

무기계 폐기물의 친환경 토건 재료의 활용

글 _ 안지환, 한기천, 조계홍, 이임창 || 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부
ahnjw@kigam.re.kr

1. 서론

대량으로 발생하는 무기 폐기물은 환경적인 유해성의 높고 낮음에 관계없이 환경적인 부하가 높기 때문에 그 처분 및 재활용에 있어서도 대량으로 사용되어야 한다. 특히, 무기 폐기물의 발생 특성상, 균일하지 못하고 함유율이 높아 운반, 처리, 저장, 활용에 있어 여러 가지 문제점을 가지므로, 처리 공정이 추가되어 재활용 시 사회적 인식뿐만 아니라 시장에서의 가격 경쟁을 가지기가 쉽지 않다.

철강슬래그, 페콘크리트, 생활폐기물 소각 바닥재, 화력발전소 바닥재 등 국내 고상 무기계 폐기물은 연간 4,000천만톤 이상 발생하고 있다. 이 중, 철강슬래그, 페콘크리트 등은 각각 100%(2005년), 90%이상(2004년)의 재활용률을 보이고 있으나, 성토재, 노반재, 복토재 등으로의 활용에 치우쳐 있다.^{1,2)} 반면에 생활폐기물 소각 바닥재는 재활용률이 3.7%로 거의 재활용 되지 못하고 있으며, 가장 큰 원인은 중금속 용출 등으로 인해 환경적인 안정성을 보장 받지 못하기 때문이다.³⁾ 그 밖에 화력발

전소 석탄회 중 바닥재의 경우도 대부분 재활용되지 못하고 있다.

반면에 유럽 국가들은 각국 및 유럽 연방 차원에서 이들 고상 무기계 폐기물의 재활용률을 높이기 위한 연구가 활성화되어 있으며, 네덜란드 등 유럽 국가 중 재활용률이 상대적으로 더 높은 국가들의 재활용 현황 및 실적 등을 벤치마킹함으로써 재활용률을 높이하고자 하고 있다.³⁾

본 고에서는 대량으로 발생하고 있는 고상 무기계 폐기물의 국내와 상대적으로 재활용률이 높은 유럽의 재활용 현황을 조사함으로써 향후 국내 고상 무기계 폐기물의 재활용 진작 방안을 살펴보았다.

2 국내 고상 무기계 폐기물의 발생 및 활용 현황

Table 1은 철강슬래그, 페콘크리트, 생활폐기물 소각 바닥재 등 주요 고상 무기계 폐기물의 발생량, 재활용률, 처리 용도를 나타낸 것이다.

철강슬래그는 철광석, 코크스, 석회석 등을 원료로 하

Table 1. 국내 주요 고상폐기물의 발생량, 재활용률, 재활용 및 처리방법

구분		발생량(만톤)	재활용률(%)	주요 재활용 및 처리방법
슬래그 (2001년)	고로	850	100.0	· 시멘트 원료, 첨가제, 혼화재 · 도로용기층재, 성토용
	제강	810	101.1	
페콘크리트(2004년)		3,900	90.0이상	· 도로용 기층재, 성토용, 매립
생활폐기물 (2004년)	바닥재	36.0	3.6%	· 대부분 매립, 벽돌 제조 · 고품화 매립
	비산재	4.0	-	
화력발전소 (2004년)	Fly ash	393	82.0	· 시멘트 원료, 콘크리트 혼화재
	Bottom ash	98	-	

Table 2. 유럽국가들의 고상 폐기물 발생량 및 도로에서의 재활용

Material		Use of recycled materials in roads(10 ⁶ metric tons)				
		Country				
		Sweden	Denmark	Germany	Netherlands	France
Asphalt concrete and rubble	Annual production	0.8 (1999)	0.824	12.0	10.7	-
	Amount used	0.76	0.824	6.0	10.7	-
Building and road demolition waste	Annual production	1.5-2.0	1.544	20.0	9.2	5.0
	Amount used	Small quantities	1.186	11.0	9.2	-
Blast furnace slag	Annual production	1.0 (1999)	-	8.3	1.2	5.0
	Amount used	0.7	-	8.3	1.2	1.1
Steel slag	Annual production	0.2	0.050	4.8	0.5	1.3
	Amount used	0.2	0.050	4.4	0.5	0.2
WTE bottom ash	Annual production	0.34	0.420	2.6	0.8	1.5
	Amount used	0.34	0.380	1.8	0.8	1.0
Coal bottom ash	Annual production	0.184	-	0.4	0.08	-
	Amount used	0.184	-	0.3	0.08	-

(Source : Recycled materials in European Highway Environments: Uses, Technologies and Policies, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation (2000))

여 고로에서 선철을 만들어 내는 제선공정에서 발생하는 고로슬래그, 전로에서 강을 제조하는 제강 공정 중에 발생하는 전로슬래그, 고철을 주원료로 사용하여 강을 제조하는 전기로에서 발생하는 전기로 슬래그로 크게 나눌 수 있다.⁴⁾ 이 중 고로슬래그는 냉각방법 및 용도에 따라 고로슬래그를 고압의 냉각수에 의해 냉각시키는 수재 슬래그와 약간의 냉각수를 살포하고 자연냉각되도록 방치하는 괴재 슬래그로 구분되며, 수재슬래그는 잠재 수경성을 가지기 때문에 혼합시멘트로서 활용성이 높고 수재 슬래그는 충분히 냉각시킨 후 일정한 크기로 파쇄하여 골재 등으로 활용한다. 반면, 제강 슬래그는 고로 괴재슬래그와 유사하게 수냉 또는 공냉 처리하여 괴상의 슬래그를 만든다.⁵⁾ 고로슬래그가 시멘트 원료 및 도로용 골재 등으로 비교적 높은 가치를 지니는 재활용 용도로 활용되는 것과는 달리 제강 슬래그는 화학적 팽창성, 중금속 용출 등의 문제점으로 인해 주로 도로 노반재용, 성토재용 등 저가용으로 활용되고 있다.¹⁾ 이들 철강슬래그 모두 2005년 현재 재활용률이 100%를 넘고 있으나 제강 슬래그의 경우, 저가용인 성토재용 골재로부터 안정화 기술을 통해 고부가가치로의 활용성을 추구할 필요가 있다.

페콘크리트는 2004년 현재 약 4,000만톤 발생하는 건설폐기물의 60%이상을 차지하는 폐기물로서 단일폐기물로는 가장 많은 발생량을 가지는 폐기물이다.²⁾ 페콘크리트의 조성이 시멘트 수화물, 굵은골재, 잔골재이므로 골재 자체의 물성으로는 가장 천연골재에 적합한 특성을 갖는다고 할 수 있다. 일반적으로 여러 파쇄기를 거쳐 입자 크기를 감소시켜 재생골재로 사용되고 있는데, 2004년 현재 재활용률이 90%이상이지만 주된 재활용 용도는 성토재 등으로 천연골재의 대체재로서의 활용은 거의 되지 않고 있는 실정이다. 페콘크리트를 처리하여 생산되는 재생골재가 콘크리트용 골재 등으로 활용되지 못하고 대부분 성토재 등으로 활용되는 이유는 처리시 골재와 시멘트 페이스트의 분리가 완전히 이루어지지 않기 때문이다. 재생골재 표면에 붙어 있는 시멘트 페이스트는 골재에 비해 상대적으로 비중이 낮고, 흡수율이 높으며, 마모율이 높으며, 궁극적으로 콘크리트의 작업성을 떨어뜨리고, 재생골재가 사용된 재생콘크리트의 압축강도, 동결융해저항성 등 콘크리트의 제반특성이 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 낮게 된다.^{6,7)} 이러한 문제점을 극복하기 위해 물리적 및 화학적 처리가 소개되고 있는데 그 중 하나가 가열 후 분쇄하는 방법이다. 이 방법은 페콘크

Table 3. 폐기물별 도로재료로서의 적합성

Properties		Methods	MSWI	BDCC	RCC	BOFS	EAFS	CBFS	VBFS
Grading		EN 933-1	x	x	x	x	x	x	
Chloride content		EN 196-21			x				
Swelling potential		EN 1744-1				x			
Soluble sulfate		EN 1744-1	x	x				x	
Organic content		NF P 94-055		x					
Particle strength pack	Resistance to fragmentation	EN 1097-2		x	x	x	x	x	
	Resistance to wear	EN 1097-1		x	x	x	x	x	
Sand equivalent		EN 933-8							x
Reactivity		EN 13286-44							x
Hydraulicity		NF P 98-107							x
Water absorption coefficient		EN 1097-6		x	x	x	x	x	
Water content of fine aggregates		EN 1097-5							
Carbon content		EN 13137							
Sulfate content		EN 196-2							
Reactivity of lime		NF P 98-111							
Amount of fines		EN 933-9		x	x	x	x	x	
Voids volume		EN 1097-4		x	x	x	x	x	
Absorbing capacity of fines		NF P 98-256-1		x	x	x	x	x	
Resistance to abrasion		EN 1097-8				x	x	x	
Particle shapes		EN 933-6		x	x				
Plasticity		BF P 94-051							
Compaction pack	Modified proctor	EN 13206-2	x	x	x	x	x	x	
	Standard proctor	EN 13206-2	x	x	x	x	x	x	
	Vibration table	En 13206-5	x	x	x	x	x	x	
Permeability		Alt-Mat	x	x	x	x	x	x	
Resistance to freezing and thawing		EN 1367-1	x	x	x				
Bearing capacity		EN 13206-1	x	x	x	x	x	x	

MSWI Municipal solid waste incineration bottom ash; BDCC Building demolition crushed concrete; RCC road crushed concrete; BOFS Basic oxygen furnace slag; EAFS Electric arc furnace slag; CBFS Crystallized blast furnace slag; VBFS Vitrified blast furnace slag
 (Source : ALT-MAT : Alternative materials in road construction, Final report, 2001)

리트를 300-500°C로 예열하여 시멘트 페이스트의 물성을 선택적으로 약화시켜 후처리인 분쇄시 골재를 손상시키지 않고 선택적으로 분리시키는 방법이다.^{8,9)} 이 방법에 의해 제조된 재생골재는 천연골재 등에 비해 연석 등의 함유량이 낮아 그 물성이 천연골재와 동등하거나 더 높은 특성을 갖는 것이 확인되었다. 하지만 가열에 따른 경제성의 확보, 대량처리 곤란 등으로 실용화에 있어 해결되어야 할 문제를 가지고 있다.

생활폐기물 소각 바닥재는 생활폐기물을 소각한 후 스토키 바닥에 잔류하는 물질로 국내에서는 2004년 기준 약 36만톤 발생되어 일반폐기물로 분류되어 거의 전량 매립되고 있다. 생활폐기물의 주요 구성물질은 철편류, 자기류, 슬래그류 등으로 유럽 등에서는 일반적으로 자력선별, 분급 등의 선별, 분리 공정을 통해 도로 재료(노반

재) 등으로 활용되고 있다. 다만, 중금속, 염류 등의 용출에 대한 환경적인 유해성을 지니고 있어 물리적인 처리 전후에 중금속 안정화, 염류 제거 등의 처리를 거치는 것이 보통이다.³⁾ 안정화 및 물리적 처리를 거친 후 제방, 콘크리트 2차 제품의 골재 등으로 활용되고 있으며, 네덜란드, 독일, 프랑스, 덴마크 등 유럽 국가들은 환경적 규제치가 상이하지만 발생 바닥재의 60% 이상을 재활용하고 있다. 정부는 매년 꾸준히 늘고 있는 쓰레기 매립량을 줄이기 위해 생활폐기물 소각물을 지속적으로 높일 계획으로 생활폐기물의 60%가 가연성인 점을 감안, 생활폐기물 소각물을 지난 2003년 14.5%에서 오는 2008년 28%로 약 두 배로 높일 계획이다.¹⁰⁾ 또한 폐기물 매립량은 2001년 1천424만8천m³, 2002년 1천533만4천m³, 2003년 1천564만4천m³ 등으로 매년 꾸준히 늘고 있으나 쓰레기

소각장 건설은 주민반발에 부딪혀 점점 어려워지고 있어 소각재에 대한 적절한 대응책이 시급한 실정이다.

화력발전소 바닥재는 석탄을 원료로 1,500°C 이상의 고온에서 용융된 후 잔류된 물질이 보일러 하부로 낙하된 후 해수에 냉각되어 분쇄된 후 바다에 매립된다. 현재 화력발전소 바닥재는 연간 약 100만톤 발생하고 있으며, 재활용은 거의 전무한 상태이다.

3. 유럽의 고상 무기계 폐기물의 재활용 현황

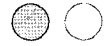
유럽연합은 90년대 초부터 부산물 및 폐기물에 대한 관심이 고조되어 EC Priority Waste Streams Programme (1991)에서 Construction and Demolition Waste Project Group(1992)을 발족시켜 건설 분야에서 발생하는 모든 폐기물의 관리를 강화하였다. 또한 Fifth Action Programme on the Environment(1993)에 의해 환경적인 고려를 포함하여, 가장 효율적인 비용으로 부산물을 처리하는 전과정적 접근(life-cycle approach, LCA)을 시도하였다.¹¹⁾ 근래에 들어, 골재 소비가 증가함에 따라 자원의 보존을 위해서라도 잠재적인 대체골재원에 대한 재활용이 필요함을 인식하여 고상 무기계 폐기물에 대한 재료로서의 재평가가 이루어졌으며, 여러 분야에서 사용가능한 것으로 인식되고 있다. 특히, 대량으로 소비할 수 있는 고속도로의 건설 재료로서 고상 폐기물의 활용성에 대해 연구가 집중되고 있다. Table 2는 여러 유럽 국가의 고상 폐기물의 발생량과 재활용량을 나타낸 것이다. 상대적으로 프랑스의 재활용률이 저조하지만 대부분의 국가에서는 고려된 폐기물의 80% 이상이 재활용되고 있으며, 네덜란드의 경우 고려된 모든 폐기물 전량이 재활용되고 있다. 특히, 국내에서의 재활용비율이 매우 낮은 생활폐기물 소각 바닥재, 화력발전소 바닥재 등의 재활용률은 주목할 만하다.

고상 무기계 폐기물의 도로재료로서의 활용을 위해서는 재료로서의 물리적, 공학적인 성질뿐 만 아니라 환경적인 면을 충족시켜야 한다. 이러한 물성은 궁극적으로는 본래의 사용되는 천연재료와 동등한 성질을 가져야만 한다는 것으로 의견이 좁혀지고 있는 경향이 있다. 그러

나, 국가별로 여러 규격이 존재하는 유럽의 상황에서 폐기물의 도로재료로서의 활용을 확대하기 위해 보다 효과적인 시험방법을 제공하기 위한 프로젝트들이 수행되고 있으며, 유럽 9개국이 참여한 ALT-MAT project(Alternative materials in road construction project)도 그 중 하나이다.¹²⁾ 1998-1999까지 2년간 수행된 이 project에서는 유럽 여러 국가의 도로재료로서의 물리적, 환경적인 시험방법을 고려하여 적합한 시험 방법을 찾고자 하였다. Table 3은 물리적 시험방법에 대한 결과로서, 대상 물질에 따라 도로재료로서의 활용을 위해 각 항목별 시험방법 및 그의 적합성에 대한 결과이다. 이러한 결과를 토대로, surface course, road base, sub-base, subgrade 등 도로재료로서 적용가능한 각 폐기물의 적합성 여부를 결정하고 적정 시험방법에 대한 규격화를 추진하고 있다. 도로재료로서의 활용에 있어 환경적인 면에 있어서는 물리적, 공학적인 물성에 비해 각국의 규제 등이 매우 상이하여 그 평가 방법 및 평가 기준을 정의하기 위해 아직까지 연구가 진행 중에 있다. 다만, 실제 적용사례가 전무한 국내현실과는 달리 오래전부터 많은 양의 폐기물이 도로 재료로서 이미 활용되었기 때문에 실험실적 연구결과와 실제 적용시의 결과와의 비교를 통해 보다 설득력있는 자료를 축적하고 있다. 특히, 2004-2006년 까지 수행된 SAMARIS(Sustainable and Advanced MATerials for Road InfraStructures) project는 실제적용을 고려한 장기적인 용출 등 환경적인 영향에 대한 평가에 주안점을 둔 것으로 (Performance-based specification)¹³⁾, 이러한 객관적인 결과를 바탕으로 고상 무기계 폐기물의 도로재료로서의 재활용을 위한 guideline이 설정되고 있는 실정이다.

4. 결 론

연간 수백만톤이상 대량으로 발생하는 고상 무기계 폐기물은 1차적으로 대량으로 활용가능한 처분 또는 재활용 용도가 필요할 것이다. 따라서, 2차선의 1킬로미터의 도로 건설을 위해 약 10,000m³의 골재를 필요로 하는 도로재료로서의 활용은 매우 효과적인 재활용 방안으로서 고려될 수 있다. 공학적, 환경적인 평가방법, 실제 적용에



의한 실측자료의 축적 등 국내 고상 무기계 폐기물의 안정적인 도로재료로서의 활용을 위해 부족한 부분이 많은 것은 사실이다. 그러나, 유럽의 사례에서도 알 수 있는 바와 같이, 정책적 의지가 무엇보다도 중요하기는 하나 공학적인 측면에서의 객관적 데이터를 축적하는 것이 중요하며, 특히, 폐기물의 활용에 있어 최종 수요자의 인식이 재활용의 주요 저해요인임을 감안할 때, 각 폐기물의 물리적, 공학적 특성과 더불어 환경적인 안정성을 검증할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 한국철강협회, “철강슬래그에 대한 재활용 실적 및 계획”(2005).
2. 환경부, “전국 폐기물 발생 및 처리현황”(2005).
3. 과학기술부, 환경부, “철강산업 슬러지의 복합처리에 의한 실용화 기술개발 최종 보고서”(2003).
4. 한국철강신문, “기초철강지식”(1996).
5. 김태희, “제강슬래그의 재활용”, 세라미스트, 제5권, 제5호 (2002).
6. 이진용 외, “재생콘크리트의 강도발현 및 동결융해 저항성 특성”, 콘크리트 학회지, 제10권, 제4호 (1998).
7. 송하원 외, “폐콘크리트로부터 재생된 골재의 합리적 평가에 관한 연구”, 콘크리트학회논문집, 제 12권, 5호 (2000).
8. 島榕和 외, “가열 분쇄에 의한 콘크리트덩어리로부터의 고품질 골재 회수 기술 개발”, 일본 콘크리트공학 연차논문집, Vol.22, No.2 (2000).
9. 안지환 외, “Recovery of Aggregates form Waste Concrete by Heating and Grinding”, Geosystem Engineering, Vol.4, No.4 (2001).
10. 환경부, “환경백서 2005”(2005).
11. OCDE Scientific Expert Group, “Recycling Strategies for Road Works”(1997).
12. ALT-MAT : Alternative materials in road construction, Final report (2001).
13. SAMARIS interim report (2004).