大韓環境工學會誌 · 논문 · pp. 661~666. 2006.

플라이 애쉬-시멘트의 강도특성에 대한 물유리의 영향

박상숙* · 강화영† · 한상호* · 임요섭** · 김동국* · 김세훈***

한영대학 토목환경과 · *순천대학교 토목 · 환경공학부 · **순천대학교 생물환경화학과 · ***전북대학교 환경 · 화학공학부

(2006년 2월 8일 접수, 2006년 6월 26일 채택)

Influence of Water Glass on Strength of Fly Ash-Cements

Sang-Sook Park* · Hwa-Young Kang† · Sang-Ho Han* · Yu-Sup Rim** · Dong-Kuk Kim* · Se-Hoon Kim***

Department of Civil and Environment, Hanyeong Technical College
**Division of Civil and Environmental. Engineering, Sunchon National University*
***Department of Bio-environmental Chemistry, Sunchon National University*
****Division of Environmental and Chemical Engineering, Chonbuk National University*

ABSTRACT : The compressive strength of a paste composed of a low-calcium Class F fly ash and alkaline activator solutions was investigated. These activator solutions, made with sodium hydroxide, water glass and water, have a very high OH^- concentration. The composition of alkaline activator solution and temperature have been shown to notably influence the development of the compressive strength of the fly ash-cements paste. Compressive strength of 50 MPa could be achieved by curing of the fly ash at 60℃ for 48 hrs or 85℃ for 24 hrs. This study presented the optimum mixing ratio of Class F fly ash/sodium hydroxide/water glass as 25 : 8 : 2 in weight basis, and activator/fly ash as 0.6/1.0 for high strength paste.

Key Words : *Alkali Activated Cement, Fly Ash, Compressive Strength, Water Glass*

요약 : 칼슘함량이 낮은 F급 플라이 애쉬와 알칼리 활성화 용액으로 구성된 페이스트의 압축강도 특성에 대한 연구를 수행하였다. 수산화나트륨과 물유리 그리고 물을 혼합하여 제조한 이들 활성화 용액은 매우 높은 OH^- 농도를 가지고 있다. 알칼리 활성화 용액의 조성과 온도는 플라이 애쉬-시멘트 페이스트의 압축강도 발현에 대한 현저한 영향 인자임을 보여주었다. 50 MPa 이상의 압축강도는 플라이 애쉬를 각각 60℃에서 48시간과 85℃에서 24시간 양생하여 얻었다. 본 연구결과, F급 플라이 애쉬/NaOH/물유리의 무게 비율 25 : 8 : 2와 활성화 용액/플라이 애쉬의 무게 비율 0.6/1.0은 높은 강도를 가진 페이스트를 위한 적정 혼합비율로 나타났다.

주제어 : 알칼리 활성 시멘트, 플라이 애쉬, 압축강도, 물유리

1. 서 론

포틀랜트 시멘트의 생산은 많은 양의 자원과 에너지를 소모함과 동시에 산성비와 지구온난화의 원인물질인 CO_2, SO_2 그리고 NO_x를 방출하게 된다. 따라서 산업 부산물을 합성하여 포틀랜트 시멘트를 대신할 수 있는 유용한 결합제를 개발하는 것은 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 이러한 관점에서 국내 석탄화력발전소에서 배출되고 있는 플라이 애쉬를 유용한 자원으로 재활용하기 위한 적극적인 연구 개발이 필요한 실정이다.

현재 국 · 내외 연구를 통해 플라이 애쉬를 콘크리트 혼화재로 사용할 경우 작업성의 개선, 장기강도의 증진, 수화열 감소, 건조수축 감소, 수밀성 증가 등의 효과가 보고되었다.[1] 그러나 이러한 목적으로 사용되는 플라이 애쉬의 대부분은 C급 플라이 애쉬 또는 Ca 함량이 높은 플라이 애쉬로 제한되며, 낮은 Ca 함량의 플라이 애쉬 또는 F급 플라이 애쉬의 사용량은 극히 적다. 좀 더 많은 양의 플라이 애쉬를 유용한 자원으로 재활용하기 위해서는 F급 플라이 애쉬 또는 Ca 함량이 낮은 플라이 애쉬를 포틀랜트시멘트의 사용 없이 시멘트 물질로 전환하는 연구가 매우 중요할 것으로 판단된다.

지금까지 플라이 애쉬-시멘트 콘크리트의 미세구조와 메카니즘에 관한 연구가 많이 수행되었다. 그러나 이들 연구의 대부분은 플라이 애쉬-$Ca(OH)_2$, 플라이 애쉬-시멘트 그리고 플라이 애쉬-석회-석고의 활성화 메카니즘에 관한 것이었으며,[2,3] 플라애 애쉬-시멘트의 알칼리 활성화 반응 메카니즘에 관한 연구는 일부에 국한되었다.

플라이 애쉬에는 상대적으로 많은 함량의 알루미늄과 규소가 함유되어있기 때문에 플라이 애쉬의 활성화는 주로 플라이 애쉬에 함유된 유리상의 Si-O-Si와 Al-O-Al의 공유 결합을 파괴하는 것에 의해 좌우 된다.[4,5] 따라서 플라이 애쉬에 함유된 알루미늄과 규소를 용해하여 활성화 반응을 촉진하기

† Corresponding author
E-mail: khy9792@hanmail.net
Tel: 061-650-4038 Fax: 061-650-4020

위해서는 충분히 높은 알카리성(OH)농도가 필요한데, Fraay[6]는 이들 활성화 반응을 위해서는 pH가 13.3 이상이 되어야 한다고 하였다. 이러한 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응에 사용되는 알칼리성 약품으로는 수산화나트륨, 수산화칼륨, 탄산나트륨 그리고 규산나트륨 등이 있으며, 알칼리 활성화 반응은 플라이 애쉬의 물리-화학적 특성과 활성화제의 종류 그리고 양생온도에 의해 크게 좌우되는 것으로 알려졌다. Zhaohui Xie and Yunping Xi[7]는 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응에 관한 연구에서 양생 온도 55℃를 기점으로 그 이하의 온도에서는 시멘트 페이스트와 콘크리트의 강도가 매우 낮았으며, 그 이상의 온도에서도 더 이상의 뚜렷한 강도 증진은 관찰할 수 없었다고 하였다. 이러한 결과를 근거로 플라이 애쉬-시멘트 페이스트의 강도 발현을 위한 알칼리 활성화 반응의 최적 양생온도는 55℃이며, 이 온도에서 최적 양생 시간은 12 시간 이라고 하였다.

본 연구에서는 현재 재활용 비율이 상대적으로 낮은 F급 플라이 애쉬를 포틀랜트시멘트의 사용 없이 시멘트 물질로 전환할 수 있는 적정 알칼리 활성화 용액의 조성과 양생 조건을 제시하는데 목적이 있다. 그리고 이러한 목적을 달성하기 위하여 수산화나트륨과 물유리 그리고 물로 혼합된 알칼리 활성 용액으로 F급 플라이 애쉬를 활성화하여 시험체를 제작한 후 압축강도와 미세조직구조를 관찰하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 플라이 애쉬는 H 석탄화력발전소에서 배출된 것으로, 이것은 ASTM C 618 규정에 따라 F급 플라이 애쉬로 분류되었으며, 플라이 애쉬의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 알칼리 활성화 용액은 공업용 수산화나트륨과 물유리 그리고 물을 혼합하여 제조하였으며 Table 2는 본 연구에 사용된 물유리의 조성을 보여주고 있다. 플라이 애쉬의 알칼리 활성반응을 위한 활성화제의 조성, 즉 물유리와 수산화나트륨 그리고 물의 혼합 비율(wt %)은 Table 3에서 보여주고 있다.

Table 1. Chemical Composition of Fly ash(wt%)

Element	Content(%)	Element	Content(%)
SiO_2	49.58	K_2O	0.88
Al_2O_3	31.90	TiO_2	1.73
Fe_2O_3	5.93	P_2O_5	0.79
CaO	2.98	MnO	0.05
MgO	0.95	Ig. loss	4.30
Na_2O	0.42		

Table 2. Specification of Water Glass

Na_2O(%)	SiO_2(%)	SiO_2/Na_2O	Specific gravity
13.5	30.5	2.26	≥ 1.498

Table 3. Mix Design for the Manufacture of Specimens from Alkali Ash Material

Paste		Activator(g)			Activator /Fly ash (wt %)	Curing temp.(℃)	Curing time
		Water glass	NaOH	Water			
I	a	520	80	0	0.6/1.0	60, 85	4, 6, 12, 24, 48 h
	b	420	80	100			
	c	320	80	200			
	d	220	80	300			
II	a	320	40	200	0.56/1.0	85	4, 6, 12, 24, 48 h
III	a	520	80	0	0.6/1.0	Paste cured in water bath and air at room temperature until testing	3, 7, 28, 90 day
	b	420	80	100			
	c	320	80	200			
	d	220	80	300			

2.2. 시험체 제조

Paste I은 서로 다른 혼합비율로 조성된 알칼리 활성화 용액과 플라이 애쉬를 0.6 : 1.0의 비율로 혼합한 후, 혼합물을 50 × 50 × 50 mm 몰드에 부은 다음 밀봉하여 60℃와 85℃ 오븐에서 각각 4 hrs, 6 hrs, 12 hrs, 24 hrs, 그리고 48 hrs 동안 양생 한 후 탈형하여 시험체의 압축강도를 측정하였다. Paste II는 Paste I-c의 활성화 용액 조성에서 수산화나트륨 첨가량을 40 g으로 줄인 활성화 용액을 플라이 애쉬와 혼합한 후 85℃에서 4 hrs, 6 hrs, 12 hrs, 24 hrs 그리고 48 hrs 동안 양생하여 시험체를 제작하였다. Paste III는 85℃ 오븐에서 24 hrs 동안 양생하여 제조한 Paste I을 탈형한 후 상온에서 각각 압축강도 측정일 까지(3, 7, 28, 90일) 수중 및 기건양생하여 시험체를 제작하였다.

2.3. 분석방법

플라이 애쉬-시멘트 시험체의 압축강도 시험은 KS L 5105에 준하여 실시하였으며, 시험에 사용된 시험체는 측정시마다 3개의 시편을 제작하여 100 ton 용량의 일축압축시험기를 사용하여 매초 약 2.04 kgf/cm^{2}의 속도로 압축강도를 측정한 후, 평균하여 압축강도를 산출하였다. 플라이 애쉬-시멘트 시험체의 미세구조와 광물조성을 관찰하기 위하여 SEM-EDX 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강도 특성에 대한 활성화 용액의 영향

우리는 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응에 관한 이전의 연구[8]에서 적정 활성화 조건으로 5 M 또는 6 M의 수산화나트륨 용액(liquid)을 플라이 애쉬와 0.4/1.0(liquid/fly ash, wt%)의 비율로 혼합하여 시험체를 제작하는 것이 압축강도 발현을 위해 적합함을 알 수 있었다. 즉 알칼리 활성화 용액으로 5 M의 수산화나트륨 용액을 이용할 경우 1,000 g의 플라이 애쉬를 활성화하기 위해서는 80 g의 수산화나트륨이 요구된

다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 일차적으로 이러한 혼합 조건하에서 물유리의 첨가가 플라이 애쉬-시멘트 페이스트의 압축강도 발현에 어떠한 영향을 미치는 지를 확인하고, 또한 높은 강도를 발현할 수 있는 적정 알칼리 활성화 용액의 조성을 제시하고자 한다. 그리고 이러한 목적을 위해서 물유리의 첨가량을 변화시켜가며 조성한 활성화제와 F급 플라이 애쉬를 0.6 : 1.0(wt %)으로 혼합하여 각각 60℃와 85℃에서 4 hrs, 6 hrs, 12 hrs, 24 hrs 및 48 hrs 동안 양생하여 시험체를 제작한 후 압축강도 변화를 관찰하였다.

플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응을 위해서는 상대적으로 높은 온도가 요구된다는 이전의 연구[8]와 다른 연구자들의 연구 결과[7,9]를 참조하여 양생 온도를 60℃와 85℃로 결정하였다. 그리고 activator/fly ash = 0.6/1.0(wt %)의 혼합 비율은 본 실험에 앞서 수행한 예비실험을 통해 플라이 애쉬에 대한 활성화제의 첨가 비율이 0.6(wt %) 미만으로 혼합될 경우 페이스트의 작업성이 떨어져 시험체 제작이 어려우며 압축강도도 저하되는 결과를 근거로 결정하였다. 또한 활성화제의 첨가 비율이 0.6(wt %) 이상일 경우도 압축강도가 저하됨을 예비실험을 통해 알 수 있었다.

Fig. 1은 위와 같은 실험조건에서 제조한 플라이 애쉬-시멘트 페이스트의 압축강도를 보여주고 있는 것으로, 먼저 압축강도 발현의 관점에서 볼 때 활성화 용액은 I-d를 제외한 I-a, b, c 모두 비슷한 강도를 발현하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 플라이 애쉬의 활성화를 위해서는 활성화 용액 조성이 무엇보다 중요하다는 것을 말해주는 것으로 1,000 g의 플라이 애쉬를 활성화하여 높은 압축강도를 가진 시험체를 제작하기 위해서는 최소 320 g의 물유리가 필요하며, 가능한 한 적은 양의 물유리를 첨가하여 높은 압축강도를 발현한다는 관점에서 볼 때 알칼리 활성화 용액의 조성은 I-c가 가장 적합할 것으로 판단된다.

그리고 이전의 연구[8]에서 5 M 또는 6 M의 NaOH 용액만을 이용하여 플라이 애쉬를 50℃에서 7일간 알칼리 활성화하여 제조한 시험체의 압축강도가 15 MPa와 18 MPa를 나타낸 것과 비교할 때, 본 연구에서 물유리를 함유한 알칼리

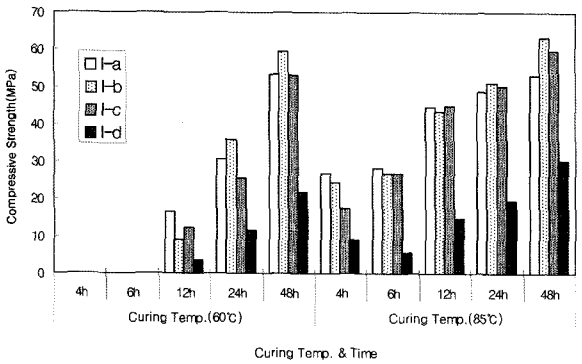


Fig. 1. Compressive strength of fly ash-cement Paste I made with a activator/fly ash ratio of 0.6 at 60℃ and 85℃ for 4 hrs, 6 hrs, 12 hrs, 24 hrs and 48 hrs, respectively.

활성화 용액(I-c)으로 60℃에서 48 hrs 및 85℃에서 12 hrs, 24 hrs 그리고 48 hrs 활성화하여 제조한 시험체의 압축강도는 각각 53 MPa 및 45 MPa, 50 MPa 그리고 60 MPa로 현저히 증가하였음을 알 수 있다. 따라서 플라이 애쉬를 알칼리 활성화하여 높은 압축강도를 발현하기 위해서는 적정량의 물유리가 첨가된 활성화 용액이 반응성 증진에 필수적인 요소임을 알 수 있다.

압축강도 발현에 대한 양생 온도의 영향을 볼 때, 60℃보다는 85℃에서 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응이 활발히 진행되었음을 알 수 있었는데, 60℃에서 양생할 경우에는 48 hrs에서 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응이 충분히 이루어져 압축강도가 급격히 증가한 반면, 85℃에서는 12 hrs에서 충분한 활성화 반응이 일어나 높은 압축강도를 발현하였으며, 양생 시간을 24 hrs와 48 hrs로 증가시킴에 따라 현저한 압축강도 증가는 없이 강도가 서서히 증가하고 있음을 보여주고 있다. 또한 60℃에서 4 hrs 및 6 hrs 양생된 시험체는 충분한 결합이 이루어지지 않아 압축강도를 측정할 수가 없었으며, 60℃에서 48 hrs 양생한 시험체의 압축강도와 85℃에서 24 hrs 양생한 시험체의 압축강도가 비슷한 강도를 보여주고 있는 것을 볼 때, 높은 양생 온도는 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응을 촉진하여 플라이 애쉬-시멘트 페이스트의 빠른 경화 속도를 유발하므로 양생 시간을 그만큼 단축할 수 있음을 알 수 있었다.

물유리와 수산화나트륨 그리고 물로 구성된 알칼리 활성화 용액과 F급 플라이 애쉬를 혼합하여 제조한 시험체의 높은 압축강도 발현에 대한 경화메카니즘은 다음과 같이 설명할 수 있다. 즉 Table 1에서 볼 수 있듯이 본 연구에 사용된 플라이 애쉬는 높은 비율의 산성 산화물($Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 87.41\%$)을 함유하고 있어 알칼리 활성화 용액과 높은 반응 잠재력을 가지고 있음을 예측할 수 있다. 따라서 알칼리 활성화 용액에 함유된 높은 농도의 알칼리성 이온(OH^-)은 플라이 애쉬 표면을 침식하여 플라이 애쉬에 함유된 유리상의 Si-O-Si와 Al-O-Al의 공유 결합을 파괴하고,[4,5] 이 과정에서 반응 생성물로 무정형의 aluminosilicate 겔을 생성하게 된다.[7,10] 그리고 이들 겔 형태의 aluminosilicate는 알칼리 활성화 용액에 함유된 용해성 실리케이트 성분과 함께 플라이 애쉬의 입자를 강하게 결합하고 응축하여 최종 반응생성물로서 치밀한 조직구조를 가진 경화체를 만들어 높은 압축강도를 유발하게 된다.

Fig. 2는 Fig. 1의 실험에서 제시한 적정 알칼리 활성와 용액 조성의 조건에서 제조한 시험체(Paste I-c)와 Paste I-c의 용액 조성에서 수산화나트륨 첨가량을 40 g으로 줄인 활성화 용액으로 재조한 시험체(Paste II-a)의 압축강도 실험 결과를 보여주고 있다. 실험결과 Paste II-a는 Paste I-c와 비교하여 상당한 압축강도의 감소가 나타났으며, 이러한 결과는 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응을 위해서는 충분히 높은 알칼리 농도가 매우 중요하다는 것을 다시 한 번 입증해 주고 있다. 그러나 비록 Paste II-a가 Paste I-c 보다는 낮은 압축강도를 나타냈지만 85℃에서 24 hrs와 48 hrs 양생하여 제조한 Paste II-a의 경우 각각 34 MPa와 40 MPa의 비교

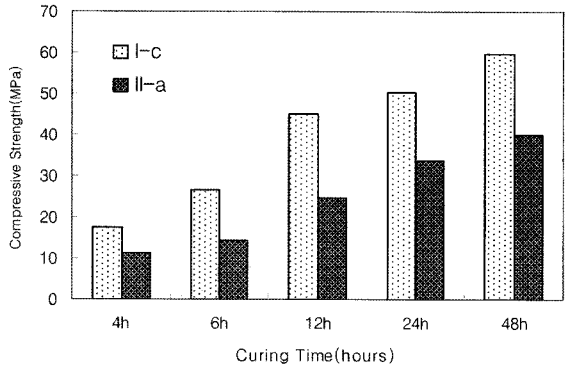


Fig. 2. Compressive strength of fly ash-cement made with a activator/fly ash ratio of 0.6(Paste I-c) and 0.56(Paste II-a) at 85℃ for 4-48 hrs, respectively.

적 높은 압축강도를 발현하고 있어 이 같은 조건에서도 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응이 상당히 이루어 졌음을 알 수 있다.

3.2. 강도 특성에 대한 양생조건의 영향

Activator/fly ash를 0.6/1.0의 비율로 혼합한 후 85℃ 건조기에서 24 hrs 양생하여 제조한 시험체(Paste I)의 압축강도 발현에 대한 수중양생과 기건양생의 영향을 관찰하기 위하여 Paste I을 상온에서 각각 3일, 7일, 28일, 90일 동안 수중양생 및 기건양생 하였으며, Fig. 3은 이렇게 양생한 시험체(Paste III)의 압축강도 측정 결과를 보여주고 있다.

실험결과 플라이 애쉬를 85℃ 건조기에서 24 hrs 알칼리 활성화하여 제조한 Paste I(contrast)을 상온에서 3일, 7일 그리고 28일 동안 수중양생 한 시험체의 경우 Paste I과 비교하여 오히려 압축강도가 감소하는 결과를 나타냈으며, 90일 동안 수중양생 한 시험체의 경우 Paste I과 비교하여 약간의 압축강도 증가를 보여주었다. 이러한 결과는 플라이 애쉬 단독으로는 수경성을 가지고 있지 않기 때문에 플라이 애쉬를 알칼리 활성화하여 제조한 시험체의 수중 양생은 강도 발현에 별다른 영향을 주지 않는 것으로 판단되며, 3일, 7일, 28일 동안 수중양생 한 시험체에서 오히려 약간의 압축강도 감

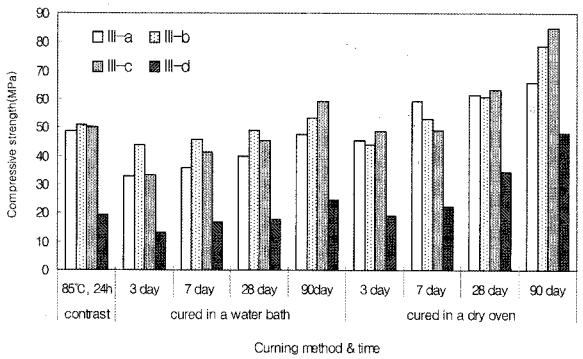


Fig. 3. Compressive strength of Paste III cured in a water bath and drying oven, respectively, at room temperature until testing for Paste I made with a activator/fly ash ratio of 0.6 at 85℃ for 24 hrs.

소 현상이 나타났는데 이러한 결과는 시험체에 함유된 알칼리 활성화 물질 중 반응이 완전히 완결되지 않은 미반응의 활성화 물질이 수중에서 용출되므로서 강도 저하의 원인이 된 것으로 판단된다.

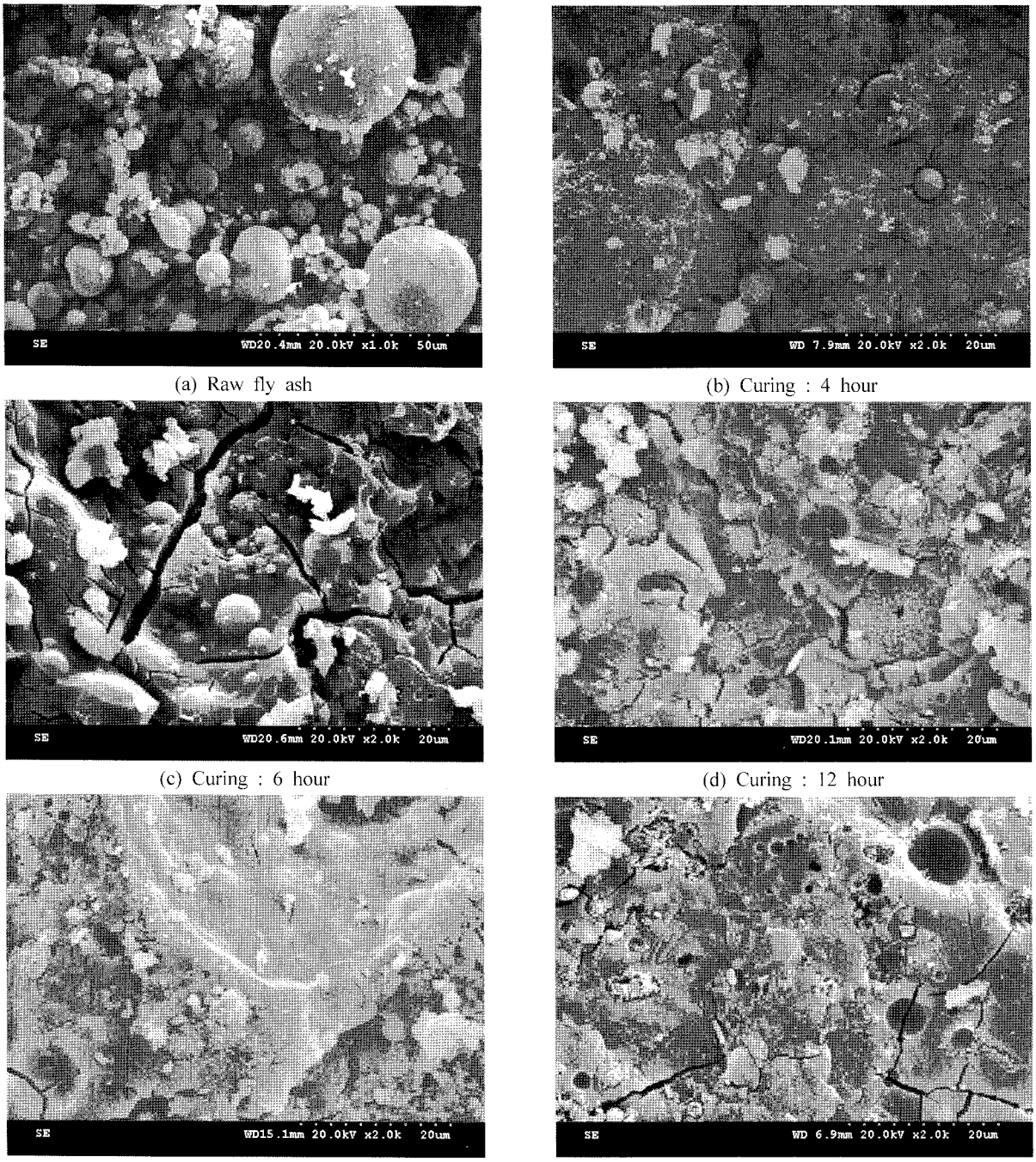
Paste I을 상온의 공기중에서 3일, 7일, 28일, 90일 동안 기건양생 한 시험체(Paste III)의 압축강도 측정결과 공기중에서 7일, 28일, 90일 동안 양생한 시험체(Paste III)는 Paste I과 비교하여 지속적으로 압축강도가 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 F급 플라이 애쉬의 광물학적 조성을 이용하여 다음과 같이 설명할 수 있을 것이다. 즉 F급 플라이 애쉬는 주로 유리화된 aluminosilicate 물질과 함께 적은 양의 결정성 물질(quartz와 mullite 등)로 구성되었는데, 이들 구성분은 4면체의 실리케이트가 산소와 다리 결합되어 중합도가 높기 때문에 상온에서 화학적인 반응성이 매우 낮아 서서히 반응하게 된다.[11] 따라서 85℃의 높은 온도에서 알칼리 활성화하여 제조한 시험체(Paste I)를 상온에서 지속적으로 기건 양생할 경우 비록 반응속도는 느리지만 플라이 애쉬의 활성화 반응이 지속적으로 진행되며, 이러한 반응의 결과 양생시간이 증가할 수 록 압축강도도 증가한 것으로 판단된다.

3.3. 시험체의 SEM/EDX 분석

알칼리 활성화 용액(I-c)과 플라이 애쉬를 혼합하여 85℃에서 4 hrs, 6 hrs, 12 hrs, 24 hrs, 그리고 48 hrs 동안 양생하여 제조한 시험체(Paste I)의 미세구조 관찰을 위한 SEM 사진을 Fig. 4에서 보여주고 있다. Fig. 4(a)의 미반응 플라이 애쉬는 대부분 둥글고 매끄러운 표면을 가지고 있음을 볼 수 있으며, 미반응 플라이 애쉬의 EDX 분석은 Si/Al = 1.67 그리고 Al/Na = 77.46의 비율로 함유되어 있음을 보여주었다.

이들 플라이 애쉬를 알칼리 활성화 용액으로 활성화하여 제조한 시험체의 SEM 사진, 즉 Fig. 4(b)-(f)는 알칼리 활성화 용액에 의해 플라이 애쉬로부터 생성된 반응 생성물과 물유리가 혼합된 겔 형태의 혼합물이 플라이 애쉬와 결합하여 하나의 모체(matrix)를 형성하고 있음을 보여주고 있다. 그리고 우리는 이전의 연구[8]에서 이러한 겔 형태의 반응생성물을 무정형 상태이거나 또는 XRD 페턴으로는 분명한 피크가 나타나지 않는 저급(low-ordered) 결정 구조를 가진 비용해성 aluminosilicate 입자로 구성된 물질로 판단하였으며, 이러한 결과는 다른 연구자들의 연구결과와도 일치하였다.[7,10,12]

알칼리 활성화 용액과 플라이 애쉬를 4 hrs 양생하여 제조한 시험체, 즉 Fig. 4(b)의 경우 알칼리 활성화 반응이 충분히 진행되지 못하여 시험체 내부에 구형의 미반응 플라이 애쉬 입자가 존재하고 있음을 볼 수 있다. 6 hrs 양생하여 제조한 시험체인 Fig. 4(c)는 Fig. 4(b) 보다는 활성화 반응이 더욱 진행되어 더 많은 반응생성물과 플라이 애쉬가 혼합된 겔 형태의 모체를 보여주고 있지만 여전히 미반응 플라이 애쉬가 반응 생성물로 덮여 있음을 볼 수 있다. Fig. 1에서 보여준 압축강도 실험을 통해서 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응이 충분히 이루어 진 것으로 판단되는 12 hrs, 24 hrs



(a) Raw fly ash (b) Curing : 4 hour

(c) Curing : 6 hour (d) Curing : 12 hour

(e) Curing : 24 hour (f) Curing : 48 hour

Fig. 4. Scanning electron micrographs(x 2,000 magnification) of raw fly ash(a) and fly ash-cement Paste I made with a activator(I-c)/fly ash ratio of 0.6 at 85℃ for 4-48 hrs(b-f).

그리고 48 hrs 양생하여 제조한 시험체의 미세구조를 관찰한 SEM 사진, Fig. 4(d), (e), (f)는 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응이 촉진되어 플라이 애쉬의 반응생성물과 용해성 실리카 겔에 의해 시멘트와 같은 치밀한 조직 구조를 가진 연속적인 모체가 형성되었음을 볼 수 있다. 그리고 이들 반응 생성물의 평균 원소 비율은 Si/Al = 2.15 그리고 Al/Na = 2.51의 비율로 함유되어 있어 미반응 플라이 애쉬와 비교하여 Na의 함량이 상당히 증가하였음을 알 수 있었다.

4. 결 론

1) F급 플라이 애쉬를 알칼리 활성화하여 제조한 시험체의 높은 압축강도 발현을 위해서는 적정 알칼리 활성와 용액의 조성(물유리 : NaOH : 물 = 4.0 : 1.0 : 2.5, wt%)과 활성화 용액/플라이 애쉬(0.6/1.0, wt%)의 혼합 비율이 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다.

2) F급 플라이 애쉬의 알칼리 활성화 반응은 높은 양생

온도에서 더욱 촉진됨을 알 수 있었는데, 85℃에서 양생된 시험체는 12시간에서 충분히 높은 압축강도를 발현한 반면 60℃에서 양생된 시험체는 48시간이 필요하였다. 또한 양생시간이 24시간 이하일 경우, 85℃에서 양생된 시험체는 60℃에서 양생된 시험체 보다 매우 높은 압축강도를 보여주었다.

3) 알칼리성 이온은 플라이 애쉬 표면을 침식하여 플라이 애쉬에 함유된 유리상을 파괴하여 반응 생성물로 Na이 함유된 무정형의 aluminosilicate 물질을 형성하고, 이들 물질은 물유리와 함께 플라이 애쉬의 입자를 강하게 결합하고 응축하여 최종 반응생성물로서 치밀한 조직구조를 가진 경화체를 만들어 높은 압축강도를 유발하게 된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(No. R01-2004-000-10480-0)지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Cochrane, J. W. and Boyd, T. J., "Benification of Fly Ash by Carbon Burnout," *In Proc. 10th Ash Use Symp., Jan.*(1993).
2. Wang, P., Chem, Z., and Scholz, H., "Characteristics of morphology of the interface between cement paste and fly ash," *J. Chin Ceram Soc.*, **25**(4), 475～749(1997).
3. Ma, W., Liu, C., Brown, P. W., and Komameni, S., "Pore structures of fly ashes activated by $Ca(OH)_2$ and $CaSO_4 \cdot 2H_2O$," *Cem Concr Res.*, **25**, 417～425(1995).
4. Li, D., Chen, Y., Shen, J., Su, J. and Wu, X. "The influence of alkalinity on activation and microstructure of fly ash," *Cem Concr Res.*, **30**, 881～886(2000).
5. Palomo, A., Grutzeck, M. W., and Blanco, M. T., "Alkali-activated fly ashes-A Cement for the furture," *Cement and Concrete Research*, **29**, 1323～1329(1999).
6. Fruuy, A. L. A. and Bejen, J. M., *Cem Concr Res.*, **19**, 235～246(1989).
7. Zhaohui, X. and Yunping, X., "Hardening mechanism of an alkaline-activated class F fly ash," *Cem Concr Res.*, **31**, 1245～1249(2001).
8. 박상숙, 강화영, 한상호, 강희복, "F급 플라이 애쉬-모르타르의 강도발현에 대한 NaOH과 $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ 첨가의 영향," 한국구조물진단학회지, **9**(4), 261～269(2005).
9. Katz, A., "Microscopic Study of Alkali Activated Fly Ash," *Cem and Concr Res.*, **28**, 197～208(1998).
10. Puertas, F. and Fernández-Jiménez, A., "Mineralogical and Microstructural Characterisation of Alkali-activated Fly Ash/Slag Pastes," *Cement & Concrete Composites*, **25**, 287～292(2003).
11. Kejin W., Surendra, P. S., and Alexander, M., "Effects of Curing Temperature and NaOH Addition on Hydration and Strength Development of Clinker-free CKD-Fly Ash Binders," *Cement and Concrete Research*, **34**, 299～309(2004).
12. Van Jaarsveld, J. G. S. and Van Deventer, J. S. J., "The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilize Toxic Metals: Part I. Theory and Applications," *Miner. Eng.*, **10**, 659～669(1997).