

磁力 選別에 의한 鐵鋼 슬래그로부터의 鐵分 回收에 관한 研究

潘奉贊 · 柳成南 · *金東秀*

순천대학교 재료 · 금속공학과, *이화여자대학교 환경공학과

Studies of the Recovery of Iron Content from Iron and Steel-Making Slags by Magnetic Separation

Bong-Chan Ban, Sung-Nam Yu and *Dong-Su Kim*

Dept. of Materials Sci. & Metallurgical Eng., Suncheon National University

**Dept. of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University*

요 약

슬래그는 철분함량이 높아 자원으로의 활용이 가능하나 시장상황에 따라 매립되는 등 재활용이 활발히 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 슬래그의 재활용이 좀 더 용이하도록 슬래그 내에 존재하는 철분 회수의 중요한 방법인 자력 선별 방법에 대하여 고찰하였다. 수재 슬래그, 수냉 전로 슬래그, 공냉 전로 슬래그를 시료로 사용하였고 자장의 세기, 드럼의 회전속도, 슬래그의 투입량에 따른 철분 회수량에 대하여 조사하였다. 철분함량이 적은 수재슬래그는 피더의 진동수 및 드럼의 회전수가 느릴수록 회수율이 증가하였으며 0.5 mm 이상의 입도에서 자력선별시 고품위의 철분을 얻을 수 있었다. 수냉의 전로 슬래그의 경우 피더의 진동수가 빠를수록, 드럼의 회전수가 느릴수록 회수율이 증가하는 것으로 조사되었고 입도의 크기가 작아질수록 입도별 회수율이 증가하는 것으로 관찰되었다. 공냉의 전로 슬래그는 피더의 진동수가 낮은 경우 드럼의 회전수가 감소할수록, 높은 경우는 드럼의 회전수가 증가할수록 회수율이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 자력선별시 자장의 세기를 증가시키면 회수율은 증가하나 금속철 이외의 철 화합물의 혼입이 많아져 품위가 낮아지는 것으로 관찰되었다.

주제어: 전로 슬래그, 고로 슬래그, 자력선별, 철분 회수

Abstract

Although slag has an enough potential as the secondary resources due to its high content of iron, quite a large amount of slags are simply landfilled when market prices of iron and steel are not so beneficial. The purpose of this study is to investigate the basic characteristics regarding the recovery of iron content from slag by magnetic separation method for the enhancement of its recycling rate. Three kinds of slags such as blast furnace slag, water-cooled converter slag, and air-cooled converter slag were tested taking the strength of magnetic field, revolving speed of drum, and feeding rate of slag as the influential factors on the magnetic separation. For blast furnace slag, the recovery of iron was observed to increase as drum speed and feeding rate were lowered. For water-cooled converter slag, iron recovery was raised as feeding rate was increased and drum speed was lowered. Also, finer slag particles were observed to be more favorable for the higher recovery of iron content. Regarding air-cooled converter slags, higher iron recovery was accomplished when both feeding rate and drum speed were increased or decreased. In addition, when the magnetic field strength was increased the iron recovery was raised, however, the iron grade of separated product was observed to diminish because of the co-separation of impurities.

Key words: BF slag, LD slag, magnetic separation, recovery of iron

*2003년 4월 14일 접수, 2003년 8월 22일 수리

*E-mail: dongsu@ewha.ac.kr

1. 서 론

제철산업은 대량의 원료와 에너지를 소비하여 철강을 생산하는 것과 더불어 월료·제강·제강·압연 등 복잡한 연결생산체제를 거치면서, 여러 가지 종류의 부산물과 폐기물은 양적으로는 주제품인 철강의 62%에 이르고 있다. 이 중 고체상태의 부산물과 폐기물의 약 74% 정도가 슬래그이고 나머지는 더스트와 슬러지 등의 형태로 발생되는데, 유용한 철분함량이 높아 대부분 자원으로의 활용이 가능하다.¹⁻³⁾ 하지만 현재 재활용되고 있는 품목인 고로슬래그의 경우 100% 이용된다고 하나 시장상황에 따라 매립되기도 하며 고부가화 또는 소재로서의 용도창출이 잘 되고 있지 않는 실정이다. 더구나 지구환경이 큰 이슈로 되고 있는 요즘 각종 제철 폐기물의 발생량을 가능한 줄이고 발생한 것은 자원화를 도모함으로써의 폐기물 처리비용을 경감하는 동시에 공해방지 차원에서 재활용이 요구된다.

슬래그는 광석으로부터 금속을 빼내고 남은 찌꺼기를 말하며 어떤 종류의 로를 사용하여 제련하는가에 따라 전기로 슬래그, 평로 슬래그, 고로 슬래그, 전로 슬래그 등으로 나뉘고 성질 또한 각각 다르다. 또한 만드는 금속의 이름을 붙여서 동슬래그, 철강슬래그 등으로 부르기도 한다.⁴⁾ 고로 슬래그는 선철의 제조과정에서 발생하는 비금속 생성물을 말하며 수재의 경우 용융상태의 고로슬래그를 고압의 냉각수로 급속 냉각시킬 때 생성된다. 연질의 수재는 미분쇄 후의 강한 잠재 수경성을 지니고 있으며 저알칼리성으로 내부마찰각 및 투수성이 크다. 이러한 특성을 이용하여 도로의 기층재나 콘크리트용 골재, 시멘트 원료, 토양 개량재 등 그 활용범위가 넓다.⁵⁻⁸⁾ 또한 제강슬래그는 일반적으로 약 20%의 금속철을 함유하고 있기 때문에 고로슬래그에 비해 금속철이 높은 비중으로 존재한다. 제강슬래그 중의 금속철 및 유기금속은 회수되어 스크랩, 철광석 및 석회석 대용으로 사용되고, 파쇄과정에서 생기는 5~15 mm의 슬래그는 다량의 철성분을 함유하고 있어서 시멘트 공장의 철 원료로 판매되고 있다.³⁾ 한편 제강슬래그의 마모 및 압축에 대한 저항 특성으로 인하여 도로용 미끄럼 방지재료의 사용이 증가하고 있다.⁹⁻¹⁰⁾ 현재는 전로 슬래그의 재활용율이 고로슬래그에 비해 낮지만 시멘트 원료로서의 사용이 증가하고 있고 최근 도로용 기층재의 개발로 사용량이 증가할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 철강 제조 공정 중에서 발생하는 슬래그를 재활용하기 위하여 가장 먼저 이루어지는 철분의

회수에 있어 중요한 방법인 자력 선별 방안에 대하여 고찰하였다. 자장의 세기, 드럼의 회전속도, 슬래그의 투입량에 따른 철분 회수량을 조사하고 이를 바탕으로 철분분리 최적조건 및 입도별 철분 분리량을 도출하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험 재료 및 자력선별 실험

실험에 사용한 수재 슬래그의 경우, 광양제철소에서 발생하는 슬래그 8 종류와 제품으로 출하되는 혼합슬래그를 에이징한 시료 및 이를 100% 건조한 9개의 시료, 그리고 혼합슬래그를 자연건조시킨 시료 등 총 19개의 시료를 사용하였다. 그리고 전로 슬래그의 경우 광양제철소에서 파쇄된 8 mm 이하 크기의 슬래그를 에이징한 시료 및 이를 100% 건조한 시료, 그리고 자연 건조된 포항제철소의 공냉슬래그, 총 3개의 시료를 사용하였다. 각 고로별 수재 슬래그 및 전로 슬래그의 경우, 최초 시료채취시 다량의 수분을 함유하고 있어, 수재 슬래그는 4주간, 전로 슬래그(G)는 8주간의 에이징과정을 거친 후, 다시 이 시료를 건조기를 이용하여 100% 건조하였다. 수재슬래그는 1.2~2.4 mm 사이즈가 약 40%로 많았고, 전로슬래그는 광양제철소의 전로슬래그 (G-슬래그)와 포항제철소 전로슬래그 (P-슬래그) 모두 1.2~2.4 mm의 입도에서 각각 30, 42%로 다량 존재하였다. G-슬래그의 경우 수쇄과정중에 파쇄된 불규칙적인 분말형태의 미분이 많아 0.5 mm 이하의 사이즈가 28%를 차지하였다. 그리고 건조 후 수재슬래그와 전로슬래그 모두 약 3% 정도의 중량 감소를 나타내어 비슷한 수분을 함유하고 있는 것으로 판단된다.

건조된 슬래그를 HDMS-38420 자력선별기(3400 gauss, Daebo Magnetic Co.)를 사용하여 조건별 자력선별 실험을 실시한 후, 분리량 및 입도분포를 측정하고, 산화물의 조성을 알아보았다. 1차 실험은 드럼의 회전속도 및 드럼에 투입되는 슬래그의 양을 변화시켰다. 실험용 시료는 자연건조된 수재슬래그 (혼합)와 수냉 및 공냉전로슬래그를 사용하였으며, 실험량은 자력선별기의 1회 투입가능량인 2 kg을 사용하였다. 실험조건은 자석드럼의 회전속도를 20, 30, 40, 50 rpm 으로 변화를 주고, 투입되는 슬래그의 투입량 즉, 진동퍼더의 진동수 또한 30, 40, 50, 60, 70 Hz 로 각각 변화를 주어 실험한 후 선별된 철분함유 슬래그량을 측정하였다.

2차실험은 1차 실험 결과 알 수 있는 각각의 시료가

안정적인 실험조건에서 시료를 100% 건조시킨 후, 건조된 슬래그와 미건조된 슬래그를 시료별로 각각 10 kg 씩 사용하여 자력선별 실험 후, 선별된 철분함유 슬래그량 및 입도 분포도를 측정하였다. 3차 실험은 철분함량이 많은 전로슬래그를 사용하여 입도별 자장의 세기 변화에 따른 회수율 및 회수된 금속철의 철분함유량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 드럼의 회전속도 및 피더의 진동수 변화

Fig. 1은 드럼의 회전속도 및 피더의 진동수 변화에 따른 수재슬래그의 자력선별실험 결과 분리된 철분함유 슬래그의 양을 나타내었다. 분석결과 수재는 약 0.1~0.5% 정도 철분을 미량 함유하고 있었다. 그리고 진동피더의 진동수가 낮을수록 자력선별된 슬래그량이 증가함을 알 수 있고, 드럼의 회전수 또한 낮을수록 자력선별된 철분 슬래그량이 대체적으로 증가되는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 진동피더의 진동수 및 드럼의 회전수가 낮아짐에 따라 공급되는 슬래그의 양이 감소하여 자력선별이 더욱 효과적으로 이뤄진 것으로 사료된다.

진동수 및 드럼의 회전 속도가 가장 낮은 30 Hz와 회전수 20 rpm에서 가장 많은 철분이 분리되었다. 그러나 진동수 70 Hz에서 자력선별된 슬래그의 경우 0.5 mm 이상의 적갈색의 슬래그만 소량으로 분리되었지만, 낮은 진동수인 30 Hz에서는 적갈색의 슬래그 뿐만 아니라 0.5 mm 이하의 미세 및 반투명한 유리질 분말

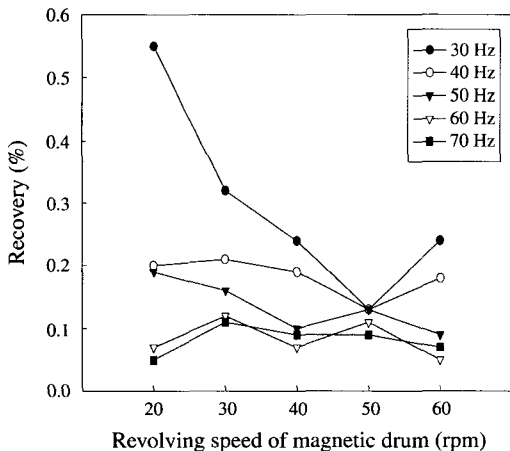


Fig. 1. The effect of magnetic drum speed on BF-slag recovery at different vibrating speed of feeder.

등이 함께 분리되었다. 드럼의 회전수가 증가할 때 분리된 슬래그의 함량은 적어지나, 진동수와는 달리 큰 차이를 나타내지는 않는다. 슬래그의 투입량이 적고 충분한 회전력을 주지 못할 경우, 미분의 슬래그가 드럼 및 피더에 점착되는 현상이 발생하여 자력선별되기 때문에 다량의 슬래그를 얻을 수는 있으나 철분함량이 상대적으로 높은 슬래그를 얻을 수는 없다. 수재 슬래그의 자력선별은 회전수 50 rpm 일 때 진동수의 영향에 관계없이 제거율이 거의 비슷한 결과를 보였다.

전로슬래그의 자력선별 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 드럼의 회전수가 저속인 20에서는 진동수 증가시 회수율이 증가하는 반면, 고속인 40, 50 rpm에서는 진동수 50 Hz까지 회수율이 감소하다 50 Hz 이상에서는 회수율이 증가하는 것으로 조사되었다. 결과적으로 G-슬래그는 진동수 70 Hz, 드럼의 회전수 20 rpm에서 슬

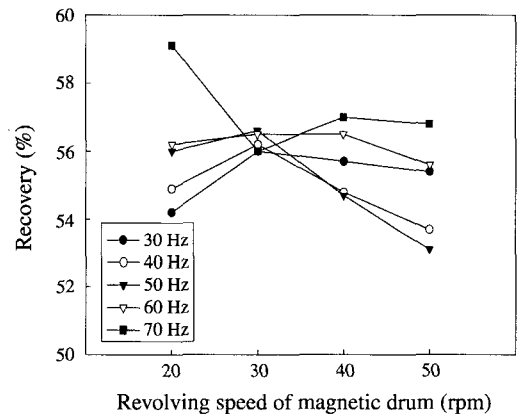


Fig. 2. The effect of magnetic drum speed on LD-slag(G) recovery at different vibrating speed of feeder.

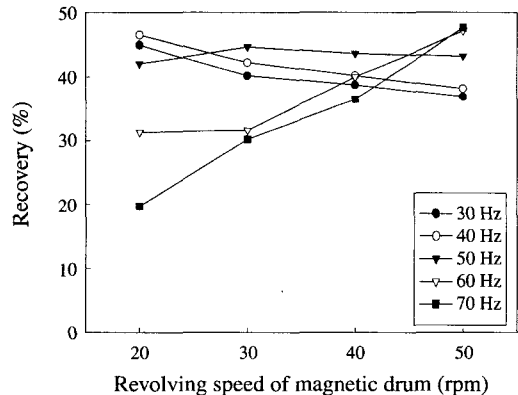


Fig. 3. The effect of magnetic drum speed on LD-slag(P) recovery at different vibrating speed of feeder.

래그의 분리 효율이 가장 좋은 것으로 판단된다. 이것은 미분의 철분 함량이 많은 슬래그의 특성상 많은 양의 투입에 따른 슬래그 간의 응집현상이 발생되기 때문으로 사료된다.

P-슬래그에 대하여 드럼의 회전 속도 및 피더의 진동수가 미치는 영향을 Fig. 3d에 나타내었다. 진동수 증가시 회전수별 회수율의 차가 크며, 회전수가 증가할수록 안정적인 회수율을 나타낸다. P-슬래그는 진동수 70 Hz, 드럼의 회전수 50 rpm에서 가장 많은 슬래그가 분리되었으나 미분이 없고 구형인 시료의 특성상 G-슬래그에 비하여 회수된 철분함유 슬래그의 양이 적은 것으로 조사되었다.

3.2. 건조 유무에 따른 자선 효과

1차 자력선별실험 결과 안정적인 조건인 진동 피더 진동수 40 Hz, 드럼 회전수 50 rpm에서 Fig. 4는 미건

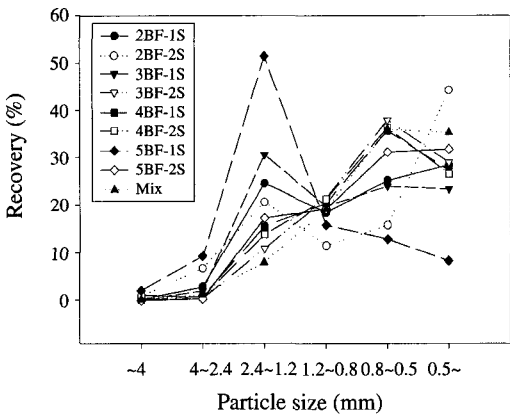


Fig. 4. Size distribution of ferrous BF-slag.

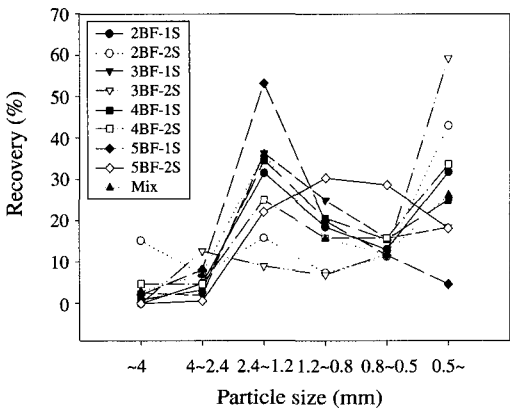


Fig. 5. Size distribution of ferrous BF-slag (dried).

조 수재 슬래그를 나타낸 것이며, Fig. 5는 100% 건조된 수재 슬래그를 실험한 후 이를 입도별 분포로 나타낸 것이다. 0.8 mm 이하의 크기에서는 그 회수율의 차가 크다. 평균적으로 미건조 슬래그는 2.4 mm 이상의 크기에선 미량의 분리가 일어나며 2.4 mm 이하의 크기에서는 유사한 수준의 회수율을 나타내는 반면 건조 슬래그는 1.2~2.4 mm 입도에서 약 42%의 큰 회수율을 나타내는 것으로 관찰되었다.

1차실험의 결과 전로슬래그는 G-슬래그에 대하여 60 Hz, 30 rpm, P-슬래그에 대하여 50 Hz, 40 rpm 에서 안정적인 결과가 관찰되었다. 이 조건으로 실험하여 회수된 철분함유 슬래그의 입도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 철분함유 슬래그가 50% 이상 회수된 G-슬래그에서는 건조 전과 건조 후의 회수율에 있어서는 0.5 mm 이하의 입도에서만 건조된 슬래그의 회수율이 높다. 또한 0.5 mm 이하의 입도에서 40~50% 정도로 가장 많은 회수율을 나타낸다. P-슬래그의 경우 45%의 회수율을 나타내며 1.2~2.4 mm에서 가장 많은 슬래그가 회수되었다.

3.3. 슬래그 중 철분 함량

수재의 경우 슬래그 중의 철분 함량이 미량이어서 입도별로 큰 차이는 나타나지 않으나 0.5 mm 이상의 크기로 시료를 전처리하여 자력선별하는 것이 불순물이 적은 철분을 회수할 수 있는 것으로 사료된다. 전로 슬래그는 4 mm 이하의 입자에서는 입도가 작아질수록 자력선별로 회수되는 정광의 입도에 따른 철분함량이 점차 증가되는 것을 알 수 있으며, G-슬래그의 경우 시료로 사용된 전체 슬래그 중 50% 정도를 차지하고 있는 0.5 mm 이하의 크기에서, 자력 선별되어 회수되는 정광

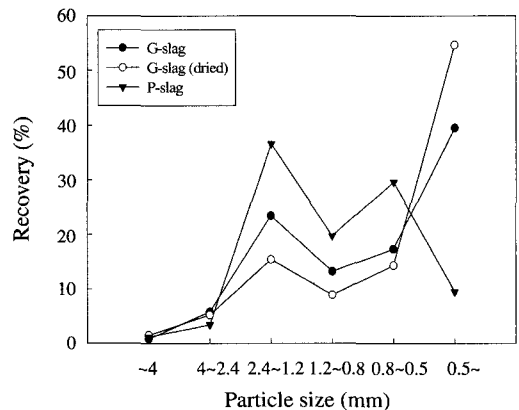


Fig. 6. Size distribution of ferrous LD-slag.

Table 1. Size distribution of various samples used in this study.(unit:wt%)

Sample	Particle size (mm)						total
	~4	4~2.4	2.4~1.2	1.2~0.8	0.8~0.5	0.5~	
BF slag	1.95	0.76	1.2	2.13	2.45	2.82	1.78
(dried)	2.15	0.55	0.79	1.06	0.62	0.8	0.78
G slag	40.0	29.0	41.8	56.8	48.3	72.3	52.2
(dried)	75.2	26.0	27.3	38.0	39.5	98.9	51.6
P slag	28	33	39	45	54	56	46.6

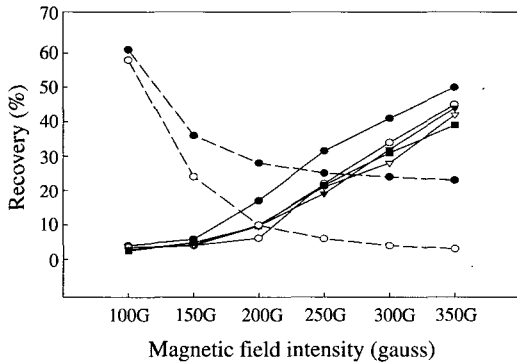


Fig. 7. Recovery in each particles and Metallic Fe(M.Fe) & Total Fe(T.Fe) content on concentration as a function of magnetic field intensity (● < 0.5, ○ 0.5-0.8, ▼ 0.8-1.2, ▽ 1.2-2.4, ■ 2.4-4, --●-- average T.Fe content, --○-- average M.Fe content).

의 철분함량이 72~98% 정도의 비중을 차지하는 것으로 조사되었다. Table 1은 각 입도별 슬래그에서 회수된 철분함유 슬래그양을 나타내었다.

3.4. 자장 세기에 따른 자선효과

Fig. 7은 자장의 세기 변화에 따른 입도별 철분함유 전로 슬래그의 회수량과 금속 철 함유량(M. Fe) 및 총 철분 함유량(T. Fe)과의 관계를 나타낸다. 자장의 세기가 증가할수록 회수율은 증가하지만, 금속철 이외의 화합물의 혼입이 많아지므로 품위가 낮아진다. 자장의 세기를 증가시키면 처음에는 금속철과 강자성체인 FeO, Fe₃O₄ 등의 철 화합물이 주로 회수되나, 자장이 강해질수록 자성이 약한 CaAl₂SiO₇ 및 CaMgSiO₄ 등의 화합물이 많이 포함되므로 품위를 저하시킨다고 할 수 있다. 그러므로 순도가 높은 금속철의 회수를 위해서는 낮은 자장의 강도에서 선별작업이 이루어져야 하며 철의 화합물등도 함께 회수하려면 높은 자장의 강도에서 선별작업이 이루어져야 한다.

4. 결 론

슬래그의 성분은 주로 FeO, CaO, SiO₂, MgO, MnO이며 슬래그에 함유되어 있는 대부분의 금속철은 단체상태로 존재하므로 분쇄만 하여도 분리될 수 있고, 자력선별에 의하여 철분의 회수가 가능하다. 본 실험은 철강 슬래그로부터 자력선별에 의하여 금속철 등의 유가자원을 회수하기 위한 것으로 건식 드럼형 자력선별기를 사용하여 피더의 진동수, 드럼의 회전수, 자장의 세기변화에 따른 자력선별의 효과에 대하여 고찰하였다.

1. 철분함량이 적은 수재슬래그(BF-slag)는 피더의 진동수 및 드럼의 회전수가 느릴수록 회수율은 증가하지만 불순물의 혼입이 많아지며 시간이 오래걸리는 것으로 관찰되었다. 1.2~2.4 mm 입도에서 약 42%로 가장 많은 회수율을 보이며, 0.5 mm 이상의 입도에서 자력선별하는 것이 고품위의 철분을 얻을 수 있는 것으로 사료된다.

2. 미분이 많은 수냉의 전로 슬래그는 피더의 진동수가 빠를수록, 드럼의 회전수가 느릴수록 회수율이 증가하는 것으로 나타났다. 0.5 mm 이하의 입도에서 55% 이상의 가장 많은 회수율을 보이며, 입도의 크기가 작아질수록 입도별 회수율이 증가하며 0.5 mm 이하에서 98%의 금속철이 회수되는 것으로 조사되었다.

3. 구형인 공냉의 전로 슬래그는 피더의 진동수가 낮은 30 Hz, 40 Hz에서는 드럼의 회전수 증가에 따라 회수율이 감소하며, 진동수가 빠른 60 Hz, 70 Hz에서는 드럼의 회전수 증가에 따라 회수율이 증가하는 것으로 나타났다. 1.2~2.4 mm 입도에서 약 37%로 가장 많은 회수율이 관찰되었다.

4. 수재 슬래그는 진동수 40 Hz, 회전수 50 rpm 일 때, 수냉 전로 슬래그는 진동수 60 Hz, 회전수 30 rpm 일 때, 공냉 전로 슬래그는 진동수 50 Hz, 회전수 40 rpm 일 때에 안정적인 선별량을 갖는 것으로 조사되었다.

5. 자력선별시 자장의 세기를 증가하면 회수율은 증가하지만 금속철 이외의 철화합물의 혼입이 많아지므로 품위가 낮아지는 것으로 판단된다. 실험조건의 범위내에서 전로 슬래그의 경우, 회수율은 350G에서 가장 높았으나 정광의 품위를 높이기 위한 최적조건은 100G인 것으로 파악되었다.

참고문헌

1. 반봉찬, 2001: “철강기술의 타산업으로의 응용”, 순천대학교, 25-35.
2. 현중수, 이경훈, 1999: “광양제철소 부산물 발생현황 및 자원화 방향”, 한국자원리싸이클링학회, 22-23.
3. 환경개선활동, 2002: Environmental progress report 2002, POSCO, 13-30.
4. 한기웅, 2001: “부산물 자원화 97% 포항중합제철 (주) 광

- 양제철소”, 에코비21, 34-35.
5. Emery, J. J., 1982: “Slag Utilization in Pavement Construction”, Extending Aggregate Resources, ASTM STP 774, American Society for Testing and Materials, 95-118.
6. Öner, M., Erdoğan, K., and Günlü, A., 2003: “Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement”, Cement and Concrete Research, 33, 463-469.
7. Higgins, D. D., 1995: “Ground granulated blast furnace slag”, World Cem. 6, 51-52.
8. 김화중, 1997: “고로슬래그를 이용한 전자재의 개발에 관한 기초적 연구”, J. Environ. Sci., 11, 33-44.
9. Noureldin, A. S., and McDaniels, R. S., 1991: “Performance Evaluation of Steel Furnace Slag Natural Sand Asphalt Surface Mixtures”, AAPT, 60, 276-303.
10. 전주용, 이관호, 조재윤, 2002: “아스팔트 포장용 재생골재로서 슬래그와 폐주물사의 물성 평가 연구”, 한국폐기물학회지, 19(5), 511-517.

潘 奉 贊

- 현재 순천대학교 금속공학과 교수
- 본 학회지 제8권5호 참조

柳 成 南

- 현재 순천대학교 신소재응용학부 재료금속공학전공 대학원 재학

金 東 秀

- 현재 이화여자대학교 환경공학과 교수
- 본 학회지 제10권3호 참조

《광 고》 본 學會에서 發刊한 자료를 판매하오니 學會사무실로 문의 바랍니다.

- * EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽, 價格 : 20,000원
(International Symposium on East Asian Recycling Technology)
- * 자원리싸이클링의 실제(1994) 400쪽, 價格 : 15,000원
- * 학회지 합본집 I, II, III, IV 價格 : 40,000원, 50,000원(비회원)
(I: 통권 제1호~제10호, II: 통권 제11호~제20호, III: 통권 제21호~제30호, IV: 통권 제31~제40호)
- * 한·일자원리싸이클링공동워크샵 논문집(1996) 483쪽, 價格 : 30,000원
- * 한·미자원리싸이클링공동워크샵 논문집(1996) 174쪽, 價格 : 15,000원
- * 자원리싸이클링 총서I(1997년 1월) 311쪽, 價格 : 18,000원
- * 日本의 리싸이클링 産業(1998년 1월)395쪽, 價格 : 22,000원, 발행처-文知社
- * 리싸이클링백서(자원재활용백서) 440쪽 價格 : 15,000원 "