

플라이애시 기반 지오폴리머 모르타르 개발

Development of Geopolymer Mortar Based on Fly Ash

(Received December 14, 2011 / Revised January 4, 2012 / Accepted January 4, 2012)

고경택^{1)*}, 류금성²⁾, 이장화³⁾

한국건설기술연구원, SOC성능연구소 인프라구조연구실

Kyung-Taek Koh, Gum-Sung Ryu, Jang-Hwa Lee

Korea Institute of Construction technology, Goyang, 411-712, Korea

Abstract

Portland cement production-1.5billion tonnes yearly worldwide-contributes substantially to global atmospheric pollution(7% of total of CO₂ emissions). Attempts to increase the utilization of fly ash, by-products from thermal power plant to partially replace the cement in concrete are gathering momentum. But most of fly ash is currently dumped in landfills, thus creating a threat to the environment. Many researches on alkali-activated concrete that does not need the presence of cement as a binder have been carried out recently. Instead, the sources of material such as fly ash, that are rich in Silicon(Si) and Aluminium(Al), are activated by alkaline liquids to produce the binder. Hence concrete with no cement is effect reduction of CO₂ gas.

In this study, we investigated the influence of the compressive strength of mortar on alkaline activator and curing condition in oder to develop cementless fly ash based alkali-activated concrete. In view of the results, we found out that it was possible for us to make alkali-activated mortar with 70MPa at the age of 28days by using alkaline activator manufactured as 1:1 the mass ratio of 9M NaOH and sodium silicate and applying the atmospheric curing after high temperature at 60°C for 48hours.

키워드 : 플라이애시, 시멘트 제로, 지오폴리머, 모르타르

Keywords : Fly Ash, Cement Zero, Geopolymer, Mortar

1. 서론

시멘트는 산업의 근대화 과정에서 가장 중요하고, 널리 사용되어 온 건설용 구조재료로서 도로, 교량, 터널, 항만, 주택, 건물 등 각종 사회간접자본의 건설에 있어 기본이 되는 재료이다. 특히 20세기에 들어서 산업구조의 고도화에 따른 건설기술도 진보해왔으며, 이에 맞추어 20세기 초부터 본격적으로 생산되기 시작한 시멘트는 생산량이 크게 증가하여 현재 15억 톤 정도를 생산하고 있으며, 이용 기술도 획기적으로 발전하여 왔다. 이와 같이 시멘트는 사회기반시설 건설에 중요한 역할을 해왔음에도 불구하고

최근에는 자연을 파괴하는 재료로서 인식되는 경향이 있다. 특히 시멘트는 클링커 제조 시 고온(1,450°C)상태에서 제조될 뿐만 아니라 시멘트 1톤 생산하는데 0.7~1.0톤의 CO₂ 가스를 배출함으로써 전 세계 CO₂ 가스의 7%를 차지할 정도로 심각하다.

한편 2005년 교토의정서가 발효됨에 따라 세계 38개국의 선진국은 온실가스 감축의무를 준수해야 한다. 교토의 정서에 따르면 제 1차 공약기간(2008년~2012년)에 1990년도 배출량 대비 평균 5.2%를 감축해야 하는 어려운 과제를 안고 있다. 최근 2008년 7월에는 일본 도야코에서 열린 G8 정상회담에서 각국 정상들은 2050년까지 배출가스를 현재의 50%로 감축하는 방안을 검토하고 있다. 이렇게 강도 높은 온실가스 감축노력은 한국도 예외는 아니며, 2013년부터 온실가스를 감축해야 하는 2차 의무이행 대상국에

* Corresponding author
E-mail: ktgo@kict.re.kr

편입될 것이 확실시 된다. 따라서 한국의 모든 산업분야에 걸쳐 온실가스를 감축하기 위해 노력을 하고 있으며, 마찬가지로 시멘트 산업에서도 소성온도를 낮추어 생산하거나 플라이애시, 고로슬래그 등의 혼합시멘트 사용하는 등 CO₂를 저감하고자 노력을 하고 있다. 그러나 이런 방법으로 시멘트 생산 시 배출되는 CO₂ 가스를 획기적으로 저감시킬 수 없기 때문에 보다 강력한 대책이 강구되어야 할 것이다. 최근 이러한 배경으로부터 시멘트를 전혀 사용하지 않는 지오폐리머 콘크리트(geopolymer concrete)에 관한 연구가 주목을 받고 있다.

본 연구에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 결합재료 플라이애시를 100% 사용한 콘크리트 개발을 하기 위한 예비단계로서 플라이애시 기반 모르타르를 대상으로 알칼리 자극제 및 양생방법에 대해 검토하였다.

2. 지오폐리머 콘크리트 개발 현황 분석 및 이론적 고찰

2.1 플라이애시 생산 및 활용

전 세계에서 화력발전소에 연간 발생하는 플라이애시를 포함한 석탄회(coal ash)의 양은 390,000,000 톤 정도이고, 이중에서 약 15% 이하가 재활용되고 있다. 특히 중국은 100,000,000 톤 이상을 발생하여 14,000,000 톤 정도를 재활용하여 재활용 비율이 비교적 낮은 편이다. 반면에 일본은 약 5,000,000 톤이 발생하여 3,000,000 톤 정도를 재활용함으로써 재활용 비율이 높은 편이라고 할 수 있다. 한국은 현재 4,500,000 톤이 발생하고 있으며, 이 중에서 45% 정도를 시멘트 제조용 원료(점토 대체제), 콘크리트용 혼화재(mineral admixture) 등으로 재활용하고 있으나, 나머지는 해안 및 육상 매립에 의해 처리되고 있어 매립지 확보를 위한 경제적 부담뿐만 아니라 매립 시 발생하는 침출수와 미세 분말로 구성된 석탄회의 분진 침출에 의해 많은 환경문제를 유발하고 있다.

2.2 지오폐리머 콘크리트 개발 현황

시멘트를 대체하기 위한 노력은 1939년 R. Feret에 의해 슬래그를 혼화재로 처음 사용이 시도된 이후로 많은 성과를 얻어 왔으나, 시멘트를 전혀 사용하지 않은 지오폐리머 콘크리트는 1978년에 프랑스의 Davidovits에 의해 카올리나이트와 알루미늄실리케이트계 알칼리 활성화제(alkaline

Table 1. Coal ash production and utilization

Country	Production, Million tonnes	Utilization, Million tonnes
Korea	4.5	2
China	>100	14
Japan	5	3
Australia	9	<1
Germany	28	12
India	>80	2
Russia	62	5
South Africa	28	N/A
Spain	8	1
U.K.	10	6
U.S.	60	8

activator) 사용하여 중합반응(polymerization)에 의한 알칼리 활성화 콘크리트를 세계 최초로 개발하였으며 그 후 여러 연구자들에 의해 연구가 수행되었으나, 제조상의 문제와 경제성 등의 이유로 그 후 한동안 활발한 연구가 이루어지지 않았다. 그러나 최근 환경문제가 사회적으로 이슈화됨에 따라 호주, 미국, 유럽 등을 중심으로 플라이애시, 고로슬래그 등 산업부산물을 이용한 알칼리 활성화 콘크리트가 연구가 활발히 진행되어 일부 실용화가 이루어지고 있다. 한국에서도 고로슬래그를 사용한 알칼리 활성화 콘크리트 등에 대해서는 일부 연구가 수행되었으나, 아직까지 초보단계에 있다고 할 수 있다. 고로슬래그를 사용한 알칼리 활성화 콘크리트는 시공성 및 수축 등의 문제가 있는 것으로 지적되고 있으나, 상온에서도 강도발현이 우수하여 압축강도 40~70 MPa 범위의 고강도 콘크리트 제조가 가능한 것으로 보고되고 있다. 그러나 플라이애시를 사용한 경우에는 상온에서는 강도발현이 어렵고, 중합반응의 활성화를 위해 고온양생이 필요하나, 아직까지 알칼리 활성화제, 양생온도와 양생기간에 대해 체계적으로 검토한 연구가 충분하지 않아 제조과정이 어려운 실정이다.

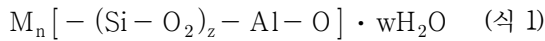
2.3 지오폐리머 중합반응 메커니즘 분석

일반적으로 콘크리트는 결합재료 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 물과 반응하는 수화반응에 의해 C-S-H(규산칼슘 수화물; $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$)와 같은 수화생성물을 형성하여 강도가 발현된다. 이에 반해 본 연구에서 개발하고자 하는 시멘트를 사용하지 않은 지오폐리머 콘크리트의 경우에는 Si(silicon)와 Al(aluminium) 성분이 풍부한 플라이애시를 100% 사용하여 제조하고 고알칼리 환경에서 중합반응을 유도함으로써 강도가 발현된다. 이러한 중합반응은 고알칼리 상태에서 Si-Al 광물에 화학적 반응을 통하여 중합체의 Si-O-Al-O 결합을 구성하는 화학 반응으로

Table 2. Chemical component and Physical properties of fly ash

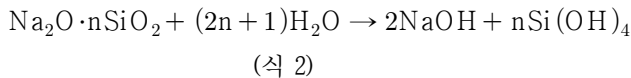
Items Types	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	L.O.I	Surface area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
fly ash	55.3	25.8	5.5	2.9	0.8	0.3	3.2	3,550	2.18

반응식은 식 (1)과 같다.



여기서, M은 알칼리요소이며, (-)표시는 결합, z는 1, 2 또는 3이고, n은 중합도(degree of polymerization)를 나타낸다.

플라이애시 내의 Si와 Al은 NaOH, KOH 등의 강알칼리성 알칼리 자극제와 쇼톱실리케이트(sodium silicate)로 구성된 알칼리 활성화제에 의해 활성화된다. 여기서 쇼톱실리케이트는 식 (2)와 같이 물과 반응하여 NaOH를 생성하여 알칼리 자극제에 더 높은 알칼리성 환경을 형성함으로써 알칼리 자극제를 단독으로 사용한 경우보다 pH를 더욱 높여 반응을 더욱 활성화시키는 것으로 알려져 있다.



그리고 유동성을 확보하기 위해 사용량은 적지만 일반 콘크리트와 마찬가지로 배합수가 필요한데, 이런 배합수 사용은 알칼리성을 낮추는 효과가 있기 때문에 강도발현을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 콘크리트 내부의 수분을 감소시키기 위하여 초기에 고온양생이 필요하며, 이러한 고온양생은 콘크리트 내부의 수분감소를 유도하고 pH 상승으로 플라이애시가 활성화 시킬 수 있는 고알칼리 환경으로 변화되어 플라이애시의 중합반응이 가속화되는 것으로 알려져 있다.

3. 실험 개요

3.1 사용재료

본 연구에서 사용된 시멘트 대체 결합체로는 한국 보령 화력발전소에서 생산되는 플라이애시를 사용하였으며, 화학성분 및 물리적 성질은 Table 2와 같다. 사용한 플라이애시는 산화규소(SiO₂)와 산화알루미늄(Al₂O₃)의 함유량이

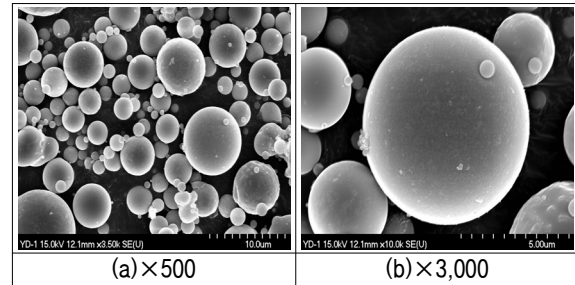


Fig. 1 Microstructure of the fly ash by SEM

81.1%로 반응성 산화물이 다량 포함되어 있다. 이 성분들은 알칼리 활성화제 사용과 고온양생으로 Al-Si 중합반응이 발생하여 콘크리트의 강도를 발현시킨다.

플라이애시 입자는 구형으로 표면에 유리질 피막(glassy chain)으로 쌓여있다. 플라이애시의 중합반응은 이 유리질 피막을 깨고 내부의 반응 물질을 활성화시키는 것으로 플라이애시 입자 주위에 강알칼리성 환경을 형성하거나 고온양생 등을 실시함으로써 유리질 피막이 깨지게 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 플라이애시를 활성화 시킬 수 있는 알칼리 자극제로 시약용으로 순도 98% 이상인 NaOH를 사용하였으며, 몰농도는 각각 6, 9 및 12M로 제조하여 반응성을 검토하였다. 또한 알칼리 자극제를 단독으로 사용하는 것보다 쇼톱실리케이트의 혼합사용이 중합반응을 더욱 활성화시키기 때문에 쇼톱실리케이트(Na₂O=10%, SiO₂=30%, 고형분=38.5%)를 사용하였다. 잔골재는 6호 규사(SiO₂=95%, 밀도=2.62 g/cm³)를 사용하였다.

3.2 배합비 및 실험방법

알칼리 활성화제의 혼합비를 검토하기 위해 9M의 NaOH와 쇼톱실리케이트의 비를 1.25:0.75, 1:1, 0.75:1.25로 제조하여 사용하였다. 그리고 본 연구에서 사용한 배합비는 Table 4와 같이 콘크리트에서 굵은골재를 제외한 모르타르를 대상으로 하였다. 이와 같이 콘크리트 대신 모르타르 대상으로 배합을 설정한 이유는 양질의 골재를 사용한 경우에는 콘크리트와 모르타르 모두 골재가 강도발현에 미치는 영향은 크지 않고, 콘크리트의 강도를 포함한 품질에 지배적인 영향을 끼치는 것은 시멘트 결합체로 판단되

Table 3. Details of experimental programme

Experiment factor	Mole concentration	Ratio of SH:SS	Curing temperature-times	Curing conditions	Age (days)
Mole concentration of alkaline activator	6, 9, 12M	1:1	60-48H	Atmospheric curing	1,3,7,28
NaOH(SH) to sodium silicate(SS) ratio by mass	9M	1.25:0.75, 1:1, 0.75:1.25	60°C -48H	Atmospheric curing	1,3,7,28
Curing temperature	9M	1:1	30°C, 60°C 90°C -24H	Atmospheric curing	1,3,7,28
Duration of high temperature curing	9M	1:1	60°C -24,48,72H 90°C -24,48,72H	Atmospheric curing	1,3,7,28
Curing conditions	9M	1:1	60°C -48H 90°C -48H	Atmospheric curing/ Water curing	1,3,7,28

Table 4. Mixture proportions of mortar

Unit mass(kg/m ³)				
W	Fly ash	Alkaline activator	S	G
104	500	184	581	710

어 기초연구로서 모르타르를 대상으로 하였다. 양생온도 및 양생기간에 따른 영향을 알아보기 위하여 습도 65±10% R.H.가 유지되는 조건에서 30, 60 및 90°C로 각각 24, 48 및 72시간 동안 양생을 실시한 후 23±2°C의 상온에서 기건양생(습도 65±10% R.H.)과 수중양생을 시험재령까지 실시하였다.

본 실험에 사용된 지오폴리머 모르타르는 10리터 믹서기에 먼저 플라이애시와 잔골재를 넣어 30~40 rpm 속도로 2분간 건비빔을 실시한 다음, 1일전에 제조된 알칼리 자극제와 소듐실리케이트 및 배합수를 넣어 다시 70~80 rpm 속도로 3분간 믹싱하여 제조하였다. 이렇게 제작된 모르타르를 KSL 5105에 준하여 플로우 시험과 50×50×50 mm의 모르타르 공시체를 제작하여 재령 1, 3, 7 및 28일 압축강도를 측정하였다. 지오폴리머 모르타르의 시공성을 분석하기 위해 플로우를 측정한 결과, 178~183 mm로 알칼리 활성화제의 혼합비에 따른 영향이 작은 것으로 나타났다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 알칼리 활성화제의 영향

4.1.1 NaOH 몰농도의 영향

Fig. 2는 알칼리 자극제인 NaOH의 몰농도가 압축강도에 미치는 영향이다. NaOH의 몰농도가 증가할수록 강도가 증가되고 있으며, 특히 재령 28일에서 몰농도 9M에서 40 MPa, 12M에서 50 MPa 이상으로 고강도를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 NaOH의 몰농도가 증가함에 따라 알칼리가 높아 플라이애시의 유리피막을 파괴시켜 내부의 Si와 Al 성분과 반응을 활성화시켰기 때문으로 분석된다. 그리고 재령 7일까지 재령에 따른 영향이 거의 없었으나, 재령 7일과 재령 28일 사이에서 NaOH 몰농도의 관계없이 강도가 크게 증가하는 것으로 나타났는데, 이것은 고온양생 후 기건양생을 통해 배합수가 모르타르 외부로 배출되어 더욱 알칼리 환경을 높여 반응이 활성화되었기 때문으로 사료된다. 이상과 같이 NaOH 몰농도가 증가할수록 강도가 증가하는 것으로 나타났으나, 몰농도가 증가함에 따라 용액의 제조과정과 경제성 저하 등 문제점이 있다. 본 연구의 결과로부터 NaOH의 몰농도에 따라 콘크리트의 강도를 제어 할 수 있을 것으로 사료되며, 또한 고강도 콘크리트 기준인 40 MPa 이상을 확보하는 데에는 NaOH 9M 정도를 사용하는 것이 적정한 것으로 판단된다.

4.1.2 NaOH와 소듐실리케이트의 혼합비율에 따른 영향

Fig. 3은 알칼리 활성화제의 혼합비율이 압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 NaOH (sodium hydroxide ; SH)와 소듐실리케이트 (sodium silicate ; SS)의 혼합비를 1:1, 1.25:0.75, 0.75:1.25로 제조한 알칼리 활성화제에 60°C에서 24시간 고온 양생한 후 기건양생을 통하여 강도를 측정한 결과이다. 재령 7일까지는 SH:SS=1:1과 0.75:1.25인 경우가 SH:SS=1.25:0.75에 비해 강도가 높고, 재령 28일에서는 SH:SS=1:1의 비율을 사용한 경우가 가장 높은 것으로

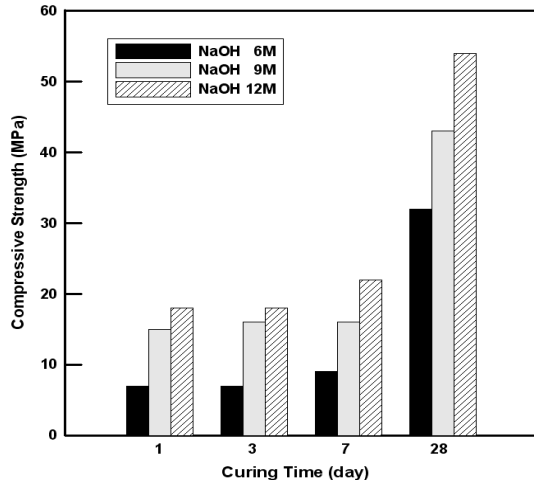


Fig. 2 Influence of concentration of NaOH liquid in molarity [M] on compressive strength

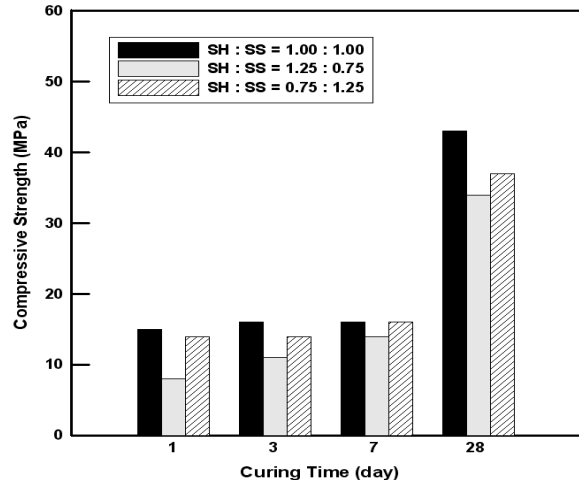


Fig. 3 Compressive strength according to sodium hydroxide(SH)-to-sodium silicate (SS) liquid ratio

나타났다. 이러한 이유는 알칼리 자극제의 경우 $\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + (\text{OH})^- + \text{H}_2\text{O}$ 로 반응하여 플라이애시의 유리질 피막을 파괴하는데 기여하며, 파괴 후 플라이애시 내부의 Si-Al을 활성화하여 식 (1)과 같은 반응이 유도된다. 쇼트실리케이트의 경우 식 (2)와 같은 반응으로 NaOH와 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 가 생성되어 플라이애시 자체의 Si-Al 성분 이외의 Si와 Na 성분을 증가시켜 중합반응을 유도한다. 이러한 관계를 통하여 알칼리 자극제의 양이 많아질 경우 Si 성분이 적어지며, 쇼트실리케이트의 양이 증가할 경우 상대적으로 알칼리 자극제보다 Na 이온이 적어져 중합반응을 활성화 시키는데 방해가 된다. 따라서 혼합비 1:1의 경우, 알칼리 활성화제의 Na, Si 성분이 플라이애시의 Si, Al 성분과 반응성이 가장 우수한 결과로 판단된다. 이상의 결과로부터 NaOH와 쇼트실리케이트의 혼합비율을 1:1로 알칼리 활성화제를 제조하여 사용하는 것이 강도에 가장 유리한 것으로 나타났다.

4.2 양생조건인 영향

4.2.1 양생온도가 압축강도에 미치는 영향

Fig. 4는 양생온도가 압축강도에 미치는 영향이다. 재령 7일까지는 양생온도가 높을수록 압축강도가 향상되며, 재령 28일에서 양생온도 60°C와 90°C는 30°C에 비해 강도가 크게 나타났으나, 60°C와 90°C는 오히려 강도가 역전되는 결과가 나타났다. 양생온도 60°C에서는 재령 7일과 재령 28일 사이에 강도가 크게 증진되었으나, 양생온도 90°C에서는 강도증진이 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같이 기건양생 조건에서 양생온도가 높을수록 강도가 향상되는

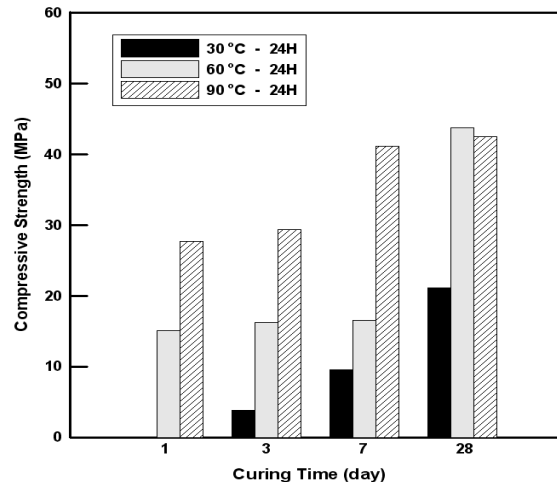


Fig. 4 Effect of curing temperature on strength

것은 콘크리트 내부의 수분감소를 유도하고 pH 상승으로 플라이애시가 활성화 시킬 수 있는 고알칼리 환경으로 변화되어 플라이애시의 중합반응이 가속화되었기 때문이다. 그리고 양생온도 90°C에서 재령 7일과 재령 28일 사이에서 강도 증진이 없는 것은 24시간 동안 90°C의 고온양생으로 재령 7일까지 콘크리트 내부의 수분 증발이 거의 이루어져 플라이애시의 잠재적 중합반응이 거의 발생함으로써 그 이후의 재령에서 강도가 증진되지 않은 것으로 분석된다. 이상의 결과로부터 재령초기에 고강도가 요구되는 콘크리트인 경우에는 양생온도가 높을수록 유리하나, 재령의 증가에 따른 강도 발현과 경제성을 고려할 경우에는 양생온도 60°C가 유리한 것으로 판단된다.

4.2.2 양생기간이 압축강도에 미치는 영향

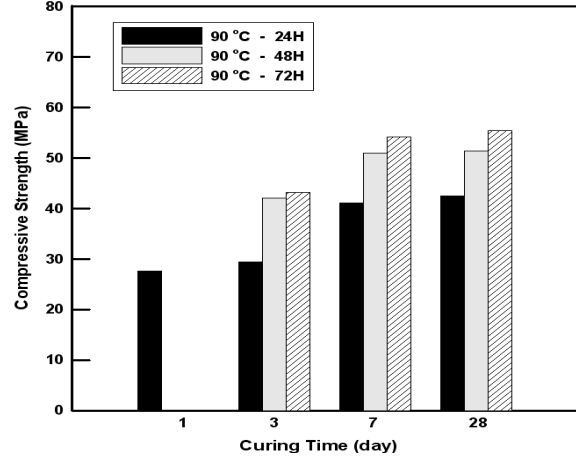
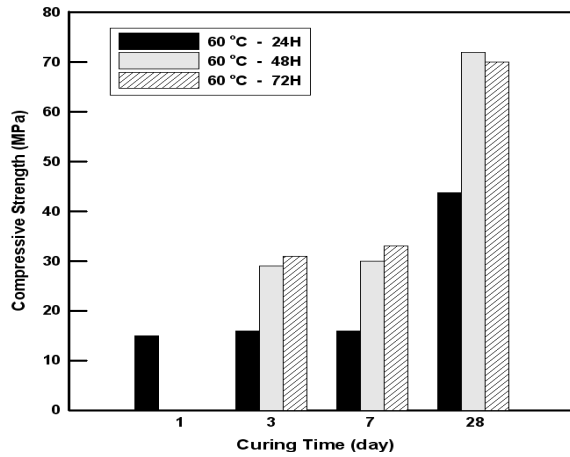


Fig. 5 Effect of the duration of high temperature curing on strength

Fig. 5는 60°C와 90°C에서 양생기간이 압축강도에 미치는 영향이다. 24시간 동안 60°C에서 양생을 실시할 경우, 15 MPa 정도로 비교적 강도가 크게 나타났으며, 재령 7일까지 60°C의 양생기간이 길수록 강도가 증진되는 것으로 나타났다. 그리고 재령 7일과 재령 28일 사이에서 60°C에서 48시간과 72시간 동안 양생을 실시한 경우에는 강도가 상당히 크게 증가되어 압축강도 70 MPa 이상으로 초고강도를 나타내고 있다. 그리고 재령 28일에서 양생기간 48시간이 72시간보다 강도가 약간 증진이 되는 것으로 나타났으며, 이 결과로부터 60°C의 환경에서 플라이 애시의 중합반응이 활성화를 유도할 수 있는 콘크리트 내부의 수분 증발에 필요한 시간은 48시간으로 추정된다. 따라서 60°C 양생환경에서는 48시간 정도 양생을 실시하는 것이 강도 발현에 적절한 것으로 분석된다.

90°C에서 24시간 동안 양생한 경우에는 재령 1일에서 27 MPa 정도로 높은 강도를 나타내고 있으며, 90°C에서 48~72시간 동안 양생을 실시한 경우에는 재령 3일에서 40 MPa 이상의 고강도를 나타내고 있다. 그러나 재령 7일과 재령 28일에서는 90°C의 양생기간에 관계없이 강도증진의 거의 없는 것으로 나타났는데, 이것은 초기 90°C의 높은 온도에서 콘크리트 내부에서 배합수가 빠르게 증발하여 초기강도는 높게 나타났으나 빠른 반응으로 조직의 치밀함이 떨어져 장기강도 발현에 악영향을 미치는 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 결합제로 플라이애시를 100%를 사용한 알칼리 활성 콘크리트 제조 시 초기강도가 요구되는 경우에는 90°C에서 24~48시간 정도 실시하는 것이 적절한 것으로 분석된다.

4.2.3 고온양생 후 양생조건이 압축강도에 미치는 영향

Fig. 6은 고온양생 후 양생조건이 강도에 미치는 영향을

분석하기 위해 각각 60°C와 90°C의 고온으로 48시간 양생한 후 기건양생과 수중양생을 동시에 실시한 결과이다. 60°C에서 양생을 실시한 경우에는 재령 7일까지는 기건양생과 수중양생의 차이가 없는 것으로 나타났으나, 재령 28일에서 기건양생의 경우가 수중양생보다 강도차이가 28 MPa 정도로 상당히 큰 것으로 나타났다. 이것은 고온양생 후 양생조건에 따라 콘크리트 내부의 수분이 증발 정도에 의해 알칼리 환경의 차이가 작용한 것으로 판단된다. 즉 수중양생의 경우에는 콘크리트 내부의 수분이 빠져나가지 못하기 때문에 거의 일정한 pH를 유지하지만, 기건양생의 경우에는 건조에 의해 콘크리트 내부의 수분이 증발됨으로써 pH가 상승하였기 때문으로 사료된다. 90°C의 양생을 실시한 경우에는 재령 3일에서 양생조건에 따른 영향이 거의 없고, 재령 7일 이후에서는 기건양생이 수중양생에 비해 강도가 증진되는 것으로 나타났으나, 60°C에 비해 양생조건에 따른 영향은 작은 것으로 나타났다. 이것은 90°C에서 48시간 동안 양생을 할 경우에는 이 기간에 대부분 수분증발 등이 발생함으로써 그 이후의 양생조건에 따른 영향이 적은 것을 분석된다. 이상과 같이 고온양생을 실시한 후 양생조건에 따른 영향을 검토한 결과, 고온양생 후 기건양생을 실시한 것이 강도증진에 효과가 있으며, 특히 60°C에서 양생을 실시한 경우에는 그 효과가 현격히 발휘되는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않은 지오폴리머 콘크리트를 개발할 목적으로 결합제로 플라이애시 100%를 사용한 알칼리 활성 모르타르의 강도에 미치는 알

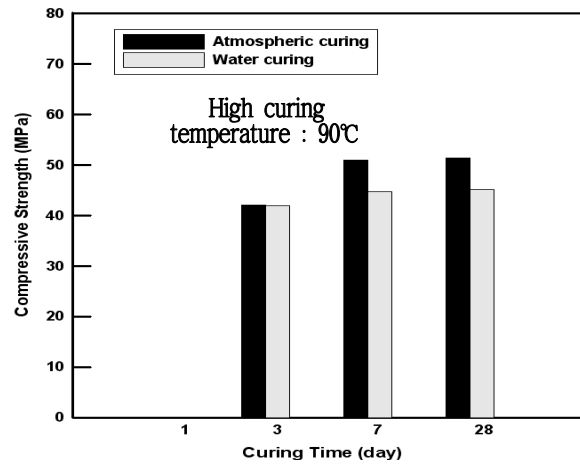
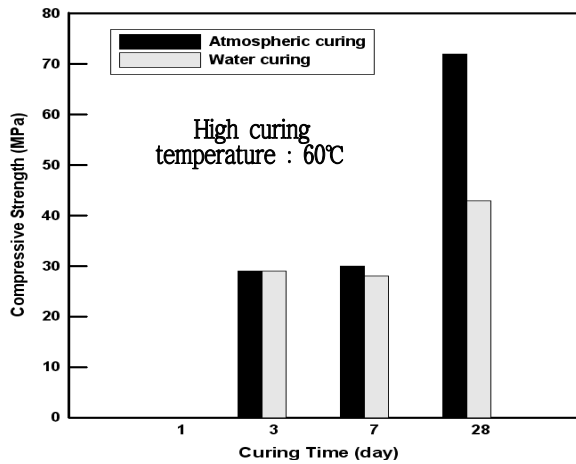


Fig. 6 Influence of curing condition after the high temperature curing on compressive strength

칼리 활성제와 양생조건의 영향에 대해 검토하였다. 그 결과, NaOH 몰농도가 증가함에 따라 강도가 향상되고, 몰농도에 의해 강도를 제어할 수 있고, NaOH와 쇼튡실리케이트와는 1:1로 혼합하여 사용하는 경우가 강도발현이 가장 우수한 것으로 나타났다. 그리고 재령초기에 고강도가 요구되는 콘크리트인 경우에는 양생온도가 높을수록 유리하나, 재령의 증가에 따른 강도 발현과 경제성을 고려할 경우에는 양생온도 60°C에서 48시간 정도 실시하여 기건양생을 실시한 것이 유리한 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 결과로부터 재령 28일에서 압축강도 70 MPa의 고강도 알칼리 활성 모르타르를 제조하기 위해서는 9M NaOH과 쇼튡실리케이트를 1:1의 비율로 제조한 알칼리 활성화제를 사용하고, 60°C에서 48시간 동안 양생을 한 다음 기건양생을 실시하는 것이 적절한 것으로 분석된다.

향후 결합제 및 알칼리 활성제 등의 종류 및 비율 등에 대한 배합 분석을 통해 다양한 지오폴리머 콘크리트와 이를 활용한 부재를 개발할 예정이다. 지오폴리머 콘크리트가 건설현장에 본격적으로 적용될 경우에는 시멘트 생산 시 배출되는 CO₂ 가스의 양을 저감하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 ‘바탕에시를 사용한 CO₂ 배출 저감형 콘크리트 기술 개발’ 사업으로 수행된 연구성과입니다. 이에 감사드립니다.

(No. 20101020100180)

참고문헌

- 1) 유엔환경계획 한국위원회, 교토의정서, 유넵프 레스 (UNEP Press), pp.12 ~ 18, 2002.
- 2) J. Davidovits, Geopolymers and geopoly -meric materials, Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 35, No. 2, 1989.
- 3) 조병완, 박석민, 박승국, 알칼리 활성화에 의한 플라이 애쉬 모르타르의 강도 발현 및 경화 메커니즘, 한국콘크리트학회지, Vol.18, No. 4, pp.499-458, 2007.
- 4) Hardjito, D, Rangan, B.V, 2005; Development and Properties of Low-calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete, Research Report CC-1, Faculty of Engineering, Curtin Univ of Technology.
- 5) 류금성, 고경택 등, 결합제로서 플라이애쉬 100% 사용 모르타르의 강도발현에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol.20, No.1, pp.721 ~ 724, 2008.
- 6) Djwantoro Hardjito et. al., Cementless Fly Ash-Based Geopolymer Concrete : From Waste to Benefit, Workshop on Fly Ash, Bhubaneswar, Orissa, India, 2004.
- 7) T. Bakharev, Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing, Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp.1224 ~ 1232, 2004.
- 8) 池田政, ジオポリマーバインダーによる鉱物質分体の常温固化と材料化, 資源と素材, No. 114, pp.497 ~ 500, 1998.

플라이애시 기반 지오폴리머 모르타르 개발

포틀랜드 시멘트는 전 세계적으로 매년 15억 톤을 생산하고 있으며, 이로 인해 전체의 배출량에 7% 이상의 CO₂ 가스 배출로 많은 지구환경을 지속적으로 오염을 시키고 있다. 그리고 화력발전소에서 발생하는 산업부산물인 플라이애시를 시멘트와 일부 대체하여 콘크리트에 재활용하고 있으나, 50% 이상을 해안 및 육상에 매립함으로써 환경적인 문제를 유발하고 있다. 한편 최근 결합재료 시멘트를 사용하지 않은 알칼리 활성화 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 알칼리 활성화 콘크리트는 시멘트 대신에 실리콘(Si)과 알루미늄(Al)이 풍부한 플라이애시를 사용하여 알칼리 용액으로 활성화시킨 시멘트 ZERO 콘크리트로서 CO₂ 가스를 저감하는데 효과적이다.

본 연구에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 결합재료로서 플라이애시를 100% 사용한 지오폴리머 콘크리트를 개발할 목적으로 알칼리 활성화제와 양생조건 등이 모르타르의 압축강도에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 그 결과, 9M NaOH과 쇼둡실리케이트를 1:1의 비율로 제조한 알칼리 활성화제를 사용하고, 60°C에서 48시간 동안 양생을 한 다음 기건양생을 실시할 경우 재령 28일에서 압축강도 70 MPa의 지오폴리머 모르타르를 제조할 수 있는 것으로 나타났다.