

# 철강공업 폐기물의 자원화현황 및 전망



表在浩

〈포항제철 자원재생과장〉

## 1. 서 론

산업중에서도 철강업은 자원, 에너지를 고도로 재이용하고 있는 RECYCLING산업의 전형이라 할 수 있으며 철강업이 RECYCLING 산업이라는 것을 단적으로 나타내는 대표적 예로 철강생산 과정에서 필수적으로 발생하는 부산물로서 슬래그를 들 수 있다.

이 철강슬래그는 각종의 비금속 원소를 함유한 폐기물로서 고도 성장시대에는 제철소 건설의 매립용도로 사용하였지만, 연간 810만톤이 넘는 슬래그를 유효 활용하는 것이 환경문제에 도움이 될 뿐만 아니라 부산물을 자원화한다는 일석이조의 효과가 있으며 슬래그 성분은 일반암석 및 CEMENT 등과 유사한 성질로 내열, 내화성이 우수하므로 제품화할 경우 여러가지 이점을 발휘할 수 있다.

이 때문에 포항종합제철(주)에서는 약 10년간 슬래그의 유효이용을 위해 다방면의 연구를 계속한 결과 해마다 활용도를 높여왔다.

철강슬래그는 현재 시멘트, 골재, 지반개량재 등 다양한 용도로 활용하는 유효자원으로서 새롭게 변신하고 있다.

## 2. 대량 발생하는 슬래그와 자원화추진

우리나라에서 제철사업이 시작된지 10여년만에 포항제철은 연산 조강 910만톤의 능력을 갖추게 되었고 여기에서 발생하는 슬래그 양도 387만톤이 된다.

이 슬래그는 1973년 부터 1981년까지는 제철소 부지조성용으로 대량 사용되었으며 1981년 이후부터는 제철소 건설도 일단락되어 소내 슬래그이용이 둔화되었다. 이와같은 사태에 대처하기 위해 '80년 슬래그 자원화추진을 위한 전담조직을 설립, 슬래그 이용기술 개발을 꾸준히 노력하여 학계, 건설부와 공동으로 '81년에 도로용 슬래그 KS 제정을 시발로 고로슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공지침('82), 콘크리트용 고로슬래그 굵은골재 설계·시공지침('83), 제강슬래그를 사용한 아스팔트포장 설계·시공지침('85), 고로슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공지침 개정판('86년), 제강슬래그를 사용한 기층 및 보조기층 설계·시공지침('89)작성 및 수많은 시험포장을 실시한 결과 표 1과 같이 슬래그제품을 규격화 공인화 하여 하천골재의 고갈 및 자연환경 보전에 따른 천연골재의

확보가 어려운 시기에 대체재료로 슬래그를 사용함으로써 국가적인 폐자원의 유효자원화 활용에 따른 자연보호 및 자원절약에 큰 기여를 하였다.

표 1. 철강슬래그 제품관계 규격 및 일람표

[KS 제정]

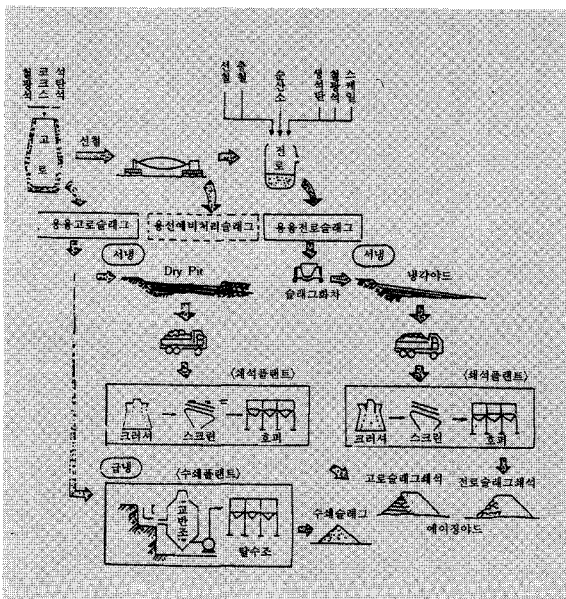
- (1) 도로용 KS F2535 도로용 슬래그('81.12.)
- (2) 콘크리트용 KS F2544 콘크리트용 고로슬래그 굵은 골재('81.12.)
- (3) 시멘트용 KS L5201 포틀랜드시멘트('89.5.개정)  
KS L5210 고로슬래그 시멘트('86.12.개정)

[지침작성]

- (1) 도로용 - 대한토목학회 : 고로슬래그 기층 및 보조기층 설계, 시공 지침('82.1., '86.11.개정)  
제강슬래그를 사용한 아스팔트포장 설계 시공 지침('85.9.)  
제강슬래그를 사용한 기층 및 보조기층 설계, 시공 지침('89.8.)
- (2) 콘크리트용 - 대한토목학회 : 고로슬래그 굵은 골재 콘크리트 설계, 시공지침('82.12.)

### 3. 철강슬래그 이용현황 및 향후 자원화계획

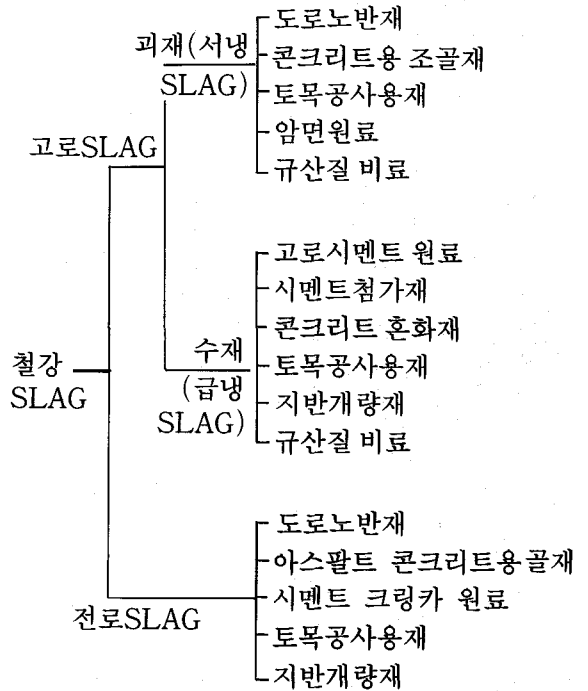
#### 가. 철강슬래그 생성과정



#### 나. 종류와 용도

포항제철에서 발생하는 철강슬래그는 고로슬래그와 전로슬래그가 있으며 이용분야는 아래와 같다.

고로슬래그



#### 다. 처리현황

고로슬래그는 선철1톤당 약 350KG, 전로슬래그는 조강1톤당 약 150KG씩 일정하게 발생된다. 고로슬래그의 경우 '81년에는 시멘트용 64만톤, 비료·암면용 36만톤, 자체활용 13만톤 38%를 활용하고 183만톤은 매립하였으나 '90년에는 시멘트용 219만톤, 비료, 암면용 27만톤, 도로용 263만톤 자체활용 58만톤으로 전량 활용하고 있다.

특히, 시멘트용으로 사용되는 수재는 '81년 64만톤에서 '90년 219만톤으로 향후 계속적인 증가가 예상되고 있다.

전로슬래그의 경우 '81년에는 제철원료 25만톤 등으로 25%를 활용하고 80만톤은 매립하였으나 '90년에는 제철원료 60만톤, 시멘트원료 32만톤, 자체 활용 23만톤으로 46%를 활용하고 133만톤을 슬래그처리장에 매립하고 있다. 그러나 시멘트원료로 사용량이 증가추세에 있으며, '89년에 도로노반용 골재개발에 성공하여 '92년부터

사용함으로써 몇년후에는 고로슬래그와 같이 전량활용할 계획이다.

철강슬래그 자원화 활동을 개시한 '81년부터의 철강슬래그 활용현황은 표2와 같다.

표2. 포항제철 철강슬래그 활용현황 (단위: 천톤/년)

구 분	'81	'84	'87	'88	'89	'90	%		
고로슬래그	발생량	2,971	3,186	3,892	4,468	5,231	5,666	100	
	활용량	1,137	2,700	3,617	4,394	5,058	5,666	100	
	시멘트용	643	1,251	1,531	1,447	1,933	2,188	39	
	비료용	345	250	279	313	301	230	4	
	암면용	15	22	15	26	25	36	1	
	토목용	134	38	513	556	506	584	10	
	도로용	-	1,139	1,279	2,052	2,293	2,628	46	
	매립량	1,834	486	275	74	173	0	0	
	전로슬래그	발생량	1,083	1,444	1,738	1,996	2,363	2,479	100
		활용량	276	329	999	1,045	1,273	1,147	46
제철원료용		251	278	478	599	649	600	24	
시멘트용		-	32	168	179	228	315	13	
토목용		25	19	358	267	396	232	9	
매립량		807	1,115	739	951	1,090	1,332	54	

\*일본 철강슬래그 활용현황 (단위: 천톤/년)

구 분	고로슬래그			제강슬래그		
	'89	'90	%	'89	'90	%
발생량	25,100	26,460	100	12,580	13,040	100
활용량	25,100	26,460	100	9,540	10,300	79
시멘트용	13,890	15,400	58	1,300	1,420	11
도로용	5,450	5,460	21	830	780	6
콘크리트용	1,290	1,250	5	-	-	-
토목용	1,720	1,500	6	2,710	3,710	24
비료용	430	400	1	-	-	-
가공원료용	-	-	-	1,400	1,580	12
자가활용	2,320	2,450	9	3,300	3,350	26
매립량	0	0	0	3,040	2,740	26

라. 용도별 이용현황 및 향후 자원화계획  
철강슬래그의 주이용분야 및 향후 자원화방향은 다음과 같다.

(1) 시멘트용

슬래그가 갖고 있는 특성을 최대한으로 이용하고 있기 때문이다. 향후에도 지속적으로 사용량이 늘어날 전망이다.

• 크링카원료

전로슬래그는 시멘트의 FeO공급원으로 사용되며, 또한 주성분인 CaO분, SiO<sub>2</sub>분도 이용되어 석회석을 저감시키는 성자원의 효과가 있어 계속적으로 사용량이 증가되고 있다.

• 고로시멘트용

고로 수재특성인 잠재수경성을 최초로 유효하게 이용한 것은 고로 시멘트이다.

이것은 고로 수재미분말(시멘트량의 30-60%)과 포틀랜드 시멘트를 혼합한 것이다.

수재이용시 장점은 첫째로 시멘트크링카 제조에 소성공정을 필요로 하지만, 수재는 건조 분쇄만 함으로 연료를 대폭적으로 절감하며 둘째로 슬래그의 주성분인 CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 유효하게 이용되므로 수재 혼합량에 상당하는 석회석, 점토질 원료 사용량을 절약할 수 있다. 최근에는 콘크리트 구조물이 알칼리 골재반응에 의하여 노화되는 것이 사회적으로 문제가 되고 있지만 외국의 연구결과 수재 미분말이 이에 대한 제어효과가 있다는 것이 알려짐에 따라 외국에서는 고로시멘트에 대한 관심과 평가가 높아지고 있으며 고로시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 수화열, 내해수성, 내약품성이 우수하다.

• 보통 포틀랜드시멘트 혼합재

보통 포틀랜드 시멘트에 소량의 수재 미분말을 혼합하여도 시멘트품질에 별문제가 없으므로 KS에서는 5%이하 혼합하는 것은 인정함으로써 에너지, 성자원의 면에서 국내 모든 시멘트업계에서 사용하고 있다.

(2) 도로용

고로슬래그는 수경성(물과 접촉하면 미량의 석회 및 SILICA가 녹아 표면에 치밀한 수화생성물이 생성되어 응고경화)이 있기 때문에 도로용 골재로 사용하면 장기간에 걸쳐 노반의 지지력이 증가하는 특징이 있어 외국에서는 슬래그가 도로에 사용된 역사는 오래되었고, 우리나라에서도 공공도로에 대량으로 사용하고 있으며 천연골재에 비해 품질, 시공성, 경제성이 우수하다.

그러나 시멘트용 슬래그의 증가에 따라 상대적으로 괴재발생량이 적어짐에 따라 '90년도에는

수요 300만톤에 비해 260만톤을 사용하였다.

일반적으로 철강슬래그는 노반재료로만 사용되지만 최근에는 노상용, 표층용 재료로서 슬래그를 사용하고 있다.

#### • 슬래그 노상개량재

노상의 지지력은 견고한 도로를 만들기 위한 중요한 조건이므로 연약한 노상의 경우에 그 일부 또는 전부를 양질의 모래로 치환하거나 시멘트 안정처리로 개량할 필요가 있다.

수재는 비소성이고, 투수성이 양호하며 잠재수경성이 있기 때문에 최근에는 수재에 시멘트를 첨가한 양질의 노상개량재를 외국에서는 널리 사용하고 있다.

#### • 슬래그 노반재

##### -고로슬래그 노반재

고로슬래그 노반은 시공실적이 많고 KS제정 및 설계시공지침 작성으로 규격화되어 널리 사용되고 있다.

고로슬래그 노반재료는 HMS, MS, CS의 3종류가 있고 수경성이 있으므로 시공후 시일이 경과하면 노반의 지지력이 향상되며 ROLLER에 의한 다짐 등 시공성이 우수하므로 천연골재에 비해 품질이 월등하다.

##### -전로슬래그 노반재

전로슬래그 노반재는 전로슬래그 단독으로 사용하는 것과, 전로슬래그에 고로 서냉슬래그를 혼합하여 사용하는 복합노반재이다.

이것은 '88년 포항제철소 구내도로에 포항제철소 고로슬래그 파쇄업체인 동서개발(주)와 공동으로 시험포장을 실시하여 노반재료로서의 품질을 입증한후 '89년 대한토목학회와 공동으로 설계, 시공지침을 작성함으로써 '92년부터 본격적으로 사용할 계획이다.

##### -아스팔트 콘크리트용 골재

최근 아스팔트 포장도로에서는 마모와 중량 교통하중에 의한 소성변형이 도로 유지관리에 큰 문제로 대두되고 있다.

이에 대처하기 위해 '84년 포항제철 구내도로, 고속도로, 국도에 건설부 및 도로공사와 공동으로 시험포장을 실시하여 전로슬래그를 사용한 아

스팔트 콘크리트는 내마모성 및 내유동성이 우수하다는 실험결과를 얻은 후 '85년 대한토목학회와 공동으로 설계, 시공지침을 작성함으로써 현 포항제철 구내도로 아스팔트 포장공사용 골재로 사용하고 있다.

#### (3) 콘크리트용 골재

콘크리트용 고로슬래그 제품에는 괴재로부터 제조되는 조골재가 있다. 이 콘크리트용 골재는 '83년 대한토목학회와 공동으로 설계, 시공지침을 작성하여 현 포항제철 공사에 사용하고 있다.

고로슬래그 조골재는 콘크리트 구조물의 녹을 일으키는 염분과 광물 조성상 알칼리 골재반응을 일으키는 것이 없으므로 천연골재의 부족을 고려할 때 금후 수요신장이 기대된다.

#### (4) 토목용

종래의 슬래그는 제철소 건설때 토지조성용으로 이용되었으나 최근에는 수재가 단위용적중량이 적고 투수성이 양호한 특성을 가지고 있기 때문에 흙과 모래의 성질로 얻을 수 없는 급경사면 및 고성토의 조성, 뒷채움재의 토압저감, 연약지반의 개량 등에 사용시 시공성이 용이하고 안정성을 확보할 수 있어 새로운 토목재료로서 주목받고 있다.

#### (5) 기 타

이상 철강슬래그중 비교적 사용량이 많은 분야에 대해 기술하였지만 이외에 2,3가지의 제품을 소개한다.

##### -비료용

더 많은 농작물 생산을 위해 SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO 등의 비료성분의 보급이 필요되므로 연간 30만톤 정도의 고로슬래그가 규산질 비료로서 판매되고 있다.

##### -어 초

슬래그 대피어초와 슬래그 골재를 이용한 콘크리트 어초는 조류가 번식하며 어개류가 양호하게 서식한다는 일본의 연구기관 및 수협이 실험보고가 있으며, 향후 우리나라 어업조건 개선을 위해 연구가 기대된다.

##### -암면원료

내화, 단열성, 흡음성이 우수한 암면원료로 년

간 3만톤 가량 사용하고 있다.

#### 4. 철강슬래그가 환경에 미치는 영향

철강슬래그는 석회 및 실리카가 주성분이며 이외에 고로슬래그는 알루미늄, 마그네시아, 전로슬래그는 산화철, 마그네시아, 산화망간 등을 함유하고 있다. 이러한 성분은 지구의 지각을 구성하는 주성분이며 광물조성도 암석, 광물로 볼 수 있다.

화학조성은 화성암, 퇴적암 등이나 인공재료인 포틀랜드시멘트와 유사하다.

또한 제철의 원료인 철광석중에는 동, 크롬 등의 금속성분은 거의 함유되어 있지 않은 것이 사용되며 이들 성분은 고로에서 광석으로부터 대부분은 환원되어 금속으로 되어 선철의 미량성분이 되므로 고로슬래그중에 함유되지 않으므로 환경상 문제가되는 중금속 등의 유해물질은 용출되지 않는다. 슬래그의 용출시험 결과는 표3, 표4와 같으며 철강슬래그 사용시 환경에 미치는 영향여부에 대하여 예를들어 설명하면

표3. 슬래그의 조성(중량%)

구분	종류	고로 슬래그	전로 슬래그	산 흙	안산암	퇴적암	포틀랜드 시멘트
	SiO <sub>2</sub>	33.7	13.8	59.6	59.6	52.4	22.0
	CaO	41.5	44.3	0.4	5.8	22.8	64.2
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.9	1.5	22.0	17.3	12.6	5.5
	산화철 *	0.4	19.6	-	6.3	4.7	3.0
	MgO	6.5	6.4	0.0	2.8	3.05	1.5
	S 또는 S화합물	0.99	0.07	0.01	-	-	2.0**
	MnO	0.5	5.3	0.1	0.2	0.31	
	TiO <sub>2</sub>	1.3	1.5	-	0.8	0.69	

(주) \*는 FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등을 포함 \*\*SO<sub>3</sub>

가. pH가 높아짐에 따라 환경에 미치는 영향 철강슬래그를 사용한 곳에 빗물이나 지하수가 통과하면 칼슘분에 의해 투과수가 알칼리성을 나타내는 수가 있다.

이 알칼리 농도는 에이징하였다 해도 그다지 변화하지 않으며 처음에는 10-11.5 정도의 값을 나타낸다. (시간이 지나면 약간 저하하는 경향이 있다) 이와같은 사실로부터 철강슬래그를 사용

#### 표4. 각종 용출시험결과

(단위 : mg/l)

구분	카드뮴 또는 그화합물	수은또는 그화합물	67크롬 화합물	납 또는 그화합물	유기인 화합물	비소또는 그화합물
기준	0.5	0.005	1.5	3	1	1.5
고로슬래그	ND	ND	ND	ND	ND	ND
전로슬래그	ND	ND	ND	ND	ND	ND
참 석 흙 강 자 갈 고 강 모 래 바 다 모 래	ND	ND	ND	ND-0.06	ND	ND
	ND	ND	ND	ND-0.23	ND	ND
	ND	ND	ND	ND-0.1	ND	ND
	ND	ND-0.01	ND	ND-0.05	0.26	ND-0.019
	ND	ND	ND	ND-0.03	ND-0.12	ND-0.009
분석상의 검출하한치	0.002	0.0005	0.005	0.01	0.1	0.002

(주) ND (NOT DETECTED) : 검출한계 이하

했을 경우, 그 투과수가 하천이나 농지 등의 수질과 흙에 나쁜영향을 미치는 것은 아닌가 하고 염려되는 수가 있으나 우리나라 흙은 일반적으로 산성흙이며, 알칼리성 물질에 대해서는 큰 흡착능력을 갖고 있으므로 철강슬래그로부터 고알칼리수가 용출하여도 흙에 의한 급속한 정화작용을 받아 주변환경에의 나쁜영향은 없다.

철강슬래그 용출알칼리 농도, 흙의 알칼리 흡착능력에 관한 시험결과를 살펴보면 처음의 pH치는 투과수에서 9.8-10.5, 수중침적시험에서는 10.2-11.5 정도이나 시일이 지남에 따라 낮아져서 360일 정도에서는 각각 8.2-8.5 및 8.5-10.5로 되었다.

그러나 고로슬래그 용출수의 pH치는 시멘트 또는 석회안정처리 용출수의 pH치와 같거나 그보다 약간 적은 값이라 할 수 있다.

흙의 알칼리 흡착능력은 흙 통과후 용출액의 pH가 5회째에 있어서도 모두 환경보전법에 규정하고 있는 배수기준치를 만족하며, 흙의 pH가 낮을수록 통과액의 pH도 낮아진다.

또한 흙의 알칼리 흡착능력의 변화는 어느 흙이나 충분한 흡착능력을 갖고 있으며 통과후 상당한 여력이 남아있다.

비교하기 위하여 콘크리트 파편의 용출액에 대해서도 조사하였으며 철강 슬래그의 경우와 같은 정도였다.

나. 철강슬래그를 도로용으로 사용시 하천, 토양 등에 미치는 영향

고로슬래그중에 함유되어 있는 약 1%의 유황은 불안정한 황화칼슘으로 존재하고 있어 이를 제거하기 위해 골재로 사용하기 전에 AGING 처리를 하면 대기의 수분과 공기에 의하여 황산칼슘 및 탄산칼슘으로 안정화된다.

안정화를 위한 제거과정 (AGING)에서 황화칼슘의 일부는 물에 의해서  $Ca^{++}$ 과  $OH^{-}$ 으로 되기 때문에 약 알칼리성을 띠게 되지만 일반적으로 토양중에 통과하면 흙의 염기치환성에 의해 중성으로 된다.

또 SLAG는 토양의 pH를 증대시켜 주므로서 작물의 발아율, 뿌리무게, 잎길이 및 잎폭 등을 증가시켜 오히려 성장촉진 효과를 주는 것으로 연구결과 밝혀지고 있다.

토양의 산성화 방지를 위해서 개발된 규산질 비료는 전량 고로슬래그로 제조되며, 정부에서도 이 규산질 비료의 사용을 농민에게 홍보 권장시키고 있어 사용량에 증가를 나타내고 있다.

## 5. 결 론

최근 10년간 이용기술 개발과 공인화에 대해 노력한 결과 현재 양적인 면에서는 거의 목적을 달성하였다.

그러나 처음에는 양적으로 처리하기 위한 슬래그자원을 부가가치가 높고 채산성이 있는 사업으로 발전시켜야 한다.

이를 위해서는 더욱 질적인 면으로 개발하기 위한 해결과제가 많으므로 새로운 목표를 수립하여 의욕적으로 추진해야 한다.

### 가. 부가가치가 높은 상품개발

고로슬래그의 자원화는 거의 달성하였지만, 이중에 노반재료, 콘크리트 골재 등은 천연골재에 없는 좋은 품질은 가지면서도 시장에서 일반 쇄석과 심한 가격경쟁을 나타내고 있다.

또한 제강슬래그는 자원화가 지연되어, 양적인 완전이용이 선결문제이다. 따라서 금후는 재

래자원의 단순 대체품으로서가 아니라, 슬래그의 특성을 충분히 활용한 고성능 상품을 개발하여 부가가치를 향상시켜야 한다.

### 나. 안정공급과 품질향상

슬래그는 철강생산시 발생하는 부산물로 계획생산이 안되므로 주문이 있으면서도 공급하지 못하는 때가 있다.

따라서 수요가의 신뢰를 유지하기 위해서는 공급량과 가격양면에 대해서 안정을 도모하는 것이 불가피함으로 수요가와 밀접한 접촉과 정보를 교환하는 것이 필요하며 또한 수요가로부터 요구되는 품질을 적극적으로 수용하고, 품질변동이 적은 공업제품으로서 공급하기 위하여 규격설정, 완벽한 품질관리를 도모하여야 한다.

### 다. 자원으로써 슬래그의 홍보

철강슬래그는 일반적으로 알려져 있지 않을 뿐만 아니라 다소나마 알고 있는 사람들조차도 쓸모 없는 폐기물로서 인식하며 또한 현행법상 슬래그를 파쇄 가공하여 제품으로 사용시 수요가의 자격제한, 재생이용시 이중신고토록 규정되어 있어 수요가는 자연골재와 같이 손쉽게 구입 사용 못하므로써 슬래그 기피현상이 발생하는 등 철강슬래그에 대한 정당한 평가를 받지 못하며 이용에도 장애가 되고 있다.

우리나라처럼 천연자원이 부족한 나라에서도 자원환경을 최대한 보존하고, 제한된 천연자원의 사용량을 절감하는 것은 절대적으로 중요할 뿐만 아니라 무한적으로 여겨지는 모래, 자갈, 쇄석 및 석회석도 장기적으로는 유한자원으로써 고갈이 예상된다.

철강슬래그는 이러한 자원의 대체재료로 사용함으로써 성자원 및 성 에너지 효과를 거두어 국가경제 발전에 기여하게 될 것이다.

따라서 철강슬래그가 산업폐기물이 아닌 유효자원으로 인식이 제고되고 국민 실생활에 밀착될 수 있도록 관계관청, 학계, 실수요자들의 더욱 깊은 이해와 애착속에 더욱더 연구개발을 추진하여야 하겠다. ◻