

電磁石 流動層에 의한 磁性/非磁性 粒子的 分離

金春河 · 徐仁國*

釜慶大學校 化學工學科, *浦項製鐵 技術研究所 銑鋼研究 Team

Separation of Magnetic/non-Magnetic Particles by an Electromagnetic Fluidized Bed

Yong-Ha Kim and In-Kook Suh*

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan, Korea,

*Iron & Steelmaking Research Team, POSCO Technical Research Laboratories, Pohang, Korea

요 약

미립의 자성/비자성 입자의 혼합분체로부터 자성 입자만을 연속적으로 분리할 수 있는 전자석 유동층이 제안되었고 본 선별기에 의해 분리된 입자분중 자성 분율에 대한 공압 가스유속, 혼합분체내 자성 입자의 분율 (= 100 - 비자성 입자의 분율) 및 전자석으로 공급되는 전류 세기와 같은 조업변수의 영향이 규명되었다. 전자석 유동층에 의한 자성 분리는 미립의 혼합분체내 자성입자에 작용하는 전자석의 자력이 분체를 유동화시키는 가스흐름으로 인한 유체력보다 클때 가능성이 밝혀졌다.

ABSTRACT

An electromagnetic fluidized bed was proposed for the continuous separation of magnetic particles from the fine admixtures with non-magnetic particles. The effects of operating variables on the magnetic fraction in the separated particles were examined, including superficial gas velocity, mixing fraction of magnetic particles (=100-mixing fraction of non-magnetic particles) in the admixture, and electric current supplied to the electromagnet. It was found that the separation was possible when a magnetic force formed by the electromagnets works on the magnetic particles over the hydrodynamic force caused by a gas stream for fluidizing the fine admixture.

1. 서 론

자성분리는 공업적으로 긴 역사를 갖고 있는 기술로서 자성과 비자성 입자가 섞여있는 혼합체의 대자율 (magnetic susceptibility), 즉 자장과 이 자장내에 놓여있는 물체의 자화강도의 비의 차이를 이용하여 자성/비자성 혼합체내 자성 물질의 농도를 올리는 농축분리나 유체 흐름으로부터 비자성 물질을 선택적으로 분리하는데 사용되어 오고 있다. 이와같은 자성 분리는 자기장이 형성된 영역내로 입자의 부유상이나 혼합체를 통과시켜 자성을 띠고있는 입자만을 선택적으로 분리 또는 체류시키는 것이다. 자성 분리에 있어서 각 입자에 가해지는 힘들로서는 자력외에도 중력, 유체력,

관성 및 원심력등이 작용하며 이들에 의해 입자의 운동이 영향을 받는다. 따라서 자성입자에 가해지는 자력이 자력이 외의 다른 힘들의 합보다 커야하는 것이 자성분리의 필요조건으로 된다. 일반적으로 사용되는 회전 드럼형 자력 선별기에 의한 건식 처리에서는 혼합체의 입도가 작은 경우 입자의 비산 또는 응집이 일어나기 쉬울 뿐 아니라 교호이극 (alternative polarity)에 의한 자극 변화로 자성/비자성 입자의 상대적 이동거리가 작아짐에 따라 선별 효율이 저하되므로 약 140 μm 이상의 비교적 큰 입자의 자성분리에만 적용되고 있으며 습식 처리법이 수반되어 실시되는 자력선별에서는 미립자의 처리가 가능하고 비자성 입자가 자성입자의 표면에 부착되는 현상을 억제할 수 있으나 시료의 종류에 따라

서는 불과의 반응성 및 수질 오염의 문제가 있으며 또한 건조 등의 2차적인 처리가 필요하다¹⁾ 제철 plant의 E.A.F.나 B.O.F.에서의 dust 또는 석탄화력 발전의 fly ash는 대표적인 미립의 자성/비자성 혼합분체로 대기 방출시 환경오염 발생이 우려되며 또한 자원 재활용 측면에서 이들의 자성분리에 대한 관심이 높아지고 있다.¹⁾ 이에 따라 본 연구에서는 기존의 회전 드럼형 전석 자력 선별기로는 자성처리가 어려운 미립의 자성과 비자성 입자의 혼합분체로부터 자성 입자만을 분리할 수 있는 전자석 유동층식 자력 선별기를 제안하고 본 선별기에 의해 분리된 입자분중 자성분율에 대한 주요 조업 변수의 영향을 규명하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이며, 유동층, 전자석, 공기 공급기, 입자의 공급 및 배출기, 그리고 사이클론과 bag filter로 구성되어 있다. 본 장치에 있어서 원료의 유동 및 자성분리가 일어나는 주요부분은 두께가 6 mm, 내경이 13.8 cm, 높이가 97.5 cm인 투명 아크릴 관으로 제작되었으며, 이와같은 아크릴관내에 직경 11.7 cm, 높이 97.5 cm이며 스테인레스 310 관을 동심원 형태로 설치하여 아크릴관내를 두 부분으로 나뉘어 있다. 이는 공기의 흐름에 의해 자성과 비자성 입자의 혼합분체를 유동시키는 내측의 core와 배출되는 입자의 중력 흐름을 위한 외측의

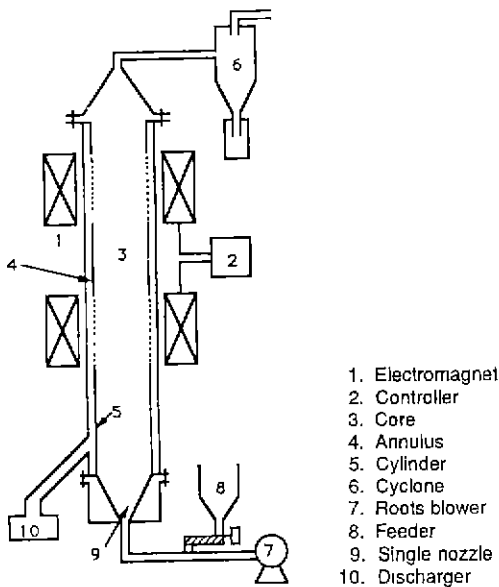


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

annulus부이며, 이때 아크릴 내벽과 스테인레스 다공판과의 간격은 1.05 cm이었다 스테인레스판에는 전자석에 의해 둘러싸인 부분에만 직경이 3 mm인 구멍이 3 mm 간격으로 뚫여 있어 약 52%의 개구비를 보이는데 이와같은 구멍을 통해 core부로부터 annulus 부로의 입자 흐름이 가능하다. Roots blower에서 공급된 공기는 rotameter형 공기 유량 조절기와 직경 1.5 cm의 단일 노즐을 지나 가스흐름 조절부와 core 부분까지의 수직거리가 21 cm인 45° 원추형 가스 팽창기를 거치면서 고르게 분산되도록 되어있다. 가스흐름 조절부의 상단으로부터 축방향으로 26 cm와 76 cm의 위치에 각각 1개씩의 전자석을 설치하여 유동층의 축 중심에서 바깥쪽으로 자기장을 형성하되 각 전자석의 자기장 발생 지속 및 자기장 소멸시간을 조정하여 상/하 전자석의 자기장 소멸이 동시에 발생하지 않도록 조정하므로써 하부 전자석의 자장 소멸시간에 미분리된 채 통과한 자성 입자도 상부 전자석에서는 분리가 가능토록 하였다. 이때 유동층의 실험부분은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 8 극의 자성회로로 구성되는 전자석의 중앙 공간을 통과하도록 되어있는데 [(말굽)형 coil의 N-S 극으로 구성된 자극이 유동층의 축을 중심으로 동일극이 마주보도록 배치되어 있다 전자석의 중앙부위 공간의 직경은 약 15.5 cm이며, 전자석의 coil은 두께 2 cm, 폭 3 cm, 높이 9.5 cm, 말굽단의 길이가 4 cm인 순철위에 두께가 0.7 mm인 구리선을 약 5000회 감아서 제작한 것이며 전자석의 외경은 32 cm, 높이는 전자석을 상하로 받쳐주는 플라스틱 판을 포함하여 16 cm이다. 이와같은 전자석은 약 30 A에서 최대 자장이 형성되고 3초동안 자기장을 발생 지속시킨후 0.5초동안은 전원을 차단하여 자기장을 소멸시키는, 즉 간헐조업이 가능한 사이클식 기구이다. 전자석에 의해 형성된 자기장의 강도는 전류의 세기 변

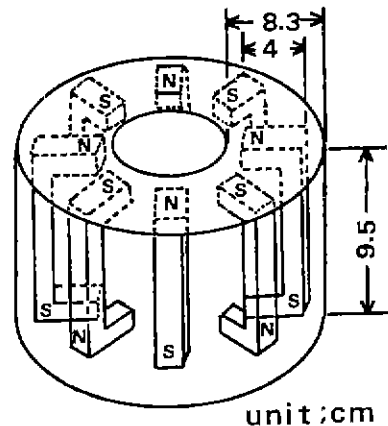


Fig. 2. Electromagnet with 8-pole magnetic circuitry.

화에 따라 제어가 가능하도록 되어있다.

저장 호퍼로부터 스크류피더에 의해 배출된 자성/비자성 입자의 혼합분체는 공기 수송에 의해 약 60 g/min의 속도로 유동층에 공급되면서 자성분리를 위해 기체-고체가 부유상태를 보이는 유동층을 형성한다. 매 실험에서의 실험시간은 5~7 분정도이며 배출기와 사이클론 및 bag filter에 포집된 입자분에 대한 실리카와 자철광이 혼합된 시료에 대해서는 표준시료의 X-선 회절 분석에 의해 얻어진 검량 곡선과의 비교에 의해, 밀분과 자철광이 혼합된 것은 수세에 의해 자성과 비자성 입자의 분율을 구하였다. 유동층으로부터 배출된 입자분중 자성 분율과 사이클론과 bag-filter와 같은 포집기에 의해 포집된 입자분중 자성 분율은 각각 다음식에 의해 계산하였다.

$$\text{배출 입자분중 자성분율} = (\text{배출 입자분중 자성입자 무게}) / (\text{배출분의 무게}) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{포집 입자분중 자성분율} = (\text{포집 입자분중 자성입자 무게}) / (\text{포집분의 무게}) \times 100 \quad (2)$$

본 실험에서 자성입자로는 자철광 (magnetite : Fe₃O₄)을, 비자성입자로는 자성입자에 대한 부착력을 고려하여 실리카와 밀분의 2종류를 사용하였는데 이들은 가스유동시 기포분열 빈도와 층 팽창이 커 유동상태가 양호한 Geldart A 그룹에 속한다.²⁾ 입자별 입도 범위, 밀도 그리고 입자의 최소유동화 속도 및 종말속도는 Table 1과 같다.³⁾ 가스유속, 혼합분체내 자성입자의 분율 (=100-비자성 입자의 분율) 및 전자석에 공급되는 전류 세기를 본 실험의 조업변수로 하였으며 Table 2는 각 조업변수별 제어범위를 나타낸 것으로 가스유속은 층내에서 자철광이 순환유동되도록 자철광의 최소 및 최대 종말속도 범위내에서 변화시켰다.

Table 1. Physical properties of particles used in the test

Particles	Size range (μm)	Density (kg/m ³)	Minimum fluidization velocity × 10 ³ (m/s)	Terminal velocity (m/s)
Magnetite	62~125	5100	8.1~32.7	0.58~1.63
Silica	62~105	2200	3.5~10.0	0.25~0.73
Wheat Flour	44~62	1150	0.9~1.8	0.07~0.13

Table 2. Experimental conditions

Superficial Gas Velocity : 0.9~1.4 m/s
Magnetic Fraction in the Admixture: 50, 60, 70, 80, 85 wt%
Electric Current : 0, 10, 20, 30 A

3. 결과 및 고찰

유동층내에서의 자성분리 현상을 해석하기 위해서는 전자석 유동층내 가스와 고체 입자의 흐름 역학을 이해하는 것이 중요하다. 유동층내 수직방향의 가스와 입자의 흐름에 따라 층내는 두 부분으로 나눌 수 있다. 하나는 혼합분체의 공기수송을 원활히 하기위한 jetting 부분으로 단일 노출형의 분산관 직상부에 형성되며 다른 하나는 유동층의 상부에 형성되는 유동층 부분이다. 분체의 순환유동층 형성이 충분할 만큼 가스유속이 높은 경우 유동층 부분은 반경방향으로 유체역학적 거동이 상이한 두 부분으로 구성된다. 즉 층의 중심부분에는 가벼운 입자로서의 비자성 입자와 미립의 자성입자가 가스와의 향류형 흐름으로 층상부를 향해 공기 수송으로 비산되는 반면 층의 벽에 가까운 부분에는 무거운 입자가 가스 흐름에 대해 병류흐름으로 벽을 따라 하강하는 환상류 구조가 존재하게 된다 이는 순환유동층 시스템의 riser내에서 관찰되는 core-annulus의 흐름과 유사하다.⁴⁾

전자석 유동층에 의한 자성/비자성 입자 분리의 원리는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 여기서 ●, △, ○은 각각 무거운 자성입자, 가벼운 자성 입자 그리고 비자성 입자를 나타내는 것으로, 혼합분체의 순환유동 상태가 형성되기에 충분한 가스유속 조건하에서는 벽을 따라 하강흐름을 하게되는 무거운 자성입자는 스테인레스관의 구멍을 통해 annulus 부

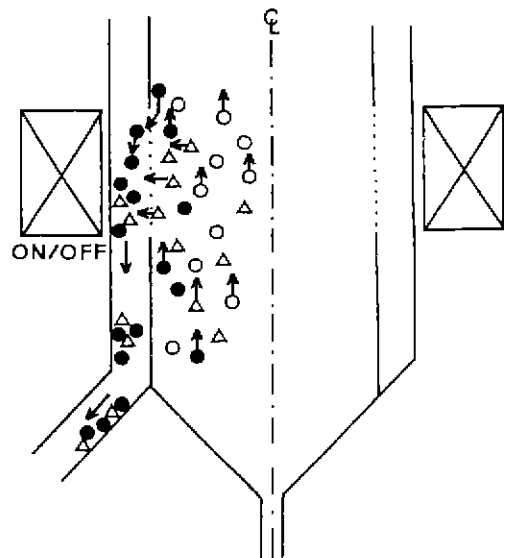


Fig. 3. Separation principle of magnetic and non-magnetic particles by an electromagnetic fluidized bed (EMFB).

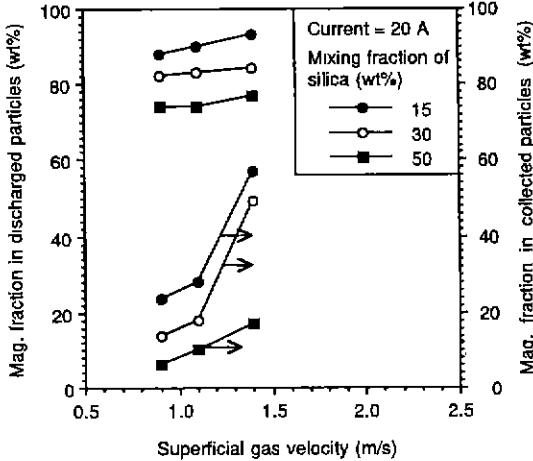


Fig. 4. Effect of superficial gas velocity on the magnetic fractions in the particles separated by EMFB at different mixing fractions of silica.

분으로 흐르게 되는데 이러한 현상은 자기장이 존재치않는 경우에도 일어난다. 층의 중심부에서 공기수송되는 미립 자성입자에 전자력이 가해지는 경우 그들은 벽쪽으로 이동되어 스테인레스 관의 구멍을 통해 annulus 부분으로 분리된다 한편 공기수송되는 비자성 미립입자는 사이클론과 bag-filter등에서 포집되면서 배출가스와 분리된다.

Fig. 4는 실리카가 15, 30, 50%의 무게비율로 혼합된 분체로부터 분리하여 얻어진 입자분중 자성 분율에 대한 공압 가스유속의 영향을 나타낸 것으로, 이때 전자석에 가해진 전류의 세기는 약 20 A이었다 자철광의 종말속도 0.58~1.57 m/s에서 공압가스유속을 0.9 m/s에서 1.4 m/s까지 증가시켰을 때 annulus 부분으로 배출되는 입자분중 자성 분율은 2~4% 증가됨이 관찰되었다. 그러나 사이클론등에 포집된 입자분중 자성분율도 공압가스유속의 증가와 함께 증가되며, 특히 공압가스유속이 1.1 m/s를 초과하면서부터 증가율이 급격히 높아짐을 알 수 있었는데 공압가스유속 1.4 m/s에서는 공압가스유속 1.1 m/s의 경우에 비해 그 값이 2 배로까지 증가되면서 미립 자성입자의 손실이 커짐을 알 수 있다. 이와같은 현상은 공압가스유속이 미립 자성 입자의 종말속도보다 커지면서 미립 자성입자에 가해지는 유체역학적 항력이 전자력보다 커지기 때문이다. Table 3은 Fig. 4와 같은 조건에서 자성분리에 따라 annulus 부분으로 배출되는 입자분과 사이클론등에 포집된 입자분간의 물질 수지와 annulus 부분으로 배출되는 입자분을 기준으로 했을 때 자성분의 선별율을 나타낸 것으로, 공압 가스유속의 감소에 따라 비산되는 입자분의 감소와 와 함께 자성분의 선

Table 3. Material mass balance for magnetic separation test of the admixture

Superficial gas velocity (m/s)	Mixing fraction of silica (wt%)	Yield of discharged particles (%)	Yield of collected particles (%)	Recovery of mag. particles* (%)
0.9	15	95.3	4.7	98.7
0.9	30	81.2	18.8	96.3
0.9	50	64.7	35.3	95.8
1.1	15	91.9	8.1	97.3
1.1	30	80.0	20.0	94.9
1.1	50	62.5	37.5	92.5
1.4	15	77.1	22.9	84.3
1.4	30	60.0	40.0	72.0
1.4	50	55.0	45.0	84.7

* Recovery of mag. particles

$$\frac{(\text{Yield of discharged particles}) \times (\text{Mag. fraction in discharged particles})}{(\text{Mag. fraction in the admixture})} \times 100$$

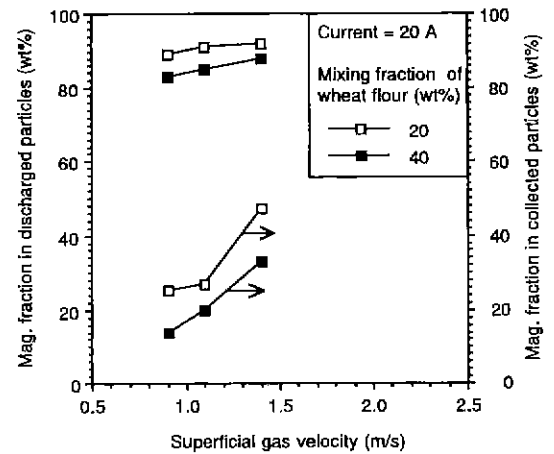


Fig. 5. Effect of superficial gas velocity on the magnetic fractions in the particles separated by EMFB at different mixing fractions of wheat flour.

별율이 상승되어 0.9~1.1 m/s의 공압가스유속 범위에서는 약 93~99%의 높은 자성분 선별율을 보이고 있는데 특히 혼합분체내 자성분율이 높을수록 자성분 선별율이 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 비자성 입자로서 실리카대신에 입경과 밀도가 작고 자철광에 대한 부착력이 높은 밀분이 20 및 40%의 무게비율로 혼합된 분체로부터 분리된 입자분중 자성 분율에 대한 공압 가스유속의 영향을 나타낸 것으로, 실리카를 사

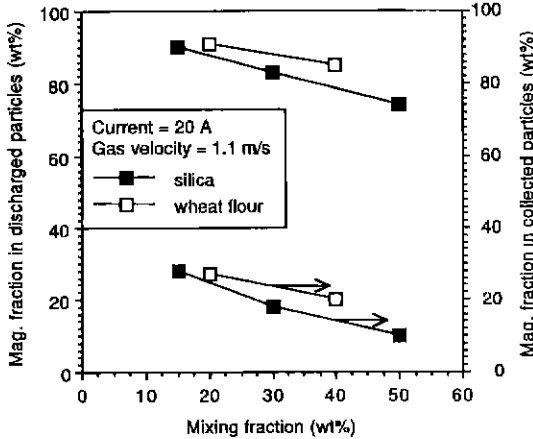


Fig. 6. Effect of mixing fraction of non-magnetic particles on the magnetic fractions in the particles separated by EMFB.

용한 경우와 유사한 현상이 관찰되었다. 배가스와 함께 비산 배출되는 미립 자성입자의 경우 가해지는 자력보다 유체력이 강하게 작용되므로 효과적인 자성 분리를 위해서는 입자에 가해지는 전자력이 유체력보다 커야한다. 이를 위해서는 전자석에 의한 자력의 작용범위를 층 중심부까지 확대하거나 층의 중심부분으로 흐르는 미립 자성입자의 흐름을 전자력이 상대적으로 큰 벽방향으로 유도하는 것이 필요하다.

Fig. 6은 공탑가스유속을 1.1 m/s, 전자석에 가하는 전류 세기를 20 A로 했을 때 자성/비자성 입자의 혼합분체중 비자성 입자의 혼합율에 따른 배출 입자분중 자성분율과 사이클론등에 의해 포집된 입자분중 자성분율의 변화를 나타낸 것이다. 비자성 입자의 혼합율이 증가, 즉 혼합분체의 grade가 떨어짐에 따라 배출입자분중 자성 분율과 사이클론 포집분중 자성 분율 모두가 감소하는 경향을 보이며 감소 기울기는 사이클론등의 포집분중 자성분율의 경우 비자성 입자로 실리카를 사용했을 때 혼합율이 15%에서 50%로 증가함에 따라 약 28%에서 10%까지 감소되어 약 16%의 감소를 보인 배출입자분내 자성 분율과 비슷한 경동을 보였다. 또한 비자성 입자로서 실리카를 사용한 경우가 밀분을 사용한 경우보다 혼합율의 증가에 따른 배출 입자분중 자성분율과 사이클론등의 포집분중 자성분율의 감소경향이 높게 나타났다. 혼합분체내 밀분의 혼합율 20 및 40%에 대해서 자성분 선별율은 각각 94 및 88%로, Table 3의 실리카를 사용한 경우의 결과와 같이 혼합분체내 비자성 입자의 혼합율이 감소, 즉 자성 분율이 증가됨에 따라 자성분 선별율이 증가됨을 알 수 있다.

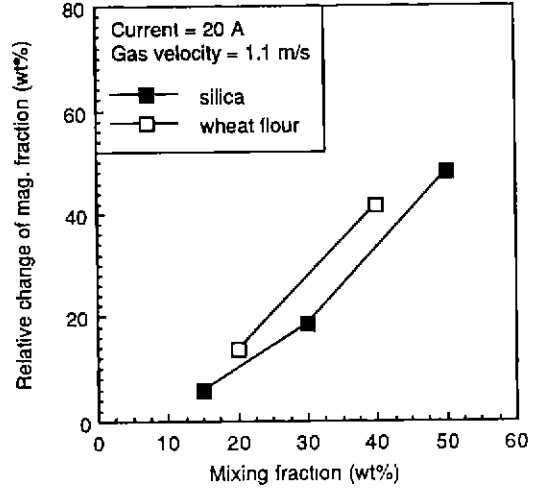


Fig. 7. Effect of mixing fraction of non-magnetic particles on the relative change of magnetic fractions in the particles discharged from EMFB.

Fig. 7은 비자성 입자의 혼합을 변화에 따른 배출입자분중 자성 분율의 상대적 변화를 다음 식과 같이 정의했을 때,

$$\text{혼합율에 따른 배출 입자분중 자성분율의 상대적 변화} = \frac{(\text{배출된 입자분중 자성분율} - (100 - \text{혼합율}))}{(100 - \text{혼합율})} \times 100 \quad (3)$$

공탑가스유속을 1.1 m/s, 전자석에 가하는 전류 세기를 20 A의 조건에서 배출분내 자성분율의 상대적 변화에 대한 혼합분체내 비자성 입자 분율의 영향을 나타낸 것으로, 비자성 입자로 실리카와 밀분을 사용한 경우 상대적 자성 분율은 혼합율의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 이때 밀분의 경우보다 높은 상대적 자성분율의 변화를 보이는 것은 밀분이 실리카에 비해 입자의 종말속도가 낮아 가스 흐름에 의해 받는 유체력이 상대적으로 커 입자속도가 커지면서 가스 흐름에 의해 쉽게 비산 가능하기 때문으로 추정된다

Fig. 8은 전자석으로 공급되는 전류 세기에 따른 배출입자분중 자성분율과 사이클론등의 포집분중 자성분율의 변화를 나타낸 것이다 약 1.4 m/s의 공탑가스유속에서 혼합분체내 실리카의 혼합율을 15, 30, 50%로 변화시켰을 때 배출입자분중 자성분율은 전류세기가 10 A에서 최대 30 A까지 증가됨에 따라 약 4~5%의 향상을 보였다. 전류의 공급을 중단했을 때 공급된 혼합분체중 자성분율과 비교하여 배출된 입자분의 자성분율이 실리카의 혼합율 15, 30, 50% 별로 각각 1, 3, 20%가 높은 것을 알 수 있는데 이는 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 무거운 입자의 대부분을 차지하는

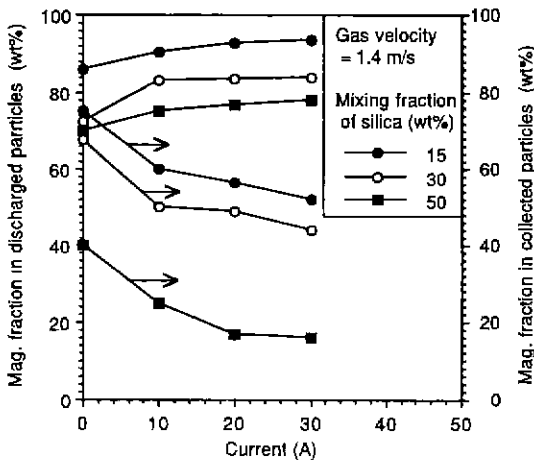


Fig. 8. Effect of electric current supplied to the electromagnet on the magnetic fractions in the particles separated by EMFB.

대립 자철광이 벽을 따라서 흐르다가 다공 스테인레스관의 구멍을 통해 annulus 부분으로 흐르기 때문에 볼 수 있다. 반면, 사이클론등의 포집분중 자성분율은 혼합분체내 자성분율보다 실리카의 혼합율 15, 30, 50%별로 각각 4, 4, 10%씩 낮은 값을 보이는데 이는 일부 대립의 자성분체만이 배출되고 층의 중심부분을 흐르는 미립 자성입자는 유체력에 의해 층내를 통과후 바로 비산하는데 기인한다. 그러나 전류가 가해지면서 미립 자성입자에 가해지는 전자력이 생겨 사이클론등의 포집분내 자성분율의 감소분은 10 A의 전류세기에서 약 15~17% 정도로 크나 전류 세기가 보다 증가되면서는 이와같은 자성분율의 감소율이 차츰 약해짐을 알 수 있다.

4. 결 론

기존의 회전 드럼형 건식 자력선별기로는 처리가 어려운

약 140 μm 이하의 자성과 비자성 입자의 혼합분체로부터 자성 입자만을 분리할 수 있는 전자석 유동층식 자력선별기를 제안하고 본 선별기로부터 배출된 입자분과 사이클론등에 포집된 입자분내 자성 분율 및 자성분 선별율에 대한 주요 조업 변수의 영향을 규명하고자 한 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 자성/비자성 혼합분체가 이들의 가스수송 및 유동을 위한 가스 흐름으로 인해 유동층내 축 중심부의 상승류와 벽가까이의 하강류가 공존하는 유동 상태에서 전자석으로부터 자성입자에 가해지는 자력이 가스에 의한 유체력보다 클때 자성분리가 가능하였다.
2. 공탑 가스유속의 감소에 따라 배출분내 자성분율은 약 2~4% 감소되나 비산되는 입자분의 감소와 함께 자성분의 선별율이 상승되어 0.9~1.1 m/s의 공탑가스유속 범위에서는 약 93~99%의 높은 자성분 선별율을 보였으며, 특히 혼합분체내 자성 분율이 높을수록 자성분 선별율이 증가됨을 알 수 있었다.
3. 보다 효과적인 자성분리를 위해서는 전자석에 의한 자력의 영향범위를 층 중심부까지 확대하거나 전자력이 상대적으로 큰 벽방향으로 미립 자성입자의 흐름을 유도하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. J. Svoboda: "Magnetic Methods for the Treatment of Minerals", ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS B.V. (1987).
2. D. Geldart: "Types of Gas Fluidization", Powder Technology, 7, 285-292 (1973).
3. D. Kunii and O. Levenspiel: "Fluidization Engineering", 2nd edition. Butterworth-Heinemann (1992).
4. M.J. Rhodes: "Modelling the Flow Structure of Upward-Flowing Gas-Solids Suspensions", Powder Technology, 60, 27-38 (1990).