

석탄회 인공골재를 이용한 콘크리트 프리캐스트 블록 연구

The Study on the Concrete Precast Block using Coal-ash Artificial Aggregate

조병완 박승국 김진일
Byung-Wan Jo Seung-Kook Park Jin-Il Kim

ABSTRACT

Recycling of coal combustion by-product(Ash) are becoming more important in the utilization business as a result of the increased use of NOx reduction technologies at coal-fired power plants. current disposal methods of these by-products create not only a loss of profit for the power industry, but also environmental concerns that breed negative public opinion.

This research made concrete precast block using coal ash artificial aggregate for environmental-friendly products and compared strength special quality of this block with existent common use brick and analyzed application possibility in situ with a reserve experiment that measured strength property and manufactured method to handle coal ash produced in Bo-ryung thermoelectric power plant.

1. 서론

석탄은 풍부한 매장량, 저렴한 가격, 공급원의 안정성 등으로 전세계 화력발전의 근간이 되는 원료로, 국민의 생활 수준 및 에너지 소비증가에 따라 그 사용량이 계속 증가되고 있다. 우리나라도 현재 석탄화력 발전이 전체 전력구성원의 30% 이상을 차지하는 중요한 전력원이며 그에 따른 석탄회의 발생량도 점진적으로 증가하고 있다. 국내 석탄회 발생량은 1997년 320만 톤에서 현재 500만 톤 이상의 석탄회가 발생되고 있다. 그러나, 현재 우리나라에서는 석탄회가 매우 유용한 자원임에도 불구하고 대부분 매립처리되고 있다. 석탄회 재활용율이 96년도 22%에서 98년도 32%(118만톤)으로 점차 증가 추세에 있으나 가까운 일본만 하더라도 94년에 이미 64%의 재활용율을 기록하는 등 선진국과 비교하면 아직도 매우 저조한 실정이다.

현재까지 우리나라에서 석탄회를 재활용하기 위한 기술은 거의 전무하며 또한 현재까지 개발된 기술 역시 에너지가 많이 소모되는 고온소성에 치우쳐 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 산자부 시행 "석탄회를 이용한 환경친화적 건자재의 개발"에서 제시한 저에너지 저온소성에 의한 석탄회 고품화 최적배합비를 이용한 인공골재를 사용하여 환경친화적 2차 제품인 인공골재를 사용한 콘크리트 프리캐스트 블록을 제작하고 이에 대한 물성을 평가하여 보았다. 또한 제조된 블록의 강도특성을 기존의 상용벽돌과 비교하여 실제 현장에서의 적용가능성을 분석하였다. 이를 위해 압축강도, 휨강도, 동결융해실험, 중금속 용출실험 등을 실시하였다. 또한 전단계의 인공골재에서 문제점으로 지적된 흡수율에 대한 저감대책으로 인공골재에 폴리머 함침을 실시하여 본 블록의 골재로 사용하였다.

* 한양대 토목공학과 교수
** 한양대 토목공학과 박사과정
*** 한양대 토목공학과 석사과정

2. 최적의 배합비 결정

2.1 사용재료

실험에 사용된 재료는 보령화력 발전소에서 발생하는 유연탄 Fly ash, Bottom ash를 사용하였으며 저온소성 경화체를 제조하기 위해 점결제, 결합제, 일반 포틀랜드 시멘트, 금속산화물을 이용하였다. 실험에 사용된 Fly ash와 Bottom ash의 물리, 화학적인 성질은 다음과 같다.

표 2 Fly ash, Bottom ash의 물리, 화학적 성질

	비중	LOI	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O(%)	TiO ₂ (%)
Fly ash	2.34	12미만	57.09	24.66	10.5	2.58	1.37	0.94	-	-
Bottom ash	1.98	13.4	50.29	24.08	3.81	3.05	1.28	-	1.37	0.84

표 3 프리캐스트 블록에 사용될 배합비

	Fly ash : Bottom ash	시멘트(%)	점결제(%)	결합제(%)	금속산화물(%)
Fly ash 단독	1 : 0	10	15	10	5
Fly ash와 Bottom ash 혼합물	6 : 4	10	15	15	5

산자부시행 “석탄회를 이용한 환경친화적 전자재의 개발”에서 제시된 연구결과를 보면 점결제와 결합제의 함량이 증가할수록 강도는 증가하며 탈형 후 24시간동안 55℃의 건조로에서 24시간 양생 후 공기중에서 상온양생하는 경우가 가장 높은 강도를 보이고 있다. 따라서 본 프리캐스트 블록의 배합비는 표 2의 배합비를 사용하였다. 이렇게 제조된 경화체를 약 14일간 상온에서 양생한 후 파쇄하여 인공골재를 제조하였다. 제조된 인공골재는 체가름을 통하여 세골재와 굵은골재로 나누었다. 세골재는 5mm체를 통과하고 0.1mm체에 남는 골재를, 굵은 골재는 5~10mm 사이의 입도를 갖는 골재를 사용하였다. 이것은 실제 S사 및 일반 벽돌생산 공장에서 사용하는 잔골재가 최대 8mm인 왕사를 사용하기 때문이며 인터록킹 블록에서 사용되는 굵은 골재의 경우 일반적으로 굵은골재의 최대치수가 10mm인 점을 고려하여 결정하였다. 또한 사용된 천연골재의 입도는 세립분이 적당하게 혼합된 골재를 사용하였다. 그 이외 일체의 혼화제는 사용되지 않았다. 제조된 골재의 모양은 그림 1-4와 같다. 시멘트는 KS L 5201(보통 포틀랜드 시멘트)를 만족하는 시멘트를 사용하였다.



그림 1 체가름한 FA 굵은골재



그림 2 체가름한 BA 굵은골재



그림 3 체가름한 FA 잔골재

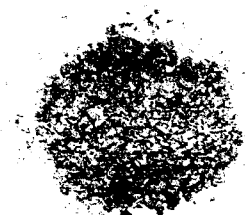


그림 4 체가름한 BA 잔골재

2.2 인공골재 콘크리트 벽돌의 배합비 결정

콘크리트 벽돌의 경우 압축강도는 KS에서 경량골재를 사용한 경량벽돌의 경우 80kg/cm²을 넘도록 규정하고 있다. 또한 건설공사 표준품셈에 의하면 대략적으로 단위시멘트량이 200kg/m³을 넘도록 규정되어 있고 이보다 적은 경우에 내구성과 수밀성 및 안전성이 작고 공극이 많으며 사용 후 우수의 침입이 많은 등 조적구조체에서 심각한 문제가 발생하므로 이 이상으로 정해야 한다고 규정되어 있다.

본 연구에서는 한국산업규격을 획득하여 기존의 시멘트 벽돌을 생산하는 S사를 대상으로 배합비를 조사하였다. S사에서는 시멘트는 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하고 있었고, 굵은 골재는 약 10mm를 사용하고 있었으며 시멘트와 부순돌의 연결재 역할을 하는 잔골재는 비교적 굵은 입도의 왕사를 사용하고 있었다.

S사의 시멘트 벽돌과 중공블록, 인터록킹 블록에 대한 배합비는 표 7.3과 같다. 여기서 시멘트 벽돌과 중공블록은 시멘트 모르타 벽돌을 의미하며 S사에서 사용하는 잔골재가 최대 입도 10mm의 왕사임을 착안하여 본 연구에서 개발한 파쇄골재의 분쇄물을 체로 가름하여 사용하였다. 인터록킹 블록의 경우 S사에서는 부순골재를 굵은 골재로 사용하고 있으므로 본 연구에서는 잔골재는 입도분포가 양호한 일반 잔골재를 사용하고 굵은 골재는 같은 체적의 파쇄 인공골재를 사용하였다.

표 3 프리캐스트 블록 제작에 사용된 배합표

	C	W	W/C(%)	S	A
S사 시멘트 벽돌 및 중공블록	225	75	33	2062	0
FA 시멘트 벽돌 및 중공블록	225	75	33	1506	0
BA 시멘트 벽돌 및 중공블록	225	75	33	1467	0
S사 콘크리트 인터록킹 블록	300	75	25	1000	636
FA 콘크리트 인터록킹 블록	300	75	25	1000	465
BA 콘크리트 인터록킹 블록	300	75	25	1000	452

3. 프리캐스트 블록 제작 및 실험

3.1 실험개요

본 연구에서 개발한 인공골재로 표 3의 배합비를 이용한 콘크리트 프리캐스트 블록을 성형하였다. 선정된 블록의 모양은 일반적인 건축용 블록, 중공블록, 보차도용인 S형 블록과 Y형 블록으로 정하였고 각 블록에 대하여 Fly ash 골재 블록과 Fly ash와 Bottom ash를 혼합골재 블록 두 가지에 대하여 모두 제작하였다. 이에 대한 물성실험을 진행하였으며 물성실험은 KS 규정 중 콘크리트 벽돌(KS F 4004), 속빈 콘크리트 블록(KS F 4002), 보차도용 인터록킹 블록(KS F 4419)을 기준으로 하였다. 또한 비교 대상으로 프리캐스트 블록과 시멘트벽돌을 생산하는 경기도 이천소재의 S사의 시멘트 벽돌을 비교대상으로 선정하였다. 각 블록의 제작을 위해 특수하게 제작된 강제 몰드를 사용하였고 각 블록의 치수는 KS F 4004에서 규정하는 바와 같이 2mm 이하의 오차로 제작하였다.

또한 콘크리트 인터록킹 블록을 제작한 후에는 흡수율 개선을 위해 본 연구의 전단계에서 개발한 폴리머 함침 인공골재를 굵은골재로 치환하여 같은 배합의 인터록킹 블록을 제작하였다. 각 단계에서 제작된 콘크리트 블록은 타설 후 약 24시간 후에 탈형하였고 항온수조에서 약 14일간 수증양생을 실시하였다. 이에 따른 각 공시체를 표 4와 같이 기호를 정하였다.



그림 5 제작된 콘크리트 블록

표 4 각 공시체별 기호

구분	인공골재 블록		폴리머함침 인공굵은골재 블록	
	FA	BA	FA	BA
기호	FG-F	FG-B	FP-F	FP-B

여기서 인공잔골재 블록은 벽돌 및 중공블록을 제조하는데 사용하였으며 인공굵은골재 블록은 인터록킹 블록을 제조하는데 사용하였다.

3.2 비중 및 흡수율

각 블록에 대한 KS규정에 의하여 14일간의 양생이 끝난 후 7일 이상 상온에 방치하여 그 무게를 측정하고 측정된 무게(kg)를 벽돌의 순 부피로 나누어 기건비중을 산출하였다. 흡수율 및 비중실험에서 공시체는 전체 모양 그대로를 사용하였다. 비중 및 흡수율 측정결과는 표 5와 같다.

표 5 비중 및 흡수율 실험결과

	비중				흡수율			
	시멘트벽돌	중공블록	S형블록	Y형블록	시멘트벽돌	중공블록	S형블록	Y형블록
FG-F	1.35	1.41	1.31	1.29	6.0	7.3	6.6	6.0
FG-B	1.3	1.35	1.20	1.25	5.8	6.6	6.2	5.8
FP-F	1.41	1.38	1.39	1.44	4.6	4.5	5.2	5.0
FP-B	1.44	1.44	1.45	1.38	4.4	4.0	4.8	4.9
S사 벽돌	1.58				5.3			
KS 규정	1.7	1.7	-	-	7%	10%	7%	7%

인공경량골재와는 달리 시멘트 벽돌과 인터록킹 콘크리트 블록의 천연골재를 인공골재로 치환한 결과 상당히 낮은 비중을 보이고 있다. 기존 벽돌의 비중이 낮은 제조 배합비를 사용하였고 골재를 인공골재로 치환하였기 때문에 기존 S사 시멘트 벽돌 비중의 약 75% 수준의 비중을 보이고 있다. KS 규정 역시 만족하고 있다.

흡수율에서는 상당히 개선된 모습을 보이고 있다. 기존 벽돌의 골재에 비해 흡수율이 높기 때문에 FA, BA 골재를 사용한 벽돌의 경우 기존의 S사 벽돌에 비해 약간 높은 흡수율을 보이고 있으며 약 5.8~6.6%의 분포로 KS 규정을 만족하고 있으며 중공블록의 경우에도 약 7.3%의 흡수율을 보임으로서 KS 규정을 만족하고 있다. 특히 폴리머 함침 골재를 사용한 인터록킹 블록의 경우는 4.0%~5.2%의 흡수율을 보임으로서 S사 벽돌과 동등 혹은 그 이하의 흡수율을 보여주고 있다.

3.3 압축강도실험

본 연구에서 제조한 프리캐스트 블록을 KS 4002, 4004, 4419를 기준으로 하여 압축강도 실험을 실시한 결과 표 6과 같은 결과를 얻었다.

표 6 압축강도 측정 결과

	압축강도		
	시멘트 벽돌	S형 블록	Y형 블록
FG-F	130.0	242.4	281.78
FG-B	133.18	260.8	260.8
FP-F	150.3	281.6	281.25
FP-B	155.25	298.5	288
S사 벽돌		186	
KS 규정	80	-	-

인공골재 치환 시멘트 벽돌의 경우 약 130~155kg/cm²의 분포를 보이고 있다. 이는 S사 벽돌의 186 kg/cm²보다는 낮으나 KS 규정을 약 50kg/cm² 이상 상회하고 있으므로 충분한 강도를 가지고 있다고 할 수 있다. 콘크리트 인터록킹 블록의 압축강도는 261~288kg/cm²의 분포를 보이고 있고 이 역시 KS 규정을 약 3-3.5배 상회하는 강도를 보여주고 있다.

3.4 휨강도 실험

휨강도는 보차도용 인터록킹 블록에서만 요구되는 물성으로 본 연구에서는 휨강도의 측정을 위해 본 실험에서는 10×10×40cm 공시체를 제작하여 단순보의 3점재하 실험을 실시하였다. 실험 방법은 KS F 4419에 준하였고 결과는 표 7과 같다.

표 7 휨강도 측정결과

	FG-F	FG-B	FP-F	FP-B	KS 규정	
					보도용 인터록킹블록	차도용 인터록킹블록
휨강도(kg/cm ²)	56.6	65.1	61.0	68.2	50	60

인공골재를 사용한 콘크리트 블록의 경우에는 대부분이 56~65kg/cm²정도를 나타내고 있어 KS 규정을 대체로 만족하고 있다.

3.5 중금속용출실험

본 연구에서 사용된 골재를 채취하여 중금속 용출실험을 실시하였다. 실험방법은 미국의 TCLP와 한국의 폐기물 공정 시험법을 대상으로 하였다. 그 결과 규제하고 있는 중금속인 Ba, Cd, Pb, Se 모두가 기준치의 10%이하로 검출되었다.

표 9 주요 중금속에 대한 중금속 용출실험 결과

구분	Cd(mg/L)	Cr(mg/L)	Cu(mg/L)	Pb(mg/L)	Zn(mg/L)
국내규정실험 1회	N.D.	0.017	N.D.	N.D.	0.014
국내규정실험 2회	N.D.	0.018	N.D.	N.D.	0.014
폐기물관리법기준	0.2	1.5	3	3	
TCLP 1회	N.D.	0.018	N.D.	N.D.	N.D.
TCLP 2회	N.D.	0.017	N.D.	N.D.	N.D.
TCLP 기준	1	5		5	

4. 결 론

산업부산물인 fly-ash, bottom-ash를 골재 및 시멘트의 대체재료로 사용하기 위하여 제조한 콘크리트 2차제품인 인공골재 콘크리트 벽돌, 중공블록, 인터록킹 블록에 대한 제조 실험 및 비중, 흡수율, 압축강도, 휨강도, 중금속 용출실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산자부 시행 “석탄회를 이용한 환경친화 전자재개발”에서 제안된 인공골재를 제조하여 체가름을 통해 환경친화적 콘크리트 블록을 제조할 수 있었다.
2. 제조된 블록의 비중 및 흡수율을 측정한 결과 비중은 1.2-1.41, 흡수율은 5.8-7.3%의 분포를 보이고 있어 KS 규정을 만족하고 있다. 이는 인공골재가 흡수율에서 가지고 있던 문제를 극복하였다. 더욱이 폴리머 함침 인공골재를 사용할 경우 비중은 1.38-1.45로 높아지지만, 흡수율은 4.0-5.5%로 크게 개선되었다.
3. 제조된 블록을 대상으로 압축강도를 측정한 결과 잔골재 치환 블록의 경우 약 130-150 kg/cm², 굵은 골재 치환 블록의 경우 약 240-300 kg/cm²의 분포를 보이고 있어 KS 규정 및 상용 벽돌의 압축강도를 상회하고 있다.
4. 제조된 블록을 대상으로 휨강도를 측정한 결과 56-68 kg/cm²의 분포를 보이고 있어 KS에서 규정하는 보차도용 인터록킹 블록의 규정치 60 kg/cm²을 만족하고 있다.
5. 위의 결과에서 FA, BA 인공골재를 이용한 콘크리트 벽돌의 경우에는 실제 상용화된 블록과의 비교에서 거의 대등한 성능을 보여주고 있으므로 추가적인 연구를 통해 추가보완이 이루어진다면 실제 현장에서 충분히 적용 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Sadayuki Shinozaki, “日本の 石炭灰 再活用 現況”, International Workshop on Utilization of Fly Ash, pp.19. 1996.
2. John Cavill. “Process for Forming Solid Aggregate Including Shaped Articles”. HOWLETT, 1992.
3. Joseph. R. P. and Gary T. R., “Aqueous Reaction of Fly Ash and Ca(OH)₂ to Produce Calcium Silicate Absorbent for Flue Gas Desulfurization,” Environ. Sci Technol. 22, pp.1299~1304, 1988.
4. 이상경, “NaOH 용액으로 처리한 fly ash의 Cu(II), Pb(II)ion 收着能,” 한양대학교 대학원, 석사논문, 1997.
5. Min-hong Zhang et. al., “Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete”, ACI Materials Journal, No.88-M19, pp.150~158, 1991.
6. “International Ash Utilization Symposium”, ACAA, 1993-1999.
7. 조병완, 산업자원부, “석탄회를 이용한 환경친화 전자재개발”, 에너지관리공단, 2002.