

# 폐유리의 잔골재로서 재활용이 탄소배출량에 미치는 영향에 대한 기초연구

A Fundamental research on the effect of recycling waste glass as fine aggregate on carbon emissions



**손민재 Min-Jae Son**  
 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부  
 박사후연구원  
 E-mail : mjson@kict.re.kr

## 1. 머리말

한국의 국내건설 수주 규모는 2018년도부터 지속적으로 증가하였으며, 지난 2022년 229.7조원으로 역대 최대치를 기록하였다. 비록 고금리 상황, 부동산 PF 관련 자금조달의 어려움 및 높은 공사비 고착화로 인하여 2023년도부터 수주 규모가 감소하는 추세이나, 그 규모는 무시할 수 없는 수준이다. 이러한 국내 건설시장 규모에 따라 건설 자재의 수요량이 증가하였으며, 그 중에서 잔골재의 수요 및 공급량 또한 증가하였다.

<그림 1>에 나타난 바와 같이, 국내 잔골재 공급 현황(국토교통부 골재수급 계획)에서 정부의 노력(건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률 시행 등)에 의해 순환잔골재 등이 국내 잔골재 공급의 절반가량을 해소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 이와 같은 정부의 노력에도 불구하고 나머지 절반가량의 잔골재는 산림, 하천 및 바다 등 자연에서 채취하여 공급되고 있으며, 특히 2017년 해양환경문제 논란으로 인한 바다모래 공급 감소를 충당하기 위해 산림모래의 채취량이 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 국내 전문가들은 <그림 2>와 같이 산림모래의 채취량 증가로 인한 산림 훼손이 다양한 환경 문제를 유발할 것으로 예측하고 있다.

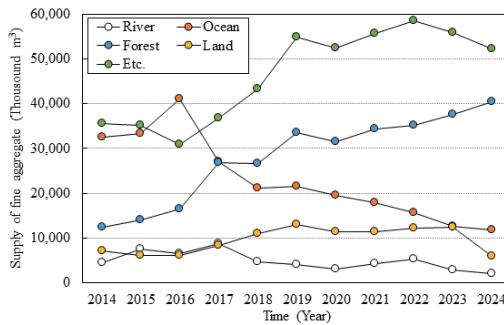


그림 1. 국내 잔골재 공급 현황



그림 2. 골재 생산에 따른 산림 파괴

※ 출처: [https://m.dnews.co.kr/m\\_home/view.jsp?dxno=201005141624025680749](https://m.dnews.co.kr/m_home/view.jsp?dxno=201005141624025680749)

자연에서 채취하는 잔골재로 인한 환경 문제를 대처하기 위하여 순환 잔골재 외에 다른 대체재를 찾기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그 중, 폐유리는 주성분이 실리카( $\text{SiO}_2$ )로 구성되어 있으며, 수분 흡수 특성을 제외하고는 천연 잔골재와 물리적 특성이 유사한 것으로 보고되고 있어 천연 잔골재의 대체재로써 주목되고 있다. 또한 폐유리를 잔골재로써 재활용할 경우, 재활용되지 못하고 매립 또는 소각 처분되는 폐유리에서 발생하는 탄소 배출 문제를 해결함으로써 탄소중립·자원순환경제 구축의 촉진을 기대할 수 있다. 이에 폐유리 잔골재와 천연 잔골재의 품질 비교를 통해 폐유리 잔골재의 대체 가능성을 검토하고, 천연 잔골재를 폐유리 잔골재로 대체하였을 때 얻을 수 있는 환경적 효과(탄소배출량 변화)에 대하여 분석하였다.

## 2. 폐유리 잔골재의 생산 공정 사례

국내에서는 생활폐기물로 처리되는 폐유리를 지자체 및 민간 수거업체가 수거하여 중간처리업체로 이관한다. 따라서, 잔골재 생산을 위한 폐유리는 중간처리업체(ISA)로 이관된 것을 사용하였다. 본 생산 공정 사례는 중간처리업체의 재활용 폐유

리 생산을 위한 일반 공정에서 잔골재로 생산하기 위한 별도 요구조건을 추가하였으며, <그림 3>에 나타난 바와 같다.

## 3. 폐유리 잔골재의 품질 및 특징

<그림 3>의 공정을 통해 생산된 폐유리 잔골재에 대하여 천연 잔골재와 물리적 특성을 비교하였다. 천연 잔골재는 강사를 사용하였다. 화학적 조성, 절대 건조 밀도, 흡수율, 안정성, 조립률 및 입자 모양 판정 실적률을 비교하였으며, 그 결과는 [표 1]에 나타난 바와 같다. 폐유리 잔골재는 천연 잔골재와 유사한 절대 건조 밀도를 나타내었으나, 불투과성 표면 특성으로 인해 매우 낮은 흡수율 및 안정성을 나타내었다. 입자 모양 판정 실적률이 100%에 가까울수록 골재의 모양이 원형인 것으로 알려져 있으나, 폐유리 잔골재의 날카로운 형상이 골재 사이의 공간을 메워 단위용적질량이 높아졌기 때문에 천연 잔골재보다 더 높은 결과값을 나타낸 것으로 예상된다. 폐유리 잔골재는 천연 잔골재와 유사하게  $\text{SiO}_2$  함량이 가장 높은 것으로 확인되었으며, 낮은  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및 높은  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  함량을 나타내었다.

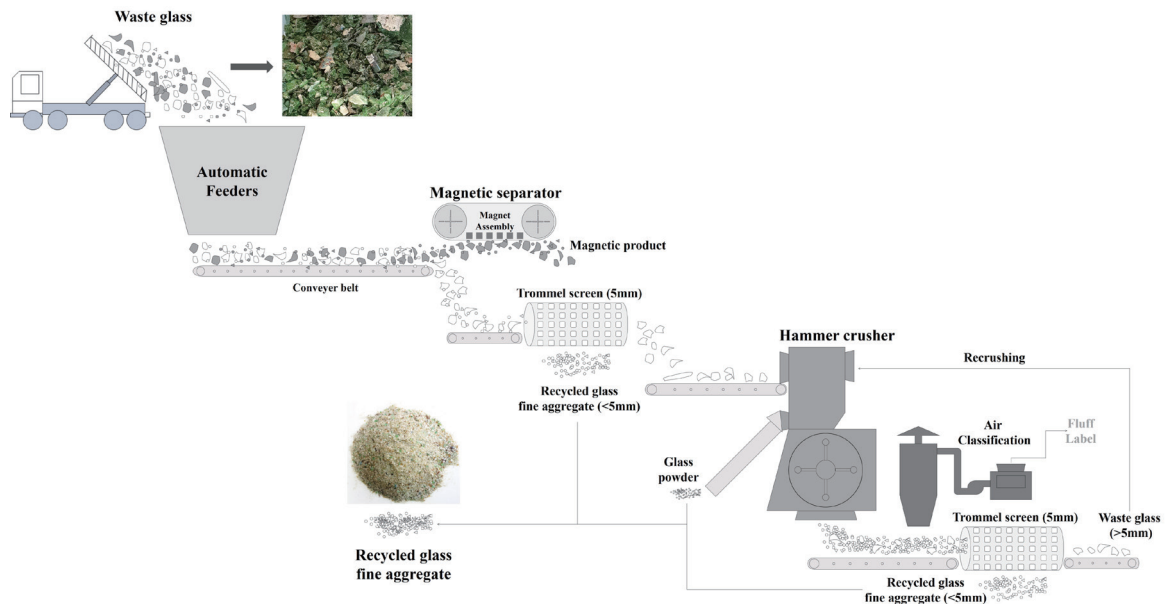


그림 3. 폐유리 잔골재 생산 공정

[표 1] 천연 및 폐유리 잔골재의 특성

구분		천연 잔골재	폐유리 잔골재
절대 건조 밀도(g/cm <sup>3</sup> )		2.54	2.45
흡수율(%)		1.6	0.4
안정성(%)		1.5	0.3
조립률		2.53	2.95
입자 모양 판정 실적률(%)		57.5	73.9
화학적 조성(%)	SiO <sub>2</sub>	81.21	65.91
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.12	3.93
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.15	0.43
	CaO	2.41	12.95
	MgO	0.83	1.42
	Na <sub>2</sub> O	1.91	10.23
	K <sub>2</sub> O	1.62	0.98

폐유리 잔골재의 품질을 분석한 결과, 콘크리트용 잔골재로써 요구되는 기준을 충족하는 것으로 확인되었기 때문에 콘크리트용 잔골재로써 사용이 가능할 것으로 기대된다. 하지만, 불투과성 표면 및 날카로운 형상 특성으로 인해 콘크리트의 특성에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 있으며, 특히 폐유리의 비정질 SiO<sub>2</sub>로 인해 내구성에 치명적인 가능성이 있다.

기존 연구결과에 의하면 폐유리 잔골재의 불투과성 표면은 콘크리트와의 계면 결합력을 감소시킬 수 있으며, 날카로운

형상은 균열 발생을 유발할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 골재의 잠재 알칼리 반응 시험(ASTM C 1260) 결과, 폐유리 잔골재의 비정질 SiO<sub>2</sub>가 알칼리 이온에 용해되어 알칼리 실리카 반응 겔(ASR gel)을 형성 및 팽창함으로써 콘크리트에 균열을 유발할 가능성이 확인되었다. 이러한 연구결과에 따라 천연 잔골재의 30% 범위 이내에서 폐유리 잔골재로 대체하여 사용하는 것이 권장되고 있다.

#### 4. 유리 잔골재의 탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 분석

폐유리 잔골재의 생산에 대한 환경적 영향을 분석하기 위하여 온실가스 배출량을 비교하고자 하였다. 탄소중립 효과를 검토하기 위해 온실가스를 CO<sub>2</sub> 등가치로 환산하는 방식을 채택하였다. 우선 폐유리를 폐유리 잔골재로 생산하는 과정에서 발생하는 탄소 배출량을 산출하였다. 폐유리 잔골재를 생산하는 과정은 <그림 3>의 생산 공정을 기반으로 설정하였다. 생산 공정에서 각 장비별 소비 전력량 및 생산효율을 근거로 가동시간을 설정하였으며, 가동시간에 따른 전력 사용량을 기반으로 탄소 배출량을 도출하였다<sup>1)</sup>. 폐유리에는 병뚜껑 및 라벨 등의 이물질이 존재하기 때문에 5%의 질량 손실이 발생하는 것으로 설정하였으며, 그 결과, [표 2]에 나타낸 바와 같이, 폐유리 잔골재를 생산하는데 2.30 kg-CO<sub>2</sub>/ton이 발생하는 것으로 도출되었다.

[표 2] 폐유리 잔골재 생산 공정에 따른 탄소 배출량

생산 공정 시스템		작동 횟수	총 전력 사용량	탄소(CO <sub>2</sub> ) 배출량
Feeders	Automatic feeder	1회	250 kw	106.0 kg-CO <sub>2</sub>
Screen	Trommel screen	3회	252 kw	106.8 kg-CO <sub>2</sub>
Crusher	Hammer crusher	1회	3700 kw	1568.8 kg-CO <sub>2</sub>
Incidental process	Magnetic separator	1회	120 kw	50.9 kg-CO <sub>2</sub>
	Air classifier	1회	840 kw	356.2 kg-CO <sub>2</sub>
투입된 폐유리		1000 ton	총 탄소(CO <sub>2</sub> ) 배출량	2153.1 kg-CO <sub>2</sub>
생산된 폐유리 잔골재		950 ton	ton당 탄소(CO <sub>2</sub> ) 배출량	2.30 kg-CO <sub>2</sub> /ton

천연 잔골재를 생산하는 과정에서 발생하는 탄소 배출량을 산출하기 위하여 다양한 연구 사례에서 DB를 얻었다. [표 3]에 나타낸 바와 같이, 천연 잔골재를 생산하는 방식에 따라 탄소 배출량이 다른 것으로 확인되었다. 천연 잔골재 생산에 따른 탄소 배출량 편차를 줄이기 위하여 최대 및 최소값을 제외하고 평균을 산출하였으며, 그 결과 3.78 kg-CO<sub>2</sub>/ton이 발생하는 것으로 도출되었다. 폐유리 잔골재가 천연 잔골재보다 더 낮은 탄소 배출량을 나타내었으나, 폐유리 잔골재의 생산 과정에서는 재료 수급 과정에서 발생하는 탄소 배출량을 고려하지 못했기 때문에 추후 분석이 더 필요할 것으로 예상된다.

### 5. 폐유리 잔골재의 재활용에 따른 탄소 배출량 분석

폐유리 잔골재의 생산 과정에서 발생하는 탄소 배출량은 천연 잔골재보다 낮은 것으로 확인되었으나, 이는 추가 분석이 필요할 것으로 예상된다. 그러나, 폐유리를 잔골재로써 활용할 경우, 천연 잔골재 대체에 따른 산림 보존 및 매립지 미사용에 따른 토지 보존을 통한 부가적인 탄소 배출량 감소를 기대할 수 있다. 정확한 통계는 확인할 수 없으나, 매년 재활

용되지 못하는 폐유리는 약 200,000 톤일 것으로 추정되며, 200,000톤의 폐유리를 매립하기 위해서는 약 156,000 m<sup>3</sup>의 매립지가 필요하다<sup>8)</sup>. 10m의 높이로 매립한다고 가정할 경우, 15,600m<sup>2</sup>의 면적이 필요하다.

한편, 국토교통부에 따르면 2021년 자연에서 채취하고 있는 천연 잔골재의 공급량은 67,741,000 m<sup>3</sup>인 것으로 확인되었다. 이로 인한 산림 파괴 면적은 22,294 m<sup>2</sup>으로 추정할 수 있다<sup>9)</sup>. 또한 200,000톤의 폐유리를 잔골재로써 재활용할 경우, 80,000 m<sup>3</sup>의 천연 잔골재를 대체할 수 있으며, 산림 파괴 면적으로 계산 시 26 m<sup>2</sup>으로 산출할 수 있다. 이를 기반으로 200,000톤의 폐유리를 잔골재로써 재활용했을 때의 탄소 배출량 감소 효과를 분석하였으며, [표 3]에 나타낸 바와 같다. 산림 파괴 또는 보존에 따른 탄소 배출량을 분석하기 위하여 산림의 단위 면적당 탄소 흡수량(국립산림과학원)이 6.08 ton-CO<sub>2</sub>/year인 것으로 가정하였다. 그 결과, 폐유리를 매립하지 않고 잔골재로써 재활용할 경우, 9,501 kg-CO<sub>2</sub>/year의 탄소 배출량 감소 효과를 얻을 수 있으며, 이는 2021년 기준 자연에서 채취하는 천연 잔골재로 인하여 파괴되는 면적을 산림으로 가정하였을 때 발생하는 탄소 배출량의 70.1%인 것으로 확인되었다.

[표 3] 천연 잔골재 생산 공정에 따른 탄소 배출량

연구 사례	년도	탄소(CO <sub>2</sub> ) 배출량	고려 여부
Sjunnesson, J. <sup>2)</sup>	2005	5.36 kg-CO <sub>2</sub> /ton	○
Roh, S. J. et. al. <sup>3)</sup>	2010	5.06 kg-CO <sub>2</sub> /ton	○
Turner, L. K. et. al. <sup>4)</sup>	2013	13.90 kg-CO <sub>2</sub> /ton	×
Kim, T. H. <sup>1)</sup>	2014	3.60 kg-CO <sub>2</sub> /ton	○
Hanyang University <sup>5)</sup>	2015	0.90 kg-CO <sub>2</sub> /ton	×
Korea Environmental Industry & Technology Institute <sup>6)</sup>	2015	1.96 kg-CO <sub>2</sub> /ton	○
Ministry of Environment <sup>7)</sup>	2019	2.91 kg-CO <sub>2</sub> /ton	○
ton당 평균 탄소(CO <sub>2</sub> ) 배출량		3.78 kg-CO <sub>2</sub> /ton	

[표 4] 폐유리의 재활용에 따른 탄소 배출량 감소 효과

구분	요구량 (m <sup>3</sup> )	면적 (m <sup>2</sup> )		탄소(CO <sub>2</sub> ) 배출량 (kg-CO <sub>2</sub> /year)
		산림 파괴	산림 보존	
천연 잔골재 생산	67,741,000	22,294	-	+ 13,555
천연 잔골재의 폐유리 잔골재 대체	80,000	-	26	- 16
폐유리 비 매립	156,000	-	15,600	- 9,485
탄소 배출량 감소 효과 (kg-CO <sub>2</sub> /year)		9,501		

## 6. 맺음말

'17년 중국의 폐기물 수입 금지, '20년 2050 탄소중립 실현을 위한 자원순환경제 구축 정책 추진 및 '25년 건설폐기물의 매립지 반입 금지 예정 등 폐기물 처리 및 재활용 문제는 더 이상 미룰 수 없는 시급한 해결이 필요한 실정이다. 특히 국내와 같이 국토 면적 중 산림이 60 % 이상을 차지하여 매립지가 부족한 환경에서는 다양한 폐기물 재활용 기술의 개발 및 적용이 활성화될 필요가 있다. 이를 위해서는 폐유리 잔골재를 건설자재로써 재활용하기 위한 다양한 후속 연구들이 수행되어야 할 시점이다.

### 참고문헌

1. Kim, T. H. (2014). A Study on Carbon Emission Impact Analysis of Concrete Mixing Recycled Aggregate. Journal of Korea Society of Waste Management, 31(1), 96-104.
2. Sjunnesson, J. (2005). Life cycle assessment of concrete.
3. Roh, S. J., Tae, S. H., Shin, S. W., Baek, C. H., Kim, N. H., Lee, J. S., & Kim, D. W. (2010). Study on the CO<sub>2</sub> Assessment Method in Material Production Stage according to Waterproof Construction Method. Proceedings of the Architectural Institute of Korea-Structural Engineering, 30(1), 171-172.
4. Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. Construction and building materials, 43, 125-130.
5. Hanyang University. (2015). Development of concrete mixing design technology to reduce CO<sub>2</sub> emissions - Final report.
6. Korea Environmental Industry & Technology Institute (2019). Carbon Labeling Emission Factor.
7. Ministry of Environment. (2019). Acquisition of environmental labeling and low-carbon product certification for ready-mixed concrete products.
8. Ministry of Environment. (2019). Development Status of Domestic and International Recycling Demand for Waste Glass Bottles.

담당 편집위원 : 김태형(한국건설기술연구원)

### ●● 학회지 원고모집 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학회, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 회원 여러분의 많은 원고 투고 부탁드립니다.

#### 1. 원고 종류

논단, 특집기사, 기술기사, 공사기사, 해외 기술정보 및 번역기사(뉴스), 현장탐방(국내외 연구소 및 국제학술대회 참가), 우리 회사소개, 신기술 또는 신제품 소개 등

#### 2. 원고 분량

글씨크기 11 pt, 줄 간격 160 %

- 1) 특집기사, 기술 및 공사기사 : A4용지 10매 이내
- 2) 해외 정보소개, 현장탐방 및 우리회사 소개기사 : A4용지 8매 내외

#### 3. 원고 작성

- 1) 원고의 모든 내용(사진, 그림 등 기타 부속물 포함)은 한글 작성이 원칙임. 단, 의미 전달이 모호할 우려가 있는 경우에는 그 원어를 괄호 안에 표기함.
- 2) 제목의 작성 : 제목은 가급적 10자 이내로 정하며 영문 제목도 동시에 표기함.
- 3) 저자의 소개 : 성명, 소속, 직위, 전공분야/관심분야, 연락처, e-mail 주소, 저자 사진(컬러)
- 4) 제출 마감일 : 발행일 30일 전까지(발행일 : 3, 6, 9, 12월)

#### 4. 제출할 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 국장(E-mail : rcr@rcr.or.kr)