

산업부산물 재활용 시멘트 콘크리트포장



남정희 | 정회원 · 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 도로연구실 수석연구원

1. 산업부산물 발생 현황

‘산업 제품의 제조, 가공, 수리, 판매나 에너지의 공급 또는 토목, 건축공사에서 부수적으로 생겨난 물건’으로 정의되는 산업부산물의 처리는 심각한 사회문제 중의 하나이나, 이의 효과적인 재활용은 천연자원의 고갈, 온실가스 문제, 기후 변화 등의 범국가적 이슈 해결에 중요한 역할을 담당할 수 있다. 특히 시멘트를 주원료로 사용하는 콘크리트포장의 경우, 천연골재의 고갈, 석회석 채굴로 인한 자연 훼손, 에너지 다 소비형인 시멘트 산업을 이용해야 한다는 비판 등에 대해 산업부산물을 재활용함으로써 친환경적 산업으로 그 역할 변화를 모색할 수 있다. 본 고에서는 대표적인 건설산업 부산물인 ‘순환골재’, 전력산업 부산물인 ‘플라이애시’, 그리고 철강산업 부산물인 ‘고로슬래그’를 활용한 시멘트 콘크리트포장에 대해 논하고자 한다.

1.1 건설산업 부산물¹⁾

2008년 전국적으로 발생된 폐기물의 총량은 약 1.3억 톤이며, 이중 건설산업 폐기물은 50%인 62.5백만 톤에 이르고 있다. 발생량으로 보면 전년

대비 83만 톤 정도 증가하였으나 발생 비율로는 약 1% 감소된 수치이다. 특히 대표적인 건설산업 폐기물인 폐콘크리트는 2008년 기준 42.3백만 톤으로 전체 건설산업 폐기물의 63%를 점유하고 있으며, 총 폐기물량의 32%를 차지하고 있다.

표 1. 연도별 건설폐기물 발생 현황

(단위 : 톤)²⁾

구분	구 분					계
	폐콘크리트	페아스콘	페토석	혼합건설폐기물	기타	
2005	28,490	5,615	2,484	10,428	44	47,062
2006	40,258	7,911	3,218	8,756	12	60,155
2007	43,021	8,094	2,592	7,935	11	61,654
2008	42,282	9,231	2,786	8,177	9	62,485

건설폐기물 재활용은 1992년 제정된 ‘자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률’을 기점으로 2000년 이후 크게 증가하여 2008년에는 97.5%의 재활용률을 나타내고 있으나, 도로보조기층 이상을 의미하는 실질 재활용률은 2006년 약 15%에 불과하다.

따라서 제1차 건설폐기물 재활용기본계획(2007~2011년)에서는 폐콘크리트의 재활용 확대를 위하여 순환골재의 고부가가치화 및 일정규모 이상의 정부 발주 공사에서는 의무 재활용을 하도록

규정하였으며, 실질 재활용 비율을 2011년까지 30%로 확대하고, 총 골재 공급 비율에서도 13% 공급하는 것을 목표로 설정 하였다.

표 2. 건설 부산물의 처리 현황³⁾

구분	2004		2005		2006		2007		2008	
	발생량 (톤/일)	비율 (%)	발생량 (톤/일)	비율 (%)	발생량 (톤/일)	비율 (%)	발생량 (톤/일)	비율 (%)	발생량 (톤/일)	비율 (%)
계	148,489	100	134,906	100	168,985	100	172,005	100	176,447	100
매립	10,976	7.4	3,491	2.6	3,935	2.3	3,169	1.8	2,914	1.7
소각	2,949	2.0	871	0.6	1,179	0.7	1,131	0.7	1,423	0.8
재활용	134,557	90.6	130,451	96.7	163,871	97.0	167,705	97.5	172,111	97.5

표 3. 순환골재의 실질 재활용률 목표⁴⁾

구분	2006	2007	2008	2009	2010	2011
순환골재의 실질 활용량(m ³)	3,551,865	4,640,733	5,857,244	7,202,275	8,676,471	10,280,877
순환골재의 건설 현장 실질 재활용률(%)	16	18	21	24	27	30
국내 전체 골재 사용량 대비 순환골재 사용 비율(%)	2.4	3.2	4	4.9	5.9	7

1.2 전력산업 부산물⁵⁾

석탄을 사용하는 화력발전 산업의 부산물인 석탄회는 발생 위치에 따라 플라이애시, 바텀애시, 신더애시로 구분되는데, 이들은 전체 석탄회 발생량 중 각각 75~80%, 10~15% 및 5% 정도를 차지한다. 2009년 석탄회 발생량은 유연탄이 686만 톤, 무연탄이 134만 톤으로서 합계 820만 톤인데 이는 2005년도에 비해 약 1.5배 증가된 양이다. 향후 신규 석탄 화력 후속기 건설로 인해 2012년도와 2015년도의 전체 석탄회 발생 예상량은 각각 831만 톤과 923만 톤으로서 석탄회 발생량은 지속적으로 증가될 예정이다.

2009년도 플라이애시의 재활용률은 68%로서 2005년도 대비 11%가 증가하였으며, 2015년도 재활용률 예상은 약 75%정도로 지속적인 증가가 예상되고 있다. 2009년 플라이애시 발생량의 58.2%와 7.3%가 각각 레미콘 혼화재와 시멘트 원료로서 재활용된 반면, 바텀애시는 발생량의 6.6%가 시멘트 부연료로, 30.2%가 프리캐스트 콘크리트 골재 및 성토용 골재로서 재활용되었으며 60.3%가 매립되었다.

표 4. 플라이애시 및 바텀애시의 재활용 분야 (2009년)⁵⁾

구분	발생량 (천톤)	재활용량 (천톤)					매립 등
		시멘트 원료	레미콘	골재	기타	소계	
플라이애시	6,850	502 (7.3%)	3,990 (58.2%)	-	158 (2.3%)	4,650 (67.9%)	2,200 (32.1%)
바텀애시	1,150	100(6.6%)	-	456 (30.2%)	42 (2.8%)	598 (39.6%)	912 (60.4%)

1.3 철강산업 부산물⁶⁾

우리나라의 2008년 조강 생산량은 53.3백만 톤으로 세계 6위의 생산국가이다. 철강 슬래그는 로의 종류 및 사용원료에 따라 고로슬래그와 제강슬래그로 구분되고, 제강슬래그는 다시 전로슬래그와 전기로 슬래그로 구분된다. 철강 슬래그의 발생량은 2006년 17,810천 톤, 2007년 18,905천 톤, 2008년 19,452천 톤으로 지속적인 증가 추세에 있다.

고로슬래그는 철광석, 코크스, 석회석을 원료로 하는 고로(용광로)에서 선철을 제조하는 공정에서 발생되며, 급냉 수쇄슬래그와 서냉 슬래그로 구분된다. 2010년 현재 고로슬래그는 일관 제철 업체인 POSCO 포항공장 및 광양공장과 현대제철의 당진공장에서만 공급되고 있으며, 현대제철 당진공장의 경우 2010년 11월에 고로 2호기가 추가로 가동될 예정으로 향후 고로슬래그의 공급량은 2009년 대비 약 30% 증가될 것으로 예상된다.

2008년 고로슬래그는 총 10,228천 톤이 발생되어, 시멘트 및 콘크리트 원료(69.4%), 도로용 골재

(25.7%), 규산질 비료(3.2%), 성토용 골재(0.7%), 기타(1.0%)로 재활용 되고 있는 실정이다.

표 5. 고로슬래그의 재활용 현황 ⁷⁾

용도	2005년		2008년	
	사용량(천톤)	비율(%)	사용량(천톤)	비율(%)
시멘트	5,908	69.3	7,098	69.4
도로용	2,043	24.0	2,628	25.7
성토용	21	0.2	69	0.7
비 료	485	5.7	329	3.2
기 타	67	0.8	104	1.0
합 계	8,526	100.0	10,228	100.0

2. 산업부산물 재활용 시멘트 콘크리트포장

2.1 순환골재 활용¹⁾

순환골재는 엄밀한 의미에서 재생골재와 다르게 쓰이는 용어이다. 즉, 기존의 폐콘크리트를 처리하여 골재를 재사용할 경우 이를 재생골재로 명명하였으나, 순환골재는 일정 수준 이상의 품질기준을 만족하는 재생골재에 한해서 품질인증을 부여하고 이를 순환골재로 명칭하는 것이다.

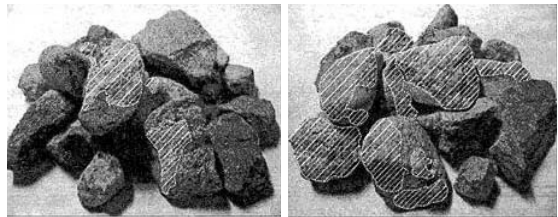
순환 잔골재 및 굵은 골재는 콘크리트 구조물의 해체공사에서 반출된 폐콘크리트를 다시 분쇄하여 제조하기 때문에, 골재의 표면에 페이스트나 모르타르의 부착 및 이물질이 포함될 가능성이 높다. 이로 인하여 순환골재는 천연골재에 비해 공학적 특성 및 내구성의 신뢰도가 낮은 편으로 현재 구조 재료로서의 활용도는 낮은 편이다.

따라서 순환골재를 성토, 복토용 저급 채움재 이상인 콘크리트포장 재료로 사용하기 위해서는 물리적 성질이 천연골재와 동등 또는 유사해야 하며, 이에 대한 관련기준인 KS F 2573(콘크리트용 순환골재, 2006)을 만족하여야 한다. 이상과 같은 기준을 만족하는 순환골재의 경우 도로 보조기층 및 빈배합 콘크리트 재료로의 활용이 가능하며, 더 나아가 재

료의 물성 및 품질변동에 대한 신뢰도를 확립할 수 있는 국가적인 시스템을 갖추어 표층재료로의 적극적인 활용 방안을 모색해야 할 것이다.

표 6. 콘크리트용 순환골재의 물리적 성질(KS F 2573)

항목	콘크리트용 굵은 골재		콘크리트용 잔골재	
	순환골재	천연골재	순환골재	천연골재
절건 밀도(g/cm ³)	2.5 이상	2.5 이상	2.2 이상	2.5 이상
흡수율(%)	3.0 이하	3.0 이하	5.0 이하	3.0 이하
유기 불순물(%)	1.0 이하	-	1.0 이하	-
0.8mm채 통과량(%)	1.0 이하	1.0 이하	7.0 이하	3.0 이하



(a) 고품질 순환골재

(b) 저품질 재생골재

그림 1. 국내에서 생산되는 순환 및 재생골재

2.2 플라이애시 활용⁴⁾

혼화재로서 플라이애시를 혼입한 콘크리트에 대한 연구는 1930년부터 시작하였으며, 1999년 일본에서는 ‘플라이애시를 사용한 콘크리트의 배합설계·시공지침·동해설’이 제정되었고, 2009년 국토해양부에는 ‘산업부산물 재활용 도로포장지침’을 발간하였다.

플라이애시를 콘크리트에 혼합함으로써 유동성 개선 및 단위수량 감소, 수화열 감소, 장기강도의 증진, 건조수축 감소, 수밀성 및 내구성의 향상, 알칼리-골재 반응 억제 등의 효과가 있을 수 있으며, 일 반적인 단점으로 연행공기량의 감소, 응결시간 지연 등을 들 수 있으나 공기연행제 및 공사시기 조절을 통한 기술적 해결이 가능하다.

국토해양부는 2009년 ‘도로공사표준시방서’를 개정하면서 ‘알칼리 골재 반응의 방지를 위해서는

시멘트의 일정 양을 산업부산물(플라이애시 또는 고로슬래그 미분말)로 대체할 수 있다' 라는 조항을 신설하였다. 한국도로공사의 '고속도로공사 전문시방서' 2009년 개정서에도 '플라이애시를 사용한 포장용 시멘트 콘크리트의 배합기준'이 신설되어 제시되었으며, '플라이애시를 사용한 콘크리트포장 알칼리-실리카 반응 억제 배합'에 대한 자체 지침을 이미 적용하고 있다.

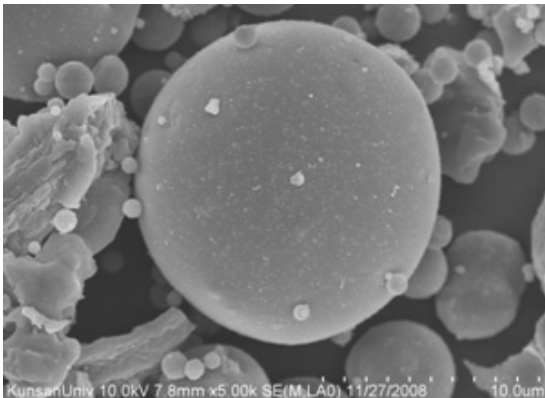


그림 2. 플라이애시 SEM 이미지



그림 3. 플라이애시 시험시공(국도 46호선)

2.3 고로슬래그 미분말 활용⁶⁾

고로슬래그의 경우 1995년 대한토목학회에서 '고로슬래그 미분말을 이용한 콘크리트의 설계 시공 지침(안)'을 제정하였으며, 2002년 콘크리트용 고로슬래그 골재, 2004년 콘크리트용 고로 슬래그 미분

말, 2006년 고로슬래그 시멘트에 대한 KS 규격이 완성되었다. 고로슬래그 중 급냉 수쇄슬래그는 클링커 분쇄시 혼합 분쇄하거나 미리 미분말화 하여 콘크리트용 혼화재료 또는 혼합 시멘트 제조시 사용된다.

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특징으로는 콘크리트의 유동성을 증진시킴으로 인한 단위수량 저감이 가능하고, 초기재령시 강도 발현이 지연되나, 장기재령시 강도 증진효과가 우수하며, 수화열에 의한 온도상승 억제, 알칼리-골재반응의 억제, 황산염이나 해수에 대한 화학저항성의 향상, 염화물 이온이나 산소의 침투에 대한 저항성 향상 등의 효과를 갖는 것이 지금까지의 많은 조사나 연구에 의해 명확해져 있기에 건설분야 전반에 걸쳐 폭 넓게 활용되고 있다. 그러나 산업부산물 재료의 과거 품질관리 미비로 인한 부정적인 인식으로 인해 도로포장 분야에서의 사용은 번번이 제외되어 왔다.

플라이애시와 마찬가지로 2009년 개정된 '도로공사표준시방서- 3.4 배합' 편에서 내구성 향상을 위해 사용할 수 있는 근거가 마련 되었으므로, 적극적인 시험포장을 통한 실용화 방안이 마련되어야 할 것이다.

3. 결 언

국내 도로분야는 1970년 경부고속도로 개통으로 시작된 전국 일일 생활권 실현 이후, 전국 반일 생활권 실현을 위해 숨 가쁘게 변하고 있다. 그동안 국토의 대동맥을 자부하는 고속도로의 연장은 3,447km(09)⁸⁾가 건설되었으며, 주요도시를 연결하는 간선도로인 일반 국도의 연장은 무려 13,549km(09)⁹⁾에 이르고 있다. 특히 자동차 전용도로이며 고속으로 주행이 이루어지는 고속도로의 경우는 수명이 길고, 유지보수가 거의 필요없으며, 중차량에 대한 지지력이 우수한 콘크리트 재료로 건설되는 경향이 많다. 20년전 개통된 88고속도로를 시작으로 중부고속도로, 제2중부고속도로, 그리고 서해안고속도로 등이 이미

콘크리트 재료로 건설되었으며, 고속도로 총연장의 61%(’09) 이상이 콘크리트 재료로 건설되어 있는 실정이다. 앞으로도 국토공간구조 재편과 국토 경쟁력 강화를 위하여 전국차원의 7×9 간선도로망 6,527km 구축이 계획되어 있으며, 2020년까지 완공 목표로 하고 있어 콘크리트 재료의 사용량은 지속적으로 증가될 것으로 예상된다. 콘크리트포장의 많은 장점으로 인해 지속적으로 고속도로에서의 사용이 증가되고는 있으나, 천연골재 부족으로 인한 골재의 품질 저하, 일부 콘크리트포장구간에서 발생하는 조기파손 및 알칼리-골재반응에 의한 장기 공용성 저하는 콘크리트포장이 갖는 문제점 중의 하나이며 이는 산업 부산물의 효과적인 재활용을 통해 일정부분 해결의 고리를 찾을 수 있을 것이다.

1992년 제정된 ‘자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률’ 활성화에 따른 산업부산물에 대한 정부의 적극적 사용 장려 및 2004년에 KS 규격화된 ‘플라이애시’ 및 ‘콘크리트용 고로슬래그 미분말’, 2006년 제정된 ‘콘크리트용 순환골재’의 품질 규정으로 산업부산물의 콘크리트포장 적용 및 양질의 재생골재를 제도적으로도 사용 가능하게 된 것이다.

재생골재 및 순환골재의 시멘트 콘크리트포장 적용을 위해서는 체계적인 시스템을 통한 신뢰성 있는 골재의 안정적 공급과 최적의 적용을 위한 연구업무 및 시험포장이 지속적으로 진행되어야 할 것이다. 그리고 플라이애시 및 고로슬래그 미분말의 적용으로 일부 현장에서 발생된 알칼리-골재반응으로 인한 포

장파손 문제에 대한 효과적인 해결, 시멘트 대체 재료로서의 산업부산물 사용을 통한 원가 절감, 고에너지 소비형 산업이라는 부정적 이미지 해소 및 환경부하 저감 등이 가능할 것이다.

이와 같이 단순한 매립재 혹은 환경오염원으로 분류되는 산업부산물에 대한 시멘트 콘크리트포장 분야의 적극적 활용을 통한 고부가가치의 창출은 늦었지만 진정한 의미의 환경 친화적 건설의 작은 출발점인 것이다.

참고 문헌

1. 이진철 외 3인, “건설산업 부산물의 발생 현황과 환경성”, 한국콘크리트학회-2010년 봄 학술발표 대회-콘크리트와 환경(별책), 2010년 봄 학술발표대회
2. 환경부·국립환경 과학원, 2008 전국폐기물 발생 및 처리현황, 2009
3. 환경부, 건설폐기물 재활용 기본계획 2007~2011년, 2006.12.
4. 임진규 외 1인, “전력산업 부산물의 현황 및 재활용”, 한국콘크리트학회-2010년 봄 학술발표 대회-콘크리트와 환경(별책), 2010년 봄 학술발표대회
5. 한국남부발전, 석탄회재활용 선진화 전력, 2009
6. 김길희 외 1인, “철강산업 부산물의 현황 및 재활용”, 한국콘크리트학회-2010년 봄 학술발표 대회-콘크리트와 환경(별책), 2010년 봄 학술발표대회
7. 한국철강협회, 철강슬래그 2008년 재활용 실적 및 2009년 계획, 2009
8. 국토해양부, 도로업무편람 2009