

폐유리 슬러지의 시멘트 대체제로의 활용 방안에 대한 연구동향

A Review on the Utilization of Waste Glass Sludge as a Partial Replacement for Cement



이현기 Hyeon-Gi Lee
 (주)브리코랩 대표이사
 E-mail : hyeongi84@gmail.com

1. 서언

국내에서 발생하는 폐유리는 병유리 및 기타 관유리에서 발생하는 골재 형태의 폐유리가 있으며, 이외에 유리제조 및 가공과정에서 발생하는 분진형태의 폐유리 슬러지가 있는 것으로 확인된다. 유리제조 및 가공과정에서 발생하는 분진형태의 폐유리는 무기물 슬러지로 구분되어 처리되고 있으며, 처리방법은 전량 매립에 의존하고 있다. 폐유리 슬러지와 관련된 발생량 및 매립에 대한 통계자료는 아직 정확하게 제시되어 있지 않으며, 국내 유리가공 18개 업체 조사 결과 아래 [표 1]과 같으며 업체규모별 폐유리 슬러지 발생량의 규모를 짐작할 수 있다.

국내 유리가공 18개 업체 조사 결과, 연간 4,700 ton 규모의 폐유리 슬러지가 발생하고 있으며, 기타 유리생산 및 가공업을 고려한다면 집계된 규모를 상회할 것으로 판단된다. 또한, 각 업체별로 폐유리 슬러지 처리비용이 50,000~100,000 원/ton (평균 약 80,000 원/ton) 이 발생하는 것으로 나타났으며, 이를 활용한 비용절감 및 친환경재료의 개발효과를 이끌어 낼 수 있을 것으로 판단된다.

폐유리 슬러지로 구분되는 미립분의 폐유리는 생산 업체별로 입도 및 성분에 대한 차이가 다소 존재하지만, 폐유리 슬러지로 구분되는 미립분의 폐유리는 생산 업체별로 입도 및 성분에 대한 차이가 다소 존재하지만, 일반적으로 1mm 이하의 미립분 형태로 발생하며, 조사업체 2곳을 임의 선정하여 성분분석결과, 아래 [표 2]와 같이 주성분의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

[표 1] 국내 폐유리 슬러지 발생현황 (출처: 국내 18개 유리가공업체)

구분	발생규모 (ton/year)	개소	총 발생량 (ton/year)	처리비용 (원/ton)	비고
소형	0~10	9개소	24.2	50,000~100,000	
중형	10~500	6개소	834	80,000~100,000	
대형	500 이상	3개소	3,900	70,000	일부 재활용

[표 2] 업체별 폐유리 슬러지 성분분석 결과

구분	대형업체 A	중형업체 B
SiO ₂	70~72	68.2
Al ₂ O ₃	0.1~2	10.1
CaO	9~10	9.9
Na ₂ O	13~15	7.62
MgO	3~5	2.94

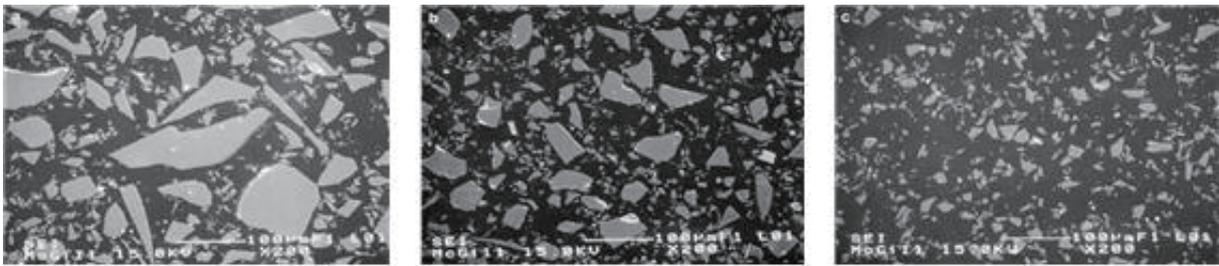


그림 2. 입도별 폐유리 입자의 형상²⁾

2. 시멘트 대체 폐유리 슬러지 혼입 콘크리트의 연구 동향

2.1 역학적 성능

Thomas D. Dyer 등 (2001)의 연구에서 600 μm 이하의 입도를 갖는 투명, 녹색, 황색의 유리를 시멘트 대체로 혼입하여 모르타르 시편을 제작, 압축강도를 시험하였다. <그림 1>처럼 투명 및 녹색 유리를 10% 혼입한 경우 강도증진효과를 나타

냈으며, 황색 유리를 10% 혼입한 경우 유리를 혼입하지 않은 경우와 유사한 강도를 나타냈다. 압축강도의 발현은 모르타르 시편에 혼입된 유리의 색상에 따라 차이를 보였다. 또한, 재령 기간 7일과 28일 사이에 강도발현 속도의 증가를 포졸란 반응 (pozzolanic reaction)에 의한 거동으로 보고 있다.¹⁾

Yixin Shao 등(2001)은 시멘트 대체로써, SiO₂ 를 약 72.8% 함유, Na₂O 를 약 16% 함유하고 있는 유리 분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도를 확인하였다. 실험에 사용된 유리는 #100(150 μm), #200(75 μm), #400(38 μm)체를 통과하는 것으로 입자별 3가지로 분류하였다.

총 6종류의 배치를 하여 압축강도를 비교하였고, 배치의 종류는 일반 콘크리트, 실리카흄 (Silica fume)을 시멘트 치환 대체율 30% 혼입한 콘크리트, 플라이애시 (Fly ash)를 시멘트 치환 대체율 30% 혼입한 콘크리트, <그림 2>와 같이 다양한 (75~150 μm, 38~75 μm, <38 μm) 입도를 갖는 폐유리를 시멘트 치환 대체율 30% 혼입한 콘크리트 구성하였다.

압축 실험결과 <그림 3>과 같이 폐유리의 입도가 작을수록 압축강도가 크게 나타났고, 38 μm 이상의 폐유리 분말을 혼입한 경우 일반 콘크리트에 비하여 재령 3일에 91%, 7일에 84%,

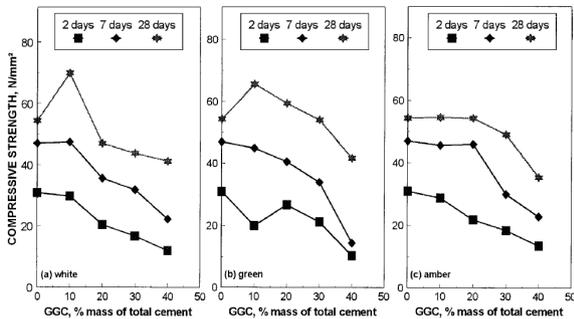


그림 1. 색상별 유리의 시멘트 대체 혼입에 따른 압축강도¹⁾

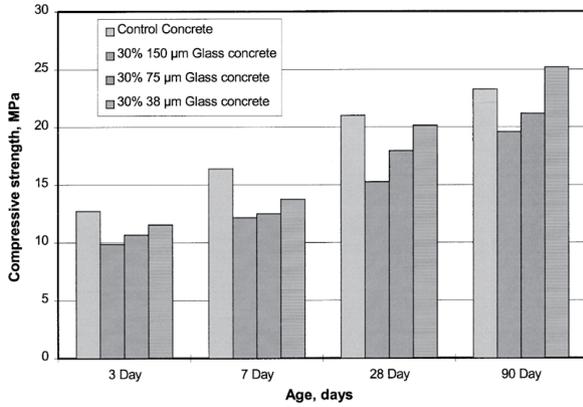


그림 3. 30%의 페유리를 혼입 콘크리트의 재령별 압축강도²⁾

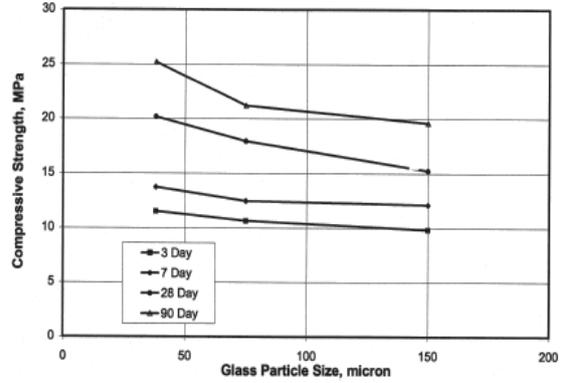


그림 5. 30%의 실리카흄, 플라이애시, 38μm의 페유리 혼입 콘크리트 재령별 압축강도²⁾

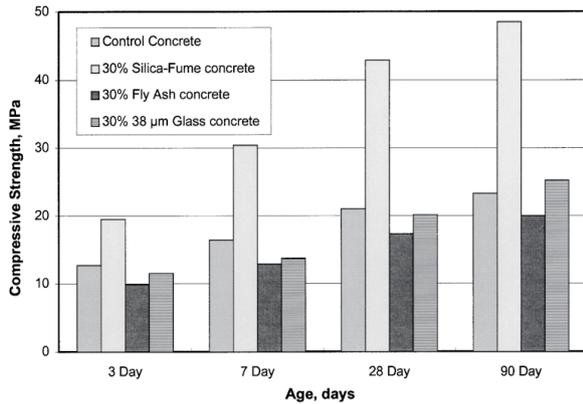


그림 4. 페유리 혼입 입도별 콘크리트 압축강도²⁾

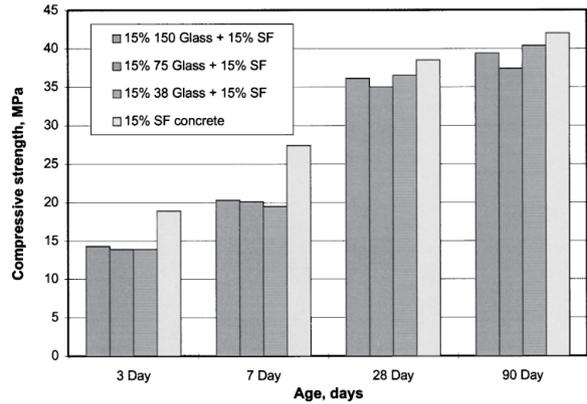


그림 6. 하이브리드(유리-실리카흄) 혼입 콘크리트의 재령별 압축강도²⁾

28일에 96%, 90일에 108%로 모든 양생기간 동안 배합강도의 75%를 초과하였다.²⁾

또한, <그림 4>와 같이 입도 38μm 이상의 페유리 분말을 혼입한 콘크리트는 플라이애시를 혼입한 콘크리트에 비해 모든 재령기간 강도가 높았고, 실리카흄을 혼입한 콘크리트에 비해 약 50%의 강도를 보였다. 페유리 속 Na₂O의 함유가 많을수록 콘크리트의 초기강도 발현에 많은 도움이 되었다. Na₂O는 알칼리와 반응하여 규산-칼슘 수화물을 형성하게 되고 이는 콘크리트의 초기 강도 발현을 촉진시켰다. 이는 콘크리트에 포함된 다수의 알칼리에 의한 것이라 사료된다. 그럼에도 불구하고, 다수의 알칼리 혼합물은 콘크리트의 장기강도를 저하시키지 않았다. 대신, 강도가 점진적으로 증진되는 현상이 나타났다. 38μm의 유리가 혼입된 콘크리트는 재령 3일에서 90

일까지 강도가 약 120% 증가되었다. 플라이애시가 혼입된 콘크리트에 비하여 같은 기간 양생 시 102% 이상의 높은 비율로 강도가 증가되었다.

<그림 5>와 같이 유리의 입도 크기에 따른 효과가 콘크리트 성능에 분명하게 나타났다. 유리의 입도가 미세할수록 보다 높은 압축강도를 가졌으며 양생 기간이 길어짐에 따라 강도가 증진되었다. 이는 입도가 작아질수록 비표면적의 증가로 포졸란 반응이 촉진되어 압축강도가 증가된 것으로 보이며, 적정 입도의 선택으로 포졸란 반응을 활용한 콘크리트 성능개선을 기대할 수 있는 것으로 사료된다.

Yixun Shao 등(2001)은 포졸란 반응이 뛰어난 실리카흄과 유리를 동시에 시멘트 대체로 혼입할 경우 콘크리트 압축강도를 평가하였다. 각 배치는 시멘트 치환 30% 대체율로 실리카흄

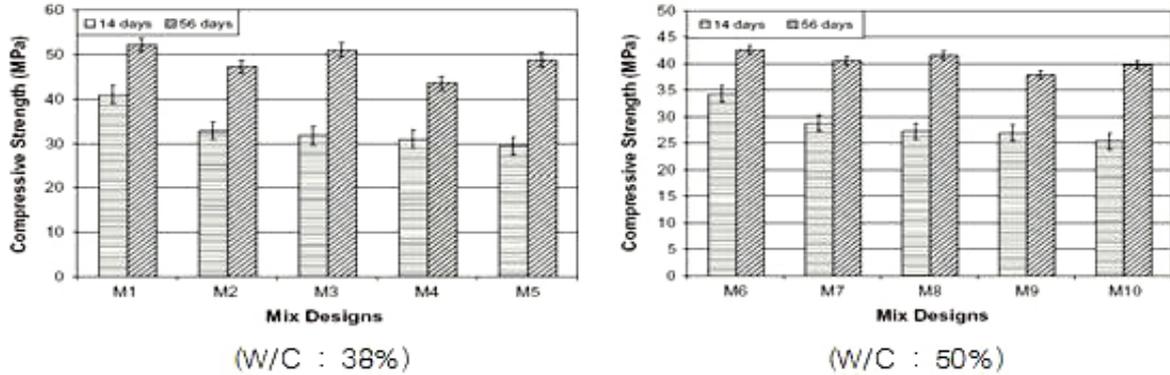


그림 7. 재령별 콘크리트 압축 강도³⁾

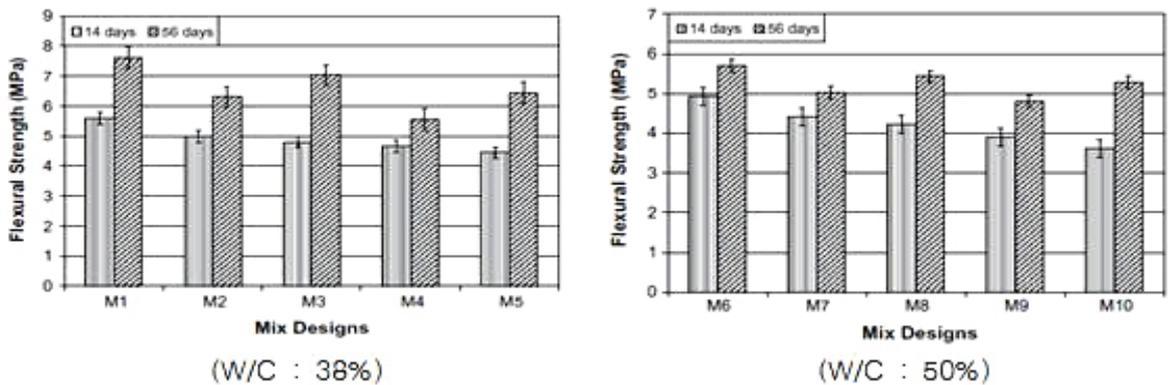


그림 8. 재령별 콘크리트 휨 강도³⁾

15%와 150 μ m 유리 15%, 실리카흙 15%와 75 μ m 유리 15%, 실리카흙 15%와 38 μ m 유리 15%, 시멘트 15% 대체로 실리카흙 15%로 총 4가지 배치로 실험을 수행 하였다.²⁾

실험결과는 <그림 6>과 같으며, 유리와 실리카흙을 동시에 혼입한 콘크리트의 강도발현 특성을 살펴보면 재령 7일의 경우, 실리카흙만 혼입한 콘크리트에 비해 20% 이상 낮은 압축 강도가 측정되었으나, 재령 28일 이후, 실리카흙만 혼입한 콘크리트와 유사한 수준의 압축강도를 나타냈다. 이는 빠르게 반응하는 실리카흙에 비해, 유리의 혼입에 의한 포졸란 반응 특성이 늦게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 유리와 실리카흙의 하이브리드(hybrid) 혼입을 통해, 콘크리트 배합의 경제성 및 압축강도 성능을 이끌어 낼 수 있음을 시사한다.

50% 물-시멘트비로 타설된 콘크리트의 압축강도는 재령

14일에서 압축강도가 폐유리를 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 보다 낮은 강도값을 가졌고, 재령 56일에서 압축강도가 서서히 높게 관측되었다. 폐유리를 혼입한 콘크리트의 경우 강도가 장기적으로 발현된다는 것을 확인할 수 있었다.

휨 강도의 경우, 압축강도와 유사한 형태의 결과 값을 확인할 수 있었다. 물-시멘트비와 관계없이 폐유리를 혼입한 콘크리트의 재령 14일 강도는 폐유리를 혼입하지 않은 콘크리트에 비하여 보다 작은 강도 값을 보였다. 하지만 <그림 8>과 같이 38% 물-시멘트비로 타설된 콘크리트 재령 56일 때, 폐유리를 혼입한 콘크리트의 휨강도가 폐유리를 혼입하지 않은 콘크리트에 비하여 증진되었음을 확인할 수 있었다. (11~14% 증진)

또한, 50% 물-시멘트비로 타설된 콘크리트의 재령 56일

휨강도의 경우 8~10 %의 강도증진을 나타내었다. 휨강도 역시 압축강도와 마찬가지로 폐유리를 혼입한 콘크리트의 경우 강도가 장기적으로 발현된다는 것을 확인 할 수 있었다.

2.2 내구성능

Roz-Ud-Din Nassar 등 (2012)의 연구에서는 시멘트 대체 가공된 폐유리를 혼입한 경우 또는 재생골재를 일반 골재 대체로 혼입한 경우의 콘크리트의 염화물 투과성 시험 및 동결융해 시험을 수행하였다.

염화물 투과성 시험은 염소이온을 투과시켜 시편을 포화시킨 후 전기 전도성을 모니터링 하여 실험을 수행하였다. 시험 결과, <그림 8>과 같이 폐유리를 혼입한 콘크리트의 경우 폐유리를 혼입하지 않은 콘크리트에 비하여 염화물 투과성이 상당히 감소함을 확인 할 수 있었다. 폐유리에 의해 포졸란 반응이 촉진되고, 이에 따라 콘크리트 내 공극이 감소되어 염화물 투과에 대한 저항성을 향상 시킨 것으로 사료되고, 폐유리의 혼입이 없는 콘크리트에 비해 최대 54 % 염화물 투과성을 감

소시켰다.

동결융해 저항성의 경우, 50 % 물-시멘트비로 타설한 콘크리트를 기준으로 폐유리 혼입 유무에 따른 배치를 달리하여 실험하였다. ASTM C 666 에 따라 42일간 양생 후, 동결은 공기 중, 융해는 수중에서 총 310번 반복하여 수행하였다. 시험 전 시편의 무게와 시험 종료 후 시편의 무게를 비교하였는데 동결융해가 반복됨에 따라 콘크리트에 균열이 발생, 균열부를 따라 수분이 침투되어 균열부가 확장되기 때문에 시편의 무게가 증가하였다.

[표 3]과 같이 폐유리를 혼입한 콘크리트의 경우 폐유리를 혼입하지 않은 콘크리트에 비하여 무게 증가가 적다는 것을 확인할 수 있었다. (약 29 % 낮은 무게 증가 추이) 또한, 손상지수를 평가하여 동결융해에 대한 저항성을 평가하였는데, 손상이 가장 적은 1 부터 손상이 극심한 5등급까지 순위를 정하여 평가하였다. [표 4]와 같이 폐유리를 혼입한 콘크리트의 경우 동결융해에 따른 균열, 표면박리, 골재박리 (aggregate pop outs) 에 대하여 높은 저항성을 가진다는 것을 확인할 수 있었다.

Nathan Schwarz 등(2008)은 유리파우더와 플라이애시의

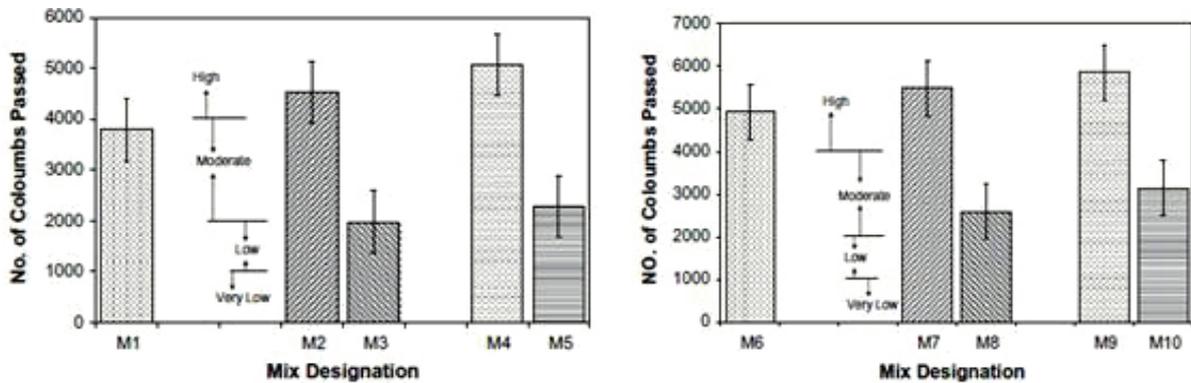


그림 9. 38% w/c비(좌)와 50% w/c비(우)로 타설한 콘크리트의 염화물 투과성³⁾

[표 3] 물-시멘트 비 50% 콘크리트의 동결융해에 따른 중량변화율³⁾

구분	M6	M7	M8	M9	M10
무게 증가율(%)	0.40	0.47	0.36	0.55	0.39

[표 4] 물-시멘트 비 50% 콘크리트의 동결융해에 따른 손상지수³⁾

구분	M6	M7	M8	M9	M10
손상지수	3	4	2	5	2

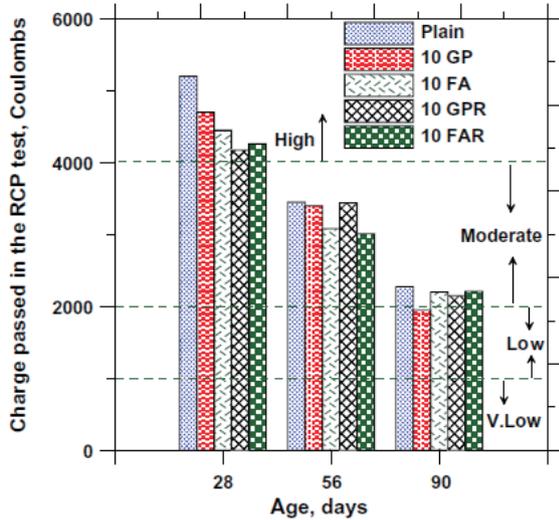


그림 10. 시간에 따른 염화물 침투⁴⁾

비교를 통하여 유리 파우더가 혼입된 콘크리트의 염화물 침투 저항성에 미치는 영향을 확인하였다. 유리 파우더는 45 μm의 체를 72 % 통과하는 입도로서, 유리파우더와 플라이애시의 혼입량은 각각 시멘트 중량비 10 % 대체하였으며, 유리 파우더와 플라이애시를 동시 혼입한 경우, 시멘트 중량비 20 % 대체하여 염화물 침투 저항성을 확인 하였다.⁴⁾

염화물 침투 시험에서 ASTM C1202를 따라 양생기간 28, 56, 90일에 대해 각각 시행했고, 결과는 <그림 10>와 같이 양생기간 28일에 기존 콘크리트의 염화물 침투 시험 값이 유리 파우더 혹은 플라이애시가 혼입된 콘크리트 보다 월등히 높았다. 하지만 56일, 90일에는 모든 값들이 비슷한 추이를 나타내었다. 재령 90일에는 유리의 시멘트 대체율 10%가 가장 낮은 수치를 보였고, 이는 공극 속 용액의 전도성에 따라 결정되는데 알칼리 이온은 유리가루에 의해 배출되면서 공극속의 전도성은 증가하게 되고, 그 결과 콘크리트에 유리를 혼입할 경우 매우 염화물 침투에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

2.3 알칼리 실리카 반응성

Ravindra K. Dhir 등(2009)은 63 μm 이하의 입도를 갖는 분말형태의 유리를 10, 30 % 시멘트 대체 혼입하여 BS 821-

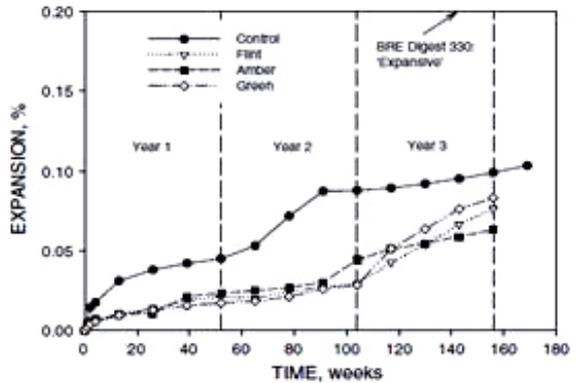
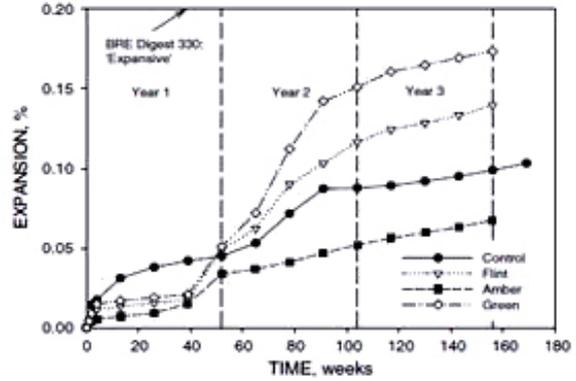


그림 11. 시멘트 대체 혼입 10%(좌), 30%(우)에 따른 팽창이력 곡선⁵⁾

123 알칼리 골재 반응성 실험을 수행하였으며, 그 결과 그림 11과 같이 단기간에 일어나는 팽창은 감소하였으나 10 % 혼입의 경우 장기적 팽창은 크게 증가함을 나타내었다.⁵⁾

Yixun Shao 등(1999)은 시멘트 대체 폐유리 분말을 혼입하였을 경우 ASTM C 1260에 의한 알칼리 실리카 반응팽창 실험을 실시하였다. 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. 유리의 속성은 SiO₂ 를 약 72.8% 함유, Na₂O 를 약 16% 함유하고 있으며 이를 시멘트 대체 대체율 30% 로 사용하였다. 실험 시편은 시멘트와 모래, Mineral additive를 사용한 모르타르로서 각 시편별로 실리카흙, 플라이애시, 입도별 유리를 혼입하여 총 5종류로 제작하였다. 양생은 80 °C 의 온도에서 수중양생을 24시간 한 후, 팽창성을 평가하였다. 유리에 함유된 실리카와 시멘트에 포함된 알칼리의 반응을 관찰하고, 혼화제의 콘크리트의 팽창

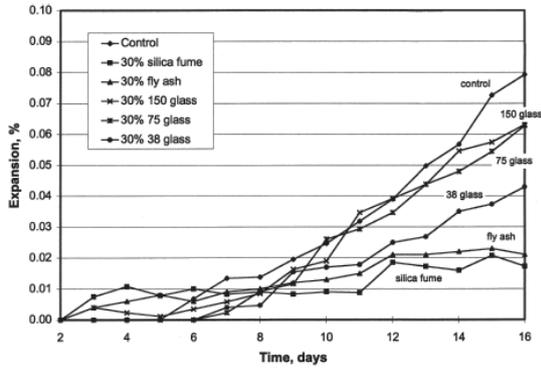


그림 12. 실리카흙, 플라이애시, 입도별 폐유리 각 시편별 팽창성²⁾

억제 효과를 확인하였다.

실험결과, <그림 12>와 같이 실리카흙을 혼입한 모르타르가 가장 팽창이 적었고, 그 다음이 플라이애시를 혼입한 모르타르가 적었다. 150 μm 과 75 μm 유리를 혼입한 모르타르의 팽창은 거의 유사한 거동을 보였으며 38 μm 유리를 혼입한 모르타르는 큰 입도의 유리를 혼입한 모르타르에 비하여 적은 팽창을 보였다. 이는 ASR에 의해 팽창이 보다 억제되었으며, 유리의 입도가 미소할수록 팽창이 낮게 측정되었다.²⁾

Nathan Schwarz 등(2008)은 유리파우더와 플라이애시의 혼입에 따른 알칼리 실리카 반응성 비교를 위해, ASTM C 1260 에 준하여 축진 모르타르 붕 시험을 수행하였으며, 시멘트 중량에 비례하여 유리파우더 및 플라이애시를 5, 10, 20 % 씩 대체 혼입하였으며, 유리파우더 및 플라이애시를 동시에 최대 20%로 혼입하였다.⁴⁾

유리 파우더와 플라이애시의 혼입량 별 ASR 팽창 시험 결과, <그림 13> (a) 와 같이 유리 혼입량이 0에서 5, 10, 20% 증가 할수록 팽창은 0.28, 0.26, 0.22, 0.17% 로 감소하였지만, 플라이애시의 경우 <그림 13> (b) 와 같이 팽창 감소율이 0.28, 0.15, 0.12, 0.08% 로 더 높게 나타났다. 유리파우더와 플라이애시를 동시 혼입할 경우 <그림 13> (c) 와 같이 유리와 플라이애시가 각각 여러 가지 비율로 함께 혼입 되었을 때 큰 폭으로 감소하는 것을 보여주며 모든 결과를 종합해보면 유리와 플라이애시가 각각 5, 15%로 대체 혼입 시 알칼리 실리카 팽창 억제에 가장 좋은 결과를 보여주고 있다.

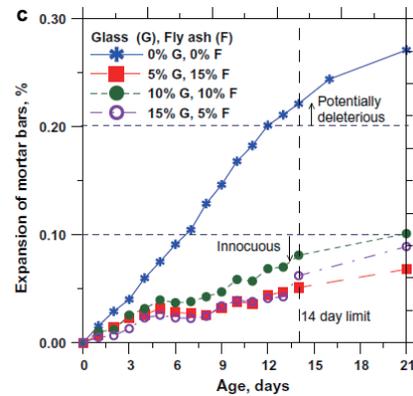
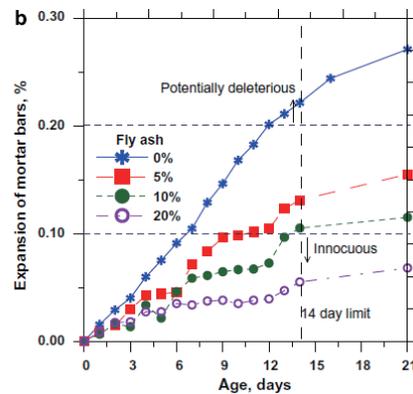
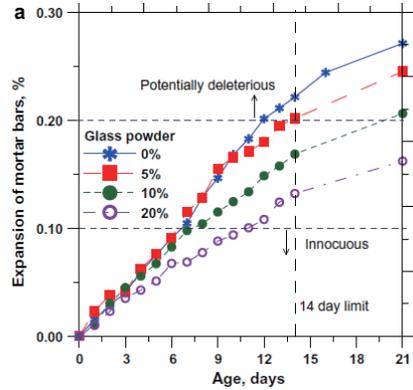


그림 13. (a) 시간에 따른 유리파우더의 팽창곡선, (b) 시간에 따른 플라이애시의 팽창곡선, (c) 시간에 따른 유리파우더와 플라이애시를 동시 혼입할 경우의 팽창곡선⁴⁾

3. 맺음말

폐유리 슬러지 재활용 관련 연구 사례를 통해 폐유리 혼입 콘크리트의 연구내용의 요약 및 결론은 다음과 같다.

1) 폐유리의 입도는 최대 100 μm 이하가 적정한 것으로 나타나며, 혼입량은 20 % 내외로 기타 혼화재와 혼입할 경우, 성능개선이 우수할 것으로 사료된다. 또한, 유리 혼입에 따른 포졸란 반응은 색상 및 특정성분에 무관하며, 이를 통한 콘크리트 배합의 성능개선을 꾀할 수 있다.

2) 실리카 성분에 의해 포졸란 반응성을 기대할 수 있으나, 실리카 및 알칼리 성분에 의해 알칼리-실리카 반응성이 존재함은 유념해야할 것이다.

3) 크롬이온의 의한 ASR 팽창 억제효과는 발견되지 않았으나, Color effect 라 불리는 효과에 대해 검증이 필요할 것으로 생각된다.

4) 폐유리 혼입 콘크리트는 염소이온 투과저항성, 동결융해 및 박리 저항성 개선효과와 ASR 팽창 억제효과를 나타내며, 기타 포졸란 혼화재보다 우수한 것으로 판단된다.

다만 아직까지 국내에서는 폐유리에 대한 재활용 인식이 낮아 폐유리를 재활용하기 위해서는 활용타당성 검증 및 안전성 검증으로 폐자원에 대한 사회적 인식 개선이 선행되어야 할 것이다. 이러한 점을 감안하여 자원순환을 위하여 문제점을 보완한 적극적인 연구 및 제도적 뒷받침이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Thomas D. Dyer, Ravindra K. Dhir (2001). Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement Component, *Materials in Civil Engineering*, 13(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:6\(412\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:6(412))
2. Yixin Shao, Thibaut Lefort, Shylesh Moras, Damian Rodriguez (2001). Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91-100. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6)
3. Roz-Ud-Din Nassar, Parviz Soroushian(2012). Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement, *Construction and Building Materials*, 29, 368-377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061>
4. Nathan Schwarz, Narayanan Neithalath (2008) Influence of a fine glass powder on cement hydration Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration, *Cement and Concrete Research*, 38(4), 429-436.
5. Ravindra K. Dhir, T. D. Dyer, M. C. Tang (2009). Alkali-silica reaction in concrete containing glass, *Materials and Structures*, 42, 1451. doi:10.1617/s11527-008-9465-8.

담당 편집위원 : 김용재(강원대학교)