

# 국내 산업부산물의 재활용 방안



김 영 근  
한국건자재시험연구원 연구개발부  
수석연구원 공학박사

## 1. 폐기물발생 현황

1960년대 시작된 경제개발 5개년 계획으로 시작된 산업의 거대화 와 도시의 급격한 인구팽창이 대량생산, 대량소비형태를 가져와 폐기물의 엄청난 양적증가와 질적 악화를 가져왔다. 따라서 국토가 좁은 우리나라의 경우 이런 폐기물의 양적증가와 질적악화에 대처하기에는 현실적으로 여러가지 어려움을 가지고 있으며 최근에는 지방 분권주의와 지역 이기주의 등으로 폐기물 매립지의 확보가 더욱 힘들어져가고 있다. 특히 생존권과 결부된 환경문제에 대한 국민들의 의식이 고양되면서 그 반대급부로 폐기물 매립장을 비롯한 오염물질 처리시설이 설치되는 지역의 주민반대운동이 점점 더 심각한 양상을 띠어가고

있다. 정부는 이와 관련하여 그 시행대책으로 환경청 주도하에 1991년 폐기물관리법을 전면 개정하여 폐기물 처리 관련내용을 전면 재정리하고, 환경 실무대책 위 주관으로 폐기물 처리 기본방향부터 처리시설, 정책시행에 이르기까지 구체적인 실천방향으로 1993년부터 2001년 까지를 그 계획기간으로하여 "국가 폐기물 처리 종합계획"을 제시하고 있다.

1991년 3월 개정 입법화된 폐기물관리법에서는 쓰레기, 연소재, 오니, 폐유, 폐알카리, 동물의 사체등으로서 사람의 생활이나 사업활동에 필요하지 않게된 물질을 폐기물이라 정의하고 그 분류방법에 따라 특정폐기물과 일반폐기물로 분류하고 있다.

이에 따른 폐기물 발생현황을 살펴보면 일반폐기물중 생활쓰레기인 경우 1987년에서 1991년 까지

표 1. 폐기물의 성상별 발생량

단위 : 톤/일

생활쓰레기		사업장 일반폐기물		특정폐기물	
성상	양	성상	양	성상	양
계	75,096	계	45,058	계	21,381
연탄재	17,750	광 재	25,287	폐 산	700
음식물	21,807	연소재	9,088	폐알카리	712
종이류	13,125	분진류	1,738	폐 유	419
금속초자류	4,957	금속초자류	1,644	폐유기용제	260
목재류	3,077	건축폐재	2,595	폐합성고분자류	1,830
기 타	14,380	종이/나무류	2,944	분 진	246
		슬러지류	1,166	슬러지	9,173
		동물성 잔재물	1,559	폐석고/석회	7,192
		고무피혁류	273	동물성잔재물	573
		기 타	1,764	기 타	269

표 2. 미국 고속도로 산업에서 현재 이용되는 폐기물

폐기물의 종류	사용 주(State)	사용장소(총 사용개소 / 현재 적용 개소)			
		표 층	기 층	보조기층	노반/제방
개질 포장물	43	23 / 8	26 / 16	14 / 8	6 / 5
Fly - Ash	33	22 / 1	6 / 2	7 / 0	5 / 2
타이어 파편	30	22 / 0	6 / 1	1 / 0	3 / 3
고로슬래그	17	5 / 4	3 / 5	0 / 3	1 / 2
제강슬래그	9	4 / 1	2 / 2	1 / 0	0 / 2
Bottom Ash	7	2 / 0	2 / 1	1 / 1	1 / 1
보일러 Slag	7	4 / 0	1 / 1	0 / 1	0 / 1

매년 7~10%의 증가율을 보이다가 1992년에 생활 쓰레기 계측방법의 변화로 18.6%의 감소수치를 나타내고 있다. 이는 비록 폐기물에 대한 발생원의 억제 및 재활용에 대한 정부의 정책과 국민의 관심이 고조된 점도 있겠지만 주된 요인은 계측방법의 변화에 기인한것이라 할 수 있다.

사업장 폐기물은 1991년 폐기물관리법의 전면개정과 1992년 동법개정에 따른 분류체계상 발생량의 연도별 정확한 분석은 힘들지만 사업장 자체 폐기물량을 살펴보면 그 발생량들은 1987년부터 1992년까지 연평균 11.5%의 평균 증가율을 보이고 있으며 특정 폐기물의 경우 17.8%, 사업장 일반폐기물은 11.0%의 증가율을 나타내고 있다.

발생된 사업장의 일반폐기물을 성상별로 살펴보면 광재, 연소재, 분진류의 발생량이 전체 발생량의 75.1%를 차지하고 있고, 특정폐기물의 경우 슬러지, 폐석고, 폐석회가 전체구성의 76.5%를 기록하고 있는데 1987년 수치와 비교해 보면 중금속 및 특정유해 함유 폐기물의 점유비율은 증가하고 있는 추세이다.

이들 폐기물중 실제로 효과적인 재활용을 통한 자원화가 가능한 것은 사업장의 일반폐기물로 한정지을 수 있으며, 이렇게 자원화되어 재활용되고 있는 산업부산물로는 플라이애쉬, 고로슬래그, 제강더스트, 석분 등 극히 제한적이며, 그나마 관계법령상의 모순 때문에 활성화되는데 장애요인으로 나타나고 있다.

국내에서 이렇게 자원화되는 폐기물은 대부분 시멘트나, 역청재료를 고형체로 하여 제조되고 있으며,

이는 이들 성분중 포함하고있는 유해중금속의 효과적인 고형화(Solidification) 및 안정화(Stabilization)에 따른 환경평가때문으로 결국 이를 재활용하는데 있어 제한적요소로 작용할 수밖에 없다.

따라서 이미 선진국에서는 이를 다양한 방법으로 고형화(Solidification) 및 안정화(Stabilization)하여 처리하고 있지만 이들 고형화·안정화의 경우 처리 비용이 많이 드는 단점을 내포하고 있다. 따라서 이들 방법들을 개량하여 고형화와 안정화를 추구하면서도 이들을 자원화하는 방법이 적극적으로 모색되고 있으며 표 2에서와 같이 폐유리, Fly Ash, Slag 등은 이미 폭넓게 재활용 되고 있다.

표 2에서 보듯이 미국의 경우 Bottom Ash나 보일러 Slag등을 자원화하고 있으며, 더욱 많은 부산물들에 대한 자원화 연구가 진행되고 있는데 비해 우리나라의 경우 자원가능한 부산물의 발굴과 이를 재료 및 제품화하는데 있어 극히 폐쇄적이라 할 수 있다. 따라서 본고에서는 국내에서 이미 자원화되었거나, 최근 새롭게 진행되고 있는 산업부산물의 재활용 방안에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 국내 산업부산물의 재활용실태

### 1) 전기로 제강분진

고철이 전기로에서 용융시기에 발생하는 일종의 먼지로서 집진기에 의해 포집된 제강분진은 국내에서 연간 15만톤 정도가 발생되며, 유해중금속을 함유

하고 있고, 특히 유해중금속의 용출농도가 폐기물관리법에서 정한 기준치를 초과하는 것이 있어 특정폐기물로 분류되어 있다.

하지만 '94년 건설교통부지정 '신기술·신공법'으로 지정되고, 더욱이 '95년 한국산업규격에서 이를 역청포장 혼합물용 채움재로 정의됨에 따라 효과적으로 재활용되고 있지만 그 범위가 채움재로서 극히 제한적으로 적용되고 있다.

### 2) 플라이애쉬

Fly Ash는 석탄을 원료로하는 화력발전소에서 미분탄을 약 1,400~1,500°C의 고온으로 연소시켰을 때 회분(Ash)이 고온의 연소가스와 더불어 생성되는 미세한 분말이다. 우리나라에서의 Fly Ash는 보령, 삼천포, 영월, 삼척 등의 화력발전소에서 생산되며, 2000년경에는 약 500만톤의 발생량이 예측된다. 일반적으로 Fly Ash 성분들은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 순으로 구성되어 있고 Silica가 전체의 50%이상 차지한다. 이중 SiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 시멘트가 수화할 때 생성되는 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응하므로 콘크리트의 강도증가에 효과가 있어, 특수콘크리트용 혼화재료로서 이용되고 있다.

또한 최근에는 이들 화력발전소 뿐만 아니라 도시 소각로인 열병합발전소에서 발생하는 Bottom Ash에 대한 연구도 활발히 연구되고있으며, 가시적인 성과도 이루어 지고 있다.

### 3) 집진회수분진

석산에서 골재를 생산하는 분쇄공정에서 발생하는 분진으로서 집진기에서 회수한다. 이들 석산에서 생산되는 골재는 전체 골재 소요량의 30%에 해당하는 10,000,000m<sup>3</sup>양에 이른다. 이들 중 석분발생량은 약 12,000,000m<sup>3</sup>으로서 30%에 해당하며, 석분중 분진함량이 10%에 달하는 1,200,000m<sup>3</sup>양에 이르는 양이다.

이들 석분회수분진 일부는 산업에 재활용되고 있으나, 대기상으로 방출될 때에 환경오염 물질로 취급된다. 석분회수분진의 주요성분은 silica(SiO<sub>2</sub>)이고, silica이외에도 상당량의 Alumina(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)가 함유되

어 있다. 이밖에도 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 알카리(K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO, MgO)성분이 함유되어 있다. 이들의 재활용 용도를 살펴보면 아스팔트 콘크리트 채움재(Filler)와 기타산업의 충전재로 활용되고 있으며, 건축자재 및 고부가가치의 소재로 개발이 기대된다.

### 4) 고로슬래그

고로슬래그는 약 1,500°C의 용융상태이므로 냉각 방법에 따라 서냉슬래그와 급냉슬래그가 된다. 피상인 서냉슬래그는 건조피트(dry pit)에 유입후 자연공냉과 적절한 살수에 의해 내부의 냉각이 서서히 일어나 결정화가 진행한 것이고, 급냉슬래그는 유하하는 용융슬래그에 고압공기를 분사하여 방사, 전열 등에 의하여 냉각속도가 증가하여 유리화질의 모래 상태가 얻어진다.

이러한 고로슬래그는 그 잠재수경성으로 인하여 이미 오래전부터 훌륭한 노반재로 사용되고 있으며, 적용용도에 있어서도 단순한 노반재에서 벗어나 시멘트의 혼화재료, 골재로서의 사용되어 지고 있으며, 특히 국립기술품질원과 한국건설자재시험연구원 연구개발부에서는 고로슬래그를 주재료한 콘크리트용 고로슬래그 미분말에 대한 한국산업규격제정이 추진되고 있어 더욱 다양한 용도로 사용 가능하리라 판단되며 재활용 건축자재로서의 활용이 기대된다.

### 5) 제강 슬래그

제강슬래그는 일반적으로 전로, 평로, 전기로 등에 의하여 생산되는데 이들은 그 처리과정에 따라 그 성분이 다른 제강슬래그가 배출된다. 이 제강슬래그 중 전로슬래그는 철강의 생산과정에서 생산되는 부산물이다. 이 전로슬래그는 일반적으로 염기도가 높고 비중이 큰 철, 망간 등의 유가금속을 함유하고 있기 때문에 여러 슬래그중에서 그 자체의 경도가 상당히 높은 편이다. 전로슬래그 풍화에 의하여 붕괴가 잘되는, 즉 팽창붕괴하는 불안정 때문에 건설재료로는 이용이 곤란하다. 고로슬래그에 대해서는 많은 연구결과 시멘트와 매우 유사한 물질로서 무해성 물질임이 확인되었고 또 자원으로서의 유용성이 입증되

어 도로용골재, 시멘트 원료, 성토용골재나 혼화제로 널리 사용되고 있으며, 일본을 비롯한 여러 선진국에서도 이를 건설재료로 널리 활용하고 있다.

그러나 전로슬래그는 그 자신이 갖고 있는 팽창, 자연붕괴성 때문에 콘크리트용 골재로 사용되지 못하고 대부분 공지 매립용으로 사용되고 있다. 또 전로슬래그에 대해서는 토질안정재로서의 적용성, 결합재 및 팽창재로서의 이용법에 대한 약간의 연구보고는 있으나 콘크리트용 골재로서의 이용법에 대한 연구는 별로 많지않다. 이 전로슬래그에 대한 연구동향을 살펴보면 전로슬래그의 탄산화 경화에 대한 연구, 수경성에 관한 연구 또는 전로슬래그의 석고, 수재슬래그 또는 염화칼슘을 가하면 상당히 큰 수경성을 나타낸다고 보고된 바 있다. 최근의 전기슬래그에 대한 연구경향을 보면 전로슬래그의 팽창 자연붕괴성을 줄이기 위해서 약 6개월이상 옥외에 방치(에이징)해 두었다가 이것을 콘크리트용 골재로 사용하고 있으나 이 방법은 많은 시간과 넓은 공간을 필요로 하기 때문에 경제성이 없어서 큰 실효를 거두지 못하고 있다. 따라서 속성에이징 방법의 개발과 건설·토목소재로 활용화를 위한 연구가 본연구원과 포항산업과학연구원에서 공동으로 진행중에 있으며 이들의 활용이 기대된다.

6) 전기로 슬래그

전기로슬래그의 비중은 자연사보다 크고, 안정성이나 흡수율은 가장 양호하다. 이에는 산화슬래그와 환원슬래그가 있는데 산화슬래그는 평균 염기도가 2정도로 철분이 높기때문에 주로 w stite(FeO),  $\beta$ -2CaO.SiO<sub>2</sub>, 2CaO.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등 안정한 화합물로 생성한다. 환원 슬래그는 염기도가 비교적 낮아 (<1.7)

규산 칼슘이 생성되어 Melilite, Mervinite 및 Monticellite등이 생성된다. 염기도가 비교적 높은 경우2CaO · SiO<sub>2</sub>, 가 생성되고 이경우 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>가 소량 존재하면 냉각과정에서 2CaO · SiO<sub>2</sub>의  $\gamma$ 형 전위가 일어나 부수어진다.

산화슬래그가 환원슬래그와 같은 정도의 염기도를 가지면 부수어지지 않는 것은 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 존재가 2CaO · SiO<sub>2</sub>의  $\gamma$ 화를 억제하는 것이라 생각된다.

계강슬래그의 안정성을 평가하는 미분화율, 화학분석에 의한 유리석회량 측정등이 있다. 전기로슬래그는 산화슬래그, 환원슬래그 모두 팽창율이 10%이하로 팽창붕괴성은 아주 낮은 천연 쇄석과 비슷하다. 따라서 산화슬래그는 지금까지 도로용재료 이용하였다. 이에 반하여 환원슬래그는 발생량도 작고 분진문제도 있어 자원화가 늦었으나 최근에는 아스팔트 혼합용 filler와 비료등에 일부 이용되고 있다.

7) 비철금속슬래그

(1) 연제련슬래그

연제련슬래그는 용제(Slag)의 용련공정상에서 발생하는 부산물로 연간발생되는 슬래그의 양은 연간 80,000톤에 이르고 있고 그 주요성분은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등으로 이루어져 있어 이미 시멘트의 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 공급원으로 사용되고 있으며 화학적조성은 표 3과 같다.

우리연구원 연구개발부에서는 고려아연(주)와 공동연구로 연정련 공정상에서 발생하는 연제련슬래그를 아스팔트 콘크리트 채움재 및 잔골재로서 사용성을 확인하였다. 골재로서 물성파악을 위하여 KS F 2358 (역청포장 혼합물용 잔골재)에 따라 입도, 조립율, 안전성을 수행한 결과 안정성에서 13.5%로 고로

표 3. 연제련슬래그의 화학적 조성

구 분	Pb	Zn	Cu	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As	Sb
	1.45	6.57	0.14	20.36	12.57	24.10	20.17	2.34	4.95	0.13	0.65
표준편차	0.51	0.83	1.73	3.91	3.66	5.35	1.24	0.77	1.31	0.007	0.20

광재에서 규정하는 12%를 상회하지만 일반골재의 18%보다 양호한 물성을 가진것으로 확인되었다.

또한 연제련슬래그를 채움재로 사용가능성을 평가하기 위하여 과립상의 슬래그를 파쇄하여 한국산업규격에서 규정하는 소정입도를 충족하여 KS F 3501 (역청 포장용 채움재)의 전항목을 시험한 결과 모든 물성을 충족하였고, 석회석분을 기준시료로 하여 마샬법에 따라 배합설계를 수행하여 아스팔트콘크리트를 제조한 결과 모든 물성을 충족하였다. 잔골재로의 적용성을 평가하기 위하여 기준시료에 대하여 10%, 20%, 30%, 50%, 100% 치환하여 채움재와 동일한 수순으로 시험을 행한 결과 모든 물성치를 만족하였다.

최종적으로 이들 시편에 대하여 연제련슬래그중 비소, 구리, 납을 미량이지만 포함하고 있어 폐기물공정시험법에 의거 용출시험을 수행하였고, 그 결과 어떠한 중금속도 용출되지 않았다. 따라서 이들의 재활용 또한 기대된다.

8) Blasting 연소재 Slag

Blasting 연소재 Slag는 동제련 슬래그를 선박의 수리시 표면의 도장 및 녹을 제거한 뒤 남은 것으로 기본적인 화학조성은 표 4와 같다.

표 4에서 보듯이 두 슬래그의 기본조성은 큰 차이를 보이지 않고있어 우리연구원과 (주)현대미포조선이 공동으로 연제련슬래그(Slag)와 동일하게 토목 및 건축재료로서의 적용가능성을 평가한 결과 역청재료용 잔골재로서 충분한 물성을 나타내고 있으며, 적용대상을 시멘트 2차제품으로 확대하여 KS F 4002 (속빈 시멘트 블록) 과 KS F 4004 (시멘트 벽돌)에 의거 시험한 결과 표 5와 같이 50%까지 치환하여도 문제가 없음을 확인하였으며, 어떠한 환경적 유해성도 없음을 알았다. 또한 이들의 재활용을 적극 지원할 예정이다.

표 4. Blasting 연소재 Slag의 화학조성

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr	SiO <sub>2</sub>	Ca	Cd	Cu	Fe	MgO	Mn	Pb	Zn	Cl
Blasting 연소재 Slag	2.79	0.038	21.04	0.62	0.0004	1.26	46.23	0.93	0.038	0.34	0.76	0.09
Cu Slag	3.14	0.04	22.76	0.7	0.0004	1.50	44.2	1.04	0.08	0.33	0.70	0.14

표 5. 시멘트 2차제품의 적용결과

제품명	규격	Blasting 연소재 Slag 치환비(%)	3일	7일	28일
시멘트 벽돌	무공 B형	Standard	92	164	193
		30%	98	159	189
		50%	111	164	200
속빈 시멘트 블록	6" 블록	Standard	34	46	54
		30%	31	52	66
		50%	34	51	58

### 3. 산업부산물의 자원화에 따른 문제점

현재 국내에서 산업부산물의 자원화는 고로슬래그, 플라이애쉬 등 국내·외 적으로 많은 연구가 이루어지고 또한 그 안정성이 확보된 극히 일부만이 제한적으로 적용되고 있으며, 그 사용에 있어서도 지나치게 많은 관련법규 및 이를 관련하는 정부부처가 서로달라 더욱 혼선을 빚고있는 실정이다.

따라서 보다 효과적이고 효율적인 자원화를 위하여는 다음 몇가지 조건이 전제되어야 한다.

#### 1) 관련법규의 통일 및 단순화

현재 이들 산업부산물을 제품의 원재료로 활용하기 위하여는 폐기물 관리법과 한국산업규격을 동시에 충족하여야 한다. 예를들어 비철금속슬래그를 이용하여 아스팔트콘크리트나 시멘트 2차제품을 제조할 경우 한국산업규격에서 규정하는 물성치를 만족하고 있어도, 규격서에서 이를 규정하고 있지 않아 사용할 수 없으며, 따라서 폐기물 관리법에 따라 산업부산물의 재활용처리신고를 하더라도 생산이 불가능한 실정이다.

또한, 이들 모두를 충족할지라도 자원의 절약 및 재활용촉진에 관한법률에서 이를 우선적으로 사용하도록 권장하고 있으나, 실제 시공에 있어서는 이들 재활용 제품이 외면받고 있는 등의 문제점을 내포하고 있어 이들이 유기적으로 정리되지 않는한 이들 재활용은 요원하다 할 수밖에 없다.

#### 2) 다양한 고품화 및 안정화방법의 도입

현재 국내에서 재활용되고 있는 산업부산물은 대부분 아스팔트 콘크리트를 이용한 열중합체법(Thermoplastic Techniques - Bitumin, Paraffin, Polyethylene)과 시멘트 2차제품의 원료로 사용되는 시멘트 기초법(Cement-based Techniques)을 적용한 방법이 거의 대부분을 차지하고 있어 극히 제한적으로만 사용할 수밖에 없다.

따라서 폐기물내에 포함된 유해물질을 효과적으로 억제할 수 있는 석회기초법(Lime-Based Techniques), 유기중합체법(Organic Polymer Techniques), 막보호법(Surface Encapsulation Techniques), 자기시멘트법(Self-Cement Techniques) 등의 다양한 방법을 통한 효과적인 고품화와 다양한 제품개발이 요구된다.

#### 3) 재활용 자원의 다양화

고로슬래그, 플라이애쉬, 제강분진 등 현재 그 사용안정성을 인정받아 범재화되어 사용되고 있는 부산물들은 대부분 폐기물관리법에서 규정하는 일반 폐기물로 한정되어 있고, 폐산, 폐알카리, 폐유, 폐기용제, 폐합성고분자류, 분진, 슬러지, 폐석고/석회 등의 특정폐기물에 대한 재활용은 극히 미진한 실정이다.

이들 특정폐기물에 관한 재활용은 정제 및 추출 등 단순 2차가공에 그치고 있는 실정므로 보다 적극적인 처리방안이 모색되어야 할 시점이다.

### 4. 결 언

지금까지 국내에서 발생하는 산업부산물의 토목 및 건축재료로서의 재활용 실태를 중심으로 살펴보았다. 하지만 이들 부산물 및 자원화방법 이외에도 더욱 많은 자원화가 가능한 부산물이 있으며, 다양한 재활용방법의 개발이 수행되어 보다 적극적이며 공격적인 자원화를 모색하여야 하는 중요한 시점에 놓여있다.

따라서 가능한 정부의 관계법령의 통일화와 간소화, 각 연구기관의 적극적인 활동 및 소비자들에 의한 사고전환을 위하여 모두 노력하여야 한다.