

플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합 사용한 무시멘트 알칼리 활성화 모르터의 유동성 및 강도 특성

Properties of the Flowability and Strength of Cementless Alkali-Activated Mortar Using the Mixed Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag

(Received November 22, 2010 / Revised December 10, 2010 / Accepted December 10, 2010)

고경택^{1)*} 류금성¹⁾ 이장화¹⁾

¹⁾한국건설기술연구원 구조교량연구실

Kyung-Taek Koh^{1)*} Gum-Sung Ryu¹⁾ Jang-Hwa Lee¹⁾

¹⁾Structural Engineering & Bridge Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, 411-712, Korea

Abstract

Portland cement production is under critical review due to high amount of CO₂ gas released to the atmosphere. Attempts to increase the utilization of a by-products such as fly ash and ground granulated blast-furnace slag to partially replace the cement in concrete are gathering momentum. But most of by-products 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. However, most study deal only with alkali-activated ground granulated blast furnace slag or fly ash, as for the combined use of the both, little information is reported. In this study, we investigated the influence of mixture ratio of fly ash/ blast furnace slag and curing condition on the flowability and compressive strength of mortar in order to develop cementless alkali-activated concrete. In view of the results, we found out that the mixture ratio of fly ash/blast furnace slag always results to be significant factors. But the influence of curing temperature in the strength development of mortar is lower than the contribution due to other factors. At the age of 28days, the mixture 50% fly ash and 50% ground granulated blast furnace slag activated with 1:1 the mass ratio of 9M NaOH and sodium silicate, develop compressive strength of about 65 MPa under 20°C curing.

키워드 : 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말, 무시멘트 알칼리 활성화 모르터, 유동성, 강도

Keywords : Fly Ash, Ground Granulated Blast Furnace Slag, Cementless Alkali-Activated Mortar, Flowability, Strength

1. 서론

국내의 화력발전소에서 연간 발생하는 플라이애쉬를 포함한 석탄회(coal ash)의 양은 2000년에 약 436만 톤으로 1990년의 189만 톤에 비해 2배 이상 증가하였으며, 2010년에는 약 736만 톤 정도로 추정하고 있다¹⁾. 현재 발생하는 석탄회 중 58% 정도를 시멘트 제조용 원료(점토 대체제),

콘크리트용 혼화재 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.

그리고 국내의 제철소에서 발생하는 고로슬래그 미분말은 연간 약 800만 톤 이상으로 2000년대 초까지도 재활용이 낮아 상당한 양의 재고가 쌓여 있었으나, 최근 보통포틀랜드 시멘트 생산 시 중량재, 혼합시멘트 및 레미콘 혼

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

화재 등으로 사용량이 급증함에 따라 재활용율이 100%에 근접하게 되었다²⁾. 그러나 2010년부터 제철소가 추가로 가동되면서 향후 고로슬래그 미분말의 발생 양은 계속 증가할 것으로 판단되므로 이에 대한 대책이 필요하다.

한편, 시멘트는 클링커 제조 시 고온(1,450°C)상태에서 제조될 뿐만 아니라 시멘트 1톤 생산하는데 0.7 ~ 1.0톤의 CO₂ 가스를 배출하는 등 전 세계 CO₂ 가스 배출량의 7%를 차지할 정도로 심각하다³⁾. 이에 시멘트 산업에서 소성온도를 낮추어 생산하거나 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 등의 혼합 시멘트 사용하는 등 CO₂를 저감하고자 노력을 하고 있다. 또한, 최근에는 이러한 환경문제로 인하여 시멘트를 전혀 사용하지 않는 시멘트 ZERO 콘크리트 개발에 관한 연구가 주목을 받고 있다. 그 중 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬 등 산업부산물을 이용한 알칼리 활성화 콘크리트에 대해 국내외적으로 다양한 연구가 진행되어 일부 실용화가 이루어지고 있으나, 아직까지 해명되지 않은 부분이 많다. 특히 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 알칼리 활성화에 대한 연구는 기초단계에 있으며, 알칼리 활성화제, 결합제의 혼합비율, 양생온도 등이 콘크리트에 미치는 영향에 대한 체계적인 검토한 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 결합제로서 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 알칼리 활성화 콘크리트를 개발할 목적으로 결합제의 혼합비율, 양생온도가 알칼리 활성화 모르타의 시공성 및 강도발현에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

2. 연구동향 분석

시멘트 ZERO 콘크리트는 1978년에 프랑스의 Davidovits⁴⁾가 카올리나이트(Al₂Si₂O₅(OH)) 광물질과 알칼리 활성화제를 사용하여 중합반응(polymerization)을 유도하는 방법에 관한 이론을 세계 최초로 정립하였고 그 후 여러 연구자들에 의해 연구가 수행되고 있다.

고로슬래그 미분말을 사용한 알칼리 활성화 콘크리트는 시공성 및 수축 등의 문제^{5,6)}가 있는 것으로 지적되고 있으

나, 상온에서도 강도발현이 우수하여 압축강도 40 ~ 70 MPa 범위의 고강도 콘크리트 제조가 가능한 것으로 보고되고 있다^{7,8)}. 플라이애쉬를 사용한 경우, 반응성이 약하므로 시공성 확보가 비교적 용이하나, 상온에서는 강도발현이 어렵고, 중합반응의 활성화를 위해 고온양생이 필요하다⁹⁻¹¹⁾.

고로슬래그 미분말과 플라이애쉬를 혼합한 알칼리 활성화 콘크리트에 대한 연구로서 활성화제로 NaOH를 사용한 경우, 초기강도는 향상되나 장기강도 증진에는 효과가 없는 것으로 보고되고 있다^{12,13)}. 그리고 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 50%씩 혼합한 결합제에 대해 알칼리 활성화제로 10M NaOH를 사용하고 25°C에서 양생한 경우, 재령 28일에서 50 MPa 정도의 강도가 발현되고, 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합비가 강도발현에 중요한 인자로 작용한다는 것을 확인하였다¹⁴⁾. C급 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합하고, 탈황석고, 수산화칼슘 등으로 구성된 활성화제를 사용한 결과, 결합제는 고로슬래그 미분말 70%, C급 플라이애쉬 18% 그리고 활성화제 2%로 구성된 것을 적정 혼합비로 선정하였다¹⁵⁾. 이상과 같이 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합한 알칼리 활성화 콘크리트는 결합제의 성분·분말도·혼합비율, 알칼리 활성화제의 종류·양, 양생방법 등에 따라 다르게 나타날 것으로 판단되나, 이에 대해 체계적인 연구는 부족한 실정이다.

3. 실험개요

3.1 사용재료

본 연구에서 사용된 시멘트 대체 결합재로는 경남 하동 화력발전소에서 생산되는 플라이애쉬와 포항제철소에서 발생하는 고로슬래그 미분말을 사용하였으며, 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다. 플라이애쉬는 산화규소(SiO₂)와 산화알루미늄(Al₂O₃)의 함유량이 81.1%로 반응성 산화물이 다량 포함되어 있다. 이 성분들은 알칼리 활성화제 사용과 고온양생으로 Al-Si 중합반응이 발생하여 콘크리트의 강도를 발현시킨다. 그리고 고로슬래그 미분말은 산화

Table 1 Chemical composition and physical properties of fly ash and blast furnace slag

Types	Items	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
Blast furnace slag		33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	2.08	0.03	4,159	2.90

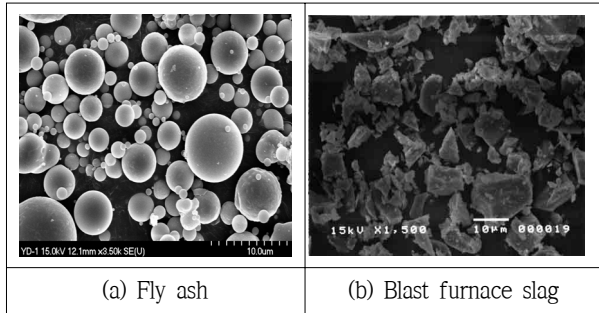


Fig. 1 Microstructure of the fly ash and Blast furnace slag by SEM

규소와 산화알루미늄의 함유량이 48.6%로 비교적 높아 플라이애쉬와 같이 어느 정도 중합반응을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 특히 산화칼슘(CaO) 성분이 42.1%로 풍부하여 일반 시멘트와 같이 수화반응도 기대할 수 있을 것으로 판단된다⁹⁾.

Fig.1은 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 SEM 사진을 나타낸 것으로, 이들 입자 표면에는 치밀한 불투수성 피막인 유리질 피막(glassy chain)으로 쌓여있는 것으로 알려져 있다. 이런 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말은 그 자체적으로 반응성이 없기 때문에 이 유리질 피막을 깨고 내부의 반응 물질을 활성화시킬 필요가 있는데, 이 때 가장 유효한 방법은 강알칼리성을 가진 알칼리 활성화제를 사용하고 경우에 따라 고온양생을 실시하는 것이다. 저자들은 기존 연구¹⁶⁾를 통하여 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 알칼리 활성화제로 반응성, 시공성 및 안정성 등을 고려하여 9M의 NaOH와 소듐실리케이트의 적정 혼합비로 1:1을 제안한 바 있다. 실험에 사용된 NaOH는 시약용으로 순도 98% 이상인 것을 사용하였으며, 소듐실리케이트는 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

본 연구에서 사용한 배합비는 Table 2와 같이 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합비율을 질량비로 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100으로 하였으며, 이 중에서 혼합비율 50:50에 대해서 알칼리 활성화제의 혼합비를 검토하는데 사용하였다. 본 연구에서 사용된 배합은 Table 2에 나타난 콘크리트 배합에서 굵은골재를 제외시킨 모르타르 배합을 대상으로 하였다. 양질의 골재를 사용한 경우에는 일반 강도범위에서 콘크리트와 모르타르 모두 골재가 강도 발현에 미치는 영향은 크지 않고, 콘크리트의 강도를 포함

한 품질에 지배적인 영향을 미치는 것은 시멘트 결합체로 판단되어 기초연구로서 모르타르를 대상으로 하였다.

Table 2 Mixture proportions of mortar

Mixture ratio (FA:BS)	Unit mass(kg/m ³)					
	W	FA	BS	Alkaline activator	S	G
100:0	104	500	0	184	581	710
75:25		375	125			
50:50		250	250			
25:75		125	375			
0:100		0	500			

본 실험에 사용된 알칼리 활성화 모르타르는 10리터 믹서에서 먼저 플라이애쉬와 잔골재를 넣어 30~40 rpm 속도로 2분간 견비법을 실시한 다음, 1일 전에 제조된 알칼리 활성화제 및 배합수를 넣어 다시 70~80 rpm 속도로 3분간 믹싱하여 제조하였다.

이렇게 제작된 모르타르에 대해 유동성을 평가하기 위해 KS L 5105에 준하여 시간이 경과함에 따른 플로우의 변화를 측정하였다. 50×50×50 mm의 모르타르 공시체를 제작하여 일정한 양생을 걸쳐 재령 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91일에서 압축강도를 측정하였으며, 압축강도 값은 공시체 5개의 평균값이다. 또한 양생온도에 따른 영향을 검토하기 위하여 습도 65±10% R.H.가 유지되는 조건에서 각각 20°C와 60°C로 48시간 동안 양생을 실시한 후 23±2°C의 상온에서 기건양생(습도 65±10% R.H.)을 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유동성

Fig. 2는 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합비율에 따른 유동성을 평가한 결과이다. 그 결과, 플라이애쉬를 단독으로 사용한 경우에는 플로우가 200 mm 정도로 높은 유동성을 나타내고 있으나, 고로슬래그 미분말의 혼합비가 증가함에 따라 유동성이 저하되어 고로슬래그 미분말을 100% 사용한 경우에는 플로우가 150 mm 정도로 저하되는 것으로 나타났다. 이것은 플라이애쉬를 사용한 경우에는 반응이 거의 발생하지 않으나, 고로슬래그 미분말을 사용한 경우에는 반응이 급격히 발생하게 때문에 유동성

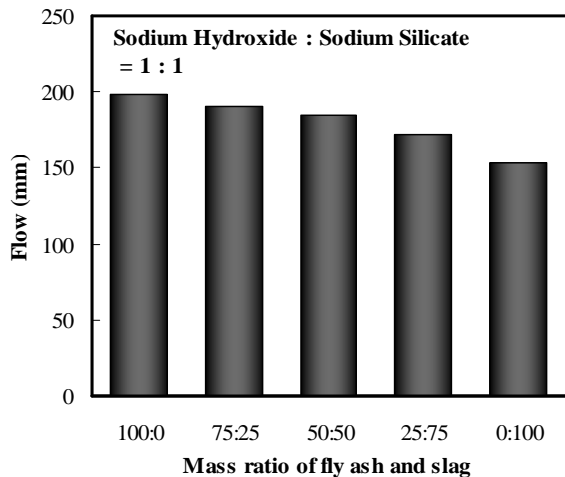


Fig. 2. Influence of the mixture ratio of fly ash and blast furnace slag on flow

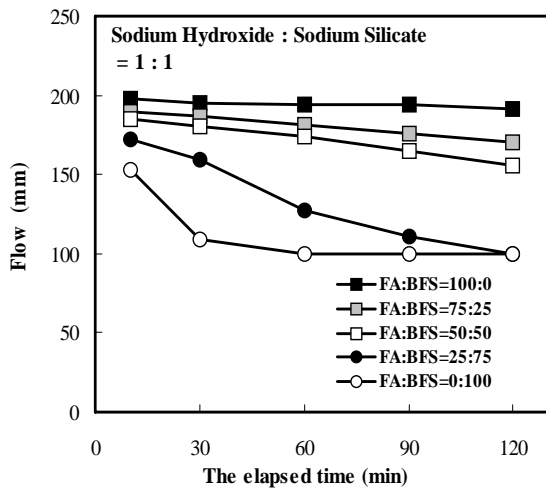


Fig. 3. Effect of the mixture ratio of fly ash(FA) and blast furnace slag(BS) on flow changes to the elapsed time

의 저하가 크게 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합비가 시간경과에 따른 유동성을 평가한 결과이다. 그 결과, 플라이애쉬를 단독으로 사용한 경우에는 타설 후 2시간이 경과하더라도 유동성 손실이 거의 없이 200 mm의 플로어를 유지하고 있다. 그러나 고로슬래그 미분말의 혼입률이 높을수록 시간의 경과함에 따라 유동성 손실이 커지는 것으로 나타났다. FA:BS=0:100과 25:75의 경우에는 각각 타설한 후 30분과 1시간이 경과 시 유동성을 거의 잃어 시편 제작이 불가능한 상태에 있었다. 이에 반해 FA:BS=75:25와 50:50으로 제조된 알칼리 활성화 모르터는 타

설 후 2시간이 경과하더라도 플로어가 각각 170 mm와 156 mm로 타설 작업이 가능한 유동성을 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 플라이애쉬의 경우에는 상온에서 Si-Al 성분과 직접적으로 반응하지 못하여 장시간 유동성이 유지되지만, 고로슬래그 미분말을 사용한 경우에는 알칼리 활성화제와의 반응속도가 빨라 급결이 일어나 유동성 손실이 일어나는 것으로 판단된다¹⁷⁾.

4.2 압축강도

4.2.1 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합비율에 따른 영향

Fig. 4는 20°C의 양생조건에서 알칼리 활성화 모르터의 결합재로 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합비율이 압축강도에 미치는 영향을 분석한 결과이다. FA:BS=100:0의 배합은 재령 91일에서도 강도가 거의 발현되지 않은 것으로 나타났다. 이것은 상온조건에서 알칼리 활성화제로만 플라이애쉬의 중합반응 발생이 어렵다는 것을 의미하는 결과이다. 플라이애쉬의 중합반응을 활성화시키기 위해 고온양생을 실시하거나, 물리적으로 유리질 피막을 파괴시키는 방법 또는 본 연구와 같이 반응성이 강한 결합재와 혼합하여 사용하는 방법을 사용할 수 있다. 그리고 결합재로 고로슬래그 미분말을 100% 사용한 경우(FA:BS=0:100)에는 재령 1일에서도 27 MPa로 매우 높고 그 이후 재령 14일 까지 강도가 증진되어 50 MPa 정도로 고강도가 발현되나, 그 이후 재령에서 강도증진이 거의 없는 것으로 나타났다.

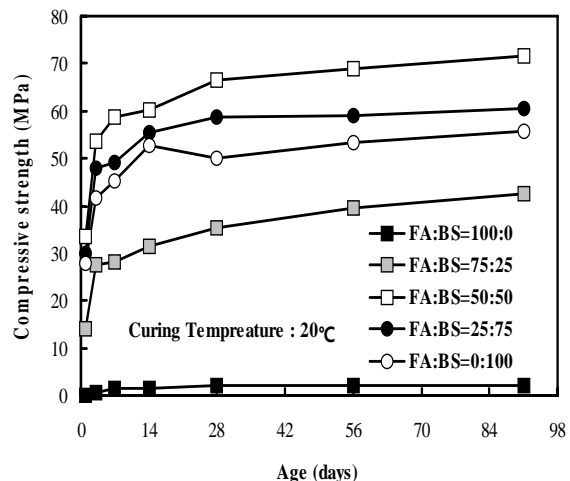


Fig. 4. Effect of the mixture ratio of fly ash (FA) and blast furnace slag (BS) on compressive strength

플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합한 모르타의 강도는 각각 단독으로 사용하는 경우에 비해 강도가 향상되는 것으로 나타났다. FA:BS=75:25의 배합에서 재령초기부터 강도가 발현되어 최종적으로 30 MPa 이상의 강도를 얻을 수 있었다. FA:BS=50:50의 경우에는 재령 1일에 30 MPa 이상, 재령 28일에는 65 MPa 정도 그리고 재령 91일에는 70 MPa 이상으로 매우 강도를 나타내고 있다. 이 강도 값은 고로슬래그 미분말 100%를 사용한 FA:BS=0:100 배합에 비해서도 20~30% 정도 높은 결과를 얻었다.

이상과 같이 알칼리 활성화 모르타에서 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬를 혼합하여 사용한 경우, 강도 증진에 효과 있으며, 각각 50:50 비율로 혼합하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

4.2.2 양생온도에 따른 영향

Fig. 5는 양생온도가 압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 각각 20°C와 60°C에서 48시간 동안 양생한 후 정해진 재령에서 압축강도를 측정하였다.

결합재로 플라이애쉬만을 사용한 알칼리 활성화 모르타(FA:BS=100:0)는 20°C에서 양생을 실시한 경우에는 강도가 거의 발현되지 않았으나, 60°C에서 양생을 실시한 경우에는 재령 1일에서 강도가 약 15 MPa 발현되고 재령 28일에서 43 MPa 정도로 양생온도가 강도발현에 미치는 영향을 상당히 큰 것으로 나타났다. 그리고 고로슬래그 미분말을 100% 사용한 배합(FA:BS=0:100)은 FA:BS=100:0에 비해 양생온도에 따른 영향이 적게 나타났으나, 70% 이상의 강도 차이가 있는 재령 1일을 제외하더라도 재령에 따라

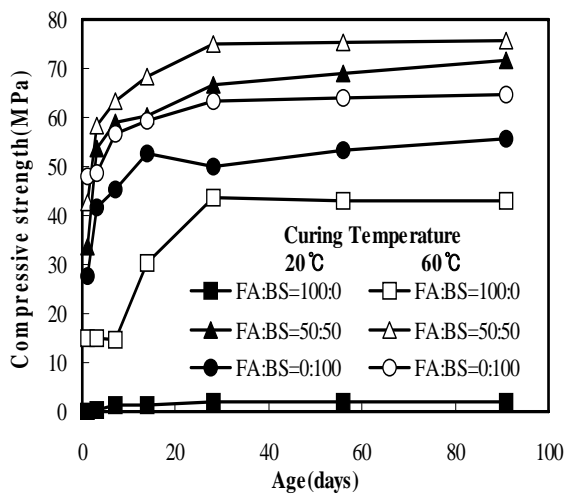


Fig. 5 Effect of curing temperature on the compressive strength of alkali activated mortar

10~25% 정도로 양생온도에 따른 강도의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이에 비해 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 50%씩 혼합한 FA:BS=50:50 배합에서 양생온도에 따라 26% 정도 차이가 있는 재령 1일을 제외하고 모든 재령에서 10% 이내로 온도의 영향이 상당히 작아지고 있는 것으로 나타났다.

이상과 같이 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합한 알칼리 활성화 모르타(FA:BS=50:50)는 플라이애쉬 또는 고로슬래그 미분말을 100%로 사용한 FA:BS=100:0과 FA:BS=0:100에 비해 양생온도의 차이가 없어 상온에서 충분히 고강도 콘크리트 제조가 가능한 것으로 나타났다.

4.3 반응 메커니즘 분석

Fig. 6은 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합비가 pH의 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 고로슬래그 미분말의 혼합률이 증가함에 따라 pH는 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이것은 고로슬래그미분말의 CaO 성분이 수화반응을 통하여 수산화칼슘 등을 생성함으로써 알칼리도가 높아지는 것으로 판단된다. 또한 재령이 증가됨에 따라 pH가 낮아지는 것은 중합반응 시 Na^+ 및 Ca^+ 이온이 소모되기 때문으로 판단된다.

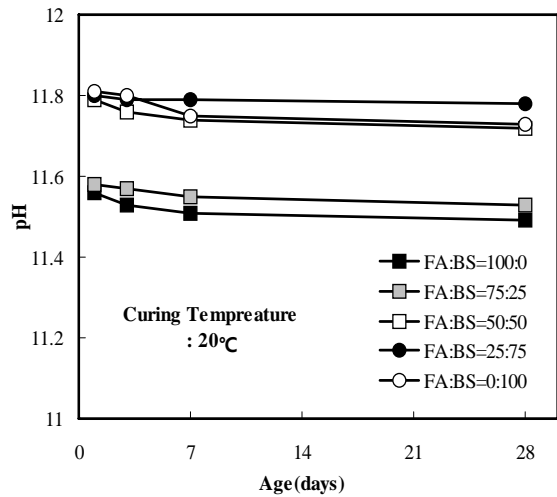


Fig. 6 Changes of pH according to mixture ratio of fly ash(FA) and blast furnace slag (BS)

Fig. 7과 Fig. 8은 FA:BS=50:50에 대해 재령 7일과 28일에서 SEM/EDS를 분석한 결과이다. 재령 7일에서 플라이애쉬가 반응하지 않은 둥근 입자가 보이고 있으며, 그 주위에 막대모양의 중합반응 생성물 그리고 침상구조를 가진

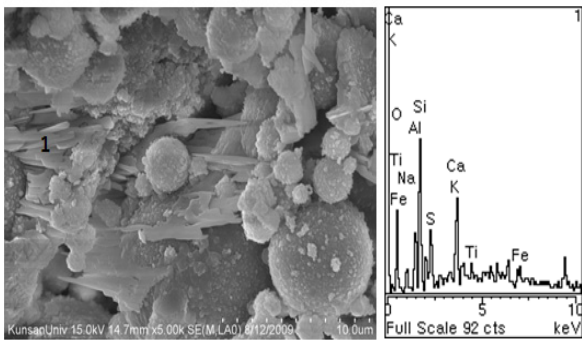


Fig. 7 SEM/EDS of alkali activated paste with the mixture 50% FA and 50% BS at age 7days

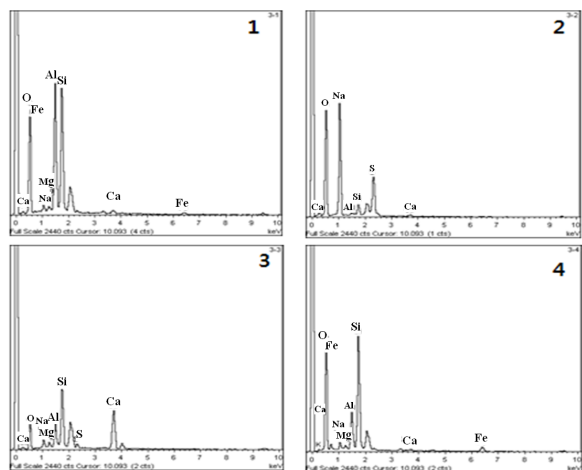
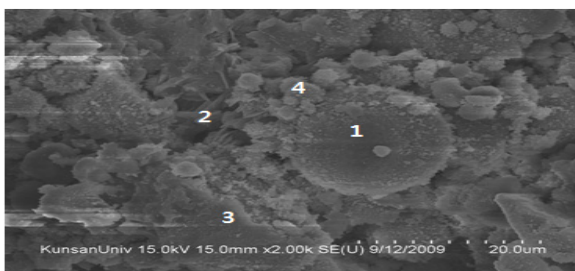
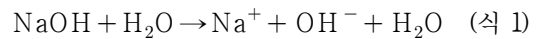


Fig. 8 SEM/EDS of alkali activated paste with the mixture 50% FA and 50% BS at age 28days

에트링자이트 등이 생성되고 있다. 그리고 막대모양의 반응생성물에 대해 EDS 분석 결과, Ca, Si 및 Al 성분이 주로 분포하고 있다. 재령 28일에서 재령 7일보다 조적이 밀실하게 보이고 있으며, 주요 생성물에 EDS를 분석한 결과, 플라이애쉬의 둥근입자(위치 1)에서 Si, Al 성분이 주로 분포하고 있는데, 이것은 플라이애쉬의 주요 성분과 동일하다. 그리고 다공질 부분(위치 2)에서 Na, O, 등 반응 생성물과 무관한 성분이 검출되었고, 수화생성물(위치 3)에서 Si, Ca 등이 검출되었는데, 이것은 고로슬래그 미분말의

수화반응과 관련된 생성물이라고 추정된다. 그리고 플라이애쉬 입자와 매트릭스와의 경계(ITZ, 위치 4)에서 Si, Al 이외에 Ca이 보이고 있는데 이것은 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 반응에 의해 혼합된 생성물로 판단된다.

Fig. 9는 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬를 혼합사용한 알칼리 활성화 모르타의 반응 메커니즘을 도시한 것이다. 재령초기에는 알칼리 활성화제 중에서 NaOH와 물의 아래의 식과 같이 반응하게 된다⁴⁾.



이 반응을 통하여 고로슬래그 미분말의 유리질 피막을 파괴하고 고로슬래그의 주요 성분인 Ca, Si 이 물과 반응하는 수화반응에 의해 Fig. 7에 나타난 바와 같이 C-S-H 겔과 Ca(OH)₂를 생성¹⁶⁾시키고, 더욱 알칼리 환경을 조성하게 하여 중합반응을 촉진시키는 것으로 판단된다.

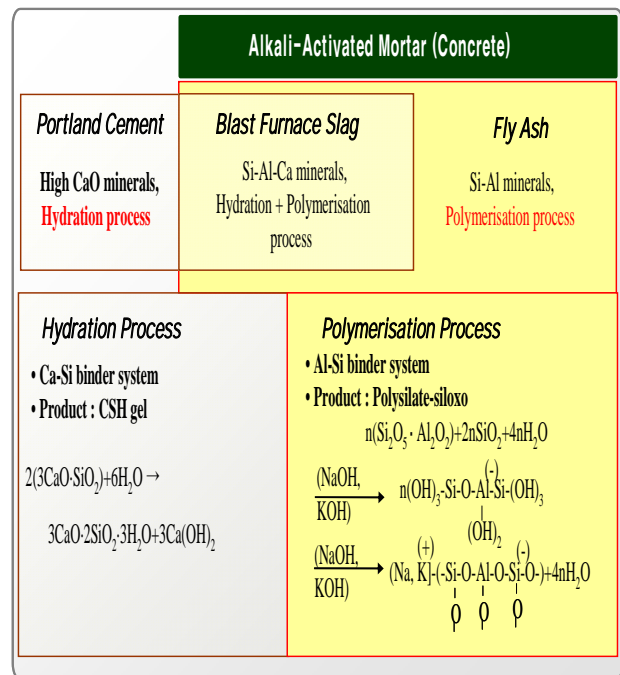


Fig. 9 Reaction mechanism of alkali-activated mortar

이상의 단계를 걸치면서 점차적으로 쇼독실리케이트의 경우에도 물과 반응하여 NaOH와 Si(OH)₄가 생성되어 결합체 자체의 Si-Al 성분 이외의 Si와 Na 성분을 증가시켜 중합반응을 유도하게 되며, 플라이애쉬의 유리질 피막도 파괴되는 것으로 추정된다^{23,24)}. 그리고 재령이 증가함에 따라 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 내부에 있는 Si-Al

을 활성화하여 중합반응으로 인해 Si-O-Al-O 결합을 구성함으로써 장기강도가 향상되는 것으로 판단된다^{19,20}.

5. 결론

본 연구에서는 시멘트 대신에 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합한 무시멘트 알칼리 활성 콘크리트를 개발할 목적으로 결합재의 혼합비율, 양생온도가 알칼리 활성 모르타의 시공성 및 강도발현에 미치는 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합하여 사용한 알칼리 활성 모르타의 유동성은 제조 후 2시간이 경과하더라도 플로우가 170mm 정도로 충분한 작업성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합한 모르타의 압축강도는 재령 초기에는 주로 고로슬래그미분말이 좌우하고 점차적으로 재령이 경과함에 따라 플라이애쉬가 강도발현을 좌우함으로써 단독으로 사용한 경우에 비해 강도가 향상되는 것으로 나타났다. 특히 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 50%씩 혼합한 경우에는 재령 1일에서 30 MPa, 재령 28일에는 65 MPa, 재령 91일에서 70 MPa 정도의 매우 높은 강도를 나타내고 있다.

3) 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합한 경우에는 양생온도의 영향을 크게 받지 않고 상온에서 충분히 고강도 무시멘트 콘크리트 제조가 가능한 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 지식경제부, 한국에너지기술평가원의 전력산업원천기술개발사업 지원으로 이루어졌으며, 이에 대해 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) 지식경제부 보도자료, "화력발전소 석탄재 재활용 길 활짝 열려", 2007.
- 2) POSCO 홈페이지(www.posco.co.kr).
- 3) 유엔환경계획 한국위원회, "교토의정서", 유넵프레스(UNEP Press), pp.12~18, 2002.
- 4) Davidovits J., "Geopolymers and geopolymeric

materials", Thermal Analysis and Calorimetry, 35(2), 1989.

- 5) 양근혁, 송진규, "알칼리 활성화를 이용한 무시멘트 콘크리트의 구조 성능 및 적용", 한국콘크리트학회, 제 19권 2호, pp.42~48, 2007.
- 6) Palacios, M., Puertas F., "Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes", Cement and Concrete Research, 37, pp.691~702, 2007.
- 7) Shi, C., Krivenko, P.V., Roy D., "Alkali-activated cements and Concretes", Taylor & Francis, 2006.
- 8) Collins, F.G., Sanjayan, J.G., "Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete", Cement and Concrete Research, 30(9), 1401-1406, 2000.
- 9) Palomo A. et al., "Alkali-activated fly ashes, a cement for the future", Cement and Concrete Research, (29), pp.1323~1329, 1991.
- 10) 조병완, 박석민, 박승국, "알칼리 활성화에 의한 플라이애쉬 모르타르의 강도 발현 및 경화 메커니즘", 한국콘크리트학회지, Vol.18, No.4, pp.499 ~458, 2006.
- 11) 강현진, 고경택외 5인, "시멘트를 사용하지 않은 플라이애쉬 알칼리 활성 모르타르의 압축강도에 미치는 알칼리 활성제 및 양생조건의 영향", 자원리싸이클 제18권 제2호, pp.39~50. 2009.
- 12) Smith, M.A., Osborn C.J., "Slag/fly ash cement", World Cement Technology, 6, pp.223~233, 1977.
- 13) Bijen J., Waltje, H., "Alkali activated slag-fly ash cement, Fly ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete", Proc. 3rd Int. Conf. Trondheim, SP114-76, pp.1566 ~1578, 1989.
- 14) Puertas F. et al., "Alkali-activated fly ash/slag cement strength behaviour and hydration products", Cement and Concrete Research, 30, pp.1625~1632, 2000.
- 15) Feng-Qing Zhao et al, "Activated fly ash/slag blended cement Resources", Conservation and Recycling, 52, 303~313, 2007.
- 16) 고경택, 류금성, 이장화 등, "결합재로 플라이애쉬와 고로슬래그의 혼합사용이 알칼리 활성 모르타르의 특성에 미치는 영향", 자원리싸이클링, 제19권 제4호, pp.19~29, 2010
- 17) Sanjay Kumar, Ralesh Kumar and Mehrotra S.P., "Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based

- geopolymer”, J Mater Sci, 45, pp.607~615, 2010.
- 18) Antonio A. Meolo Neto, et al., “Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement”, Cement and Concrete Research, 38, pp.565~574, 2008.
 - 19) Puertas F. et. al., “Mineralogical and microstructural characterisation of alkali- activated fly ash/slag pastes”, Cement and Concrete Composites, 25, pp.287~292, 2003.
 - 20) Zongjin Li, Sifeng Liu, “Influence of slag as additive on compressive strength of fly ash-based geopolymer”, Journal of materials in Civil Engineering, 19(6), pp.470~474. 2007.
 - 21) 문영범, 이승현, “알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 내황산성”, 한국세라믹학회지, Vol. 44, No.11, pp.633~638, 2007.
 - 22) 한천구, 손석현, 박경택, “순환잔골재를 사용한 무 시멘트 고로슬래그 모르타르의 배합요인에 따른 품질특성”, 한국건설순환자원학회 논문집, 제5권, 제3호, pp.69~76, 2010.
 - 23) Koh, K.T., Lee, J.H., et. al., “Properties of Cement Zero Concrete”, PICLS 2010, pp.113~122, 2010.
 - 24) Wang S.D. et al., “Alkali-activated cement and concrete, A review of properties and problems”, Advanced Cement Research, 27, pp.93~102, 1995.

플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합 사용한 무시멘트 알칼리 활성화 모르타르의 유동성 및 강도 특성

포틀랜드 시멘트 제조 시 다량의 이산화탄소를 배출함으로써 많은 문제가 발생하고 있다. 그리고 화력발전소 및 제철소의 산업부산물인 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말은 시멘트와 일부 대체하여 콘크리트로 일부 재활용되고 있으나, 42% 정도를 해안 및 육상에 매립함으로써 환경적인 문제를 유발하고 있다. 최근 결합재로 시멘트를 사용하지 않은 알칼리 활성화 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 결합재로 플라이애시 또는 고로슬래그 미분말을 단독으로 사용한 연구는 많으나, 이들 결합재의 혼합사용에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 결합재로서 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 혼합한 알칼리 활성화 콘크리트를 개발할 목적으로 결합재의 혼합비율 및 양생온도가 알칼리 활성화 모르타르의 시공성, 압축강도 등 특성에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 그 결과, 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합비는 시공성 및 강도에 큰 영향을 주지만, 양생온도는 비교적 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 50%씩 혼합하고, 9M NaOH과 쇼돔실리케이트를 1:1의 비율로 제조한 알칼리 활성화제를 사용할 경우에는 20℃의 상온양생에서도 재령 28일에서 압축강도 65 MPa의 알칼리 활성화 모르타르를 제조할 수 있는 것으로 나타났다.