

폐유리 재활용을 위한 전처리 기술

Pretreatment Technology for Recycling Waste Glass



장일영 Il-Young Jang
금오공과대학교 토목공학과 교수
E-mail : jbond@kumoh.ac.kr

1. 서언

환경 오염문제가 전 세계의 공통적 과제로 비추어 지면서 환경오염을 줄이기 위한 다양한 방법에 관심이 고조되고 있다. 환경을 오염시키는 원인에는 여러 가지 요소가 있지만 그 중 시멘트를 생산하면서 발생하는 이산화탄소(CO₂)가 환경오염의 주범이 되고 있다. 또한 급격한 산업발달로 인해 대량의 산업폐기물이 발생되면서 대부분 재활용 되지 못하고 매립 및 소각에 의존하여 이로 인해 토양 및 수질오염의 문제가 발생하고 있다.

이러한 산업폐기물 중 하나인 LCD 폐유리 또한 최근 각종 디스플레이 기기들이 개발되고 사용되어 지면서 LCD를 적용한 다양한 전자 제품들이 널리 보급되고 있으며 이로 인해 LCD 폐유리 발생량 또한 날이 증가하고 있는 추세이다. 유리폐기물의 국내 발생현황은 한국환경공단의 통계연감(2013) (Korea Environment Corporation 2013)을 기준으로 하루 평균 약 443톤이 발생하는 것으로 집계되었으며 이러한 폐유리의 약 94%(420톤)가 재활용 되지 못하고 매립 및 소각되고 있는 실정이므로 매립지 부족 문제와 폐기 비용 증가 문제를 해결함과 동시에 매립 및 소각으로 인한 환경오염을 방지하기 위하여 LCD 폐유리의 재활용 방안에 대한 다양한 연구가 필요하다.

본 고에서는 유리의 제조과정에서 발생하는 LCD폐유리를 대상으로 국내의 폐유리 수집 및 크기별 분쇄 등 폐유리를 재사용하기 위한 전처리 과정 등 이와 관련된 내용을 소개한다.

2. LCD 폐유리 수집 및 크기별 분쇄

2.1 LCD 폐유리 수집

폐 디스플레이의 유리 소재를 재활용하기 위해서는 먼저 폐 디스플레이를 해체/분리하는 작업을 거쳐야 한다. 예를 들어, LCD를 해체하면 <그림 1>과 같은 구조를 가진 LCD 패널 부분을 분리해 낼 수 있는데 여기에서 backlight를 제거하면 두 장의 유리의 가장자

리 부분을 절단하면 유리 상판 부분과 유리 하판 부분으로 분리할 수 있다. 재활용하고자 하는 최종 제품 형태에 따라 유리 상태 그대로 원료로 사용할 수도 있지만 인듐 등의 유가자원을 먼저 회수하는 경우도 있다. 그리고 color filter 등 유리에 붙어 있는 이물질들을 적절히 제거한 다음, 재활용 제품의 제조공정에 알맞은 크기로 유리를 파쇄하여 이렇게 분쇄된 분말을 선별 작업을 통해 활용 가능 여부를 판단한 후 이송하여 저장 및 출하한다. (신동윤 등, 2015)

LCD 폐유리를 활용하여 콘크리트용 결합재료의 사용성 확보와 더불어 활성도 개선을 위하여 전처리 공정을 거쳐 유용자원 선별 및 추출하여 정밀 분쇄 작업을 실시하였으며, 그에 대한 공정 과정을 아래 <그림 2>에 나타내었다.

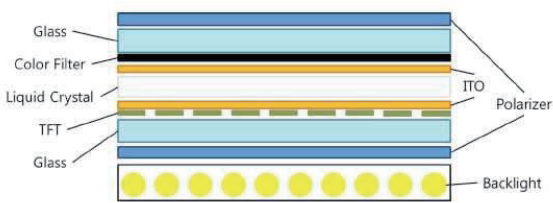


그림 1. Cross-sectional view of TFT-LCD panel
(출처: 신동윤 등, 2015)

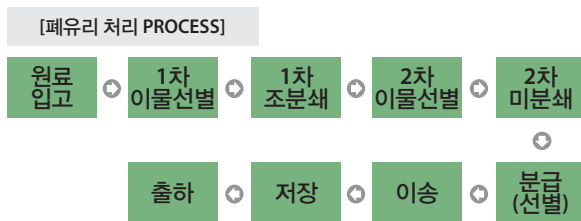


그림 2. LCD 폐유리 처리 Process

2.2 폐유리의 입자크기별 미분화

LCD 폐유리 및 Panel 폐유리를 활용하여 콘크리트용 결합재료의 사용성을 확인하기 위해 해머크래셔와 대용량 원형 불밀을 이용한 미분말화 작업을 실시하였다. LCD 폐유리 및 Panel 폐유리의 경우 시멘트 대비 비중이 낮고, Fe 성분이 적어 분쇄가 용이하나 경도에 의해 일반적인 방법으로는 10 μm이

하의 미분말을 제조하기 어렵다. Y. Shao 등(1999)은 시멘트 대체로써, 콘크리트 강도 및 알칼리 실리카 반응성 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 유리는 #100 체(150 μm)를 통과하고 #200체 (75 μm)에 남는 것, #200체 (75 μm)를 통과하고 #400체 (38 μm)에 남는 것, #400체 (38 μm)를 통과하는 것으로 입자별 3가지로 분류하였다. 압축 실험결과 <그림 7>과 같이 폐유리의 입도가 작을수록 압축강도가 크게 나타났고, 38 μm 이상의 폐유리 분말을 혼입한 경우 일반 콘크리트에 비하여 재령 3일에 91%, 7일에 84%, 28일에 96%, 90일에 108%로 모든 양생기간 동안 배합강도의 75%를 초과하였다.

본 연구에서는 LCD 폐유리의 미분말화를 위해 불밀을 이용하여 분쇄하였다. 회전원통용기 내에 LCD 폐유리와 분쇄매체인 알루미늄 ball을 넣어 분쇄를 행하는 분쇄기로, 긴 역사와 실적이 있고, 신뢰성이 높으며 구조가 간단하다. <그림 8,9>는 Conical ball mill을 나타내었다. Conical ball mill의 특징은 크고 작은 Ball을 장입해서 회전하는 것에 의해 큰 Ball은 공급구 측에 작은 Ball은 배출측에 분포하여 합리적인 분쇄가 행해질 수 있게 한다. 최적회전수 $N(r. p. m)$ 은 일반적으로 다음과 같은식으로 주어진다. 여기서 $D(m)$ 는 mill의 내경이다.

$$N = \frac{32}{\sqrt{D}}$$

본 연구에서 사용된 건식방법에 의한 미분말 분쇄 시 가장 중요한 것은 시료 내에 잔류 수분이 전혀 없어야 하며, 입자와 입자사이에 존재하는 미립화 방해물질을 제거하여야 하고, 또한 미분화가 진행되는 동안 외부로부터의 수분 및 공기의 침투를 막아야 한다. 따라서 원료는 건조시킨 후 투입하고, 분쇄매체로는 지름이 2mm인 스테인리스 ball과 미분화 진행시 오염을 줄이기 위하여 지름이 1, 2mm인 알루미늄 ball을 각각 사용하여 미분화 효율 및 오염의 정도를 확인하였다. 여기서 분쇄를 위한 분쇄 매체로 사용한 ball 장입량 결정은 기초실험에 의해 가장 경제적이며 목적으로 하는 입경의 LCD 폐유리의 미분말화 효율이 가장 좋은 조건인 분쇄 용량 전체 부피의 60%를 차지하는 양으로 결정하였다. LCD 폐유리의 투입량



그림 3. LCD 폐유리 수집, 운반



그림 4. 미분쇄 설비



그림 5. 미분말 Silo 및 분급



그림 6. LCD 폐유리의 미분말

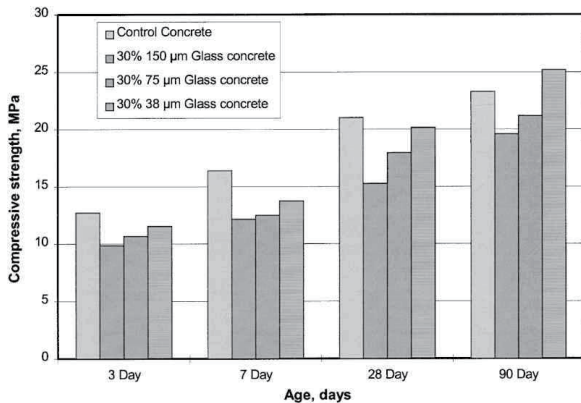


그림 7. 폐유리를 혼입한 콘크리트의 압축강도(Y. Shao 등, 1999)

은 분쇄 매체로 사용된 ball 각 개개의 사이를 충분히 충전시켜줄 수 있는 량을 중심으로 투입량 조절하였다. 본 장비의 회전 속도 역시 기초실험 결과에 의하여 적용하였다. 따라서 LCD 미분말의 12um 분쇄 시 약 500rpm, 5um 분쇄 시 약 700rpm의 회전수를 사용하였다. 장입되는 ball의 무게비는 stainless와 alumina의 비중 차이 때문에 약 2배의 차이가 있었다. 실리카질 재료는 경도가 다른 광물보다 커서 분쇄하기가 대단히 어려운 광물 중 하나로, 분쇄 후에도 모서리가 뾰족한 모양이고 분쇄도중에 불순물에 따라서 품질의 저하가 발생하고, 분쇄의 이송과정에서 이송판 또는 토출구의 마모 등 문

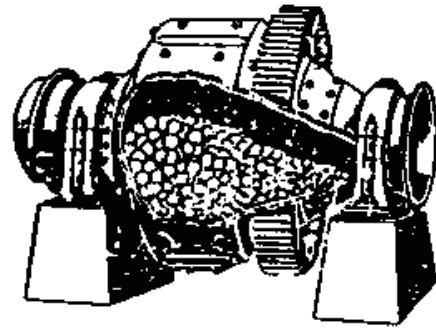


그림 8. Conical ball mill



그림 9. 'I'사의 Conical 볼밀(Ball Mill)

제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 입자의 모양을 구형화 하였다.

2.3 LCD 폐유리 입경 크기별 분쇄

1차 미분화 작업을 통해 <그림 11>와 같이 파쇄형태에 따라 5개의 재료로 구분하고 이 중 10~20um이 가장 많이 분포하고 있는 EM-1000의 시료를 선택하여 목적에 따라 시멘트와 유사한 평균입경 12um 미분말과 평균적으로 시멘트보다 작은 입경인 5um로 2차 미분을 수행하였다. 이러한 입경의 영향은 LCD 폐유리의 활용에 있어서 큰 영향을 미친다. 2차 분쇄된 최종 미분말의 입형은 <그림 6>과 같으며 장시간의 분쇄 공정을 통해 재료의 구상화가 다소 진행 되었다. 일반적으로 분쇄의 흡착성과 반응성의 증대에는 고체의 표면적이 관여하

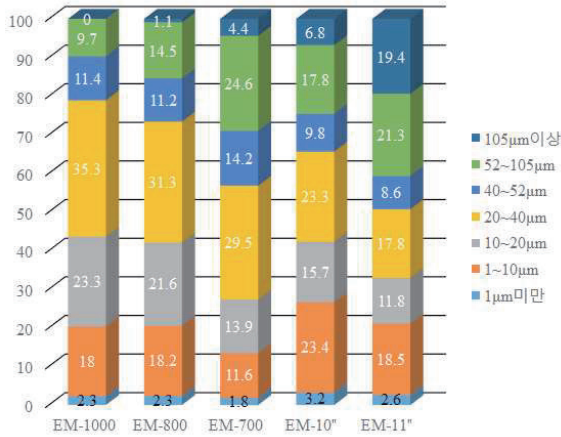


그림 10. 1차분쇄 후 시료의 입도 현황

고 있다. 비표면적은 분쇄율에 따라 증대되며 재료내에서 화학적 반응의 속도를 촉진시킬 수가 있다.

2.4 LCD 폐유리 입도분포 및 형상 평가

실험에 사용한 LCD 미분말은 볼밀을 이용하여 시멘트 대체재로서의 활용성과 성능을 높이기 위해 OPC 보다 재료의 평균입경을 작게 하였다. 실제로 OPC를 구성하는 가장 작은 입경이 3~5 마이크로 미터를 포함하는 반면, LCD 미분말에는 일부 1마이크로미터보다 작거나 조금 더 큰 미세한 크기를 포함하고 있다. 즉, 시멘트 재료의 입도분포가 유사하지만 실제로 LCD 미분말이 OPC보다 입경이 더 작게 분쇄되었다. 이러한 작용은 콘크리트 내부의 시멘트 페이스트에서 물리적 또는 화학적으로 어떠한 과정을 통해서든지 필러역할과 포졸란 반응을 통해 강도와 내구성 측면에서 유리하게 작용할 것이다. 시멘트의 대체를 위한 LCD 유리 파우더는 평균입경에 따라서 2종류로 구분하였다. 연구목적에 따라 LCD 폐유리를 5 µm, 12 µm로 나누어 2차 분쇄하였고, 분쇄된 재료의 Particle Size Analyzer(PSA) 시험성적서 및 입도분석 결과를 <그림 11>부터 <그림 13>까지 재료별로 나타내었다. 전체적인 LCD 폐유리의 입도분포는 크기는 OPC의 입도분포와

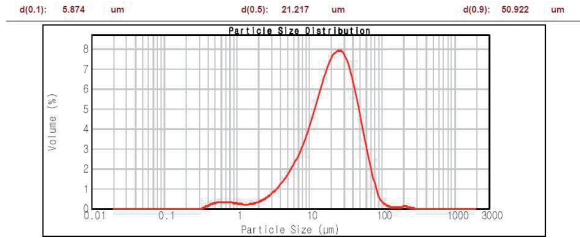


그림 11. OPC의 입도분포 곡선

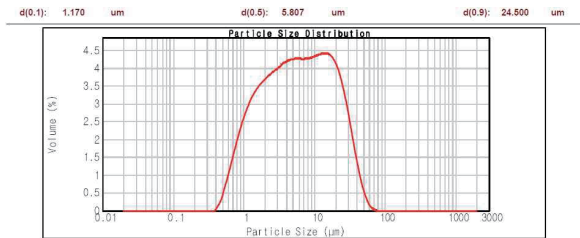


그림 12. 평균입경 5.807 µm LCD 폐유리의 입도분포 곡선

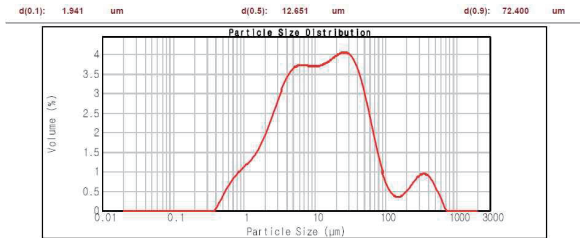


그림 13. 평균입경 12.651 µm LCD 폐유리의 입도분포 곡선

유사하게 나타났다.

LCD 미분말의 낮은 입경은 높은 비표면적에 기인하여 포졸란 활성의 개선을 기대할 수 있으며, 실제입경의 크기는 포졸란 반응의 특성에 있어서 중요한 파라미터이다. 이에 따라 평균입경 12.651 µm는 입경의 분포와 크기가 시멘트와 유사하고, 평균입경 5.807 µm의 미분말은 시멘트의 분말도가 약 2배 이상 되도록 분쇄되었다. 2가지 재료 모두 1µm이하의 미분말을 포함하고 있으며 최소입경의 미분말 10%의 평균은 1.941 µm, 1.170 µm이다. LCD 5 µm 재료가 평균입경 5.807 µm으로 비교적 미세한 입자로 구성되어있으며, LCD 12 µm 재료는 이보다 큰 평균 12.651 µm 로 나타났다. 이는 사용된 OPC의 평균 입경을 <그림 11>과 같이 21.217µm로 보았을 때 시멘트의 평균 입경보다 미분되어 분쇄된 것으로 나타났다.

LCD 12um의 입도분포곡선 결과를 보면 시멘트와 상당히 유사한 입도분포를 보이고 있다. 2차 분쇄된 LCD 폐유리의 입도분포 평균입경을 고려할 때, 비교적 20um 이하 미분의 입도가 상대적으로 많은 반면에 100um 이상의 조대한 입자가 다수 함유되어 있음을 보여주고 있다.

3. 결론

전자장치 및 디스플레이 산업과 기술의 고도화로 매년마다 대량 발생하는 LCD 폐유리는 재활용이 거의 이루어지지 않는 실정이며, 대부분 매립, 소각되어 사회적, 환경적 문제를 야기하고 있다. 이는 우수한 자원 중 하나인 유리에 대한 경제적이고 효과적인 재활용 방안이 확립되어 있지 않기 때문이며, 이를 극복하기 위한 건설재료로서의 재활용 연구를 체계적으로 진행하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 특성은 LCD 폐유리 미분말의 입경과 성분 등 여러 가지 요인에 의한 영향을 받으며, 국내에서 발생하는 LCD 폐유리 미분말의 경우, 연간 발생량이 국내에서 콘크리트 재료로 사용할 수 있을 정도로 발생하는 것이 확인되고 있다. LCD 폐유리 미분말을 시멘트 대체재로 사용함으로써 저시멘트 효과 및 CO₂의 발생량을 저감시켜 환

경적인 문제를 해결할 수 있으며, 폐유리를 매립 및 소각으로 소비되는 사회적 문제를 일거에 해소할 수 있다. 또한 콘크리트 내부에서의 화학적 성분을 바탕으로 포졸란 반응을 통한 장·단기 강도 및 내구성 향상을 기대할 수 있다. 이와 같은 연구를 더욱 적극적으로 진행하여 LCD 폐유리 및 파유리 소재를 효과적으로 회수하고 재활용할 수 있는 기술을 확립하며, 상용화 하는 방안을 중장기적으로 모색하는 것은 바람직하다고 판단된다.

참고문헌

1. 정범석, 최판길, 윤경구, 권수안, "열화된 줄눈콘크리트 포장의 파손원인 분석", 한국도로학회 불학술대회 논문집, pp. 211~217 (2009)
2. 이승훈, 김형두, "복합열화 환경하에서의 고로슬래그미분말 사용 콘크리트의 내구성능평가", 구조물진단학회지, Vol.14, No.2, pp. 171~175 (2010)
3. 나옥빈, 이재승, "제설제 사용에 따른 콘크리트 포장의 염화물 침투 예측기법", 한국방배학회논문집, Vol. 14, No. 2, pp. 77~83 (2014)
4. N. Salemi and K. Behfarnia, "Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement", Construction and Building Materials, Vol. 48, pp.934-941 (2013)
5. R. Nassar, P. Soroushian and T. Ghebrab, "Field investigation of high-volume fly-ash pavement concrete", Resource, Conservation and Recycling, Vol. 73, pp. 78-85(2013)

담당 편집위원 : 임명관(송원대학교)

●● 학회 특별회원사 동정 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학계, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 특별회원사의 최신 정보 및 기술현황 등의 홍보사항을 학회지에 무료로 게재하여 널리 홍보하고자 하오니 관심 있는 특별회원사는 아래 사항을 참조하여 원고를 송부하여 주시기 바랍니다.

1. 특별회원사 홍보내용

특허, 신기술, 신제품, 수상실적, 세미나 및 시연회, 사회공헌 등

2. 원고 분량

A4 2~4매 내외이나 특별한 제한이 없음(그림 또는 사진포함 가능)

3. 보내실 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 차장(E-mail : rcr@rcr.or.kr, Tel.02-552-4728)