

콘크리트용 재료로서 각종 산업 폐기물의 재활용

- Recycling of Industrial Wastes as a Material for Concrete -



김기형*

1. 머리말

최근 콘크리트 구조물의 대형화 및 사회간접자본에 의한 공공 시설의 확대에 따라 콘크리트용 잔골재 및 굵은골재에 대한 수요가 급증하고 있다. 그러나 자연 환경 보존을 위해 강화된 환경 정책 및 강모래, 강자갈과 같은 콘크리트용 천연 골재의 고갈 등으로 인하여 양질의 천연 재료의 공급이 원활하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 자연 환경을 보호하며 자원의 보존 및 콘크리트의 품질 개선 등을 목적으로 한 콘크리트 제조용 대체 재료의 개발 및 적용에 대한 연구 실적이 선진국에서는 이미 이루어지고 있다.^{1)~3)}

근년에 와서 우리나라에서도 건설 폐기물 및 산업 부산물 중 재활용이 가능한 무기질 재료를 콘크리트용 혼화 재료 및 잔골재와 굵은골재 그리고 시멘트용 원료 등으로 사용함으로써 콘크리트의 역학적 성질의 증진 및 내구성 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.^{4)~6)}

이들 무기질 폐기물 및 부산물을 시멘트 및 콘크리트용 골재와 같은 건설 재료

로 재활용함으로써 자연 보전 및 환경 보호뿐만 아니라 처리 비용을 줄일 수 있으며 아울러 콘크리트의 물성을 개선하는 등 일석삼조의 효과를 기대할 수 있다.⁷⁾

여기에서는 각종 폐기물 중에서 이미 콘크리트용 재료로 실용화가 진행되거나 현재 실용화를 위한 연구가 많이 진전되고 있는 제강 슬래그 골재, 고로 슬래그 미분말, 실리카 폼, 플라이 애쉬 및 레디 믹스 콘크리트 공장의 슬러지 등을 제외한 기타 산업 폐기물 중에서 콘크리트용 골재 또는 혼화재로 재활용 가능성이 있는 재료에 대한 연구 보고의 개요를 소개하고자 한다.

아래에서 소개하는 폐자원을 콘크리트용 재료로 재활용하기 위해서는 기술적, 경제적, 소비 에너지 측면에서 앞으로도 계속적인 연구 개발이 필요한 것이 대부분이지만 향후 실용화에 큰 기대가 모아진다.

2. 폐기물의 종류와 용도

콘크리트용 재료로 활용이 가능한 폐기물의 종류와 그 재생 처리 방법 및 재활용의 용도를 정리한 것이 <표 1>이다. 이들 폐기물이 콘크리트 제조용 골재 및 혼화재

등으로 유효 이용될 수 있다면 그 자체만으로도 자연 파괴의 억제 및 지구 환경 보존에 공헌할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 각종 폐기물의 재활용 가능성

이 절에서는 <표 1>에 나타난 각종 산업 폐기물의 연구 개발 동향에 대해서 간단하게 서술하고자 한다.

3.1 기와, 벽돌, 도자기

폐도자기 파편을 콘크리트용 재료로 재활용하기 위한 연구 보고⁸⁾에서는 도자기 원료의 성질은 명확하지 않지만 잔골재로 파쇄한 경우에 비중이 2.22, 실적률 55.1%, 조립률 3.14, 안정성 1.1% 정도를 나타낸다고 하며, 폐도자기 잔골재를 사용한 모르타르의 압축 강도를 강모래를 사용한 것과 비교해 보면 재령 28일에서 압축 강도가 약 20% 작게 나타나며 재령 90일에서는 약간 낮은 정도이지만, 재령 180일에서는 강모래를 사용한 것보다 약 10% 크게 나타난다고 한다. 한편 콘크리트에서는 W/C가 55%의 경우, 재령 7일에서 30%, 재령 28일, 90일, 190일에

* 정희원, 여주대학 토목과 부교수

표 1. 콘크리트용 골재, 혼화제로서 각종 산업 폐기물의 재활용 가능성

구분	폐기물	재생 처리 방법	개발 용도		
각종 폐기물	무기질 폐기물	기와, 벽돌, 도자기	파쇄	굵은골재, 잔골재	
		폐유리	소결	굵은골재	
		폐주물 더스트	선별	잔골재, 혼화재	
		규사 부서리기	소결	굵은골재, 잔골재	
		산골재 오니	소결	굵은골재, 잔골재	
		쇄석 석분	선별	혼화재	
		건설 오니	소결	굵은골재, 잔골재	
	유기질 폐기물	하수 오니	소각회		굵은골재, 잔골재, 혼화재
			소각회의 소결		굵은골재, 잔골재
			소각회 용융고화	파쇄	굵은골재, 잔골재
		도시 쓰레기	용융고화	파쇄	굵은골재, 잔골재
				수쇄	잔골재
		폐식물	소각회	파쇄	혼화재
		제지펄프 슬러지	소각회	파쇄	혼화재
FRP 부서리기	분쇄		혼화재		

표 2. 기와 파편 굵은골재의 성질 예

비중		흡수율 (%)	로스엔셀레스 마모감량(%)	통과량(%)				조립률
표면 건조	절대 건조			체(mm)				
				25	20	10	5	
2.28	2.09	8.85	23.4	100	77	31	0	6.92

서 강모래를 사용한 콘크리트보다 압축 강도가 약 20% 정도 크게 나타나고 있다고 한다.

폐도자기 파편을 혼화재용으로 미분쇄하여 시멘트를 일부 치환하여 제조한 모르타르에서는 치환율 5%의 경우 재령 90일까지는 시멘트만을 사용한 모르타르에 비해서 압축 강도가 약간 낮게 나타나지만, 재령 180일에서는 약간 크게 나타나고 있다.

폐벽돌의 활용에 대한 연구 보고 예⁹⁾에 따르면, 폐벽돌을 분쇄하여 제조한 잔골재의 경우, 표면 건조 비중 2.30, 흡수율 16.5%, 조립률 2.1 정도를 나타내며 이 잔골재를 사용하여 제조한 모르타르를 오토클레이브 양생을 한 경우에는 강모래를 사용한 모르타르보다 압축 강도가 다소간에 크게 나타나는 결과를 나타내고 있다. 그러나 표준 수중 양생을 한 경우에는 폐

벽돌 잔골재를 사용한 모르타르의 압축 강도 및 휨 강도가 일반 강모래를 사용한 것에 비해서 큰 폭으로 감소되는 경향을 나타내었다. 이것은 폐벽돌 잔골재가 일반 강모래보다 비중이 작고, 흡수율이 크며, 시멘트 페이스트와 골재와의 부착 강도가 작기 때문으로 판단되고 있다. 이 결과로부터 폐벽돌 잔골재는 오토클레이브 양생에 의한 콘크리트 2차 제품 제조용으로 적용 가능성이 있음을 시사하고 있다.

기와 파편을 콘크리트용 굵은골재로 재생하여 사용한 연구 보고에 따르면, 기와 파편 굵은골재의 성질은 <표 2>에 나타난 것과 같으며 보통의 굵은골재에 비해서 절대 건조 비중이 약 20% 정도 작으며, 흡수율은 약 3배 정도 크게 나타나고 있다. 한편 기와의 경우는 벽돌과는 다르게 소결 온도가 벽돌보다 높으며 또한 비교적 소결이 잘 되어 경화되어 있기 때문에 로스엔

셀레스 마모 감량은 보통 골재보다 약간 큰 값을 나타낸다.

기와 파편 굵은골재를 사용한 콘크리트의 시멘트-물비와 압축 강도 예를 나타낸 것이 <그림 1>이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 <표 2>의 기와파편 굵은골재를 사용한 콘크리트는 보통 골재를 사용한 콘크리트와 동일한 배합(동일한 슬럼프, 동일한 물-시멘트비, 동일한 단위수량)에서는 거의 비슷한 압축 강도가 얻어지고 있음을 알 수 있다. 한편 기와 파편의 표면에는 유약 처리가 되어 있어서 표면이 유리화되어 있지만 K₂O 등의 알칼리 성분이 포함되어 있어서 이에 따른 알칼리 골재 반응 작용의 유무에 대해서는 검토가 되어야 하지만 아직 확인되지는 않고 있다.

이상에서 알 수 있듯이 기와 파편, 폐도자기, 폐벽돌 중에서 기와와 폐도자기는 콘크리트용 골재로서 사용 가능성이 높다고 사료되며, 폐벽돌 골재는 오토클레이브 양생을 하는 경우에는 효과적이지만 표준 수중 양생의 경우는 압축 강도가 강모래를 사용한 경우보다 작게 나타나기 때문에 중요도가 다소 작은 구조물에 사용되는 콘크리트용 골재로서 재활용 가치가 있다고 할 수 있겠다.

3.2 폐유리

폐유리를 콘크리트용 재료로 재활용하기 위한 연구는 여러 가지 방법으로 진행되고 있다. 대표적인 것으로서 폐유리를 파쇄하여 입형, 입도를 조정하여 골재로서 사용하는 방법, 용융 수재(水滓)화해서 잔골재로 사용하는 방법, 첨가제와 발포제를 사용하여 용융 발포시켜 미세 입경을 갖는 잔골재로 사용하는 방법 및 미분쇄하여 시멘트 혼화제로 사용하는 방법 등이 시도되고 있다.

(1) 잔골재로 사용하는 경우

폐유리를 잔골재로서 사용할 경우, 폐유리 잔골재의 비중은 보통의 골재와 크게 다르지 않지만 흡수율이 0.4%로 매우 작은 것이 특징이다. 강모래와 폐유리 잔골

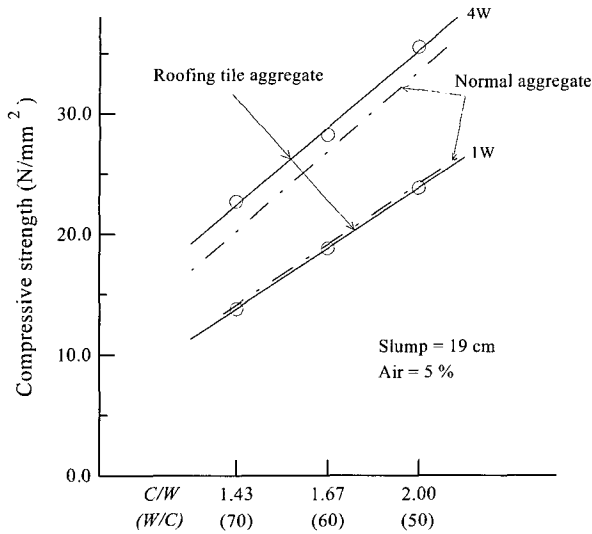


그림 1. 기와 파편 굵은골재를 사용한 콘크리트의 시멘트-물비와 압축 강도

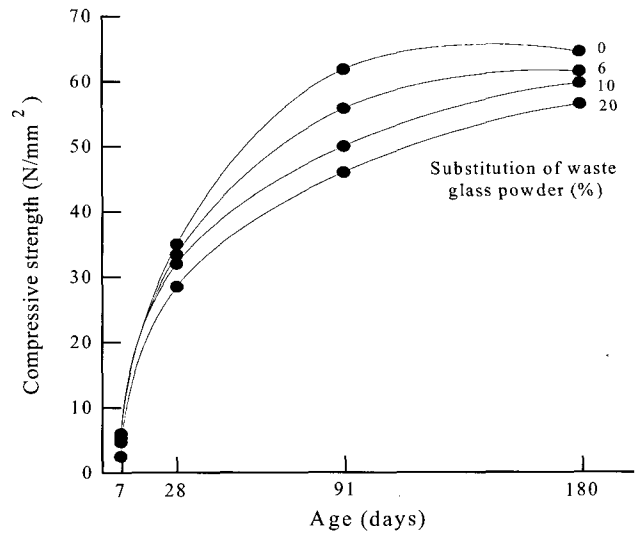


그림 2. 폐유리 분말을 사용한 모르타르의 압축 강도

재를 1 : 1로 사용한 모르타르 시험 결과⁹⁾에 따르면 동일한 물-시멘트비로 제조한 모르타르를 오토클레이브 또는 표준 수중 양생을 한 경우 강모래를 사용한 모르타르에 비해서 압축 강도가 15 ~ 20%, 휨 강도는 10 ~ 15% 정도 작은 값을 나타내고 있다. 이것은 폐유리 골재의 자체 강도가 작거나, 폐유리 골재와 시멘트 페이스트와의 부착 강도의 강약 여부가 모르타르의 압축 강도를 크게 지배하기 때문으로 판단된다.

폐유리 용융수재를 잔골재로 사용하여 제조한 콘크리트에 대한 연구¹⁰⁾도 있으며 용융수재 잔골재의 비중은 천연 골재보다 약간 작으며 흡수율은 매우 작게 나타났지만 압축 강도는 해사를 사용한 경우와 비슷하거나 약간 작은 정도를 나타낸다고 한다.

(2) 발포 초경량 잔골재로 사용한 경우 발포 잔골재에 대한 연구¹¹⁾에 따르면 발포 잔골재 입자는 조립·소성에 따라서 입자 모양이 둥근 모양을 하고 있다. 입경은 0.3 ~ 5.0 mm 정도이며 모르타르로 제조한 경우 28일 압축 강도 및 휨 강도가 비교적 크게 나타났다.

(3) 분말을 혼화제로 사용한 경우 폐유리를 분쇄하여 혼화제로 사용한 경

우의 실험결과 예를 <그림 2>에 나타내었다. 폐유리를 시멘트에 일부 치환하여 사용한 경우 모르타르의 압축 강도는 전반적으로 저하되지만 이러한 경향은 <그림 2>에서 알 수 있듯이 재령이 장기화될수록 차이가 없게 되며 재령 180일에서는 폐유리 분말의 혼입이 강도에 미치는 영향이 작아지며 재령 1년 정도에서는 폐유리 분말을 사용한 모르타르의 강도가 폐유리 분말을 사용하지 않은 모르타르와 거의 동일한 강도를 나타내는 것으로 추정되고 있다.

폐유리 분말을 혼화제로서 시멘트에 치환한 경우 모르타르의 플로우 값은 치환하지 않은 것에 비하여 크게 나타나며, 특히 외할(外割)로 치환한 경우에는 장기 강도가 크게 기대되고 있다.

3.3 폐주물 더스트

폐주물 더스트는 인공 경량 골재의 제조용으로도 가능하지만 현 단계에서는 콘크리트 제조용 잔골재의 일부로 치환하여 사용하는 연구^{12), 13)}와 폐주물 더스트를 시멘트에 혼화제로 치환하여 사용하는 연구¹⁴⁾가 진행되고 있다.

폐주물 더스트는 발생 장소에 따라서 성질의 차이는 있지만 일반적으로 입자의 입경이 0.3 mm체를 거의 통과하며 75 μm

체를 50 ~ 80% 통과한다. 블레인 값은 2,000 ~ 5,000 cm²/g 정도이며 입경으로 판단해 볼 때 잔골재 또는 혼화제로서 활용이 가능한 재료이다.

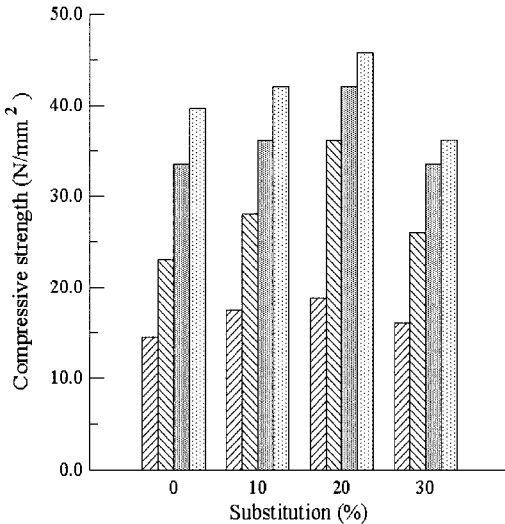
발생 장소에 따라서 폐주물 더스트의 품질은 차이가 크게 나타나며, 잔골재로 사용한 경우, 동일한 치환율에서 <표 3>에 나타난 것과 같이 치환하지 않은 경우와 비교하여 압축 강도가 크게 저하하는 경우¹³⁾와 반대로 <그림 3>과 같이 압축 강도가 증가하는 경우⁵⁾도 있다.

한편, 폐주물 더스트의 성분은 SiO₂와 Al₂O₃가 대부분을 차지하며 주물에서부터 혼입되는 Fe₂O₃와 점결제의 연소에 따른 C가 많이 포함되어 있으나 이 성분은 주물의 제조 공정에 따라서 크게 변화한다. 이 때문에 폐주물 더스트를 콘크리트에 사용한 경우 시멘트의 응결시간과 공기연행성에 크게 영향을 미치기도 한다.

또한 폐주물 더스트를 혼화제로 시멘트와 치환한 경우¹⁶⁾ 28일 압축 강도는 치환율이 클수록 강도 저하율이 크게 되는 경향을 나타내지만 폐주물 더스트의 종류에 따라서는 반대 경향도 나타나기도 한다. 즉 재령 91일에서 폐주물 더스트 치환율이 10 ~ 20%의 콘크리트가 치환하지 않은 것에 비해서 상대강도비가 1.0 ~ 1.1 정도로 되는 결과도 나타나고 있다.

표 3. 폐주물 더스트를 사용한 콘크리트의 압축 강도(N/mm²)

재령	시료	plain	폐주물 더스트 치환율		
			20%	30%	40%
1		20.5	20.1	21.2	18.5
7		35.9	31.3	33.0	26.5
14		38.7	36.1	33.3	29.4
28		44.1	38.0	36.6	31.4



* 막대기둥의 좌측으로부터 재령 3, 7, 28, 91일 강도값임.

그림 3. 폐주물 더스트를 사용한 콘크리트의 압축 강도

이 외에 폐주물 더스트에 점토 등을 첨가하여 소성시켜 발포 경량 골재¹³⁾를 제조하는 연구도 시도되고 있다.

3.4 쇄석 석분

쇄석의 생산 과정에서 발생하는 석분은 도로용 쇄석의 경우에는 아스팔트 혼합물용의 쇄사로 사용하기도 하고 로반재의 보충재로서 소비되기도 한다. 콘크리트 골재용으로 쇄석을 생산할 경우에는 발생하는 석분의 양이 과다해지며 특히 쇄석과 쇄사의 입형을 좋게 하면 좋게 할수록 석분량이 증가하여 그 처리방안을 고심하고 있는 것이 쇄석 공장의 현실이다. 그러나 쇄석의 원석이 석회암인 경우에는 석분의 부가 가치는 매우 높으며 화학 성분 중에 SiO₂가 많이 포함된 산성암 계열이 유효 이용

가능성이 높은 석분이다. 일반적으로 석분의 이용 방법에는 2가지의 방법이 있다. 즉, 쇄사 중에 석분을 많이 포함한 채 사용하는 것과 석분을 혼화재로서 콘크리트에 첨가하는 방법이 있다. 석분의 성상, 입도 분포는 쇄석의 압질과 제조 공정에 따라서 어느 정도 차이가 있지만 콘크리트에 혼입한 경우는 석분이 미분말 효과를 발휘하여 콘크리트의 워커빌리티와 강도 등이 향상되고 있다.¹⁵⁾

석분을 콘크리트에 활용하기 위한 연구^{16)~18)}에 따르면 대체로 다음과 같은 효과가 얻어지고 있다.

- ① 블리딩 : 석분 혼입량의 증가와 더불어 작게 된다.
- ② 응결 시간 : 석분 혼입량의 증가와 더불어 종결이 빠르게 되는 경향이 있다.
- ③ 워커빌리티 : 석분이 혼입되면 굳지 않은 콘크리트의 점도가 증가하기 때문에 재료 분리가 적어지며 굵은 골재로 쇄석을 사용한 경우에는 워커빌리티의 개선에 효과적이다.
- ④ 압축 강도 : 동일 물-시멘트비에서는 강도가 높게 된다. 특히, 빈배합 콘크리트에서 혼입률이 높으면 유효하다.
- ⑤ 건조 수축 : 석분 혼입량의 증가와 더불어 단위수량이 증가하여 건조 수축이 약간 크게 되는 경향이 있다.

이상과 같이 석분은 콘크리트용 재료로 재활용하기에 매우 적합하다고 사료된다. 발생량도 비교적 많으며 최근 콘크리트 골

재로서 쇄석, 쇄사의 의존도가 점점 증가하고 있는 경향을 고려해 보면 자원의 유효 이용, 환경 보호 차원에서도 사용 기준의 설정이 시급히 요망된다.

3.5 기타 무기질 폐기물

위에서 서술한 무기질 폐기물 외에도 산골재 세척 플랜트의 오니, 유리원료용 규사 부수리기, 건설 오니¹⁹⁾, 알루미늄 세련시 발생하는 적니(赤泥)²⁰⁾ 등 자원으로서 재활용이 가능한 폐기물은 많이 존재한다.

산골재 플랜트의 오니와 유리 원료인 규사 부수리기를 주원료로 하여 제작한 인공 경량 골재의 경우, 모스 경도가 보통의 경질사암 골재와 비슷하며 마모감량, 안정성도 매우 작고, 흡수율도 1.7% 정도로서 천연 골재와 비슷하다. 흡수율이 작은 이유는 골재 내부의 공극의 대부분이 독립되어 있어서 물을 흡수하지 않기 때문에 경질의 가벼운 골재가 얻어진다. 또한 모스 경도가 7로서 경질의 골재이기 때문에 마모를 받는 포장용 콘크리트에 사용하면 적합하다고 판단된다.

한편 산골재 플랜트의 오니와 적니를 사용하여 제조된 인공 경량 골재의 성질을 나타낸 것이 <표 4>이다.

3.6 하수 오니

하수 오니를 소각한 소각회에는 고분자계 오니, 석회계 오니 및 이들을 혼합한 혼합 오니를 소각한 것이 있지만 화학 조성은 큰 차이가 있다고 한다.²¹⁾

(1) 소각회 자체를 굵은골재, 잔골재로 사용한 경우

오니의 소각에 있어서 단계식 스토카로를 사용한 경우에는 소각된 오니가 반응용 상태로 회수되는데, 굵은골재용으로 44~86%, 잔골재용으로 12~43% 회수된다는 보고²¹⁾가 있으며 콘크리트 2차 제품(콘크리트 블록)으로 실용화될 수 있는 가능성이 시사되고 있다. 또한 이 외에도 고

능성이 시사되고 있다. 또한 이 외에도 고분자계의 소각회를 가압성형 2차 제품으로 사용한 보고도 있다.

(2) 소각회 자체를 혼화재로 사용한 경우 가열 유동판을 사용해서 약 800 °C로 소각된 오니는 분체(粉體)로서 회수되지만 그 블레인 값이 고분자계에서 5,870 cm²/g, 석회계에서 8,210 cm²/g, 혼합계에서 5,750 cm²/g으로 제조된 예²²⁾가 있다. 이들 재료는 모두 시멘트보다 분말도가 높으며 <표 5>는 이들 소각회의 물성 및 화학 성분 분석 예를 나타낸 것이다.

이들 소각회를 사용할 경우에는 소각회의 흡수성 때문에 소각회 중량의 25%에 달하는 수량을 추가해야 할 필요가 있다. 이 때문에 소각회를 혼입하지 않은 콘크리트보다 물-시멘트비가 증가하게 되지만 압축 강도는 소각회를 혼입하지 않은 콘크리트와 거의 동일하게 나타난다고 한다.²²⁾ 소각회를 혼입한 콘크리트의 압축 강도를 나타낸 것이 <그림 4>이다. 이 그림에서 소각회의 잔골재 치환율이 30% 이하일 경우에는 무첨가의 경우와 압축 강도가 거의 차이가 없게 나타났다. 그러나 소각회를 사용하게 되면 건조 수축이 크고, 동결 융해에 따른 공시체 표면의 박리와 동탄성 계수의 저하가 현저하게 크게 될 염려가

표 4. 산골재 오니 및 적니를 사용한 인공 경량 골재의 성질 예

종류	비중	단위용적 중량(kg/m ³)	안정성(%)	흡수율(%)	로스엔젤레스 마모감량(%)
굵은골재 (경량)	표건 : 1.46 건조 : 1.33	834	4.8	4.4	24.8

표 5. 하수 오니 소각회의 화학 성분 예²²⁾

종류	비중	비표면적 (cm ² /g)	화학 성분(%)							
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
고분자계 (A)	2.77	5,870	42.1	12.1	20.0	14.1	2.31	5.43	0.92	0.93
석회계 (B)	2.98	8,210	33.1	4.53	24.4	24.8	2.21	8.27	0.63	0.53
혼합 (C)	2.86	5,750	36.8	9.68	21.4	19.7	2.40	6.85	0.84	0.72

있다고 보고되고 있다.²²⁾

(3) 소결 골재(인공 경량 골재)로 사용한 경우

하수 오니 소각회에 팽창성 혈암 등의 분말을 첨가하여 입도를 조정, 소결하면 인공 경량 골재가 만들어진다.²³⁾ 이 때 팽창성 혈암과 같은 역할을 하는 것에는 산골재 플랜트의 오니, 알루미늄 제련시 발생하는 적니 슬리프(현탁액) 등도 이용된다.

(4) 수쇄 잔골재로 사용하는 경우 용융 슬래그를 수쇄화하여 잔골재로 사

용한 연구 실험²⁴⁾도 행해지고 있고, 건조 비중이 2.3 ~ 2.8 정도가 되며, 시멘트 모르타르 및 콘크리트 제조용으로 사용된 바 있다.

(5) 공냉 슬래그를 파쇄하여 굵은골재, 잔골재로 사용한 경우

하수 오니의 용융 처리에 따라서 발생한 용융 슬래그를 공냉 후에 파쇄하여 굵은골재, 잔골재를 제조한 예²⁵⁾도 있다. 연구 보고²⁵⁾에 의하면 굵은골재, 잔골재로 사용한 경우, 절대 건조 비중은 2.6 및 2.7을 상회하며 흡수율은 0.4% 이하, 안

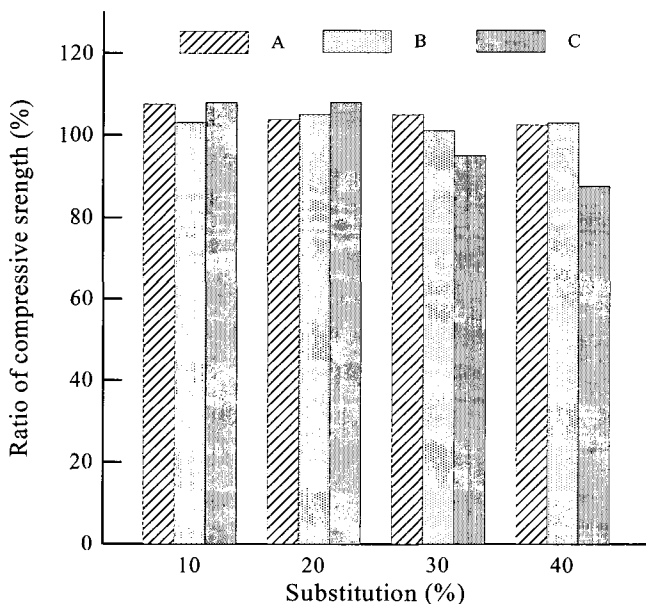


그림 4. 하수 오니 소각회를 사용한 콘크리트의 압축 강도

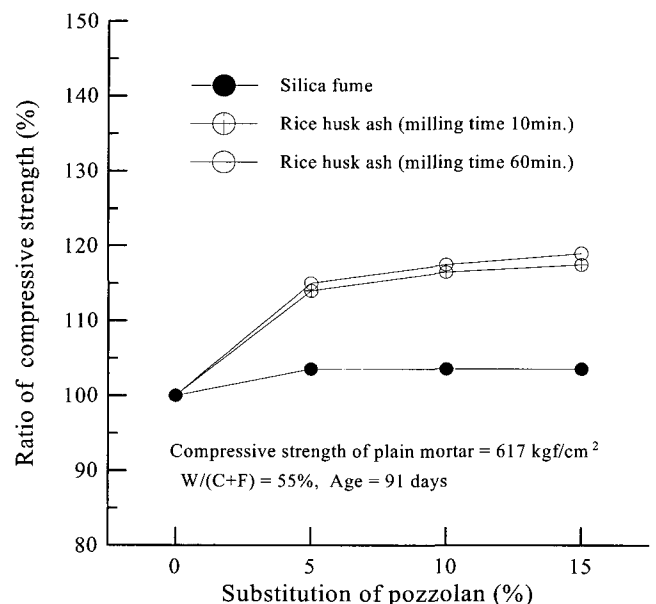


그림 5. 포졸란재 혼입률과 모르타르의 압축 강도비

표 6. 포졸란 재의 화학 성분(%)

종별	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	C
쌀겨 소각회	3.80	90.18	0.21	0.22	0.34	0.31	0.04	2.36	0.47	0.18	2.10
실리카 폼	3.43	88.94	0.98	1.94	0.80	0.94	0.74	1.81	-	-	-

표 7. 펄프 애쉬의 화학 조성 변동 예

화학물(%)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Total
평균치	33.9	30.4	16.7	8.5	1.7	91.2
변동계수(%)	14.2	5.8	16.9	11.5	34.9	-

(비고) n = 10, 3 ~ 12월 매월 1회 측정

정성은 1.2% 및 2.2%로 보통의 쇄석 등과 비교해서 손색은 없지만 굵은골재의 로스엔젤레스 마모감량은 보통 쇄석의 3배에 가까운 값을 나타내고 있다. 그 원인으로서는, 용융 슬래그의 공냉 과정에서 슬래그의 유리화가 촉진되어 슬래그 골재가 취성화되었기 때문으로 판단된다.

한편 콘크리트에 사용하면, 압축 강도 시험 결과²⁶⁾에서는 공냉 슬래그의 파쇄 굵은골재를 사용한 경우 보통 쇄석을 사용한 것의 76% 정도의 값이 얻어져 강도가 낮은 값을 나타내고 있다. 그러나 이 골재를 재차 열 처리하여 사용하면 압축 강도가 보통골재를 사용한 것보다 약간 상회하는 결과도 얻을 수 있다고 한다.

열 처리하지 않은 공냉 슬래그는 오니의 성분 및 용융 냉각의 방법과 조건에 따라서 품질이 안정화되기에는 한계가 있기 때문에 동결 융해 시험에 따른 내구성 지수의 저하가 보통 쇄석에 비해서 크게 되는 것도 지적되고 있다.²⁶⁾

3.7 쓰레기 소각회

쓰레기 소각회 중에서 비회(날아가는 재)는 시멘트에 혼합 사용하면 시멘트가 수화할 때 발포 팽창을 발생²⁷⁾시키기 때문에 혼화재로서 사용되기 어렵다고 한다. 쓰레기 소각회는 일반적으로 용융 슬래그로 수재화하여 잔골재로서 사용하는 것이 시도되고 있다.^{10), 28)}

용융 방식에 따라서 절대 건조 비중의 차이가 발생하지만 일반적으로 소각로에서 직접 용융 방식에 의한 것은 비중이 2.3 전후로 보통의 골재에 비해서 약간 작지만, 소각회를 별도로 용융 처리한 수재의 비중은 통상의 쇄석보다 크게 나타난다.²⁸⁾ 쓰레기 소각회 수재 잔골재를 사용한 모르타르 및 콘크리트의 압축 강도는 천연 골재를 사용한 경우의 80% 정도의 값을 나타낸다고 한다.^{10), 28)}

쓰레기 소각회를 사용한 콘크리트의 압축 강도의 한 예¹⁰⁾를 고찰해 보면, 쓰레기 용융 방법의 종류에 관계없이 용융 슬래그를 사용한 콘크리트의 압축 강도는 해사를 사용한 콘크리트의 압축 강도의 70~80% 전후 값을 나타내고 있다.

3.8 쌀겨(rice husk) 소각회

쌀겨는 규산 집적 폐식물로서 이것의 소각회는 화학 성분 중 SiO₂가 많이 포함되어 있어서 포졸란 재료로서 콘크리트 제조용으로 활용이 가능하다. 쌀겨 소각회의 화학 성분의 예²⁹⁾를 나타낸 것이 <표 6>이며 표준 수중 양생에 따른 모르타르 공시체의 압축 강도 시험 결과를 나타낸 것이 <그림 5>이다.

3.9 펄프 슬러지 소각회

제지공장에서 배출된 펄프 슬러지 소가

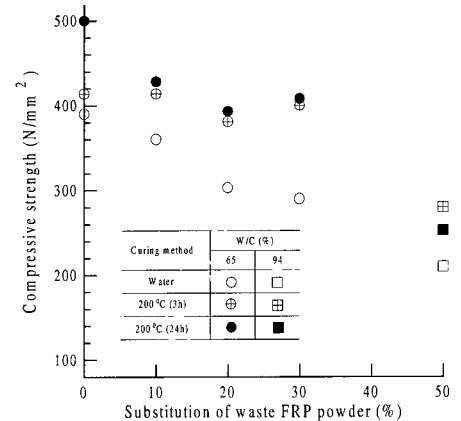


그림 6. FRP를 사용한 모르타르의 압축 강도³²⁾

회(펄프 애쉬)를 혼화재로서 이용하기 위한 방안이 여러 가지로 제안되고 있다.³⁰⁾ 펄프 애쉬의 성질은 발생 공장에 따라서 다르며, 또한 동일한 공장이라도 펄프의 생산 조건에 따라서 다르게 나타난다. 펄프 애쉬의 화학 성분의 예를 나타낸 것이 <표 7>이다.³⁰⁾ 펄프 애쉬는 다른 소각회에 비해서 Al₂O₃가 많은 것이 특징이며 블레인 값은 3,000 ~ 10,000 cm²/g로 조정하여 사용한다.

콘크리트 제조시 펄프 애쉬를 시멘트의 일부로 치환해서 사용한 경우(블레인 값 10,000 cm²/g 사용), 고강도 배합(물-시멘트비 40%일 경우)에서는 압축 강도가 펄프 애쉬를 사용하지 않은 것과 동등하거나 약간 높게 나타나는 경향이 있지만 저강도 배합(물-시멘트비 60%일 경우)에서는 펄프 애쉬 치환율이 클수록 강도가 낮게 나타나는 경향이 있다. 또한 블레인 값이 6,000 cm²/g 이상으로 되면 20% 치환에서도 강도비가 1을 초과하는 것도 있지만 발생 공장간에 펄프 애쉬의 품질 차이가 크기 때문에 블레인 값 6,000 cm²/g에서도 강도비가 1을 넘지 못하는 경우도 있다.

3.10 FRP 부스러기

정화조, 보트, 소형선 등의 본체로 사용되고 있는 섬유 강화 플라스틱(FRP)의 폐기물은 대부분 소각 또는 매립되고 있지만 분쇄물을 콘크리트용 혼화재로서 사용하

기 위한 실험이 실시되고 있다.^{32)~34)} 연구 보고에 따르면 치환율(F/(C+F))의 증가에 따라서 모르타르의 플로우 및 단위용적 중량은 큰 폭으로 저하된다고 하며, 압축 강도는 <그림 6>에 나타난 것처럼 치환율의 증가에 따라서 저하하지만 휨 강도의 경우는 치환율 50%까지는 치환율의 증가와 더불어 점진적으로 증가한다고 한다.

4. 맺음말

각종 폐기물을 콘크리트 재료로 이용하기 위한 기존의 연구 보고 등을 중심으로 연구 내용의 개요를 서술하였지만 이외에도 재활용 가능성이 있는 폐기물은 많다고 사료된다.

결론적으로 이들 폐기물을 콘크리트용 골재 또는 혼화재로 이용하는 방법을 크게 구분하면 다음과 같다.

① 그대로 사용하는 방법, ② 기계적 파쇄, 분쇄하여 사용하는 방법, ③ 소결, 용융 후 그대로 또는 가공해서 사용하는 방법으로 나뉘어 진다. 이 중에서 ①의 경우는 재생 이용을 위한 가공비와 에너지가 필요하지 않으며, 재생을 위한 코스트가 비교적 염가이다. 또한 ②의 경우는 어느 정도의 설비를 필요로 하며, 분쇄의 경우에는 약간의 에너지를 필요로 하지만 ①과 더불어 2차 폐기물(폐가스, 폐열 등)이 발생하지는 않는다. 그러나 ③의 경우는 폐기물을 감량화, 무해화하기 위한 처리 단계에서 사용되고 있는 열에너지가 필요하게 된다. 또한 소각 처리 후의 잔재, 소각회, 비회 등을 다시 가열해서 소결, 또는 용융할 경우에는 재생품 1톤당 60만~120만 kcal 정도의 열에너지가 필요하게 되며, 게다가 폐가스(이산화탄소, 이산화질소 등), 폐열을 다량으로 발생시키게 되어 대기 오염, 지구 온난화 등에 영향을 미칠 수 있다.

이와 같은 관점으로부터 폐기물의 재활용, 재자원화 기술은 에너지 절약, 환경보전에 충분한 배려를 해야 되는 것이 중요하다.

또한 여기에서 소개한 재료들을 실제로 활발하게 실용화하기 위해서는 각종 규격과 사용 실적에 따른 내구성의 증명 등이 필요로 하기 때문에 이에 대한 지속적인 연구가 필요하겠다. □

참고문헌

1. American Foundrymen, s Society, "Alternate Utilization of Foundry Sand", Report to Illinois Department of Commerce and Community Affairs, Chicago, 1991.
2. 한국전력공사, 석탄회 및 탈황석고 활용 국제 워크숍, 서울, 1997, pp.29~53.
3. P.T. Sherwood, "Steel Slag", Alternative Material in Road Construction, THOMAS TELFORD, 1999, pp.101~111.
4. 김기형, 최재진, 최연왕, 신화철, "도자기 폐기물을 사용한 시멘트 모르타르의 특성", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제11권 2호, 1999. 11.
5. "녹색 환경의 나라건설을 위한 국가폐기물 관리종합계획", 환경부, 1996.
6. 문한영, 서정우, "콘크리트용 혼화재로서 국산 플라이 애쉬의 품질에 대한 연구", 대한토목학회 논문집, 제7권 제3호, 1987. 9.
7. "전기로 슬래그를 사용한 도로포장 설계·시공지침", 대한토목학회, 1997.
8. 原口誠夫・松田林樹: 細骨材に陶器廢棄物及び廢棄鑛石を用いたコンクリートの基礎的研究, 鹿兒島縣工業高等專門學校研究報告第19號, 1985. 2, pp.103~111.
9. 依田彰彦: レンガ・ガラス屑のセメント二次製品への利用, 콘크리트工学, Vol.14 No.9, 1976. 9, p.56.
10. 上吉川 誠・大久保全陸: ごみ焼却灰溶融スラグを用いたモルタル及びコンクリートの強度特性, 日本建築學會大會學術講演概要集(東海), 1994. 9, pp.69~70.
11. 山本 達: 使用済みガラス瓶の再資源化-廢棄ガラスを高強度超輕量骨材へ再生-, 環境管理, Vol.31 No.7, 1995, pp.47~52.
12. 箕輪 普・西村幸雄: 輕量骨材及び細骨材としての鑛物用廢砂の利用, 콘크리트工学, Vol.14 No.9, 1979. 9, p.66.
13. 上原 匠・目下拓哉・梅原秀哲・近藤元博: 鑛物ダストを混入したコンクリートの物性に關する研究, 土木學會第49會年次學術講演會, 1994. 9, pp.756~757.
14. 目下拓哉・上原 匠・創正秀樹: 鑛物ダストを混和材として用いたコンクリートの諸物性, 土木學會第50回年次學術講演會, 1995. 9, pp.78~79.
15. 山崎寛司: 鑛物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に關する基礎的研究, 土木學會論文報告集, Vol.85, 1962. 9, pp.15~46.
16. 田村 博・高橋利一・五十嵐千津雄: 破碎粉のコンクリートへの有効利用に關する研究, 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.13 No.1, 1991, pp.57~62.
17. 重倉裕光: 廢骨材の粒徑及び石粉がコンクリートの諸性狀におよぼす影響に關する實驗, 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.14 No.1, 1992, pp.223~228.
18. 關口賢二・大西良亮・吉川良和・田村 博他3名: 碎石粉の有効利用に關する研究, 第7回生コン技術大會研究發表論文集, 1993, pp.23~26.
19. 三地 武・宇野定雄・小川伸吉・飽本一巳: 建設汚泥の焼成による有効利用, 土木學會第50回年次學術講演會, 1995. 9, pp.644~645.
20. 高木讓治・今野義晴: 赤泥を利用したコンクリート, 콘크리트工学, Vol.14 No.9, 1970. 9, p.60.
21. 吉田惠男・神屋惠一: 下水汚泥焼却灰の骨材としての有効利用, 建設用原材料, Vol.2 No.1, 1992, pp.21~26.
22. 蓮本清二・阪本好史・牧角龍憲: 下水處理汚泥焼却灰を混入したコンクリートの性狀について, 土木學會第48回年次學術講演會, 1993. 9, pp.446~447.
23. 横山昌寛・高橋泰一・櫻野紀元・阿部道彦他3名: 東京都下水汚泥焼成骨材を用いたコンクリートの耐久性調査-10年間の屋外暴露試験-, 日本建築學會大會學術講演概要集(北海道), 1995. 8, pp.446~447.
24. 白石 隆・増田隆司: 下水汚泥溶融スラグの強度特性に關する研究, 第28回下水道發表講演集, 1991, pp.876~878.
25. 草下直樹・田中正道: 汚泥溶融スラグの

- 建設資材化のための破碎方法について, 第28回下水道発表講演集, 1991, pp.880~881
26. 京材俊則・櫻井克信・河野宏隆 : 下水汚泥スラグ骨材のコンクリートへの利用技術の開発, 土木技術資料29-4, 1987, pp.33~38.
27. 神田 亨・阪本廣行・沼田和彦 : 都市ゴミ焼却灰のセメント固化に関する一考察, 土木學會第49回年次學術講演會, 1994. 9. pp.404~405.
28. 白石光彦・戸高光正 : 廢棄物熔融スラグの資源化利用研究, 第2回廢棄物學會研究發表會講演論文集, 1991, pp.145~148.
29. 杉田修一・庄谷征美・磯島康雄・餘其俊 : バガス灰のボゾラン材としての有効利用に関する研究, 土木學會第50回年次學術講演會, 1995. 9, pp.76~77.
30. 太田 實・山田幹雄 : ハルプスラッジ焼却灰のコンクリート混和材としての利用, 土木學會第48回年次學術講演會, 1993. 9, pp.448~449.
31. 牧野和州・太田 實・山田幹雄 : ハルプスラッジ焼却灰のコンクリート混和材としての利用-アッシュ粉末度の影響, 土木學會第49回年次學術講演會, 1994. 9, pp.406~407.
32. 吉川 茂・小島 昭・淺田俊彦 : FRP廢材微粉末を用いた輕量モルタルの製造, 第55回セメント技術大會講演集, 1991, pp.334~339.
33. 小島 昭・吉川 茂・淺田俊彦 : FRP廢材の骨材用微粉化-FRP廢材の骨材化その1-, 建設用原材料, Vol.2 No.1, 1992, pp.42~48.
34. 吉川 茂・小島 昭・宮本正雄・淺田俊彦 : FRP廢材微粉末の骨材としての利用-FRP廢材の骨材化その2-, 建設用原材料, Vol.2 No.1, 1992, pp.49~53.