

화력발전소 Bottom Ash를 콘크리트 골재로 이용하는데 있어서 포졸란성 혼화제 역할

김동환, 이생근, 임남웅*

(주)한국후라이애시시멘트공업, 중앙대학교 건설대학원 환경공학과*

Role of the pozzolanic admixture on the compressive strength of concrete with use of the bottom ash as an aggregate, sourced from the electric power plant

Kim Dong-Hwan, Lee Saeng-Kun, Lim Nam-Woong*

Korea Fly Ash Cement Co., Dept. of Environmental Eng., Chung Ang Univ.*

1. 서론

한국전력에서는 국내 에너지 문제의 해결책으로 석탄화력발전소 건설을 증설하여 왔고, 이로 인하여 석탄사용량은 2001년에는 약 3천만톤이었던 것이 장기 전력수급계획이 완료되는 2006년에는 약 3,400만톤에 이르게 된다. 석탄사용량에 따른 Ash의 발생량은 2006년에는 약 550-600만톤으로 예상되며, 이중 Bottom Ash양은 약 120-140만톤으로 추정되고 있다. 뿐만아니라 1995년도 이후 Ash를 폐기처리하기 위하여 Ash Pond를 건설하여 왔고 여기에 Bottom Ash를 매장시켜 왔기 때문에 그 동안의 매장량도 수천만톤에 이르러 이에 대한 대책이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 최근에는 소각로에서나 화력발전소에서 발생하는 Bottom Ash를 고유동 콘크리트의 충전재, 지반개량재 및 담체 등으로 재활용되고 콘크리트 2차제품의 자연골재 대체로도 활용할 수 있는 기술적 연구가 활발히 이뤄지고 있는 실정이다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 Bottom Ash 골재는 천연골재와는 달리 흡수율이 높고, 비중이 낮은 관계로 천연골재 대체에 대하여 기술적인 문제가 제기되어 왔다.

따라서 연구에서는 콘크리트 제품상에 천연골재를 Bottom Ash 골재로 대체하는데 문제를 보완하기 위해서 포졸란성 혼화제 첨가하였을 때 따른 콘크리트 압축강도에 어떤 영향을 줄 수 있는지를 조사하고자 하였다.

2. 실험

2.1 포졸란성 혼화제

① 규조토

규조토는 5~400 μ m 크기의 작은 단세포로 구성된 주결정각을 이루고 있다. 각각의 규조각에서는 0.01~1 μ m 정도의 무수히 많은 이차 세공들이 발달되어 있고 비표면적이 50m²/g 정도이다. 규조토는 국내산(P 지역)으로, 550 $^{\circ}$ C에서 가소처리로 활성화하고 D₅₅₀으로 명명하였다.⁽⁴⁻⁶⁾ (Table 1 참조)

② Fly Ash

충남 보령화력 발전소에서 발생하는 Fly Ash를 사용하였다. 발생하는 Fly Ash는 한국후라이애시시멘트공업주식회사에서 1차 정제공정을 한 것으로 제한하였으며 감열감량(L.O.I)은

한국 KS가 제시하는 양(5.0%)에 만족하였다. 주로 Quartz (SiO₂)와 Mullite(3Al₂O₃·2SiO₃)의 광물성을 보였으며, 입자구형으로서 일반적인 Fly Ash 특성과 일치하였다.(표 1 참조)

Table 1. Chemical Composition

Sample	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	L.O.I
OPC	63.11	18.8	6.72	3.68	3.63	0.8	1.07	0.4	2.1	0.8
Diatom	0.70	84.58	5.31	0.32	2.27	0.40	4.84	-	0.27	1.20
Fly Ash	4.15	54.15	27.18	0.27	3.83	1.08	0.95	1.83	0.60	4.75

(Note) OPC : Ordinary Portland Cement Diatom : 국내 P지역 규조토

2.2 Bottom Ash(BA) 골재

Bottom Ash 골재는 충남보령화력 발전소의 Ash Pond에 매장되어 있는 Clinker시료를 제공받아 KS 시방기준(제 57호 골재)에 따라 입도시험하였고, 이에대한 물리적 특성도 조사하였다.

2.3 콘크리트 배합설계

① 배합특성

설계강도는 240kg/cm²(일반레미콘)에 잔골재율 42%와 할증강도는 288kg/cm²로 하였다.(Table 2 참조)

Table 2. Factors for Concrete Mix Design

설계강도	할증강도	변동계수	잔골재율	단위수량	슬럼프	공기량	W/C
240 (kg/cm ²)	288 (kg/cm ²)	15 (II 공식)	42 (%)	170 (ℓ/m ³)	12±2 (cm)	4±2 (%)	43 (%)

② 배합비

레미콘 배합비는 설계기준(양생 28일 압축강도 240 kg/cm²)에 따라 Table 3과 같이 조절하였다.

Table 3. Concrete Mix Design

재 료	N ^o .	(kg/m ³)			
		CTL	No.1	No.2	No.3
OPC		416	416	416	416
D ₅₅₀		-	-	42	-
Fly Ash		-	-	-	42
(-5 ^{mm}) BA 잔골재		-	705	705	705
(-25 ^{mm}) BA 굵은골재		-	1098	1098	1098
(-5 ^{mm}) 천연잔골재		705	-	-	-
(-25 ^{mm}) 천연굵은골재		1098	-	-	-
유동화제(%) (시멘트양에 대한 첨가량)		0.5	0.5	0.5	0.5
축진제(%) (시멘트양에 대한 첨가량)		0.5	0.5	0.5	0.5
AE제(g) Esaton 1214 (시멘트양에 대한 첨가량)		0.2	0.2	0.2	0.2

(주)

CTL : Control Mix, OPC : Ordinary Portland Cement
D₅₅₀ : Pozzolanic Admixture, BA : Bottom Ash

2.3 압축강도

콘크리트 공시체($\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$)는 KS F 2405와 KS F 2434에 따라 제작한 후 7일과 28일 수중양생 후 압축강도를 측정하였다. 이때 공기량은 $4.5\% \pm 1.5\%$, Slump는 $12.0 \pm 1.5\text{cm}$ 범위내로 조절하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 입도분석

Table 4에서 볼 수 있듯이, 굵은골재입도의 13mm는 KS 기준에 60%를 초과하지 않도록 되어 있지만, 기준에 비하여 17%가 초과된 77%를 보였다. 그러나 BA잔골재는 KS 시방기준에 잘 만족하고 있다. 따라서, 천연잔골재를 대체하는 데는 큰 문제가 없어 보이지만 굵은골재 대체에는 문제가 있을 수 있어 보였다.

Table 4. Sieve Analysis of BA Coarse Aggregate(-25mm)

시험항목	통과중량 백분율(%)	KS 시방기준	결과
입도	40mm	%	100
	25mm	%	95 - 100
	20mm	%	-
	13mm	%	25 - 60
	10mm	%	-
	5mm	%	0 - 10
	Pan	%	-

Table 5. Sieve Analysis of BA Fine Aggregate(-5mm)

시험항목	통과중량 백분율(%)	KS 시방기준	결과
입도	10mm	%	100
	5mm	%	95 - 100
	2.5mm	%	80 - 100
	1.2mm	%	50 - 85
	0.6mm	%	25 - 60
	0.3mm	%	10 - 30
	0.15mm	%	2 - 10

3.2 물리적 특성

Table 6에서 보는 것 같이, BA 잔골재의 비중(2.2)은 천연잔골재의 비중(2.65)에 비하여 약 20%가 낮으나, 굵은골재의 경우에 있어서는 BA 굵은골재의 밀도(2.61)과 천연굵은골재 밀도(2.69)는 크게 차이가 나지 않는다. 이는 배합설계에서 천연잔골재 사용량과 BA 잔골재 사용량에 차이에 대한 중량보정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

조립을 역시 천연잔골재(2.75%)와 BA 잔골재(2.59%)는 약간의 차이를 보이고 있지만, 굵은골재의 경우는 거의 동일한 수준을 보이고 있기 때문에 배합시 BA 잔골재량을 조절한다면 크게 문제가 되지 아니할 것으로 보였다. 천연골재와 BA 골재들이 보여준 흡수율은 큰 차이를 보이지 아니하였다. BA 골재가 천연골재보다 더 흡수를 더하는 것으로 보아 배합시 물량조절이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Table 6. Physical Properties

특성	골재	천연		Bottom Ash	
		잔골재	굵은골재	잔골재	굵은골재
비중(g/cc)		2.65	2.69	2.2	2.61
조립율(%)		2.75	6.95	2.59	6.95
흡수율(%)		3.0 >	3.0 >	3.5-4.0	3.5-4.0

3.3 압축강도

Table 7에서는 레미콘 콘크리트의 기본배합에서 천연골재(잔골재 및 굵은골재)를 BA골재(잔골재 및 굵은골재)로 대체한 압축강도(재령 7일과 28일)를 나타내었다. 천연골재 레미콘의 압축강도는 양생 7일과 28일 각각 256 kg/cm²와 384 kg/cm²를 보여 양생 28일 배합강도(288kg/cm²)는 초과하였다.

천연골재를 BA골재로 대체하였을 때 양생 7일과 28일에 각각 330 kg/cm²와 342 kg/cm²을 보여주었다. BA로 천연골재를 대체하게 되면 (28일 강도 비교) 약 12%에 압축강도의 감소를 보였다. BA 골재만을 사용한 레미콘에 포졸란 D₅₅₀과 Fly Ash를 시멘트양에 각각 10% 치환하고 이들의 압축강도 변화를 보았을 때, D₅₅₀ 경우 BA 콘크리트는 첨가하지 아니한 BA 콘크리트보다 약 16% 압축강도(양생 7일)가 증가되었고 양생 28일에서는 약 13% 압축강도가 증가되었다. 즉, BA 콘크리트가 BA 골재로 인하여 감소된 압축강도를 보완하려면 포졸란 D₅₅₀을 첨가하면 어느정도 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다. 또한 포졸란성 규조토가 첨가된 콘크리트에 장기강도 향상에 영향을 준다는 이유를 감안한다면 장기적으로는 강도증가가 예상된다.⁽⁷⁻⁸⁾ 둘째로 Fly Ash 경우 BA 레미콘 압축강도와 거의 동일한 수준이었다. 즉, 레미콘에 천연골재를 BA골재로 대체하면 압축강도는 감소된다. 그러나, 포졸란성 규조토(D₅₅₀)를 사용하면 BA 골재 레미콘 콘크리트는 천연골재 레미콘 콘크리트의 압축강도와 동일한 수준에 이른다는 것을 알 수 있다. 따라서, BA 골재를 콘크리트의 골재로 이용하기 위해서는 포졸란성 규조토 첨가가 바람직하였음을 확인할 수가 있었다.

Table 7. Compressive Strength of the BA Concrete

물성	시료번호	CTL	No.1	No.2	No.3
		압축강도 (kg/cm ²)	7일	256	230
	28일	384	342	386	356

4. 결론

1. Bottom Ash 골재 입도분석에 있어서, 굵은골재 입자 크기 13mm의 KS 기준(60%)에 비하여 Bottom Ash 굵은골재는 17%를 초과하였으나 Bottom Ash 잔골재는 KS기준에 만족하였다.
2. Bottom Ash 잔골재 비중(2.2)은 천연잔골재의 비중(2.65)에 비하여 약 20% 낮으나, Bottom Ash 굵은골재비중(2.61)은 천연굵은골재비중(2.69)와 크게 차이가 없었다. Bottom Ash 굵은골재 조립율(6.95%)과 천연굵은골재 조립율(6.96%)과 거의 동일하였

다. 동시에 Bottom Ash 잔골재 조립율(2.59%)은 천연굵은골재 조립율(2.71%)에 비하여 비교적 낮았다. Bottom Ash 흡수율(3.5-4.0%)은 천연골재흡수율(3.0%>)보다 높았다.

3. 레미콘 콘크리트 기본배합에서 천연골재(굵은골재 및 잔골재)를 Bottom Ash 골재(굵은골재 및 잔골재)를 전량 대체하였을 때, Bottom Ash 골재로 대체된 콘크리트의 압축강도(양생 7일 : 230 kg/cm² 양생 28일 : 342 kg/cm²)는 기본배합(7일 : 256 kg/cm², 28일 : 384 kg/cm²)에 비하여 약 11-12%가 감소되었다.

그러나, 포졸란성 규조토를 혼화제로 첨가(시멘트양에 10% 대체)하면 양생 7일에는 220 kg/cm²이었고, 양생 28일에는 386 kg/cm²을 보여 기본배합과 거의 동일한 압축강도수준이었다. 하지만, Fly Ash를 혼화제로 첨가(시멘트양에 10% 대체)하더라도 기본배합강도만큼 압축강도를 향상시키지 못하였다.

따라서, 레미콘 콘크리트에 천연골재를 Bottom Ash 골재로 전량 대체하기 위해서는 포졸란성 규조토를 콘크리트 시멘트양의 10% 대체첨가하면 가능하다.

참고문헌

1. 中村州一, “도시쓰레기 소각로에서 발생하는 소각재 처리 및 재활용(1) - 도시쓰레기 소각재의 토목”, 환경자재 리싸이클, http://www.envitop.co.kr/O3_chumdan/11/SP3.htm
2. 임남웅, 임남웅, “소각로에서 발생한 유해성 분진 자원화 기술개발에 관한 연구”, 산업자원부 기술개발보고서(2004)
- 3) R. Salgado, “Compostion and Mechanical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures for Embankments and other Geotechnical Applications”
Workshop on recycling opportunities for fly ash and other coal combustion products in concrete and construction materials, Indianapolis, Indiana, USA(2005)
4. 임남웅, 류한길, “콘크리트 부식방지용 시멘트 모르타 및 그 제조방법”, 대한민국 특허 제 1997795호 (1992)
5. 박광희, 임남웅, 김영근, “포졸란을 이용한 전기로 분진중의 중금속 시멘트화에 관한 연구”, 한국폐기물학회지, 제 13권 1호(1996)
6. 류한길, 임남웅, 박종욱, “EAF Dust상에 중금속을 함침한 활성규조토가 혼합된 시멘트 모르타의 내화학성에 관한 연구” 한국콘크리트학회지, 제9권 1호(1997)
7. 임남웅, “재생골재를 이용한 구조 및 비구조 콘크리트 개발”, 중앙대학교 건설산업기술연구소, 연구보고서(2002)
8. 김동환, 임남웅, “시멘트 모르타 및 재생골재를 이용한 콘크리트 제조”, 대한민국 특허 제 10-0199998호(1999)