

석탄회를 잔골재 일부로 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구

최 세 진

정 용

오 복 진

(삼표산업(주) 환경기술 연구소)

1. 서론

최근 전력사용량의 증가에 따라 화력발전소에서 부산물로 발생하는 석탄회량도 증가하여 2000년에는 약 450만톤의 석탄회가 발생하였으며 2010년경에는 발생량이 약 600만톤에 이를 것으로 예상되고 있다.¹⁾

석탄회는 발생장소에 따라 Fly Ash(플라이애시), Cinder Ash(신더애시), Bottom Ash(바텀애시)로 구분되고 있다. 이중 바텀애시는 연소실 하부에서 발생하는 회로 Clinker Ash(클링커애시)라고도 하며, 총석탄회 발생량 중에 약 10~15%를 차지하고 있다. 그러나 발생량에 비해 이를 처리하기 위한 매립지나 처리시설의 확보가 어려워 석탄회의 처리에 대한 문제가 국가·사회적으로 중요시되고 있다.

한편 최근 바다모래(해사) 채취에 관한 규제 및 천연자원 고갈화에 따른 공급량의 한계로 바다모래를 대체할 수 있는 대체재의 개발이 크게 부각될 것으로 예상되며, 석탄회를 잔골재 대체재로 사용할 경우 바다모래 및 부순모래 세척에 따라 손실되는 미립분을 보완할 수 있어 그 활용성이 크다고 할 수 있다.

이에 선진외국의 경우, 잔골재 대체재로서 석탄회를 콘크리트에 활용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으나²⁾³⁾ 국내에서는 이에 대한 체계적인 연구가 미흡한 실정이다.

특히 석탄회중 플라이애시는 활용률이 매년 증가하고 있으나, 바텀애시의 경우에는 거의 대부분이 매립·폐기되고 있다. 또한 바텀애시 자체의 물리·화학적 성질이 열악하기 때문에 바텀애시를 잔골재 대체재로서 콘크리트에 활용하기 위해서는 이에 대한 검토가 충분

히 이루어져야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 잔골재 대체재로서 석탄회의 주요 구성 성분인 플라이애시와 바텀애시의 치환율에 따른 콘크리트의 각종 공학적 특성을 비교·검토함으로써 산업부산물인 석탄회의 효율적 활용방안 및 이용기술의 개발을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

본 연구의 실험계획 및 배합은 [표 1]에서 보는 바와 같이 석탄회를 잔골재 대체재로서 사용한 콘크리트의 특성을 비교·검토하기 위해서 시리즈 I의 경우, 물시멘트비를 보통강도 수준의 60%, 단위수량은 180kg/m³로 고정하고 목표슬럼프는 플라이애시를 치환한 콘크리트의 유동성을 고려하여 18±2cm로 설정하였다. 또한 플라이애시를 잔골재 용적에 대하여 10, 20, 35, 50%로 치환한 콘크리트의 굳지않

은 정상 및 경화성상을 비교·분석하였다.

시리즈 II의 경우, 바텀애시의 상대적으로 열악한 물리적 성질을 고려하여 목표슬럼프를 8±2cm로 설정하였으며, 기타 실험계획 및 배합은 시리즈 I의 경우와 동일하게 실시하였다.

2.2 시험방법

콘크리트 시험은 각각 KS규준에 준하여 실시하였으며, 콘크리트의 염화물 함유량 시험은 MARUTO사의 이온선택 전기방식의 CL-203Z를 이용하여 굳지않은 콘크리트의 전염화물량을 측정하였다.

콘크리트의 길이변화 시험은 10×10×40cm의 각형 공시체를 제작하여 KS F 2424에 준하여 실시하였고, 화학저항성 시험은 28일 표준양생을 실시한 Ø10×20cm 원주형 공시체를 5%의 H₂SO₄용액에 침지시켜 각각의 침지재령별 콘크리트의 물성을 평가하였다.

축진중성화시험은 10×10×40cm의 공시

[표 1] 실험계획 및 배합

시리즈	요인 ¹⁾	W/C (%)	슬럼프 (cm)	단위 수량 (kg/m ³)	s/a (%)	절대용적 ²⁾ (l/m ³)				단위중량 (kg/m ³)				측정 항목				
						C	Ash	S	G	C	Ash	S	G					
I	FA 0	60	18±2	180	41	95	0	293	422	300	0	750	1118	· 공기량 (%) · 슬럼프 (cm) · 염화물함유량 ³⁾ (kg/m ³) · 압축강도 (MPa)				
	FA 10														29	264	62	674
	FA 20														59	234	125	599
	FA 35														103	191	218	487
	FA 50														147	147	312	374
II	BA 0	60	8±2	180	41	95	0	293	422	300	0	750	1118	· 길이변화 · 화학저항성 · 압축강도 변화(MPa) · 중량변화율(%) · 중성화깊이(mm)				
	BA 10														29	264	58	675
	BA 20														59	234	116	600
	BA 35														103	191	202	488
	BA 50														147	147	289	375

주 1) FA : Fly Ash, BA : Bottom Ash, 수치는 잔골재용적에 대한 치환비율

2) C : Cement S : Sand G : Gravel

3) 시리즈 II의 경우만 실시

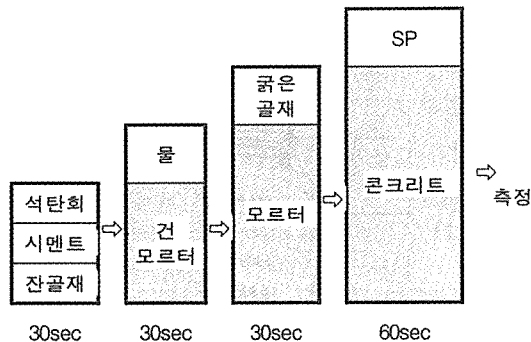
체를 제작하여 촉진중성화시험기(온도 20 ± 2 °C, 습도 $60 \pm 5\%$, 탄산가스농도 $5 \pm 2\%$)에서 4주간 촉진중성화를 실시한 후, 1% 페놀프탈레인 용액을 분무기로 분무하여 표면으로부터 적색으로 변화하지 않는 부분을 중성화깊이로 하여 측정하였다.

2.3 사용재료 및 비빔방법

본 실험에 사용된 재료의 물리적 성질은 [표 2]에서 보는 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트, 잔골재는 비중 2.56의 제염사, 굵

[표 2] 사용재료의 물리적 특성

사용재료	물리적 특성
시멘트	보통포틀랜드 시멘트 비중: 3.15 분말도: 3,265cm ² /g
잔골재	세척사, Gmax: 5mm, 조립율(F.M.): 3.04, 비중: 2.56
굵은골재	부순골재, Gmax: 20mm F.M.: 6.5, 비중: 2.65
바텀애시	Gmax: 5mm, F.M.: 2.93, IOL: 20.5%, 흡수율: 5.8%, 비중: 1.97
플라이 애시	분말도: 3,610cm ² /g, IOL: 4.0%, SiO ₂ : 53.2%, 비중: 2.13
혼화제	고성능감수제 (나프탈렌계)



[그림 1] 콘크리트의 비빔방법

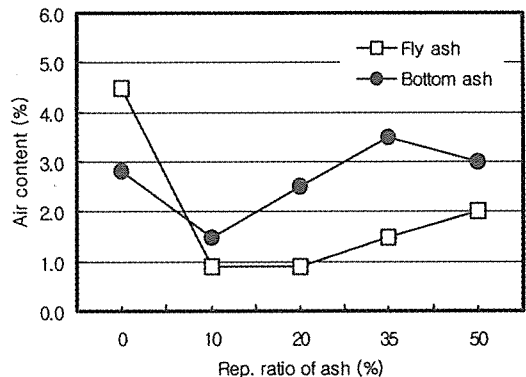
은골재는 비중 2.65의 부순자갈, 혼화제는 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였다. 또한 바텀애시는 최대치수 5mm, 비중 1.97, 강열감량 20.5%, 흡수율 5.8%, 조립율 2.93의 서천산 바텀애시를 건조시켜 사용하였으며 플라이애시는 비중 2.13, 분말도 3,610cm²/g의 보령산 제품을 사용하였다.

콘크리트의 비빔방법은 수차례의 예비시험을 통해 [그림 1]에서 보는 바와 같이 용량 100 l의 강제식 믹서를 사용하여 시멘트, 잔골재, 바텀애시를 투입하여 건비빔을 30초간 행한 후, 물과 굵은골재, 고성능감수제를 투입하여 약 2분간 비빔을 실시하는 분할투입방법을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공기량 검토 및 분석

석탄회 치환율에 따른 공기량의 변화를 나타낸 [그림 2]에서 알 수 있듯이, 우선 플라이애시를 사용한 경우 플라이애시를 치환한 배합에서 공기량이 1~2%정도로 낮게 나타나고 있는데, 이는 플라이애시의 미연탄소에 의한 작용으로 사료된다. 따라서 적절한 공기량의



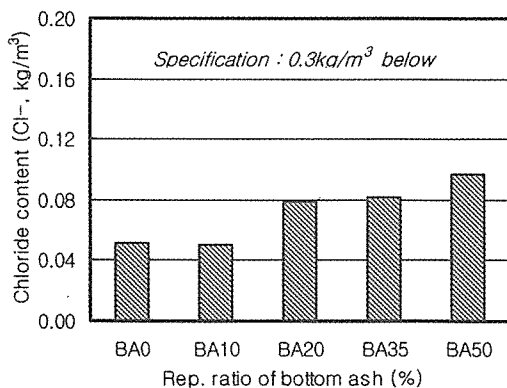
[그림 2] 공기량의 변화

확보를 위해서는 강열감량이 낮은 플라이애시의 사용이나 AE제의 사용이 필요할 것으로 판단된다.

또한, 바텀애시를 사용한 경우에는 BA10을 제외하고 대체적으로 유사하게 나타났는데, 이는 입자크기가 작은 분말상태의 플라이애시와는 달리 바텀애시가 잔골재와 유사한 정도로 상대적으로 크기 때문에 플라이애시와 같은 공기량 흡착현상이 발생하지 않았던 것으로 사료된다.

3.2 염화물 함유량 검토 및 분석

[그림 3]은 바텀애시를 사용한 굳지않은 콘크리트의 염화물 함유량을 나타낸 것으로, 바텀애시 치환율이 증가할수록 콘크리트내의 염화물함유량이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이는 석탄화력발전소의 이송시스템상 바텀애시를 매립지로 이송할 경우 해수를 이용하기 때문에 바텀애시에 소량의 염분이 포함된 것으로 판단된다. 그러나 바텀애시를 치환한 모든 콘크리트에 있어서 건설교통부 제정 「콘크리트표준시방서」에서 제안하고 있는 콘크리트내의 전 염화물 이온량 0.30kg/m^3 이하를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

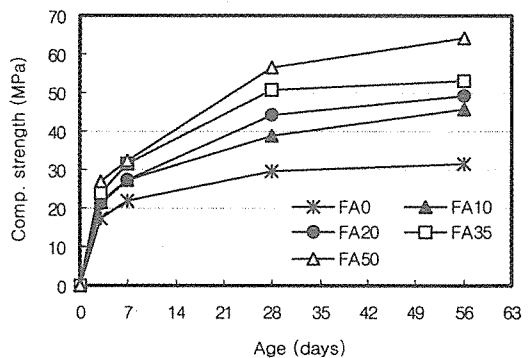


(그림 3) 염화물 함유량의 변화

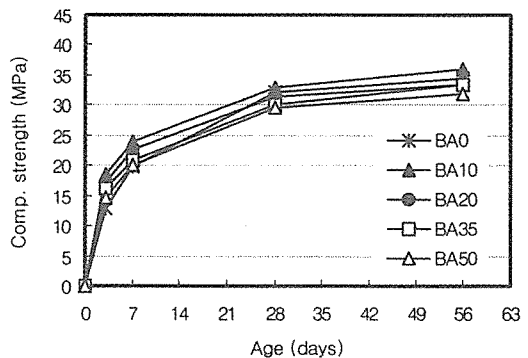
3.3 압축강도 특성 검토 및 분석

플라이애시 치환율별 재령에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 [그림 4]에서 보는 바와 같이, 모든 재령에 있어서 플라이애시 치환율이 증가할수록 높은 압축강도를 발현하고 있는데, 이는 플라이애시의 공극 충전 현상 등에 의한 조직의 치밀화에 기인한 것으로 사료된다. 이러한 경향은 포졸란반응이 이루어지는 장기 재령일수록 현저하여 재령 56일에 FA50의 경우 64.1 MPa 수준으로서 31.6MPa를 나타낸 FA0보다 약 2배 정도의 압축강도를 발현하고 있음을 알 수 있다.

[그림 5]는 바텀애시 치환율에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바



(그림 4) 플라이애시 치환율별 압축강도의 변화



(그림 5) 바텀애시 치환율별 압축강도의 변화

와 같이 바텀애시를 치환한 경우, BA0과 유사한 수준으로 나타났다.

3.4 길이변화 검토 및 분석

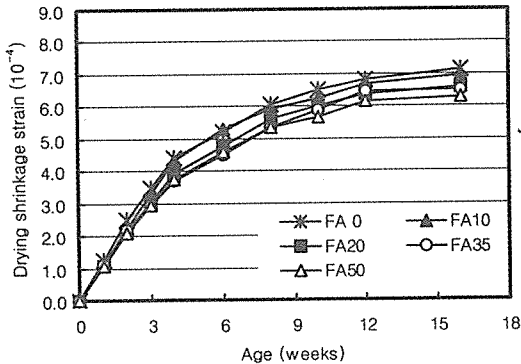
[그림 6](a)(b)는 플라이애시 및 바텀애시를 사용한 콘크리트에서의 석탄회 치환율에 따른 길이변화를 나타낸 것이다. 우선 플라이애시를 사용한 콘크리트를 살펴보면 재령 16주후의 길이변화가 $6.28 \sim 6.97 \times 10^{-4}$ 의 수준으로, 7.13×10^{-4} 을 나타낸 플레인콘크리트(FA0)에 비해 길이변화가 상대적으로 적게 나타나고 있으며, 바텀애시를 사용한 콘크리트의 경우에는 $6.75 \sim 7.60 \times 10^{-4}$ 의 수준으로

BA0과 유사한 수준을 보이고 있다.

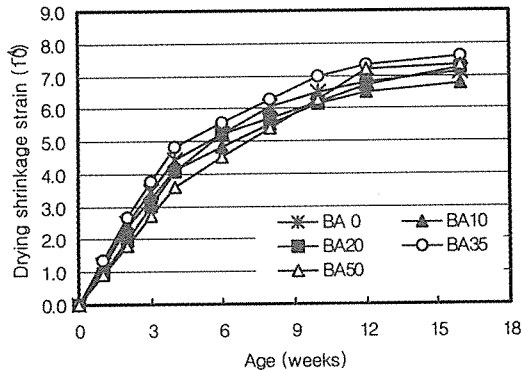
3.5 화학저항성 검토 및 분석

[그림 7]은 플라이애시를 사용한 콘크리트에 있어서 4주간 표준양생을 실시한 후, 5% H_2SO_4 용액에 침지시켜 침지재령별 압축강도의 변화를 나타낸 것으로서, 침지재령이 증가함에 따라 대체적으로 압축강도가 저하하고 있으며, 특히 침지전의 압축강도가 낮을수록 침지후의 압축강도 저하폭이 상대적으로 크게 나타나고 있다.

[그림 8]은 침지재령별 플라이애시 치환율

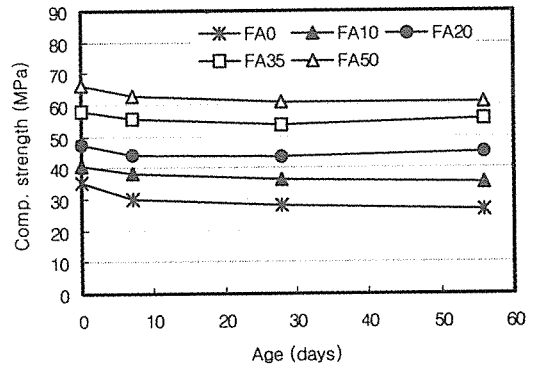


(a) Fly ash

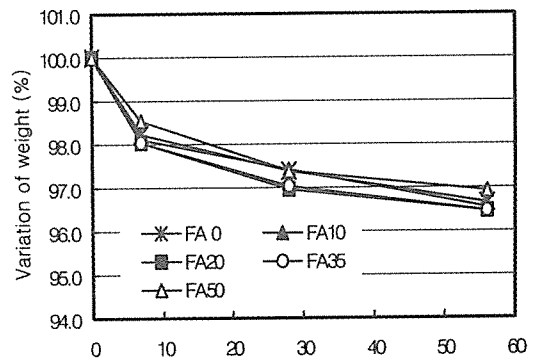


(b) Bottom ash

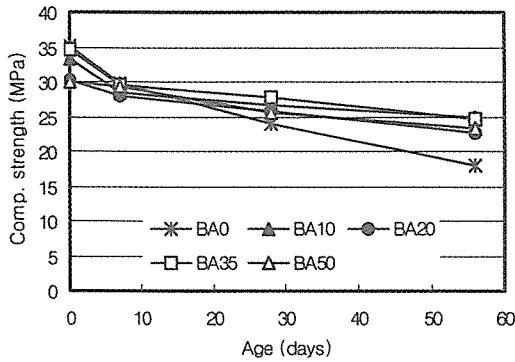
[그림 6] 콘크리트의 길이변화



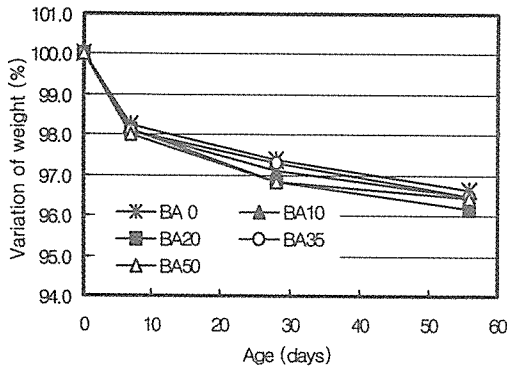
[그림 7] 플라이애시 치환율별 침지재령에 따른 압축강도의 변화



[그림 8] 바텀애시 치환율별 침지재령에 따른 중량변화율



(그림 9) 바텀애시 치환율별 침지재령에 따른 압축강도의 변화



(그림 10) 바텀애시 치환율별 침지재령에 따른 중량변화율

에 따른 중량변화율을 나타낸 것으로서, 침지재령이 증가함에 따라 모든 수준에서 중량이 감소하고 있으며, 플라이애시 치환율에 따른 유의할 만한 경향은 보이지 않고 있다.

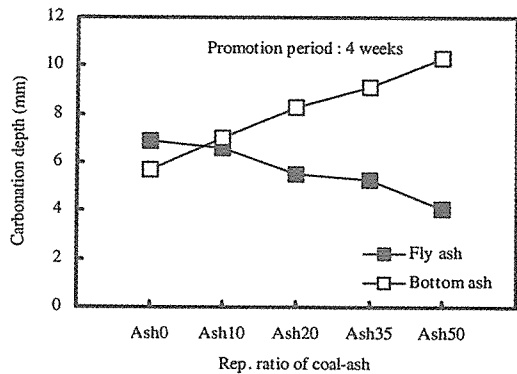
또한, [그림 9]는 바텀애시를 사용한 콘크리트에 있어서 침지재령별 압축강도의 변화를 나타낸 것으로서, 침지재령이 증가함에 따라 대체적으로 압축강도가 저하하고 있음을 알 수 있으며, 바텀애시 치환율에 따른 유의할 만한 경향은 보이지 않고 있다.

[그림 10]은 침지재령별 바텀애시 치환율에 따른 중량변화율을 나타낸 것으로, 플라이애시를 사용한 콘크리트와 유사하게 침지재령이

증가할수록 중량이 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.6 중성화 특성 검토 및 분석

[그림 11]은 석탄회를 잔골재 일부로 사용한 콘크리트의 석탄회 치환율에 따른 중성화깊이의 변화를 나타낸 것으로서, 그림에서 보는 바와 같이 플라이애시를 사용한 경우 플라이애시 치환율이 증가함에 따라 조직의 치밀화에 의해 중성화깊이가 감소하고 있으며, 바텀애시를 사용한 경우에는 바텀애시 치환율이 증가함에 따라 중성화깊이가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 바텀애시의 다공성 및 치환율의 증가에 따른 압축강도 저하로 인해 CO₂의 확산속도가 빨라져 중성화깊이가 증가한 것으로 사료된다.



(그림 11) 중성화깊이의 변화

4. 결론

석탄회를 잔골재 일부로 사용한 콘크리트의 공학적특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 바텀애시 치환율이 증가할수록 콘크리트

내 염화물량이 다소 증가하였으나, 건설교통부제정「콘크리트표준시방서」에서 제안하고 있는 콘크리트내의 전 염화물이온량 0.30kg/m³이하를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

2) 압축강도의 경우, 플라이애시 치환율이 증가할수록 높은 압축강도를 발현하였으며, 바텀애시를 치환한 경우에는 전반적으로 유사하게 나타났다.

3) 플라이애시를 잔골재 일부로 사용한 콘크리트의 경우 플레인콘크리트에 비해 길이변화가 상대적으로 적게 나타났으며, 바텀애시를 사용한 경우에는 플레인콘크리트와 유사한 수준으로 나타났다.

4) 5% H₂SO₄용액에 침지시켜 침지재령별 압축강도를 살펴본 결과, 침지재령이 증가함에 따라 대체적으로 압축강도가 감소하였으며, 특히 침지전의 압축강도가 낮을수록 침지 후의 압축강도 저하폭이 상대적으로 크게 나타났다.

5) 바텀애시를 사용한 콘크리트의 경우 치환율이 증가할수록 중성화깊이가 상대적으로 증가하였으나, 플라이애시를 잔골재 일부로 사용한 경우 치환율이 증가할수록 중성화깊이가 감소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) 차동원 외, 한전의 석탄회 및 탈황석고 재활용 현황, 고성능 콘크리트 국제 워크숍 논문집, 1999.10, pp.245~270
- 2) 김무한, 최세진 외, 플라이애시의 치환방법 및 치환율에 따른 플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 18권 2호, 2002.2, pp.123~130
- 3) Nader Ghafoori, Yuzheng Cai, Laboratory-Made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash, ACI Material Journal, 1998.5, pp.224~251
- 4) 松藤 泰典ほか, 石炭灰のコンクリートの大量使用に関する研究, 日本建築學會學術講演梗概集, 1999. 9, pp.437~454
- 5) Use of Fly Ash in concrete(ACI Committee 226) : ACI Material Journal, Vol.84, No.5, pp.381~409, 1987
- 6) 이진용 외, 플라이애시 함유량이 콘크리트의 특성에 미치는 영향, 고성능콘크리트 국제 워크숍, pp.271~285, 1999
- 7) 김성수 외, Bottom-ash(무연탄)를 적용한 고유동충전재의 물리·역학적 성능비교, 한국콘크리트학회논문집, 제13권 1호, 2001. 5, pp.263~268