

알칼리 활성화법에 의한 Bottom Ash의 경화 특성에 관한 실험적 연구

The Experimental Study on Hardening Characteristics of Bottom ash by Alkali Activation

오 동 옥*
Oh, Dong-Uk

김 백 중**
Kim, Baek-Joong

이 종 구***
Yi, Chong-Ku

강 경 인***
Kang, Kyung-In

Abstract

Because the physical · chemical properties of bottom ash are inferior, most bottom ash is disused. But the use of bottom ash helps in reducing environmental pollution and solving some bottom ash waste problems. So, we have been investigating about the optimum mixture, hardening mechanism, curing condition and environmental safety of a paste composed of a bottom ash and alkali. optimal mixing proportion of bottom ash solid was cement 5%, water 30%, NaOH 10%. After curing during 28days, bottom ash solid can be achieved compressive strength 15,13MPa. As a result, Compressive strength tests of alkali-activated bottom ash have potential as a replacement of coarse aggregate.

키 워 드 : 알칼리 활성화법, 바텀애시, 경화특성
Keywords : Alkali Activation, Bottom Ash, Hardening Characteristics

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

국내의 화력발전소에서 발생하는 석탄회는 2000년에 약 450만톤이 발생하였으며, 2010년에는 약 600만톤이 발생될 것으로 예상된다.¹⁾ 세계적으로 30년 이상 이어져온 석탄회의 재활용 기술 관련 연구를 기반으로 Fly ash는 각종 산업분야에 활용되어 재활용률이 60% 이상 되고 있다.²⁾ 하지만, 이러한 Fly ash의 재활용률 증가에도 불구하고 석탄회의 10~25% 정도를 차지하고 있는 Bottom ash는 재활용 기술의 미약함으로 인해 국내의 경우 대부분 인근연안에 매립, 폐기되고 있다. 이는 해양환경 파괴를 초래함과 동시에 매립지의 포화상태를 가져왔으며, 새로운 매립지에 대한 요구에도 불구하고 경제성 및 환경파괴 등의 이유로 매립지 확보가 곤란한 실정이다.³⁾

일반적으로 석탄회는 Al₂O₃, SiO₂ 등과 같은 반응성 산화물을 다량 함유하고 있어 알칼리 활성화제와의 반응을 통해 경화체의 강도를 높일 수 있는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 이러한 특성을 토대로 Fly ash의 경화체 강도를 증가시켜 경량골재 혹은 조골재화하여 건설재료로 사용하고자 하는 연구가 활발히 진행중이다. 하지만, Bottom ash는 물리·화학적 열악성을 이유

로 현재 잔골재의 대체재로 사용하는 수준에 머물러 있고, Fly ash와 같은 경화체로서의 직접적인 활용에 대한 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 국내 화력발전소에서 발생하는 Bottom ash를 알칼리 활성화법을 활용하여 경량골재화 하기 위한 연구의 일환으로 알칼리 활성화법의 적용을 위한 적정배합비 산정과 경화체의 강도특성을 분석하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험재료

2.1.1 Bottom ash

- 1) 차동원 외, 한전의 석탄회 및 탈황석고 재활용 현황, 고성능 콘크리트 국제 워크숍 논문집, pp.245-270, 1999.10
- 2) Sadayuki Shinozaki, 일본의 石炭灰 再活用 現況, International Workshop on utilization of Fly Ash, pp.19, 1996
- 3) 송민섭 외, 바텀애시를 사용한 모르타의 특성에 대한 실험적 연구, 한국건축시공학회 학술.기술논문발표회 논문집, v.3 n.1(통권 제4집), pp.61-66, 2003.10
- 4) 조병완 외, 알칼리 활성화에 의한 Fly ash와 Bottom ash의 경화특성, 대한토목학회논문집, 25권 2A호, pp.289-294, 2005.3

* 정희원, 고려대학교 건축공학과 석사 과정
** 정희원, 고려대학교 건축공학과 박사 과정
*** 정희원, 고려대학교 건축공학과 교수

표 1. Bottom ash의 화학조성 (unit : %)

	Specific Gravity	CO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Bottom ash	2.46	24.4	0.12	0.58	25.1	41.6	0.36	3.35	0.93	0.76	0.08	2.51

실험에 사용된 Bottom ash는 동해 화력 발전처의 소각로에서 발생된 것을 사용하였으며, 그 화학조성은 표 1과 같다. 표 1에 나타난 것과 같이 Bottom ash는 화학조성 중 반응성 산화물인 Al₂O₃(25.1%), SiO₂(41.6%)를 다량 포함하고 있는 일반적인 저칼슘 석탄회 형태를 나타내고 있다.

또한, Bottom ash의 입도분포는 그림 1과 같으며, 외관은 사진 1과 같다. 실험에 사용된 Bottom ash는 콘크리트용 잔골재의 표준입도 범위에 속하는 것으로 나타났다. 하지만, 본 실험에서는 알칼리 활성법에 의해 Bottom ash를 경량골재화하는 것을 목적으로 하고 있으므로 반응성의 향상을 위해 사진 2와 같이 입경 300 μ m 이하로 Bottom ash를 분쇄하여 사용하였다.

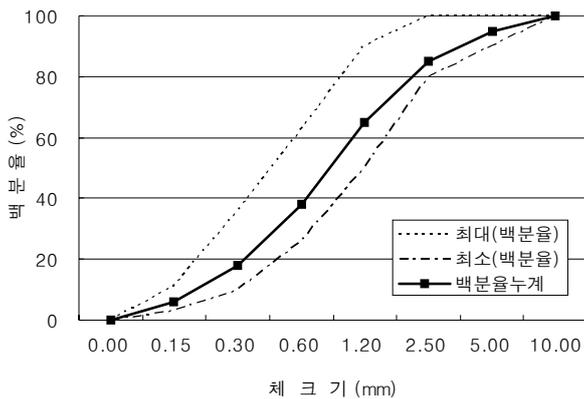


그림 1. Bottom ash의 입도곡선

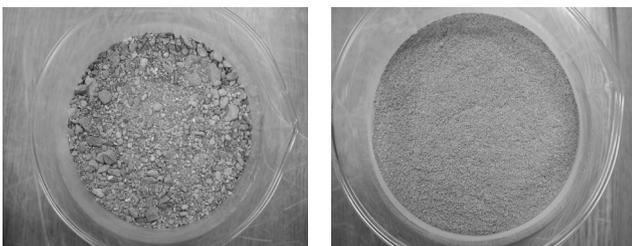


사진 1. 분쇄 전 Bottom ash

사진 2. 분쇄 후 Bottom ash

2.1.2 알칼리 활성제

Bottom ash에 포함된 반응성 산화물이 잠재수경성을 발현하기 위해서는 반응을 유발시켜줄 알칼리 활성제가 요구된다. 본 연구에서는 알칼리 계통의 NaOH와 KOH를 이용하였으며, 그 특성은 다음 표 2와 같다.

표 2. 알칼리 활성제의 특성

알칼리 활성제	단위중량(per mol)	순도(%)
NaOH	40.00	93.0
KOH	56.11	85.0

조기 강도 증진을 목적으로 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정에 적합한 국내 G사의 보통 포틀랜드 시멘트로서 비중 3.15, 분말도 3400cm³/g인 제품을 사용하였다. 시멘트의 물리적 성질과 화학조성은 표 3과 표4와 같다.

표 3. 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (cm ³ /g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,400	0.1	230	410	23	31	40

표 4. 시멘트의 화학조성

SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	lg-loss (%)
21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	2.58

2.2 실험방법

알칼리 활성화법을 활용한 Bottom ash의 경량골재화를 위한 적정배합비의 산정을 위한 실험의 배합은 물-석탄회비를 0.25, 0.30, 0.35로 선정하였고, 알칼리 활성제로 사용되어진 NaOH는 Bottom ash를 기준으로 혼입비율을 5%, 10% 15%, 20%로 결정하였다. NaOH의 순도를 고려하여 실제 배합시 사용되는 NaOH량은 식(1)을 통해 환산하여 산정하였다.

$$\text{NaOH량(g)} = \text{Bottom ash량(g)} \times \text{혼입비율} \times \frac{100(\%)}{\text{NaOH의 순도}(\%)} \dots \text{식(1)}$$

KOH량은 NaOH를 혼입한 실험과의 비교를 위하여 배합시 두 알칼리 활성제의 몰(mole)량을 동일하게 유지하기 위해 다음 식 (2)를 통해 NaOH의 몰량을 산정한 후 식(3)을 통해 동일 몰(mole)량의 KOH량을 산정하였다.

$$\text{NaOH의 몰량} = \text{NaOH량(g)} \times \frac{\text{NaOH 순도}(\%)}{100(\%)} \times \frac{1}{\text{NaOH 1몰 질량(g)}} \dots \text{식(2)}$$

KOH량(g)=

$$\text{NaOH 몰량} \times \text{KOH 1몰 질량} \times \frac{100(\%)}{\text{KOH의 순도}(\%)} \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

시험체의 조기강도 증진을 위해 시멘트를 사용한 경우 그 함량이 증가할수록 압축강도가 증진될 것으로 사료되나 본 연구는 시멘트에 의한 경화를 측정하는 것이 아니므로 시멘트의 비율을 Bottom ash의 5%로 제한하였다.

혼합물을 KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험방법에 따라 플로우 시험을 하였으며, 모르타르의 압축강도 시험방법에 따라 다짐하여 성형 후 24시간 양생 뒤 탈형하여 7일간 80℃에서 증기양생을 실시하였다. 이후 20일간 20℃에서 기건양생을 실시하여 재령 28일의 압축강도를 각 배합에 따라 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 알칼리 활성화법 적용을 위한 배합범위의 결정

본 실험은 Bottom ash의 중량을 고정하고 물-석탄회비 및 알칼리 활성화제의 양을 변화시켜 진행되었으며, 실험과정에서 이 두 변수의 범위는 다음과 같은 이유로 각각 한정되었다.

알칼리 활성화제인 NaOH와 KOH 혼입한 용액의 제조시 물과

알칼리 활성화제와의 반응은 발열반응이다. 반응 이후 용액의 온도가 낮아지면서 NaOH 혼입비율 20%의 용액은 포화상태에 이르렀고, 동일한 물수의 KOH 혼입한 용액 역시 포화상태에 이르러 두 용액 모두 용질이 석출되었다. 따라서, 물-석탄회비 0.35미만의 배합에서는 NaOH의 사용량을 석탄회 대비 최대 20%미만으로 결정해야 될 것으로 사료된다.

또한, 물-석탄회비 0.25의 모든 시험체는 배합에 사용된 용액의 양이 부족함에 기인하여 플로우 시험 결과 적정 플로우를 값을 만족하지 못하였다. 이 결과와 표 5의 재령 28일의 시험체의 압축강도 결과를 동시에 고려할 경우 물-석탄회비는 0.25 초과~0.40 미만의 범위에서 결정해야 할 것으로 사료된다.

3.2 강도특성 및 경화체의 특성

알칼리 활성화법을 활용하여 경화시킨 시험체의 재령 28일의 압축강도 실험결과는 표 5와 같다. 시험체는 배합별 3개씩 제작하였으며, 탈형 및 양생과정에서 손상이 없는 시험체로 배합별 2개씩 선정하여 KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험방법에 따라 압축강도를 측정하였다. Na-A-30 계열과 Na-A-35계열의 Ⅲ 시험체는 시험체 제작 24시간 후 탈형시 시험체가 겔(gel)상태를 유지하고 있어 탈형이 불가능하여 압축강도 측정이 불가능하였다.

알칼리 활성화제로 NaOH를 혼입한 시험체 중 시멘트를 혼입하지 않은 계열의 시험체는 전체적으로 5MPa 이하의 낮은 압

표 5. 시험체 배합 및 시험체별 압축강도(재령 28일)

Mixtures		Bottom Ash(g)	Cement(g)	Water(g)	Accelerator(g)	Compressive Strength(MPa)	
Na-A-30 계열	I	100	0	30	NaOH	5.38	
	II					10.75	
	III					16.13	
Na-A-35 계열	I					5.38	
	II					10.75	
	III					16.13	
Na-B-30 계열	I		5	30		NaOH	5.38
	II						10.75
	III						16.13
Na-B-35 계열	I						5.38
	II						10.75
	III						16.13
K-A-30 계열	I	100	0	30	KOH		8.25
	II						16.50
	III						24.75
K-A-35 계열	I						8.25
	II						16.50
	III						24.75
K-B-30 계열	I		5	30		KOH	8.25
	II						16.50
	III						24.75
K-B-35 계열	I						8.25
	II						16.50
	III						24.75

Na — A — 30 계열
 └─ 물-석탄회비
 └─ 시멘트 사용유무 (A : 사용하지 않음, B : 사용)
 └─ 알칼리 활성화제의 종류(Na : NaOH, K : KOH)

축강도를 가졌으며, NaOH의 혼입률이 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 경향을 가진다. 그러나, 조기강도 증진을 위해 시멘트를 Bottom ash 대비 5% 혼입한 Na-B-30과 Na-B-35 계열의 I, II 시험체들은 압축강도가 9.2~15.13MPa로 상대적으로 높은값을 보였으며, NaOH의 혼입률이 증가할수록 압축강도가 증가하였다. 시멘트를 혼입하지 않은 Na-A-30과 Na-A-35 계열의 시험체에서는 알칼리 활성화가 제대로 발현되지 않아 낮은 압축강도 보였으며, 대조적으로 Na-B-30과 Na-B-35 계열의 시험체는 알칼리 활성화 발현에 기인하여 반응에 참여한 알칼리 활성제량의 증가에 따라 시험체의 압축강도의 증가가 유발된 것으로 사료된다. 단, Na-B-30과 Na-B-35 두 계열의 III 시험체의 경우 과도하게 첨가되어진 알칼리 활성제가 시험체 속에 남게되어 강도 저하를 가져온 것으로 사료 되므로 향후 시험체의 성분분석 및 미시구조 분석 등을 통한 반응 매커니즘 분석이 필요할 것으로 사료된다.

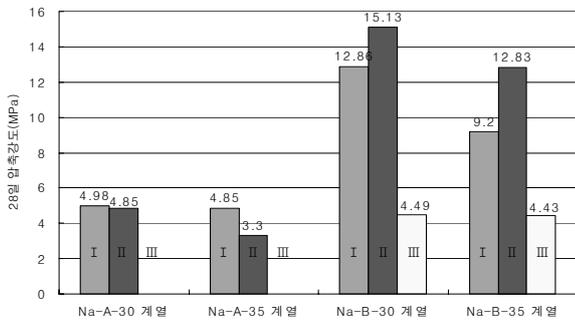


그림 2. 재령 28일의 시험체별 압축강도(MPa)

알칼리 활성제로 KOH를 혼입한 시험체는 동일한 물과 KOH량을 첨가한 시험체에 있어 시멘트의 혼입의 영향이 NaOH 혼입한 시험체들과 비교하여 상대적으로 적었으며, KOH량의 증가에 따른 압축강도는 알칼리 활성화가 제대로 이루어지지 않은 Na-A-30 및 Na-A-35 계열과 유사한 경향을 보였다. 또한, 사진 3에서 보는바와 같이 28일 양생 후 시험체 표면에 KOH 성분이 석출된 점을 고려하면 알칼리 활성화 반응이 제대로 발현하지 않은 것으로 사료된다.

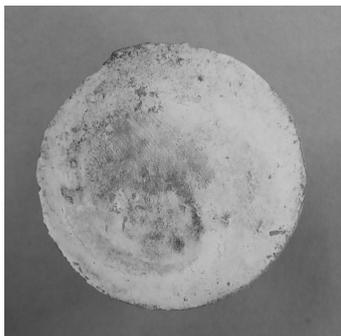


사진 3. KOH가 석출된 시험체 표면형상

하지만, 물-석탄회비가 낮고, KOH를 적게 혼입한 K-A-30과 K-B-30의 I 시험체들의 압축응력이 상대적으로 큰 값 나타냈다는 점을 고려하면 KOH 혼입 비율을 줄인 추가실험을 통해 알칼리 활성화가 이루어질 수 있는 최적 배합을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 국내 화력발전소에서 발생하는 Bottom ash를 알칼리 활성법을 활용하여 경량골재화 하기 위한 연구의 일환으로 알칼리 활성법의 적용을 위한 적정배합비 산정과 경화체의 강도특성을 분석하고자 하는 목적으로 진행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실험의 과정을 통해 물-석탄회비 및 알칼리 활성제의 혼입 가능 범위를 파악할 수 있었으며, NaOH의 사용을 통해 Bottom ash에 존재하는 Al_2O_3 , SiO_2 와 같은 산성화합물과의 반응을 활성화 있음을 확인했다.
2. 최적 배합 도출을 통해 Bottom ash 대비 시멘트 5%, 물 30%, NaOH 10%(환산값 10.75%)을 혼합하여 양생한 결과 압축강도 15.13MPa를 얻을 수 있었다.
3. 동일한 물량의 NaOH, KOH 혼입시 KOH의 석출이 많이 이루어진다는 점을 통해 최적 배합 도출시의 상대적 인 물량은 NaOH와 비교해 KOH가 더 작을 것으로 사료된다.

향후 Bottom ash의 경화체 제작에 있어 본 연구의 결과를 바탕으로 NaOH, KOH 뿐만 아니라 다양한 알칼리 활성제를 도입한 실험을 실시하고, 최적배합 및 최적양생조건 도출과 경화체의 미시구조 분석 등을 통해 Bottom ash의 최적화된 경량골재화를 이루고자 한다.

참 고 문 헌

1. 송민섭 외, 바텀애시를 사용한 모르타의 특성에 대한 실험적 연구, 한국건축시공학회 학술.기술논문발표회 논문집, v.3 n.1(통권 제4집), pp.61-66, 2003.10
2. 조병완 외, 알칼리 활성화에 의한 Fly ash와 Bottom ash의 경화특성, 대한토목학회논문집, 25권 2A호, pp.289-294, 2005.3
3. 차동원 외, 한전의 석탄회 및 탈황석고 재활용 현황, 고성능 콘크리트 국제 워크숍 논문집, pp.245~270, 1999.10
4. Sadayuki Shinozaki, 日本의 石炭灰 再活用 現況, International Workshop on utilization of Fly Ash, pp.19, 1996