

순환골재의 품질향상 기술개발연구

안 지 환

한국지질자원연구원 자원활용소재연구부

1. 서론

지난 1970년대이래 건설붐의 영향으로 신축되었던 상가나 아파트를 포함한 주택 등 콘크리트 구조물의 재개발이 본격화되어짐에 따라 건설 산업 폐기물이 급격히 증가하고 있다. 또한, 콘크리트 구조물은 거의 반영구적인 내구성을 갖는 것으로 인식하고 있지만, 구조물의 기능적인 수명에 비해 의외로 짧은 기간에 해체되고 있는 실정이다. 건설폐기물 중 폐콘크리트 양은 전체의 60~70%정도를 차지하고 있어 그 발생량이 매우 심각한 실정으로 그 발생량은 대략 연간 약 3,700만톤 이상 발생하고 있다.

이에 따라 재생골재를 도로의 기층 및 보조기층, 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 노력은 일찍이 1980년대 초부터 미국과 유럽의 여러 나라에서 실용화하기 위하여 꾸준히 연구 검토되어 왔다. 특히, 일본은 30년 전부터 재생골재에 대한 연구가 시작되어 그 규격을 제정하여 노반재 등으로의 사용이 적용된지 오래전이며, 재생골재의 품질을 천연골재와 동등하거나 그 이상으로 제조하기 위한 연구가 꾸준히 지속되어, 90년대 말에는 재생골재를 일반 구조용으로 사용하기 위한 인정 기준을 마련함으로써 천연골재의 완전한 대체재로서 재생골재의 사용에 대한 토대를 마련하였다.

이에 반해 국내의 폐콘크리트로부터의 재생골재 생산은 파쇄 등 일반 쇄석을 생산하는 방식과 크게 다르지 않고, 기초적인 물성만을 비교하는 수준에 그치고 있으며 많은 연구에도 불구하고 현재 재생 골재는 뒤편재나 보조기층용 재료로밖에 사용을 하고 있지 않는 실정이다.

콘크리트용 골재로 사용되는 골재자원은 그 채취장소에 따라 산림골재, 하천골재, 육상골재, 바다골재로 나눌 수 있으며, 골재의 특성은 그 발생기원에 따라 특성이 좌우되며, 또한 산림 및 육상골재는 하천 및 바다골재와는 달리 생산이 파쇄에 의해 생산되며, 풍화정도가 적어 알칼리 골재 반응성이 높을 수 있는 등 사용에 대해 주의를 기울여야 한다. 현재까지의 연구결과로 볼 때, 재생골재는 위의 고려하여야 할 특성과 더불어 콘크리트라는 복합체로부터 생산되기 때문에, 골재에 시멘트 페이스트 및 시멘트 모르타르가 필수적으로 부착되어 있어, 굵은골재와 잔골재 및 시멘트와 더불어 시간이 경과된 시멘트 모르타르의 혼합체에 대한 특성을 고려해야 하기 때문에 골재특성에 대한 주의가 더욱 필요할 것이다. 이러한 시멘트 페이스트의 특성은 그 사용된 시멘트의 종류, 첨가재, 혼화재 등이 상이하기 때문에, 재생콘크리트로 사용되었을 때, 장기적인 특성에 대한 예측은 매우 어려우며, 또한, 해체년수에 따른 특성도 중요한 인자가 될 수 있으며, 더욱이 해체된 폐콘크리트가 발생하는 장소에 대한 고려(이를 테면, 해양구조물 등) 또한 중요한 사항으로, 재생골재의 사용에 있어 일반 콘크리트용 골재보다 더욱 신중함이 요구된다. 일반적으로 골재가 콘크리트 속에서 차지하는 용적비율은 약 65~85%를 차지하므로 골재의 종류나 품질에 따라 콘크리트의 성질에 미치는 영향은 매우 크다.

일반적으로 재생골재는 부착된 시멘트 페이스트 및 모르타르로 인해 천연골재에 비해 흡수율, 비중, 마모율 등의 골재의 일반적인 특성이 떨어지며, 재생콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 물의 사용량이 많아져 내

구성을 나타내는 동결융해저항성, 건조수축, 화학저항성 등이 낮은 것으로 보고되고 있다. 동결융해 저항성은 공기량에 의해 좌우되지만, 충분한 공기량이 연행된 경우에도 골재의 품질이 나쁘면 동결융해 저항성이 저하되며, 건조수축의 경우 재생골재에 함유된 모르타르는 일반골재에 비해 탄성계수가 낮기 때문에 오래된 시멘트 페이스트는 건조수축에 대한 저항이 약하고 재생골재를 사용한 콘크리트의 건조수축은 일반 콘크리트에 비해 약간 증대된다.

따라서, 재생골재를 콘크리트 구조체에 전량 사용하거나 부분 치환했을 경우, 천연골재에 비해 취약하여 콘크리트 구조체의 역학적 성능과 내구성이 저하되는 문제점이 발생할 것으로 예상된다. 그러므로, 재생골재의 사용에 있어, 품질이 저급한 노반재 등의 사용에서 벗어나, 건축물 등으로 사용하여, 완전한 천연골재의 대체재로 사용하기에 앞서 재생골재의 발생 특성상 여러 공학적, 환경적 특성이 고려되어 안전성의 확보가 필요하며, 재생골재가 갖는 낮은 물성의 원인인 시멘트 페이스트를 원천적으로 제거하기 위한 기술 개발이 필요하다. 본고에서는 재생골재의 품질향상을 위한 기술에 대해 검토한다.

2. 본론

가. 건설폐기물 처리기술동향

1) 국내기술동향

국내의 건설폐기물의 재활용에 대한 연구는 1980년대 중반 일본 및 선진국의 연구결과를 바탕으로 학교 등의 연구기관을 중심으로 학술적 연구가 시작된 이후, 1990년대 들어서 본격적으로 추진되었다. 1993년 6월 “자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률”이 제정되고 1994년 당시 환경처와 건설부 통합고시에 의하여 국내 건설폐기물 재활용 계획이 수립되면서 적극적인 기술개발이 시작되었다. 표 1은 국내의 건설폐기물 및 재생골재 관련 연구보고서를 열거한 것으로 건설폐기물의 재활용을 위한 다각적인 기술개발과 투자가 이루어지고 있으나, 연구개발 투자에 비하여 실용화는 활발히 이루어지지 못하고 있다.

건설폐기물의 활용성을 높이기 위해 한국산업규격(KS)에서는 1999년 KS F 2573 콘크리트용 재생 골재, KS F 2574 도로 보조 기층용 재생 골재, KS F 2572 아스팔트 콘크리트 재생골재 등 재생골재에 대한 규격을 제정하였다. 그러나, 이러한 규격은 일반 콘크리트용 골재에 대한 규정에 비해 매우 완화된 규정으로 재생골재의 사용을 도로 기층재 등 그 사용에 제한하고 있다.

국내의 재생골재 시스템은 단순 파/분쇄가 주를 이루고 있고, 이러한 재생골재의 품질은 흡수율이 5% 이상이며, 그 변동율이 매우 높아 적절한 대책이 요구된다. 근래에 들어 국내에서도 단순 파/분쇄처리보다 진보한 기술 등이 다소 소개되고 있으나, 그 또한 비중(약 2.3~2.4) 및 흡수율(약 4~5%)에 있어서, 기존의 재생골재보다 품질이 약간 향상되었을 뿐이다.

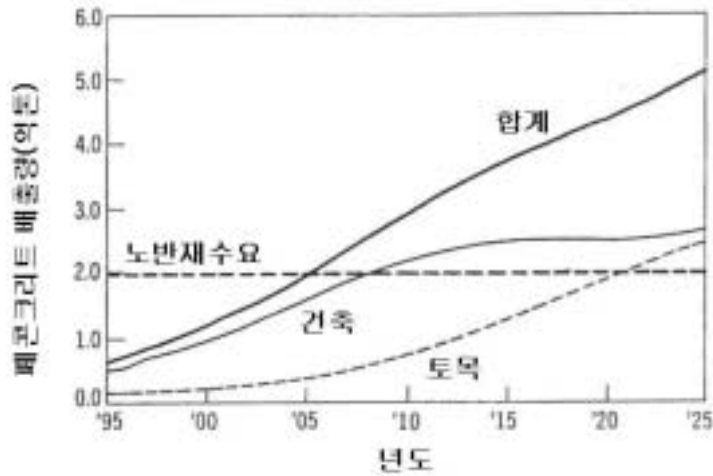
<표. 1> 국내의 건설폐기물 및 재생골재 관련 연구

연구 제목	연도	주요 내용
1. 굵은 골재로서 폐콘크리트를 사용한 콘크리트에 관한 실험적 연구	1986	폐콘크리트로부터 가공·생산된 재생골재의 콘크리트용 골재로서 사용가능성 타진
2. 폐콘크리트를 사용한 재생골재콘크리트의 시공성 및 공학적 특성 연구	1991	재생골재콘크리트의 현장 적용 가능성 타진
3. 폐콘크리트 재활용에 있어서 강도특성상의 문제점	1992	재생골재 콘크리트의 역학적 특성에 관한 문제 규명
4. 재생골재콘크리트에 관한 연구- 재생골재의 품질	1993	생산시스템에 따른 재생골재 품질 특성
5. 폐콘크리트 재활용 기술개발 연구	1994	·재생골재의 도로보조기층재 활용 ·재생골재의 콘크리트 2차제품 생산활용
7. 건설산업 폐기물의 리사이클링 시스템 및 재활용 기술개발	1997	건설폐기물 발생실태 및 재생골재의 활용 검토, 파쇄시스템 개발, 도로포장용 콘크리트 적용기술 개발
8. 건설폐기물의 재활용 및 처리기술 개발	2000	·폐아스콘 재활용 ·폐콘크리트 노반재 활용
9. 무세골재콘크리트 제조와 건자재 활용 기술개발	1999	재생골재를 이용한 무세골재콘크리트(투수콘, 방음벽 등) 제조기술 개발
10. 폐콘크리트를 이용한 재생골재의 표준화 및 시스템 구축	1999	콘크리트용, 도로보조기층용 아스팔트 콘크리트용 KS 규격 제정

2) 국외기술동향

30년 전부터 재생골재에 대해 관심을 갖은 일본 등 건설폐기물의 처리에 있어, 앞선 국가에서는 재생골재의 품질을 천연골재와 동등하게 함으로써 천연자원의 보존 및 자원순환형 처리시스템을 구축하고 있다. 이에 따라, 단순 파/분쇄에서 벗어나 가열분쇄 등 고도처리를 통해 천연골재와 동등한 재생골재를 생산하기 위해 노력을 기울이고 있으며, 그에 따라, 재생골재를 구조용 콘크리트에 사용하기 위한 적절한 기준과 장기적인 안정성에 대한 데이터를 축적함으로써, 재생골재의 사용을 극대화하고자 하고 있다.

그림. 1은 일본의 골재소비구조를 나타낸 것으로 2005년을 전후하여 현재 폐콘크리트가 주로 사용되고 있는 노반재수요를 초과할 것으로 예상된다. 이러한 골재소비구조의 예상에 발맞추어 일본은 30여년간 건설폐기물 및 재생골재에 대한 시책 및 연구결과를 축적하여 왔다.



<그림. 1> 일본의 골재 소비구조.

일본은 표.2에 나타난 바와 같이 주요 시책을 통해 건설폐기물에 대한 정책을 꾸준히 추구하여 왔으며, 이러한 정책과 지속적인 페콘크리트 연구에 의해 각 분야에서 여러 재생골재 사용기준(안)이 제시되어왔다.

- 일본건축업협회 “재생골재 및 재생콘크리트 사용기준(안) (1987년)
 - 1981년 건설성 종합기술개발프로젝트 「건설사업의 폐기물 이용기술개발」를 통하여,
 - 보통 골재에 재생골재를 소량 혼합하여 사용하는 방법 제시
 - 재생골재를 보통골재와 동등한 품질로 개량하여 사용하는 방법을 검토하여, 「재생조골재품질기준(안)」, 「재생조골재를 사용하는 콘크리트 사용기준(안)」 「재생골재를 사용한 콘크리트의 설계시공지침(안)」 제시
 - 건설성 종합프로젝트에서 콘크리트 재생이용에 대한 조사를 통해 「콘크리트 부산물 재이용에 관한 용도별 잠정품질기준(안)」 제시 (1992년)
- 또한, 1999년에는 (재)일본 건축 센터에서 “건축 구조용 재생 골재 인정 기준“을 만들어 재생골재를 구조용으로 사용하기 위한 토대를 마련하였다.

<표.2> 일본의 건설폐기물 재활용 촉진을 위한 주요 시책

년도	내용
1973	콘크리트, 아스팔트콘크리트의 리사이클포장재로의 연구개발
1975	부분적인 재생포장 시험공사 시작(시멘트콘크리트 재생노반, 재생가열아스팔트 혼합물)
1977	시멘트콘크리트 및 아스팔트콘크리트의 본격적인 리사이클플랜트 출현 1978년 대규모 시험공사 수행
1984	포장 폐재 재생이용 기술지침(안) 제정(일본도로협회)
1987	노상 재생 재쟁이용 기술지침(안) 제정(일본도로협회)
1983-1987	건설성종합기술개발 프로젝트 <건설사업에의 폐기물 이용 기술의 개발>
1991	재생자원의 이용촉진에 관한 법률(라싸아클법) 제정
1992	폐기물의 처리 및 청소에 관한 법률(청소법) 개정
1992-96	건설성 종합기술개발 프로젝트 건설부산물의 발생억제·재생이용기술의 개발
1994	건설부산물 대책 행동 계획-"Recycle Plan21"발표 콘크리트 부산물의 재이용에 관한 용도별 잠정 품질 기준(안)
1994	건설부산물 대책 행동 계획 (리사이클 플레인 21) 설립
1997	건설리사이클 추진 계획 '97
1998	건설리사이클 가이드라인 제시
1999	건설해체 폐기물 리사이클 프로그램 설정
2000	건설리사이클 공포

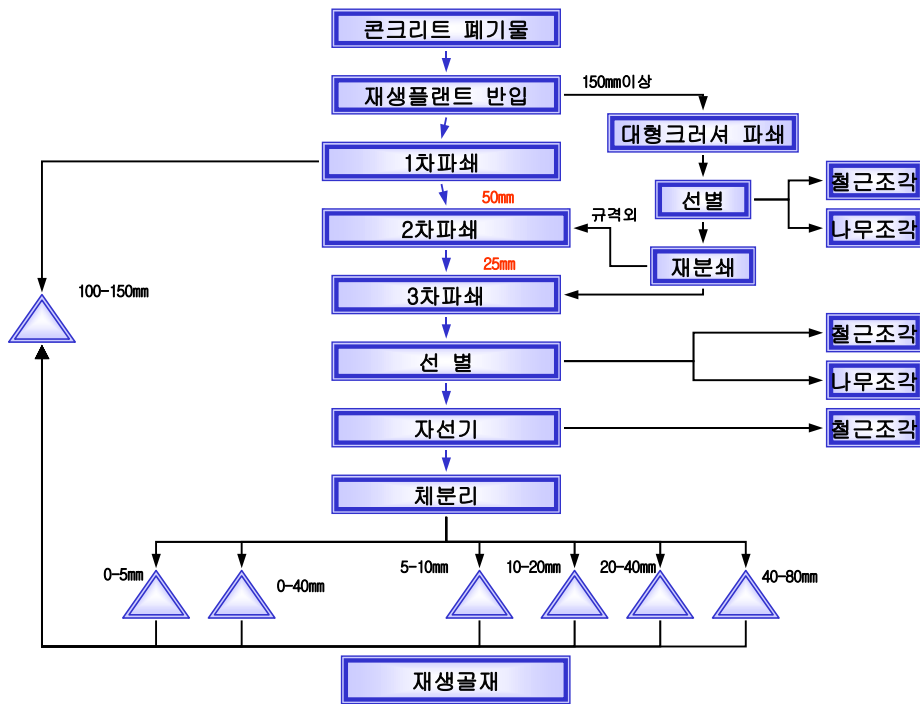
이는 양질의 재생 골재를 유효 이용하는 것에 중점을 두고, 통상의 골재와 동등한 품질을 적용하여 구조용 콘크리트 골재로 재생골재를 활용하기 위한 것이다.

일찍이 일본에서는 재생골재에 대한 연구가 활발히 진행되어 그 품질 저하에 대한 원인 규명과 품질 향상을 위하여 재생골재 처리기술에 대한 다각적인 노력을 기울여 왔다.

연구 초기 단계에서는 폐콘크리트의 단순 파·분쇄에서 점차 재생콘크리트에서 문제가 되는 재생골재에 부착된 시멘트 페이스트 및 모르타르의 영향을 최소화하기 위해 파·분쇄의 효율적 조합 및 마쇄 등의 여러 처리기술이 개발되었고, 근래에 들어 가열분쇄 등의 고도처리 기술이 소개되고 있다.

나. 일반적 재생골재 생산 체계 및 품질

재생골재의 일반적인 생산과정은 그림. 2와 같다. 재생골재 생산업체로 운반된 건설폐기물은 여러 선별공정에 의해 철근, 목재 등이 제거되며 재생골재를 생산하는 주요 공정은 파쇄공정으로 이 공정에 의해 적절한 입도로 조정된다. 여러 파쇄공정과 각 파쇄공정의 반복에 의해 최종사용처에 적합하게 입도가 조정된다. 주로 사용되는 파쇄기는 jaw crusher, impact crusher 등이다.



<그림. 2> 재생골재의 생산과정.

파쇄한 폐콘크리트는 매립이나 성토에 의한 토지조성재료 이외에 토목건축구조물의 기초나 충전재료, 도로의 노반재료, 포장용 아스팔트 혼합물 및 콘크리트 골재 등으로 사용이 가능하다. 아스팔트 혼합물용 골재로서의 폐콘크리트의 파쇄물은 사용되지 못하는데 이는 비중과 흡수율이 KS F 2357의 역청포장 혼합물용 골재기준의 품질에 미치지 못한다는 것이 첫 번째 원인이다. 한편, 콘크리트용 골재이지만 콘크리트의 굵은 골재에 이용되는 부순골재와 잔골재로 쓰이는 골재로서 국내의 파쇄기를 주로 사용하는 재생골재는 그 자체 KS규격의 부순 골재와 동등하게 사용할 수 없음이 명백히 밝혀져 있다. 이는 생산되는 재생골재가 천연골재의 품질에 비해 상대적으로 매우 낮은 성질을 가지고 있고 주로 재생골재에 부착된 페이스트의 영향이 주된 요인으로 알려져 있다.

표. 3은 국내의 대표적인 10개의 재생골재 생산업체의 40mm이하의 재생골재의 비중, 흡수율, 마모강량을 조사한 결과이다. 절대건조비중은 콘크리트 또는 모르타르의 비중에 가까운 평균 2.1~2.6 정도이고, 흡수율은 2.7~7.9%로 보통골재보다 높고, 마모강량도 30.2~43.7%로 대상 시료들의 대부분이 콘크리트용 쇄석 및 쇄사의 KS규격(절대 건조비중 2.5이상, 흡수율 3%이하)을 만족시키지 못하고 있다.

<표.3> 중간처리업체별 재생 굵은골재의 비중, 흡수율 및 마모감량
(40mm 재생골재)

번호	업체	표건비중	절건비중	흡수율(%)	마모감량(%)
1	A	2.512	2.4	4.662	41.51
2	B	2.408	2.288	5.274	42.61
3	C	2.527	2.385	5.936	39.94
4	D	2.393	2.262	5.799	38.92
5	E	2.327	2.189	6.313	40.51
6	F	2.541	2.404	5.687	37.5
7	G	2.442	2.264	7.854	43.71
8	H	2.559	2.486	2.932	37.94
9	I	2.546	2.452	3.820	30.24
10	J	2.636	2.564	2.786	40.12

결과적으로 표. 4, 표. 5의 KS로 규격화된 재생골재의 물리적 성질, 유해물 함유량의 허용값과 비교하면 2종과 3종의 재생 굵은 골재에 해당하는 낮은 등급의 품질을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 이들 재생골재의 품질을 높여 용도를 다양화시켜야 할 것으로 판단된다.

<표.4> 재생골재의 물리적 성질

종 별	항 목	재생 굵은 골재			재생 잔 골재	
		1 종	2 종	3 종	1 종	2 종
	흡수율(%)	3 이하	5 이하	7 이하	5 이하	7 이하
	비 중	2.2 이상			2.2 이상	
	마모 감량(%)	40 이하			-	
	입자 모양 판정 실적률(%)	55 이하			53 이상	

<표.5> 재생골재의 유해물 함유량의 허용값

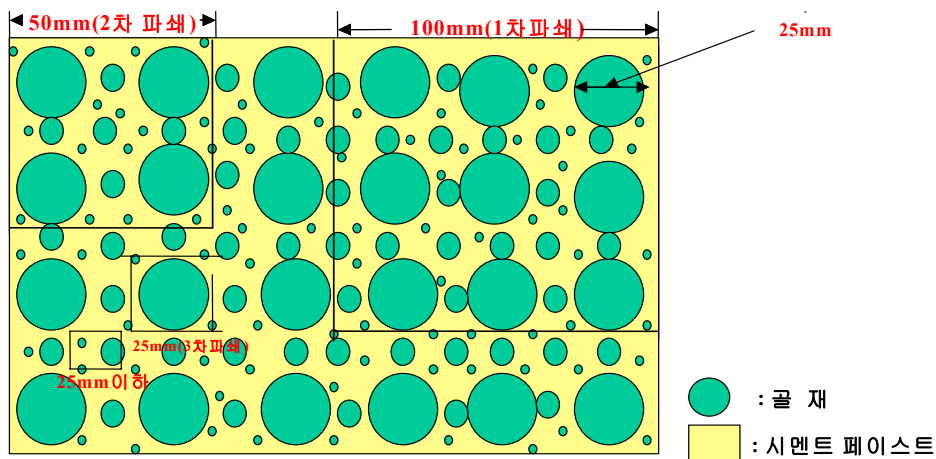
구 분	항목	재생 굵은 골재	재생 잔 골재
		1, 2, 3종	1, 2종
0.08mm 체 통과량 시험에서 손실된 양(%)	콘크리트의 표면이 마모작용을 받는 경우	1.5 이하	5 이하
	그 밖의 경우	1.5 이하	7 이하

재생골재를 생산할 때 파쇄산물의 입도를 조정하는 것은 콘크리트에 사용되는 골재의 입도와 밀접한 관계가 있겠으나 골재 품질의 관점에서 보면 파쇄공정에 의한 적정 입도를 예측할 수 있다. 그림. 3은 이를 설명하기 위한 그림이다. 파쇄공정만을 사용할 때, 원콘크리트에 최대 골재치수 25mm의 골재가 사용되었다고 가정하면 파쇄산물이 50mm이상에서의 재생골재는 굵은골재, 잔골재, 시멘트 페이스트가 콘크리트와 동일하

여 콘크리트의 성질과 유사하며 25mm정도로 파쇄산물이 얻어졌을 때 가장 골재의 특성에 가까워짐을 알 수 있다. 25mm이하로 파쇄되었을 때에는 골재자체가 파쇄되는 경우가 발생할 수 있으며, 시멘트 모르타르나 페이스트 성질에 가까워짐을 알 수 있다. 따라서, 25mm의 골재를 회수하기 위해서는 25mm를 전후한 산물을 제조하기 위한 파쇄공정이 적합하겠다. 그러나 파쇄공정에 의해 25mm를 전후한 입도만을 얻을 수는 없으며 콘크리트에 사용되는 골재는 일정범위의 입도를 가지게 되므로, 이는 이론상의 접근이며 실제 공정에서는 실효를 거두기는 어렵다.

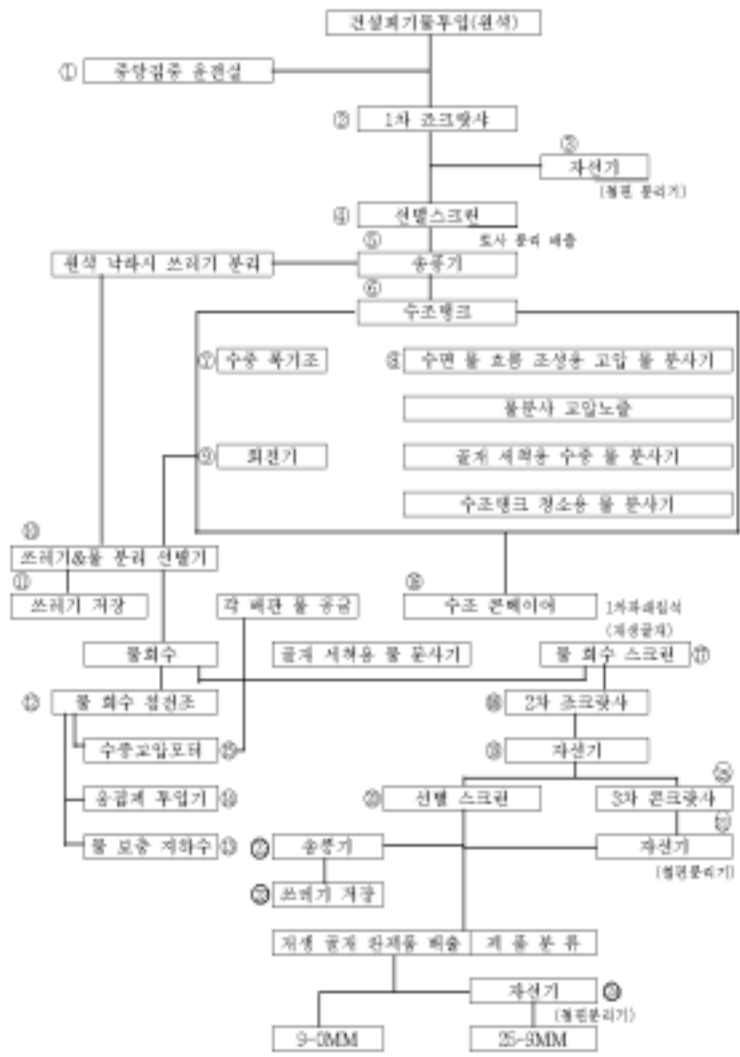
파쇄에 의한 폐콘크리트의 파괴는 취약한 골재와 시멘트 페이스트간에 의해 발생되기 쉽기 때문에 파쇄회수를 증가시킴으로써 시멘트 모르타르를 골재로부터 더욱 제거할 수 있다. 그러나 파쇄횟수의 증가는 골재 자체에 대해 충격이 가해질 수 있으므로 골재의 입도를 변화시키며 골재의 내구성을 떨어뜨리는 원인이 된다. 또한 파쇄만을 사용하는 공정에 의해서는 재생골재의 품질 변동이 커서 콘크리트 골재로서 사용하기에는 한계가 있다.

따라서, 파쇄에 의해 일정크기로 산물의 입도를 조정한 후에 시멘트 모르타르를 제거하기 위해서는 파쇄양상이 다른 파쇄기나 마쇄나 분쇄처리를 사용하는 것이 적합할 것이다.



<그림. 3> 고품질 재생골재회수를 위한 적정입도선정을 위한 모식도.

앞서 언급한 바와 같이 대부분 폐콘크리트 중간처리업체의 체를 이용한 토사분리기술, 자선기에 의한 금속편 분리기술, 풍력을 이용하여 가벼운 이물질을 분리하는 기술과 크러셔를 사용하여 입자 크기를 감소시키는 기술에 수조탱크를 이용한 불순물 자동 분리 및 세척을 통해 불순물을 더욱 제거하고 콘크리터를 이용하여 생산되는 재생골재의 입형 개선과 일부 부착 페이스트의 제거 효과를 높여 양질의 재생골재를 생산하는 기술이 일부 국내 업체에서 적용되고 있다. 그 처리 계통을 그림. 4에 나타내었다.



<그림. 4> I 사 건설폐기물 재생 플랜트.

생산된 재생골재의 품질 특성은 표. 6과 같다.

<표.6> KS F 2573(콘크리트용 재생굵은골재)와 고도처리된 재생골재 품질 비교

항목	콘크리트용 재생 굵은 골재(KS F 2573)			고도처리된 재생골재	일반천연골재 (쇄석)
	1종	2종	3종		
흡수율 (%)	3 이하	5 이하	7 이하	1.12	1.23
비중	2.2 이상			2.62	2.64
마모율 (%)	40 이하			21.5	24.1
입자모양 판정실적율 (%)	55 이상			60	60.8
체가름 통과량 (%)	25mm	100		100	100
	20mm	90 ~ 100		95	94
	10mm	20 ~ 55		27	28
	5mm	0 ~ 10		1	2
	2.5mm	0 ~ 5		0	0

다. 재생골재 품질 향상 기술

폐콘크리트의 단순 파·분쇄에서 점차 재생 콘크리트에서 문제가 되는 재생골재에 부착된 시멘트 페이스트 및 모르타르의 영향을 최소화하기 위해 파·분쇄의 효율적 조합 및 마쇄 등의 여러 처리기술이 개발되었고, 근래에 들어 보다 고품질의 재생골재를 회수하기 위한 고도처리 기술이 소개되고 있다.

1) 가열분쇄

재생골재는 굵은골재, 잔골재 모두 시멘트 수화물의 부착이 거의 없는 입자, 원콘크리트의 큰 골재입자에 시멘트 수화물이 부착된 입자, 시멘트 모르타르 덩어리로 구성되어 있다. 이러한 재생골재로부터 시멘트 페이스트를 제거하는 방법은 일반적으로 재생골재를 마모시키는 것이다. 그러나 마모는 시멘트 수화물부분 뿐만 아니라 골재부분에서도 일어나서 골재의 회수율을 저하시킬 수 있다. 따라서 가능한 한 골재를 마모시키지 않고 시멘트 페이스트부분만을 제거하는 기술이 요구되며 골재부분과 시멘트 부분과의 강도차이를 크게 하기 위한 하나의 방법으로 시멘트 페이스트와 골재의 열적 특성 차이를 이용하여 폐콘크리트로부터 시멘트 페이스트를 효과적으로 분리하는 방법이다.

시멘트의 주요구성광물은 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF 로 이들은 반응성이 높은 무수화물이며 물과 반응하여 용해도가 낮은 안정한 수화물을 생성한다. 시멘트 화합물의 수화속도는 C_3S 가 가장 신속하고 다음으로 C_3A 와 C_4AF 가 빠르며 C_2S 가 가장 느린 수화속도를 보인다. $CaO-SiO_2-H_2O$ 계에서는 다양한 수화물이 생성되는데 특수한 목적으로 시멘트를 사용하지 않는 한 보통 콘크리트 타설시 생성되는 칼슘실리케이트의 수화물은 저결정성 C-S-H 상이 생성된다. 이러한 저결정성 C-S-H 및 수열반응으로 형성되는 tobermorite, xonotlite 등과 같은 C-S-H상을 가열하면 100 ~ 500°C에서 모든 결정수가 탈수된다.

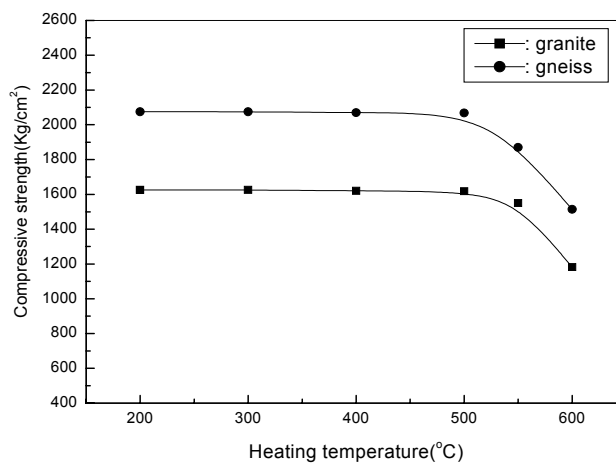
또한, $CaO-Al_2O_3-H_2O$ 계에서도 다양한 수화물이 생성되며 C_3A 수화물에서는 C_3AH_6 (24면체형), C_3AH_{18-21}

(침상), C_3AH_{10-12} (육각판상)의 존재가 알려져 있는데 이들을 가열하면 275℃에서 탈수하여 먼저 $C_3AH_{1.5}$ 로 되고, 500℃까지 1.5H₂O분의 OH기가 탈수된다.

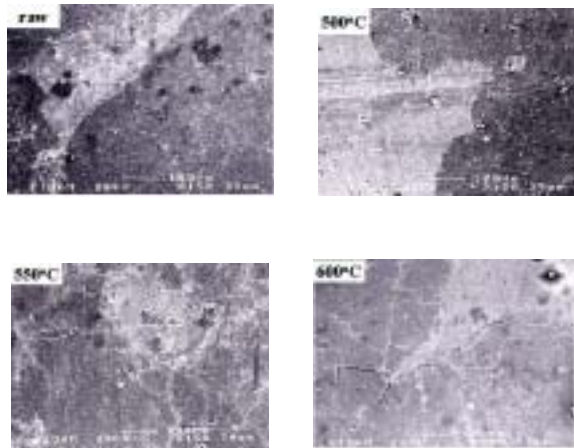
그밖에 고향산염 수화물인 ettringite는 400℃이하의 온도에서 단계적으로 탈수되어 1000℃에서는 $C_3A \cdot CaSO_4$, $CaSO_4$, CaO 의 혼합물이 된다. monosulfate는 $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ 를 가열하면 12H₂O의 물분자중 H₂O분자에 해당하는 6~7H₂O가 약 110℃에서 탈수된다.

한편, 골재로 사용되는 암석은 주로 화성암인데, 이들은 주로 석영(α -SiO₂), 장석, 운모, 각섬석 등의 조암 광물로 구성되어 있다. 이들 조암광물중 암석의 내구성에 가장 영향을 끼칠 수 있는 광물은 석영과 점토광물이다. 왜냐하면 석영을 가열하게 되면 α -SiO₂→ β -SiO₂→ β_2 -tridymite→ β -cristobalite→ 액상으로 변화되며, 약 573℃에서 α -SiO₂가 β -SiO₂로 결정 전이될 때 약 2%정도에 이르는 급팽창을 일으키는데 가역전이이므로 냉각시에는 동일한 비율로 수축한다. 결과적으로 암석내에서 석영의 팽창과 수축으로 암석의 내구성을 저하시킬 수 있다. 한편 골재에 점토광물인 kaoline 광물이 함유되어 있으면 500~600℃에서 탈수되어 골재를 열화시킬 수 있다.

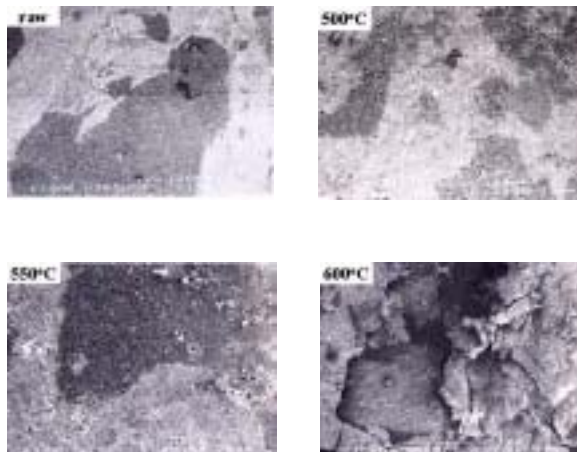
그림. 5는 화강암과 편마암을 3cm(φ)×5cm(H)의 시편을 만들어 각 온도에서 1시간 유지시킨 후 시편의 압축강도를 측정한 것이다. 화강암과 편마암 시편 모두 500℃이상에서 압축강도가 급격히 하강하는 것을 확인할 수 있으며, 그림. 6과 그림. 7로부터 500℃이상에서 각 시편에 crack이 발생하는 것으로부터 화강암 및 편마암이 열화되는 것을 확인할 수 있다.



<그림. 5> 가열온도에 따른 화강암 및 편마암의 압축강도 변화.



<그림. 6> 가열온도에 따른 화강암의 표면 사진.



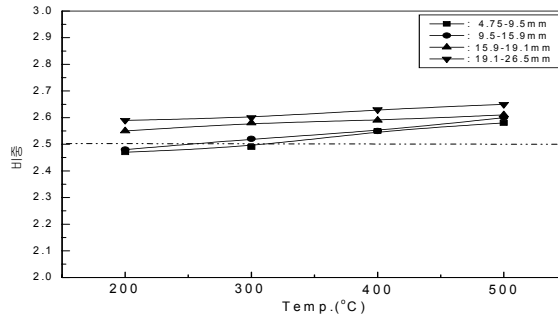
<그림. 7> 가열온도에 따른 편마암의 표면 사진.

결과적으로 가열분쇄에 의한 안정된 재생골재를 회수하기 위해서는 시멘트 수화물이 탈수되지만 점토광물의 탈수 및 석영의 결정전이가 일어나지 않는 500°C이하에서 가열한 후 마쇄하여 제조하는 것이 유리하다. 가열분쇄법에 대한 실시예로서 폐콘트리트를 1차 조크러셔와 2차 조크러셔로 파쇄하고 3차에서 콘 크러셔를 거쳐 생산된 26.5mm이하의 재생골재에 대해 500°C까지 가열처리하여 실험실용 볼밀(길이 30cm, 지름 15cm)로 분쇄 처리한 결과를 보이면 아래와 같다. 원재생골재의 골재크기별 비중, 흡수율, 마모율은 표. 7과 같다.

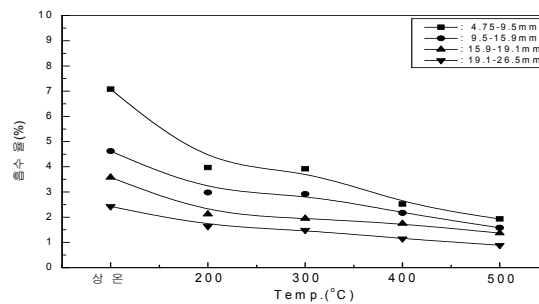
<표.7> 재생골재의 골재크기별 비중, 흡수율, 마모율

골재크기(mm)	절건비중	흡수율(%)	마모율(%)
26.5 ~ 19.1	2.48	2.33	23.0
19.1 ~ 15.9	2.44	2.98	
15.9 ~ 9.5	2.38	3.70	33.3
9.5 ~ 4.75	2.28	5.61	

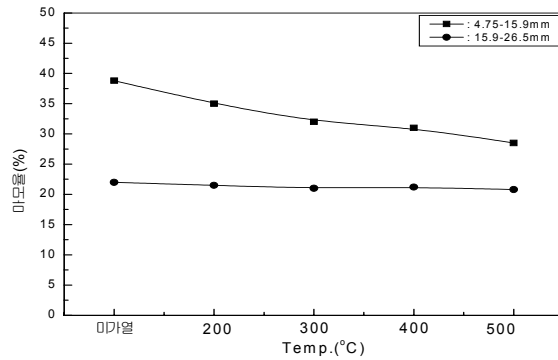
그림. 8 그리고 그림. 9, 그림. 10은 각각 볼/재생골재의 비율을 1.5로, 마모시간은 1시간으로 고정하고 골재의 입도, 가열온도에 변화에 따른 제조된 골재의 비중, 흡수율, 마모율을 측정된 결과이다. 골재를 300℃ 이상으로 가열하면 비중이 2.5이상으로 되고, 400℃이상으로 가열해야만 흡수율이 3.0이하로 낮출 수 있음을 알 수 있다. 또한 미가열 시료의 경우는 마모감량이 약 40%이지만, 가열온도가 높아짐에 따라 마모감량이 낮아져 500℃에서는 30%이하로 되어 가열분쇄에 의해 재생골재의 품질이 콘크리트용 골재와 동등한 품질까지 향상 가능함을 알 수 있다.



<그림. 8> 가열분쇄 재생골재의 입도 및 온도별 비중.

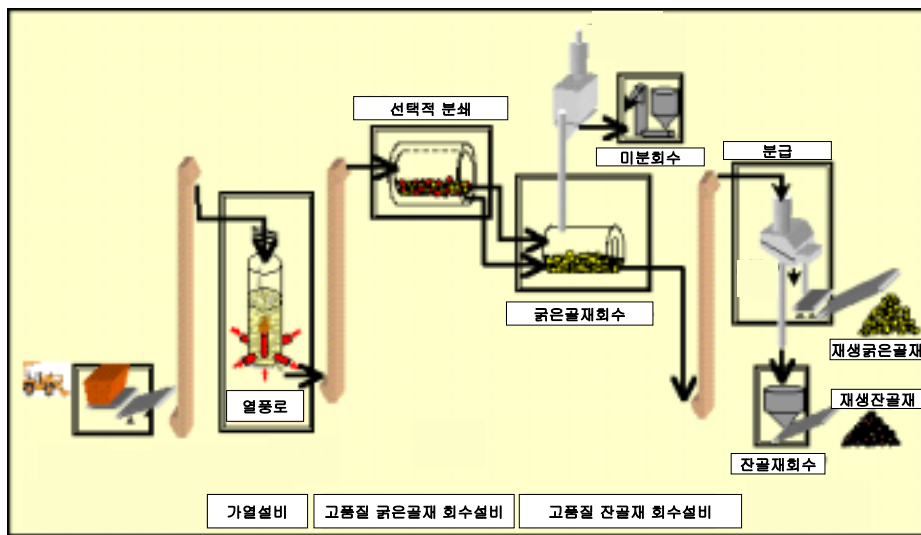


<그림. 9> 가열분쇄 재생골재의 입도 및 온도별 흡수율.



<그림. 10> 가열분쇄 재생골재의 입도 및 온도별 마모율.

일본의 Mitsubishi materials에서는 가열분쇄방법에 의해 재생골재를 생산하고 있으며, 그 과정은 그림. 11과 같으며, 폐콘크리트를 열풍에 의하여 약 300°C에 가열함으로써 시멘트 페이스트를 구성하는 시멘트 수화물만을 탈수, 약화시키고 강구를 사용하여 골재를 약화시키지 않을 정도의 마찰력으로 시멘트 페이스트를 선택적으로 제거한다. 동시에 세립분을 연속적으로 배출하면서 재생굵은골재를 제조한다. 또한, 잔골재 회수 장치로 세립분을 재생 굵은 골재에 의하여 분쇄 처리를 행하여 재생잔골재를 제조한다. 내용물은 전부 분급 장치에 투입되고, 미분은 공기분급에 의해 제거·회수된다. 이러한 과정에 의해 생산된 재생 굵은골재, 재생 잔골재는 콘크리트용의 골재 품질(JIS A 5005)을 만족하였다.



<그림. 11> 고품질 재생골재의 회수 과정.

2) 마이크로파에 의한 재생골재 회수 기술

마이크로파 가열은 물체 자체가 발열체로 되는 가열방식이기 때문에 종래의 열 전도에 의한 외부가열에 없

고 다음과 같은 특징이 있다.

가) 급속가열

열품과 같이 열 전도를 이용하는 가열법에 비하여 마이크로파 가열은 피 가열물 자체가 발열하기 때문에 열 전도에 의하지 않고 내부의 온도를 높일 수 있다. 이 때문에 가열에 요하는 시간을 크게 단축시킬 수 있고, 또 비교적 일정하게 온도를 올릴 수가 있다.

나) 균일가열

외부 가열에서는 내외의 온도구배를 피할 수 없고 균일 가열하려고 하면 시간이 걸린다. 마이크로파 가열에서는 유전체내의 전기력선이 균일하게 발생하려고 하면 온도 상승도 일정하게 된다. 외부 가열에서는 외측의 온도는 높고 내측의 온도는 낮지만 마이크로파 가열에서는 내외의 발열량을 동일하게 할 수가 있다.

다) 국부가열

외부 가열에서는 국부만을 가열할 수 없는 곤란한 경우가 많다. 국부에 열판을 대서 외부 가열할 경우는 온도를 올리는 데에 시간을 요하기 때문에 열 전도로 가열부분이 넓어지는 것을 피할 수 없다. 마이크로파 가열에서는 가열해야 할 부분에 전극을 대서 전기력선이 집중하도록 고안하면 좁은 범위에서도 가열할 수 있다. 가열시간이 짧기 때문에 가열부분의 넓이는 작다.

라) 레벨링(Levelling)

다른 물질은 다른 마이크로파 흡수 특성을 가지고 있기 때문에, 혼합물을 구성하는 개개 성분의 선택적 가열이 가능하다.

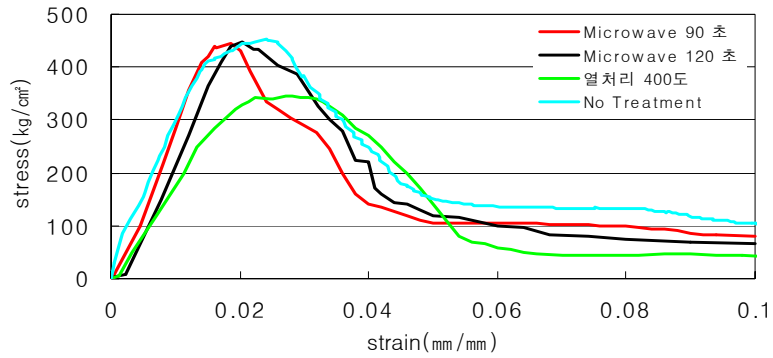
마) 열효율

마이크로파는 오븐 속에 놓아둔 피 가열물만에 흡수되고 주위의 벽(금속)과 공기를 가열하지 않기 때문에 당연히 열효율이 높다. 따라서 작업환경의 개선에도 상당히 유용하다고 할 수 있다. 또 에너지를 필요 부분에 집중시킬 수 있기 때문에 열효율이 높다.

그밖에, Heating source와 Heating material과의 직접적인 접촉이 없으며, 가열이나 건조 과정에서 제어가 용이한 장점을 가지고 있다.

이러한 마이크로파의 특성을 이용하여 페콘크리트로부터 고품질의 재생골재를 회수하는 연구가 수행되고 있다.

그림. 12와 그림. 13 그리고 표. 8은 KS L 5105 모르타르 강도 시험 방법에 지름 약 25mm의 둥근 자갈 1개를 중심에 삽입하여 시편을 제작한 후 Microwave 처리 조건을 체류시간 90초, 120초로 하였고, 전력은 600W, 주파수는 2450MHz로 하여 실험한 결과로서, 열처리를 한 경우 파괴에너지에서 큰 효과가 보이지 않고 압축계수와 탄성계수가 각각 77%와 62%로 많이 줄어들었음을 알 수 있다. 반면에 마이크로파 처리를 한 경우 압축강도에는 큰 변화가 없었으며 파괴에너지의 경우 약 68%정도로 크게 줄어들어 재생골재 생산에서 에너지 효율의 향상 가능성을 보여주었다.

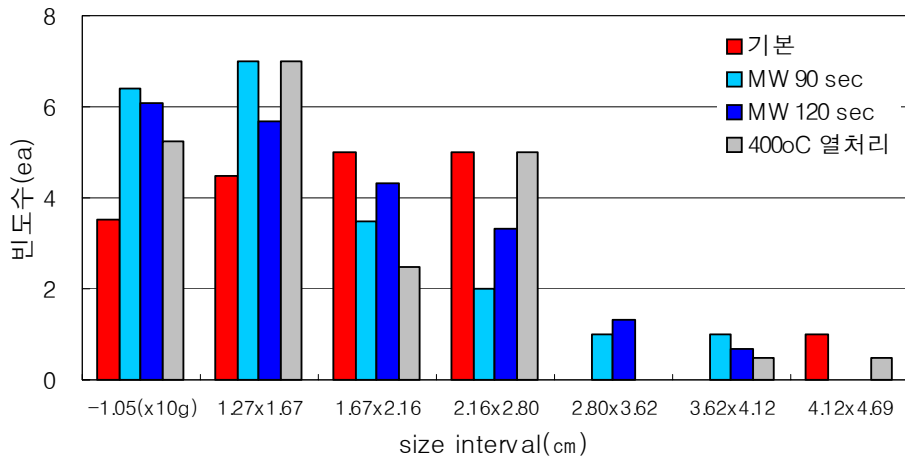


<그림. 12> 압축강도 측정 결과.

<표.8> 압축강도, 탄성계수, 파괴에너지의 변화 비교

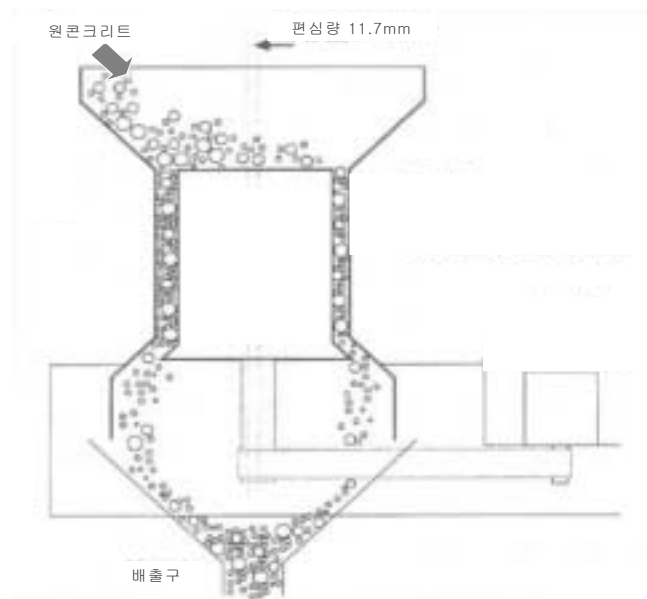
	압축강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (MPa)	파괴에너지 (J/cm ³)
No Treatment	448	2757.55	0.707
Microwave 90초	440	3240.05	0.476
Microwave 120초	446	2818.92	0.482
열처리 400℃	346	1723.33	0.643

또한, 아무런 처리도 하지 않은 시편은 파괴 후 자갈 표면에 시멘트 페이스트가 많이 부착되어 있음을 확인할 수 있다. 반면 열처리의 경우와 마이크로파 처리의 경우 시멘트 페이스트의 부착정도가 아무런 처리도 하지 않은 시편에 비해 적으며 미세 가루가 많이 발생함을 확인할 수 있다. 그리고 마이크로파 처리의 경우 90초 처리한 시편보다 120초 처리한 시편이 페이스트 부착량이 적었다.



<그림. 13> 파편을 같은 밀도의 구로 가정, 크기에 따른 출현빈도수.

그 밖에, 주식회사 竹中工務店에서 개발한 건설구조용 재생골재회수장치는 폐콘크리트를 파쇄한 후, 파쇄물을 편심 회전하는 처리 장치에 의해 처리해, 굵은골재와 모르타르 부분을 거의 완전하게 분리하여 천연골재 및 쇄석과 동등의 품질을 가지는 굵은골재를 제조하고 있다. 이 재생골재의 품질은 절건비중 2.58, 흡수율 1.81%, 실적을 61.2%로 JIS와 JASS(절건 비중 2.5이상, 흡수율 3.0%이하, 실적을 55%이상)를 만족하였으며, 프레스 콘크리트의 성질과 상태, 강도 및 내구성이 통상의 굵은골재를 사용한 콘크리트와 같아, 건축물이나 구조체에 이용할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 이렇게 생산된 재생골재는 일본에서 처음으로 건물의 구조체(1층 마루의 일부, 면적 약 100m²)에 이 재생굵은골재를 사용하였으며, 타설량은 약 30m³, 총량으로 약 30톤을 타설하였다.



<그림. 14> 고품질 재생 골재의 회수 과정.

3. 결 론

천연골재 수급 불균형이 심화되고 있기 때문에 그 대체재의 확보가 절실히 요구되는 시점에서 폐콘크리트 중의 골재를 회수하는 기술 개발은 절실히 요구되고 있다. 그러나, 파쇄기 위주의 처리에서 얻어진 재생골재의 품질은 천연골재에 비해 현저히 품질이 낮아 재생콘크리트의 내구성에 영향을 미치며 이를 위해 고품질 생산 골재의 생산 시스템 개발이 요구되고 있다.

이에 따라, 고품질의 재생골재를 제조하기 위한 여러 기술들이 소개되고 있는데, 그 중 폐콘크리트의 열처리 방법은 골재의 열화 이하의 온도에서 가열하여, 시멘트 페이스트의 결합력을 약화시켜, 보다 효율적인 고품질 재생골재의 생산에 유리한 기술이라 판단된다. 또한 마이크로파를 이용한 재생골재 처리 기술 또한 단순 처리에서 얻어진 재생골재에 비해 고품질 재생골재를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 경제성을 확보하는 것이 요구되며, 가열분쇄법의 경우 열원으로서 폐자원의 활용을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

그러나, 회수된 고품질의 재생골재는 건축물 등의 콘크리트의 원료로 사용되기 때문에, 장기적인 안정성에 대한 검증이 필요하며 따라서, 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 환경부, 전국 폐기물 발생 및 처리 현황 (2003).
2. 건설교통부, 건설폐기물 리사이클의 품질기준 및 촉진방안 (2002).
3. Takenaka Cooperation, Improved Mechanical Grinding Method, Japan (2000)
4. Arai, Yasuo, Cement Material Chemistry, 2nd Edition. Dainippon Tosho Publishing Co., Ltd., pp.83-90. (1998).
5. Buck, A. D., Recycled Concrete as a Source of Aggregate, ACI J., Title No.74-22, pp.212-219. (1997).
6. 안지환 외, Recovery of Aggregates from Waste Concrete by Heating and Grinding, geosystem engineering, (2002).