

석탄회를 이용한 환경친화적 프리캐스트 블록의 개발

The Study on the ECO Artificial Precast Block using Coal-ash

조 병 완*
Jo, Byung Wan

권 병 윤**
Kwon, Byung Yun

박 승 국***
Park, Seung Kook

김 진 일****
Kim, Jin Il

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 Precast block for environment-friendly secondary product and compare strength special quality of this block with existent common use brick and analyze application possibility in situ with a reserve experiment that measure strength property and manufacture 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. 우리나라는 석탄화력 발전이 전체 전력 구성원의 30% 이상을 차지하며, 그에 따른 석탄회의 발생량도 1997년 320만 톤에서 현재 500만 톤 이상으로 점진적으로 증가하고 있다. 우리나라에서는 석탄회 재활용율이 96년도 22%에서 98년도 32%(118만톤)로 점차 증가 추세에 있으나 가까운 일본만 하더라도 94년에 이미 64%의 재활용율을 기록하는 등 선진국과 비교하면 아직도 매우 저조한 실정이다.^{1), 2)}

따라서, 본 연구에서는 보령 화력발전소에서 발생한 석탄회를 환경친화적인 2차 제품으로 처리하기 위한 석탄회 고화체의 제조방법 및 강도특성과 품질을 측정할 예비실험을 바탕으로 프리캐스트 블록을 제조하고 이 블록의 강도특성을 기존의 상용벽돌과 비교하여 실제현장에서의 적용가능성을 분석하였다. 기존의 석탄회 처리기술이 대부분 고온소성에 의한 방법에 치중되어 있으나 고온소성에 의한 방법은 에너지가 많이 소모되며, 또한 흡수를 저감대책으로 폴리머 함침을 실시하였으며, 마지막으로, 칼라 인터록킹 블록을 제조하고 이에 대하여 고찰하였다.

2. 최적 배합비 결정

2.1 사용재료

실험에 사용된 재료는 보령화력 발전소에서 발생하는 유연탄 Fly ash(이하 FA), Bottom ash(이하 BA) 첨가제로는 점결제, 결합제, 일반 포틀랜드 시멘트, 금속산화물을 이용하였다. 실험에 사용된 FA와 BA의 물리, 화학적인 성질은 표 1과 같다.

* 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 원주지방국토관리청 도로국장

*** 정희원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

**** 한양대학교 토목공학과 석사과정

표 1 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 (%)
FA	2.34	12미만	57.09	24.66	10.5	2.58	1.37	0.94	-	-
BA	1.98	13.4	50.29	24.08	3.81	3.05	1.28	-	1.37	0.84

칼라 프리캐스트 블록의 제작에 필요한 안료에는 무기안료와 유기안료가 있는데 무기안료는 발색성분이 무기물로 이루어져 있어 일반적으로 열, 빛, 알칼리 등에 대해서 화학적으로 안정하며, 밀바탕 또는 골재의 색을 보이지 않게 하는 능력이 큰 반면에 유기안료에 비해 색상강도가 높지 않은 단점이 있다. 그러나 유기안료는 내구적이지 못하고 색이 바래기 쉬운 단점이 있으므로 본 연구에서는 무기안료를 착색 안료로 선택하였다.

본 연구에서는 B사의 안료를 선정하였다. B사의 안료는 물에 불용성이며 알칼리 저항성이 있는 제품으로 콘크리트의 혼합성, 경화과정 및 최종제품의 기계적 강도에 영향을 미치지 않는다는 점이 이미 검증된 제품이다. B사 안료의 입자 크기는 0.09-0.70 μ m를 보이고 있으며 B사의 자료에 의하면 압축강도 및 휨강도 저하율은 3% 이하로 나타나고 있다. 여러 색상의 안료중에서 본 실험에서는 주로 산화철계의 적색을 주로 사용하였다. B사의 안료를 KS M 5102의 품질기준과 KS M 5131의 안료시험방법에 따라 실험한 물성은 다음 표 2와 같다.³⁾

표 2 B사의 적색 산화철 안료의 물성

	Fe ₂ O ₃	강열감량(%)	물용해분(%)	수소이온농도	체(No.325) 불통과분(%)
B사 적색안료	98.7	0.94	0.4	6.6	0.26
KS M 5102	99.3	0.91	0.1	3.2	0.28

2.2 최적배합비

본 연구에서 사용된 최적배합비는 표 3과 같다.⁴⁾

표 3 프리캐스트 블록에 사용될 배합비

	FA : BA	시멘트(%)	점결재(%)	결합재(%)	금속산화물(%)
FA 단독	1 : 0	10	15	10	5
FA와 BA 혼합물	6 : 4	10	15	15	5

2.3 칼라 프리캐스트 블록의 최적배합비 실험

본 연구에서 안료의 최적배합비를 결정하기 위하여 적색안료를 백색시멘트에 혼입하였을때의 압축강도를 측정하여 가장 높은 배합비를 찾았으며 이를 위해 사용한 배합비 및 압축강도는 표 4와 같다. 시멘트는 A사의 백색 포트랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재는 조정중사를 사용하였다. 성형은 일반적인 모르타 강도측정용 큐빅공시체용 몰드를 이용하여 성형하였고 KS F 4419의 초기양생기준을 따라 성형 후 최고 60 $^{\circ}$ C로 설정된 건조로에서 증기양생을 약 24시간 실시한 후에 14일간 상온에서 양생하였다.

표 4 안료 배합비 결정에 사용된 배합비 및 압축강도 측정결과

	C(kg/m ³)	W(kg/m ³)	S(kg/m ³)	안료	압축강도
B-0	300	60	1500	0(0%)	235 kgf/cm ²
B-25	300	60	1500	7.5(2.5%)	238 kgf/cm ²
B-50	300	60	1500	15(5%)	244 kgf/cm ²
B-75	300	60	1500	22.5(7.5%)	210 kgf/cm ²
B-100	300	60	1500	30(10%)	185 kgf/cm ²

압축강도 실험 결과에서 안료가 약 5% 혼입될 때까지는 강도가 오히려 증가하고 있다. 이는 안료에 의해 모르타의 내부구조가 치밀해지기 때문으로 분석된다. 그러나 7.5%에서는 약 14%의 강도저하가 나타나고 있으며 10% 혼입된 공시체의 경우에는 무려 24%의 강도저하가 나타나고 있다.

안료혼입물 변화에 따른 인터록킹 블록의 색상을 비교하기 위해 안료를 혼입한 블록을 일반적으로 활용되는 색상표기법인 표준색표집과 비교해 보았으나 상당히 난해한 작업이었으므로 직접 육안으로 색상만을 대비하였다. 그 결과 안료 5%를 혼입할 때까지는 색상강도가 증가하고 있었으나 그 이후로는 색상의 강도가 거의 증가하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 최적의 안료 배합비를 B-50으로 결정하였다.

3. 프리캐스트 블록 제작 및 실험

3.1 실험개요

본 연구에서는 위의 석탄회 최적 배합비 실험에서 얻은 배합비를 이용하여 프리캐스트 블록을 성형하였다. 선정된 블록의 모양은 일반적인 건축용 블록, 중공블록, S형 및 Y형 보차도용 인터록킹 블록으로 정하였고 각 블록에 대하여 FA만을 사용한 블록과 FA와 BA를 혼합하여 제조한 블록 두 가지에 대하여 제작하였다. 이렇게 제조된 블록에 대한 물성실험을 진행하였으며 물성실험은 KS 규정 중 콘크리트 벽돌(KS F 4004), 속빈 콘크리트 블록(KS F 4002), 보차도용 인터록킹 블록(KS F 4419)를 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. 강제몰드로 성형된 제작된 각 블록을 성형 후 24시간동안 최고 60℃의 건조로에서 건조양생하고 그 후 약 14일간 공기중에서 양생하였다



그림 1 제작된 프리캐스트 블록

또한 예상되는 높은 흡수율에 대한 저감대책으로 폴리머 함침을 실시하였다. 폴리머 함침 프리캐스트 블록의 경우 제작된 블록을 약 6시간동안 함침시킨 후에 6시간동안 공기중에서 건조시키고 약 18시간동안 최고 60℃의 건조로에서 건조하였다. 칼라 프리캐스트 블록의 경우, 현재 사용되고 있는 예를 감안하여 인터록킹 블록에만 한정하여 제작하였다. KS 규정에서 유색층의 두께를 최소 1cm로 규정하고 있으므로 본 연구에서는 유색층의 두께를 2cm로 정하였으며 몰드에 2cm 두께로 타설한 후 2시간동안 경화시킨 후 고화체블록과 같은 방법으로 성형, 양생하였다.

표 5 각 공시체별 기호

구분	경화체 블록		폴리머 함침 경화체 블록		칼라 프리캐스트 블록	
	FA	BA	FA	BA	FA	BA
기호	B-F	B-B	PB-F	PB-B	C-F	C-B

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 시험에서는 시험체는 전체 모양 그대로를 사용하였다. 비중 및 흡수율 측정결과는 표 6과 같다.

표 6 비중 및 흡수율 실험결과

기호	비중				흡수율			
	시멘트벽돌	중공블록	S형블록	Y형블록	시멘트벽돌	중공블록	S형블록	Y형블록
B-F	1.75	1.70	1.78	1.73	16.3	17.0	16.0	15.9
B-B	1.66	1.68	1.72	1.68	13.4	14.2	13.0	13.8
PB-F	1.70	1.71	1.68	1.66	7.1	7.9	6.9	6.8
PB-B	1.58	1.62	1.51	1.59	7.6	7.6	7.4	7.4
C-F	-	-	1.4	1.34	-	-	12.03	12.8
C-B	-	-	1.34	1.27	-	-	9.59	9.7
S사 벽돌	1.58				5.3			
KS 규정	1.7	1.7	-	-	7%	10%	7%	7%

B-F의 경우 기건비중이 규정치를 약간 상회하고 있으나 나머지 공시체의 경우 1.66~1.72의 값을 보이고 있어 KS 규정을 대체로 만족하고 있다.

흡수율 측면에서는 B-F의 경우 평균 16.7%, B-B는 약 13.6%의 흡수율을 보이고 있어 KS 규격을 상회하고 있으며 실제 사용되고 있는 S사 블록에 비해서도 높은 값을 보이고 있다. 흡수율 저감을 위해 폴리머 함침을 시도했을 경우, 비중은 경화체 그대로 사용했을 경우와 거의 대동소이하나, 흡수율의 부분에서는 크게 개선되어 PB-F의 경우 약 6.8~7.9%(평균 7.2%), PB-B의 경우 7.4~7.6%(평균 7.5%)의 분포를 보이고 있다. 그러므로 일반적으로 KS에서 규정하고 있는 흡수율인 7%와 10%에 매우 근접하고 있어 일반적인 건축용도의 부재로서는 사용 가능한 수준으로 사료된다.

칼라블록의 경우 백색시멘트 모르타르로 제조한 유색층의 비중이 고화체에 비해 아 기건비중이 약 1.34~1.4로 감소된 분포를 보이고 있으며 흡수율 측정 결과에서도 유색층의 낮은 흡수율의 영향으로 약 11~13%의 낮은 분포를 보이고 있다. 간단한 흡수율 저감 처리를 통해 KS 규정 이하로 낮출 수 있을 것으로 보인다.

3.3 압축강도 및 휨강도 실험

KS 4002, 4004, 4419를 기준으로 각 공시체에 대한 압축강도 및 휨강도 실험을 실시한 결과 표 7과 같은 결과를 얻었다.

표 7 압축강도 및 휨강도 측정 결과(단위: ksf/cm²)

	휨강도	압축강도		
		시멘트 벽돌	S형 블록	Y형 블록
B-F	45.3	320.64	308.6	318.62
B-B	62	338.8	322.8	330.35
PB-F	51	352.58	348.1	349.13
PB-B	65	351.8	338.3	355.11
C-F	-	-	310.3	315.5
C-B	-	-	345.2	340.0
S사 벽돌	-	186		
KS 규정	60	80	-	-

각 공시체의 압축강도가 KS규정을 3~4배 정도 상회하고 있으며 S사 시멘트 벽돌과의 비교에서도 본 연구에서 제작된 FA, BA 블록이 압축강도면에서 상당히 우수함을 알 수 있다. 폴리머 함침 경화체의 압축강도 측정 결과는 비함침 경화체의 압축강도 측정결과보다 약 10% 정도 크게 나타났으며 역시 KS 규정을 4배 가량 상회하고 있고, 칼라 프리캐스트 블록의 압축강도는 약 245~260kgf/cm²의 분포를 보이고 있어 KS 규격의 약 3배정도의 압축강도를 보이고 있으며 기존 S사 시멘트 벽돌에 비해서도 매우 높은 강도를 보이고 있다.

휨강도는 보차도용 인터록킹 블록에서 요구되는 값으로 휨강도의 측정을 위해 KS F 4419에 의한 10×10×40 cm 공시체를 제작하여 단순보의 3점재하 실험을 실시하였다. 휨강도 실험에서 B-F, PB-F 등 FA를 사용한 블록이 보도용 인터록킹 블록의 기준치인 50kg/cm² 이상을, BA를 사용한 블록이 차도용 인터록킹 블록의 기준치인 60kg/cm² 이상을 보이고 있다. 이는 콘크리트에서의 잔골재의 기능을 BA가 대행함으로써 나타나는 현상으로 보인다.

3.4 동결융해 실험

콘크리트 벽돌 및 속빈 콘크리트 벽돌은 실제 시공시 대기나 물에 잘 노출되지 않으나 보차도용 인터록킹 블록의 경우는 대기 중에 그대로 노출되어 대기온도와 물에 대한 저항성능에 따라 인터록킹 블록의 내구성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 KS F 2456의 “급속 동결융해에 대한 콘크리트 저항 시험방법”에 의하여 7.5×7.5×40 cm 공시체를 3시간 30분을 1Cycle로 하여 -18℃ ~ 4℃의 온도변화를 주고 각 10 Cycle마다 동탄성계수와 무게를 측정하는 동결융해 실험을 실시하였다.

KS F 2447, “벽돌과 점토타일 시료채취 및 시험방법”에 의하면 동결융해 Cycle이 50회를 넘어가거나 외관상 심한 파손 및 갈라짐이 발견될 경우 실험을 중단하도록 되어있다. 또한 여러 참고문헌⁵⁾에서 통상적으로 벽돌, 블록, 인터록킹 블록에 대한 기준치를 최종 50 Cycle 로 잡고있어 본 연구에서도 50 Cycle을 기준으로 하였다. 공시체는 재령 14일에서 시험을 시작하였다.

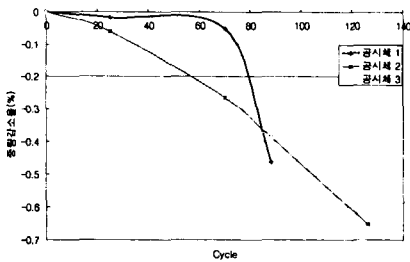


그림 2 FA 블록 중량감소율

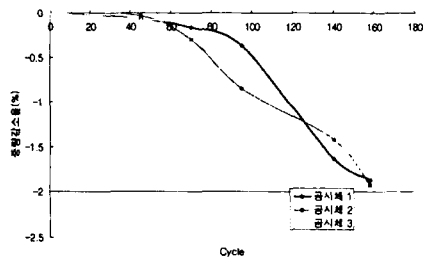


그림 3 BA 경화체 중량감소율

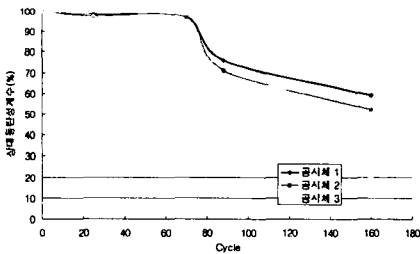


그림 4 FA 경화체 상대동탄성계수

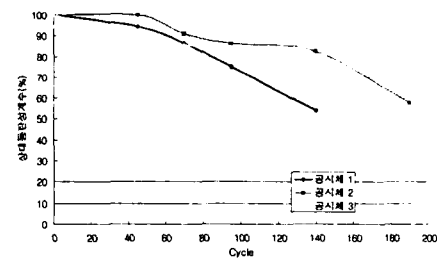


그림 5 BA 경화체 상대동탄성계수

중량 감소율은 최대 2%를 넘지 않았으며 그 경향이 상대동탄성계수의 감소 추이와 비슷하게 진행되고 있다. 50Cycle 이상에서도 동결융해 실험을 진행하는 동안 외관상으로 박리나 크랙이 발생되지 않았으며 최종 Cycle에 이르러서도 상당히 양호한 외관을 보여주고 있었다.

3.5 중금속용출실험

미국의 TCLP와 한국의 폐기물 공정 시험법을 대상으로 한 중금속 용출실험 결과 주요 중금속인 Ba, Cd, Pb, Se 모두가 기준치의 10%이하로 검출되었다.

표 8 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	

3.6 장기 야외노출 실험

마지막으로 본 실험에서 제작한 프리캐스트 블록을 실제 시공되는 모양으로 조립을 해 보았으며 조립 후 약 5개월 간 노상에서 방치해 두었다. 초기에 컬러 프리캐스트 블록에서 일반적으로 나타나는 백화현상이 약간 나타났으나 우천으로 백화현상은 사라졌고 5개월이 경과한 후에도 컬러 프리캐스트 블록의 색상은 전혀 감소하지 않았다.



그림 6 전체 블록 조립모양

4. 결 론

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

1. 전단계에서 개발한 최적 배합비로 제조한 FA 블록의 경우에는 KS규정에서 정하고 있는 비중, 흡수율, 휨강도 측면에서 KS 규정을 만족하지 못하고 있다.
2. 최적배합비로 제조한 BA 블록의 경우에는 흡수율 이외의 항목에서 KS 규정을 만족하고 있다.
3. 흡수율 저감대책으로 세운 제 2단계 실험인 폴리머 합침을 실시한 결과 흡수율은 FA 블록의 경우 16.7%에서 7.2%로, BA 블록의 경우 13.6%에서 7.5%로 크게 개선되어 KS 규정치를 다소 상회하나 대체로 만족하고 있다. 폴리머 합침을 시도한 블록의 경우 블록의 종류에 따라 차이가 있으나 압축강도에서는 약 10%, 휨강도에서는 약 10%의 강도 개선효과가 있었다.
4. 본 연구에서 개발한 FA, BA 블록에 대한 내구성 평가를 평가하기 위해 동결융해 시험을 실시한 결과 여러 논문들에서 제시하고 있는 기준치 50 Cycle 이상에서 동탄성계수의 저하 및 표면에 균열이나 박리가 발생하지 않았다.
5. 현재 사용이 확대되고 있는 컬러 인터록킹 블록을 제조하여 물성실험을 실시한 결과 흡수율, 비중의 측면에서 크게 개선되었고 압축강도의 손실은 거의 없었다. 또한 색상강도 또한 만족할만한 수준을 보여주고 있다.
6. 본 연구에서 제조한 컬러 인터록킹 블록을 실제시공과 같은 방법으로 시공한 후 5개월간 야외에서 관찰한 결과 색상의 저하가 없었으며 균열이 발생하지 않았다.
7. 위의 결과에서 BA 블록과 폴리머 합침 경화체 블록의 경우에는 흡수율 측면에서 기준에 근접하는 성능을 보여주므로 추가적인 연구를 통해 보완이 된다면 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. “International Ash Utilization Symposium,” ACAA, 1993-1999.
3. M. Sowade, “The Colouring of Concrete,” Bayer AG, 1994,
4. “석탄회를 이용한 환경친화 건자재의 개발,” 산업자원부, 2002. 1.
5. 김종목, 양순갑, “건설폐기물을 이용한 보도벽돌의 성능평가에 관한 연구,” 대한건축학회, pp. 119-126, 1999,