

高品質 循環骨材 生産을 위한 폐콘크리트의 單體分離 特性 研究[†]

† 金瑄鎬 · 文明旭 · 趙熙燦* · 安芝煥**

*서울대학교 에너지시스템공학부, **韓國地質資源研究院 資源活用素材部

A Study on the Liberation Characteristics of Waste Concrete for Production of High Quality Recycled Aggregate[†]

†Kwan Ho Kim, Myoung Wook Mun, 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, Yusung-gu, Daejeon, Korea, 305-350

요 약

1990년대 후반 이후 국내 건설폐기물의 발생량은 급격하게 증가하였으며, 이를 처리하기 위해 많은 노력을 기울인 결과 97%이상 재활용이 이루어지고 있다. 이 과정에서 폐콘크리트는 단순 파쇄를 통해 순환골재로 생산되고 있으며, 대부분 뒤채움재나 매움재 등 저급한 용도로 재활용되고 있는 실정이다. 그 이유는 골재와 모르타르의 단체분리가 원활히 이루어지지 않아 천연골재 대비 낮은 품질의 순환골재가 생산되기 때문이다. 이에 본 연구에서는 기존 순환골재 생산 공정의 문제점을 파악하기 위하여 기존 공정에서 대표적으로 사용되고 있는 파분쇄 장비를 이용한 폐콘크리트 파분쇄 실험을 통해 골재와 모르타르의 단체분리 특성을 분석하였다. 이 과정에서 골재와 모르타르의 단체분리 효율을 향상시키기 위하여 가열 전처리 방법을 도입하였으며, 우수한 단체분리 특성을 확인하였다. 파분쇄 실험 결과 기존 파분쇄 장비를 통해 생산된 순환골재는 골재와 모르타르의 계면을 따라 선택적인 파분쇄가 발생하지 않아 그 품질이 저하되었으며, 나아가 골재 자체가 충격을 받아 파괴가 일어나는 문제가 존재하였다. 이를 해결하기 위하여 골재와 모르타르의 계면에서의 선택적인 파분쇄를 유도시키는 새로운 분쇄 메커니즘인 gentle breakage를 도입하였으며, 이를 위한 기초 실험으로 폐콘크리트를 자유낙하시켜 순환골재를 생산한 결과 기존 파분쇄 장비에 비해 우수한 단체분리 특성을 확인하였다.

주제어 : 폐콘크리트, Gentle breakage, 순환골재, 단체분리, Locking Index

Abstract

In general, the waste concrete is simply crushed and reused as a recycled aggregate at a low value application such as back filling material. It because that the quality of recycled aggregate is lower than one of natural aggregate due to the insufficient liberation of aggregate and cement mortar. So in this study, the liberation characteristics of liberation of aggregate and cement mortar is analyzed to investigate the limitation of conventional crushing stage at waste concrete processing circuit. In this process, thermal treatment method is evaluated for the enhancement of liberation. From test results, the preferential breakage along the grain boundary is not accomplished by the conventional crushers. It leads a low quality of recycled aggregate and a fracture of aggregate. To solve these problems, gentle breakage is used as a breakage mechanism to induce preferential breakage along the grain boundary. The recycled aggregate produced from the free fall test, which adopts a gentle breakage, shows a better liberation characteristics and a higher quality.

Keywords : Waste concrete, Gentle breakage, Recycled aggregate, Liberation, Locking index

[†] 2010년 5월 13일 접수, 2010년 5월 28일 1차수정

2010년 6월 11일 수리

*E-mail: kiki99@snu.ac.kr

1. 서 론

자원처리 과정에서 이루어지는 분쇄 공정의 기본적인

목적은 광물의 입도 감소와 함께 맥석광물로부터 유용한 성분을 선택적으로 단체분리(liberation) 하는 것이다. 일반적으로 자연 상태에서 산출되는 유용 광물들은 대개 단일 상태로 존재하지 않으며 여러 가지 기타 광물, 맥석 등과 같이 붙어서 존재하므로, 이를 분리하기 위해서는 적당한 크기로 분쇄하는 과정이 선행되어야 한다. 이 과정에서 유용한 광물만을 선택해서 단체분리 하는 것이 중요하며, 유용 광물의 단체분리를 어떻게 효율적으로 달성하는 가는 전체적인 자원 처리 공정에 매우 중요한 역할을 하게 된다. 효율적인 단체분리를 달성하기 위해서는 유용 광물의 계면을 따라 선택적인 파분쇄가 이루어지는 것이 바람직하며, 유용 광물을 가로질러 파괴가 이루어질 경우에는 단순한 입도 감소에 그치게 된다. 이러한 원리는 비단 천연자원의 처리에만 국한된 문제는 아니며, 폐자원을 재활용하는데 있어서도 동일하게 적용될 수 있다. 많은 폐자원 역시 천연자원과 마찬가지로 유용 자원과 무용 자원이 결합된 형태로 발생하며, 이를 효과적으로 재활용하기 위해서는 파분쇄를 거쳐 유용 자원을 단체분리 시키는 공정이 필수적이다.

재활용 과정에서 단체분리가 필수적인 폐자원 중 대표적인 것이 페콘크리트이다. 페콘크리트는 콘크리트 구조물의 해체과정에서 발생하는 불연성 폐기물로서 부피가 크고 발생량이 많아 매립 및 소각 처리가 어려운 특징이 있다. 이에 정부에서는 건설폐기물, 특히 페콘크리트를 재활용하기 위해 많은 노력을 기울였으며, 2008년 기준으로 약 97% 이상이 재활용되고 있다.¹⁾ 페콘크리트를 재활용하는 가장 일반적인 방법은 페콘크리트를 파분쇄하여 입도를 감소시킨 후 순환골재로 이용하는 것이며, 이를 위해 국내에서는 현재 400여개의 건설폐기물 중간 처리 업체가 운영되고 있다. 대부분의 업체에서는 순환골재 생산을 위하여 2-3단계의 파분쇄 공정과 이물질 제거 공정, 그리고 입도 분급 공정을 조합하여 운영하고 있으나 이러한 처리 공정에서 생산되는 대부분의 순환골재의 품질은 천연골재 대비 매우 낮은 실정이다.

이렇게 생산된 순환골재는 품질이 낮고 균일하지 못하기 때문에 최근 수급에 어려움을 겪고 있는 천연골재의 대체재로 사용되기 보다는 매움재와 채움재 등 저급한 용도로 사용되고 있다. 현재 생산되고 있는 순환골재의 품질이 낮은 이유는 페콘크리트의 파분쇄 공정에서 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리가 충분히 이루어지지 않았기 때문이다. 골재의 표면에 부착되어 있는 시멘트 모르타르는 순환골재의 품질을 저하시키고, 이를 이용하여 콘크리트 제품을 제조할 시 많은 문제를

야기하게 된다. 시멘트 모르타르가 많이 부착되어 있는 순환골재는 흡수율이 증가하며, 이로 인해 콘크리트 작업시 slump와 workability가 감소하게 되고 이 과정에서 생산된 콘크리트는 낮은 압축강도와 내구성, 동결융해저항 특성을 갖게 된다.^{2,4)} 따라서 순환골재의 품질을 향상시키기 위해서는 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리를 향상시키는 것이 필수적이다.

또한 국내 천연 골재 공급원 개발에 따른 국토훼손, 자연환경파괴가 지속되고 있고, 이로 인해 막대한 국내 예산의 낭비가 초래되고 있다. 2002년 건설교통부에서 조사한 자료에 따르면 국내 천연골재 부존량이 향후 20여년 이내 완전 고갈상태에 이를 것이라는 보고가 있어, 공사수행차질 및 골재대란이 심화될 여지가 있다.⁵⁾ 이에 정부에서는 건설폐기물의 재활용을 촉진하고 순환골재의 재활용을 활성화시키기 위하여 2003년 『건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률』을 제정하고 건설폐기물 분리매출기준, 순환골재 품질기준 및 품질인증, 순환골재 사용의무 등 각종 대책의 근거를 마련하였다. 위 법률의 가장 주된 내용은 순환골재를 법적으로 규정하고, 일정규모 이상의 공공공사에 대한 순환골재 의무사용 의무를 부여한 것이다. 이로 인해 순환골재의 재활용은 더욱 활성화 될 것으로 예상되며, 현재의 채움재와 매움재와 같은 저급한 용도를 넘어서 천연골재를 대체할 수준의 고품질 순환골재의 필요성이 제기되고 있다. 따라서 기존의 단순 파분쇄로 인해 저급한 순환골재 생산의 한계를 벗어나 고품질의 순환골재를 생산하기 위해, 골재와 시멘트의 단체분리를 증진시키기 위한 새로운 파분쇄 장비 및 운전 조건에 대한 연구가 필요한 상황이다.

이에 본 연구에서는 순환골재의 생산과정에서의 여러 가지 파분쇄 장비와 전처리 방법을 이용하여 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리 특성을 분석하고자 하였다. 우선 기존 페콘크리트 처리 공정에서 가장 많이 사용되고 있는 조크리셔를 이용한 파분쇄 실험을 통해 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리 특성과 한계점을 살펴보고, 이를 바탕으로 단체분리를 향상시킬 수 있는 새로운 방법을 도입 하였다. 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리는 두 물질의 계면에서의 선택적 파분쇄를 통해 향상될 수 있으므로, 계면을 따라 선택적 파분쇄를 유도한다고 알려진 gentle breakage를 분쇄 메커니즘으로 하는 자유낙하 실험과 가열 처리 방법을 사용하여 생산된 순환골재의 품질을 기존 조크리셔를 통해 생산된 순환골재와 비교함으로써 그 효과를 검증하였다.

2. 배경 이론

2.1. 단체분리의 개념

Fig. 1에서와 같이 두 가지 성분 X와 Y로 이루어진 입자의 분쇄과정을 생각해 보면, 입자의 종류는 물질 X로 이루어진 입자와, 물질 Y로 이루어진 입자, 그리고 물질 X와 Y가 같이 존재하는 입자로 나눌 수 있다. X 또는 Y만 단독으로 이루어진 입자들은 분쇄가 진행됨에 따라 단순히 입자의 크기만이 작아지고, 입자내의 X와 Y의 비율은 변하지 않는다. 하지만 X와 Y가 같이 존재하는 입자는 분쇄가 진행됨에 따라 입자의 크기가 달라짐은 물론이고, 입자내의 X와 Y의 비율이 달라지기도 한다. 따라서 X와 Y가 존재하는 입자가 분쇄되어 X 또는 Y만으로 이루어진 입자가 생길 수도 있으며, X와 Y의 비율은 달라지지 않고 단순히 크기만 작아질 수도 있다. 따라서 두 가지 성분이 존재하는 입자의 분쇄는 입자의 크기와 성분의 비율을 이용해서 나타낼 수 있다. 이러한 개념을 토대로 하여 생각해 보면 단체분리는 두 가지 이상의 성분으로 이루어진 입자가 분쇄를 통해 하나의 성분으로만 이루어진 입자로 분리되는 것을 의미하며, 이를 통해 여러 성분이 혼재되어 있는 입자에서 우리가 필요로 하는 유용한 물질들을 얻을 수 있다.

2.2. 단체분리도

주어진 크기의 입자에서 두 가지 성분으로 이루어진

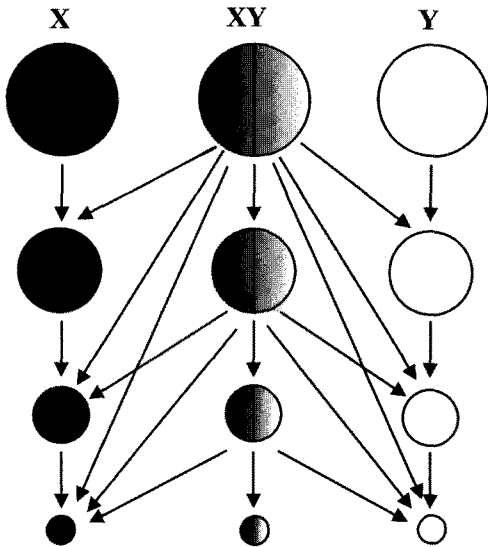


Fig. 1. Schematic representation of a binary ore.

물질의 단체분리 정도는 각 성분에 해당하는 입자의 질량비율을 통해 나타낼 수 있다. 만약 대부분의 질량이 X성분 또는 Y성분으로 이루어진 입자로 이루어져 있다면, 이는 단체분리가 이루어진 것이다. 그러나 반면에 많은 질량 비율이 X와 Y성분이 같이 존재하는 입자에 의한 것이라면, 이는 단체분리가 이루어지지 않은 것이다. 따라서 주어진 입자의 크기에서의 단체분리 정도는 성분비에 따른 입자의 질량 비율을 나타낸 그래프를 통해 계산할 수 있다. Fig. 2는 X와 Y의 두 가지 성분으로 이루어진 물질에서 성분 Y가 차지하는 비율 C를 x축으로 하고, 성분 Y가 차지하는 비율이 C보다 작거나 같은 입자의 질량 누적백분율 M을 y축으로 나타낸 그래프이다. 주어진 입자의 크기에서 전체 입자 중에서 Y가 차지하는 전체비율이 ϕ 라 할 때, Fig. 2에서의 수직선은 모든 입자의 비율이 ϕ 임을 의미하므로, 단체분리가 전혀 이루어지지 않은 상태이다. 이에 비해 수평선은 Y의 비율이 0%인 X만 존재하는 입자와, 100%인 Y만 존재하는 입자만이 존재하게 되고, 이는 완전한 단체분리가 이루어진 상태를 의미한다. 일반적인 단체분리의 곡선은 수직선과 수평선의 사이에 나타나게 된다. 따라서 그래프의 형태를 통해 단체분리 정도를 대략적으로 비교할 수 있다.⁶⁾

그러나 이와 같은 방법은 전체의 성분비율(ϕ)이 다르다면 정확한 단체분리의 정도를 비교할 수 없다. 따라서 이러한 단체분리 정도를 그래프의 넓이를 이용해서

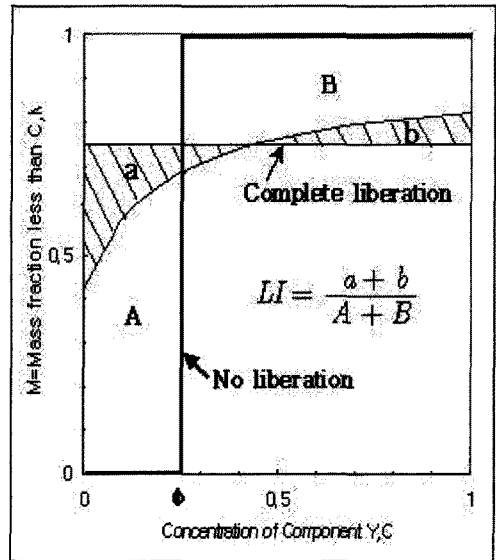


Fig. 2. Liberation pattern graph.

수치적으로 나타내는 방법이 Locking Index(LI)이다.

$$LI = \frac{a+b}{A+B} \quad (1)$$

여기서 A와 B는 직사각형의 넓이를 나타내며, a와 b는 빗금친 부분의 넓이를 나타낸다. LI값이 1이면 그래프의 수직선처럼 단체분리가 일어나지 않은 상태를 의미하고, LI값이 0이면 그래프의 수평선처럼 완전한 단체분리가 일어났음을 의미한다. 따라서 LI는 0에서 1사이의 값을 갖으며, 값이 작을수록 단체분리가 잘 이루어졌음을 의미한다. LI의 값을 수학적으로 표현하면 식 (2), (3), (4)와 같다.

$$A(=B) = \phi(1 - \phi) \quad (2)$$

$$a = \int_{M=0}^{1-\phi} CdM \quad (3)$$

$$b = a \quad (4)$$

따라서 LI는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$LI = \int_{M=0}^{1-\phi} CdM/\phi(1-\phi) \quad (5)$$

2.3. 단체분리 향상을 위한 가열처리 방법

콘크리트가 강도를 갖는 이유는 시멘트를 구성하는 각종 화합물들이 수화반응으로 인해 골재와 함께 굳어지기 때문이다. 콘크리트에 열처리를 하면 수화반응의 역반응이 발생하여, 그 결과 골재와 시멘트 모르타르 간의 결합력도 약해지는 것으로 알려져 있다. 또한 페콘크리트가 함유하고 있는 골재를 손상시키지 않고 가열분쇄 하기 위해서는 α -SiO₂가 β -SiO₂로 전이되는 573°C 이하의 온도와 점토광물이 탈수되어 골재를 열화 시키지 않는 400~500°C의 온도 범위가 적합하다고 알려져 있다.⁷⁾

또한 페콘크리트를 가열처리하면 콘크리트를 구성하고 있는 골재와 시멘트 모르타르의 서로 다른 열팽창률에 의해서 두 물질의 계면사이의 강도가 약해진다. 골재의 열팽창계수(5~13 × 10⁻⁶/°C)가 시멘트 모르타르의 열팽창계수(11~20 × 10⁻⁶/°C) 보다 작기 때문에 이러한 현상이 발생할 수 있다.⁸⁾ 따라서 페콘크리트에 가열처리를 하면 골재와 시멘트 모르타르의 결합력이 저하되어 두 물질의 선택적 파분쇄 가능성이 향상된다.

또한 기존의 오븐을 이용한 가열처리 방법과 함께 Microwave를 이용한 처리 방법도 가열처리의 수단으

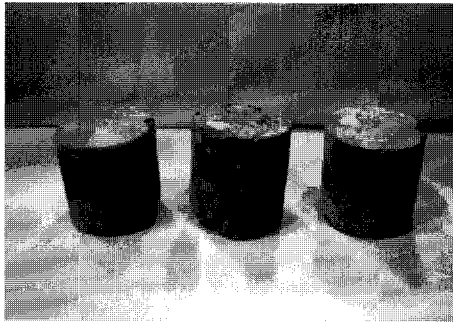
로 사용되고 있다. Microwave는 처리는 912 MHz와 2460 MHz의 주파수 밴드를 사용하여, 일반적으로 전도(conduction)와 대류(convection)를 이용하는 오븐에 의한 가열처리 방법과 다르게 빠르게 물체의 내부로 투과되어 에너지를 전달하며, 입자의 분자와 원자 레벨에서 microwave를 흡수하게 된다. Microwave를 이용하여 선행된 연구 결과에 따르면, 광물이 다른 입자에 의해 둘러싸인 영향은 그리 크지 않고, 광물이 microwave를 받아들이는 차이에 의해 열역학적 응력과 변위의 차이가 발생하여 입자 내부의 국부적인 파괴를 유발시킬 수 있다고 알려져 있다.⁹⁾

3. 실험 방법

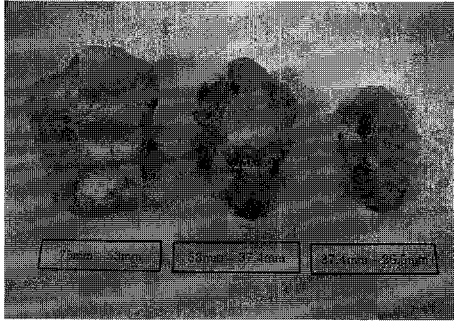
3.1. 조크러셔 파분쇄 실험

조크러셔를 이용한 파분쇄 실험에는 두 가지 종류의 페콘크리트가 사용되었다. 첫 번째는 기초적인 파분쇄 특성을 파악하기 위해 페콘크리트 중간 처리 현장에서 얻은 페콘크리트 괴로부터 지름 5.5 cm, 높이 5.5 cm의 일정한 크기와 모양의 원통형 코어를 채취하여 사용하였다(Fig. 3(a)). 두 번째는 실제 페콘크리트 파분쇄 공정에서 이루어지는 파분쇄 공정을 좀 더 정확하게 모사하기 위하여 실제 처리 공정에서 발생하는 불규칙한 모양의 실제 페콘크리트 시료(Fig. 3(b))를 이용하여 파분쇄 실험을 실시하였다. 파분쇄 실험에 사용된 시료의 크기는 원통형 코어 시료의 결과와 비교하기 위하여 크기와 비슷한 53 × 37.4 mm 크기의 페콘크리트 덩어리를 사용하였다. 실험에 사용된 조크러셔는 시료 투입 부분의 너비가 약 65 mm로 고정되어 있고, 배출 부분의 너비는 약 10 mm-15 mm 로 조절이 가능한 장비이며, 파분쇄 후 배출된 페콘크리트 조각들의 입도는 실험에 사용된 조크러셔 하부의 배출 부분의 너비에 따라 결정되며, 사용된 크러셔의 배출 부분의 너비에 따라 체의 top size를 달리하여 $\sqrt{2}$ 간격으로 체가름을 실시하였다.

전처리 방법에 따른 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리 특성을 파악하기 위하여 가열처리 방법(Thermal treatment)을 사용하여 파분쇄 실험을 하였다. 실험에 사용된 가열 전처리 방법은 오븐을 이용한 가열처리 방법과 마이크로웨이브를 이용한 처리 방법으로, 오븐을 이용한 가열처리 방법은 실온에서 400°C까지 1시간동안 온도를 상승 시킨 후, 400°C를 1시간동안 유지하면서 열처리 하였고, 마이크로웨이브에 의한 처리 방법은 600w, 2450MHz 의 마이크로웨이브를 90초간 조사하였



(a) Waste concrete core sample



(b) Waste concrete sample obtained from a waste concrete processing plant.

Fig. 3. Waste concrete sample used in jaw crusher test.

다. 파분쇄된 폐콘크리트 조각들은 입도 분리 후 골재와 시멘트 모르타르의 단계분리 특성을 파악하기 위하여 후처리를 실시하였다. 파쇄된 폐콘크리트 조각들은 경화된 콘크리트의 시멘트 함유량 시험 방법(KS F 2416)에 따라 산처리 하여 골재와 시멘트 모르타르의 함유량을 분석하였다. 파분쇄된 폐콘크리트 조각들을 550°C에서 3시간 이상 건조하여 수분을 제거한 후 시멘트 모르타르와 골재의 무게(W_s)를 측정하였으며, 그 후 준비된 염산용액(염산 1: 증류수9)에 넣어 골재에 부착되어 있는 시멘트 모르타르를 반복해서 용해시킨 후 남아있는 골재의 무게(W_1)를 측정하였다. 이 방법을 통해 산처리 전과 후의 분쇄된 폐콘크리트 조각들의 질량 차이를 계산하여, 감소한 질량을 시멘트 모르타르의 양으로 간주하고 골재와 시멘트 모르타르의 질량비를 계산하였다.

3.2. 자유낙하실험

자유낙하실험에 사용된 폐콘크리트 시료는 실제 폐콘크리트 처리 업체에서 운영되고 있는 1차 조크러셔 산물을 사용하였으며, 그 중 75 × 53 mm 크기의 시료를

사용하였다. 폐콘크리트 시료는 두꺼운 철판 위로 자유낙하 시켰으며, 각각의 낙하 후 체가름으로 낙하산물의 입도를 분석하여 10 mm를 기준으로 산물들을 분리하였다. 10 mm 보다 작은 입자들은 낮은 질량으로 인하여 반복적인 실험을 통해서도 시료의 파괴를 발생시킬만한 충분한 충격이 발생하지 않기 때문에 반복적인 낙하실험에서 제외하였다. 분리된 10 mm 이상의 입자들은 육안으로 골재와 시멘트 모르타르의 단계분리 정도를 파악하였으며, 완전한 단계분리가 이루어진 입자들에 대해서는 추가적인 실험을 진행하지 않았고 그렇지 않은 입자들에 대해서만 추가적인 반복 실험을 실시하였다. 이 과정을 통해서 자유낙하실험을 통해 생산되는 모든 입자의 크기가 10 mm이하가 될 때까지 실험을 반복하였다.

자유낙하실험에서도 조크러셔 파분쇄 실험과 마찬가지로 전처리 방법에 따른 효과를 살펴보았다. 조크러셔 파분쇄 실험과 동일한 방법으로 가열처리된 시료는 아무런 처리를 하지 않은 시료와 같은 방법으로 자유낙하 실험을 진행하였으며, 실험 후 분석을 통해 가열전처리 방법의 효과에 대해 살펴보았다.

4. 실험 결과

4.1. 가열 전처리 방법의 효과 검증

가열처리 후 골재와 시멘트 모르타르의 결합력이 어떤 차이를 보이는지 확인하기 위해 원통형 시편을 만들어서 3축 압축 시험을 실시하였다. Fig. 4(a)는 실험을 위해 제작된 원통형 시편의 사진으로 원통을 대각선으로 비스듬하게 잘라 한쪽은 시멘트 모르타르로 다른 한쪽은 암석을 이용하여 제작하였다. Fig. 4(b)는 3축 압축 시험을 위해 원통형 몰드를 실험 장치에 넣은 모습이며, Fig. 4(c)는 실험 장비로 3축 압축 시험을 실시하는 모습이다.

3축 압축 실험은 봉압을 4.9, 9.8, 14.7 MPa로 증가시키면서 각각의 봉압하에서 시편이 파괴되는 최대응력을 측정하는 실험이다. 이 실험을 통해 파괴된 시료의 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)는 아무런 처리를 하지 않은 시료의 파괴양상이며, Fig. 5(b)는 가열처리를 한 시료의 파괴양상이다. 아무런 처리를 하지 않은 시료는 암석과 시멘트 모르타르의 단면에서 파괴가 일어나기 보다는 주로 시멘트 페이스트 부분에 발생하였으며, 이에 반해 가열처리를 한 시료는 주로 암석과 시멘트 모르타르의 계면을 따라 파괴가 발생하였다. 일반적으로 시료의 파괴는 강도가 가장 약한 곳에서 발생하므로, 폐

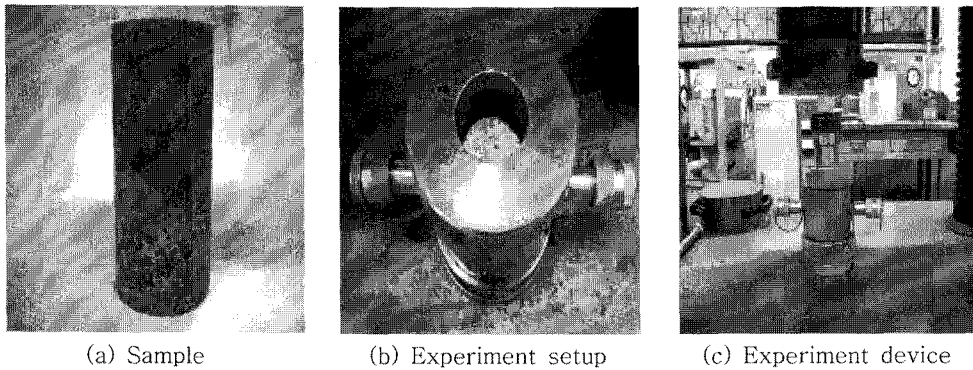


Fig. 4. 3-axis compression test.

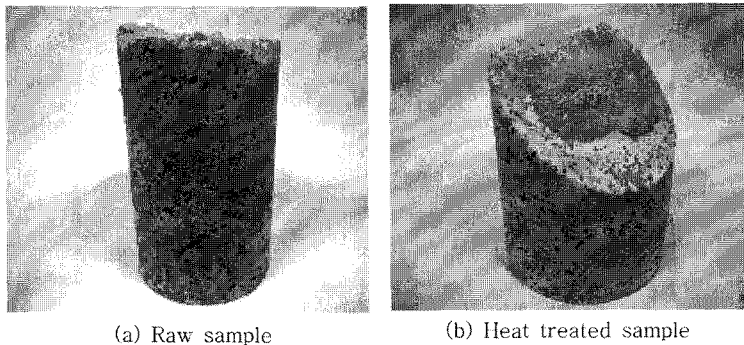


Fig. 5. Results of 3-axis compression test.

콘크리트에 가열처리를 하면 골재와 시멘트 모르타르의 계면에서의 강도가 저하된다는 사실을 확인하였다.

4.2. 조크러셔의 단체분리 특성 분석

Fig. 6은 크기와 모양을 일정하게 한 원통형 시료 (Fig. 3(a))의 파분쇄 결과를 전처리 방법에 따른 입도와 시멘트 모르타르 함량의 분포를 나타낸 그래프로서, 전처리 방법에 따른 분쇄 산물의 성분 차이를 잘 보여 주고 있다. Fig. 6(a)는 아무런 전처리를 하지 않은 폐콘크리트 시료의 분쇄 산물이고, (b)는 가열처리를 한 시료의 분쇄 산물, (c)는 Microwave를 이용하여 처리한 시료의 분쇄 산물이다. 가로축의 함량(Composition)에서 '0'은 시멘트 모르타르의 함량이 0일 때, 즉 골재로만 이루어진 산물을 의미하며, 이와 반대로 '12'는 100% 시멘트 모르타르로 이루어진 분쇄산물을 의미한다. 그 사이의 시료들은 시멘트 모르타르의 함량은 10% 간격으로 나누어서 나타낸 것이며, 예를 들어 0-10%의 시멘트 모르타르 함량을 가진 분쇄 산물을 '1'로, 50-60%의 시멘트 모르타르 함량을 가진 분쇄 산물을 '6'

으로 나타낸 것이다. 따라서 폐콘크리트 분쇄 산물의 단체분리가 잘 이루어졌다는 것은 '0'과 '12'에 해당하는 분쇄 산물이 많아야 한다는 것을 의미하며, 반대로 그 사이의 분쇄 산물들은 완전한 단체분리가 이루어지지 않았다는 것을 의미한다. 따라서 그래프를 살펴보면 아무런 전처리를 하지 않은 Fig. 6(a)의 그래프에서 중간 범위의 시료가 가장 많은 것을 확인할 수 있으며, 이는 곧 단체분리가 가장 잘 이루어지지 않았다는 것을 의미한다. 이와 반대로 가열처리를 한 Fig. 6(b) 그래프에서는 상대적으로 양 끝의 범위에서 많은 분쇄 산물이 존재하였으며, 가운데 범위에서는 산물이 적게 존재하였다. 이와 비슷하게 Microwave 처리를 한 Fig. 6(c) 그래프에서도 아무런 전처리를 하지 않은 Fig. 6(a)에 비하여 상대적으로 단체분리가 잘 이루어졌다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 파분쇄 공정을 수행하기 전에 전처리를 수행하면, 분쇄 산물이 동일한 입도를 갖고 있더라도 분쇄 산물의 시멘트 모르타르 함량, 즉 품질은 다를 수 있다는 것을 확인할 수 있었고, 전처리 방법 중에서 오븐을 이용한 가열 전처리 방법이 가장 좋은 효과를 보인다.

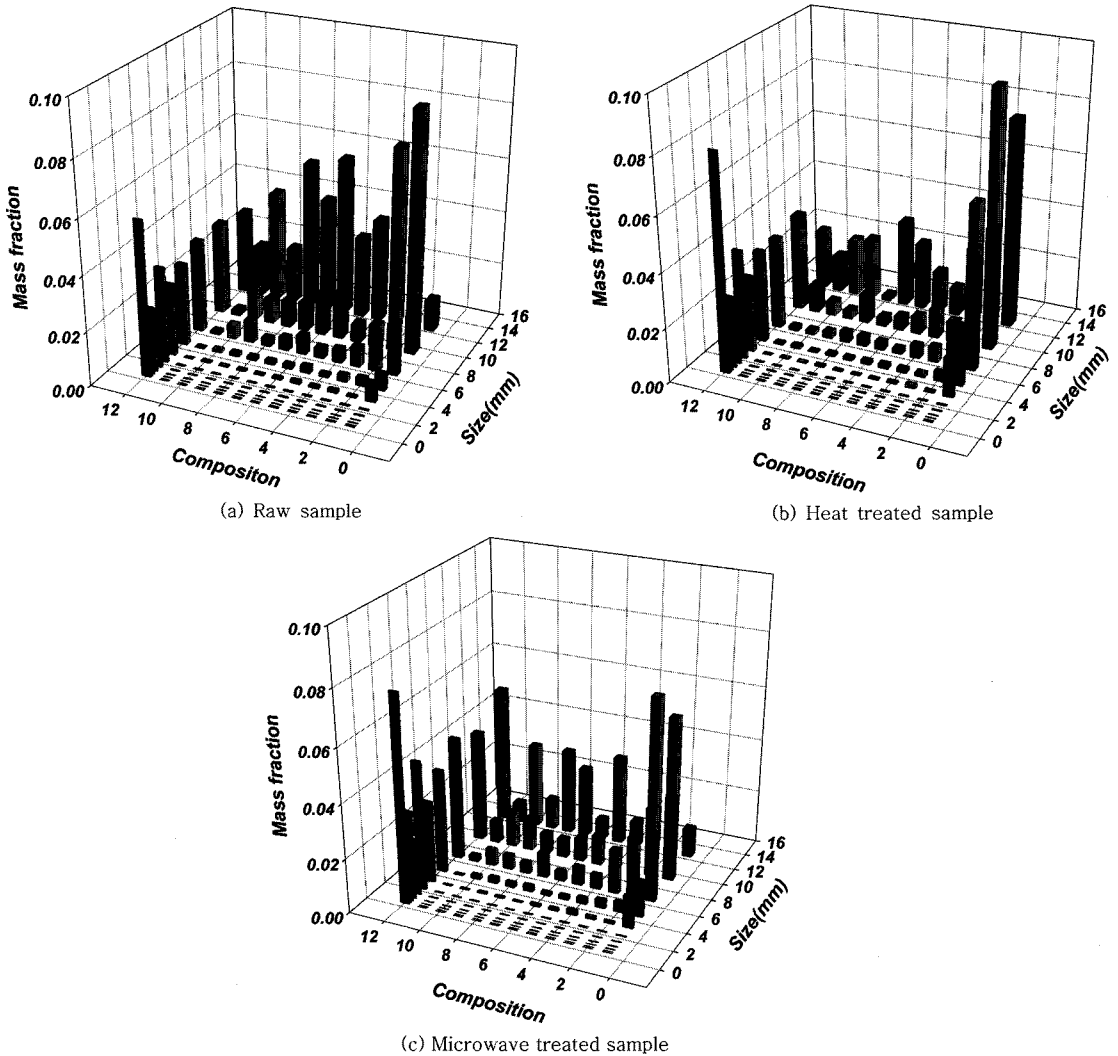


Fig. 6. Size-composition graph of crushed products generated from crushing the core samples using the jaw crusher.

Austin(1994)에 의해 제시된 단체분리 분석방법을 도입하여, X축은 분쇄된 파편의 시멘트 모르타르 질량비를 기준으로 하여, 골재로만 이루어진 파편을 0%, 시멘트 모르타르로만 이루어진 파편을 100%로 분류하였다 (Fig. 7). 또한 그 사이의 간격을 10구간으로 분류하여, 총 12개의 구간으로 분류하였다. Y축은 시멘트 모르타르의 질량비가 C보다 작거나 같은 파편에 대한 누적질량백분율을 나타낸다. 또한 3.35 mm이하의 파편에 대해서는 모두 시멘트 모르타르로 이루어졌다고 간주하였다. 그래프를 살펴보면 전처리 방법에 상관없이 입자의 크기가 작아짐에 따라서 그래프가 수평에 가까워짐을

알 수 있다. 이는 Fig. 2에서 알 수 있었던 것처럼 단체분리가 향상되어, 골재 또는 시멘트 모르타르로만 이루어진 입자의 비율이 증가하였다는 것을 의미한다. 그러나 시료의 크기별로 골재와 시멘트 모르타르의 함량비가 다르기 때문에, 입자의 크기와 전처리의 영향에 의한 단체분리의 정도를 정확히 비교하기 위해 Locking Index(LI)를 계산하였다(Fig. 8). LI값은 단체분리가 향상될수록 적은 값을 가지며, Fig. 8을 통해서 알 수 있듯이 입자의 크기가 작아짐에 따라서 LI값이 작아진다. 또한 전처리에 따른 단체분리의 영향을 살펴보면, 모든 입자구간에서 열처리한 시료의 LI값이 microwave 처리

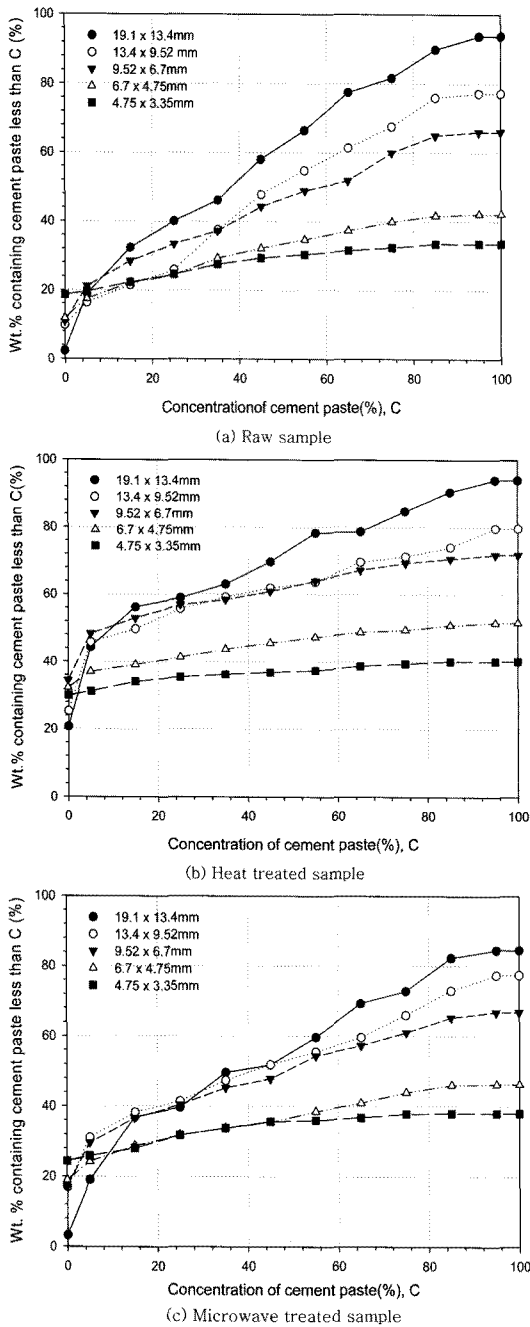


Fig. 7. Liberation pattern graphs for various size fractions of the crushed products generated from crushing the core samples using the jaw crusher.

한 시료와 아무런 처리를 하지 않은 시료의 값보다 적은 것을 알 수 있다. 따라서 전처리에 따른 단체분리는

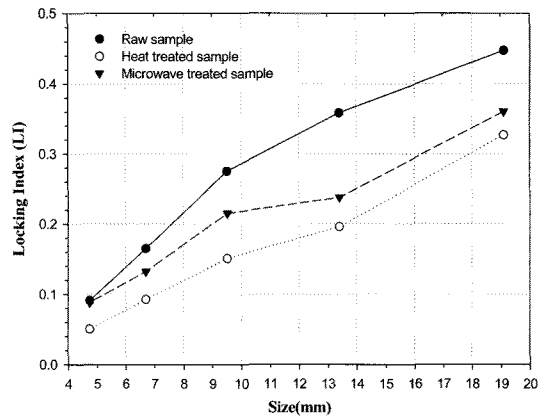


Fig. 8. Composition of Locking Index(LI) for the various size fractions generated from crushing the core samples using the jaw crusher with/without pre-treatment.

열처리를 하였을 때 가장 향상되는 것을 알 수 있다.

두 번째로 실제 폐콘크리트 시료(Fig. 3(b))를 이용하여 파분쇄 실험을 실시한 결과 폐콘크리트 시료의 불균질성으로 인해 크기와 모양을 일정하게 만든 원통형 시료의 경우처럼 경향이 뚜렷하지는 않지만, 조각의 크기가 작아짐에 따라 단체분리 그래프가 수평에 가까워지는 것을 알 수 있었고, 이는 단체분리가 향상된다는 것을 의미한다. 그 결과 원통형 시료의 실험결과(Fig. 8)와 마찬가지로 전체적으로 조각의 크기가 작아질수록 LI값은 작아지는 경향을 보였다(Fig. 9). 그러나 조크리셔를 이용한 경우에는 조크리셔의 시료배출구의 간격에 의해서 입자의 크기가 조절되기 때문에 비교적 균일한 입도의 산물을 얻을 수 있었지만, 폐콘크리트의 골재가 부서지는 등의 단점이 존재하였다(Fig. 10).

4.3. 파분쇄 장비에 따른 단체분리 비교

기존 파분쇄 장비인 조크리셔를 이용하여 폐콘크리트를 파분쇄할 경우 산물의 입도가 시료 배출부의 유격에 의해 결정되는 특징에 의해 골재가 부서지는 단점이 존재하였고, 고품질의 순환골재 생산을 위한 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리가 원활히 이루어지지 않았다. 이에 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리를 증진시켜, 파분쇄 공정을 통해 생산되는 순환골재의 품질을 높이고자 새로운 파분쇄 메커니즘인 gentle breakage을 도입하였으며, 이를 검증하기 위해 자유낙하에 의한 파분쇄 실험을 실시하였다.

새로운 분쇄 메커니즘인 gentle breakage의 효과를

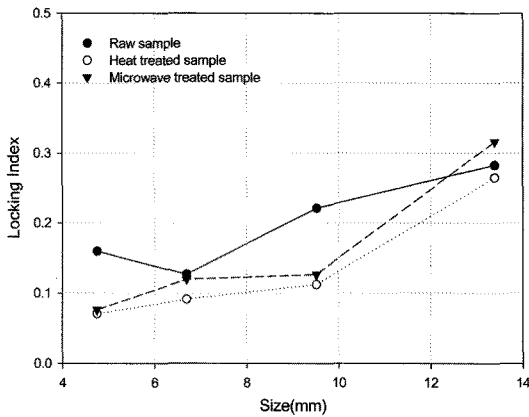


Fig. 9. Composition of Locking Index(LI) for the various size fractions generated from crushing the raw samples using the jaw crusher with/without pre-treatment.

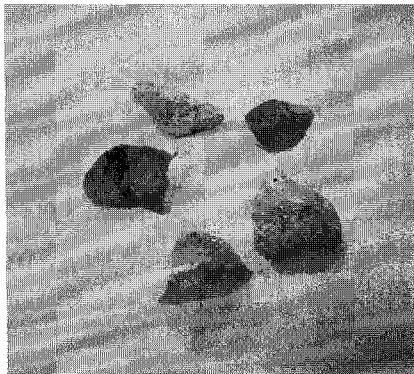


Fig. 10. Crushed product coming out of the jaw crusher.

검증하기 위해서는 이러한 과정을 통해 생산된 순환골재의 품질을 확인하는 것이 매우 중요하므로, 자유낙하를 통해 생산된 순환골재의 품질을 기존의 폐콘크리트 파분쇄 장치인 조크러셔를 통해 생산된 순환골재의 품질과 비교해보았다. 일반적으로 생산되는 순환골재의 품질은 골재 표면에 부착되어 있는 시멘트 모르타르의 양에 의해 결정되는데, 시멘트 모르타르의 양이 많아질수록 순환골재는 흡수율이 상승하고 강도가 저하되는 등 품질을 자연스럽게 낮아지게 된다. 따라서 여러 실험을 통해 생산된 순환골재의 시멘트 모르타르 함유량을 확인해보았다.

Fig. 11은 시멘트 모르타르의 함유량을 질량비로 나타낸 결과이다. 조크러셔 파분쇄 산물의 경우에는 시멘트 모르타르의 함유량이 전 영역에 걸쳐서 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이는 조크러셔를 이용하여 폐콘크

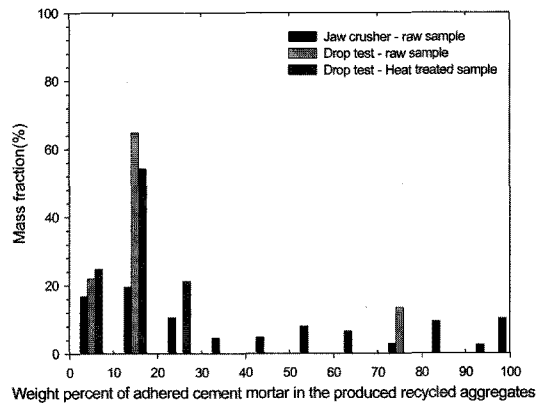


Fig. 11. Distribution of recycled aggregates subdivided by the amount of adhered cement mortar.

리트를 파분쇄 하는 경우에는 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리가 이루어지지 않아 낮은 품질의 순환골재가 생산되는 것을 의미한다. 반면에 자유낙하를 통해 생산된 순환골재의 경우에는 시멘트 모르타르의 분포에서 양 끝단에 위치하였는데, 이는 골재의 표면에서 시멘트 모르타르가 탈착되어 높은 수준의 단체분리가 이루어졌다는 것을 의미한다. 그러므로 자유낙하를 이용하여 폐콘크리트를 파분쇄 할 경우 기존의 조크러셔보다 높은 품질의 순환골재를 생산을 기대할 수 있다.

순환골재의 품질을 결정하는 또 다른 기준은 순환골재의 강도이다. 기존의 파분쇄 장치인 조크러셔나 임팩트 크러셔를 이용하여 순환골재의 생산할 경우에는 과도한 충격이 가해져서 생산된 순환골재 내부에 크랙이 존재할 수 있다. 이는 천연골재의 품질에 비해 그 품질이 저하되는 또 다른 원인이 될 수 있다. Table 1은 여러 가지 파분쇄 장치(조크러셔, 임팩트 크러셔, AG mill)를 이용해서 생산된 순환골재의 강도이다. 순환골재의 압축강도는 점하중 실험을 통해 측정하였다. 점하중 실험은 시료가 파괴될 때의 압력을 가해, 시료가 파괴될 때의 최대 압력과 파괴된 시료의 단면적을 이용해서 계산할 수 있다. 각각의 파분쇄 장치를 통해 생산된 순환골재의 압축강도를 측정된 결과 자유낙하에 의한 파분쇄와 동일한 분쇄 메커니즘을 갖고 있는 AG mill을 통해 생산된 순환골재의 압축강도가 가장 높게 나타났다. 이는 AG mill을 이용하여 순환골재를 생산할 경우, 기존의 파분쇄 장비에 비해 골재에 가해지는 충격이 적어 골재의 품질이 저하되지 않기 때문이다. 그러므로 gentle breakage를 파분쇄 메커니즘으로 이용하는 자유낙하 또는 AG mill 장비는 골재와 시멘트 모르타르의

Table 1. The strength of aggregate produced from various crusher

	Jaw crusher	Impact crusher	Autogenous mill
Compressive strength	84.6 MPa	95.1 MPa	106.0 MPa

단체분리를 증진시킬 뿐만 아니라 골재에 가해지는 충격도 감소시켜 고품질의 순환골재 생산에 매우 효과적인임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 폐콘크리트의 파분쇄 공정에서 골재와 시멘트 모르타르의 단체분리를 향상시켜, 천연골재를 대체할 수 있는 고품질의 콘크리트용 순환골재 생산을 위한 기초 연구로 파분쇄 장비와 방법에 따른 단체분리 특성을 살펴보았다. 기존 폐콘크리트 처리 공정에서 대표적으로 사용되고 있는 조크리셔를 이용하여 파분쇄 실험을 실시한 결과, 파분쇄된 산물의 입도가 감소할수록 단체분리는 향상되었으며, 가열전처리 시료에서 가장 우수한 단체분리 특성을 나타내었다. 그러나 전체적인 입도영역에서는 단체분리가 원활히 이루어지지 않았으며, 나아가 파분쇄 과정에서 골재가 충격을 받아 파괴되는 문제점이 존재하였다. 따라서 단순 입도 감소에 초점이 맞춰져 있는 기존의 조크리셔는 골재와 모르타르의 단체분리에는 적합하지 않다고 판단되었다. 이에 골재와 시멘트 모르타르의 계면에서 선택적인 파분쇄를 유도하여 단체분리를 향상시키고자 gentle breakage를 파분쇄 메커니즘으로 이용하는 자유낙하에 의한 파분쇄

실험을 실시하였으며, 그 결과 자유낙하를 통해 생산된 입자들은 대부분 골재 또는 모르타르로만 이루어져 조크리셔 대비 매우 우수한 단체분리 특성을 나타내었다. 따라서 기존 조크리셔를 이용한 파분쇄 공정을 개선하여 가열처리방법과 gentle breakage를 이용한 파분쇄 공정을 결합할 경우, 천연골재를 대체할 수 있는 고품질의 순환골재 생산이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 환경부, 2009: 2008 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. I. B. Topcu, S. 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. 건설교통부, 2002: 건설폐기물 재활용촉진을 위한 정책 및 기술 개발 연구.
6. L. G. Austin, 1994: *Patterns of liberation of ash from coal*, Minerals and metallurgical Processing, (), pp. 148-159.
7. Ji-Whan Ahn et al., 2001: *Recovery of aggregates from Waste Concrete by Heating and Grinding*, Geosystem Engineering, **4**(4), pp. 123-129.
8. 윤재환, 2000: 포틀랜드시멘트 및 콘크리트, 세진사, 2판
9. C. A. Pickles, 2004: *Microwave heating behaviour of nickeliferous limonitic laterite ores*, Mineral Engineering, **17**, pp. 775-784.

金 瑄 鎬

- 2003년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학사
- 현재 서울대학교 에너지시스템공학부 에너지자원처리연구실 박사과정

文 明 旭

- 2005년 안양대학교 환경공학과 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 제10권 4호 참조