

고성능 콘크리트 개발을 위한 LCD 폐유리 미분말 활용

Application of LCD Waste Glass Fine Powder for High Performance Concrete Development



김성겸 Seong-Kyum Kim
고려대학교 초대형구조기술연구소 연구원
E-mail : envylife@korea.ac.kr



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

1. 서언

현대의 콘크리트 기술은 지속가능한 친환경 개발을 바탕으로 고성능, 고강도, 경제성 등을 고려하여 기능의 다양화, 내구성, 품질 안정성 등을 요구하고 있다. 따라서 비교적 최근에 들어와 주목받고 있는 재료가 디스플레이 산업의 전례없는 발전에 힘입어 파생되고 있는 LCD 유리 재료이다. 정보의 전달과 표시는 디스플레이 장치로부터 가능하게 되었고 이러한 장치의 성능과 효율을 높이기 위한 기술로써 LCD 제품의 시장은 크게 증가하였다. 이에 따라 폐 LCD 발생량도 증가하기 시작하여 2015년 200만대 이상, 매년 약 460,000 톤에 달한다. 폐기량은 대부분 매각, 소각, 매립 등을 통해 국가적 차원의 자원 낭비와 다양한 환경오염의 원인이 되고 있다. 한편, 세계적으로 건설재료 분야에서는 LCD 폐유리 성분 중 SiO₂가 60% 이상인 점을 주목하여 기존 혼화재인 플라이애시(57%), 고로슬래그(36%)보다 높은 실리카 성분으로 콘크리트 내 포졸란 반응의 가능성을 보고하며 기존 혼화제의 대체 및 시멘트 치환 활용방안 연구가 활발하게 지속되고 있다. 특히, 고강도·고성능 콘크리트 제조 시 강도발현에 있어서 최대의 약점은 결합재인 시멘트 페이스트와 골재의 부착성능의 취약성이며, 상호계면의 결합력이 가장 취약해지는 부분으로 이것은 콘크리트의 고강도화에 주요한 저해 요인으로 보고 있다. 콘크리트의 결합재인 시멘트 페이스트와 골재의 계면의 결합력을 증강하기 위해서는 그 계면 영역에 존재하는 많은 공극이 다른 재료에 의해 충전되는 것을 고려할 필요가 있다. 초미립자를 이용하여 계면영역에 존재하는 수산화칼슘과 반응하고 C-S-H 수화물 등 2차 생성물이 공극을 충전하기 때문에 높은 강도를 발현할 수 있게 되었다. 본고에서는 유리의 제조과정에서 발생하는 LCD 폐유리를 대상으로 국내 발생 및 처리 현황과 활용방안을 살펴보고 시멘트 대체재로서 LCD 폐유리를 활용한 콘크리트의 특성을 소개한다.

2. LCD 폐유리 현황 및 특성

2.1 국내 발생 및 처리 현황

2015년 기준 국가별 디스플레이 세계시장 점유율은 한국 39.2%, 대만 27.4%, 중국 15.5% 기타 17.9% (2015, '디스플레이 산업 통계지표', KDIA)로 한국의 LCD 투자비용은 3조 원/년에 달하며, 생산량은 48만 대/월(8세대, 50")로 세계 최고 수준이다. 스마트폰, 태블릿 등 휴대기기의 생산량과 앞으로의 수요량을 예상하면 LCD 생산량은 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.

LCD 폐유리는 LCD 제품 생산과정 중 유리판을 절단하다 남은 자투리나 버려지는 LCD 제품에서 파생되는데 2000년 초반부터 증가하기 시작한 발생량은 2015년에 도달하여 200만대 이상, 매년 약 460,000톤에 달한다. 이는 상당부분 재활용되지

못하고 매립 또는 폐기되는 실정이다. 매립이나 소각을 통한 방법은 토질오염, 매립장 확보 곤란, 지하수 오염, 이산화탄소로 인한 지구 온난화, 유지비용의 문제로 국가적 차원의 자원 낭비와 다양한 환경오염의 원인이 되고 있다.

LCD 폐유리의 분류는 크게 다음 3가지로 볼 수 있다. 1) LCD Cullet, 2) LCD processing waste glass, (LPWG), 3) End of Life(EOL) LCD waste glass. 특히 주목할 만한 LPWG의 경우, LCD 제조업체에서 발생하는 폐유리로 제조과정 중 가공 및 결합불량 등의 이유로 발생하게 된다. 제조과정에서 일부 미량의 화학적 가공의 원인으로 유리표면에 PPM 수준의 Cu, Mn, Mo, Fe 과 같은 원소가 존재할 수 있다. 이러한 이유로 재활용 시 품질 저하로 재활용에 문제가 발생되며 재활용 되지 못하고 소각 또는 매립하고 있는 실정이다. 가공단계에서 필수적으로 발생하는 폐기물로서 2015년 기준, 40,000톤 정도가 발생하고 있으며 LCD 시장 크기에 의존한다.

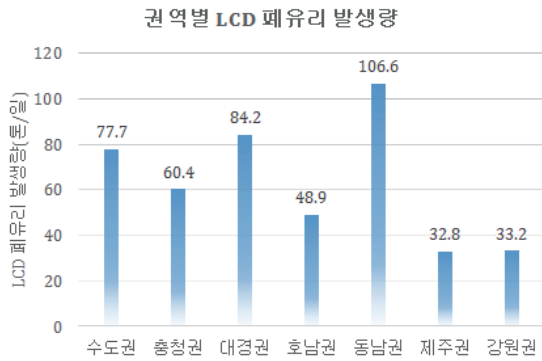


그림 1. 권역별 LCD 폐유리(모니터, TV 등) 발생량(한국환경공단, 2013)

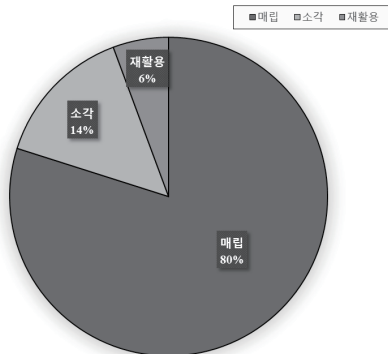


그림 2. 국내 일단위 LCD 폐유리 처리현황(한국환경공단, 2013)

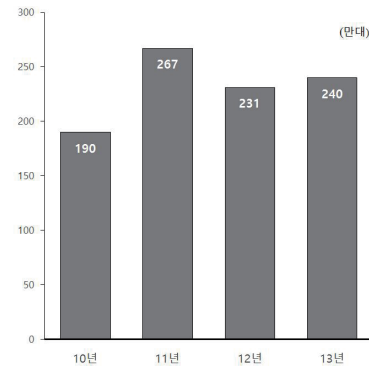


그림 3. 국내 연간 LCD 폐유리 발생량(한국환경공단, 2013)

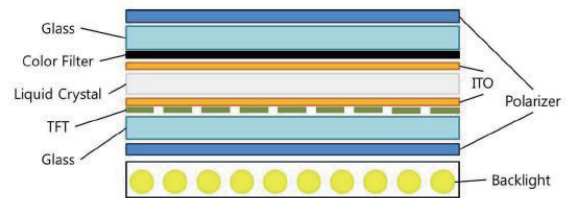


그림 4. LCD 패널을 구성하는 재료 및 단면 구조(신동윤 등, 2015)

2.2 건설재료 활용가능성

패 디스플레이의 유리 소재를 재활용하기 위해서는 먼저 패 디스플레이를 해체 및 분리하는 작업을 거쳐야 한다. 예를 들어, LCD를 해체하면 <그림 4>와 같은 구조를 가진 LCD 패널 부분을 분리해 낼 수 있는데 여기에서 Back light를 제거하면 두 장의 유리의 가장자리 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.

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 5>에 나타내었다.

LCD 유리의 제조에는 용해공정과 열가공 공정이 포함되어 있어 다른 무기원료에 비하여 안정적으로 가공하여 재활용하는데 어려움이 있다. 이러한 LCD 유리를 원료로 하는 고강도 콘크리트 파일을 개발하는 연구가 진행되었다. LCD 유리는 다음과 같은 장점 때문에 고강도 콘크리트 파일의 원료로 활용될 수 있다. 첫째, 일반 유리와 달리 알칼리가 함유되지 않아 콘크리트의 부피팽창 및 알칼리 실리카 반응에 대한 문제가 없으며, 둘째, 유리의 청정제로 사용된 비소가 SrO로 대

체 사용됨으로써 인체에 무해하다. 셋째, 유리 원료인 규산질 소재가 수밀성을 증대 시킬 수 있다. 일반적으로 폐유리의 시멘트 대체재로써 연구는 soda-lime 유리를 대상으로 다량의 알칼리(Na, K)가 포함되어 있어 골재중의 실리카(SiO_2)와 반응에 의해 부피 팽창 및 균열이 예상되었다. 시멘트를 대체하는 재료를 사용할 때에 이러한 알칼리-실리카 반응을 인식하는 것은 중요한 부분이다. 하지만, 유리의 반응성은 종류, 구성 물질, 물리적 특성 등에 따라서 달라지는 것을 인식하는 것도 또한 중요하다. 특히 미세분말화 된 유리분말은 포졸란 재료로써 알칼리골재 반응의 저감 효과와 시멘트 페이스트 내에서 알칼리 실리카 반응의 억제를 위한 컨트롤 역할을 하는 것으로 보고되고 있다. 콘크리트 혼합재로 사용하기 위한 LCD 유리분말과 활성화제의 최적 비율을 조사하기 위해 모르타르 압축강도 시험을 실시한 결과, 유리분말 첨가에 따라 포졸란 반응성이 향상되어 압축강도가 향상되었다. TFT LCD 유리분말의 최적 조건으로는 입도크기 $100\ \mu\text{m}$ 이하, 첨가량은 10% 이었으며, 활성화제의 최적 조건으로는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 1% 가량 첨가하는 것이었다. 이는 활성화제 첨가로 인해 미반응 유리분말의 반응이 촉진되어 압축강도가 향상된 것으로 보인다.

2.3 LCD 폐유리 특성 및 일반유리의 비교

일반 폐유리 중 건축물에서 사용되는 유리는 보통유리와 특수용도의 유리로 구분되며, 일반용도로 쓰이는 보통의 판유리는 분쇄 시 각이 지고 모가 나있고, 특수유리의 경우는 입형이 구형으로 형성되는데 화학성분의 70% 이상이 실리카질

[폐유리 처리 PROCESS]



그림 5. 건설재료로 활용하기 위한 LCD 폐유리 수집, 분쇄, 분급 절차

[표 1] 주요 혼화재의 화학 성분 및 OPC 대비 혼화재의 화학성분비(%)

구분	화학성분 및 OPC 대비 화학성분비(%)										
	SiO ₂	SiO ₂ / SiO ₂ P	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ / Al ₂ O ₃ P	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ P	MgO	MgO / MgO P	CaO	CaO / CaO P	평균
OPC	19	1.0	4.04	1.0	3.09	1.0	2.84	1.0	65.1	1.0	1.0
LCD 폐유리	66.9	3.52	18.2	4.5	0.0794	0.03	0.452	0.16	10	0.15	1.67
고로슬래그	36	1.89	18	4.56	0.35	0.11	10	3.52	45	0.69	2.14
플라이애시	57	3	26	6.44	7	2.27	3	1.06	10	0.15	2.58

[표 2] 다양한 폐유리의 화학 성분(%)

구분	화학성분(%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	
LCD 폐유리	66.9	18.2	0.0794	10	0.452	-	0.0571	0.272	
무색 판유리	71	1.47	0.07	8.91	4.04	0.23	0.83	13.1	
녹색 병유리	70.3	2.5	0.7	11.5	1.6	0.1	1.1	11.5	
거울 유리	70.6	1.5	1.4	10.6	3.2	0.3	0.6	11.0	

(SiO₂)성분과 붕산(BO₂) 등 기타 성분으로 구성되어 있다. 실리카 성분은 그 자체로는 굳어지는 성질이 없으나, 물의 존재로 상온에서 CaOH₂와 반응하여 안정된 불용해성 화합물을 생성하여 경화시키는 성질을 가지고 있다. 최근 연구에서 시멘트와의 수화반응 시 포졸란 반응 가능성이 있는 것으로 확인되어 경화 콘크리트의 물리적 성질을 향상시키고 굳지 않은 콘크리트의 레올로지 특성을 개선하여 블리딩의 저감, 수화열 억제 등에 효과적인 것으로 보고되고 있다. 또한, 포졸란 반응에 의해 내부 조직이 치밀해져 투수성이 낮아지므로 유해물질이 외부로부터 침입하는 것을 막아주어 내구성 향상에도 기여할 것으로 판단된다. LCD 폐유리는 일반적인 폐유리와는 달리 알칼리 금속(Na와 K)성분이 적으므로 실리카 성분과 물이 함께 반응하여 균열을 발생시키는 알칼리 실리카 반응 유발 가능성이 적다. 일반적으로 콘크리트의 강도는 시멘트의 수화반응에 의한 수화 생성물에 의해 발현하는데, LCD 폐유리 미분말의 화학성분이 기존의 혼화재보다 OPC에 유사하고 포졸란 반응물인 SiO₂ 성분을 다량 함유하고 있어 콘크리트 성능 향상에 기여할 것으로 예상된다.

2.4 LCD 폐유리의 입자크기별 미분화

LCD 폐유리 및 Panel 폐유리를 활용하여 콘크리트용 건설재료로서의 사용성을 확인하기 위해 해머 크래셔와 대용량 원뿔형 불밀을 이용한 미분말화 작업을 실시한다. LCD 폐유리 및 Panel 폐유리의 경우에는 시멘트 대비 밀도가 낮고, Fe 성분이 적어 분쇄가 용이하나 경도에 의해 일반적인 방법으로는 10μm

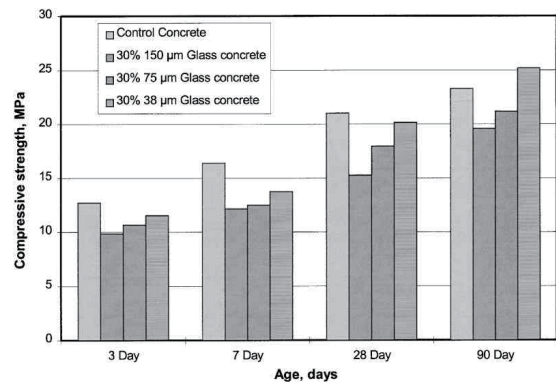


그림 6. 폐유리를 혼입한 콘크리트의 압축강도(Shao.Y 외, 1999)

이하의 미분말을 제조하기 어렵다. Y. Shao 등(2000)은 시멘트 대체로써, 콘크리트 강도와 알칼리 실리카 반응성 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 유리는 #100체(150 μ m)를 통과하고 #200체(75 μ m)에 남는 것, #200체(75 μ m)를 통과하고 #400체(38 μ m)에 남는 것, #400체(38 μ m)를 통과하는 것으로 입자별 3가지로 분류하였다. 압축강도 실험결과, <그림 6>과 같이 폐유리의 입도가 작을수록 압축강도가 크게 나타났고, 38 μ m 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.

3. 시멘트를 대체한 LCD 콘크리트의 특성

3.1 슬럼프 특성

<그림 7>은 LCD 폐유리 치환율에 따른 콘크리트의 슬럼프 결과를 보여준다. LCD 폐유리 치환율 5%에서 OPC에 비해 9% 정도 높은 슬럼프를 나타냈다. 그러나 치환량의 증가에 따라 슬럼프는 저하되었으며 15% 치환율에서부터 기존보다 떨어

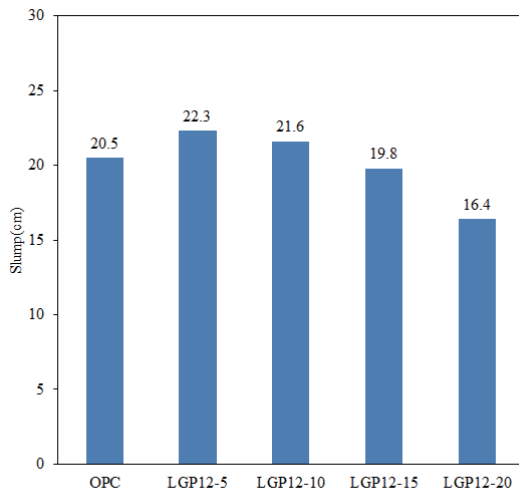


그림 7. LCD 폐유리 콘크리트의 슬럼프 특성

지는 슬럼프 결과를 보여준다. 이러한 현상은 비슷한 입경을 갖더라도 상대적으로 흡수율이 낮고 표면이 매끈한 LCD의 특성이 반영된 유동성의 향상으로 보여진다. 일반적으로 굳지않은 콘크리트의 유동성은 비슷한 입경이라 할지라도 재료의 조도나 형상의 영향을 받게 된다. LCD 미분말은 표면 및 가장자리가 각이 지고 거칠어서 10% 이상의 치환율에서 급격하게 저하된 슬럼프를 나타낸다.

3.2 압축강도 측정

LCD 콘크리트의 강도는 초기 재령 3일을 제외하고 전체적으로 기존의 OPC보다 증가하는 경향을 나타낸다. LCD 폐유리의 포졸란 반응은 OPC의 수화반응 시작 후 3일에서 14일이 경과한 다음에 본격적으로 시작되는 것으로 예상할 수 있다. 일반적으로 이 시기에 OPC에 포함된 alite는 약 60~70% 정도의 반응을 진행한 상태이다. 따라서, LCD로부터 용출된 Si 이온과 Al 이온은, 공극에 존재하는 세공액 중에 포함된 Ca 이온과 반응하여 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H) 및 칼슘알루미네이트 수화물(C-A-H)을 형성하여 경화체의 조직을 보다 치밀하게 만들어 줄 것으로 예상된다.

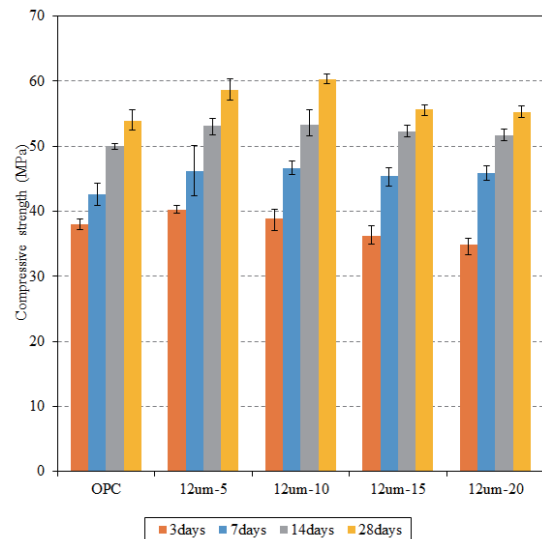


그림 8. LCD 폐유리 콘크리트의 압축강도

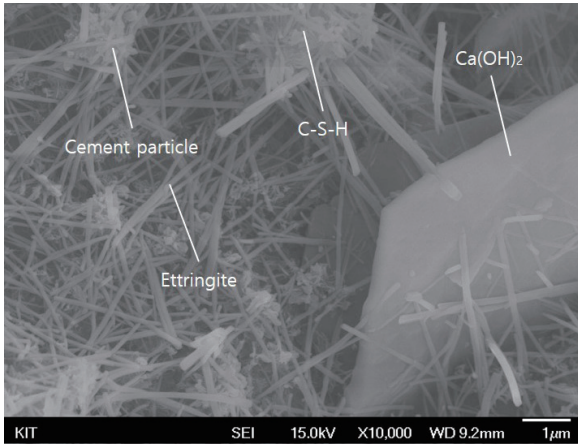


그림 9. OPC 콘크리트의 재령 3일 SEM 영상

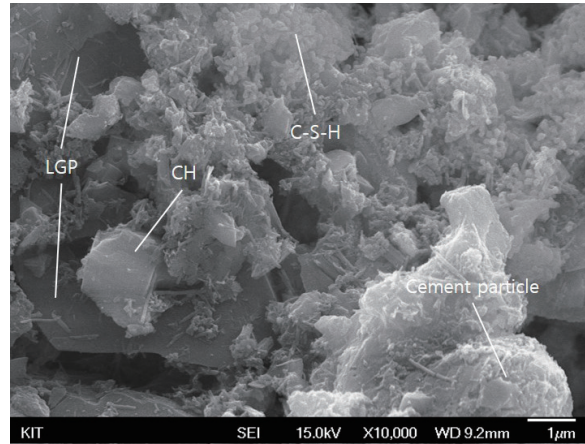


그림 10. 재령 3일 LCD 12um 10% 치환 콘크리트의 미세구조 SEM 영상

3.3 SEM-EDX 미세구조 변화

〈그림 9〉의 SEM 이미지는 OPC의 재령 3일 미세구조이다. 전형적인 모습으로 수화하여 규산칼슘 수화물(C-S-H)과 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 수화물을 생성하고 있으나 어두운 곳으로 표시되는 다량의 물을 포함하고 있는 공극상태가 나타난다.

〈그림 10〉은 재령 3일의 LCD를 치환한 시멘트 페이스트 구조이다. C-S-H(gel)와 CH 수화물 사이에 안정적으로 존재하고 있는 LCD 입자를 확인할 수 있다. LCD를 고배율로 촬영한 단면에서 파쇄면에 존재하는 표면의 특징으로 수화물 내의 LCD를 확인이 가능하다. 초기 3일째 사진에서는 생성된 수화물과, LCD 미분말이 본격적으로 포졸란 반응을 시작하지 않은 상태로 존재하는 것을 보여준다. 이러한 현상은 재령 초기에 시멘트처럼 즉각적으로 물과 반응하여 직접적인 수화반응이 일어나지 못하는 것을 보여주며 초기 콘크리트 내부에 많은 LCD 치환량은 강도에 악영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

4. 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 환경적인 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. 신동윤, 강이승, 박재량, 이찬기, 윤진호, 홍현선, "폐 평판디스플레이 패널유리의 재활용 연구 동향", J. of Korean Inst. of Resources Recycling, Vol. 24, No. 1, pp.58-65, 2015.
2. Shao Y, Lefort T, Moras S, Rodriguez D., "Studies on concrete containing ground waste glass", Cement and Concrete Research 30 (1), pp.91-100, 2000.
3. Wu Y, Shi C, Shao Y, Riefler C., "Alkali-aggregate reaction of concrete containing ground glass powder". In: Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete; pp.789-795, 2015.
4. Wang, H.Y., "The effect of the proportion of thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar", Construction and Building Materials, 25(2), pp. 791-797, 2011.
5. Wang, H.Y. and Huang, W.L., "Durability of Self-consolidating Concrete using Waste LCD Glass", Construction and Building Materials, 24(6), pp 1008-1013, 2013.
6. Sungkyu Lee, et. al., "Disassembly and Compositional Analysis of Waste LCD Displays", J. of Korean Inst., Resources Recycling, 22(2), pp.29-36, 2013.
7. Cui, J., and Forssberg, E., "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review", J. Hazard. Mater. B, 99, pp.243-263, 2003.
8. Shin, D.Y., Kang, L.S., Park, J.L., Lee, C.G., Yoon, J.H. and Hong, H.S., "Current Research Trend on Recycling of Waste Flat Panel Display Panel Glass", Journal of Korean Institute of Resources Recycling, 24(1), pp.58-65, 2015. (In Korean)
9. Kim, S.K., Kang, S.T., Kim, J.K., Jang, I.Y., "Effects of Particle Size and Cement Replacement of LCD Glass Powder in Concrete", Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2017, Article ID 3928047, 2017.
10. Korea Environment Corporation, Environmental Statistics Yearbook, 2015 editon, Korea, Seoul: Korea Environment Corporation, pp.484-485, 2015.

담당 편집위원 : 고경택(한국건설기술연구원)

●● 학회지 광고 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학회, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다.

저렴한 가격과 가장 효과적인 방법으로 귀사를 홍보할 수 있는 한국건설순환자원학회지 광고의 많은 이용 부탁드립니다.

- 아 래 -

1. 광고 게재면

게재면	광고 협찬금	게재면	광고 협찬금
표지 2	80만원	간지	70만원
표지 3	70만원	내지(전면)	50만원
표지 4	100만원	박스 광고	30만원

2. 할인혜택

본 학회의 특별회원사가 게재하는 광고 또는 년2회 이상 광고 게재 시 상기 광고 게재료의 10%를 할인해 드립니다.

3. 문의

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