한 황토를 활용한 건설재료 연구들이 많이 이루어지고 있다.

황토를 이용한 연구에는 시멘트를 사용하지 않은 완전 대체연구와 시멘트 콘크리트에 혼화재료로 황토를 이용한 부분대체연구가 있다.

현재 천연 황토를 850°C로 가열 후 급냉시켜 활성화시킨 황토 콘크리트에 대한 연구는 시멘트 대체 활용에서 치환율에 따라 적절한 강도가 확보되며, 황토가 첨가된 결합재의 역학적 성능평가와 실험들이 구조물 적용 가능성에 긍정적 결과를 보이고 있다.^{3,4)}

황토를 고온으로 가열할 경우 황토가 활성화 되어 포졸란반응이 촉진되므로 강도가 증진되는 사실에 기인한 연구들이다.

본 연구에서는 활성화시키지 않은 비활성 천연 황토재료가 해양구조물에서 인공어초, TTP, 소파블럭과 같이 체적이 상대적으로 크면서 철근을 사용하지 않고, 강도 또한 고강도를 요구하지 않는 구조물에서 활용 가능성을 알아보고자 그에 대한 기초연구를 하고자 한다.

*Corresponding author E-mail : kongsure@nate.com

Received January 14, 2008, Revised April 17, 2008, Accepted July 25, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

1.2 연구 목적

열을 가하지 않은 천연 황토는 기존 재료에 비해 상대적으로 낮은 강도를 이유로 연구 필요성에서 배제되어 왔으나 친환경적 측면으로 비활성 황토의 활용을 찾아보고자 한다.

본 연구에서는 황토에 열을 가열하지 않고 미분쇄된 상태에서 강도증진을 위한 무기재료를 혼합한 재료를 이용하여 실험하였다. 고열처리를 하지 않으므로 활성황토에 비하여 상대적으로 친환경적이다.

이에 연구에서 얻고자 하는 것은 비활성 황토결합재를 이용한 콘크리트에서 기본적인 공학적 성능을 파악하고 소형시편과 대형시편을 제작하여 수화열과 수축의 특성들을 평가하여 기초적인 자료를 확보하고자 한다.

1.3 연구 흐름

Fig. 1의 연구 흐름은 먼저 이론적 고찰에서 황토재료 특성과 황토의 강도 메커니즘을 정리하였고, 이론을 바탕으로 실험에서는 황토결합재를 이용한 콘크리트의 압축강도, 슬럼프, 공기량 등 기초적 성능을 알아보았다. 다음으로 비교를 위한 시멘트 시편과 강도와 슬럼프가 유사한 배합을 가지고 소형시편을 제작하여 수화열과 수축을 중앙부에 계측하여 결과를 살펴보고, 대형시편을 제작하여 더 큰 시편에서 수화열과 수축의 변화를 살펴보았다.

2. 이론적 고찰

2.1 황토재료 특성

황토는 석영조면암, 안산암, 화강암 등이 열수작용 및 풍화작용에 의하여 분해되어 생성된 것이며, 화학식이 $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ 로 표시되는 카올린족 점토류에 속하는 광물이다.

천연상태의 흙을 별도의 가공 없이 건조시킨 후 미분말로 만들어 사용함으로써 기존 재료들에 비해 생산 단계에서의 에너지 소비를 최소화할 수 있으며 원적외선

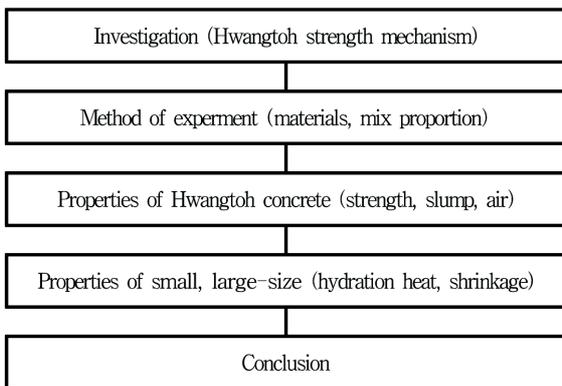


Fig. 1 Study flow

방사율, 탈취율 및 습도조절능력이 우수한 천연 흙의 장점을 그대로 가지고 있다.

황토결합재는 시멘트 및 수지를 첨가하지 않은 제품으로 기존 재료를 대체할 수 있는 특성을 갖는다. COx, NOx 등 환경오염 물질이 발생하지 않으며 강도 발현을 위해 첨가된 무기재료들의 활용을 통해 환경부하를 저감하는 역할을 하는 재료이다.

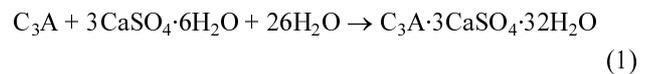
2.2 황토의 강도 메커니즘

황토결합재는 포졸란반응에 의해 생성되는 C-S-H와 C-A-S-H 수화물에 의해 강도발현이 된다. 카올린과 칼슘수화물 사이의 포졸란반응은 미세공극결합을 높여주는 것으로 연구되어 졌다.

하지만, 황토는 시멘트에 비하여 균열이 발생하기 쉽다. 이 문제를 연구자들에 의해서 황토의 수축균열 제어 메커니즘을 분석하게 되었고 균열을 제어할 수 있는 재료적인 접근이 이루어졌다. 그에 대한 메커니즘을 두 가지로 나누어 질수 있다. 화학적 프리스트레스 작용과 에트린자이트 반응이다.⁵⁾

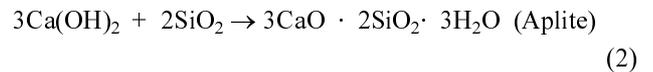
화학적 프리스트레스 작용은 황토가 물과 반응하게 되면, 각 입자간의 응집현상으로 약 6%의 체적감소 현상이 일어난다. 이것이 균열의 주된 원인으로 여기에 석회를 혼입하면, 생석회가 소화 반응을 일으키면서 체적이 팽창되면, 균열을 억제한다.

또 다른 하나는 에트린자이트 반응이다. 에트린자이트 반응은 아래 식 (1)과 같이 황토속의 성분과 혼화재료인 석고가 반응하여 팽창성의 에트린자이트를 생성시킴으로써 수축균열이 제어된다.

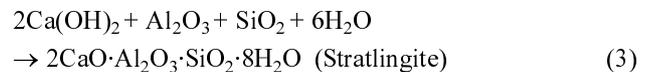


또한, 황토결합재의 강도발현 메커니즘은 포졸란반응으로 Aplite와 Stratlingite반응으로 구분될 수 있다.

Aplite반응은 점토의 성분 중 실리카 (SiO₂)성분과 석회내의 수산화칼슘 (Ca(OH)₂)의 반응 결과 치밀하고 안정된 포졸란 생성물인 Aplite가 생성되는 것을 말한다. 반응화학식은 다음 식 (2)에서와 같다.



식 (3)과 같은 Stratlingite반응은 점토 성분중 실리카 (SiO₂)와 알루미늄 (Al₂O₃)성분이 석회내의 수산화칼슘과 반응하는 과정으로 Stratlingite의 생성을 유도하여 점토는 밀실한 모르타르가 된다.



본 연구에서는 위와 같은 강도발현으로 인한 황토콘크

리트의 공학적 특성들을 살펴보고자 한다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험 계획

본 연구의 실험은 황토콘크리트의 적정배합을 찾기 위한 실험을 선행하였다. HBC (Hwangtoh binder concrete)와 OPC (ordinary Portland cement & concrete)의 배합표는 다음의 Table 1과 같다. 황토결합재 (HB)를 이용한 HBC를 비교하기 위한 OPC를 제작하였다. HBC는 W/B 변화와 HB량을 변화시켜 이에 대한 강도, 슬럼프, 공기량을 살펴 보았다. 결과 값 중 시멘트의 강도와 슬럼프에 유사한 HBC 배합으로 소형시편 (Fig. 2(a), (b))과 대형시편 (Fig. 2(c), (d)) 제작하여 수화열과 수축을 측정하여 분석하였다.

3.2 실험 방법

비교 기준체인 OPC의 배합조건은 28일 강도 24MPa과 슬럼프는 150 ± 30 mm로 HBC가 활용될 수 있는 범위영역에서 접근하였다. HBC 배합은 결합재의 300, 400, 500 kg/m³의 양적인 변화에 특성을 살펴보고, 각각 결합재 영역에서 W/B의 변화 (25~55%)에 대한 압축강도, 슬럼프, 공

Table 1 Mix proportion of HBC and OPC

	W/B (%)	S/G (%)	Unit weight (kgf/m ³)				SP (B×%)
			W	B	S	G	
OPC	51	48	173	339	833	913	2%
HBC1	45	45	135	300	861.4	1008.8	
HBC2	50		150		843.7	988.0	
HBC3	55		165		825.9	967.2	
HBC4	35	45	140	400	813.2	952.4	
HBC5	40		160		789.6	924.7	
HBC6	45		180		765.9	896.9	
HBC7	25	45	125	500	788.7	923.7	
HBC8	30		150		759.1	889.0	
HBC9	35		175		729.5	854.4	

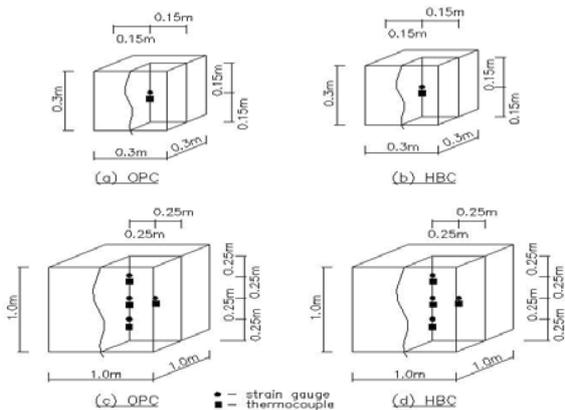


Fig. 2 Location of strain gauge & thermocouple installation



Fig. 3 Construction & setting for test

기량을 살펴보고자 한다.

다음으로 소형시편은 Tables 2, 3의 방법으로 주변부만 50 mm 스티로폼으로 단열시킨 상태에서 거푸집을 제작하였다. 비빔 직후에 콘크리트를 타설 한 후, 열전자쌍인 열전대를 콘크리트 중앙부에 정착하였으며 시작에서 3일은 60분 간격으로, 재령 3일 이후는 24시간 간격으로 측정하였다. 수축의 측정은 수화열과 함께 시험체의 중앙부에 위치시켜 시작에서 60분 간격으로 60일을 측정하였다.

대형시편은 단면이 커지므로 인한 수화열과 수축의 변화를 알아보려고 하였다. 거푸집의 크기를 Fig. 2에서와 같이 $1,000 \times 1,000 \times 1,000$ mm를 제작하였다. 외부에 노출된 폭로상태에서 OPC와 HBC를 각각 수축과 수화열 온도계를 상단부와 하단부, 중앙부, 측부의 네 곳에 측정 비교 검토하였다. 방법과 측정은 소형시편과 동일하다.

3.3 사용 재료

흙과 무기재료로 이루어진 황토결합재를 국내 C사에서 구입하여 사용하였으며 황토결합재는 천연 황토를 주 성분으로 하여 고강도로 이용하기 위해 개발된 분말 형태의 재료이며, 국내 S사에서 구입한 보통포틀랜드시멘

Table 2 Design of experiment

Items of design	Comparison	OPC, $f_{ck} = 24$ MPa, Slump = 120 mm, Air = 3%
	Fix condition	S.P = 2%, S/G = 45%
Content of binder	300, 400, 500 kg/m ³	
Content of water	B = 300 kg/m ³	45, 50, 55%
	B = 400 kg/m ³	35, 40, 45%
	B = 500 kg/m ³	25, 30, 35%
Items of measurement	Fresh concrete	Slump flow, air content
	Hardened concrete	Compressive strength (3, 7, 28, 56, 91 days)

Table 3 Method of experiment

Small size 27/ (300×300×300 mm)	Condition	27 ± 3 temperature, 45 ± 5% humidity
	Shrinkage	PML-60-2L gauge Data logger TDS-302
	Strength	Ø100 × 200 mm, KSF 2403
		U.T.M, KS F 2405
Hydration heat	Thermocouple data logger TDS-302	

트와 함께 그 물리적 성질과 화학적 성질은 Tables 4, 5에 표기하였다.

본 연구에서 사용된 잔골재는 목포지역 바다에서 채석된 골재를 사용하였고 굵은 골재는 전남 무안군 청계면에서 채석된 골재를 사용하였는데 그 물리적 성질은 Table 6과 같다. 유동성과 강도를 향상시키기 위해 국내 A사의 폴리카르본산계 고성능 AE 감수제를 사용하였다. 이에 대한 특성을 Table 7에 정리하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 슬럼프와 공기량

다음의 Table 8과 Fig. 4에서 보듯이 실험 결과 단위 수량이 증가할수록 슬럼프 값이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 단위 분체량이 증가함에 따라 슬럼프 값이 실험체 HBC2, HBC6, HBC9에서 210, 230, 237mm로 증가하는 것으로 보아 단위 분체량이 증가함에 따라 슬럼프

Table 4 The chemical compositions of HB and OPC

	Chemical composition (% by weight)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
HB	37.93	14.9	1.29	37.78	3.01
OPC	21.11	5.34	3.29	64.52	2.92

Table 5 The physical properties of HB and OPC

Type	HB	OPC	
Specific gravity (g/cm ³)	3.16	3.14	
Blain fineness (cm ³ /g)	3,483	3,303	
Ignition loss (%)	0.09	0.08	
Initial setting time (min)	209	255	
Final setting time (min)	609	452	
Compression Strength (MPa)	7 (days)	11.1	19.7
	14 (days)	21.9	28.8
	28 (days)	36.6	37.8

Table 6 The physical properties of aggregates

Type	Coarse aggregate	Fine aggregate
Maximum size (mm)	25	5
Fineness modulus	6.48	2.94
Specific gravity	2.42	2.64
Water absorption (%)	1.65	2.64
Unit weight (kg/m ³)	1680	1580

Table 7 The properties of water reducing admixture

Super plasticizer	Polycarbonic acid
Appearance	Dark brown liquid
Specific gravity (20)	1.04 ± 0.05
pH	2.0~4.0
Alkali (%)	0.02 under
Chloride (%)	0.02 under

Table 8 Experimental results for slump & air of HBC and OPC

	Binder (kg/m ³)	W/B (%)	Air (%)	Slump (mm)
OPC	339	51	3	12
HBC1	300	45	2.5	0
HBC2		50	5.7	21
HBC3		55	8	20
HBC4	400	35	2.7	1.5
HBC5		40	8.5	20
HBC6		45	10	23
HBC7	500	25	4.3	0
HBC8		30	5.3	18.3
HBC9		35	3.2	23.7

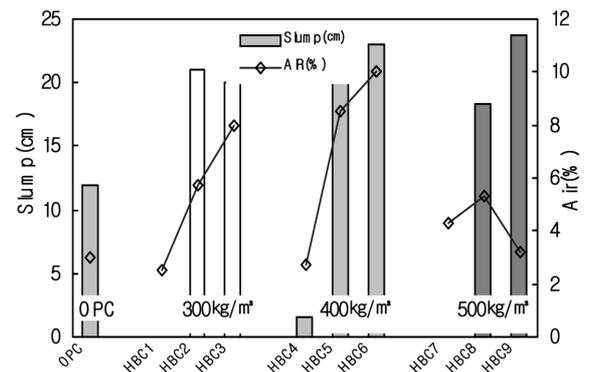


Fig. 4 Experimental results for slump & air of HBC and OPC

값이 증가하는 결과를 보였다. 이는 단위 분체량의 증가에 따라 물량의 증가와 골재의 감소로 인해 나타나는 것으로 사료된다.

결과적으로 HBC는 HBC1, HBC4, HBC7에서 보여주듯이 각각 분체량에서 W/B의 5% 변화에 슬럼프가 210 mm, 200 mm, 183 mm의 결과를 나타내므로 단위수량의 한계 점을 판단하여 혼화제 사용을 통한 적절한 유동성을 확보하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

공기량은 단위 결합재 300, 400 kg/m³에서는 단위 수량이 증가함에 따라 공기량이 증가하였으나 단위 결합재 500 kg/m³에서는 감소하는 경향을 보였으며 W/B비가 25%에서 30% 증가하였을 때는 4.3%에서 5.3% 증가하였지만 35%에서는 3.2%로 감소하였다. 단위결합재의 증가에 따라 골재량이 감소하므로 일정 결합재량이 한계 범위를 지나면 공기량이 낮아지는 경향을 보여 더 깊이 있는 연구가 필요할 것으로 보인다.

4.3 압축강도

4.3.1 W/B 변화에 따른 압축강도 결과

황토결합재를 이용한 콘크리트 W/B 변화와 단위 결합재량의 변화에 따른 압축강도는 Table 9, Fig. 5와 같이 나타났다. 양생 기간이 증가함에 따라 압축강도도 증가함을 알 수 있다. 단위 결합재 300, 400, 500 kg/m³ 모두 W/B가 증가함에 따라 강도는 저하되는 것으로 나타났다.

단위결합재 300 kg/m³에서 OPC와 유사한 강도를 발현하는 결과를 보여주며, 단위 결합재량이 많아질 경우 400, 500 kg/m³에서는 OPC 이상의 강도발현을 나타내었다. W/B를 낮추고 혼화제를 이용할 경우 압축강도가 더 증진될 것으로 사료된다. 그러나 400, 500 kg/m³에서 W/B량이 5% 정도 많아질 경우 급격한 강도저하를 보이므로 HB가 물에 민감함을 알 수 있으며 더 세밀한 연구가 필요할 것으로 보인다.

4.3.2 단위 결합재량 변화에 따른 압축강도 결과

단위 결합재량의 증가에 따른 압축강도의 변화는 비례하는 결과를 보여주었다. 단위결합재 300, 400, 500 kg/m³에서 가장 높은 강도가 91일에 28.84, 35.02, 39.89 MPa로 나타났다. 그러나 가장 높은 압축강도를 나타내는 시험체 HBC4, HBC7은 슬럼프가 각각 15, 0 mm로 유동성이 거의 없어서 시공성이 좋지 않으므로 고강도와 유동성을 확보하기 위해서는 혼화제에 따른 기초물성시험이 필요할 것으로 보인다.

4.3.3 압축강도 소결

황토결합재를 소성하지 않고서 친환경재료로서 사용할 때 강도측면에서 구조물 적용 가능성을 보여주는 결과이다. 이러한 강도발현은 황토결합재를 이용한 콘크리트의 경우, 시멘트를 전혀 첨가하지 않고도 SiO₂, Al₂O₃와 CaO 성분으로 포졸란반응을 하여 흙의 단점인 강도 저하의

문제 해결의 가능성을 보여준다.

Table 9에서 보여주듯이 황토 콘크리트는 강도기준으로 무근구조물이나 해양구조물 분야에서 적절한 접근이 가능하리라 판단되어지며, 비교체 OPC 28일 압축강도 24 MPa에 근접하며 유동성 또한 확보되어지는 HBC5의 배합으로 소형, 대형시편을 제작 실험하여 구조물의 수화열과 수축 변화를 살펴보았다.

4.4 소형시편의 수화열과 수축

4.4.1 소형시편의 수화열 결과

소형시편의 수화열은 Fig. 6에서 보여주듯이 OPC가 HBC보다 높게 나타났다. OPC를 이용한 콘크리트의 경우 최고온도는 47.5°C를 나타냈으며 HBC인 경우는 31.6°C를 나타냈다. OPC의 경우보다 HBC는 최고온도가 15.9°C 차이를 보였다. Fig. 5에서 보여주듯이 강도가 비슷한 영역에서의 두 재료는 최고온도와 7일 이후 안정된 온도의 차이가 OPC 경우 20.3°C이고 HBC 경우 5.2°C로 3.9 배의 온도차를 보인다.

OPC의 온도가 HBC에 비해 상대적으로 크다. 이러한 초기 재령 콘크리트에서의 열적 팽창과 온도차는 수축균열과 이상응력에 대한 내구성 저하를 초래한다. 내부의 최고온도 도달시간은 OPC 경우 13시간과 HBC 경우는 16시간으로 나타났다.

4.4.2 소형시편의 수축 결과

수축은 일정한 온도에서 하중을 받지 않는 콘크리트의 체적감소를 말한다. 수분의 감소가 주요한 원인이며 대부분의 수축은 몇 달 내의 양생기간에 이루어진다. Fig. 7에서 보여주듯이 실험 결과는 재령 22일에 HBC는 가장 큰 수축을 보이고 지나면서 다소 수축이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이에 HBC의 장기적인 관찰이 필요로 하는 것으로 보여진다.

OPC는 재령 60일까지 수축은 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. HBC는 OPC에 비교하여 작은 수축량을 보여주고 있다. OPC에 비하여 HBC가 수화 발열이 낮아 온도에 의한 팽창도가 낮게 나타난 것으로 보여진다.

Table 9 Compressive strength of HBC and OPC

	Binder (kg/m ³)	W/B (%)	Strength (MPa)				
			3 days	7 days	28 days	56 days	91 days
OPC	339	51	10.35	17.49	24.05	27.8	30.6
HBC1	300	45	13.88	18.79	24.21	27.54	28.84
HBC2		50	10.55	15.78	20.36	21.04	22.15
HBC3		55	10.40	11.92	14.77	15.90	19.15
HBC4	400	35	18.2	24.57	30.11	32.86	35.02
HBC5		40	13.65	17.60	23.07	25.88	28.33
HBC6		45	12.02	14.56	21.05	22.85	23.93
HBC7	500	25	23.07	28.93	33.40	36.25	39.89
HBC8		30	10.84	15.22	18.28	21.16	22.53
HBC9		35	11.77	14.71	18.39	21.25	21.20

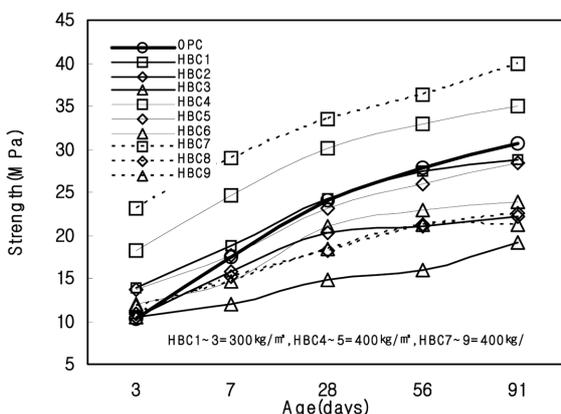


Fig. 5 Compressive strength of HBC and OPC

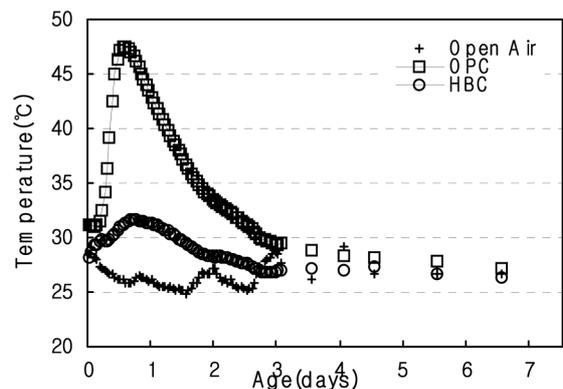


Fig. 6 Hydration temperature after the setting of HBC and OPC

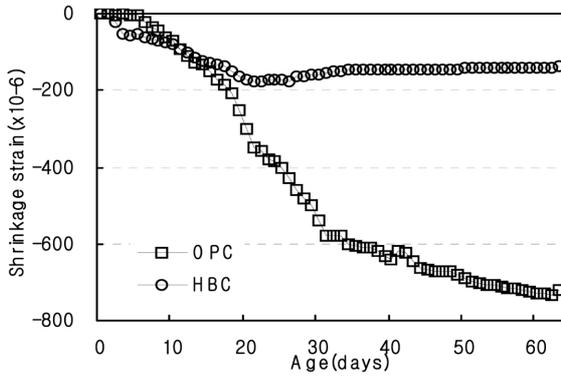


Fig. 7 Drying shrinkage strain of hydration age of HBC and OPC

4.5 대형시편의 수화열과 수축

4.5.1 대형시편의 수화열 결과

대형시편의 수화열에 대한 Fig. 8에서 보여주듯이 OPC와 HBC의 온도차는 최고 15.4°C 이상의 차이를 보여주고 있다. OPC_Middle은 56.4°C에 이르는 반면, HBC는 41.0°C의 최고온도를 나타내었다. 동일 강도에서 OPC는 내부 온도가 상승하면서 HBC에 비하여 1.25배 이상의 높은 온도를 나타내고 있다. OPC의 중앙부는 최고 56.4°C에 도달시 하면은 50.5°C 이르는 5.9°C 온도 차이를 나타내고 있으며 HBC는 최고온도가 41.0°C일때 하면의 온도는 37.8°C에 도달하여 3.2°C의 온도차를 보였다.

콘크리트에서는 수화열을 줄임으로 열응력의 최소화를 필요로 할때 OPC에 비하여 HBC는 긍정적 결과를 나타내리라 보여진다. 또한, 콘크리트 온도가 25°C 이상일 때 파이프쿨링이나 기타 콘크리트의 온도상승을 억제하기 위한 적절한 냉각조치를 취해야 할 경우에 있어서 OPC에 비하여 HBC는 내구성에서 상당한 기대효과를 높일 수 있을 것이라 사료된다.

4.5.2 대형시편의 수축 결과

Fig. 9에서 대형시편의 수축 결과를 보여 주고 있다. OPC와 HBC는 초기 팽창이 일정기간 발생하였다. 외부의 폭로상태의 기상변화에 의한 영향으로 사료된다.

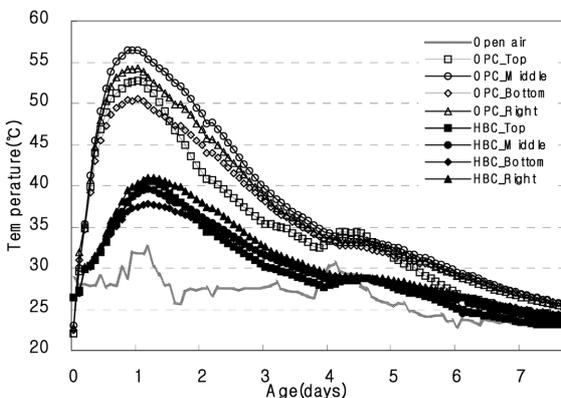


Fig. 8 Results of HBC and OPC hydration temperature

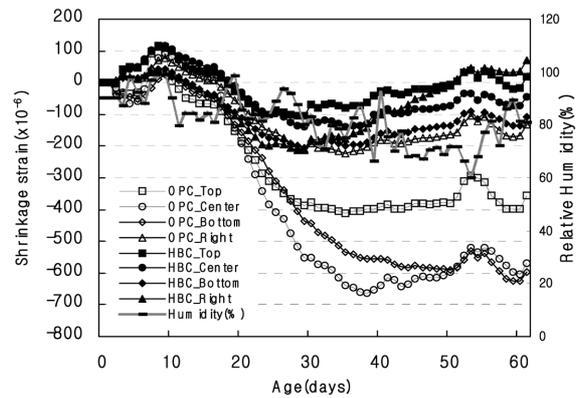


Fig. 9 Results of HBC and OPC shrinkage strain

OPC의 수축은 OPC_Middle이 38일 기점으로 가장 큰 변위가 발생하였으며 시간의 경과에 따라 서서히 줄어들었다. 수화열의 분석에서도 중앙부가 가장 큰 온도를 나타내듯이 높은 수축을 나타내고 있다.

HBC의 수축 변형은 HBC_Right가 수화열의 온도가 높았듯이 수축 변형을 역시 HBC_Right가 크게 나타났다. OPC와 HBC의 수축 변형은 20일 이후부터 격차가 벌어져 60일 기점으로 Center 변형 차이가 570 μm와 45.5 μm로 12.6배 이르는 결과를 보였다.

외부의 폭로상태에서 시험한 결과이므로 다른 요인에 의한 오차가 있을 수 있으나 HBC는 OPC에 비해서 상대적으로 수축 변형이 작게 발생하여 구조물의 내구성능에 다소 긍정적인 평가를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

비활성 황토로 구성된 황토결합재를 이용하여 기본적인 공학적 성능을 파악하고 동일강도 OPC와 함께 소형시편과 대형시편을 제작하여 수화열과 수축 특성을 비교 분석하였다.

- 1) HBC의 슬럼프는 각각 분체량에서 W/B의 5% 변화에 슬럼프가 210 mm, 200 mm, 183 mm의 결과를 나타내므로 단위수량의 한계점을 판단하여 혼화제 사용을 통한 적절한 유동성을 확보하는 연구가 필요할 것으로 보인다. 공기량은 단위 결합재 300, 400 kg/m³에서는 단위 수량이 증가함에 따라 공기량이 증가하였으나 단위 결합재 500 kg/m³에서는 감소하는 경향을 보이며 단위결합재의 증가에 골재량이 감소하므로 일정 결합재량이 한계 범위를 지나면 공기량이 낮아지는 경향을 보여 더 깊이 있는 연구가 필요할 것으로 보인다.
- 2) 압축강도는 단위결합재 300 kg/m³에서 OPC와 유사한 강도를 발현하는 결과를 보여주며, 단위 결합재량이 많아질 경우 400, 500 kg/m³에서는 OPC 이상의 강도발현을 나타내었으나 W/B량이 5% 정도 많아질 경우 급격한 강도저하를 보이므로 HB가 물에

민감함을 알 수 있으며 더 세밀한 연구가 필요할 것으로 보인다.

- 3) HBC5의 배합조건으로 소형시편과 대형시편을 제작하였다. 소형시편의 수화열은 최고온도와 7일 이후 온도의 차이가 OPC 경우 20.3°C이고 HBC 경우 5.2°C로 3.9배의 온도차를 보이며 수축 역시 HBC는 OPC에 비하여 작은 수축량을 나타내었다.
- 4) 대형시편의 수화열은 OPC은 56.4°C, HBC는 41.0°C의 최고온도를 나타내었다. 내부에서도 OPC는 5.9°C 온도 차이를 나타내고 HBC 3.2°C의 온도차를 보였다. 수축의 결과 역시 전체적으로 HBC는 OPC에 비해 작은 값을 나타내어 수화열과 수축으로 인한 내구성에 긍정적 효과를 보일 것으로 사료된다.

본 연구를 통해서 비활성 황토결합재는 구조물에 적용 가능한 강도와 유동성을 확인할 수 있었고 수화열과 수축 등의 내구성에서도 긍정적인 기대를 할 수 있다고 사료된다. 그러나 단위수량과의 세부적인 역학평가를 토대로 기초 자료들을 확보하여야 된다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립문화재연구소 전통과학기술 실용화 연구개발사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Yang, K. H., "Development of a Cementless Mortar Using Hwangtoeh Binder," *Building and Environment*, Vol. 42, Issue 10, October 2007, pp. 3717~3725.
2. Roy, D. M., "Alkali Activated Cements Opportunities and Challenges," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 29, No. 2, 1994, pp. 249~254
3. 최희용, 김무한, 황혜주, "혼화제 종류 및 활성황토 대체율별 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구," 콘크리트학회논문집, 13권, 2호, 2001, pp. 123~129.
4. 양근혁, 황혜주, 김선영, 송진규, "혼화제 · 재가 무시멘트 황토 모르타르의 유동성 및 압축강도 발현에 미치는 영향," 콘크리트학회논문집, 18권, 6호, 2006, pp. 793~800.
5. Hwang, H. Z., *A Study on the Method Activating Kaolin and Mortar & Concrete Mixed with Active Kaolin*, PhD thesis, Seoul National University, 1997, pp.54~72.

요 약 본 연구는 비활성 황토결합재로 시멘트를 대체함으로써 시멘트의 수화 반응 등에 의한 콘크리트 내부 발열과 수축 특성을 연구하였다. 먼저 재료의 분석을 토대로 압축강도, 슬럼프, 공기량을 살펴보았다. 소형시편과 대형시편을 제작하였고, 보통콘크리트 (OPC)와 황토콘크리트 (HBC)의 수화열, 수축을 측정하여 비교 평가하였다. 황토결합재는 압축강도가 18~33 MPa로 보통강도 콘크리트의 강도를 발현하였고, 유동성도 확보되는 결과를 보였다. 소형시편에서는 HPC는 OPC에 비해 양생시 내부의 최고온도가 약 1/4 정도로 낮게 나타나고 수축 역시 HBC는 OPC에 비하여 감소하였다. 대형시편에서도 HBC는 OPC에 비해 내부온도가 낮게 나타났으며 수축 역시 60일 기점으로 OPC의 상대적으로 매우 낮은 수축률을 보였다. 따라서 비활성 황토 결합재는 일정강도와 유동성을 확보할 수 있는 재료이며 친환경적 재료이다. 수화열과 수축에 있어 내구성능을 확보하는데 긍정적으로 사료된다.

핵심용어 : 황토결합재, 수축, 수화열