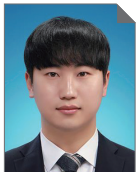


폐유리병 순환유리골재 자원순환 기술

The recycled glass aggregate recycling technology of waste glass bottle



이훈 Hoon Lee
한국지질자원연구원
책임연구원
E-mail : hoonlee@kigam.re.kr



이한솔 Han-Sol Lee
UST자원순환공학과
박사과정
E-mail : manutd1205@kigam.re.kr

1. 머리말

2020년 기준 국내 폐유리병 발생량은 약 56만 톤이며, 재활용률은 약 76.8 %로 보고되었다. 2012년 이후 폐유리병의 재활용률은 75 % 이상의 수치를 갖는 것으로 나타났으며, 이는 플라스틱(69.6 %), 철(30.7 %)과 같은 다른 폐기물에 비해 상대적으로 높다. 그러나 이 수치는 독일, 일본과 같은 전략적인 재활용 시스템이 갖춰진 나라에 비해 약 10 %정도 낮은 것으로 확인된다. 또한, 연간 출고량 10 톤 이상, 매출액 10억 원 이상, 수입액 3억 원 이상의 제조 및 수출업자만 재활용 의무 대상자이기 때문에 정확한 폐유리병 재활용량에 대한 파악이 어려우며, 실제 재활용률은 매년 보고되는 수치보다 낮은 것으로 추정된다. 따라서 매년 최소 약 13만 톤 이상의 폐유리병이 재활용되지 못하고 있으며, 재활용되지 못하는 주요 원인은 배출된 폐유리병의 다양한 색상 혼입이다. 색상 혼입된 폐유리병의 경우 유리병 제조를 위한 원료 물질로 재활용되지 못하며 마땅히 사용될 곳이 부족한 현실이다. 이에 본 연구에서는 매립되는 폐유리병을 감소시켜 재활용률을 증가시킬 수 있는 재활용(파·분쇄 및 선별) 공정을 적용하였으며, 해당 공정으로 생산된 제품의 품질 기준 만족 여부를 확인하였다.

2. 폐유리병 재활용 연구 및 기존 폐유리병 재활용 공정

2.1 폐유리병 재활용 연구

매립되는 폐유리병을 건설자재로 재활용하기 위해 발포 유리 생산 연구, 시멘트 생산에 폐유리 활용 연구, 콘크리트 속 골재 대체 연구, 모르타르에 폐유리 활용 연구 등 다양한 연구들이 수행되었다. 위 연구들을 통해서 콘크리트에 폐유리를 혼합할 때 콘크리트 강도에 상당한 영향을 미치는 알칼리-실리카 반응

(ASR)은 입자 크기 조절 및 첨가제를 이용하여 조절할 수 있음이 확인되었으며, 오히려 폐유리는 시멘트와 수화 반응하는 포졸란 반응으로 콘크리트의 물리적 특성을 향상시키는 것으로 나타났다. 따라서 폐유리병은 가공처리 후 다양한 방법으로 건축 소재로 활용할 수 있음이 확인되었다.

2.2 기존 폐유리병 재활용 공정

국내 폐유리병은 지방자치단체 및 민간 수집 업체에 의해 수거되며, 이후 중간처리 업체로 보내진다. <그림 1>은 기존에 적용되는 폐유리병 재활용 공정으로, 수선별을 통해 큰 이물질을 제거한 이후, 1차 자력선별을 통해 자성 산물을 제거한다. 비자성 산물 흐름은 해머크러셔를 통해 20 mm 이하로 입자를 감소시키며, 20 mm 이하 산물들은 2차 자력선별 및 와류선별을 통해 철과 비철금속을 제거하고 공기분급기를 통해 종이와 같은 가벼운 이물질을 제거한다. 그러나 기존 공정은 단일 색상의 폐유리병만 처리할 수 있기 때문에 처리 효율이 낮으며, 중간처리 업체로 수거된 폐유리병 중 혼입 폐기물은 공정에 적용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 기존 공정은 개선이 필요하다.

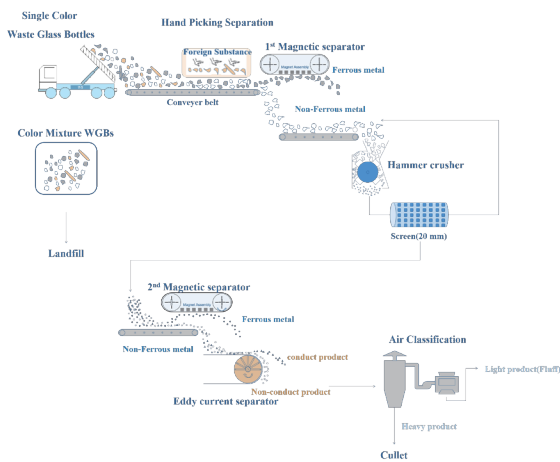


그림 1. 기존 폐유리병 재활용 공정

3. 폐유리병 재활용률 향상을 위한 선별 및 파·분쇄 실험

3.1 색상 선별 실험 결과

폐유리병을 Cullet으로 재활용하는 것은 가장 경제적인 방법이며, 재활용 공정을 효율적으로 가동하기 위해서 색상 선별 공정의 적용은 필수적이다. Cullet으로 사용되기 위한 각 색상별 혼입률은 호박 및 녹색 5 % 미만, 백색 1 % 미만이기 때문에, 색상 선별기를 통해 폐유리병을 색상별로 선별하였다. <그림 2>는 본 연구에서 사용된 광학선별기이며, 고해상도 CCD 카메라를 통해 물체에 투과된 빛의 양을 측정하여 물체를 선별하는 장비이다. 색상 선별 순서의 조합을 변경함으로써 광학선별기의 최적조건을 선정하였다.



그림 2. 본 연구에 사용된 광학선별기

광학선별을 수행하기 이전에 선별할 물체의 색상을 광학선별기에 입력해야 하며, RGB 데이터 측정결과, 호박색 유리병 데이터는 다른 색상의 데이터와 겹치지 않았지만 녹색과 백색 유리병은 겹쳐지는 것으로 나타났다. 이로 인해, 녹색과 백색 유리병은 서로 영향을 미치기 때문에, 가장 엄격한 기준을 갖고 있는 백색을 마지막 선별 순서로 배치하였다. 따라서 A 조건(녹색 - 호박색 - 녹색 & 호박색), B 조건(호박색 - 녹색 -

01

녹색 & 호박색)으로 실험을 수행하였다.

〈그림 3〉은 선별 순서 조건에 따른 각 색상별 품위와 회수율을 나타내며, Condition B 조건에서 모든 색상의 혼입물 기준을 만족한 것으로 나타났다. 이는 앞서 선별기에 입력한 각 색상별 데이터에서 녹색과 백색이 겹쳐 서로 영향을 미치기 때문에, 가장 선별할 Mass가 많은 1 단계에서 녹색을 우선적으로 선별하는 A 조건은 상대적으로 품위가 감소하는 것으로 판단된다.

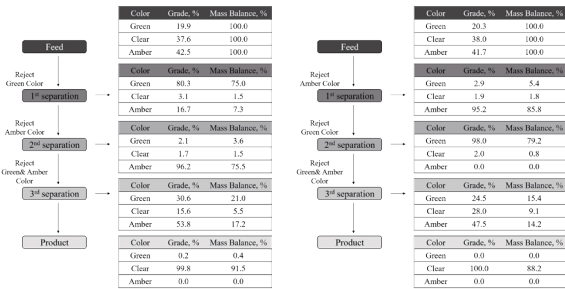


그림 3. 각 색상에 따른 품위 및 회수율

3.2 파·분쇄 실험 결과

광학선별기로 선별되지 못한 폐유리병을 순환유리골재로 재활용하기 위해서는 다양한 품질 기준을 만족해야하며, 이중 이물질 및 입도분포 품질 기준이 대표적이다. 한국 순환골재의 경우(KS(Korea standard) F 2576 test) 골재 속 비닐, 플라스틱, 목재, 종이 등의 유기 이물질 함유량이 용적물의 1.0% 이하여야 한다. 〈그림 1〉의 공정에서 수선, 와류, 자력 및 풍력 선별을 통해 대부분의 이물질이 제거되었기 때문에 이물질 관련 품질 조건은 만족하는 것으로 판단하였다. 〈표 1〉은 순환잔골재 입도분포기준(KS F 2527 test)을 나타낸다. 이물질을 제거한 폐유리병의 입도분포는 품질기준을 만족하지 못하였으며, 추가적인 파쇄 공정이 필요한 것으로 판단되었다. 따라서 파일럿 규모의 슈레더, 롤크러셔, 해머크러셔 그리고 VSI(Vertical Shaft Impact) 크러셔를 이용하여 폐유리병 파쇄 실험을 하였으며, 〈그림 4〉에 파쇄된 산물들의 입도 분포 결과를 나타냈다.

〈표 1〉 순환잔골재 입도 품질 기준

입자크기 mm	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
체 통과 질량 백분율 %	최대	100	100	100	90	65	35	15
	최소	100	90	80	50	25	10	2

파쇄 산물의 입도분포와 비교해본 결과, 롤 크러셔와 슈레더의 산물은 파쇄가 이루어지지 않아 최소 입도분포 기준을 충족하지 못했다. 슈레더는 일반적으로 연성이 있는 물질 및 복합 물질의 해체에 적용되는 장비로 유리처럼 경도가 높은 물질을 파쇄하는데 적절하지 않는 것으로 판단하였다. 롤크러셔는 장비 특성상 롤 사이의 유격을 가지고 있는데, 환경 폐유리병 입자의 분쇄에 적합하지 않았다. 충격력이 주 에너지인 해머 크러셔는 회전하는 해머의 높은 운동에너지로 인하여 과분쇄가 발생하였으며, 또한 해머의 마모가 상대적으로 빠르게 발생하기 때문에 유지보수 측면에서도 적절하지 않다고 판단되었다. VSI 크러셔는 시료를 직접 타격하지 않고 회전 임펠러를 이용하여 시료를 외벽으로 분산시켜 입자-입자, 또는 입자-벽 사이에서 발생하는 충돌에너지를 통해 분쇄효과를 유도하는 장비로서, 폐유리병 분쇄에 매우 적절한 것으로 나타났다.

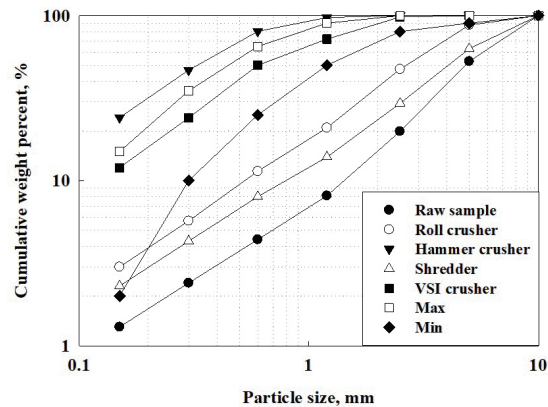


그림 4. 각 장비에 따른 폐유리병 파쇄 산물 입도분포

3.3 입형

문헌에 따르면 파쇄 색상 혼입 폐유리병을 순환잔골재로

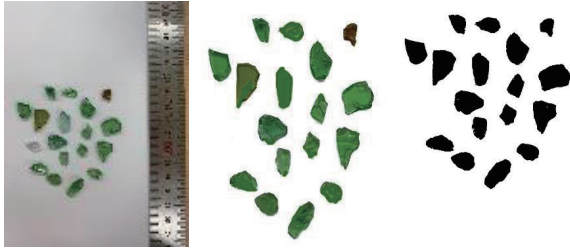


그림 5. Image J 분석과정

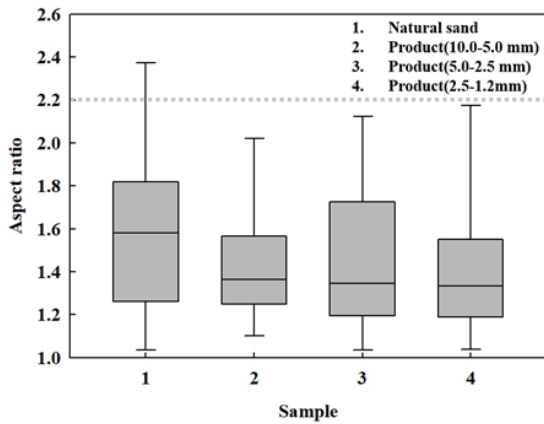


그림 6. VSI 크러셔 산물의 입형

사용할 때, 골재 입자의 Angularity(모남 정도)는 골재와 결합제의 혼합물 취급 용이성에 영향을 미치는 중요한 특성이며 Aspect ratio(입자의 최대 측정 길이에 대한 최소 측정 길이의 비율)를 통해 분석 가능하다. 또한, KS F 2575 규정에 따르면, Elongated particle(편장성 입자)은 골재 입자의 두께에 대한 폭의 비 또는 폭에 대한 길이의 비가 3배 이상인 입자가 나타난다. 따라서 본 연구에서는 폐유리병의 Aspect ratio를 측정하여 파쇄 전, 후 변화를 관찰하였다. Aspect ratio는 대표적인 공개 영상분석 프로그램인 Image J를 이용하여 측정하였다. Image J는 <그림 5>와 같이 시료를 1) 디지털 이미지화한 후 회색 그림자를 제거하기 위해 2) 대비 처리를 적용하고, 3) 최종적으로 입자 경계를 정확하게 구분하기 위해 Binary mode로 전환하여 분석하였다. <그림 6>의 Box plot에서 확인할 수 있듯이, 파쇄 후 산물의 Aspect ratio는 대부분의 입도

구간에서 자연사보다도 낮은 Aspect ratio 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 폐유리병은 VSI 크러셔를 이용한 파쇄를 통해 순환골재로 사용함에 있어 적절한 것으로 판단된다.

4. 폐유리병 최적 재활용 공정

4.1 폐유리병 최적 재활용 공정

본 연구에서 광학선별 및 파쇄 실험 결과는 폐유리병을 Cullet과 순환유리골재로 사용하기 위한 재활용 공정을 개발하기 위해 적용되었다. 최종적으로 개발된 공정은 <그림 7>에 나타내었으며, 이물질 선별공정은 기존 공정과 동일하게 적용되었지만, 본 공정은 색상 혼합 폐유리병도 처리할 수 있는 공정이다. 이 결과에 기반하여 Cullet의 생산량은 83.2%까지 향상되었으며, 기존에 매립 처리되던 약 20%의 폐유리병을 순환유리 골재로 활용할 수 있는 생산 가능성을 확인하였다. 결과적으로 본 연구는 폐유리병의 재활용률 향상에 기여할 수 있으며, 색상 혼합된 폐유리병을 처리할 수 있기 때문에 공정 효율 또한 개선되었다고 사료된다.

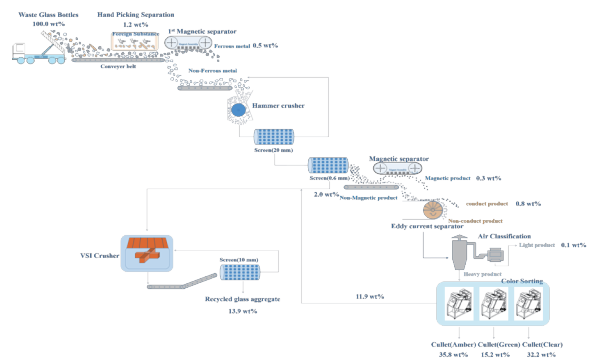


그림 7. 개발 폐유리병 재활용 공정

4.2 향후 연구

개발된 재활용 공정 중 파쇄 공정에 적용된 VSI 크러셔는 디자인 및 운전 조건에 따라 파쇄 효율을 더 개선할 수 있기 때문

에, DEM(Discrete Element Method)에 기반한 입자 해석 모델링을 활용하여 파쇄 특성을 파악하는 연구가 필요하다.

5. 맺음말

폐유리병 재활용률 향상을 위한 공정을 개발 및 제시하였다. 광학선별기를 적용하여 색상 혼입 폐유리병을 처리하였으며, 선별 순서에 따른 각 생산별 품위 및 회수율 확인을

통해 품질 기준을 달성하는 조건을 선정하였다. 순환유리골 재료의 사용은 최적 파쇄기 선정, Aspect ratio 측정 실험을 통해 적절성을 확인하였다. 분쇄 성능과 장비의 운용성 측면에서 순환잔골재용 유리를 생산하는데 적합한 파쇄기는 VSI 크리셔로 판단되며, Aspect ratio 측정 결과 또한 자연 사보다 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 제시된 복합 공정은 매년 매립되어지는 폐유리병을 재활용하는 것이 가능하며, 이는 폐유리병 재활용률 향상에 큰 기여를 할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Bai J, Yang X, Xu S, Jing W, Yang J (2014) Preparation of foam glass from waste glass and fly ash. *Materials Letters* 136:52–54. doi:10.1016/j.matlet.2014.07.028
2. König J, Petersen RR, Yue Y (2015) Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass. *Ceramics International* 41:9793–9800. doi:10.1016/j.ceramint.2015.04.051
3. Chen M, Zhang F-S, Zhu J (2009) Lead recovery and the feasibility of foam glass production from funnel glass of dismantled cathode ray tube through pyrovacuum process. *Journal of Hazardous Materials* 161:1109–1113. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.04.084
4. Hesky D, Aneziris CG, Groß U, Horn A (2015) Water and water glass mixtures for foam glass production. *Ceramics International* 41:12604–12613. doi:10.1016/j.ceramint.2015.06.088

담당 편집위원 : 김규용(충남대학교)