

資源循環型 社會 構築을 위한 高品質 循環骨材 生産 工程 開發 研究[†]

金瑄鎬 · [‡]趙熙燦 · 安芝煥*

서울대학교 에너지시스템공학부, *韓國地質資源研究院

Development of High quality Recycled Aggregate Production Process from Waste Concrete for Resource Circulation System[†]

Kwan Ho Kim, [‡]Hee Chan Cho and Ji Whan Ahn*

Energy-system Engineering, Seoul National University 599 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea, 151-742

*Korea Institute of Geoscience and Mineral resources 30 Gajeong-dong, Yusong-gu, Daejeon, Korea, 305-350

요 약

부존자원의 대량소비로 인해 자원고갈 문제와 이에 따라 발생하는 폐기물처리 문제가 대두되고 있는 가운데 두 가지 문제를 동시에 해결하기 위해 현재의 사회구조를 자원소비형에서 자원순환형으로 변화하기 위한 노력이 진행되고 있다. 이런 노력의 일환으로 국내 발생 폐기물 중 가장 높은 비중을 차지하고 있는 건설폐기물에 관심이 급증하고 있지만 종합적인 처리에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 건설폐기물의 가장 많은 단일 물질인 페콘크리트의 자원순환을 위한 고품질 순환골재 생산 공정 연구를 진행하였다. 굵은 골재, 잔골재, 시멘트 등이 수화물의 형태로 결합되어 있는 페콘크리트를 가열전처리 방법과 Autogenous mill을 이용한 단계분리를 통해 고품질의 콘크리트용 순환 굵은 골재를 회수하였으며, 파분쇄 후 생산된 페콘크리트 미분은 sink/float 분리를 통한 비중분리 특성을 파악한 후 간섭침강분리를 통해 정제과정을 거쳐 고품질의 콘크리트용 순환 잔골재를 생산하였다. 따라서 본 연구를 통해 전체 건설폐기물 중 가장 높은 비중을 차지하는 페콘크리트를 고품질 순환골재로 재활용 할 수 있는 자원순환형 처리 공정을 개발하였다.

주요어 : 페콘크리트, Gentle breakage, 비중분리, 단계분리, 흡수율

Abstract

To solve resource exhaustion and waste management problems caused by mass consumption, there are many efforts to change from resource consumption system to recycling system. Specially, interests about management of construction waste have increased, but efficient recycling system of waste concrete is not established yet. In this study, high quality recycled aggregate processing circuit was developed to recycle waste concrete. From the waste concrete which is a hydrated compound with coarse aggregate, fine aggregate, and cement material, high quality recycled coarse aggregate for concrete making was produced by autogenous milling and heat pretreatment method. After then, refinement process was performed to separate fine aggregate and cement material from waste concrete fines by sink float separation and hindered-settling separation. As a result, high quality recycled aggregate was produced from waste concrete by developed processing circuit.

Key words : Waste concrete, Gentle breakage, Gravity separation, Liberation, Water absorption

1. 서 론

현대사회에 이르러 산업이 고도화되고 대량생산 · 대

량소비의 사회구조가 구축되면서 자원고갈, 환경오염 등 많은 문제가 발생하고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위해 국내의 폐기물 관리 체계도 많은 변화를 겪게 되었다. 유용자원의 낭비와 환경오염을 야기하는 단순 매립과 소각의 폐기물 관리체계를 탈피하여, 자원 순환형

[†] 2009년 5월 6일 접수, 2009년 6월 8일 수리

*E-mail: hccho@snu.ac.kr

사회 구축을 통해 과거의 자원 소비형 사회구조를 벗어나 생산, 유통, 소비, 최종 처리에 이르기까지 물질자원을 효율적으로 이용하고 재활용을 촉진함으로써 한정된 자원의 소비를 억제하고 환경에 대한 부하를 줄이는 것이 오늘날 폐기물 관리 정책의 큰 방향이 되고 있다.

국내의 폐기물 발생량 중 가장 높은 비중을 차지하고 있는 것은 건설폐기물로, 환경부 자료에 따르면 2007년 기준 하루에 17만여 톤이 발생하고 있어 전체의 약 51%를 차지하고 있다. 또한 생활폐기물 종량제 등 폐기물 감량화 정책이 추진된 이후, 생활폐기물 및 사업장 일반 폐기물의 발생량이 매년 정체상태에 있는 것에 비해, 건설폐기물은 재건축, 재개발의 활성화와 함께 매년 큰 폭으로 증가하고 있다. 따라서 전체 폐기물 관리 체계에서 건설폐기물의 관리의 중요성이 더욱 부각되고 있다.¹⁾ 여러 물질이 혼합되어 발생하는 건설폐기물 중에서 폐콘크리트는 단일물질로 가장 높은 비중을 차지하고 있고 무기성 폐기물로서 소각이 어려우며 매립할 경우 막대한 부피의 매립장이 필요하므로, 폐콘크리트를 효율적으로 처리하여 재활용하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.²⁻⁶⁾

굵은 골재, 잔골재, 그리고 시멘트 미분의 수화물로 결합되어 있는 폐콘크리트를 재활용하는 가장 일반적인 방법은 파분쇄를 통해 입도를 조절하여 순환골재로 이용하는 것이다. 이는 건설폐기물의 처리를 통한 재활용의 측면뿐 만 아니라, 부족한 골재수급문제 해결 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 최근 몇 년간 국내에서는 골재 자원의 고갈과 건설 및 토목 공사의 활성화로 인해 골재의 수급 문제를 겪어왔고, 천연 골재의 가격 상승은 전체 공사비용의 증가를 초래하였다. 또한 심화되는 환경 규제와 환경 단체의 압박으로 인해 새로운 골재 자원의 채취가 더욱 어려워질 것으로 예상되기 때문에 이러한 추세는 당분간 계속 될 것이며, 새로운 골재 자원의 확보가 절실히 요구된다. 이러한 문제들을 해결할 수 있는 가장 현실적인 방법이 바로 폐콘크리트로부터 순환 골재를 회수하여 재사용 것이며, 순환 골재를 이용하여 천연 골재를 대체할 경우 1) 공사비용을 절감할 수 있으며, 2) 천연골재의 채취로 인한 환경 보호를 막을 수 있고, 그리고 3) 건설폐기물 매립을 위한 막대한 매립 부지를 절약할 수 있는 장점이 있다.

현재 국내에서는 약 200여개의 건설폐기물 중간 처리 업체에서 건설폐기물을 수거 및 처리하고 있으며 대부분 1, 2차 파분쇄기와 선별기를 이용해 단순 입도 제어와 이물질 제거 후 순환 골재로 사용하고 있다. 따라

서 여러 중간 처리 업체에서 생산되는 순환 골재들은 천연 골재에 비해 품질이 낮으며 균일하지 못해, 천연 골재의 대체재로 사용되기 보다는 매움재와 채움재 등 저급한 용도로 사용되었다. 그 이유는 기존 단순 파분쇄 공정에서 생산된 순환골재는 골재와 시멘트 모르타르가 완벽히 단체분리 되지 않고 결합되어 품질을 저하시키기 때문이다. 골재의 표면에 부착되어 있는 시멘트 모르타르는 높은 흡수율을 나타내어 콘크리트용 골재로 사용할 경우 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 낮은 압축강도와 내구성 등 물리적 특징이 저하되어 문제가 발생하게 된다.²⁻⁴⁾ 이에 정부에서는 유용자원을 효율적으로 재활용하고 순환골재의 품질을 확보하기 위하여 2003년 12월 '건설폐기물의 재활용 촉진을 위한 법률'을 제정하고 제 36조의 규정에 의하여 순환 골재의 용도별(도로공사용, 콘크리트용, 아스팔트콘크리트용) 품질에 대해 인증을 부여하는 '순환골재 품질인증제도'를 시행하고 있으며,⁷⁾ 처리 업체에서도 용도별 적합한 품질을 만족하는 순환골재를 생산하기 위한 공정을 개발하고 있다.

이에 본 연구에서는 자원 순환형 사회 구축의 일환으로 단순히 폐콘크리트로부터 순환골재를 생산하여 단순 재활용하는 것을 극복하기 위하여, 폐콘크리트로부터 콘크리트용 천연골재를 대체할 수 있는 고품질 순환골재 생산 공정 구축에 대한 연구를 진행하였다. 우선적으로 고품질의 순환골재 생산을 위해 기존의 단순 파분쇄 공정의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 공정을 개발하였다. 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리를 증진시킬 수 있는 가열전처리 방법과 autogenous mill을 이용해 고품질의 콘크리트용 순환 굵은 골재를 생산 연구를 진행하였으며, 그 후 파분쇄 공정에서 발생한 폐콘크리트 미분에서 순환 잔골재와 시멘트 미분을 분리하기 위한 공정을 추가로 진행하였다. 이 두 물질을 분리하기 위하여 잔골재와 시멘트 미분의 비중 및 입도 차이를 이용하여 잔골재와 시멘트 미분의 비중 및 입도 차이를 이용하였으며, 비중액을 이용한 sink/float 분리를 통해 비중에 따른 분리 폐콘크리트 미분의 분리 특성을 파악하였다. Sink/float 분리 결과를 이용하여 연속식 공정을 위해 간섭침강분리 장치를 이용 하였으며, 이 공정을 통해 고품질의 콘크리트용 순환 잔골재와 시멘트 미분을 분리하였다.

2. 실험 방법

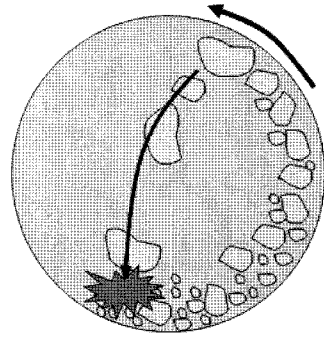
2.1. 순환 굵은 골재 생산을 위한 파분쇄 공정

파분쇄 실험에 사용된 폐콘크리트 시료는 현재 운영

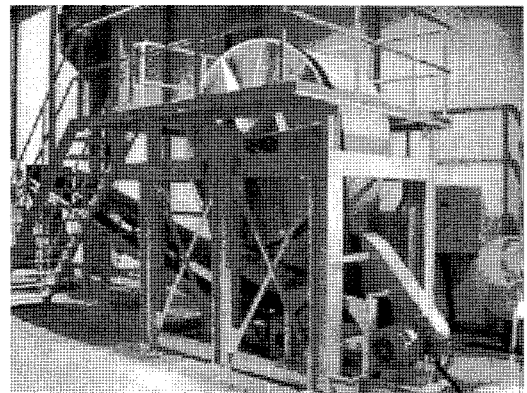
중인 건설폐기물 중간 처리 업체의 1차 조크러셔 생산물에서 획득한 것으로, 파분쇄 실험 전에 플라스틱, 나무 등 이물질들을 제거하여 최대입도 106 mm를 기준으로 $\sqrt{2}$ 간격으로 입도구간을 나누어 전체 입도를 분석하였다. 분석된 시료는 파분쇄 공정 전에 골재와 시멘트 모르타르의 분리를 증진시키기 위하여 가열전처리 방법을 수행하였다. 폐콘크리트를 가열처리를 하면 수화반응의 역반응이 발생하여 폐콘크리트의 강도가 저하되며, 천연골재의 열팽창률($5\sim 13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)과 시멘트 모르타르의 열팽창률($11\sim 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)의 차이에 의해 두 물질의 계면에서의 강도가 저하되어 선택적 파괴가 발생하게 된다⁸⁾. 일반적으로 폐콘크리트의 강도를 저하시키면서 골재의 강도에는 영향을 미치는 않는 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 가 적절하다고 알려져 있으며, 본 실험에서는 400°C 에서 1시간 동안 가열전처리 공정을 수행하였다.

폐콘크리트 파분쇄 실험에 사용된 autogenous mill(Fig. 1-a)은 일반적인 불밀과 같이 원통형의 구조로 되어있으며, 원통이 회전하면서 밀 내부의 시료가 충격을 받아 파분쇄가 이루어지게 된다. 그러나 불밀과의 가장 큰 차이점은 불밀은 밀에 투입된 불의 충격에 의해 시료를 분쇄되는 반면에, 본 실험에 사용된 autogenous mill은 시료 자체가 낙하하여 그 충격에 의해 파분쇄가 일어난다. 이렇듯 autogenous mill은 gentle breakage를 파분쇄 메커니즘으로 하고 있으며, 일반적으로 gentle breakage는 두 가지 이상의 물체가 존재할 때 경계면을 따라 분쇄가 이루어진다고 알려져 있다.⁹⁾ Autogenous mill의 gentle breakage에 의한 폐콘크리트의 파분쇄는 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리를 증진시킬 뿐만 아니라 골재에 직접적으로 가해지는 충격이 적어 골재 내부의 손상을 최소화 하는 장점을 갖고 있다. 또한 autogenous mill의 또 다른 분쇄 메커니즘인 abrasion/chipping은 순환 골재의 표면을 서로 마모시켜 순환골재 표면에 부착되어 있는 시멘트 모르타르를 탈착시키는데 매우 효율적이다. 따라서 본 실험에 사용된 autogenous mill은 생산된 순환골재 내부에 손상을 최소화하면서 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리를 최대화할 수 있으므로 고품질 순환골재 생산에 매우 적합한 파분쇄 장비이다.

실험에 사용된 pilot scale autogenous mill(Fig. 1-b)은 지름 2000 mm, 길이 800 mm의 원통형이며, 밀 내부에는 2개의 lifter가 존재하여 원통의 회전에 따라 효율적으로 골재를 낙하할 수 있게 하였다. 밀의 회전속도는 밀의 최대입계속도의 70%인 20 rpm으로 고정하였으며, 시료 장입량은 밀 부피의 10%인 300 kg을 사용하였다.



(a) Schematic diagram of autogenous milling



(b) Pilot scale autogenous mill used in this study

Fig. 1. Autogenous mill.

2.2. 폐콘크리트 미분 분리를 위한 정제 공정

폐콘크리트 파분쇄 공정을 통해 생산된 미분(4.75 mm)에 혼재되어 있는 순환 잔골재와 시멘트 미분을 분리하여 콘크리트용 고품질 순환 잔골재를 생산하기 위한 연구를 진행하였다. 폐콘크리트 미분에 혼재되어 있는 두 물질의 비중에 따른 분리 특성을 파악하기 위하여 비중액을 이용한 sink/float 분리를 실시하였다. 실험에 사용된 비중액은 사염화탄소(Samchun, 99.0%, 비중 1.6 g/cm^3)와 디브로모메탄(Alfa Aesar, 99.0%, 비중 2.6 g/cm^3)을 혼합하여 비중 2.2 g/cm^3 부터 2.6 g/cm^3 까지 여러 비중액을 만든 후 사용하였다. 비중분리를 통해 분리된 시료들의 회수율과 물리적 특성을 파악하였으며, 이를 통해 폐콘크리트 미분의 분리 가능성을 파악하였다.

Sink/float의 비중분리 실험결과를 이용하여 연속식 공정을 개발하기 위해 간섭침강장치(Fig. 2)를 이용한 분리 실험을 실시하였다. 간섭침강장치는 입자의 비중 및 입도에 따른 간섭침강 속도 차이에 의해 물질을 분리하는 장비로서, 오래전부터 다양한 영역에서 이용되어 왔

다. 간섭침강장치는 간섭침강 상태에서 분리 작업이 이루어지므로 일반 자유침강보다 비중차이에 의한 분리 효과를 더욱 부각시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 분리 실험에 사용된 간섭침강분리 장치는 분리가 이루어지는 지름 15.24 cm(6inch), 높이 123.5 cm의 컬럼과 시료를 공급하는 feeder, 컬럼 내 압력을 조절하는 압력센서, 하부유량 조절부로 이루어져 있다. 컬럼 상부로 페콘크리트 미분과 feed water가 투입되면, Zone B에서 입자의 간섭침강과 하부유입수의 속도차이에 의해서 분리가 발생한다. 크고 무거운 입자(순환 잔골재)들은 컬럼 하부인 Zone C로 쌓여 층을 형성한 후 배출되게 되고, 작고 가벼운 입자(시멘트 입자)들은 컬럼의 상부인 Zone A로 물과 함께 배출되어 분리가 이루어지게 된다.

컬럼 내부의 압력을 나타내는 set point는 컬럼 전체가 물로 가득 차 있는 상태(940 mm H₂O)를 '0'으로, 압력 값이 1,880 mm H₂O인 경우를 '100'으로 환산하여 컬럼 내 압력의 상대적인 값을 나타내며, 본 실험에서는 set point를 '15'로 고정하였다. 컬럼 내부의 압력이 set point보다 높아지는 경우에는 컬럼 하부의 배출구가 작동하여 하부로 시료가 배출되게 된다. 컬럼의 하부로 유입되는 물의 속도는 컬럼 내에서 분리가 일어나는 위치를 조절할 수 있으며 분리되는 위치에 따라 분리의 효율이 달라지므로, 본 실험에서는 최적의 분리 상

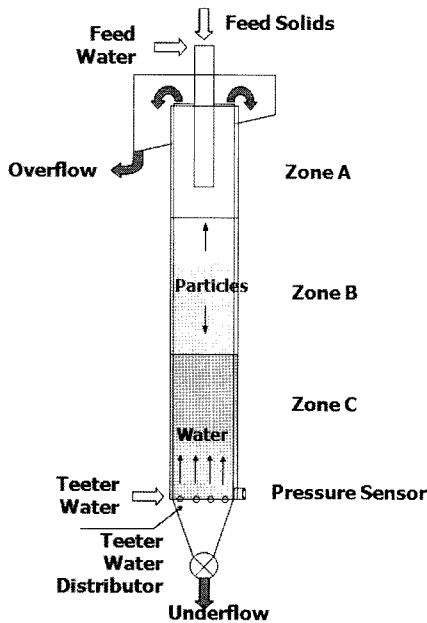


Fig. 2. Schematic of hindered settling column.

태를 도달하기 위하여 하부유입수의 속도를 9.5, 11.4, 13.3 L/min으로 바꿔가면서 실험을 실시하였다. 시료가 투입되는 속도는 약 500 g/min으로 고정하였으며, 컬럼 내부의 간섭침강분리가 steady-state에 도달한 후 상부, 하부로 배출되는 시료의 특성을 측정해 잔골재와 시멘트 미분의 분리 여부를 파악하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 고품질 순환 굵은 골재 생산을 위한 파분쇄 실험

Pilot scale autogenous mill을 이용하여 전처리 방법에 따라 페콘크리트를 10분간 파분쇄 한 결과는 Fig. 3과 같다. Pilot scale autogenous mill을 이용한 파분쇄 결과도 기존의 lab scale autogenous mill 파분쇄 결과⁵⁾와 같은 경향을 보이고 있는 것으로 확인할 수 있다. 누적입도분포곡선의 중간 영역에 평평한 부분이 존재하며, 입도분포를 살펴보면 크게 3가지 크기의 입자들로 이루어져 있다는 것을 확인할 수 있다. 5 mm 이하의 가장 작은 입도 구간에는 페콘크리트 미분이 존재하며, 중간 입도 영역(5 mm×50 mm)에서는 천연 골재의 입도를 갖고 있는 순환 굵은 골재, 그리고 아직 파쇄가 충분히 이루어지지 않은 50 mm 이상의 큰 입자가 혼재되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 전처리 방법에 관계없이 동일한 경향을 보이고 있으며, 파분쇄 공정을 통해 생산된 생성물들은 간단한 입도 분리를 통해 분리될 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 전처리 방법에 따른 파분쇄의 효율에는 차이가 나게 되며, Fig. 4에서 확인할 수 있는 것처럼 전처리한 시료가 그렇지 않은 시료에 비해 순환 굵은 골재와 미분의 발생이 많은 반면 아직 파쇄되지 않은 큰 입자는 적은 것을 확인할

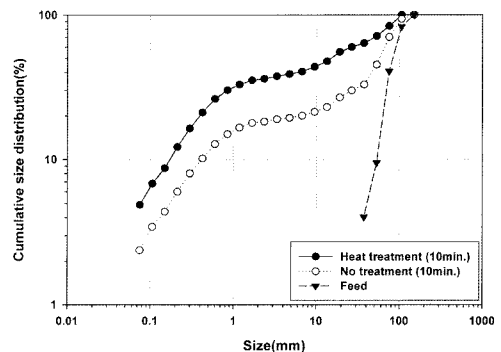


Fig. 3. Cumulative size distribution of crushed waste concrete by Autogenous milling (10min.).

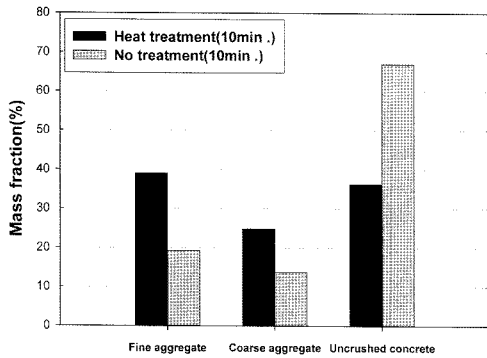
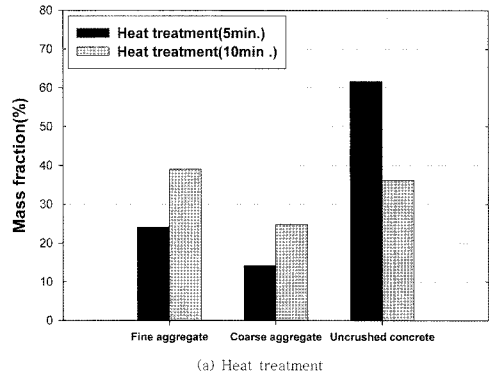


Fig. 4. Mass fraction(%) of crushed particle as a function of pretreatment method.

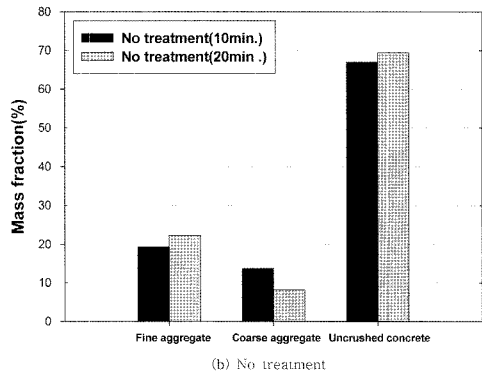
수 있다. 가열처리한 시료의 경우 전체의 순환 골재와 폐콘크리트 미분의 생산량이 각각 약 25%, 40% 인데 반해, 아무런 처리를 하지 않은 시료의 경우에는 폐콘크리트 시료가 충분히 파괴되지 않아 순환골재의 생산량이 각각 약 12%, 20%에 머물렀다. 이는 앞서 언급 하였던 가열전처리의 효과가 나타난 결과이며, 가열전처 리로 인해 폐콘크리트의 강도가 저하되어 같은 파분쇄 시간에서도 더 많은 시료가 파분쇄 되었기 때문이다.

파분쇄 시간에 따른 영향을 살펴보기 위하여 충분한 분쇄가 이루어진 가열전처리 시료의 경우에는 시간을 줄여 5분간 파분쇄를 진행하였고, 10분 동안 분쇄가 충분 히 이루어지지 않은 전처리하지 않은 시료는 파분쇄 시간을 20분으로 증가시켜 실험을 진행하였다. 그 결과 파분쇄 시간을 10분에서 5분으로 감소한 가열전처리 시 료의 경우에는(Fig. 5-a), 감소한 파분쇄 시간으로 충분 한 분쇄가 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있다. 부서 지지 않은 폐콘크리트의 양은 36%에서 62%로 크게 증가하였으며, 이로 인해 순환 골재의 생산량은 25%에서 14%로, 폐콘크리트 미분의 경우에는 40%에서 25%로 감소하였다. 이는 5분의 파분쇄 시간으로는 가열전처리한 시료의 충분한 분쇄가 이루어지지 않는다는 것을 의미하며, 순환 골재의 생산량을 위해서는 파 분쇄 시간을 10분 이상 유지하는 것이 필요하다.

파분쇄시간을 10분에서 20분으로 증가시킨 전처리하 지 않은 시료의 경우에는(Fig. 5-b) 파분쇄 시간이 증가 했음에도 불구하고 파분쇄가 크게 증가하지 않음을 확 인할 수 있다. 아직 부서지지 않은 큰 입자의 경우에는 파분쇄 시간에 관계없이 전체의 약 65%를 차지하였는 데, 이는 두 가지 이유를 통해 설명할 수 있다. 첫 번째로 전처리하지 않은 폐콘크리트의 경우에는 강도가



(a) Heat treatment



(b) No treatment

Fig. 5. Mass fraction(%) of crushed particle as a function of breakage time.

유지되어 이를 파괴하기 위해서는 가열전처리한 시료에 비해 훨씬 더 많은 에너지가 필요하며, 비록 파분쇄 시 간이 증가하였다 하더라도 강도가 유지되는 폐콘크리트 의 추가적인 파괴를 위해서 필요한 충격이 부족하다는 것을 의미한다. 이는 기존에 수행되었던 폐콘크리트 입 자의 낙하실험에서도 확인할 수 있는데, 처리하지 않은 시료의 경우 가열전처리한 시료와 동일한 수준으로 파 괴하기 위해서 3배 이상의 충격이 필요하였다.¹⁰⁾ 두 번 째는 파분쇄 과정에서 생산된 미분으로 인해 폐콘크리 트 입자가 받는 충격이 감소하였기 때문이다. 밀 내에 존재하는 미분들은 충격을 흡수하는 쿠션작용을 하며 이 로 인해 파분쇄 시간이 크게 증가하였지만 실질적으로 폐콘크리트 입자가 받는 충격은 크게 증가하지 않아 추 가적인 파분쇄가 발생하지 않았다. 이에 비해 4.75 mm 이하의 미분 발생량은 20%에서 23%로 소폭 증가하고, 반대로 순환 골재의 생산량은 14%에서 8%로 소 폭 감소하였는데, 이는 파분쇄 시간이 증가함에 따라 밀 내의 입자간 마모가 더 진행되어 순환 골재 표면 에서 분리된 시멘트 모르타르 미분 발생량이 증가했다

Table 1. Water absorption(%) of recycled coarse aggregate (Unit : %)

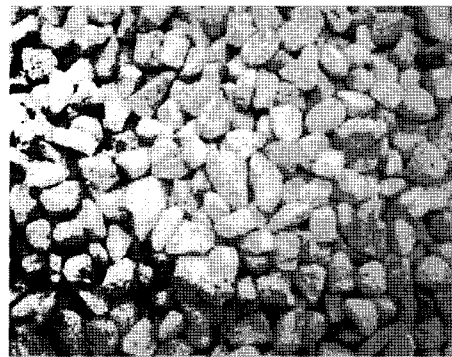
		6.7 mm ×4.75 mm	9.52 mm ×6.7 mm	13.4 mm ×9.52 mm	19.1 mm ×13.4 mm	26.5 mm ×19.1 mm	37.4 mm ×26.5 mm
Heat	5 min.	5.99	4.07	3.30	2.85	5.14	6.66
	10 min.	3.80	2.57	1.96	2.05	2.16	2.34
No	10 min.	4.08	3.18	2.25	2.40	2.77	2.37
	20 min.	3.38	2.61	2.78	2.39	2.84	5.19

는 것을 의미한다.

Autogenous mill의 파분쇄 실험을 통해 생산된 순환 굵은 골재의 품질을 확인하기 위하여, 순환골재의 대표적인 물리적 특징인 밀도와 흡수율을 측정하였다.¹¹⁻¹²⁾ 골재의 밀도와 흡수율은 반비례의 관계를 가지며, 골재 표면에 부착된 시멘트 모르타르의 함량이 적을수록 높은 밀도와 낮은 흡수율을 갖는다. 콘크리트용 순환 굵은 골재의 품질 기준인 흡수율 3%를 기준으로 측정결과(Table 1)를 살펴보면, 가열전처리 시료의 경우에는 5분간 파분쇄한 순환 굵은 골재는 충분한 파분쇄가 이루어지지 않아 흡수율 3%의 기준에 만족하지 못하였지만, 10분간 분쇄한 순환 굵은 골재는 대부분 입도에서 기준을 만족하였다. 전처리하지 않은 시료의 경우에도 10분 이상의 파분쇄 후에는 대부분의 입도에서 흡수율 3%를 만족하였다. 그러나 모든 파분쇄 조건에서 가장 작은 입도 구간의 흡수율이 다른 입도 구간에 비해 높게 나타났는데, 이는 단체분리된 골재와 시멘트 모르타르 입자가 완벽히 분리되지 않고 혼재되어 존재하기 때문이다. 전체적인 순환 굵은 골재의 품질을 살펴보면, 전처리 방법에 따라 크게 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있는데, 이는 autogenous mill의 특성에 기인할 것이라 할 수 있다. Autogenous mill 내부에서 순환 굵은 골재는 마모 작용을 통해 표면의 시멘트 모르타르 미분이 제거되게 되는데, 이 과정은 전처리 방법에 의한 골재와 시멘트 모르타르 단체분리 효과는 크지 않은 것으로 드러났다. 파분쇄 공정을 통해 생산된 순환 굵은 골재의 표면(Fig. 6)을 살펴보면 대부분의 골재 표면이 깨끗하고 시멘트 모르타르가 거의 부착되어 있지 않아 고품질의 순환 굵은 골재가 생산되었음을 확인할 수 있다.

2. 간섭침강분리를 이용한 순환 잔골재 생산과 시멘트 미분의 분리

Autogenous mill을 통해 생산된 폐콘크리트 미분(-4.75mm)에 포함되어 있는 순환 잔골재와 폐시멘트 미



(a) 13.4 mm × 9.52mm



(b) 19.2mm × 13.4mm

Fig. 6. Photograph of produced recycled coarse aggregate by Autogenous milling.

분을 분리하기 위해 두 물질의 비중차이를 이용한 sink/float 실험을 실시하였다. 여러 가지 비중액을 이용하여 비중분리 실험을 실시한 결과(Table 2), 비중 2.4 g/cm³ 이상의 시료에서 콘크리트용 1종 순환 잔골재의 품질(비중 2.2 g/cm³ 이상, 흡수율 5% 이하)을 만족하는 것을 확인할 수 있었으며, 비중이 증가할수록 순환잔골재의 품질은 향상되었다. 반대로 순환잔골재의 회수율(Fig. 7)은 비중이 증가할수록 감소하였으며, 비중 2.4 g/cm³일 때 약 70%의 순환잔골재를 회수할 수 있었다. Sink/float 실험결과 물질의 비중 차이를 이용하여 폐콘크리

트 미분에 혼재되어 있는 순환잔골재와 시멘트 미분을 분리할 수 있었으며, 콘크리트용 1종 순환잔골재의 생산 가능성도 파악하였다.

비중분리 결과를 이용하여 페콘크리트 미분을 정제할 수 있는 연속식 공정을 개발하기 위하여 간섭침강분리 실험을 실시하였다. 앞서 언급한 것과 같이 시료의 투입 속도와 set point값을 고정시킨 상태에서, 컬럼 내 입도 구간을 결정하는 중요한 실험 요소인 하부유입수의 속도를 변화시키면서 실험을 실시하였다. 하부에 유입되는 물의 양을 증가시키면 물의 양이 적을 때와 비교하여 상대적으로 무겁고 큰 입자까지 분리될 수 있으며, 컬럼 내부의 입자 분리가 안정 상태에 이르고 난 뒤, 상부와 하부로 배출되는 입자를 채취하여 입도 및 물리적 특성을 살펴보았다.

실험결과 상부와 하부로 배출되는 시료는 3:7의 비율로 분리가 이루어지며 분리된 시료의 성분을 파악하기 위하여 XRF분석을 실시하였다(Table 3). 그 결과 상부와 하부로 배출되는 시료의 가장 큰 성분 차이는 SiO₂와

CaO로써, 하부로 배출된 시료에서는 상대적으로 SiO₂은 함량이 높게, CaO의 함량은 낮게 분포하였으며, 상부로 배출된 시료에서는 반대의 결과를 보였다. 이는 하부로 배출된 시료에 Si성분, 즉 잔골재가 다량으로 포함되어 있으며, 상부로 배출된 시료에는 Ca성분, 즉 시멘트 미분이 다량으로 포함되어 있다는 것을 의미한다. 따라서 간섭침강분리를 통해 페콘크리트 미분 내의 잔골재와 시멘트 미분의 분리가 가능하다는 것을 확인할 수 있었으며, 잔골재와 시멘트 물질의 입도 및 비중차이에 의해서 잔골재는 컬럼 내부에서 침강하여 하부로 배출되고 시멘트 물질은 물과 함께 상부로 배출되었다.

상부와 하부로 배출된 시료의 입도 측정결과(Fig. 8)를 살펴보면, 상부와 하부로 배출된 시료의 입도가 명확히 분리된 것을 확인할 수 있다. 약 100~200 um의 크기를 기준으로 하여 상대적으로 무겁고 큰 입자들인 잔골재는 컬럼의 하부로 배출되었으며, 가볍고 작은 시멘트 입자들은 물과 함께 상부로 배출되었다. 하부유입수의 속도에 따라 하부로 배출된 입자(순환 잔골재)들의 물리적 특성 측정 결과를 콘크리트용 순환 잔골재의 흡수율 기준 5%와 함께 나타내었다(Fig. 9-a). 그 결과 가열전처리한 시료에서 생산되어 하부로 분리된 순환 잔골재의 경우 하부유입수의 속도가 11 L/min 이상의 경우 콘크리트용 순환 잔골재의 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 처리하지 않은 시료에서 생산되어 분리된 순환 잔골재는 하부유입수의 속도를 13.3 L/min

Table 2. Water absorption(%) of sink material

		2.4 g/cm ³	2.5 g/cm ³	2.6 g/cm ³
Heat treatment	5 min.	4.39	2.97	2.74
	10 min.	4.38	3.30	2.40
No treatment	10 min.	3.89	3.12	2.12
	20 min.	3.31	3.60	2.62

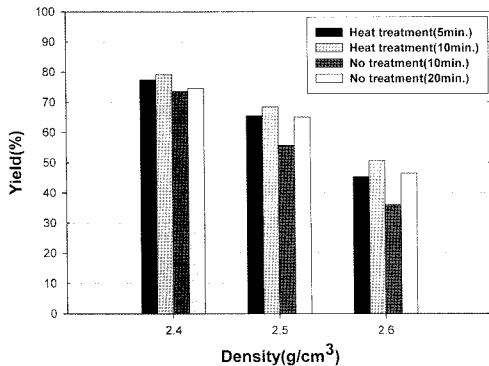


Fig. 7. Yield(%) of recycled fine aggregate by sink/float test.

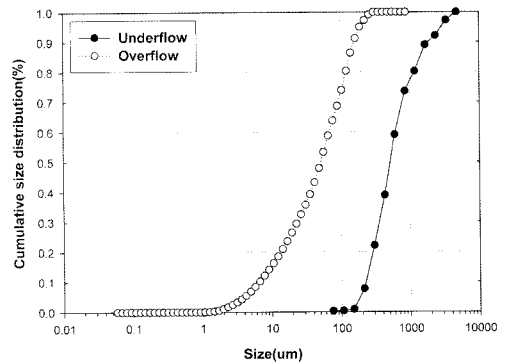


Fig. 8. Cumulative size distribution of separated material by hindered settling column.

Table 3. Chemical composition of separated materials by hindered settling column (wt%)

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Total
Underflow	72.09	7.58	0.20	1.90	0.53	5.64	0.81	3.19	0.06	6.62	98.66
Overflow	50.44	9.46	0.32	2.63	1.77	23.14	0.56	2.58	0.09	0.12	100.01

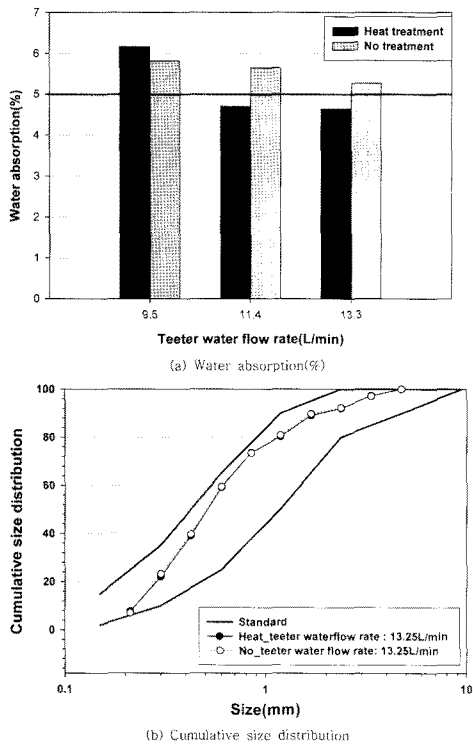


Fig. 9. Physical characteristics of recycled fine aggregate.

까지 증가시킨다 하더라도 5% 미만으로 감소하지 않았다. 이는 전처리 방법에 따른 차이로, 가열전처리한 시료의 잔골재와 시멘트 미분의 단체분리가 증진되었기 때문이다. 순환 굵은 골재와 잔골재 모두 입도 규격이 존재하지만, 특히 순환 잔골재의 경우 작업의 용이성을 확보하기 위하여 엄격한 입도 규격을 만족해야 한다. 본 실험에서 간섭침강분리를 통해 생산된 순환 잔골재의 입도를 측정하여 콘크리트용 순환 잔골재의 입도 규격과 비교해 보았다(Fig. 9-b). 입도 측정 결과 전처리 방법에 관계없이 콘크리트용 입도 규격을 만족하였으며, 이를 통해 간섭침강분리공정을 통해 폐콘크리트 미분을 순환 잔골재와 시멘트 미분으로 분리하여 콘크리트용 고품질의 순환 잔골재가 생산되었음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

자원 순환형 사회 구축을 위해 폐콘크리트를 처리하여 콘크리트용 고품질 순환골재로 재활용하기 위한 공정 개발 연구를 진행하였다. 기존 폐콘크리트 생산 공정의 한계를 극복하고 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리를

증진시켜 천연골재를 대체할 수 있는 순환골재를 생산하기 위해 가열전처리 방법과 gentle breakage/abrasion/chipping을 분쇄 메커니즘으로 하는 autogenous mill을 이용하여 파분쇄 공정을 수행하였다. 그 결과 골재 표면에서 시멘트 모르타르의 분리가 향상되어 흡수율 3% 이하의 1종 순환 굵은 골재를 생산할 수 있었다. 파분쇄 과정에서 발생된 페콘크리트 미분에 포함되어 있는 순환 잔골재와 시멘트 미분을 분리정제하기 위하여, 두 물질의 비중과 입도 차이를 이용하였다. 비중분리 결과 비중 2.4 g/cm^3 이상의 분리 시료들이 1종 순환 잔골재의 품질을 만족하였으며, 이를 연속식 공정으로 적용하기 위해 간섭침강분리를 이용해 고품질의 콘크리트용 순환 잔골재와 정제된 시멘트 미분을 생산하였다. 가열처리한 시료의 경우 하부유입속의 속도가 10 L/min 이상일 때 컬럼 하부로 배출된 시료가 1종 순환잔골재의 입도 및 품질 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 이렇듯 본 연구를 통해 기존 폐콘크리트 처리 공정의 한계점을 극복하고, 천연골재를 대체할 수 있는 콘크리트용 1종 순환 굵은 골재와 순환 잔골재를 생산하는 공정을 개발하였다. 또한 본 공정에서 부가적으로 발생하는 시멘트 미분은 시멘트 산업에 직접적으로 이용하거나, 광물 탄산화 공정 등에 재활용 될 수 있으므로, 추가적인 연구를 통해 폐콘크리트에서 발생하는 모든 물질을 재활용하는 종합 처리 공정 구축이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 환경부, 2008 : 2007 전국 폐기물 발생 및 처리 현황.
2. I. B. Topcu, 1997 : *Physical and Mechanical properties of concretes produced with waste concrete*, Cement and Concrete Research, **27**(12), pp. 1817-1823.
3. Ilker Bekir Topcu, and Selim Sengel, 2004 : *Properties of concretes produced with concrete aggregate*, Cement and Concrete Research, **34**, pp. 1307-1312.
4. C. S. Poon et al., 2004 : *Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete*, Cement and Concrete Research, **34**, pp. 31-36.
5. 김관호 등, 2007 : *Autogenous mill을 이용한 순환골재 생산 공정 개발*, 한국자원리사이클링학회지, **16**(5), pp. 25-30.
6. 오재현 등, 2008 : *건설폐기물의 리사이클링 현황과 연구 동향 - 국내자원의 유효이용을 위한 처리 및 회수기술동향*, 한국자원리사이클링학회지, **17**(2), pp. 16-29.

7. 순환골재 품질인증제도, 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률 제36조.
8. Ji Whan Ahn *et al.*, 2006 : *Advanced Process for Recovery of High Quality Recycled Aggregate from Waste Concrete*, Geosystem Engineering, 9(2), pp. 45-48.
9. Charles Burroughs Gill, 1991 : *Material Beneficiation*, Springer-Verlag, New York.
10. 김관호 등, 2007 : *낙하실험에 의한 폐콘크리트 파괴 분석*, 한국자원리사이클링학회 춘계학술대회집, pp91-94, 한국자원리사이클링학회, 포항, 2007년 5월.
11. KS F 2503 : 굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법.
12. KS F 2573 : 콘크리트용 순환 골재.

金 瑄 鎬

- 2003년 서울대학교 지구환경시스템 공학부 공학사
- 현재 서울대학교 에너지시스템공학부 에너지자원처리연구실 박사과정

趙 熙 燦

- 현재 서울대학교 에너지시스템공학부 교수
- 당 학회지 제10권 3호 참조

安 芝 煥

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제 10권 4호 참조