

電氣爐 製鋼 슬래그에서 磁力選別에 의한 地金の 回收

玄鐘泳 · 金亨錫 · 申康浩 · 趙東星

仁荷大學校 資源工學科

A Study on the Recovery of a Metallic Fe-particle from the Steelmaking E. A. F. Slag by the Magnetic Separation

Jong Yeong Hyun, Hyung Suk Kim, Kang Ho Shin and Dong Sung Cho

Department of Mineral & Energy Resources Eng., Inha University

요 약

I사의 전기로 제강 슬래그(이하 슬래그)는 상당량의 금속철(metal Fe)과 wustite(FeO), magnetite(Fe₃O₄), gehlenite(CaAl₂SiO₇) 및 monticellite(CaMgSiO₄) 등으로 구성된다. 슬래그에 함유된 금속철(Fe 품위: 95%이상)을 회수하기 위해서는 금속철을 단체로 분리시키는 것이 바람직하며, 매립으로 활용할 수 밖에 없는 슬래그를 단계적으로 파쇄하면 대부분의 금속철은 구상의 단체로 분리된다. 구상의 단체인 금속철의 크기에 따라 흡인되는 자장의 세기를 측정하면 금속철이 흡인되는 최소 자장의 세기는 약 100G로 거의 일정하다. 다단계로 파쇄한 슬래그를 100G의 자장에서 회수한 산물은 95%이상의 철분이 함유된 금속철이었으나, 자장의 세기를 증가시키면 철의 산화물 및 알칼리 토금속류의 화합물들도 함께 회수되므로 품위가 저하된다. 따라서 매립되는 슬래그를 다단계로 파쇄하고, 각 입도에서 100G로 자선하면 파쇄된 슬래그에 함유된 대부분의 금속철을 회수할 수 있다. I사에서 매립하는 35만톤의 슬래그를 다단계로 파쇄하는 경우에, 30~4.7 mm의 입도에서는 매립되는 전체 슬래그중의 약 0.73%인 2천 5백톤 정도의 금속철이 100G의 자장에서 회수될 수 있고, 4.7~0.3 mm서도 약 1.2%인 4천 2백톤 정도가 회수될 수 있다. 그러므로 자력선별로 회수할 수 있는 금속철은 매립되는 슬래그중의 약 1.9%인 6천 7백톤 정도가 된다.

ABSTRACT

The E.A.F. steelmaking slag (slag that follow) of a company I Co., contained a simple substance of a metal, wustite (FeO), magnetite (Fe₃O₄), gehlenite (CaAl₂SiO₇), monticellite (CaMgSiO₄), etc. To recover a metal (Fe grade . +95%) in the slag, it is desirable that the particles of a metal are isolated from the slag and made for a liberated substance. Then, the liberated metal is easily recovered by a magnetic separation. If the reclaimed slag, the size of which ranges under 40 mm, have a multi-stage crushing, the most of a metal in the slag is simply isolated as a liberated substance. If the metal, that is a liberated substance and a sphere, is recovered by a magnetic field intensity, the minimum intensity, at which a metal is attracted, is approximately 100G and did not depend on the particle size of a metal in the same particles. The recovered material, that contained a iron (Fe) over 95%, is a metal which is crushed slag by 100G in the multi-stage. If the magnetic field intensity increase, the recovery increase, but the concentration grade decrease. Because the concentration earns more and more impurities, iron oxide and the compound of alkali earth element. Therefore If the reclaimed slag have the multi-stage crushing, the metal is almostly recovered in the crushed slag by 100G on each particles. If the slag, used as a reclamation that is a amount of 350,000 ton from I Co., was under the multi-stage crushing and then separated by 100gauss, it is possible to recover a metal approximately 2,500 ton, that is 0.73% of a reclaimed slag. in 30~4.7 mm particles and to recover 4,200 ton in 0.3~4.7 mm particles, that is 1.2% of a reclaimed slag, in a year. Therefore, the total recoverable metal is 6,700 ton, that is 1.9% of a reclaimed slag, in a year, too.

1. 서 론

전기로 제강공정에서 필연적으로 발생되는 부산물이 전기로 제강 슬래그(이하 슬래그)이다. 슬래그는 흔히 단순 매립이나 도로의 노반재등으로 활용되기도 하지만, 금속철(metal Fe)이 함유된 슬래그를 파쇄한 후 자력선별로 Fe가 95%이상 함유된 금속철을 회수하여 제강원료로 재사용하는 것은 좋은 자원의 재활용이라고 할 수 있겠다.

전기로 제강업체인 I사(주)는 1995년도에 약 360만톤의 철강을 생산하였고, 부산물로 철분(Fe)이 21%정도 함유된 약 46만톤의 슬래그를 배출하였다. 그리고 수선과 자력선별로 슬래그에 함유된 철분의 약 38%(36,800톤)를 굵은 입자의 금속철로 회수하였다. 금속철을 회수하고 남게 되는 40~100 mm의 슬래그는 도로의 노반재로 사용하고, 40 mm이하의 단순한 매립에 활용하였다. 그러므로 I사의 수선이나 자력선별의 처리설비에서 회수하지 못한 약 62%(59,800톤)의 철성분이 매립이나 노반재로 사용된 슬래그에 함유되어 폐기되고 있는 실정이다. 따라서 상당량의 소중한 재료자원이 폐기되므로, 슬래그에서 단체로 분리될 수 있는 금속철을 선별하여 제강원료로 재활용함을 목적으로 하였다.

현재, 입도가 40~100 mm인 7만 2천톤 정도의 슬래그는 도로의 노반재로 사용되며, 슬래그에 함유된 철분의 약 42%인 2만 5천톤 정도를 함유한다. 철의 밀도가 조암광물에 비하여 높기 때문에 슬래그를 파쇄하면 굵은 입자에는 단체상태로 존재하는 금속철이 많지므로, 도로의 노반재로 활용되는 슬래그에 함유된 철분의 상당량은 금속철로 존재할 것이다. 그러나 이들 조립의 금속철 입자는 현재 시설된 자력선별 장치로 선별이 가능하며, 더구나 실험실에서 회수실험용 시료로는 사용이 곤란하므로 회수실험의 대상에서 제외하였다.

40 mm 이하의 단순 매립에 이용되는 슬래그는 35만톤 정도이지만 나머지의 약 58%인 3만 4천 8백톤 정도의 철성분을 함유한다. 이 슬래그에 함유된 철분의 22% 정도는 단체상태인 금속철로, 나머지는 철의 화합물등으로 존재한다.

따라서 본 실험에서는 I사에서 배출되는 슬래그중에서 그 양이 대단히 많고 파분쇄가 비교적 용이한 40 mm이하의 매립되는 슬래그만을 다단계로 파쇄한 후 금속철 입자들을 자력선별로 회수하는 실험을 하였다.

2. 시료 및 실험방법

본 실험에 사용된 시료는 전보(前報)¹⁾와 같은 전기로 제강 슬래그(이하 슬래그)이다. 슬래그내에 존재하는 철분의

상태는 거의 순수한 금속철(Fe 함유 .95%이상), 철의 산화물 및 철과 알칼리 토금속류와의 화합물등의 상태이다.¹⁾

용융된 슬래그를 장시간 정치(靜置)시켜 서냉한다면, 철의 미립자들은 밀도가 높고 응집력이 크기 때문에 점점 커다란 구형의 입자가 되므로, 운반포트의 하부로 농집하게 될 것이다. 그러나 용융된 슬래그가 완전히 고결되기까지는 많은 시간이 소요되고, 슬래그가 완전히 고결되면 운반포트에서의 분리, 즉 하적이 곤란하기 때문에, 실제공정에서는 슬래그를 유동성이 있을 때에 야적장에 하치시키게 된다. 따라서 하적된 슬래그에 함유된 금속철의 작은 입자들은 큰 입자가 되지 못하고, 슬래그내에서 분산된 상태로 고화(固化)하게 된다.¹⁾

본 실험에서는 매립으로 사용되는 슬래그를 파쇄할 때에 실험실용 jaw crusher의 출광구를 적절히 조절하여 금속철의 입자가 95% 이상의 철분의 단체로 분리되도록 단계적인 파쇄를 하였다. 파쇄배과정에서 조암광물이나 철의 화합물들은 취성이 크기 때문에 용이하게 파쇄되지만, 금속철의 입자는 조립이라도 강도와 전성이 크기 때문에 파쇄되지 않고, 큰 입자는 압착되어 판상으로 변형되거나 파쇄기를 정지시켰다. 그러나 작고 구상에 가까운 금속철의 입자들은 대부분이 단체로 분리된다.

다단계 파쇄에 의해 단체분리된 구형인 금속철 입자의 크기에 따른 흡인 자장의 세기를 조사하여 보았다. 이때의 시료는 압쇄에 의해서 변형이 되지 않은 구형(球形)의 입자였지만, 직육면체의 상당경으로 크기를 표현하여 보았다. 자력선별에서는 시료와 영구자석(3,000 gauss, Daebco Magnetic Co.)간의 거리를 조절하여 자장의 세기를 변화시켰고,

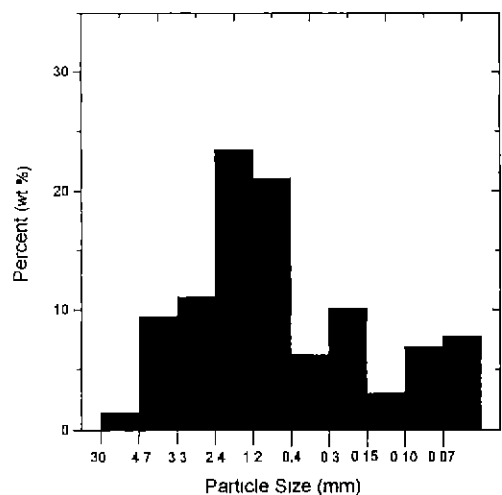


Fig. 1. Particle size distribution of crushed slag in -40 mm.

자장의 세기는 Gaussmeter(MODEL 9500 GAUSSMETER, F.W. Bell)로 측정하였다. 그리고 슬래그에 함유된 철분(Fe)은 분광광도계(930 UVICON Spectrophotometer, KONTRON)로 측정하였고, 금속철 이외의 물질은 X선 회절분석(PW1700, Xray Diffractometer, PHILIPS)으로 조성을 알아 보았다.

Fig. 1은 매립으로 사용되는 40 mm이하의 슬래그를 30 mm이하로 파쇄한 시료의 입도분포를 보인 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 30~4.7 mm의 입도는 약 1.4%이고, 4.7~0.3 mm는 70.8%정도이며, 0.3 mm이하는 약 27.8%의 분포를 보였다.

3. 실험결과 및 고찰

슬래그에 함유된 구형인 금속철 입자의 크기에 따른 흡인되는 자장의 크기를 측정한 결과를 Table 1에 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 금속철이 흡인되는 자장의 최소 세기는 약 100G로 입자의 크기에 관계되지 않고 거의 일정하였다 따라서 구형인 금속철의 경우에 시료의 크기는 흡인되는 자장의 최소 강도에 영향을 끼치지 않는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 70.8%를 차지하는 4.7~0.3 mm의 시료를 자장의 세기를 변화시키에 따른 각 입도별 시료의 회수율과 회수산물에 함유된 철분의 평균 함유율을 보인 것이다.

Fig. 2에서 입도별, 자장의 강도별 시료의 회수율은 뚜렷한 차이를 보이지 않으나, 100G로 회수된 산물은 철분이 95% 이상 함유된 금속철이고, 자장의 세기가 높아지면, 철분과 금속철의 함유율은 점차 낮아져서, 340G에서는 철분은 약 25%이고, 금속철은 5%정도까지 함유율이 낮아졌다.

즉, 자력선별시 자장의 세기를 증가시키면 시료의 회수율은 증가하지만 금속철이외의 화합물의 혼입이 많아지므로 품위가 낮아진다. 그러므로 회수산물의 품위를 저하시키는 화합물의 종류를 알아보기 위한 입도별 XRD(X-Ray Diffraction) 분석의 결과를 Fig. 3~Fig. 7에 나타내었고, 0.07

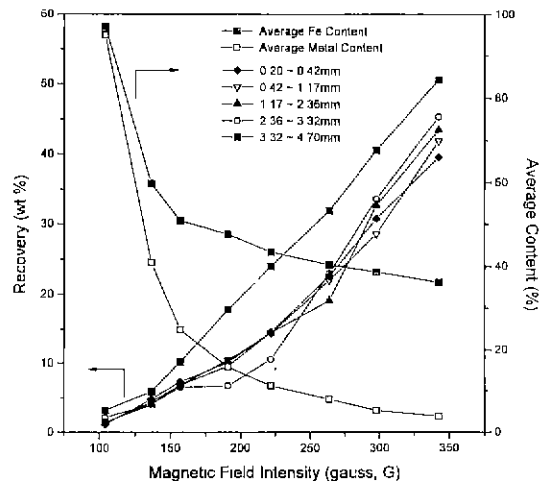


Fig. 2. Recovery in each particles and average Fe & metal content on concentration as a function of magnetic field intensity (gauss).

mm 이하인 시료를 1,500G의 자장에서 선별하였을 때에 정광, 중광 및 광미의 X선 회절분석 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 3~7에서 보는 바와 같이, 자장의 세기에 따른 입도별로 회수된 산물들의 회절선이 매우 비슷하므로 회수된 화합물의 종류에는 별 변화가 없는 것으로 판단된다. 그리고 각 입도에서 자장의 세기를 증가시키면 처음에는 금속철과 wustite(FeO), magnetite(Fe₃O₄) 등의 철의 화합물이 주로 회수되나, 더욱 자장이 강해지면 gehlenite(CaAl₂SiO₇), monticellite(CaMgSiO₄) 등의 화합물도 더욱 많이 포함되므로 품위를 저하시킨다고 할 수 있다. Fig. 8에서도 역시 정광을 구성하는 물질은 주로 강자성체인 wustite, syn., magnetite, syn. 등이 확인되며, 광미는 자성이 매우 약한 gehlenite, syn. 및 monticellite, syn.등 이고, 중광의 경우에는 wustite, syn., magnetite, syn, gehlenite, syn. 및 monticellite, syn.등이 혼재함을 알 수 있겠다. 그러므로 순도가 높은 금속철의 회수율을 높이기 위해서는 낮은 자장의 강도에서 선별작업이 이루어짐이 바람직하다고 하겠다

Table 1. Particle size and attracted minimum magnetic field intensity on metal Fe particles (major axial length: l, minor axial length: b, thickness: h, gauss: G)

Sample No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Particle size (mm), $\sqrt[3]{lbt}$	23 25	17 64	14.41	9.50	7.29	6.40	4.8	3.9	1.8	0.7	0.37
Attracted Minimum Magnetic Field Intensity (G)	100	104	99	102	96	95	98	97	99	96	95

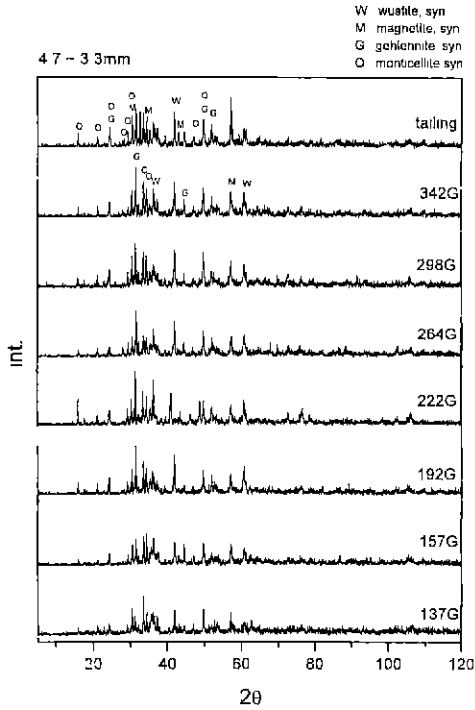


Fig. 3. XRD pattern of recovered slag by each gauss in 4.7~3.3 mm

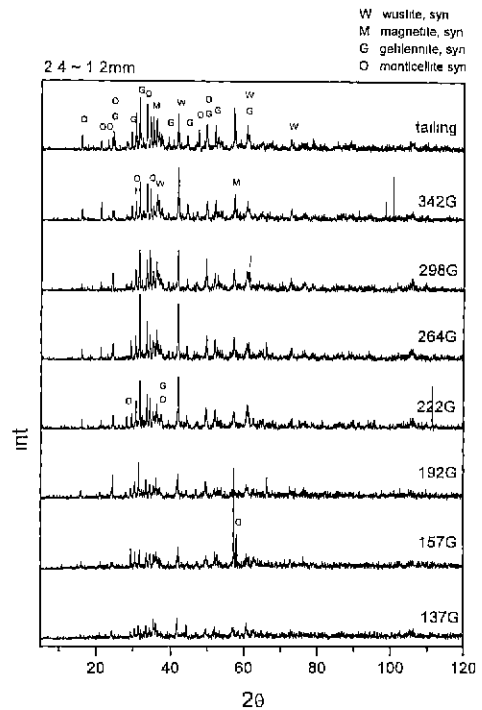


Fig. 5. XRD pattern of recovered slag by each gauss in 2.4~1.2 mm

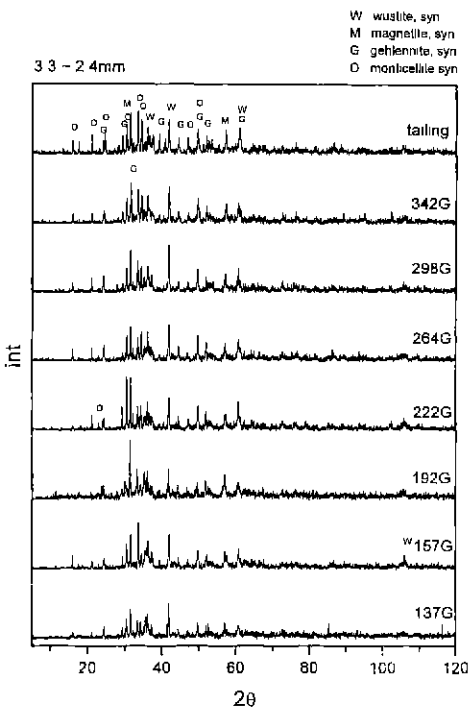


Fig. 4. XRD pattern of recovered slag by each gauss in 3.3~2.4 mm

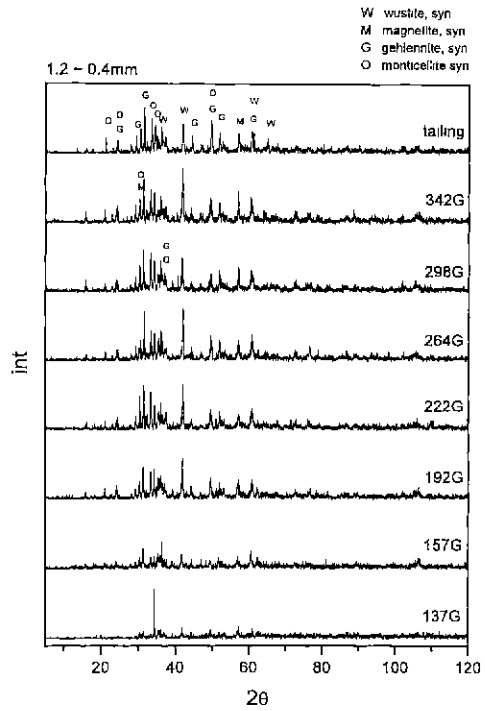


Fig. 6. XRD pattern of recovered slag by each gauss in 1.2~0.4 mm.

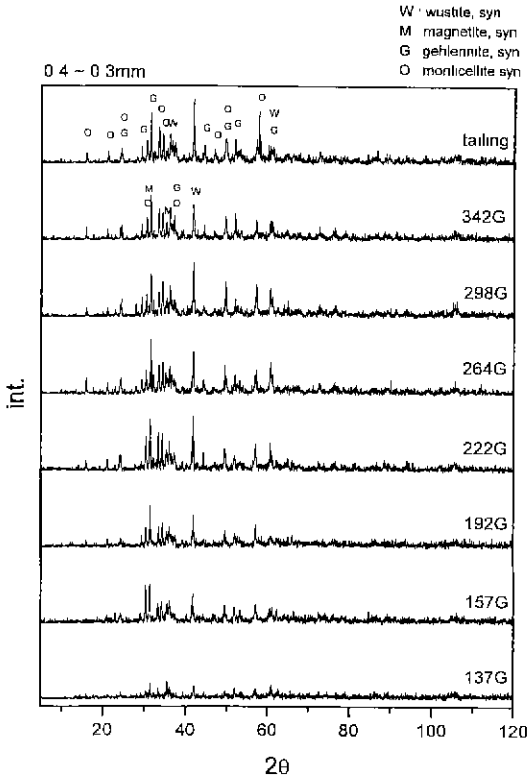


Fig. 7. XRD pattern of recovered slag by each gauss in 0.4-0.3 mm.

단순 매립으로만 사용되는 35만톤의 슬래그중에서 약 60 kg의 슬래그를 다단계로 파쇄한 시료를 100G에서 자선한 결과를 Table 2에 나타내었다. 여기서 슬래그중에 함유된 금속철의 양은 자력선별시 원광으로 사용된 시료를 더욱 가늘게 파쇄하였을때 파쇄가 되지않은 금속철을 회수하여 생산한 값이다.

100G의 자장에서 금속철의 입도별 회수율은 95%이상이므로 파쇄된 슬래그에 함유된 거의 대부분의 금속철을 회수할 수 있었다. 이와 같이 금속철의 대부분을 회수할 수

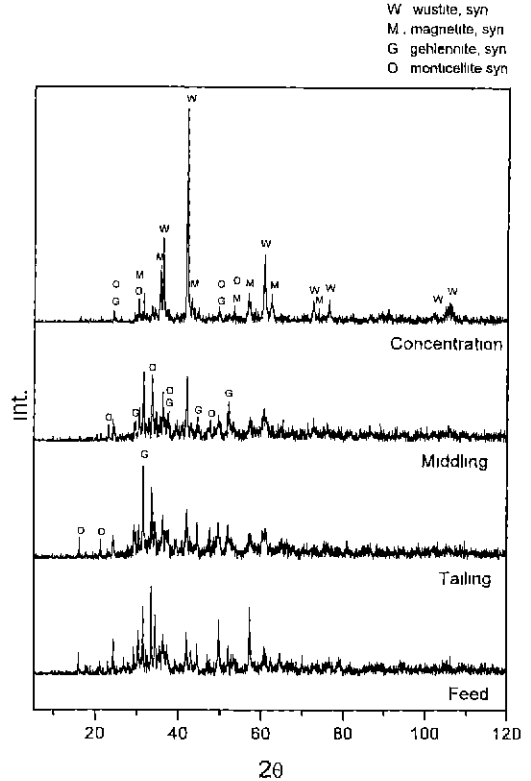


Fig. 8. XRD pattern of feed, concentration, middling and tailing by 100G in -0.07 mm.

있었던 원인의 하나는 매립용 슬래그를 다단계로 파쇄하면 파쇄 효과는 금속철의 결정입계나 공극과 같은 부분에 집중된다. 또한 금속철과 철의 화합물이나 기타 화합물과의 파쇄강도가 다르기 때문에 금속철의 대부분이 단체로써 양호하게 분리되므로 자력선별에서 회수가 잘 되는 것으로 생각된다.

그리고 30~4.7mm와 같이 굵은 입도에서의 회수율은 약 52%를 보였으나, 나머지의 작은 입도에서는 회수율이 약 1~3%로 급격히 낮지만, 회수된 산물은 금속철의 단체로 분

Table 2. Results of experiments on the crushed slag

Particle size (mm)	30~4.7	4.7~3.3	3.3~2.4	2.4~1.2	1.2~0.4	0.4~0.3	-0.3	Total
Sample weight (g)	852.6	5,603.7	6,556	13,890.9	12,463.1	3,683.9	16,142.6	59,493.2
Sample weight distribution (%)	1.4	9.4	11.0	23.3	20.9	6.2	27.8	100
Metal weight in sample (g)	452.4	187.2	144.9	204.2	170.4	42.5	99.5	1,301.1
Metal weight distribution in sample (%)	34.2	14.5	11.2	15.8	13.1	3.3	7.9	100
Recovered metal weight by 100G (g)	44.24	179.2	137.8	194.4	162.1	40.6		1,156.5
Recovered metal weight/total metal weight × 100 (%)	97.8	95.7	95.1	95.2	95.1	95.6		
Recovered metal weight/sample weight × 100 (%)	51.9	3.2	2.1	1.4	1.3	1.1		
Recovered metal weight/total sample weight × 100 (%)	0.73	0.3	0.23	0.33	0.27	0.07		1.9

석되었다. 실험의 결과가 작은 입도에서의 회수율이 급격하게 감소되는 이유는 다단계로 파쇄를 할 때에 금속철의 입자는 파분쇄되지 않으며, 밀도가 큰 철의 입자들은 강한 응집력을 갖기 때문에, 회수율도 작은 입도의 산물에서 보다 훨씬 높게 나타나는 것으로 생각된다.

따라서 입도가 40 mm이하이기 때문에 매립될 수 밖에 없는 슬래그도 다단계로 파쇄하고 100G 정도의 낮은 자장으로 금속철을 회수하면, 30~4.7 mm의 입도에서는 매립되는 전체 슬래그중의 0.73%정도인 약 2천5백톤, 4.7~0.3 mm에서도 1.2% 정도인 약 4천 2백톤을 회수할 수 있게 된다. 그러므로 자력선별로 회수할 수 있는 금속철은 매립되는 슬래그중의 약 1.9%인 6천 7백톤 정도였다.

따라서 현재 매립으로 이용되는 슬래그는 단순한 충전재로써 이용할 수도 있지만, 다단계 파쇄와 낮은 자장의 강도로 자력선별을 시행한다면 슬래그에 포함되어 폐기될 수 밖에 없는 금속철의 대부분을 회수할 수 있고, 회수된 금속철은 철분의 함량이 95% 이상이므로 제강원료로 재활용이 가능하다고 할 수 있다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 금속철만을 목적으로 하는 선별에서는 100G 정도의 자장으로 자력선별을 함이 바람직하며, 철의 화합물들도 함께 회수하려면 더욱 높은 자장의 강도에서 선별작업이 이루어짐이 바람직하다고 할 수 있겠다.

4. 결 론

전기로 제강업체인 I사에서 배출되는 전기로 제강 슬래

그를 자력선별하여 다음과 같은 결론을 얻었다

1. 구상의 단체인 금속철의 크기에 따른 흡인되는 자장의 최소 세기는 약 100G로 입자의 크기에 관계없이 거의 일정하였다.
2. 슬래그에 함유되어 있는 금속철은 대부분이 간단히 파분쇄만 하여도 단체로서 분리가 가능한 상태이고, 약 100G의 낮은 자장에서는 순도 95% 이상인 금속철을 회수할 수 있다.
3. 슬래그를 구성하는 성분중에서 금속철을 제외한 물질은 주로 wustite(FeO), syn., magnetite(Fe₃O₄), syn., gehlenite(CaAl₂SiO₇), syn. 및 monticellite(CaMgSiO₄), syn. 등이 확인되었다.
4. 매립으로 폐기되는 슬래그를 다단계로 파쇄하여 100G의 자장에서 선별을 한다면 매립되는 슬래그중의 약 1.9%인 약 6천 7백톤/년 정도의 금속철을 회수할 수 있다.

후 기

본 연구는 인하대학교의 연구비 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 현종영, 김형석, 조동성 · "전기로 제강 슬래그의 물성에 관한 연구". 지원리사이클링지 Vol. 5, No. 3, 17-23 (1996).