

## 폐유리 재활용 기술

1990년대 후반기에 들어서면서, 폐기물의 양은 국내는 물론 전세계적으로 매년 급격히 증가하고 있는 추세이다. 특히, 자원 고갈의 심각성과 아울러 소각처리가 어려운 폐기물의 경우, 매립지의 한정이라는 국면을 맞이하면서 보다 근본적이고 적극적인 대책 수립이 요구되고, 이에 따라 폐기물의 자원으로서의 효율적인 처리와 이용에 대한 관심이 증대하게 되었다.

이러한 배경속에 그동안 국가적으로 폐철, 페플라스틱, 폐유, 폐타이어 등 많은 폐기물에 대한 재활용 기술 연구가 진행되어 왔으나, 유리의 경우 재활용이 유리한 품목임에도 불구하고 아직까지는 유리 용기류에 한해 유리병 제조시 원료로 재활용되는 것이 대부분이며, 이외의 재활용 기술 수준 및 기술연구가 미흡한 실정으로, 향후 폐유리의 재활용을 상층에 한계를 보이고 있다.

반면, 정부에서는 90년대부터 쓰레기 종량제, 예치금·부담금제도, 포장재 감량화 지침 등 폐기물 감량·재활용정책을 중점 추진하고 있으며, 2003년부터 자원순환형 사회구축이라는 장기정책 목표달성을 위해 '생산자 책임 재활용제도'를 도입하여 여러 폐기물의 효율적인 관리를 도모하고 있다. 따라서 본고에서는 폐기물 증가에 의한 환경오염 억제 및 자원 재활용을 위하여 국내·외에서 연구 개발되고 있는 폐유리 재활용 기술에 대하여 소개하고자 한다.



이희수 연구위원

- 산업기술시험원 재료평가팀 수석연구원 팀장
- 산자부 한국파인세라믹스 표준기술연구회 연구위원
- 산자부 에너지 자원기술비금속 연구위원

### 폐유리 발생 및 재자원화 현황

국내 유리병의 변화 추이를 살펴보면 60년대 1차산업의 수동제병위주 산업구조에서 80년대 들어 점차 기계화, 산업화와 국민생활수준의 향상에 의한 대량생산 및 대량소비의 경제구조로 변화함에 따라, 포장용기업체도 소비패턴의 급격한 향상으로 수많은 종류의 제품과 질 좋은 용기로 발전을 거듭하였다. 유리병의 경우 70~80년대 유리병 파동으로 한때 호황기를 맞이하는 시기도 있었고 이후 지나친 시설 및 설비확장과 이로 인한 공급과잉으로 어려움을 겪은 때도 있었다. 더욱이

우리제품의 비탄력적 수요공급 성향은 수급관리의 어려움으로 지적되면서 가격변동과 원료조달문제 등의 난관에 부딪치기도 했었다. 80년대 후반은 우리경제의 활성화 조짐과 소비기호의 패턴이 대량화, 간편화로 바뀌면서 신제품의 개발과 보급 및 기능성 용기로서의 판로 확대를 유지하게 되어 매년 생산량의 증가를 보이기도 했다.

현재, 국내 유리병 생산업체는 자동제병과 수동제병 공장으로 나뉘어져 있으나, 90% 이상이 자동제병공장에서 생산되고 있으며, 국내 자동제병 공장에서 연간 생산하는 양으로서 1994년 이후 50% 이상이 음료병에 해당된다. 발생된 유리병 중 주류병, 청량음료병 등의 보증금비는 93.5%(98년도 기준)가 역루트로 회수되어 재사용되고 있다. 또한 일회용병은 지자체 등에서 수거한 유리병을 민간수집상의 가공(선별, 파쇄)을 통해 제병공장에서 원료로 재자원화 하고 있으나 Table 1에 나타난 바와 같이 재활용율이 저조하고 대부분 타용도 개발이 아닌 유리병 원료로 사용되고 있어 고부가가치 제품으로 재자원화 할 수 있는 기술개발이 시급하다.

Table 1. 국내 유리병 발생 및 재활용 현황

종류	연도	1996	1997	1998
반복 사용병 <sup>1)</sup>	발생량 (판매량, 백만본)	6156.8	5735.8	5386.6
	재사용량 (Reuse, 백만본)	5567.4	5355.3	5035.9
	재사용율 (%)	90.3	93.4	93.5
	발생량 (판매량, 톤)	317,412	356,122	312,412
일회용병 <sup>2)</sup>	재활용량 (Recycling, 톤)	58,912	80,947	145,006
	재활용율(%)	18.6	22.7	46.4

회장품 및 의약·농약병 제외

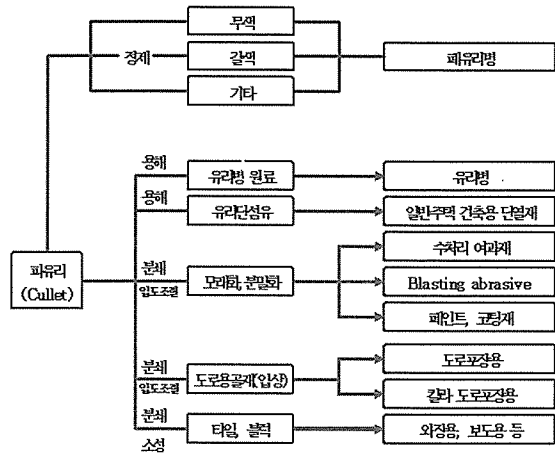
주1) 주류 및 음료 협회 자료

주2) 환경부 및 유리재활용협의회 자료

## 폐유리 재활용 기술

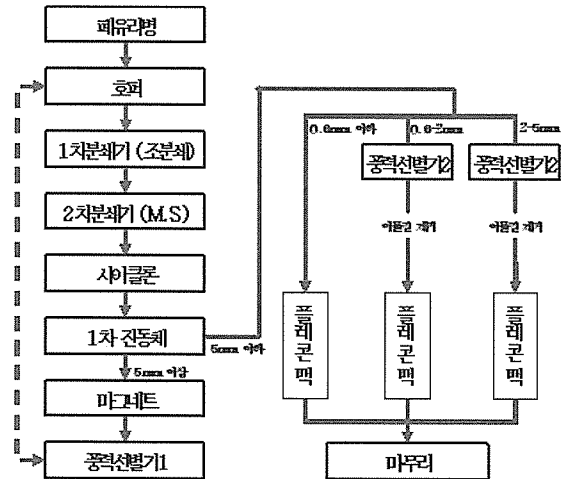
국내·외에서 연구 개발되고 있는 폐유리 재활용 분야를 Fig. 1에 나타내었는데 타용도로는 도로나 건축자재로의 활용이 두드러지고 있다.

Fig. 1. 국내·외 폐유리병 재활용 방법 및 용도



## 가. 폐유리병 파쇄기술

Fig. 2. 파유리 제조 공정



미세하게 분쇄된 유리는 roof coating, 연마재, fused glass, 중합체 혼합제, 페인트 첨가제, 수처리 여과재, 조경물질, 혼합시멘트 등으로의 다양한 사용이 실험되어졌다. 이들 적용에 있어 일부는 특정 유리분말 크기를 요구하며, 이에 따른 입경 조절이 가능한 파쇄(분쇄)기술이 필요하다. 파쇄공정의 한 예를 살펴보면 Fig. 2와 같다. 미리 색 선별을 거친 폐유리병을 일차파쇄(조분쇄)한 후 Microsizer에서 이차파쇄를 거치는데, 이 단계에서 파유리는 자연사와 유사한 형상을 가진다. 다음으로 1차 진동체에서 선별된 5mm 이상의 파유리

는 마그네트 장치 및 풍력선별기(1)를 이용하여 이물질  
을 제거한 후 최초의 호퍼로 되돌아가서 5mm 이하의  
입경까지 재파쇄시킨다. 한편, 5mm 이하의 파유리는  
2차 진동체에서 0.6mm이하, 0.6~2mm, 2~5mm의 3  
가지 입도로 나누어지고, 0.6~2mm, 2~5mm의 입도  
에 대해서는 풍력선별기 2, 3에서 이물질을 제거한 후,  
각각 우레콘백에 담겨진다.

#### 나. 완속 및 급속 여과제

워싱턴의 도시 Roslyn에서는 완속 모래여과에서 여  
과제로서의 파유리 사용가능성을 평가하기 위하여 실험  
실 규모 연구가 이루어졌다. 이 연구에서 사용된 모든  
여과제의 입경특성은 EPA 지침 매뉴얼과 10개주의  
표준 지침에 포함되어 있다. 5달 반동안 일주일에 5  
일간 원수 및 여과수의 샘플을 수집, 탁도를 측정하고  
결과, 단지 Ellensburg sand 만이 MCL(최대오염도)내의  
배출수 탁도를 유지하였다. 또한 최종 수두손실에 도달  
하는 시점을 결정하기 위하여 각 여과제에 대한 압력강  
하가 관측되었다. 완속여과에 대한 미국 수처리 공정  
매뉴얼에서는 완속 모래여과제는 최종 수두손실전까지  
적어도 한달 이상은 유지되어야 한다고 지침하고 있는  
데, 실험결과 4가지 여과제 모두 이 기준을 만족하였  
다. 특히, Trinidad Sand는 역세척 기간이 평균 6개월  
간으로 가장 좋은 성능을 보였으며, 파유리 여과제는 6  
개월 실험기간동안 2번의 역세척을, Stelacoom Sand  
와 Ellensburg Sand는 13개월의 실험기간동안 3번의  
역세척을 각각 보여주었다. 일반적으로 여과제 모두 비  
슷한 대장균 제거효율을 가졌다. 실험실 규모 연구동안  
세균성 오염물질에 대한 제거는 유리여과제가 완속여  
과에서 일반적으로 예상되는 활성도를 가지고 있다는  
것을 증명하였다.

완속 여과제로서의 파유리 사용 연구에서 파유리가  
기존 모래여과제의 효과적인 대체물임을 확인한 이후,  
CWC(Clean Washinton Center)에서는 이를 급속여과  
로의 적용으로 확대 실험을 행하였다. 이전에도 펜실베  
니아주와 San Joe 주립대학에서의 실험실 연구에서 파  
유리는 수처리 여과제에서 천연모래의 대체 물질로서  
효과적인 여과제임을 보여주었다. 이번 실험은 체육관

수영장을 대상으로 실규모로서 행해지면서, 여과재로  
서 재활용된 유리 모래의 시장성을 고려한 경제성 평가  
에 대한 정보 제공에 대해서도 함께 이루어졌다. 여과  
재로 사용된 파유리는 시애틀에 있는 TriVitro 사에서  
제조된 VitroCLean™으로 기존 실리카모래와 비교하  
여 실험이 이루어졌다. 실험에 사용된 파유리는 다른  
변수로 작용할 수 있는 어떤 유리물이나 무기물로 오염  
되지 않은 깨끗한 유리를 사용하였다. 현장 적용성 평  
가를 통하여, 기존 모래 여과제에 비하여 탁도 25% 감  
소, 역세척시간 23% 감소 및 역세척 효율 증가, 여과제  
사용량 20% 감소의 효율이 있음을 보여주었다.

#### 다. 유리연마제(Blasting Abrasive)

기존의 실리카 모래는 Silicosis와 같은 폐질환을 일  
으킬 수 있는 자연 발생적 결정 실리카를 함유하고 있  
어 작업 중 발생하는 먼지가 인체 건강에 위해할 수 있  
다는 문제점을 갖고 있다. 그러나 유리는 비록 그 원료  
가 실리카모래이지만, 제조과정에서 결정구조가 비결  
정질 상태로 전환되어, 실험결과에 의하면 1% 미만의  
결정질 실리카를 함유하고 있다. 또한 연마제로서의 사  
용을 위한 실리카 모래와 유사한 물리적 특성으로 가공  
되어 질 수 있다. 연마제로서의 파유리는 미국에서 몇  
몇 상표명까지 갖고 개발, 판매되어 왔었다. 그러나 그  
동안 이들 제조업자들은 그들 자신만의 고유 자료로서  
개발하여 왔기 때문에, 공공적인 정보가 한정되어 있었  
다. 이에 따라 CWC와 ReTap에서는 파유리 연마제에  
대한 공공적인 정보를 개발하기 위하여 실험실 및 현장  
적용 실험을 지원하였다. 실험에서는 다양한 입경의 파  
유리가 강철의 연마에 적합하다는 것을 보여주었다. 유  
리는 건조 연마제로 사용될 수도 있고, 슬러리 세척과  
같은 공정에 사용을 위해 물과 혼합하여 사용될 수도  
있다.

#### 라. 유리섬유

유리섬유는 면상태의 섬유로서, 섬유화는 보통 유리  
원료를 고온의 온도(1,500~1,600℃)에서 용융하여 이  
를 섬유화 장치에서 섬유로 만든다. 대표적 섬유화 방  
법으로 원심법과 화법이 있다. 원심법은 용융 유리를

고속회전하는 원심기에 흘려 넣어 원심력에 의해 원심기의 측면 벽 세공을 통하여 날려보내는 방법이다. 화법은 노즐로부터 나오는 용융유리를 냉각하여 연속적으로 매우 가는 섬유로 뽑아내면서 여기에 고속의 연속 가스를 불어 날려보냄으로서 섬유를 만드는 방법이다. 유리섬유의 특징은 단열성, 흡음성, 불연성이 우수하고 부패가 발생되지 않으며, 또한 가볍기 때문에 운송이나 시공이 용이하다는 이점이 있다. 따라서 유리섬유의 용도는 건축, 설비, 토목, 가정용품, 음향제품, 스포츠·레저용품, 자동차, 선박, 각종 산업기기의 보온·단열·흡음·방진재료 등 다양하게 사용되어질 수 있다.

#### 마. 아스팔트 포장용 파유리 활용기술

유리병의 다용도 활용 중에서 주목받고 있는 것은 토목건축 분야에서 대량으로 사용되는 모래의 대체로서의 파유리 이용이다. 특히, 도로포장으로의 활용은 무한한 수요가 예측되는 부문이다.

이미 아스팔트 포장은 새로운 도로의 시공이나 경도를 크게 요구하는 공사 등에 활용되고 있다. 아스팔트 포장에 파유리를 사용할 경우 주간에는 태양광에 의해, 야간에는 자동차 헤드라이트에 의해 도로 조도를 향상시킬 수 있어 운전자의 시야를 넓힐 수 있다는 장점이 있으며, 더욱이 유리병을 회수, 재활원화하는 지역에서 사용된다면, 운송비도 경감시킬 수 있어 경제적으로도 좋은 용도가 된다. 통상 아스팔트포장의 구조는 표층, 기층, 노반, 노상으로 이루어져 있으며, 표층과 기층이 아스팔트콘크리트로 되어 있고, 이 아스팔트콘크리트는 쇄석, 모래, 아스팔트의 혼합물이지만 현재 기술에서는 쇄석과 모래의 일부를 최대 15%까지 파유리로 대체하는 것이 가능하다.

쇄석 또는 모래의 대체품으로서 사용되는 아스팔트 포장용 파유리는 유리병 원료용 파유리에 요구되는 품질보다도 낮은 품질로서 사용되어질 수 있다. 파유리는 세정할 필요도 없이 금속류의 혼입에만 유의한다면 문제는 없을 것이다. 또한 새로운 파유리 제조설비로서의 분쇄기술을 통하여 천연모래와 동일한 형상으로 분쇄, 예리한 갖을 없앨 수 있다면 안전하게 사용될 수 있다.

대표적인 성상을 다음의 Table 2.에 나타내었는데,

분쇄 파유리는 입도분포에 따라 배합비가 결정되기 때문에 통상 일정한 입도와 양을 확보하는 것이 필요하다.

Table 2. 포장용 재료로서의 파유리 성상

비 중	(5mm 이하의 분쇄 파유리에 대해) 진비중 2.5, 단위비중 0.3~1.4
흡 수 율	(5mm 이하의 분쇄 파유리에 대해) 흡수율 0.3~0.4%
침 가 율	전체 혼합물의 10~15%
형 상	날카로운 각(edge)이 없는 형상
입 도	포장도로 표면에 의도적으로 사용하는 방법 이외에는 통상 4.75mm 이하를 사용

일본에서 파유리의 도로포장용 재료로서의 활용은 1993년부터 여러 구간에서 시공되고 있다. 약 5년간 155,000㎡, 즉 폭 7.5m의 일반도로로 환산하여 약 20km의 공공도로가 포장되어, 약 2,700톤의 파유리가 사용된 것으로 추정된다.

Fig. 3. 파유리를 이용한 아스팔트 포장



#### 바. 칼라도로포장용 파유리 활용기술

최근 칼라도로 포장용 파유리 활용이 급격히 각광을 받고 있다. 박층 칼라수지 몰타르 포장은 일반적으로는 자연석, 인공칼라골재나 고무투브 등과 수지를 혼합하여 포장하는 공법이다.

유리병 Cullet의 박층 칼라수지 몰타르 포장으로의 사용에 대해서는 지금까지 자연석이나 인공칼라골재 등의 일부 치환재로서의 사용 예는 있지만, 여기서는 파유리 이용의 촉진을 도모하기 위해서 골재로서 파유리만을 사용하였고, 뿐만 아니라 유리병의 색과 입경에 따른 색의 변화를 이용함으로써 칼라화를 행하였다. 그

Fig. 4. 폐유리 재활용 칼라도로포장재

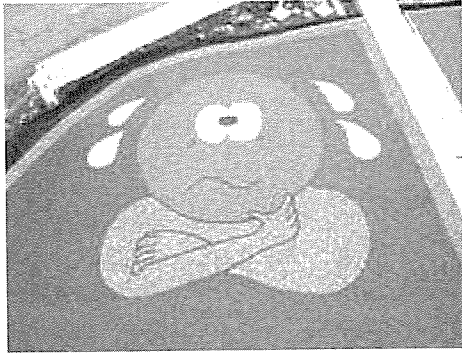
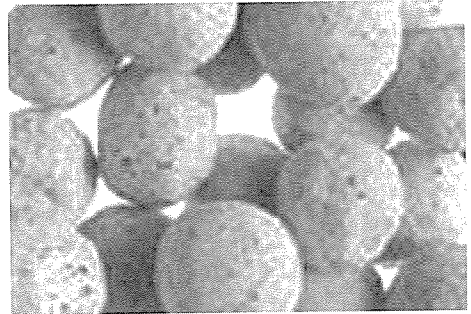


Fig. 5. 폐유리 재활용 경량골재



러나 파유리 사용의 경우 파유리의 흡수율이 적고, 수지와의 친화력도 나쁘기 때문에 수지의 주재료 및 경화제의 선정에 주의하고 수지와의 혼합 전에 첨가제를 가하여 파유리와 수지와의 친화력을 향상시켜야 한다.

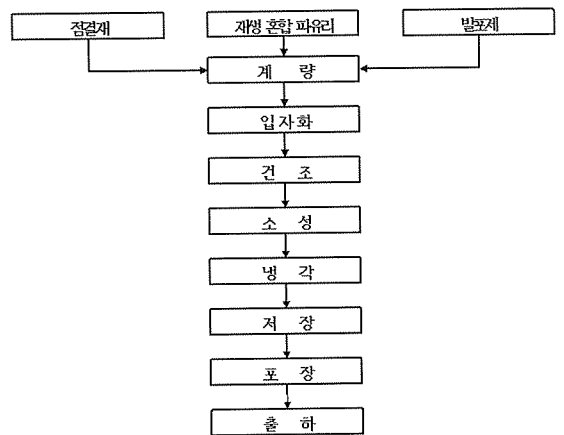
이 공법은 유리의 색을 살려 아름다운 경관을 연출할 수 있어 공원의 보도나 육교 등으로의 시공에 적합하다.

또한 강도 향상, 미끄럼 방지와 적당한 투수성을 가지고 있어 표면에 수분이 고이는 것을 방지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 일본서는 파유리를 사용한 박층 칼라수지 몰타르 포장을 보도, 육교, 공원도로 등 외에도 하천호안의 하천명 표시판이나 터널 입구의 디자인 판넬 등에 시공하였으며, 국내 일부 기업에서도 기술개발에 성공하여 상용화 진행 중에 있다.

### 사. 경량유리재생골재

폐유리를 이용한 경량골재는 유리를 주성분으로 하는 완전 무기질 소성체로서 표면에는 알루미늄의 미분말이 코팅되어 있다. 따라서 높은 내열성을 가지며, 내구성, 내알칼리성, 낮은 흡수성에 우수하다. 또한 미세한 독립 기포를 무수히 내장한 발포구조체로서, 경량이면서 단열성에 우수하며, 독립기포로 인한 돔구조의 응력분산효과에 의해 매우 뛰어난 내압축강도를 발휘한다. 이와 같은 특징으로 인하여 유리재생경량골재는 시멘트제품(흡음재 등), 수지제품, 복합판(바닥판넬, OA 마루 등), 시멘트·수지제품, 아스팔트, 점토제품(소성 경량타일 등) 등에 사용되고 있다.

Fig. 6 경량유리골재 제조 공정



경량유리재생골재의 제조방법은 Fig. 6과 같으며 30mm 이하의 혼합 파유리를 파쇄기에 의해 알맞은 입도로 분쇄한다. 여기에서 흡수율이 큰 파유리나 금속, 도자기 등의 이물질은 분쇄효율을 저하시킴과 동시에, 골재 입자 구조 결함의 원인이 되기 때문에 주의가 요구된다. 건조시킨 유리분말, 점결재, 발포제의 각 원료 탱크로부터 소정량을 계량하여 조립기에 주입, 일정 입경 범위를 가진 치밀한 구형 패렛트로 입자화 한다. 구형 패렛트는 건조기에서 건조시킨 후 로터리킬른에서 소성, 발포시킨다. 최종적으로 서냉 후 발포입자는 입경별로 제품 탱크에 저장하고 포장하여 출하한다.

### 아. 유리 재활용 타일

일반 자기질타일과 폐유리 재활용 타일의 원료 배합과 화학조성을 비교해보면 일반 자기질타일에는 골격이 되는 규석(비가소성원료), 성형성을 부여하는 점토

Fig. 7. 폐유리 재활용 타일

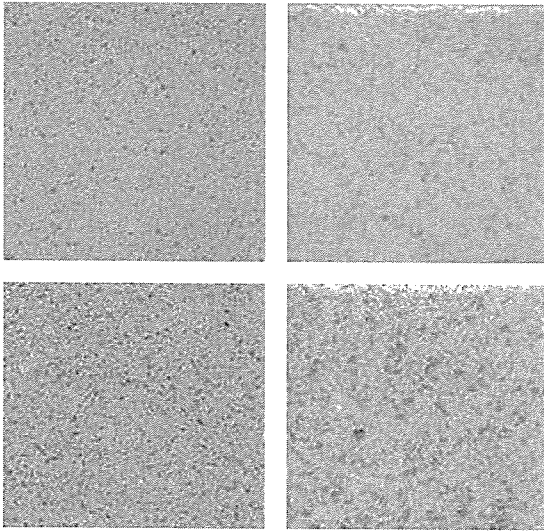


Fig. 8 폐유리 재활용 타일 포장 사례



(가소성원료), 소결재로서의 역할을 하는 장석(매용원료)의 3요소가 필수적이다. 장석은 고온에서 용융해서 점착성이 있는 액체가 되어 성형체와 입자사이에 충만하여 큰입자를 안고, 작은 입자를 녹여 넣어서 냉각하

면, 고형화하고 입자와 입자를 확고하게 결합시키는 역할을 한다. 반면, 폐유리 재자원화 타일에서는 유리가 골격이 됨과 동시에 소결재로서의 역할을 한다. 유리 재활용 타일은 유리병 혼합 파유리를 주원료로 이용(약 70% 이상)하여, 고갈화와 자연파괴가 염려되는 천연도자기질 점토원료의 사용을 억제할 수 있는 친환경적 타일이며, 흡수성, 미끄러짐저항, 내약품성, 동결융해성 등 물성이 우수하고, 동시에 경관재료로서 미장성도 함께 가지고 있다. 또한 종래 1,350℃의 소성온도를 900~1,000℃까지로 낮출 수 있어 에너지자원의 절약과 CO<sub>2</sub> 배출량의 26% 저감이 가능하다. 이와 같은 폐유리 재활용 타일은 공원, 보도, 광장 등의 포장재, 실내의 바닥면, 실외벽 등에 사용이 가능하다.

## 요약

최근 폐기물 발생량 증가로 인한 환경오염 문제 및 자원고갈 문제가 심각하게 대두되고 있으며 정부에서는 2003년부터 생산자책임재활용제도(EPR)하에서 다양한 폐기물의 재활용을 추진하고 있다. 이에 따라 폐유리 재활용 분야에 대한 기술개발도 절실히 요구되고 있다. 이를 위해서 정부에서 폐기물 재활용에 대한 규제뿐만 아니라 다양한 정책지원이 이루어지고 산·학·연 기관에서 공동연구 등을 통해 보다 다양한 재활용 기술을 개발하여 폐유리 재활용품의 고부가가치화를 이룬다면 폐유리 재활용 분야의 장래는 밝다고 할 수 있다.

