

인공경량골재의 생산기술 및 골재 특성과 적용분야

Production Technology, Property and Application of Artificial Lightweight Aggregates



김유택*
Yootaek Kim



장창섭**
Changsub Jang

1. 서론

미국과 유럽 등 서구 선진국에서는 인공경량골재 제조에 대한 연구가 19세기 말부터 시작되어 이미 상당한 수준의 성과가 있으며, 비구조용뿐만 아니라 구조용 분야에서도 폭넓게 활용되고 있다. 가까운 일본의 경우 1960년대에 이미 인공경량골재가 각종 구조물에 이용되기 시작하였다. 범지구적인 환경문제가 대두되면서 각종 산업폐기물을 인공경량골재의 원료로 재활용하는 연구도 활발히 이루어져 왔다. 그 중에서도 석탄회를 재활용한 인공경량골재에 대한 기술은 40년 전에 영국, 일본 등 선진국에서 실용화되었으며, 최근 석탄회를 포함한 각종 고상폐기물을 인공경량골재의 원료로 재활용하기 위한 연구가 널리 이루어지고 있다. 그러나 우리나라에서는 세계 각국의 인공경량골재 개발의 급진전에도 불구하고 현재까지 천연골재가 비교적 풍부하며, 인공경량골재의 원료가 되는 팽창점토와 팽창혈암 등의 부존자원이 거의 없다는 등의 여건으로 인해 인공골재 시장의 기반조차 형성되어 있지 않은 실정이다. 이러한 이유로 과거 일부 업체에서 인공경량골재 생산을 시도한바 있으나 골재의 가격경쟁력 문제를 극복하지 못하고 인공경량골재의 국산화 사업에는 성공하지 못하였다. 최근 들어 일부 경량 건축재 제조업체에서 비구조용 경량골재를 수입하여 쓰거나 ASEM 빌딩, 장경간의 상업용 건축물 등을 대상으로 고가의 수입 인공경량골재가 적용되는 등 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 국내에서도 점차적으로 골재자원의 고갈 및 무분별한 골재채취로 환경훼손에 대한 인식이 증가하고, 각종 건축, 토목 구조물에 대한 인공 경량골재의 적용 필요성 인식이 높아지고 있어 각 분야의 연구개발 노력이 활발히 진행되고 있다. 특히 바텀 애쉬와 플라이 애쉬를 포함하는 석탄회의 재활용기술 개발 연구는 국내에서도

80년대 이후 지속적으로 이루어져 왔으며, 그 결과 플라이 애쉬의 경우 콘크리트 혼화제로 대부분 재활용되고 있고, 바텀 애쉬는 미연탄분을 함유하고 있을 뿐만 아니라 입도, 비중, 흡수율 등이 불균일하여 이로 인한 품질관리의 어려움과 같은 제한이 있어 실용화가 되기 시작한 것은 최근의 일이다¹⁾.

본 고에서는 현재 (주)남동발전 산하 영흥화력본부에 설치중인 인공경량골재 상용화 시설 준공에 즈음하여 인공경량골재 관련 생산기술 및 시스템과 국내산 인공경량골재의 물리적, 역학적 특성, 국내 인공경량골재 생산 현황 및 적용 분야를 중심으로 살펴보고, 향후 전망에 대해 알아보고자 한다.

2. 인공경량골재 생산 기술 및 시스템

인공경량골재를 생산하기 위해서는 기본적으로 골재를 가볍게 할 수 있는 성분이 필요하며 이 유효 성분들이 고온에서 골재를 가볍게 만들 수 있도록 만드는 소성공정의 분위기 조절이 필수적이다²⁾. 즉 골재의 블로우팅(bloating)을 위한 성분 및 분위기 조성이 필수적인데, 국내에서 생산 예정인 인공경량골재는 석탄 화력발전소에서 발생하는 바텀 애쉬 및 발전소 건설시 발생된 준설토를 기본 원료로 사용하여 비중 0.8 ~ 2.0 사이의 인공경량골재 생산을 계획하고 있다. 인공경량골재의 원료는 위에서 언급한 인공경량골재를 제조할 수 있는 요건을 갖추면서도 100% 발전소 폐자원을 재활용한 것으로 친환경적인 에코건설 자재 생산이 가능하다.

국내의 연구진들은 석탄회뿐만 아니라 유해성분 및 중금속이 함유된 각종 폐기물을 포함해 여러 종류의 산업 폐기물을 복합적으로 사용하여 혼합공정에서 일차 안정화시키고, 성형 및 로타리킬른(rotary kiln)에서 1,100 ~ 1,200°C 정도의 고온으로 소성하여 유해성분을 제품 내에 안정화시킨다. 그리고 2차 안정화 단계를 거쳐 인공경량골재를 제조하는 기술도 개발하였다. 특히 환경오염원이 될 수 있는 성분을 인공경량골재에서 꼭 필요한 블로우팅 유효성분으로 활용하여 골재의 비중이 1.5 미만

* 경기대학교 신소재공학과 교수
ytkim@kgu.ac.kr

** 경기대학교 신소재공학과 박사과정

이며, 천연원료를 사용하는 일반적인 경량골재의 제조방식과는 달리 폐기물을 대량으로 처리할 수 있는 친환경적인 제품(Eco 제품)을 제조할 수 있는 재활용 기술을 개발하였는데에 그 의의가 있다. 물론 중금속 등 유해물질이 없는 석탄회와 같은 물질을 재활용하는 경우 1차 안정화 과정은 생략될 수 있다.

제조공정을 살펴보면 석탄회, EAF 더스트(electric arc furnace dust), 제철 슬래그, 하수오니 조각재, 석분, 제지 슬러지 조각재 등으로 이루어진 폐기물 군에서 선택된 적어도 2가지 이상의 폐기물을 각 화학 조성에 따라 조합한 혼합체를 필터 프레스(filter pressing)하여 필터 케이크(cake)를 형성하고, 숙성시킨 후 1차 성형하여 제 1성형체를 형성한다. 제 1성형체를 2차 성형하여 제 2성형체를 형성하고, 건조시킨 후 고온에서 소결하여 소결체를 형성한다. 소결체를 냉각시켜 경량 골재용 조성물을 완성한다. 즉, <그림 1>에서 보듯이 제조공정은 '원료→혼합(폐기물 + 점토)→압출성형→구상화→로타리킬른(R/K)→소성→분급→제품생산 완료' 순으로 이루어진다. 인공경량골재 제조공정은 소성 공정을 포함하기 때문에 기본적으로 원가에서 차지하는 에너지 비용의 비중이 큰 편이다. 그러나 석탄회 등과 같이 미연탄소를 다량 함유하고 있는 폐기물과 EAF 더스트, 석분, 하수 슬러지 등과 같이 다량의 알칼리, 알칼리 토금속을 함유하고 있는 폐기물을 적절히 조합해 사용함으로써 소성온도를 낮출 수 있고, 에너지 비용(에너지 수치)도 상대적으로 저렴해진다. 특히, 향후 국내 경량골재의 시장이 확대됨에 따라 해

당 인공경량골재의 양산라인의 규모가 커질 경우 에너지 비용이 크게 절감될 것으로 예상된다. 또한 사회의 다양한 요구에 따라 친환경적인 제품 이외에도 고기능성 제품이 부각되고 있는 추세이므로 단일 성능, 흡수성능 등 경량골재의 우수한 특성을 부각시킬 수 있는 용도 전개 및 고부가가치화가 진행될 수 있을 것으로 분석된다.

3. 국내산 인공경량골재의 물리적, 화학적 특성

국내에서도 점차적으로 골재자원의 고갈 및 무분별한 골재채취로 인한 환경훼손에 대한 인식이 증가하고, 각종 건축, 토목 구조물에 대한 인공 경량골재의 적용 필요성에 대한 인식이 높아지고 있어 각 분야에서 이에 대한 연구개발 노력이 활발히 진행되고 있다. 특히 화력발전소의 주요 폐기물인 석탄회의 재활용 연구에 뚜렷한 성과를 보여주고 있으며, 이러한 연구개발의 결과로 최근 석탄 화력발전소에서 발생되고 있는 바텀 애쉬를 이용한 년산 20만 m³의 인공경량골재의 상업적 제조 시설이 영흥화력본부에 설치되어 본격 가동을 눈앞에 두고 있다. 기 생산된 시제품의 경우 각종 물성이 KS 기준을 만족하였으며, 인공경량골재의 품질 수준도 국외 제품과 비교하여 동등 수준에 있다고 판단된다. <표 1>에는 인공경량골재의 물리적 특성, <표 2>에는 경량골재의 단위용적질량 규정, 그리고 <표 3>에는 외국 제품과의 품질 비교를 나타내었다.

개발된 바텀 애쉬 기반 인공경량골재를 활용하여 제조한 경량 콘크리트와 건축공사시방서 및 토목공사시방서에서 규정하고 있

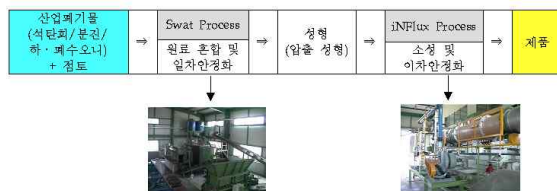
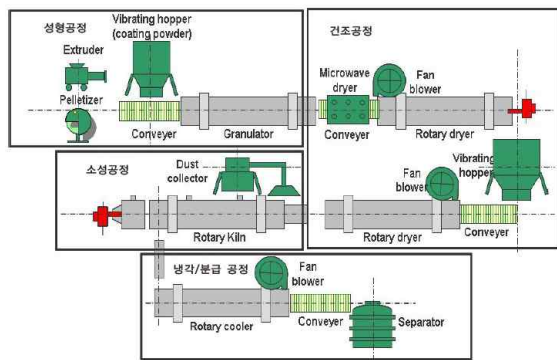


그림 1. 인공경량골재 제조공정

표 1. 국내 생산된 인공경량골재 시제품의 물리적 특성

밀도	흡수율	조립률	단위용적질량	입형
1.48 g/cm ³	19.31%	6.26	906 kg/m ³	등골고 매끄러움

표 2. 구조용 경량 골재에 규정된 경량골재의 단위용적질량

치수	건조된 상태의 최대 단위용적질량(kg/m ³)
잔골재	1,120
굵은 골재	880
잔골재와 굵은 골재의 혼합물	1,040

표 3. 인공경량골재의 품질수준 비교

생산국가명	일본(M사)	국산(시제품)	
경량골재 사진			
흡수율(%)	20.1	13.8	21.07
비중	1.32	1.38	<1
용도	구조용	구조용	비구조용

는 강도, 단위용적중량의 부합 정도를 비교 분석한 결과를 <표 4>에 정리하였다.

<표 4>에서 나타난 바와 같이 바텀 애쉬를 활용해 제조한 인공경량골재를 사용하여 제조한 경량 콘크리트의 설계 강도 대비 기건 단위용적질량은 관련시방서에서 요구하고 있는 품질수준을 충분히 만족하는 것으로 조사되었다.

4. 국내 인공경량골재 생산 전망 및 경제성

2000년 하반기 이후 건설공사의 필수 자재인 골재 부존자원의 점진적인 고갈과 더불어 환경에 대한 규제가 급속히 강화되면서 천연골재의 부족 현상이 지속되고 있으며, 갈수록 심각한 수급난이 심화되고 있는 실정이다. 골재의 수요는 향후에도 건설 활동의 증가에 힘입어 지속적으로 증가될 것으로 전망되고 있기 때문에 골재 자원의 확보가 긴요한 사안으로 부각되고 있다. 우리나라의 총 골재 수요는 현재 2.8억 m³를 넘고 있으며, 현재의 건설 활동 추세를 감안할 때 앞으로도 연평균 5% 이상 수요가 증가할 것으로 전망되고 있다. 이처럼 양질의 골재 자원에 대한 면밀한 수급 대책이 마련되지 못하여 골재의 공급이 부족하게 되면 불법 채취가 증가하게 된다. 또한 마사토나 알칼리 반응성 골재, 미세척 해사 등 저품질의 골재가 대량으로 유통될 가능성이 높아지게 되어 결국 건설 구조물의 품질 저하로 이어질 우려가 현실로 발생하게 될 것이다. 수급 불안정이 갈수록 심화되고 있는 천연골재의 대체 재료로서 천연골재 부족을 대체할 수 있는 순환골재, 인공골재 등의 추가적인 골재 자원의 확보가 필요한 시점으로 약 10여 년 전부터 관심을 가지기 시작했던 인공경량골재에 대한 환경 친화적인 개발방안에 연구개발 노력이 점차 가속화되고 있다. 그러나 경량골재, 경량 콘크리트, 경량 콘크리트 구조물 장점에 대한 인식부족 및 홍보부족, 경량 콘크리트의 장점을 살린 구조설계 기술 개발 부족, 경량 콘크리트 수요부족에 의한 경량골재 제조업체의 도산 및 부재, 비싼 외국산 경량골재의 수입에 의한 경량골재의 경제적 이미지 악화, 경량

골재 및 경량 콘크리트에 대한 재료/시공 측면 연구개발 부족, 경량 콘크리트를 이용한 구조물의 구조 성능 연구개발 부족, 경량골재 및 경량 콘크리트에 대한 각종 규격, 표준 및 시방서의 부족 등 국내의 현실적인 이유로 최근까지 제조 및 실용화 단계는 미흡한 실정이다. 그러나 고갈되는 자연골재로 인한 부족한 골재공급을 환경 폐기물을 재활용한 인공경량골재로 대체한다면 국가경제의 부가가치를 제고하는 획기적인 방안이 될 것이라 생각되며, 최근 석탄 화력발전소에서 발생되고 있는 바텀 애쉬를 이용한 연산 20만 m³의 인공경량골재의 상업적 제조 공장이 인천 영흥화력본부에 설립되고 있음은 국내 건설 산업과 자원 재활용 측면에서 긍정적인 신호로 판단되어 진다.

건축물에 경량골재 콘크리트를 사용하는 목적은 첫째, 경량화에 따른 구조물의 자중 경감과 그에 따른 부재응력의 감소와 부재단면의 축소를 통한 경제성의 확보이고, 둘째, 경량골재 콘크리트가 지닌 우수한 내화성능 및 단열 성능의 적극적인 활용 등이다^{3,4)}. 이러한 목적을 위하여 경량골재에 대한 성능향상 및 고강도화에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 선진 외국의 경우 성능이 개선된 고강도 경량골재 콘크리트의 개발 및 현장 적용이 적극 도입되고 있는 실정이다. 재료·시공 측면에서 경량골재 콘크리트는 경량골재의 높은 흡수율 및 이에 따른 동결융해 문제, 경량 콘크리트의 초경량화, 고강도화 및 고인성 요구, 경량 콘크리트의 펌프 시공시 발생하는 물성변화 및 폐쇄 방지 등 시공성능 향상 문제와 함께 값싸고 안정적으로 공급이 가능한 경량골재의 대량생산 문제 해결이 긴밀하게 요구되고 있다.

5. 인공경량골재의 환경적 장점 및 적용 분야

인공경량골재는 단순매립하고 있는 석탄회를 비롯한 EAF 더스트, 하수오니 석분 등 환경오염 물질을 환경 친화적인 골재로 재활용함으로써 고부가가치화 재활용기술을 확보하고, 화력발전소 및 제철소, 하수오니 처리시설의 고질적인 문제인 포화상태의 매립장 수명연장 및 처리비용 감소 효과와 부족한 골재 수요 충당 및 수입대체효과를 기대할 수 있다.

인공경량골재는 기존의 천연보통중량 골재가 지니지 못한 콘크리트의 경량화를 가능케 하여 기존 건물의 층축, 고층건물의 경량화에 의한 구조 부재의 단면감소 및 공간효율 증대, 방음성능과 흡음성능을 지닌 경량 콘크리트 판넬의 제조 등에 직접 활용·적용이 가능한 기술로써, 기공구조에 의한 흡음성, 단열성, 경량성으로 인하여 경량 콘크리트 판넬, 방음벽/흡음벽 재료, 아파트 층간소음방지용 채움재, 구조용 경량 콘크리트에 사용가능하며, 입자크기 조절이 가능한 기술이므로 방음 판넬, 보온 판넬의 생산에 요구되어지는 인공경량골재의 특성을 조절할 수 있어 다양한 분야의 건설 산업의 발전에 기여할 것으로 생각된다^{5,6)}.

표 4. 바텀 애쉬 인공경량골재 사용 경량 콘크리트 시방서 부합도

규격명	관리항목	품질기준	인공경량골재	부합도	
건축공사 표준시방서	경량 콘크리트 1종	설계기준강도 (MPa)	18, 21 24	24	◎
		기건단위용적 중량의범위 (tonf/m ³)	1.7 ~ 2.0	1.7 ~ 1.8	◎
토목공사 표준시방서	경량 콘크리트 1종	설계기준강도 (MPa)	15, 21 24	24	◎
		기건단위용적 중량의범위 (tonf/m ³)	1.7 ~ 2.0	1.7 ~ 1.8	◎

<표 5>에 인공경량골재의 적용 가능분야를 나타내었다.

6. 결론

우리나라에서는 세계 각국의 인공경량골재 개발의 급진전에도 불구하고 현재까지 천연골재가 비교적 풍부하며, 인공경량골재의 원료가 되는 부존자원이 거의 없다는 등의 여건으로 인공골재 시장의 기반조차 형성되어 있지 않은 실정이다. 하지만 국내에서도 점차적으로 골재자원의 고갈 및 무분별한 골재채취로 인한 환경훼손에 대한 인식이 증가하고, 각종 건축, 토목 구조물에 대한 인공 경량골재의 적용 필요성에 대한 인식이 높아지고 있어 각 분야에서 이에 대한 연구개발 노력이 활발히 진행되고 있으며, 인공경량골재 제조 기술은 상용화 단계까지 이르고 있다. 외국의 경우 인공경량골재의 상용화가 20세기 초반부터 이루어져 활성화되어 있다. 선진국의 예를 보면 국민소득부터 인공경량골재의 수요가 증가하는 것을 감안한다면, 국내에서도 곧 충분한 수요가 창출될 것으로 생각된다. 인공경량골재의 잠재수요 시장은 매우 다양하여 경량 레미콘, 경량 콘크리트 패널, 방음벽, 층간 소음재, 단열재, 경량인조석, 주택 및 건물 녹화용 소재(조경석 및 콩자갈) 등의 시장에서 인공경량골재의 수요가 기대된다. 본격적인 재건축 및 리모델링이 진행되면 경량 콘크리트의 가파른 수요 증가가 예상된다. 향후 초고층 빌딩, 장경간 교량, U-Eco City, 환경친화형 건축재 개발 등의 프로젝트가 시행되면 인공경량골재의 사용은 필수불가결한 것이어서 가까운 미래

에 수요가 급속히 늘어날 것으로 판단되고 있다. □

참고문헌

- Lo, T. Y., Cui H. Z. and Li, Z. G., "Influence of Aggregate Pre-wetting and Fly Ash on Mechanical Properties of Lightweight Concrete", *Journal. Waste Management*, Vol. 24, No. 4, 2004, pp. 333 ~ 338.
- Negre, F, Barba, A., Amoros J. L. and Escarkino, A., "Oxidation of Black Core During the Firing of Ceramic Ware-2. Process Kinetics", *Journal. Br. Cream. Trans.*, Vol. 91, 1992, pp. 5 ~ 11.
- Lo, T. Y., Cui, H. Z., "Effect of Porous Lightweight Aggregate of Strength of Concrete", *Journal. Materials Letters*, Vol. 58, No. 6, 2004, pp. 916 ~ 919.
- Choi, S. J., S.Y. Lee, B.C. Yeo, M.H. Kim, "An Experimental Study on the Properties of Crushed Sand in Capital Region and Concrete according to the Replacement Ratio of Crushed Sand", *Journal Korea Institute, Const*, Vol. 1, 2005, pp. 63 ~ 68.
- Kang, S. D., "A Study on Manufacturing of Autoclave Lightweight Concrete with Fine Sludge of Crushed Sand", *Journal Korea Institute, Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 35, No. 3, 1998, pp. 264 ~ 269.
- 김재성, 배준영, 강석표, 김경덕, 주동철, 김정환, '천연골재 대체골재로서 재생골재를 사용한 건조모르타르 적용에 관한 실험적 연구', 시멘트 심포지엄, Vol. 32, 2005, pp. 222 ~ 227.
- James S. Reed, in "Introduction to the principles of ceramic processing(John Wiley & Sons, New York)" 1989, 24 pp.
- 曾根徳明 外, 石炭灰を多量に混用したコンクリートの配合設計に関する一考察, セメント・コンクリート論文集, Vol. 50, 1996, pp. 726 ~ 731.
- 谷川公一 外, 石炭灰を多量に混用したコンクリートの諸特性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, 1995, pp. 331 ~ 336.
- 柴井建二 外, 石炭灰を原料とした人工軽量骨材を用いたコンクリートの流動性と強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, 1995, pp. 411 ~ 416.

표 5. 인공경량골재의 적용가능 분야

구분	용도	비고
토목구조용 콘크리트	도로, 교량의 바닥판 및 포장 콘크리트	경량 및 진동에 의한 노면 균열 방지
	교각	-
	경량 아스팔트 포장	도로표층 포장재의 노면 균열 방지
	노반재	시멘트 안정처리 노반의 모래 대체
	항만 구조물	내해수성, 화학 저항성이 큼
건축재료	기초, 슬래브	쇄석 콘크리트의 워커빌리티 개선
	경량벽돌, 블럭	-
	단열 온돌판 온돌 바닥재	우리나라 특유의 건축재로서 온돌 파이프에 콩자갈(25 mm 이하) 대응 및 온돌판
기타	인공토양	하수처리용 미생물 담체
	수처리 여재	-
	화분석	-
	기와	-

담당 편집위원 : 양근혁(경기대학교) yangkh@kyonggi.ac.kr