

석탄회를 이용한 환경친화적 인공골재 개발 (II)

The Study on the ECO Artificial Aggregate using Coal-ash (II)

조 병 완* 김 영 진** 황 의 민*** 안 제 상***
Jo, Byoung Wan Kim, Young Jin Hwang, Eui Min An, Je Sang

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. Since inherent characteristics make these by-product suitable for building materials, several types of artificial aggregates and construction bricks are manufactured and tested to verify the engineering properties.

1. 서 론

최근 국가경제 및 산업의 발전으로 전력수요가 크게 증가하면서 발전소의 증설과 함께 화력발전소에서 발생하는 석탄회도 날로 증가하고 있는 실정이다. 선진국에서는 30여년전부터 지속적인 석탄회 폐기물에 대한 이용기술 개발과 함께 이를 각종산업분야에 이용하여 최근에는 재활용률이 60%이상 되고 있으나 국내의 경우 재활용률이 아직까지는 선진국에 미치지 못하고 있어 이의 효과적인 처리가 중요한 문제로 대두되고 있다. 현재 석탄회 재활용 기술분야로는 시멘트, 레미콘 분야이외에 골재분야, 건축재료분야, 토목분야, 농업수산분야등에 이용되고 있으며 이중 골재 및 건축재료분야의 경우 석탄회를 대량으로 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 천연골재의 고갈과 쇄석채취에 따른 환경문제의 부각으로 인하여 향후골재 수급이 점차 어려워지고, 천연골재의 단가도 계속 상승함에 따라 천연골재를 대체할 인공골재의 개발이 시급하다고 할 수 있다. 또한 건설구조물이 대형화, 고급화 되어 감에 따라 구조부재의 경량화가 중요한 문제로 되어 석영이나 점토질의 고급재료를 사용하여 고비용의 인공경량골재를 제조하였고 국내에서도 석탄회, 제지슬러지 및 슬래그 등을 이용한 콘크리트 혼화재와 인공경량 골재에 대한 다수의 연구가 수행되었으나, 고온소성으로 인한 생산단가의 상승, 상대적으로 낮은 강도, 품질관리의 어려움 및 생산된 골재를 이용한 상품개발의 부진 등으로 인하여 선진외국과 비교하여 사용량이 저조한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 산업폐기물인 석탄회를 이용하여 고비용의 고온소성방법을 대신하여 비소성 방법에 의해 석탄회를 이용한 인공경량골재를 개발하여 골재 물성실험 및 강도실험을 수행하였다.

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험개요

비소성방법으로 인공경량골재를 제조하기 위해서는 Fly ash의 고형화가 가장 중요한 문제이다. 따라서 본 연구에서는 1단계로 비소성방법에 의한 Fly ash 고형화 실험을 진행하여 Fly ash를 고형화하기 위한 최적의 배합비를 찾아보았으며 2단계로 실험결과를 바탕으로 인공경량골재의 성형 및 물성실험을 진행하였다.

2.1.1 Fly ash 고형화 실험

국내외에서 연구되어 개발된 인공경량골재 제조기술의 경우 거의 대다수가 팽창혈압, 혈압등을 주된 재료로 하여 1200~1500℃의 고온에서 소성하는 방법에 한정되어 있다. 고온소성에 의한 방법의 경우 비소성방법에 비해 상대적으로 골재의 강도에는 장점을 가지고 있으나 높은 생산비용과 흡수율 등의 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 1단계로 비소성방법에 의한 Fly ash의 고형화실험을 진행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

표 1 Fly ash고형화실험 배합표 (단위:Fly ash함량에 대한 백분율)

Fly ash	결합재	점결재	시멘트	금속산화물
100	10	10	10	5

표 1의 배합비에 따라 재료를 혼합하여 공시체(5×5×5cm)를 제작, 1일후 탈형하여 24시간 건조후 상온에서 양생하였다. 7일 양생한 공시체의 압축강도를 측정된 결과 300kg/cm² 이상이였다.

2.1.2 인공경량골재성형

비소성방법에 의한 Fly ash 고형화 실험결과를 바탕으로 2단계로 골재의 성형 및 물성실험을 진행하였다. 인공경량골재의 경우 여러 가지 성형방법이 소개되어 있다. 펠레타이저를 이용한 방법은 회전하는 팬을 이용하여 응집력 있는 젖은 물질에 건조된 재료를 서서히 혼합하여 구상화하는 방법을 말한다. 압출성형기를 이용한 방법은 재료를 미리 혼합하여 압출성형기로 사출하면서 입구에 두 개의 편치를 두어서 적당한 크기로 찍어내는 방법이며 마지막으로 압축파쇄에 의한 방법은 재료를 혼합하여 넓은 공간에서 롤러등을 이용하여 압축하여 양생후 파쇄하는 방법이다.

2.1.3 인공경량골재 물성실험

인공경량골재는 깨끗하고, 강하고, 내구적이며, 적당한 입도 및 무게를 가져야하고, 콘크리트 및 강재에 나쁜 영향을 주는 유해물질을 함유해서는 안되며, 품질의 변동이 적은 것이어야 한다. 표 2, 3, 4, 5는 경량골재의 물성규정이다. 따라서 본 연구에서는 인공경량골재의 물리적 성질과 품질등을 파악하고 비교해 보기 위하여 국내산과 외국산 경량골재에 대하여 일련의 시험을 수행하였다. 골재의 물리적 성질중 비중 및 흡수율, 단위용적중량 실험을 수행하여 외국산 및 국내에서 생산중인 골재와 비교하여 본 연구에서 제조된 골재의 물성이 어느정도에 이르고 있는지를 검토하여 보았다. 국내산 골재로는 A 산 제품을 사용하였으며, 외국산으로는 일본산 골재와 독일산 골재를 시험에 사용하였다.

표 2 경량골재의 절건비중규정(JIS A 5002)

종류	절건비중	
	잔골재	굵은골재
L	1.3미만	1.0미만
M	1.3이상 1.8미만	1.0이상 1.5미만
H	1.8이상 2.3미만	1.5이상 2.0미만

표 3 경량콘크리트의 압축강도 규정(JIS A 5002)

종류	압축강도(kg/cm ²) (28일양생강도)
400	400이상
300	300~400
200	200~300
100	100~200

표 4 경량골재의 단위용적중량 최대치(KS F 2534)

종류	건조된 상태의 최대단위용적중량(t/m ³)
잔골재	1.12
굵은골재	0.88
잔골재와 굵은골재의 혼합물	1.04

표 5 경량골재의 실적율 규정(JIS A 5002)

종류	모르타르속의 잔골재의 실적율(%)	굵은골재의 실적율(%)
A	50.0이상	60이상
B	45.0이상 50미만	50이상 60미만

2.2. 실험재료

실험에 사용된 재료는 보령화력발전소에서 발생하는 유연탄 Fly ash를 사용하였으며 첨가제로는 점결제, 결합제, 일반 포틀랜드시멘트, 금속산화물을 이용하였다. 실험에 사용된 Fly ash 및 일반 포틀랜드 시멘트의 성분은 다음과 같다.

표 6 Fly ash의 물리적 특성

비중	분말도(cm ³ /g)	습분(%)	강열감량(%)	단위수량비(%)	압축강도비
2.34	3,700	0.13	3.07	99	95

표 7 Fly ash의 화학적 특성

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)
57.09	24.66	10.5	2.58	1.37	0.94

2.3. 실험방법

2.3.1 인공경량골재성형실험 및 물성실험

고온소성시 인공골재의 경제성을 고려하여 제조공정이 비교적 간단하고 대량생산이 가능한 비소성 압축파쇄에 의한 방법을 이용하여 골재를 성형하였다. 배합비에 따라 고상의 재료를 2분간 건비빔후 액상의 재료를 혼합하여 3분간 비빔하였다. 혼합된 재료를 특수제작된 압축성형 몰드에 집어 넣은 후 압력을 가하여 압축한 후 24시간 양생후 탈형하였다. 탈형후 다시 24시간 건조양생후 상온에서 양생하였다. 인공경량골재의 비중은 자체의 기공으로 인하여 보통골재 보다 낮으며, 골재의 단위용적중량과 콘크리트의 중량에 직접적인 영향을 주므로 적당한 값이하로 하는 것이 중요하다. 또한 굵은 골재의

입형이 좋고 나뭇을 판정하기에는 실적을치의 여하에 따라 좌우된다. 따라서 제조된 골재의 비중 및 흡수율 물성시험을 KS F 2503, 굵은 골재의 비중 및 흡수율시험방법, 단위중량시험을 KS F 2505, 굵은 골재의 단위중량시험에 따라서 측정하였으며, 독일, 일본 그리고 국내산 인공경량골재와 비교 고찰하였다.

2.3.2 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 강도시험

본 연구에서 제작된 인공경량골재와 국내외 기존의 인공경량골재, 천연골재를 사용하여 설계기준강도 240kg/cm²로 원주형 공시체(∅10×20cm)를 제작하여 7일 양생후 KS F 2403 규정에 따라 압축강도를 측정하였다. 콘크리트 공시체 제작에 사용된 배합비는 표 5 과 같다.

표 8 콘크리트 원주형공시체 제작에 사용된 배합표

사용골재	Gmax	Slump	Air	W/C	S/a	단위량 (kg/cm ³)				혼화제 (C × %)
						W	C	S	G	
JG	15	8±2.5	4±1.5	44	46	155	352	838	535	0.2
GG	16								468	
KG	19								434	
FG	19								571	
NC	19								988	

주: JG(일본산 골재), GG(독일산 골재), KG(국내산 골재), FG(본연구에서 제조된 골재), NC(천연골재)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 인공경량골재성형 및 물성시험

Fly ash 고형화시험에서 도출한 배합비를 이용하여 인공경량골재를 제조하였다. 인공경량골재의 성형은 압축후 파쇄를 이용한 방법을 사용하였다. 제조된 골재를 독일, 일본 그리고 국내에서 생산된 인공경량골재와 같이 물성시험을 진행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

3.1.1. 비중 및 흡수율

국내외산 경량 굵은 골재에 대한 비중 및 흡수율 시험결과는 다음과 같다. 시험결과 일본산은 표건비중이 1.43, 절건비중이 1.32이고, 독일산은 표건비중이 1.25, 절건비중이 1.10로 나타났다. 국내산은 표건비중이 1.16, 절건비중이 1.00으로 외국산에 비해 비교적 낮은 비중값을 보이고 있다. 본 연구에서 제조된 골재의 경우 표건비중이 1.78, 절건비중이 1.59로 다른 골재에 비해 상대적으로 높은 수치를 나타내고 있다. 이는 고온소성시 내부에 수많은 공극이 형성되어 비소성방법에 비해 비중이 낮아지는 것으로 판단된다. 시험에 사용된 골재 모두 경량골재의 절건비중규정(JIS A 5002)을 만족하고 있다. 인공경량골재의 흡수율은 내부의 공극으로 인해 보통골재보다 높은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 이와 같은 결과를 보이고 있다. 고온소성방법에 의해 제조된 골재의 경우 절건비중과 흡수율과의 살펴보면 비중이 낮을수록 흡수율이 증가하는 양상을 보여주고 있다. 그러나 본 연구에서 제조된 골재의 경우 고온소성제조 골재보다 높은 흡수율을 나타내고 있는데 그 이유는 고온소성방법으로 제조된 골재의 경우 소성과정에서 표면이 코팅처리되어 상대적으로 흡수율이 낮은 것으로 사료된다.

3.1.2 단위용적중량 및 실적율

경량 굵은골재의 단위용적중량을 살펴보면 일본산은 0.789, 독일산은 0.678을 나타내고 있으며 국내산의 경우 0.595로 비교적 낮은 단위용적중량을 갖고 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제조된 골재의 경우 단위용적중량이 0.842으로 다른 골재보다 상대적으로 높았으나 KS F 2534의 규정값인 0.88 보다는 낮은 것으로 나타났다.

표 9 인공경량골재 물성실험결과

골재종류	표건비중 (g/cm ³)	절건비중 (g/cm ³)	흡수율 (%)	단위용적중량 (g/cm ³)	실적율 (%)
JG	1.43	1.32	7.7	0.789	59.8
GG	1.25	1.10	13.3	0.678	61.6
KG	1.16	1.00	15.5	0.595	59.5
FG	1.78	1.59	18.5	0.842	58.3

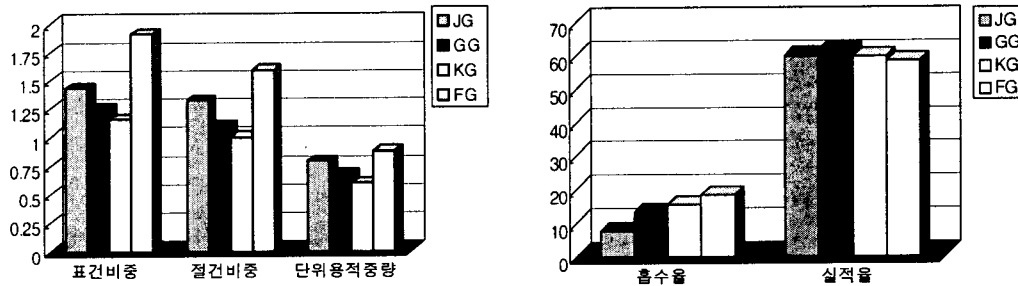


그림 1 인공경량골재 물성실험결과

3.2. 석탄회를 이용한 인공경량골재로 제작한 공시체의 압축강도

산업폐기물인 석탄회를 이용한 인공경량골재의 강도는 골재 내부의 공극의 영향으로 보통골재보다 작은 것이 일반적이다. 소성 경량골재의 경우 표면의 견고한 피막층에 의하여 다소 강도가 증가될 수 있으며 비소성 경량골재는 고온의 소성과정을 거치지 않으므로 강도의 저하를 초래할 수 있다고 알려져 있다. 본 연구에서도 보통골재를 사용한 공시체의 경우 7일강도가 평균 240kg/cm², 인공경량골재를 사용한 공시체의 경우 180kg/cm²으로 나타났다. 보통골재에 비해 25% 정도의 강도저하현상을 보이고 있다. 경량콘크리트 압축강도규정(JIS A 5002)에서 비구조용 경량콘크리트의 기준을 만족한다.

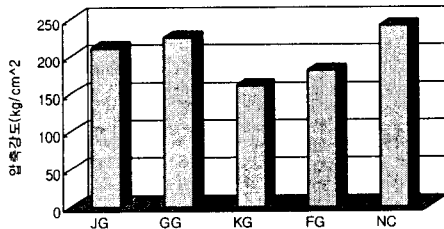


그림 2 콘크리트 공시체의 압축강도



그림 3 비소성 인공경량골재

4. 결 론

국내화력발전소에서 발전용으로 석탄을 연소시킬 때 발생하는 유연탄 석탄회를 이용하여 비소성방법으로 Fly ash 고형화 실험에서 얻은 배합비를 이용하여 압축파쇄에 의한 방법으로 인공경량골재를 제조하여 골재의 물성 실험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표건비중 1.78, 절건비중 1.59, 흡수율 18.5(%)으로 국내외 기존인공경량골재보다 상대적으로 높은 결과치를 얻었으며 JIS A 5002 경량골재의 절건비중 기준을 만족하고 있다.
- (2) 단위용적중량 0.842 (g/cm³)은 KS F 2534 구조용 경량골재의 단위용적중량 기준을 충족시키며, 실적을 58.3 (%)도 JIS A 5002 굵은골재의 실적을기준에 부합되는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) Fly ash를 이용한 인공경량골재를 굵은 골재로 사용하여 제작한 원주형공시체의 7일압축강도가 JIS A 5002 비구조용 경량콘크리트 압축강도기준을 만족하는 180kg/cm²로 측정되었다.

이상의 결과로 본연구에서 제조된 골재가 비구조용 인공경량골재로 사용가능성을 확인 할 수 있었으며 추가적인 연구를 통해 구조용 인공경량골재로 사용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 에너지관리공단에서 지원한 "석탄회를 이용한 환경친화 건자재개발" 과제수행 연구내용중 일부임을 밝히며 에너지관리공단과 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

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.