
Global Report

건축용 대체재로서 재활용 폐유리의 지속가능한 사용

1. 개요
2. 소개
3. 유리의 종류와 특성
4. 재활용 폐유리의 사용
5. 결론

1. 개요

건설 산업은 수많은 건물과 인프라의 신규개발 및 유지관리를 위해 천연골재의 채취와 시멘트를 필요로 한다. 그러나 이러한 대량의 천연자원의 채취는 환경악화로 이어질 수 있는 지속적인 천연자원의 고갈이라는 결과를 초래하게 되었다. 폐유리는 천연골재와 시멘트의 대체재로 재활용될 수 있으므로 매립지에 버려지는 폐유리의 양을 감소시킬 수 있고 천연골재를 활용하는 것이 별 이득이 없게 만들며 또한 대기 중의 온실가스 배출을 감소시키게 할 수 있다. 한편 건설 분야에 재활용 폐유리 사용에 관한 인식은 고도의 수많은 연구를 통하여 천연골재가 효과에 비해 비용이 더 든다는 것을 마주하게 되어 이러한 천연골재만이 좋다는 인식이 감소하고 있다는 것이다. 이 보고서에서는 건설재로서 재활용 폐유리에 관한 기준과 지속가능한 사용에 대해 검토코자 한다. 삶의 수준 향상과 더불어 세계 인구는 끊임없이 증가하고 있어서 생성되는 유리의 폐기물 양도 지속적으로 증가할 것이다. 따라서 우리가 건설 분야에서 유리 못지않게 재활용 폐유리의 사용에 더 많은 이해를 해야 한다는 것은 중요하다. 건설 분야에 재활용 폐유리를 사용하는 것은 폐기물을 관리하고 환경이 더 악화되지 않도록 보존할 수 있는 하나의 지속가능한 길로 간주되고 있다.

2. 소개

폐기물 재활용의 기본적인 주요 목표는 환경폐해를 일으키는 폐기물의 양을 궁극적으로 줄이고자 하는 것이다. 또한 폐기물 재활용은 과도하게 사용되는 천연재료의 감소율을 낮추기 용이한 대체재를 마련하는 방안으로 채택되어 왔다. 콘크리트 제조에 사용되는 천연재료에는 자연환경에서 쉽게 고갈되어 버리는 재료들이 일부 있다. 콘크리트는 건설 분야에서 일반적으로 사용되는 재료 중 하나이며, 콘크리트 배합에는 재활용 재료의 활용이 요구된다. 전 세계적으로 가장 많이 채취된 재료는 모래와 자갈이다. 매년 세계에서 이용되는 재료의 양(470~590억 톤) 가운데 모래와 자갈이 68%~85%를 차지해 왔다. 토건분야의 건축 및 유지관리에 많은 양의 골재를 필요로 한다. 일반적인 콘크리트 배합물 중에서 골재의 중량이 약 90%를 차지한다. 생성되는 폐유리의 양을 고려할 때 약 3분의 1은 신규 제조 유리를 만드는데 활용되며 나머지는 다른 용도로 사용될 수 있는 기회가 있다. 다양한 산업체에서 대량의 유리 폐기물이 발생된다. 전 세계적으로 많은 업체에서 다양한 공정과 포장재 또는 보관용으로 유리를 재사용한다. 본문 표1에서는 여러 국가의 재활용률을 보여주고 있다. 독일은 2004년까지 재활용률이 가장 높은 것으로 나타났다.

건물, 교량, 댐 등과 같은 건축물의 지속가능성 문제는 정부의 규제가 그 문제를 극복하는데 도움이 될 수도 있는 하나의 지속적인 과정(on-going process)이다. 이것은 콘크리트 배합에 유리를 일부 또는 전부 대체할 가능성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 재사용은 콘크리트 배합에 대한 설계 개선을 포함하여 많은 환경적 장점들을 제공한다. 건설관리 관행에서 도로공사에 폐유리를 재활용하는 프로세스가 확립되었다. 이 도로공사에 쓰이는 양은 건물 건축에 비해 더 많은 양의 골재와 시멘트를 소비한다. 그러나 기후 변화 문제로 인하여 세계는 건축물 시공에 사용되는 재료의 양을 줄이고 대체재 및 재활용재를 찾도록 종용받고 있다.

대체재로서 유리의 활용에 관한 주요 논쟁점에는 지속가능한 모르타르 및 콘크리트 배합에 폐유리의 사용 시 재활용 처리비용 및 운반비 문제로 반대하는 경향이 있다는 것이다. 폐기물을 재활용 가능하도록 만들고 운반하는데 드는 비용은 지속가능한 용도로 활용되기 때문에 용인되어야 하는 것이다. 따라서 이러한 용도로 쓰일 수 있는 전제조건은 재사용이 가능한 혁신과 시설물들을 적용 가능한 비용(functional cost)으로 활용이 가능하도록 하는 요구조건을 만족할 수 있도록 해야 한다.

3. 유리의 종류와 특성

유리는 대다수의 사람들에게 일상생활의 일부분이며 본질적으로 투명한 냉동액체와 다르지 않으며 극한의 온도에서 액화되는 탄산칼슘, 소다회 및 실리카의 조합체이다. 액체 유리의 결정화를 막기 위해 유리를 급냉하게 된다. 유리는 풍부한 원료로 제조되며 유리 제조 시 원료로 즉시 재사용될 수 있다. 유리는 품질이나 그 가치에 아무런 손실이 없이 무한히 재활용될 수 있다. 유리는 나이지리아에서 고품폐기물의 일부분을 차지하고 있는데 전체 고품폐기물의 8.7%에 해당하는 것으로 추정되고 있다. 전체 유리 생산량의 80%~85% 정도는 식품, 음료 및 약품의 용기로 쓰이거나 또는 건축용 및 자동차용 평판 유리로 쓰이는 수준이다.

3.1 유리 종류와 폐유리

유리는 크게 세 가지 부류로 나누어진다.

소다석회유리(Soda-lime glass, Na₂O, CaO, 6SiO₂): 이 유리는 주로 규산나트륨과 규산칼슘의 조합이다. 저온에서 용해되며 색상은 없다. 혼합 상태에서 효과적으로 부풀리거나 용착 될 수 있다. 이 유리는 실험실 실린더 및 기구용 유리제품으로 활용된다.

카리석회유리(Potash lime glass, K₂O, CaO, 6SiO₂): 이 유리는 주로 규산칼슘과 규산칼슘의 혼합물이다. 이 유리는 경질유리(hard glass)로 불리기도 한다. 이 유리는 고온에서 용해되며 극한의 온도에서 견뎌야 하는 유리제품의 생산에 활용된다.

카리납유리(Potash lead glass, K₂O, PbO, 6SiO₂): 이 유리는 대부분 규산칼슘과 규산납의 혼합물이다. 이 유리는 빛나는 광택과 놀라운 굴절률을 지니고 있다. 합성보석, 전구, 초점렌즈, 수정, 프리즘 등의 제조에 활용되기도 한다.

유리 폐기물은 용기형 유리, 평유리 또는 윈드 스크린으로 이루어져 있으며 나머지는 전구, 실험실용 튜브 등 기타 유리로 분류된다. 이러한 폐유리는 시멘트 또는 골재의 부분 대체재로 활용될 수 있다. 폐유리가 매립지로 보내지는 주요 사유는 인프라가 불충분하기 때문이다. 인프라 이용의 어려움이 유리의 재활용을 거의 불가능하게 하는 것이다. 에너지, 천연자원을 절약하고 이산화탄소 배출도 감소시키기 때문에 유리 제조업체에서 유리 제조에 파유리를 재활용하는 것이 더욱 경제적이다. 그러나 유리를 만들 때와 달리 유리를 골재로 사용할 때 에너지 또는 천연자원이 절약되지 않을 수도 있다. 골재로 사용되는 경우는 파유리(glass cullet)가 유리의 재생에 사용될 수 없는 경우이다. 콘크리트에서 가장 중요하게 다루어야 할 특성 중에서 재활용된 폐유리는 폐유리가 활용되는 또 다른 방식이기는 하지만 유리가 높은 함량(70% 이상)의 반응성 실리카로 구성되어 있기 때문에 콘크리트에 알칼리 실리카 반응(ASR - Alkali-Silica Reaction)을 일으킬 가능성을 가지고 있다는 것이다. 사용되지 않은 유리를 재활용하는 사례의 등장은 콘크리트 속의 시멘트 계 재료 또는 골재로 활용될 수 있음을 의미하는 것이다.

3.2 유리의 용도

주택, 작업장 및 최신의 건축 여부에 상관없이 건설 분야에서 유리의 적용성에는 에너지 효율적이고, 안전하며 세련되고 심미적 만족감이 있어야 하는 것이다. 또한 거주자에게 안락함을 제공하며 에너지를 생산하고 의사소통하는데 활용될 수 있어야 한다. 유리는 무한한 용도가 있지만 다음과 같은 일부 용도를 소개코자 한다.

단열 : 단열유리(Insulated covered glass)는 건축물로부터 열을 반사시키며 열 손실을 방지하여 거주자에게 쉴 수 있는 공간을 제공한다.

태양광 차폐(Solar protection) : 유리로 건축물에 침투하는 태양에너지의 양을 조정할 수 있으며 태양의

열기를 반사시키면서 빛은 통과시킬 수 있다.

건강, 안전 및 보안 : 훼손 방지, 기물파손 방지, 침입방지 및 외부소리 차단 등의 용도로 활용되는 유리는 거주자 생활의 조화로움과 안녕을 도모하게 해준다. 끝으로 항균 유리는 이 유리로 보호되는 공간에서 모든 미생물의 최대 99%를 근절시키면서 건강을 보장하게 해준다.

심미성(Aesthetics) : 유리 공간은 투명하고 청정하며 소박한 색조로 시공될 수 있다. 반투명 유리는 공간 확장성이 있다. 도장된 유리는 공간을 불투명하게 변화시켜 공간의 확장성을 도모한다. 빛을 조각하는 장식유리도 있다. 반사유리는 거울처럼 비추며 공간을 확장시킨다. 접합유리와 착색유리의 경우 안전성과 더불어 심미성을 제공한다. 강화유리 및 스크린 인쇄유리는 맞춤형 건물내부공간에 쓰일 수 있다. 전계발광(Electroluminescent with LEDs) 유리는 환상적인 모양의 빛을 생성시킨다. 디자인 유리(Designed and carved glass)는 혁신적인 가구 제조업체에서 활용한다.

에너지 생성(Energy generation) : 건물일체형 태양광(Building Integrated Photovoltaic - BIPV) 유리는 두 가지 역할을 수행하는데 에너지를 생산하면서 건물 외부구조의 일부를 담당한다.

커뮤니케이션 및 정보오락(Communication and Infotainment) : 늦은 밤에 눈에 띄는 배선없이 LED와 결합된 접합유리는 건물 외부를 움직이는 화면과 더불어 현란한 색상과 거대한 화면으로 탈바꿈 시킨다.

4. 재활용 폐유리의 사용

콘크리트에 재활용 폐유리는 하나 또는 그 이상의 부분 대체재로서 건축에 다양한 방법으로 자주 활용된다. 연구진들은 폐유리가 세골재 및 조골재와 결합되기 때문에 세골재 또는 조골재의 부분 대체재로 폐유리를 사용하는 것을 조사하였으며 유리분말의 포졸란 특성으로 인해 시멘트의 부분 대체재로 유리분말을 사용하는 경우가 있었다.

4.1 건설재료로서 재활용 폐유리의 사용

건설 분야에서 폐유리 분야에 관한 검토결과들에 따르면 콘크리트의 골재로 분말 형태이든 분쇄된 형태이든 재활용 폐유리가 콘크리트의 기계적 강도를 개선하는 것으로 밝혀져 왔다. 유리 분말의 종류가 분석되고 그 색상에 따라 압축강도에 영향을 미치게 되는데 최대 15%까지 시멘트를 부분 대체하는 녹색 색상의 유리가 강도 값이 떨어지는 것으로 조사되었다. 15% 정도 일정한 비율로 대체하는 경우 갈색 유리분말과 네온색상 유리분말의 압축강도의 차이는 크지 않았다. 실험결과 네온 색상의 유리에서 13% 강도증가가 관찰되었다. 네온 유리는 칼슘(CaCO₃) 탄산염 함량이 높는데 이것이 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 것이다. 유리분말이 없는 상태의 콘크리트에서 그 기계적 특성은 다음과 같다. 천연골재를 사용한 콘크리트가 분쇄유리를 골재로 부분 대체한 콘크리트에 비하여 압축강도와 쪼갬 인장강도가 훨씬 더 크다.

그럼에도 불구하고 세골재 또는 결합재로서 폐유리 10%와 15-30%의 범위의 콘크리트 배합이 쪼갬인장강도와 압축강도에 해를 끼치지 않는다는 많은 연구결과들이 있다(본문 참고문서 번호 4,22,24,27,29-40 사례). 유리분말 대체가 30%를 초과하게 되면 수산화칼슘이 부족한 것으로 판명이 났기 때문에 30% 이상의 경우 수산화칼슘은 포졸란 반응에 부적절하게 된다. 다량의 칼슘과 규소를 함유하는 폐유리는 특성상 비정질로 분류될 수 있다. 따라서 폐유리 분말은 성질상 포졸란 계이거나 심지어 시멘트 계 재료라 분류될 수 있다. 재활용 폐유리 모르타르는 표준모래를 사용하는 모르타르에 비해 유해물이 적으며, 기존 모르타르에 가장 가까운 폐유리 혼합율은 15% 정도이다. 포졸란 계 대체재로 10%의 유리분말을 활용하는 경우 모르타르의 압축강도가 약 9% 정도 개선되었다. 좀 더 나아가 결합재로서 15%의 유리분말을 활용하는 경우 평균 16% 정도의 시멘트 압축강도가 개선되었으며 시멘트를

사용하는 경우에 비해 더 나은 결과가 도출되었다.

4.2 재활용 폐유리의 지속가능한 사용

아래 문헌검토 내용은 재활용 폐유리의 지속가능한 활용을 기반으로 한 것이다. 점성을 개선하기 위하여 폐 소다석회 유리(Soda, Lime Silica glass waste - SLS)가 고층건축의 자중문제를 최소화하기 위해 점도를 부분 대체하는데 사용된다. 폐 소다석회 유리는 고온에서 소결되었으며 폐 소다석회 유리의 활용이 점토골재(clay aggregates)의 특성에 어느 정도 긍정적인 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 또한 강도는 증가되고 개방형 기공(open porosity), 흡착력(waste absorption)과 중량은 감소되는 것으로 드러났다.

- 반투명 콘크리트는 건물내부로 자연광을 투과시키기 때문에 인공조명의 필요성을 크게 줄일 수 있는 최신의 해결책이다. 재활용 유리가 자가충전 모르타르(self-compacting mortar - SCM)에 사용될 때 천연 세골재의 대체재로 활용된다. 만족할 만한 시공성, 적절한 강도와 내구성을 갖춘 SCM 및 반투명 콘크리트를 제조할 때 최대 30%의 재활용 유리골재를 부분 대체하는 것이 가장 실용적이다. 이번 조사로 반투명 콘크리트 판넬/외벽재가 친환경 건축물과 지하역사의 내력 및 비내력 벽재로 그리고 보안, 감독 및 안전을 강화해야 할 필요성이 있는 은행, 교도소 및 박물관 등의 건축벽체로 적합하다는 것을 확인하게 되었다.
- 재활용 유리 플라이애시 지오폴리머에 대한 평가가 수행되었는데 그 결과 수용 가능한 압축강도를 발휘하는 저탄소 조적재료로 만드는 것이 가능한 것으로 조사되었다. 이 재료의 구체적인 적용 사례에는 경량골재로 이루어져 있기 때문에 열전도성이 낮고 기계적 특성이 개선되어 내력벽재, 부유식 건축재(floating structures)나 단열재 등의 용도로 건축물에 사용되는 경우 등이 있다.
- 본문 참고문서 [61]의 Yu, van Onna, Spiesz, Yu & Brouwers 등의 연구진이 언급한 바와 같이 폐유리 용도가 확장되고 활용성이 증대되었다. ULFRC는 초경량 섬유 강화 콘크리트 “Ultra-Lightweight Fiber Reinforced Concrete”를 말한다. ULFRC의 구체적인 적용사례는 이 재료가 경량골재로 이루어져 있기 때문에 열전도성이 낮고 기계적 특성이 개선되어 내력벽재, 부유식 건축재(floating structures)나 단열재 등의 용도로 건축물에 사용되는 경우 등이 있다.
- 재활용 폐유리는 가열아스팔트 혼합물(Hot Mix Asphalt - HMA)에 쓰이며 관리표준으로 HMA가 평가되었다. 폐유리는 유리병이 파쇄 된 형태(유리 부스러기)의 것이었고 세골재의 부분 대체재로서 활용되었다. 시험결과 도출을 위해 마샬 시험(Marshall Test - 최적의 비투민 함유량, 안정성, 플로, 비중 및 공극)이 이루어졌고 도로 및 교량에 대한 나이지리아 기준은 고속도로 기준이 적용되었다. 이번 연구 결과 재활용 폐기물 사용 HMA는 나이지리아 도로 및 교량 기준에 적합하였으며 재활용 폐기물 사용 HMA가 관리기준(standard control) HMA에 비해 성능이 우수한 것으로 밝혀졌다.
- 폴리머 콘크리트가 성공적으로 제조 및 사용되었다. 이것은 조명용 유리 부재를 사용하는 업체로부터 수집된 폐유리가 적용된 사례이다. 이 폐기 조명용 유리부재들은 작은 입자로 만들기 위해 분쇄과정을 거쳐 골재로 사용될 수 있다. 콘크리트에 사용되는 기존 골재와 연구결과가 비교 분석되었다.
- 다양한 방법의 폐유리(유리 부스러기)를 사용한 건축물의 장기적인 알칼리 실리카 반응(Alkali-Silica Reaction - ASR)을 평가한 As'ad Munawir[본문 참고문서 65번]의 연구결과는 세골재 또는 조골재로 사용한 경우의 것이었다.
- 친환경 콘크리트 혁신 사례들은 재활용재를 사용하게 만들어 환경을 개선하는데 도움이 된다. 연구진은 폐점토벽돌 분말과 폐유리 분말을 콘크리트에 사용하는 것에 관해 연구하였다. 적절한 강도의 콘크리트 제조를 위해 점토벽돌 및 유리분말로 시멘트를 대체하는 배합 매트릭스가 준비되었다.(본문 참고문서 66).

- 지오폴리머 타일(Geopolymeric tiles) 제조는 폐유리분말을 사용하는 하나의 지속가능한 방법이다. 유리병, 형광등, 기타 언급되지 않은 폐유리를 사용하는 방법에는 타일재료로 사용하는 경우이다. 타일은 알칼리성 시멘트계 재료가 될 수 있도록 알칼리 반응이 요구된다. 지오폴리머 타일에 부과되는 압축강도와 최대하중은 그 용도에 부합해야 한다.

5. 결론

지구를 구하는 것은 전 세계적인 문제이며 많은 이해관계자들이 에너지 사용을 제한하고 환경에 미치는 영향을 감소시키는 다양한 방법들을 찾고 있으며 연구에 따르면 우리는 지속가능한 건축 구성재인 것으로 밝혀져 왔다. 재활용 폐유리를 사용하는 것이 건축의 경우 수익성이 있고 합리적인 상태이다. 이산화탄소의 큰 배출로 인해 시멘트에 전적으로 의존하는 것은 지속가능하지 않기 때문에 폐유리 활용이 바람직하다. 그러나 건설공사에 재활용 폐유리 사용에 대한 지침으로 기술표준이 도입되어야만 한다. 이러한 관리 대책은 천연 골재를 사용하는 것에 비하여 재활용재를 사용하는 것이 더 비용이 많이 들게 할 수 있는 요인을 제공할 수도 있다. 건설업계는 수익을 창출하고 건축물의 내구성을 보장해야 하며 환경 보호에 대한 기업의 사회적 책임도 가지고 있다. 따라서 환경에 미치는 영향으로 인해 건설과정에 시멘트와 천연골재 사용의 축소에 대한 재평가도 수반되어야 한다. 업계의 수익창출과 건축물의 내구성에 어떤 위해도 없이 재활용 폐유리를 사용하는 방법을 찾는 것이 건설업계의 최상의 관심사가 될 것이다. 건설업계에 폐유리 활용을 위한 끊임없는 연구 및 개발 노력이 요구되는 것이다. 건설공사에 폐유리 사용에 대한 경제적 문제를 확인하거나 반박할 수 있는 비용 분석에 대한 연구가 수행되어야 한다. 건설공사에 활용되는 폐유리는 매립지로 보내지는 폐유리의 양을 줄이는데 도움이 되며 건설 공사에 요구되는 천연골재의 양을 줄일 수 있는 잠재력을 나타내기도 한다. 폐유리를 건설자원으로 쓰기 위해 원하는 곳으로 운반 및 가공 처리하는 것이 더 큰 에너지 소비를 요할 수도 있으며 이산화탄소 배출이 늘어날 수도 있다. 이러한 조치는 재활용 폐유리를 사용하는 목적을 상실하게 되어서 건축물에 재활용 폐유리의 효과를 평가하는 생애주기 분석이 이루어져야 할 것으로 예상되며 건설업계에 재활용 폐유리를 채택하는 것을 지원할 수 있는 많은 보고서도 작성되어야 할 것으로 판단된다. 이어서 건축공사에 건설재로서 재활용 폐유리에 관한 관점을 변화시킬 수 있도록 이해 관계자들은 정부를 통해서 건축물에 재활용 폐유리 사용 가능성을 확대시킬 수 있는 건설업계에 보상 제공 제도를 요청할 수도 있다. 정부는 또한 건설공사에 재활용재의 활용을 권장하고 촉진하는 법규제정도 해야 한다. 재활용 폐유리를 사용하는 건축물의 성능에 영향을 끼칠 수 있는 많은 요인들이 있다. 재활용 폐유리의 활용을 위한 전제 조건이 있어야만 하며 그런 이유로 다음과 같이 명확히 그 내용을 기술코자 한다.

- (1) 배합비, 각 배합의 구성요소는 구성 골재에 따른 다양한 특성을 가지고 있다.
- (2) 유리 모양, 유리입자의 크기 및 대체 유리 함량 기준(위해가 없는 최적의 첨가량은 20% 정도).
- (3) 재활용 폐유리의 성분, 색상 및 처리방식. 재활용 폐유리는 골재 또는 시멘트의 대체재로 활용될 수 있다. 또한 콘크리트 구조물의 알칼리 골재반응(ASR)에 대한 영향과 관련하여 건설공사에 재활용 폐유리의 중대 기술적 관심사로서 미래 심층연구는 필수적이다.

<원문제목> Sustainable use of recycled waste glass as an alternative material for building construction

<원문출처> Covenant University,Ota, Ogun State, Nigeria.