≫ 기술자료 ≪

http://dx.doi.org/10.7844/kirr.2015.24.1.58 pISSN: 1225-8326 eISSN: 2287-4380

폐 평판디스플레이 패널유리의 재활용 연구 동향

신동윤 · 강이승 · 박재량 · 이찬기 · 윤진호 · [◆]홍현선

고등기술연구원 신소재공정센터

Current Research Trend on Recycling of Waste Flat Panel Display Panel Glass

Dongyoon Shin, Leeseung Kang, Jae Layng Park, Chan Gi Lee, Jin-Ho Yoon and [†]Hyun Seon Hong

Advanced Materials & Processing Center, Institute for Advanced Engineering(IAE), Yongin, Korea

요 약

국내 디스플레이 산업의 핵심기술과 글로벌 점유율은 세계 최고 수준이지만 폐 디스플레이의 재활용 관련한 전반적 기술은 매우 미흡하고 폐 디스플레이의 유리소재는 전량 매립하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 폐 초박막 액정표시장치(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display) 유리를 고강도 콘크리트 파일 및 발포체의 원료로 재활용 하는 연구, 초박막 액정표시장치 제조 공정에서 발생하는 불량품인 파유리를 장섬유 및 단섬유 등으로 재활용 하는 연구 동항에 대하여 조사하였다. 폐유리를 재활용한 원료 성분은 고강도 콘크리트 파일과 발포체 원료로 재료 재활용이 가능한 것으로 입증되었으며 특히 콘크리트 파일의 경우 기존 제품보다 항상된 특성을 나타내었다. 이외에도 파유리를 장섬유나 단섬유로 재활용 하는 기술은 이미 상용화 단계에 있으므로 향후 폐 디스플레이 유리 소재의 상용화 재활용 시스템을 구축할 수 있는 기술을 확립하는 방향으로 연구를 진행할 필요가 있다.

주제어 : 폐 LCD, 폐 FDP, 재활용, 패널, 유리

Abstract

Although Korea is a top market sharing and world leading producer and developer of flat panel display devices, relevant recycling technology is not up to her prestigious status. Besides, most of the waste glass arising from flat panel displays is currently land-filled. The present paper mainly reviews on development of recycling systems for waste TFT-LCD glass from end-of-life LCD TVs and monitors and TFT-LCD process waste of crushed glass particles with target end uses of raw material for high strength concrete pile and glass fibers, respectively. Waste LCD glass was recycled to fabricate ingredients for high strength concrete piles with enhanced physical properties and spherical foam products. The waste LCD glass recycling technology is already developed to fabricate long and short fibers at commercial level. In view of these, future R & D on waste LCD glass materials is to be directed toward implementation of commercial materials recycling system therefrom.

Key words: Waste LCDs, Waste FPDs, Recycling, Panel, Glass

[·] Received: January 13, 2015 · Revised: January 30, 2015 · Accepted: February 9, 2015

^{**}Corresponding Author : Hyun Seon Hong (E-mail : hshong@iae.re.kr)

Advanced Materials & Processing Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28, Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon,

Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 449-863 Korea

Tel: +82-31-330-7481 / Fax: +82-31-330-7116

[©] The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

국내 디스플레이 산업의 핵심기술과 이를 통한 평판 TV 글로벌 점유율은 2007년 기준으로 매출은 4조원, 판매대수는 324만대로 세계 최고 수준이지만 폐 디스플레이에 관한 재활용 기술 및 재활용 현황은 선진국 대비 월등히 낮은 수준이다. 국내 폐 디스플레이 발생 량은 2015년부터 매년 200~300 만대 정도로 예측되고 있는데 반하여, 현재 폐 디스플레이 재활용 기술 수준은 제품을 구성하는 단일부품 및 모듈에 대해서 극히일부만 진행 중에 있다¹⁾.

LCD (Liquid Crystal Display) 제품을 해체하여 크기 및 생산 년도 별 소재 분포 비율을 조사한 결과, 제품 평균 중량은 약 23 kg이었으며, 그 중 유리가 차지하는 평균 조성은 약 5.8%로 나타났다¹⁾. 이에 따라 폐 LCD 제품 발생량(매년 약 200만대)으로부터 계산해보면, 폐 LCD 유리 발생량은 매년 약 46만 톤에 달할 것으로 예상된다.

국내의 경우 폐 디스플레이 해체/분리를 통해 얻은 Case/Frame, Driving Circuit Unit (Printed Circuit Board, 전선 등) 등 비교적 재활용이 용이한 부품은 재활용하고, 재활용 기술력이 미비한 패널, Back Light Unit 등은 위탁 처리하여 매립/소각 처리하고 있다. 유용자원을 함유하고 있는 부품들을 소각 처리하는 주된 이유는 유리와 ITO (Indium Tin Oxide) 필름의 분리/회수, 유리와 형광체 분리/회수, 유해물질 무해화 등에 필요한 전처리 기술이 미흡하기 때문으로, 고가의 희소금속 및 희토류 금속자원 확보를 위한 ITO 필름, 형광체 등을 효율적으로 분리/회수할 수 있는 기술 개발이 절실하다²).

폐 디스플레이 패널을 소각시켜 폐기할 경우 폐기되는 유리의 비중이 너무 높아져서 WEEE의 의무회수율 규정 을 준수하기 어렵게 되기 때문에 제품 생산 업체나 국가 경쟁력 강화를 위해서 효과적인 사용 후 폐 디스플레이 제품 재활용 기술의 개발은 전략적으로 매우 중요하다³⁾.

발생하는 폐 디스플레이의 종류는 현재까지 CRT (Cathode-Ray Tube)가 주를 이루고 있지만 앞으로 점점 LCD가 이를 대체할 것으로 보인다²⁾. 하지만 폐 LCD 재활용 기술 중 아직 상용화되지 않은 것이 많으며, 특히패널 부분의 유리는 전량 매립되고 있는 실정이다. 디스플레이의 유리는 디스플레이 특성 상 일반 유리보다 고품위의 유리로서 성분도 일반 유리와 다를 뿐 아니라 제조 방법도 복잡하고 제조 단가도 고가이다. 따라서 경제적, 환경적인 측면에서 이러한 폐 디스플레이의 유리를 재활

용하기 위한 방안을 적극적으로 개발해야 한다.

2. 디스플레이 유리 소재

2.1. 디스플레이 종류별 패널 유리의 특성

디스플레이에는 CRT, PDP (Plasma Display Panel), OLED(Organic Light Emitting Diode), LCD의 4가지 종류가 있으며 디스플레이의 종류별로 사용되는 패널 유리기판의 특성도 달라진다. CRT용 유리기판은 조성이 서로 다른 전면유리와 후면유리로 구성된다. 전면유리는 alkali-alkaline earth-silica계의 유리로서 Na₂O와 K₂O알칼리 산화물을 동시에 함유하고 있으며, 후면유리는 alkali-alkaline earth-leadsilica계 유리이다. 전면유리에는 network modifying oxide의 역할을 하면서 X-선흡수계수의 증진에도 기여할 수 있는 BaO와 SrO성분이 중요한 역할을 하고 있으며 후면유리의 경우 PbO성분이 X-선 흡수계수의 증진에 기여하고 있다⁴).

PDP용 유리기판의 재료로는 현재 알루미노규산염 (alumino-silicate) 계열의 유리가 사용되며 strain point 가 580°C정도로 높기 때문에 PDP의 유전체, 전극, 격 벽을 형성하기 위한 고온 소성공정 시 기판의 왜곡을 최소화하기에 적합하다⁴⁾.

OLED용 유리기판 재료로는 소다석회(soda lime) 유리와 무알칼리 유리가 대표적이며, 일반적으로 저가의 소다석회 유리를 정밀가공(연마)하여 표면 평활도를 향상시킨 뒤 세정하여 OLED 패널 완제품에 사용하고 있으며 일부 수요처의 요구에 따라 고가의 무알칼리 유리도 특수 용도로 사용되고 있다⁴).

LCD용 유리기판은 일반적으로 무알칼리성으로 내구성을 갖추어야 한다. 만일 유리 내부에 알칼리 성분이었으면 액정에 알칼리 이온이 용출되기 때문에 액정의특성을 변화시키거나 색이 균일해지지 않아 LCD 패널안정성에 큰 문제를 초래하고, 300℃이상의 고온이 필요한 패널 생산 공정을 거쳐야 하기 때문에 여러 가지화학 물질에 대한 내구성이 강해야 한다. 그러므로LCD용 유리기판에는 이러한 특성을 만족시키는 붕규산염(borosilicate)계 유리가 일반적으로 사용된다. 또한,LCD 유리는 STN (Super-Twisted Nematic)용과 TFT (Thin Film Transistor)용으로 구분되며 각각의 유리 조성도 다르다. STN용 유리기판은 구동방식의 특성상 평단한 표면이 요구되므로 LCD 제조공정에 적합한 strain point가 550℃ 이하인 박판의 소다봉규산염(soda borosilicate) 유리가 사용된다. 또한 Na₂O나 K₂O같은 알칼

	Corning	LG Chem	Schott AG	Nippon Electric Glass
SiO ₂ (%)	64~70	46~57	58~70	58~68
Al ₂ O ₃ (%)	9.5~14	21~29	12~20	10~25
B ₂ O ₃ (%)	5~10	3.5~7.5	5~15	3~15
Others(%)	6.5~21.5	15~29.5	2~25	0.2~29

Table 1. Chemical composition of the TFT-LCD glass for individual manufacturers²⁻⁵⁾

리 산화물이 함유되어 발생하는 알칼리 이온의 표면확산에 의하여 투명전도막이 손상되기 때문에 이를 방지하기 위하여 실리카(silica) 보호막을 먼저 기판유리표면에 형성시킨다. STN용 LCD는 제조가격이 저렴한 반면색감이 나쁘고 정면에서만 보이기 때문에 최근에는 거의 이용되지 않고 있다. 현재 대부분의 LCD에는 TFT-LCD가 사용되고 있는데 소다봉규산염계 유리로는 TFT제조 공정온도를 충족시킬 수 없기 때문에 strain point가 높고 열팽창계수가 낮은 무알칼리 알루미노봉규산염(alumino borosilicate)계 유리가 사용된다. TFT-LCD유리는 Corning의 박판유리 공법인 퓨젼다운드로우법(fusion down draw process)과 플로트법(float process),리드로우법(redraw process)에 의해 생산되고 있다4).

앞으로 발생하는 폐 디스플레이는 LCD가 주축을 이루기 때문에 폐 LCD의 재활용 기술 개발을 중심으로 연구하는 것이 바람직하다. LCD에 대부분 TFT-LCD가 사용되고 있기 때문에, 디스플레이 유리 재활용에 있어서 폐 TFT-LCD 유리의 특성을 파악하고 재활용하는 연구가 가장 중요하다고 볼 수 있다.

2.2. 초박막 액정표시장치 (Thin Film Transistor Liquid Crystal Display) 유리의 특성

TFT-LCD에는 붕규산염계 유리가 사용되는데, 붕소가 첨가되어 B_2O_3 의 형태로 존재하게 된다는 것이 다른 유리와의 차이점으로 볼 수 있다. TFT-LCD 유리의 제조업체별 성분 조성은 Table 1과 같다. LG화학5에서 생산하는 TFT-LCD 유리에는 $3.5\sim7.5$ %의 B_2O_3 가 함유되어 있는 반면 Corning60 제품에는 $5\sim10$ %의 B_2O_3 가 함유되어 있다. 이외에도 독일의 Schott AG⁷¹와 일본의 Nippon Electric Glass⁸⁰에서 각각 $5\sim15$ %와 $3\sim15$ %의 B_2O_3 를 함유한 TFT-LCD 유리를 생산하고 있다. 이와 같이 TFT-LCD 유리에 들어가는 B_2O_3 의 함유량은 대부분 $3\sim15$ %이하이며, 이러한 경향은 TFT-LCD 유리를 생산하는 다른 업체의 제품에서도 거의 공통적으로 관찰된다.

TFT-LCD 유리기판은 300° C이상의 고온이 필요한 패널 생산 공정을 거쳐야 하기 때문에 무알칼리성 및 여러 가지 화학 물질에 대한 강한 내구성을 갖추어야 한다. 그러므로 B_2O_3 는 유리의 네트워크 구조 생성체 산화물로서 유리의 용해 반응성을 좋게 하고 열팽창 계수를 작게 하며, 실투성을 향상시키는 등 화학적 내성을 좋게 하며 밀도를 낮추는데 기여할 수 있다. 그러나 B_2O_3 가 지나치게 많이 함유되는 경우 유리의 내산성이 떨어지며 밀도가 높아지고 변형점이 낮아져 내열성이나빠질 수 있다. 그 반면 B_2O_3 가 어떤 임계치보다 낮게 함유되면 첨가 효과를 거의 기대할 수 없다.

3. 폐 디스플레이 유리 소재 재활용 연구 현황

폐 디스플레이의 유리 소재를 재활용하기 위해서는 먼저 폐 디스플레이를 해체/분리하는 작업을 거쳐야 한다. 예를 들어, LCD를 해체하면 Fig. 1과 같은 구조를 가진 LCD 패널 부분을 분리해 낼 수 있는데 여기에서 backlight를 제거하면 두 장의 유리가 접합된 형태로 분리할 수 있다. 이 두 장의 유리의 가장자리 부분을 절단하면 Fig. 2(a)와 같이, 유리 상판 부분과 유리 하판부분으로 분리할 수 있다. Fig. 2(b)에 유리의 상판만검은색을 띠고 있는데 이는 color Filter가 아직 유리에붙어있기 때문이다. 재활용하고자 하는 최종 제품 형태에 따라 ITO 등이 붙어 있는 유리 상태 그대로 원료로 사용할 수도 있지만 인듐 등의 유가자원을 먼저 회수하는 경우도 있다. 그리고 color filter 등 유리에 붙

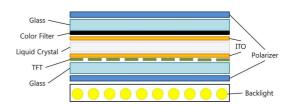


Fig. 1. Cross-sectional view of TFT-LCD panel.

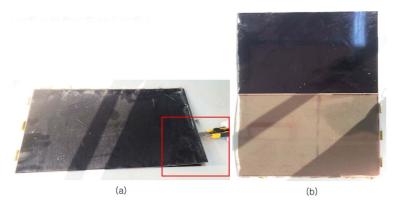


Fig. 2. Post-disassembly waste LCD panel: (a) Separation into upper and lower glass plates; (b) Dark upper glass plate (with color filter) and lower glass plate.

어 있는 이물질들을 적절히 제거한 다음, 재활용 제품의 제조공정에 알맞는 크기로 유리를 파쇄하여 공정 원료로 사용한다.

폐 LCD 유리를 극히 제한적인 용도로 재활용 하는 연구도 시도 되고 있는데 폐 LCD 유리를 보온단열재, 흡음차음제 등의 원료로 재활용하기 위한 발포공정을 연구한 사례⁹⁻¹¹⁾가 있으며, 폐 TFT-LCD 유리분말을 혼입한 고강도 콘크리트 파일로 재활용하는 연구¹²⁻¹⁴⁾도 보고되어 있다. 이외에도 LCD 제조 공정 중 발생하는 불량품으로 이루어진 파유리를 재활용하는 연구¹⁵⁻²²⁾도 진행되었는데, LCD 파유리는 폐 LCD 유리와 유사한 성질을 가지고 있다고 볼 수 있다. 실제로 LCD 파유리를 재활용하여 원가절감 등의 경제적 효과를 달성한 사례들도 보고되고 있다.

3.1. 발포체로의 재활용

폐 TFT-LCD 패널의 재활용 공정에서 발생하는 폐유리를 원료로, 보온단열재, 흡음차음제, 토목용 경량골재 또는 수처리용 담체로 재활용하기 위한 발포공정 연구가 진행되었다. 폐 TFT-LCD 패널로부터 유리를 회수하기 위해서 Fig. 3과 같은 재활용 공정을 거치게 된다. 먼저 backlight lamp를 제거하고 플라스틱과 회로기판을 회수하면 편광판이 붙어있는 ITO glass가 남게된다. ITO glass에서 ITO 필름을 분리하여 폐 유리기판만을 회수하거나, ITO 필름이 붙은 상태로 유리를 파쇄하고 산으로 ITO를 침출시켜 회수한 다음 최종적으로 발생하는 유리 폐기물을 cullet 상태로 회수할 수있다. 이렇게 회수된 두 종류의 폐 LCD 유리별로 발포공정 조건을 달리해야 할 필요가 있다9-11).

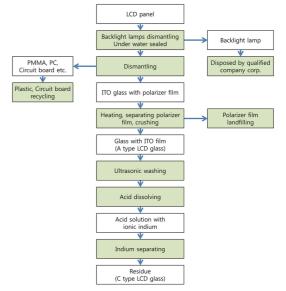


Fig. 3. Proposed recycling flow chart for recovery of glass from waste LCD panels⁸.

발포공정에 앞서 폐 TFT-LCD 유리를 분쇄해야 한다. TFT-LCD 유리는 그 강도가 매우 높은 알루미노붕규산 염(aluminoborosilicate)계 유리이므로 미분쇄 효율이 낮기 때문에, 분쇄 특성을 파악하기 위한 예비 실험을 진행한 결과, 볼밀링 분쇄 공정에서 볼의 재질은 철보다 알루미나가, 볼의 크기는 3 cm보다 2 cm가 더 미분효율이 좋았으며, 이러한 조건에서 3시간 볼밀링 분쇄를 거침으로써 발포화 공정에 적당한 -200 mesh의 크기로 100% 분쇄할 수 있었다. 분쇄된 폐 LCD 유리에서 ITO

필름에 함유되어 있는 유가성분을 회수하기 위하여 염산으로 인듐과 주석을 침출시켜 거의 전량 회수하고 남는 침출잔사는 폐 LCD 유리의 cullet으로 볼 수 있다⁹.

폐 TFT-LCD 유리의 발포화 공정에 적절한 발포조제를 선정하는 것이 중요하다. 무기질 유리 다포체의 제조에 있어 가장 기본적인 발포조제는 탄소이므로, 탄소계 발포조제에 대한 최적 조건을 조사하는 실험 결과, 천연 흑연(Natural Graphite)이 가장 적합하였다. Cullet 원료의 경우 발포체의 밀도가 낮을수록 발포체의 다공율이 증가되는 경향성을 보이므로 발포화의 진행 여부를 알 수 있었으나, ITO가 박리된 판유리 소재의 경우특정 조건에서 이러한 경향을 따르지 않는 현상을 보였는데, 이는 불량 발포화가 일어난데 기인한 것으로 발포조제의 보완이 필요함을 의미한다⁹⁾.

이러한 최적화 예비 실험결과를 바탕으로 폐 TFT-LCD 유리의 볼밀링 분쇄를 통해 -200 mesh의 입자크기로 미분화한 다음, 염산을 이용한 산 침출로 인듐 및 주석의 회수가 가능하며, 침출잔사 형태의 폐 유리 cullet의 발포조제로는 천연 흑연이 가장 적절하였다. Fig. 4는 이러한 조건 하에 시험 제조한 구상 발포체로서 형태가 균일한 구상체이며 표면상으로도 균일도 높은 다공성의 다포체임을 알 수 있었다9-11).



Fig. 4. Photograph of the spherical foamed LCD glass¹⁰.

3.2. 고강도 콘크리트 파일로의 재활용

TFT-LCD 유리의 제조에는 용해공정과 열가공 공정이 포함되어있어 다른 무기원료에 비하여 안정적으로가공하여 재활용하는데 어려움이 있다. 이러한 TFT-LCD 유리를 원료로 하는 고강도 콘크리트 파일을 개발하는 연구가 진행되었다. TFT-LCD 유리는 다음과 같은 장점 때문에 고강도 콘크리트 파일의 원료로 활용될수 있다. 첫째, 일반 유리와 달리 알칼리가 함유되지 않아 콘크리트의 부피팽창 및 알칼리 실리카 반응에 대한문제가 없으며, 둘째, 유리의 청징제로 사용된 비소가 SrO로 대체 사용됨으로써 인체에 무해하다. 셋째, 유리원료인 규산질 소재가 수밀성을 증대 시킬 수 있다나2-14).

콘크리트 혼합재로 사용하기 위한 TFT-LCD 유리분 말과 활성화제의 최적 비율을 조사하기 위해 모르타르 압축강도 시험을 실시한 결과, 유리분말 첨가에 따라 포 졸란 반응성이 향상되어 압축강도가 향상되었다. TFT-LCD 유리분말의 최적 조건으로는 입도크기 100 / m 이하, 첨가량은 10%이었으며, 활성화제의 최적 조건으로는 Ca(OH)2를 1% 가량 첨가하는 것이었다. 이는 활성화제 첨가로 인해 미반응 유리분말의 반응이 촉진되어 압축강도가 향상된 것으로 보인다. 12)

이러한 실험결과를 바탕으로 TFT-LCD 유리분말 10%, Ca(OH)₂활성화제가 1%가 첨가된 콘크리트 파일을 실제로 제조하여 물성 평가를 실시한 결과가 Table 2에 나와 있다. 압축강도, 전단강도, 휨강도, 축력휨강도 모두 기존의 포틀랜드 시멘트만으로 제조된 콘크리트 파일에 비해향상되었다는 것을 알 수 있다. 이로써 폐 비정질 세라믹스인 TFT-LCD 유리분말은 기존 콘크리트 파일 제품보다우수한 고강도 콘크리트 파일의 제조 원료로 재활용하기에 적합하다고 판단된다¹²⁻¹⁴).

3.3. TFT-LCD 파유리의 재활용

폐 LCD 유리의 성분 중 붕소가 차지하는 재료비가 다른 원소에 비하여 매우 높기 때문에 폐 LCD 유리

Table 2. Physical characteristics of concrete pile products⁹⁾

		Actual Product	Existing Products	Target Value
Compressive Strength (N/mm ²)		88.1	85.7	More than 80
Shear Strength (kN)		165.4	163.8	More than 148.1
Flexural Strenth (kN·m)	Cracking Flexural Moment	57.3	53.7	More than 53.9
	Fracture Flexural Moment	85.7	84.7	More than 81.4
Axial Force (kN·m)	Cracking Flexural Moment	188.7	187.2	More than 182.4
Axiai Force (KIN·m)	Fracture Flexural Moment	281.8	280.4	More than 258.9

재활용에 있어서 붕소를 필요로 하는 제품으로 재활용하는 것이 경제적으로도 유리하다고 볼 수 있다. 그러나 위에서 언급한 폐 LCD 유리를 콘크리트 및 발포체로 재활용 하는 연구에서는 폐 LCD 유리에 붕소가 함유된 것을 고려하지 않고 저품위 재활용에 사용하였다. 그러므로 재활용 원천기술로의 활용 가능성은 입증되었지만 경제성이 없으므로 아직 상용화되지 않고 있다.

국내에서 봉소를 원료로 생산되는 제품에는 LCD 패널에 사용되는 디스플레이용 유리 이외에도 유리섬유(장섬유 및 단섬유), 도자기의 유약, 태양전지용 판유리와같은 산업용 유리 및 기타 내열성이 강조되는 유리가었다. 폐 LCD 유리를 이와 같은 제품들로 재활용할수 있는 방안을 모색한다면 보다 고품위의 재활용이 가능하다. 실제로 폐 LCD 유리와 유사한 성질을 가진 LCD 파유리를 장섬유 유리로 재활용하여 상용화가 이루어진 기술도 개발되었다.

디스플레이용 유리 제조 공정 중 불량품으로 판단되어 폐기되는 파유리도 발생하는데, 이러한 파유리 또한 폐 디스플레이 유리와 같은 조성과 물성을 가진 것으로 볼 수 있다. 최근에 TFT-LCD 파유리를 재활용하여 장섬유, 단섬유, 내열유리 등을 제조하는 고품위 재활용연구가 진행되고 있으며, 장섬유의 실제 제조공정에 있어서 LCD 파유리를 제조원료로 재활용하고 있는 기업도 있다.

디스플레이용 유리 중 TFT-LCD용 기판 유리는 디스 플레이 핵심부품을 보호하고 영상을 전달해 주는 역할 을 하기 때문에 불량률이 매우 낮아야 하므로 일반 창 유리나 식기유리와 비교하여 제조과정 또는 품질관리가 매우 엄격하다. 따라서 매우 사소한 불량이라도 발생한 경우 불량품으로 간주하여 폐기하는데 이 과정에서 많 은 파유리가 발생한다. 파유리란 불량유리, 깨어져 못쓰 게 된 유리, 유리 부스러기 또는 유리제품의 파쇄품 등 을 말한다. 이러한 파유리는 유리 또는 유리제품의 제 조 및 가공공정에서 필연적으로 발생하는데, 유리제조 시 원료로 재활용 할 수 있는 소재로 간주하여 매우 중요하게 관리된다. 그러나 디스플레이의 지속적인 품 질을 보장하기 위해 불량 기판유리가 파유리화 되면 이 를 다시 TFT-LCD 기판유리 제조공정 원료로 재활용하 지 않으며 매립하여 페기된다. 이렇게 TFT-LCD 기판 유리 생산 업체에서 발생되는 파유리의 양은 매년 20,000~30,000 톤 수준으로 추정된다¹⁵⁾. 그러므로 이러 한 TFT-LCD 파유리의 재활용에 관한 관심이 높아지고 있으며, 이러한 파유리를 폐기 하지 않고 재활용할 수 있는 방법 및 분야를 지속적으로 발굴하고 연구해야 할 필요가 있다.

TFT-LCD용 기판유리는 알칼리 성분을 전혀 함유하 지 않으며, SiO₂, Al₂O₃, 알칼리토(MgO+CaO+SrO+ BaO), 및 B₂O₃를 주된 성분으로 하고 있다. 또한 위의 성분들이 잘 용융되어 혼합되었기 때문에 균질도가 매 우 높은 고급 유리이다. 그러므로 TFT-LCD 파유리는 적절한 양을 혼합하여 소다석회규산염계 판유리, 병 및 식기유리, 소다석회규산염계 단섬유 유리, 또는 붕규산 염계 장섬유유리 등을 제조하는데 필요한 원료로 사용 될 수 있다. TFT-LCD 파유리를 재활용하여 이러한 유 리제조 원료의 일부를 대체 할 경우, 유리의 제조공정 과 물리적 성질을 훼손하지 않는 유리 batch 조성물을 제조할 수 있어 원료비를 크게 절감하고 제조단가를 낮 출 수 있다. 또한, 결정성 원료 대신 무정질 LCD 파 유리를 원료로 대체함으로써 원료의 용용성이 향상되며, 이로써 용융 시 소요되는 에너지가 기존의 공정대비 적 게 소요되어 에너지 절감 효과가 있을 수 있다.

TFT-LCD 파유리를 재활용하여 제조된 붕규산염계 장 섬유유리의 경우 주성분이 LCD 파유리의 주성분이 동 일하여 장섬유 유리의 원료로 LCD 파유리를 첨가할 수 있다. 장섬유유리의 조성물 중 규석의 중량을 100으 로 할 때 LCD 파유리를 최대 $65^{16)}$ 첨가할 수 있다. 마찬가지로 규석의 함유량을 100으로 할 때, 소다석회 붕규산염계 단섬유유리의 경우 최대 55¹⁷⁾, 소다석회규 산염계 판유리, 병 및 식기유리는 최대 2418, 태양전지 용 저철분 판유리는 최대 2419, 알칼리 붕규산염계 내 열유리는 최대 20²⁰⁾ 첨가할 수 있다. 또한 붕규산염계 로빙섬유 유리 제조공정에 있어서 납석의 중량 함유량 을 100 기준으로 OLED 파유리 또는 LCD 파유리 중 하나를 최대 47021) 첨가 가능하며, 도자기 배합조성물 에 대하여 고령토, 점토, 납석, 도석 및 이들의 혼합물 의 중량 함유량을 100 기준으로 할 때 LCD 파유리 또는 폐유리를 최대 33²²⁾ 첨가하여 제조할 수 있다. 이 렇게 LCD 파유리를 재활용하여 제조된 제품들의 고온 물성 및 저온물성에 대한 평가 결과 기존 제품대비 고 온 물성 및 저온물성이 거의 동일하다. 다만 불필요하 게 첨가되는 기타 성분들이 LCD 파유리에 최대 함량 이상 첨가되면 열팽창 계수가 증가하여 유리의 저온물 성에 영향을 미친다.

그러므로 TFT-LCD 파유리를 원료로 첨가하여 재활용하더라도 장섬유 및 단섬유를 포함하고 있는 다양한 제품들의 제조 시 기존 제품의 물성과 크게 차이가 없

으며, 원료 절감 및 에너지 절감 등의 효과가 있을 것으로 판단된다. 실제로 장섬유 유리의 제조에 LCD 파유리를 원료로 하여 재활용하는 기술은, 군산대로부터의 기술이전을 통하여 미국계 장섬유 유리 업체인 OCF(주)의 김천공장과 (주)KCC 조치원 공장에 각각 2010년, 2011년부터 이전하여 양산 적용하고 있으며이는 매우 성공적인 재료재활용이라고 할 수 있다.두 기업의 장섬유 유리 사업장에서 연간 약 10,000톤의 LCD 파유리를 사용하여 연간 약 30억 원 이상의 원가절감 효과를 달성하고 있다¹⁵⁾. 이는, 원가절감 효과뿐 아니라 매립시켜 처분해 오던 LCD 파유리를 생산 원료로 재활용함으로써 환경적인 부담도 줄일 수 있다.

4. 결 론

매년 대량 발생하고 있는 폐 디스플레이 패널 유리의 재활용이 거의 이루어지고 있지 않으며 대부분 매립되 고 있는 실정이다. 이는 폐 디스플레이 유리에 대한 경 제적이고 효과적인 재활용 방안이 확립되어 있지 않기 때문이며, 이를 위해 추가적인 재활용 연구를 체계적으 로 진행할 필요가 있다. 폐 TFT-LCD 유리를 고강도 콘크리트 파일 및 발포체로 재활용하는 연구가 진행되 고 있지만 상용화까지는 많은 추가 연구 및 양산 적용 성검토가 필요하다. 경제성의 측면에서 보자면 폐 LCD 유리의 성분 중 가장 단가가 비싼 붕소를 재료로 재활 용하는 것이 중요한데, 폐 LCD 유리와 조성이 유사한 장섬유, 단섬유, 내열유리와 같이 붕소를 함유하는 제품 의 원료로 재활용하는 연구가 진행되고 있다. 실제로 TFT-LCD 파유리를 장섬유 제조에 적용함으로써 연간 약 30억 원의 원가절감 등 성공적인 자료재활용 효과 를 보여주고 있다. 이와 같은 연구를 더욱 적극적으로 진행하여 파유리를 비롯하여 폐 LCD 유리 소재를 회 수하여 재활용할 수 있는 기술을 확립하고 상용화 하는 방안을 중장기적으로 모색하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 폐금속·유용자원재활용기술개발사업의 지원에 의해 수행하였으며 이에 감사 드립니다(GT-11-C01-020-0).

References

- 1. Sungkyu Lee, et, al., 2013: Disassembly and Compositional Analysis of Waste LCD Displays, J. of Korean Inst. Resources Recycling, 22(2), pp. 29-36.
- 2. Hyun Seon Hong, et, al., 2010: Overview and Future Concerns for Recycling Display Wastes, KIC News, 13(1), pp. 9-18.
- 3. M. Turner and D. Callaghan, 2007: Computer Law and Security Report, 23(1), pp. 73-76.
- 4. Korea Institute of Science and Technology Information, 2009: Raw LCD Glass Plates, Research Report.
- LG Chem, Ltd., 2014: ALKALI-FREE GLASS AND PREPARATION THEREOF, US Patent, Pub. No.: US 2014/0011659 (2014.01.09).
- Corning Incorporated, 2007: GLASS COMPOSITIONS FOR PROTECTING GLASS AND METHODS OF MAKING AND USING THEREOF, PCT, Pub. No.: WO 2007/095116 (2007.08.23).
- Schott AG, 2007: ALUMINOBOROSILICATE GLASS, US Patent, Pub. No.: US 2007/0243992 (2007.10.18).
- Nippon Electric Glass Co., Ltd., 1997: ALKALI-FREE GLASS SUBSTRATE, PCT, Pub. No.: WO 1997/011920 (1997.04.03).
- Chul-Tae Lee, 2005: Physical and Chemical Properties of Waste Glass as Feed Materials for the Production of Foamed Glass, J. Korean Ind. Eng. Chem., 16(3), pp. 440-448.
- Chul-Tae Lee, et al., 2009: Physical and Chemical Properties of Waste LCD Glass as Raw Materials for the Production of Foamglass, J. Korean Ind. Eng. Chem., 20(3), pp. 266-272.
- Chul-Tae Lee, Tae-Moon Park, and Jung-Min Kim, 2012: Foaming Process of Waste LCD Glass for the Recovery of Valuable Materials from Waste LCD Panel, Appl. Chem. Eng., 23(2), pp. 195-203.
- Seong-Hwan Jeon, Kyung-San Min, and Yang-Seob Soh, 2010: The Characteristics of P.H.C Pile using Admixture by Waste TFT-LCD Glass Powder, J. of the Korean Ceramic Society, 47(5), pp. 419-425.
- 13. Lee Seung Heun, et, al., 2010: Properties of PHC Piles Using TFT-LCD Waste Glass, Proceedings of the Korea Concrete Inst. Conference, 22(1), pp. 319-320.
- 14. Seung-Joe Yoon and Jeong-Min Park, 2012: A Study on the Possibility of concrete Using Waste LCD Glass Powder, J. of the Architectural Inst. of Korea Structure and Construction, 28(8), pp. 95-102.
- 15. Kidong Kim, 2011: Recycling of Crushed TFT-LCD Glass for use in raw Long and Short Fiberglass, Research Report, Korea Sanhak Foundation.
- 16. Business-Academic Cooperation Team, Kunsan National

- University, 2009: Preparation of borosilicate fiber glass batches for long fiber containing cullet of TFT-LCD substrate glass, Korean Patent, Registration No.: 10-0917269 (2009.09.07).
- Business-Academic Cooperation Team, Kunsan National University, 2009: Preparation of borosilicate fiber glass batches for long fiber containing cullet of TFT-LCD substrate glass, Korean Patent, Registration No.: 10-0929869 (2009.11.26).
- Business-Academic Cooperation Team, Kunsan National University, 2010: Preparation of soda lime silicate glass batches for plate, bottle and tableware containing cullet of TFT-LCD substrate glass, Korean Patent, Pub. No.: 10-2010-0081777 (2010.07.15).
- Business-Academic Cooperation Team, Kunsan National University, 2010: Photovoltaic low iron flat glass batches containing alkali-free alumino-borosilicate display glass

- cullet, Korean Patent, Registration No.: 10-0990875 (2010.10.25).
- Business-Academic Cooperation Team, Kunsan National University, 2014: Preparation of alkali borosilicate glass batches for heat resistant glass containing TFT-LCD glass cullet or waste glass, Korean Patent, Registration No.: 10-1445108 (2014.09.22).
- Business-Academic Cooperation Team, Kunsan National University, 2013: Preparation of borosilicate roving fiber glass batches containing alkali free aluminoborosilicate display cullet, Korean Patent, Registration No.: 10-1305447 (2013.09.02).
- Business-Academic Cooperation Team, Kunsan National University, 2014: Porcelain batch compositions containing alkali free aluminoborosilicate display cullet or waste glass, Korean Patent, Registration No.: 10-1375162 (2014. 03.11.).



신 동 윤

- 일본 도쿄대 물리학과 이학석사
- 고등기술연구원 신소재공정센터 연구원



강 이 승

- 고려대학교 신소재공학과 공학석사
- 고등기술연구원 신소재공정센터 청정 소재 공정팀 선임연구원



박 재 량

충남대학교 바이오응용화학과 공학석사고등기술연구원 신소재공정센터 청정 소재 공정팀 선임연구원



이 찬 기

일본 큐슈대 물질이공학과 공학박사고등기술연구원 신소재공정센터 청정 소재 공정팀 수석연구원



윤 진 호

- 서울시립대학교 신소재공학과 공학박사
- 고등기술연구원 신소재공정센터 청정 소재 공정팀 선임연구원



홍 현 선

- 한양대학교 금속공학과 공학박사
- 고등기술연구원 신소재공정센터 센터장