

환경과 사용성을 고려한 폐콘크리트 재활용 전처리 기술현황

Pre-treatment for dismantled concrete recycling considering environment and reuse



박원준 Won-Jun Park
강원대학교 건설융합학부 부교수
E-mail : wjpark@kangwon.ac.kr

1. 배경

최근 10년간 전세계적으로 시멘트 사용량은 급속하게 증가하는 추세이며, 동시에 골재와 콘크리트 생산량도 증가해 왔다. 건설재료 생산에서 배출되는 온실가스 가운데 시멘트는 가장 큰 이산화탄소 배출원이며, 콘크리트는 시멘트 소비와 함께 대량의 천연자원(골재)을 소비하고 있다. 이를 감축하기 위한 다양한 기술적 접근이 시도되었으며, 대표적으로 시멘트 제조에 소비되는 대체연료, 대체원료의 사용, 시멘트 제조시 에너지효율 향상, 산업부산물(플라이애쉬, 고로슬래그 등)을 활용한 시멘트 대체, 재생재료를 사용한 콘크리트 등이 있다. 한편, 시멘트 제조 및 활용단계가 아닌 콘크리트 생산 및 소비단계에 의 온실가스 배출 감소를 고려할 때, 재생재료를 사용한 콘크리트는 자원고갈 방지와 친환경 건설재료로서의 효과를 기대할 수 있다.

여기서, 콘크리트 제조에 활용될 수 있는 대표적인 순환골재는 철근콘크리트 구조물을 해체하여 발생하는 폐콘크리트에서 뽑아낸 골재를 칭한다. 현재, 전 세계적인 콘크리트 생산 및 소비와 함께, 노후 콘크리트 구조물 해체에 따라 발생하는 콘크리트 폐기물의 재활용은 매우 중요한 과제로 여겨진다. 현재 한국에서 발생하는 산업폐기물은 연간 약 130백만톤에 달하며, 이중 폐콘크리트 등의 건설폐기물이 50% 이상을 차지하고 있다. 특히, 콘크리트 폐기물은 건설 폐기물의 약 70%를 차지하고 있으며, 이는 전체 산업폐기물의 약 40% (46백만톤)에 해당하는 양이다. 대량발생되는 콘크리트 폐기물의 대부분은 재활용 처리과정을 거쳐 순환골재로 생산되고 있다. 재생산된 순환골재는 주로 도로 기층재, 노반재 및 콘크리트용 순환골재로 재사용되고 있다.

순환골재의 품질기준은 골재 흡수율과 비중에 의해서 구분되며, 순환골재 등급에 따라 구조용 콘크리트 골재, 비구조용 콘크리트 골재, 노반재 등으로 나뉜다. 일반적으로 순환골재가 천연골재에 비하여 낮은 품질을 가지는 이유는 골재표면에 부착된 모르타르(시멘트 경화체, cement matrix)에 기인한다. 높은 흡수율과 낮은 비중을 가진 저품질 순환골재는 콘크리트용으로 재사용하는

측면에서 제한이 있다.

이에 따라, 대부분의 순환골재가 콘크리트용 골재가 아닌 도로 노반재 및 기층재로 사용되고 있으나, 그 수요는 점차적으로 감소하고 있기 때문에, 콘크리트용 골재로서의 활용이 지속적으로 요구되고 있다. 또한, 도로용이나 매립용으로 사용되는 순환골재는 표면의 부차모르타르(시멘트 경화체)에 다량으로 함유된 Ca(OH)₂로 인한 알칼리 용출이 우려되고 장기적 관점에서 환경영향의 문제점을 가지고 있다. 2008년 말 발생한 시화호의 물고기 폐죽음 보도사례가 대표적인 예로 pH 9 이상의 알칼리성 순환골재 사용으로 인해 발생하였다. 물론 사후 대응으로서 “물과 접촉되는 수직·수평 배수층에는 pH 9.8 이하의 순환골재를 사용하여야 한다”는 신설항목이 건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률 시행령 개정안에 반영되기도 하였다.

결론적으로, 지속가능한 자원순환을 위해 대량으로 발생하는 폐콘크리트의 재활용은 순환골재의 적극적인 사용과 함께 친환경적인 사용도 중요하다. 이를 위해서, 현재 순환골재가 가지고 있는 낮은 비중, 높은 흡수율과 알칼리용출에 대한 대책이 동시

에 요구되며, 콘크리트용 골재로서의 사용하기 위한 품질개선도 요구된다. 이러한 관점에서 본고에서는 환경과 사용성을 고려한 폐콘크리트 재활용 전처리 기술현황에 대해 소개하고자 한다.

2. 폐콘크리트 재활용의 환경성과 사용성 개선

2.1 순환골재 생산효율과 전처리 일반

국내의 순환골재 품질규정에 근거한 순환골재 품질(고, 중, 저품질)별 대표적인 폐콘크리트 재활용 방식(생산기술)과 단위 폐콘크리트 투입에 따른 배출 물질의 분류(물질수지)에 관해서 [표 1]과 같이 요약한다. 한편, 국내의 순환골재 생산(건/습식), 재활용(정책/연구/실용화), 순환골재 표면개질, 골재 중심의 이론정립(특허/논문), 콘크리트 적용을 위한 재료 설계 분야별 국내의 현황은 [표 2]와 같이 상대적으로 평가하여 요약할 수 있다.

[표 1] 순환골재 품질별 생산-처리방식-최종 물질분류 (출처: 환경신기술정보시스템 공개정보에서 저자 요약)

품질	생산방법	폐콘크리트 (t)	비율											통당전력 사용량 (kWh/ton)	선별
			도로공사	굵은골재	잔골재	토사	석분	바이패스	이물질						
									고철	가연성 폐기물	페슬러지	기타	목재비닐		
고	임팩트크러셔 (3회)	1	-	0.259	-	0.244	0.496	-	0.001	-	-	-	-	2.4	자력선별 송풍기
		1,581	-	0.409	-	0.386	0.784	-	0.002	-	-	-	-		
중	임팩트크러셔 (3회)	1	-	-	0.238	0.349	0.409	-	0.004	-	-	-	-	3.5	자력선별 송풍기
		1,581	-	-	0.376	0.552	0.647	-	0.006	-	-	-	-		
중	임팩트크러셔 (3회)	1	-	-	0.085	0.309	0.336	0.267	0.002	-	-	0.001	-	2.4	자력선별 송풍기
		1,581	-	-	0.134	0.489	0.531	0.422	0.003	-	-	0.002	-		
중	시멘트페이스트 박리기(습식8회)	1	-	-	0.748	0.205	-	-	0.005	0.001	0.041	-	-	2.37	자력선별
		1,581	-	-	1.183	0.324	-	-	0.008	0.002	0.065	-	-		
고	임팩트크러셔 (5회)	1	-	0.26	0.261	0.126	0.347	-	0.003	-	-	0.003	-	3.27	자력선별
		1,581	-	0.411	0.413	0.199	0.549	-	0.005	-	-	0.005	-		
고/중	전기가열회전 (9회)	1	-	0.34	0.39	0.207	-	-	0.014	-	0.047	-	0.002		자력선별
		1,581	-	0.538	0.617	0.327	-	-	0.022	-	0.074	-	0.003		
고	멀티콘크러셔 (9회)	1	-	0.158	0.071 0.329	0.31	0.125	-	0.008	-	-	-	-	2.75	자력선별
		1,581	-	0.25	0.112 0.52	0.49	0.198	-	0.013	-	-	-	-		
고	복합마쇄기 (3회)	1	0.848	0.028	-	-	0.12	-	0.003	-	-	-	-	3.3	자력선별
		1,581	1.341	0.044	-	-	0.19	-	0.005	-	-	-	-		
고	복합마쇄기 (3회)	1	0.68	0.076	-	-	0.239	-	0.005	-	-	-	0.001	2.9	자력선별
		1,581	1.075	0.12	-	-	0.378	-	0.008	-	-	-	0.002		
고	복합마쇄기 (3회)	1	0.71	0.079	-	-	0.208	-	0.003	-	-	-	-	2.6	자력선별
		1,581	1.123	0.125	-	-	0.329	-	0.005	-	-	-	-		

[표 2] 국내외 페콘크리트 재활용 단계에서의 특성별 비교 (국내: ○, 국외: ●)

구분	R&D			논문			특허			상용화			제품화		
	미약	보통	우수	미약	보통	우수	미약	보통	우수	미약	보통	우수	미약	보통	우수
순환골재 생산			○/●		○	●			○/●			○/●			○/●
건식공정			○/●	○	●			○	●			○/●			○/●
습식공정		○	●	○	●			○	●			○/●			○/●
재활용률			○/●			○/●			○/●		○	●		○	●
콘크리트 재활용률			○/●			○/●			○/●		○	●		○	●
표면개질 (산/CO ₂)			○/●		○/●				○/●		○	●		○	●
표면개질 (산업부산물)	○/●			○/●			○	●		○/●			○/●		
이론정립		○/●		○	●		○/●			○/●			○/●		
콘크리트 성능 설계		○	●		○	●	○	●		○	●		○	●	
종합			○/●	○		●		○	●		○	●		○	●

2.2 순환골재 물성과 환경성 개선과 전처리

서론에 언급한 바와 같이, 08년 11월, 시화호 주변에 연약 지반처리(Sand Mat)재료로 순환골재를 사용한 현장에서 강 알칼리성 침출수가 발생하여 주변 생태계에 피해를 주었다는 내용이 언론에 보도되고, 12월경 현장조사를 실시하여 순환골재 침출수의 pH가 10~12의 강알칼리성임을 확인, 순환골재의 알칼리 침출수에 대한 대책의 필요성을 인식하였다. 2009년 6월에는 택지조성공사 현장에 사용된 순환골재가 우수에 노출되어 알칼리 침출수가 인근 지역으로 유출되어 문제가 발생할 수 있음을 언론에 보도되었다. 순환골재는 토양 오염우려기준 및 지정폐기물 유해물질 함유기준을 모두 만족하였으나, 수질오염 배출허용기준 중 pH는 11이상의 강알칼리성을 나타내어 만족시키지 못하였다. 또한 순환골재의 알칼리성은 20mm이하의 순환골재의 영향이 큰 것으로 분석되었으며, column 시험 등을 통하여 순환골재의 pH가 9.8이하이면 토양을 통한 침출수의 pH가 중성 범위에 포함될 수 있음을 확인할 수 있다. 국외의 경우 순환골재의 알칼리 침출수가 주변 식생에 영향을 주지 않도록 알칼리 침출이 우려되는 지역

은 사용을 제한하고 있으며, 국내에서도 알칼리수 침출이 우려되는 지역에 순환골재의 사용을 제한하거나 대응하는 순환골재 품질에 대한 방안이 새로 마련되었다. 한편, 미국의 경우 수질규정은 물에 대한 pH 규정을 pH 6.5~8.5로 설정하고 있으며, 연방 고속도로 관리국에 의한 보고서에 따르면 순환골재의 사용을 권장하지만 배수층이나 수원 근처에서 순환골재를 사용할 때는 침출에 대한 문제를 해결하도록 명시하고 있다. 빗물에 노출되는 경우의 순환골재 사용은 우수의 pH가 8.5를 초과하는 경우, 지표수로 방출되지 않도록 해야 하며 정화처리를 제한하여 순환골재로부터 용출된 물이 지표수로 흘러들어가지 못하도록 규정하고 있다. 또한, 일본의 경우 매립용 재료의 환경피해 예방과 관련한 법적기준은 환경청에서 작성한 토양오염에 관한 환경기준을 따르고 있으며, 특히 순환골재를 사용하여 하천이나 지하수 등의 수질이 오염되는 경우는 수질환경기준을 적용하는 것이 타당하다고 판단하고 있다. 아울러, 일본의 수질환경기준은 총 51개 항목에 대하여 제시하고 있으며, 이중 pH 범위는 5.8~8.6으로 규정한다. 영국에서도 순환골재의 품질기준에 pH 범위 기준을 표시하고 있으며 총 90여개의 용도에 대하여 191개의 제품으로 구분하고,

[표 3] 국내외 페콘크리트 재활용현황

한국	순환골재: 골재생산 기술 및 활용 중점.
유럽	폐기물로부터 재활용 건축자재 생산 및 활용하는 기술중점 폐기물: 페콘크리트, 폐블록, 폐유리, 폐석고보드
일본	순환골재 생산기술 2차 콘크리트 제품 활용기술 우수 파쇄기술, 골재선별기술, 부착모르타르 제거기술, 이물질 선별기술 페콘크리트 미분말 재자원화 기술, 오염수 처리기술
미국	골재생산 기술 및 활용 중점. 도로용 콘크리트에 적극활용 파쇄기술, 골재선별기술, 부착모르타르 제거기술, 이물질 선별기술
소결	국내의 경우, 본 연구에서 다루는 주요 폐기물에 관한 특하는 상당히 진행 순환골재: ①생산기술+산처리를 통한 pH저감, ②CO ₂ 를 활용한 표면탄산화를 통한 표면개질 ③생산기술+이물질 선별을 통한 고품질 생산 회수수: ①안정화+재사용기술, ②농축 및 탈수기술 슬러지: ①2차제품 재료로 활용기술, ②고형화기술 페콘크리트 미분말: ①2차제품 재료로 활용기술, ②시멘트 원료 활용기술

[표 4] 순환골재 개질에 관한 등록특허 현황

드라이아이스를 통한 순환골재 · 건설폐토석 pH 저감장치
수산화칼슘과 이산화탄소의 중화반응을 이용한 고품질 순환골재의 생산방법
연속공정형 순환골재 · 건설폐토석 pH 저감장치
순환골재 강제 탄산화 장치
순환골재를 이용한 수용액 상에서의 중금속 제거방법
촉진탄산화 반응을 이용한 순환골재 제조방법
중성화 촉진제 및 회수식 탄산수를 이용한 중성화 촉진 성능을 가진 이산화탄소 가스에 의한 순환골재의 중성화 장치
순환골재의 폐하 저감방법 및 그 장치
저알칼리성 순환골재 생산 장치
순환골재의 강 알칼리성 침출수를 중화하는 방법
황산을 공정수로 사용한 저속습식마쇄장치를 사용한 고품질순환골재 제조방법
이산화탄소로 처리된 순환골재를 함유한 친환경 호안블록의 조성물과 이를 이용하여 제조된 호안블록

pH를 6~9 또는 5~10으로 제한하고 있다.

요컨대, 페콘크리트 기반의 순환자원의 재활용 과정에서는 골재로서의 물성향상과 재사용에서의 환경영향을 동시에 고려해야 하는 상황에 직면하였다. 앞선 표-1에 제시한 바와 같이, 골재의 품질과 물질수지의 관계는 서로 역행하는 관계이다. 즉, 페콘크리트에서 원골재에 가까운 고품질의 순환골재를 생산할수록 에너지 소비를 제외하더라도 미분말, 석분을 비롯한 잔여물의 발생량이 상대적으로 늘어나고 후처리 또는 잔여물 재활용에 대한 문제도 수반된다. 이러한 배경과 함께 표-2에 제시한 관점에서 국내외 페콘크리트 관련 재활용 현황을 요약

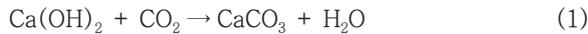
하면 [표 3]과 같다.

이상과 같은 문제 인식과 해결방안으로 대량 발생처리 및 재사용 측면에서 현재 보완되고 강화된 품질 및 사용기준에 따라 친환경 재료로서의 순환골재의 활용성에 대한 접근이 요구되었다. 즉, 전처리 과정에서의 순환골재의 물리-화학적 처리를 통한 골재의 품질 개선과 환경영향저감을 동시에 추구하는 접근이다. 대표적인 순환골재 개질에 관한 등록특허 현황은 [표 4]와 같이 요약한다.

[표 4]에 요약된 등록특허 현황과 같이 일반적으로 순환골재 표면에 부착된 모르타르(시멘트 경화체)에 다량의

Ca(OH)₂가 함유된 점에 고려하여, 탄산화(Carbonation) 및 산처리(Acid treatment)를 활용한 화학적인 처리, 즉 순환골재 표면개질에 관한 연구가 다수 보고되었다. 탄산화 표면개질은 고농도 이산화탄소의 건식 또는 습식 환경하에서 골재 표면 부착모르타르의 Ca(OH)₂와 반응시키는 촉진탄산화(Accelerated Carbonation)가 적용된 방법이다. 촉진탄산화에 의한 순환골재 표면개질 매커니즘은 아래의 식(1)-(2)와 같다. 산처리에는 대표적으로 황산, 염산 사용되며, 이를 적용한 순환골재 표면개질 매커니즘은 아래의 식(3)-(8)과 같다. 기계적인 1차 처리과정으로 생산된 순환골재에 화학적 2차 처리과정으로서 탄산화와 산처리가 적용된다.

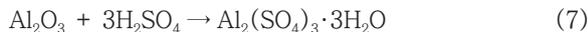
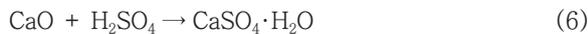
Reactions under CO₂:



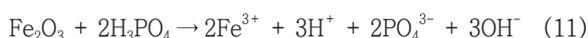
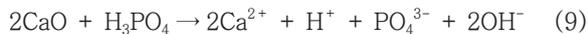
Reactions under HCl:



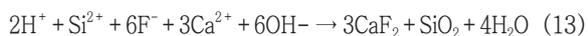
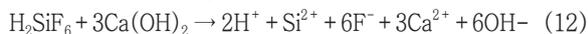
Reactions under H₂SO₄:



Reactions under H₃PO₄:



Reactions under H₂SiF₆:



한편, 탄산화는 높은 설비투자 비용, 단위시간당 골재처리량 한계, 미반응 이산화탄소 회수의 문제점을 가지고 있으며,

산처리는 높은 처리비용과 2차 오염수 발생 및 오염수 처리의 문제점을 가지고 있다. 하지만, 탄산화 기반 순환골재 전처리는 건식과 습식 탄산화 반응으로 구분하여 기술개발이 진행되어가고 있다. 건식반응에서는 탄산화 반응속도를 촉진하고 미반응 이산화탄소 회수효율을 높이는 설비적 측면에서 개선이 되고있으며, 습식반응에서는 건식보다 빠른 반응속도와 이산화탄소 흡착(Carbon Capture Storage, CCS)을 개선하는 초임계 이산화탄소, 나노버블형 습식반응과 같은 반응 매커니즘 측면에서의 개선이 이루어지고 있다. 한편, 산처리는 골재품질개선과 시멘트 매트릭스 제거에 탁월하지만 경제성과 2차 오염수 처리 측면에서 산업부산물 기반의 반응형 물질을 적용하고 표면을 개질하는 습식반응 측면으로 일부 개선된 연구가 보고되었다.

3. 맺음말

단일 건설폐기물로서 폐콘크리트의 비중은 가장 높고, 향후 지속적으로 발생이 예측된다. 지난 20여년 간 관련 법과 제도의 정비 및 다양한 연구개발을 통하여, 폐콘크리트의 재활용률은 95% 이상으로 유지되고 있다. 사용성 측면에서 현재의 순환골재는 60% 이상이지만, 도로, 지하 관련 공사부분에서 소요되는 건설재료로서 대량 사용되고 있지만, 최근 지속적으로 콘크리트용 골재로의 사용 전환 증가나 의무사용이 강화되고 있는 상황에 비추어 볼 때, 순환골재는 사용성과 환경성을 동시에 충족해야 함은 물론이고 환경배려적인 사용계획과 효율적인 콘크리트 성능설계에 대한 충족에 대한 사회환경적 요구가 강화될 것으로 예측된다. 환경성과 사용성의 동시 충족에는 경제성에 대한 지원과 산업계 인식전환도 결코 간과할 수 없는 부분이다. 본고에서 환경과 사용성을 고려한 폐콘크리트 재활용 전처리 기술에 대한 현황에 대해 소개하였으나, 이러한 기술에 대한 경제사회적 요구와 제도적 반영, 산업계의 환경인식 전환과 고품질 순환골재의 사용확대에 대한 다각적인 지원과 노력이 필요할 것으로 판단한다.

담당 편집위원 : 박원준(강원대학교)