

기류 수송계에서 자성 및 비자성 미분체의 연속적 자성분리

여평모 · 김용하[†] · 김행구^{*}

부경대학교 화학공학과

*포항산업과학연구원 용융환원 프로젝트팀
(2000년 2월 24일 접수, 2000년 7월 10일 채택)

Continuous Magnetic Separation of Magnetic and non-Magnetic Fine Powders in a Pneumatic Conveying System

Pyoung-Mo Yeo, Yong-Ha Kim[†] and Hang-Goo Kim^{*}

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

*Smelting Reduction Project Team, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-330, Korea

(Received 24 February 2000; accepted 10 July 2000)

요 약

물질의 자화율 차이를 이용하여 공기 흐름계에서 자성 및 비자성 미분체를 연속적으로 분리하기 위해 하향흐름을 가지는 전자석 분리장치에 대해 연구를 수행하였다. 먼저, 부분적인 유동과 진동을 적용한 미분체 공급장치를 전자석 분리장치에 미분체를 공급하기 위해 개발·적용하였다. 미분체 공급장치의 공급특성을 파악하기 위해 평균입경 52 μm 인 미분탄과 입경별로 분급한 석탄을 사용하였다. 부분적인 유동과 진동은 입자상호간의 부착력을 최소화하는데 효과적이었다. 미분체의 배출속도는 부분 유동화 가스유속이 증가함에 따라 입자크기에 대해서 임계유속 이하에서는 완만하게 증가하고, 임계유속 이상에서는 급격하게 증가하였으며, 입자 크기와 진동가속도 그리고 부분 유동화 가스유속이 증가할수록 미분체의 배출속도는 증가하였다. 전자석 분리장치의 분리실험에서 자성 미분체로는 G/D, shot dust를, 비자성 미분체로는 미분탄과 모래를 사용하였다. 하향흐름을 가지는 이중관 분리장치는 공기 흐름계에서 자성 및 비자성 미분체의 연속적인 제거 및 회수에 있어서 효과적이었다. 연속적인 조업에서 전자석 세트의 on/off 시간이 작을수록 내관에서 자석 chains 형성을 최소화할 수 있었다. 자장강도, 내관에서 개구비, 자화율이 증가함에 따라 자성 미분체의 제거율은 증가하였지만, 비자성 미분체의 회수율은 입자 상호간의 부착력으로 인해 감소하였다.

Abstract – Based on the differences in the magnetic susceptibility of materials, a down-flowing electromagnetic bed were investigated for the separation between magnetic and non-magnetic fine powders in a pneumatic conveying system. A new feeder which utilizes local fluidization and vibration was developed for conveying powders to the electromagnetic bed. The performance of the feeder has been evaluated using pulverized coal of which average diameter is 52 μm and sieved coals which were classified by size. Local fluidization and vibration were found to be effective to minimize interparticle adhesion forces. As the gas velocity for local fluidization increased, the discharging rate increased only slightly when the gas velocity is below a critical value with respect to particle size, but increased sharply when it is above the critical value. The discharging rate increased with the increases in particle size, vibrating acceleration and gas velocity for local fluidization. In the test for electromagnetic separation, grinding dust(G/D) and shot dust were used as magnetic fine powders and pulverized coal and sand as non-magnetic ones. Down-flowing annulus separator was found to be effective for continuous removal and recovery of magnetic and non-magnetic fine powders in a pneumatic conveying system. In the continuous operation, the formation of magnetic chains in the core could be minimized by shortening on/off intervals of electromagnetic sets. As the magnetic field intensity, the opening ratio in the core and the magnetic susceptibility increased, the removal efficiency of magnetic fine powders increased while the recovery efficiency of non-magnetic fine powders decreased due to interparticle adhesion forces.

Key words: Magnetic Separation, Magnetic, non-Magnetic, Fine Powders, Pneumatic Conveying, Magnetic Susceptibility, Vibration, Fluidization

[†]E-mail: yhkim@mail.pknu.ac.kr

1. 서 론

자성분리 기술은 입자들의 자화율(magnetic susceptibility)의 차이를 이용하여 분리하는 것으로 철광석의 선별 등에 19세기부터 이용되기 시작하였다. 자화율이 다른 물질들이 섞여 있는 혼합체의 경우에 자성(강자성 또는 상자성) 물질을 농축분리 또는 반자성 물질을 선택적으로 분리·회수하는 방법으로 화학, 식품, 의약품 등에서 불순물인 철분 제거와 광물질 선광(mineral beneficiation), 폐수 중에 있는 부유물질, 기름 등을 제거하는 수처리 분야, 석탄의 정제 등에 광범위하게 이용되고 있다[1]. 자성분리는 자기장이 형성된 영역 내로 자화율이 다른 입자들의 부유상이나 혼합체를 통과시켜 자성 입자를 선택적으로 분리하는 것으로, 이 자성 입자에 가해지는 외력으로는 자력(magnetic forces) 외에 중력, 유체력, 관성 및 원심력 등을 들 수 있다. 또한 정전기와 전자기력 등과 같은 부착력, 반발력 등의 입자간 상호작용에도 자성분리는 영향을 받게 된다. 자성입자가 선택적으로 분리되기 위해서는 자력이 외력 및 입자 상호간의 힘의 합보다 커야만 분리가 가능하게 된다. 자성분리장치에 공급되는 혼합체는 비자성 물질(tails), 농축된 자성 물질(mags) 또는 비자성 물질과 자성물질의 혼합물(middlings)의 두 종류 또는 세 종류로 분류된다. 자성분리 기술은 불순물인 자성물질을 제거하여 비자성 물질만을 얻는 방법과 다량의 자성물질을 농축하는 방법으로 크게 두 종류로 나뉘어진다. 자성분리 장치로는 입경이 큰 물질과 강자성 물질의 분리에 효과적인 격자형, 드럼형과 벨트형 등이 있고, 자화율이 낮은 상자성 물질을 분리하기 위해서는 높은 자력이 필요하므로 철망과 같은 강자성체 망(ferromagnetic matrix) 등을 입자들이 통과하는 부분에 삽입한 고구배 자성분리(high gradient magnetic separation, HGMS)가 이용되고 있다[2, 3]. 이러한 HGMS는 matrix 또는 steel wool을 사용하기 때문에 고농도의 흐름에서는 압력손실이 발생하며, matrix나 steel wool 등에 포집된 자성체를 단속적으로 분리·회수해야 하기 때문에 연속적인 조업이 어렵다. HGMS의 문제점인 압력손실을 최소화하고, 자성과 비자성의 혼합 분체로부터 연속적으로 자성입자만을 분리하기 위한 장치로 이중관 전자석 유동층이 제안된 바 있다[4]. 이중관 전자석 유동층은 제거율면에서는 효과적이지만 상향흐름(up-flowing)이기 때문에, 가스와 미분체의 흐름은 층 중심에서 상승하는 고체농도 회박영역과 벽 부근에서 하강하는 농후영역인 core-annulus 형태를 가지게 된다[5]. Core-annulus 흐름을 가지는 이중관 전자석 유동층은 미분체의 하강에 의한 역 혼합 때문에 내관에서 외관으로 자성 미분체뿐만 아니라, 비자성 미분체도 빠져 나오는 현상이 일어나게 된다. 또한, 상류흐름에서의 slip velocity는 입자들의 응집력 때문에 단일입자보다 더 크며, 벽 쪽에서 slip velocity가 최대가 되고, 고체의 농도분포도 벽 부근으로 갈수록 급격하게 증가하는 경향을 보인다[6, 7]. 상류흐름의 유체역학적 문제를 해결하기 위해 최근에는 가스-고체 반응기로 하강흐름 장치가 점점 주목을 받고 있다[8]. 미분체의 역 혼합을 억제하고, 축 방향의 분포를 일정하게 하면서 cluster 형성을 최소화하는 방법으로 하강흐름(down-flowing) 방법을 이용할 수 있다[9]. 반경방향의 고체 분율이 상향흐름은 벽 쪽으로 갈수록 지속적으로 증가하는 경향을 보이지만, 하강흐름은 반경이 증가할수록 일정한 고체 분율을 가지며 벽 쪽에서 약간 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 또한 입자들의 침강속도 분포도 거의 일정해지고[10, 11], 상류흐름보다 하강흐름에서의 마찰손실이 훨씬 작으며, 고체 분율에 대한 영향도 더 적다[12]. 따라서 유체역학적으로 상류흐름보다 하강흐름이 이중관 자력분리를 위해서 더 유리하다고 볼 수 있다.

미분체를 다루는 공정에서 전체적인 공정의 성패여부는 미분체의 안정적인 공급 여부에 따라 결정되듯이 연속적인 자성분리를 하기 위해서도 먼저 안정적인 미분체의 공급장치가 필요하다. 입경이 큰 분체는 기계적 장치 등을 이용하여 비교적 쉽게 공급할 수 있으나, 입경이 수

십 마이크로미터 이하가 되면 입자 사이의 상호 부착이 강해지면서 응집체의 생성 등으로 인해 안정적 공급이 어렵게 된다[13]. 입자의 응집에 대표적으로 작용하는 van der Waals 힘이 입자의 중력보다 높아지는 임계 입경은 입자의 밀도와 형상에 따라 차이가 있으나 약 40-70 μm 로 알려져 있다[14]. 미분체의 안정적 공급을 위해 syringe-type, 진공, 진동 등을 이용한 미분체의 공급장치[15-18] 등이 있지만 공통적인 문제점은 응집력과 부착력이 큰 미분체의 경우 배출되는 부분에서 브릿지(bridge)에 의한 공급이 생기면서 입자들이 간헐적으로 배출되는 점이다. 따라서 미분체를 취급함에 있어서 선결해야 할 문제는 미분체의 안정적인 공급이다.

이에, 본 연구에서는 연속적인 자성분리를 위해 진동과 부분적인 유동을 이용한 미분체 공급기술과 전자석 유동층을 하향식으로 개선한 자성분리 장치를 제안하고, 미분체 공급장치의 조업변수 영향 파악과 미분체 공급장치를 자성분리장치에 적용하여 자성과 비자성 혼합 미분체의 선택적인 분리 특성 및 자성 미분체의 제거에 대한 조업변수의 영향 등을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

2-1-1. 미분체의 연속적인 공급장치

미분체를 공급하는데 공통적인 문제점으로는 응집력과 부착력이 큰 미분체의 경우 배출되는 부분에서 브릿지에 의한 공급이 생기면서 입자들이 간헐적으로 배출되는 점이다. 이를 극복하고자 Fig. 1에서 보는 바와 같이 미분체의 저장조 하부에 일정하게 진동을 가하여 저장조 내

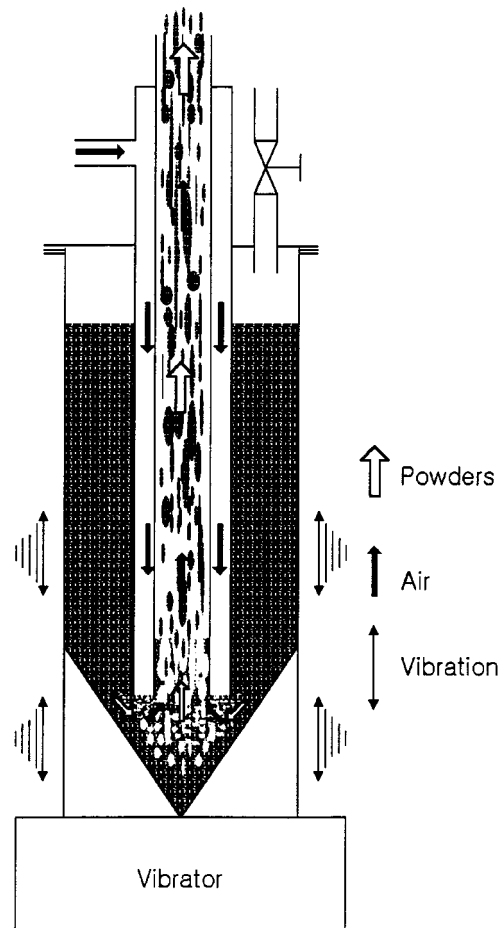


Fig. 1. Conceptual illustration of air and powder flow.

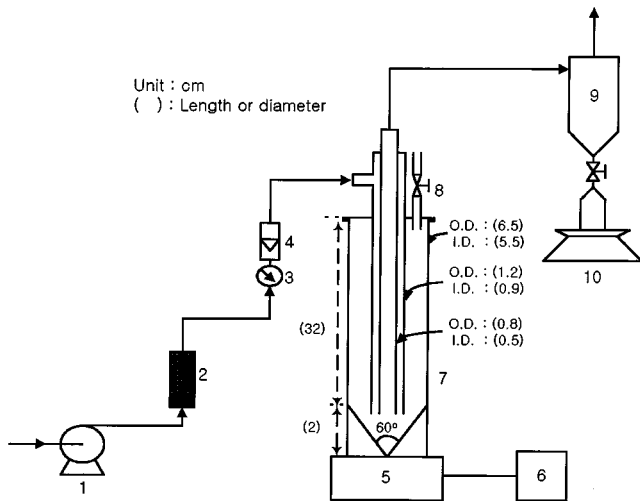


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for feeding of fine powders.

- | | |
|-----------------------|---------------|
| 1. Compressor | 6. Controller |
| 2. Silica gel column | 7. Feeder |
| 3. Pressure regulator | 8. Valve |
| 4. Rotameter | 9. Cyclone |
| 5. Vibrator | 10. Balance |

미분체의 공급을 억제하면서 공기에 의해 부분적으로 유동되는 미분체를 공급시키는 기술[19]을 개발하여 미분체의 자력분리에 적용하고자 하였다. 본 연구에서 사용한 공급장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 공기 유입부, 미분체 저장조, 미분체 배출부, 진동장치, 배출량 측정부로 구성되어 있다. 공기 유입부는 공기중의 습기를 흡수 제거하기 위한 실리카 겔 탑, 압력 조절기, 유량 조절기로 되어 있다. 미분체 저장조는 내경 5.5 cm의 아크릴 관으로 아랫부분을 꼭지점의 내각이 60°인 원뿔 모양으로 하여 진동할 때 미분체가 배출부 중심으로 움직이도록 하였으며, 높이는 원뿔 모양의 꼭지점으로부터 34 cm로 하였다. 미분체 배출부는 공급 장치에서 가장 중요한 부분으로, 진동에 의해 원뿔 부위로 하강하는 입자들을 부분적으로 유동을 시켜서 배출하게 된다. 진동을 가하지 않고 공기만 주입했을 경우, 미분체의 응집력 때문에 입자들은 중력에 의해서 자연 하강하지 않고 브릿지를 형성하게 되는데 이 브릿지의 형성을 억제하기 위해 저장조에 진동을 가하는 방법을 택하였다. 배출부는 아크릴 관으로 제작된 이중관이며, 외관의 외경은 1.2 cm, 내경은 0.9 cm, 내관의 외경은 0.8 cm, 내경은 0.5 cm로 되어 있다. 배출관은 저장조 하부의 원뿔의 꼭지점으로부터 2 cm 상부에 위치하도록 하였다. 저장조 하부에 자장에 의해서 진동하는 장치를 두어 층 전체에 진동을 가하는 방법을 이용하였다. 본 연구에 사용된 진동장치는 진동 가진계에 의한 측정에서 전원 주파수 60 Hz를 기준하여 8배인 480 Hz까지 일정하게 진동을 가할 수 있었으며, 이때 진동 장치에 의한 가속도의 범위는 15.7-29.7 m/s²이었다.

2-1-2. 자성 및 비자성 미분체의 연속적 자성분리 장치

Fig. 3은 자성 및 비자성 혼합 미분체의 연속적인 분리를 위한 실험 장치의 개략도이다. 자성분리 탑, 전자석, 미분체 공급기 및 공기 공급기, 사이클론과 bag filter로 구성되어 있다. 자성분리 탑은 투명한 아크릴 관으로 외관은 내경 10 cm, 두께 1 cm, 높이 124 cm, 내관은 내경 7 cm, 두께 0.3 cm, 높이 124 cm로 두 부분으로 제작되었다. 이는 공기 및 중력에 의해 자성과 비자성 혼합 미분체가 흐르는 내측 core와 자성 미분체를 분리하여 배출하는 annulus부를 택해 연속적 그리고 선택적인 분리를 위한 것이다. 내관에는 전자석이 위치한 부분에 직경이 2 mm인 다수의 구멍을 뚫어 자성 입자가 자력의 영향을 받아 core

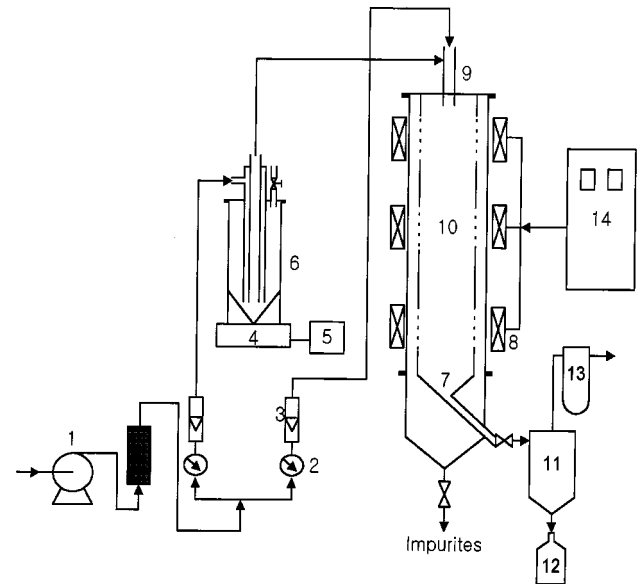


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus for continuous separation of magnetic and non-magnetic fine powders.

- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| 1. Silica gel column | 8. Electromagnet |
| 2. Pressure regulator | 9. Distribution tube |
| 3. Rotameter | 10. Magnetic separation bed |
| 4. Vibrator | 11. Cyclone |
| 5. Controller | 12. Collector |
| 6. Feeder | 13. Bag filter |
| 7. Conical discharger | 14. Controller of electromagnets |

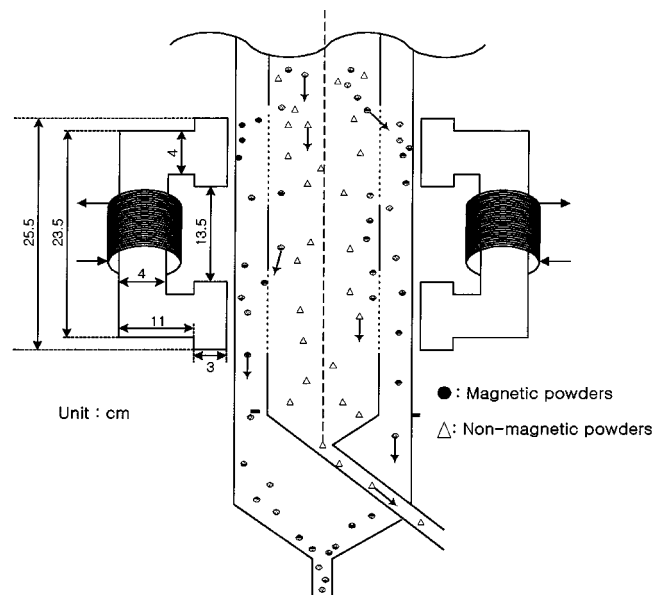


Fig. 4. Separation principle of magnetic and non-magnetic fine powders in down-flowing electromagnetic separator.

로부터 annulus로 흐름을 가능하게 하였다. 여기서 전자석이 위치한 부분의 내관 옆면적에 대한 2 mm 구멍의 총 면적의 비율로 정의된 개구율은 25%와 50%로 하였다. 비투자율이 2000인 연철(mild steel, 0.2 C)에 구리선을 6,100회 감아서 제작한 전자석을 Fig. 4와 같이 180°로 서로 마주 보는 형태를 1세트로 하여 15 cm 간격으로 3단, 총 6개를 설치하였다. 전자석은 leakage factor[20]가 없다고 가정하였을 때 각 전자석에 전류가 1-4 A로 흐르면 층 중심의 자장강도는 약 0.64-2.5

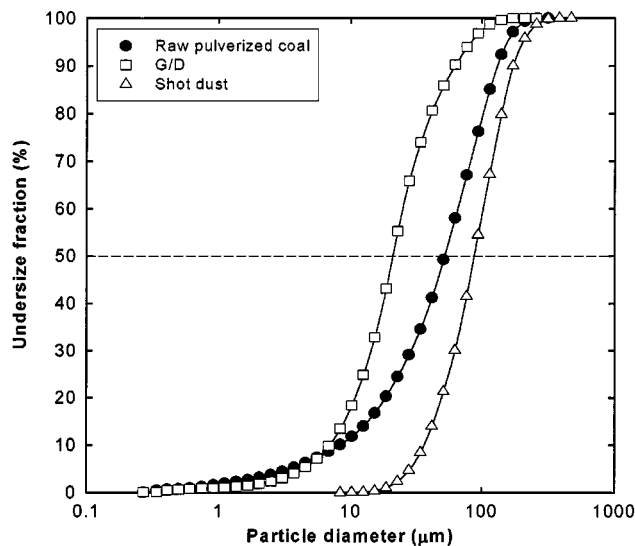


Fig. 5. Particle size distribution of magnetic and non-magnetic fine powders.

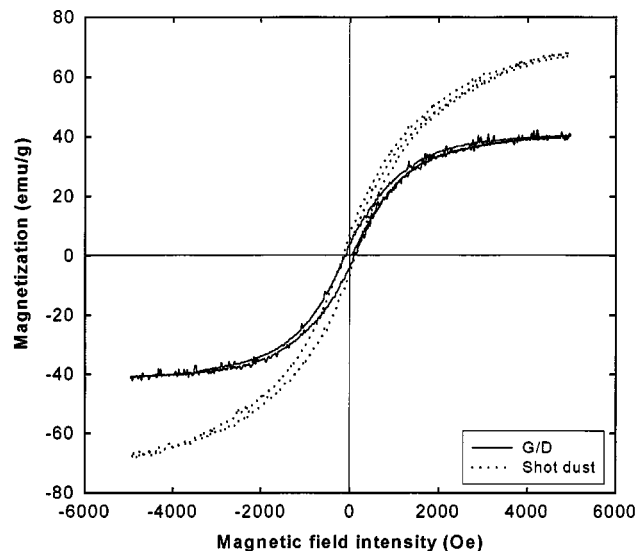


Fig. 6. Magnetization curves of magnetic fine powders.

kOe 정도가 된다. 전류에 의해 형성된 전자석은 하부로부터 첫 번째, 세 번째 전자석 세트와 두 번째 전자석 세트를 각각 따로 on/off가 가능하도록 하였다. 이는 자석에 포집된 자성물질을 분리하기 위해서 전체 전자석에서 자기장이 소멸되지 않고 각각 따로 소멸되도록 하여야 연속적으로 분리가 가능해야 하기 때문이다. 미분체 공급기에서 공급된 자성과 비자성 미분체는 공기와 같이 분리 탑 상부에 위치한 직경 2 cm인 단일 노즐에 의해서 분산된다. 분산된 자성과 비자성 혼합 미분체중 자성 미분체는 annulus에 포집되어 분리장치 하부에 농축된다. 한편 core에 잔존하는 비자성 미분체는 꼭지점의 내각이 60°인 원뿔 모양의 배출 관을 통해 연속적으로 배출되며 가스와 함께 나가는 일부 비자성 미분체들은 하부 사이클론과 bag filter에서 포집된다.

2-2. 시료 및 물성

실험에 사용한 자성 미분체로는 C 특수강 회사로부터 공급된 G/D (grinding dust)와 shot 분진을 이용하였다. 자성 및 비자성 미분체는 Fig. 5에서 보는 바와 같은 입경분포를 가지며, G/D의 평균입경은 21

μm, shot 분진의 평균입경은 87 μm이었다. 비자성 미분체로는 평균입경이 52 μm인 미분탄과 평균입경이 106 μm인 모래로 각각 일정비율로 자성 미분체와 혼합하여 사용하였다. 미분탄의 입자 밀도는 1.4 g/cm³, 모래는 2.6 g/cm³, G/D는 3.51 g/cm³, shot 분진은 6.63 g/cm³이었다. 자성 미분체인 G/D, shot 분진의 자장강도에 대한 자화 정도는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 shot 분진이 G/D보다 높은 것으로 나타났다.

2-3. 실험방법

2-3-1. 미분체의 연속적인 공급장치

표준체를 이용하여 ~45, 45-106, 106-150, 150-212 μm으로 분급한 석탄과 제철소에서 이용되는 평균 입경이 52 μm인 미분탄을 사용하여 미분체의 연속 공급장치로써의 적용 가능성과 조업변수에 대한 특성을 실험을 통해 조사하였다. 400 g(충진층 높이: 약 26 cm)의 미분탄을 저장조 상부에 있는 밸브를 통해서 주입하고, 매 실험에서 공극의 오차를 줄이기 위해서 진동을 주어 같은 높이로 조정하였다. 일정한 진동을 저장조 하부에 준 상태에서 실리카 겔 탑과 오일 여과기를 통해 습기 및 기름을 제거한 공기를 저장조 내부에 있는 이중관의 annulus 부분에 일정속도로 공급하였다. 원뿔 모양의 하부에서 미분탄을 부분적으로 유동시켜 공기와 함께 배출되도록 하고, 배출된 미분탄을 저울 위에 설치된 사이클론으로 포집과 동시에 질량을 측정하여 배출속도를 계산하였다.

2-3-2. 자성 및 비자성 미분체의 연속적 자성분리 장치

자성 및 비자성 미분체는 자성 분리탑 상부에 위치한 단일 노즐을 통해 공급을 하였다. 자석 세트를 연속적으로 on/off시키면서 자성 및 비자성 미분체를 일정한 시간동안 분리한 후, 먼저 공급장치에서 미분체의 공급을 중단한 후, 자성 분리탑의 내부에 남은 미분체들이 축적되지 않도록 공기만을 약 3분 동안 공급한 후 사이클론과 bag filter에 포집된 미분체와 annulus에 포집된 미분체들의 무게를 측정하였다. 포집된 미분체 내에 포함된 자성 미분체의 분율을 X-선 회절 분석에 의한 검량 곡선과 비교하여 구했으며 자성 미분체의 제거율과 비자성 미분체의 회수율은 각각 식 (1)과 (2)에 의해 구하였다.

$$\eta_m = \frac{f_{i,m} - f_{o,m}}{f_{i,m}} \times 100 \quad (1)$$

$$\eta_{nm} = \frac{f_{i,nm} - f_{o,nm}}{f_{i,nm}} \times 100 \quad (2)$$

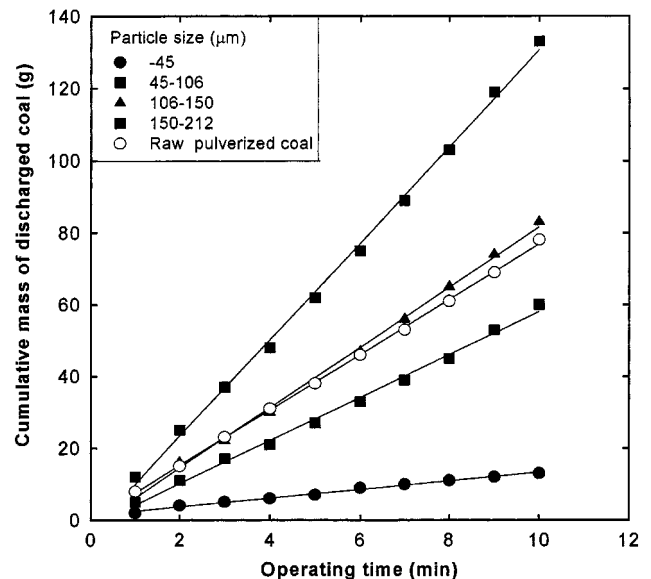


Fig. 7. Cumulative mass of discharged coal vs. operating time with respect to size range of coal powders.

3. 결과 및 고찰

3-1. 미분체의 연속적인 공급장치

3-1-1. 석탄의 입경에 따른 배출특성

Fig. 7은 용광로에 투입되는 미분탄(0.3-300 μm , $\bar{d}_p=52 \mu\text{m}$)과 이 미분탄을 입경별로 분급한 석탄을 조업시간에 따른 배출 누적량의 변화로 나타낸 결과이다. 진동장치의 진동 가속도는 25.44 m/s^2 , annulus에서의 공탑가스유속은 11.36 Nm/s 으로 하였다. 평균입경 $52 \mu\text{m}$ 의 미분탄의 종말속도는 이론식으로 계산한 값은 약 0.09 Nm/s 정도이다[21]. 배출관의 core에서 공탑 가스유속은 약 7.7 Nm/s 으로, 이와 같은 유속 조건에서는 초킹(choking)과 슬러깅(slugging)이 관찰되지 않았다. 저장조내 석탄 무게의 영향을 줄이기 위해서 400 g 으로 일정하게 투입하여 실험을 하였는데, 입경별로 시간에 따라 일정한 속도로 배출되었으며 입경이 클수록 배출속도가 증가하는 경향을 보였다. 상대적으로 입도 분포가 넓은 미분탄(약 0.3-300 μm)의 경우에도 조업시간의 경과에 따라 일정한 속도로 배출되었다. 입경이 클수록 많이 배출되는 것은 입경이 클수록 입자 상호간의 부착력이 감소되고 이에 따라 부분적인 유동과 진동에 의한 입자의 거동이 원활하기 때문이다. 이 결과에 의하면 미분체를 공급하는데 있어 진동과 부분적인 유동이 입자 상호간 부착력과 브릿지 형성을 최소화하는데 중요한 역할을 하며, 이와 같은 점을 이용한 본 공급장치가 미분체를 공급하는데 적합하다고 판단되었다.

3-1-2. 부분적인 유동화를 위한 공탑 가스유속의 영향

Fig. 8은 진동 가속도를 25.44 m/s^2 로 일정하게 유지한 상태에서 10분 동안 실험을 하여, 배출속도에 대한 부분 유동화 가스유속의 영향을 입경별로 나타낸 결과이다. Annulus에서의 공탑 가스유속의 증가에 따라 배출속도가 완만하게 증가하는 영역과 급격하게 증가하는 영역으로 크게 두 영역으로 나타났다. 이는 상대적으로 유속이 낮은 영역에서는 입자 상호간의 부착력이 유동화 가스에 의한 힘보다 크게 작용하고, 유속이 높은 영역에서는 입자 상호간의 작용력보다 유동화 가스에 의한 힘이 더 크게 작용하기 때문으로 사료된다. 미분체를 배출하기 위해서는 입자간 상호 작용력보다 진동력과 유체력이 더 커야 하는데, 입경이 작을수록 입자간 상호 작용력이 커지므로 일정한 진동력 하에서는 유체력을 증가시켜야 한다. 따라서 두 영역의 경계점인 임계 가스유속은 입경의 감소에 따라 증가하는 경향을 보였다.

3-1-3. 진동가속도의 영향

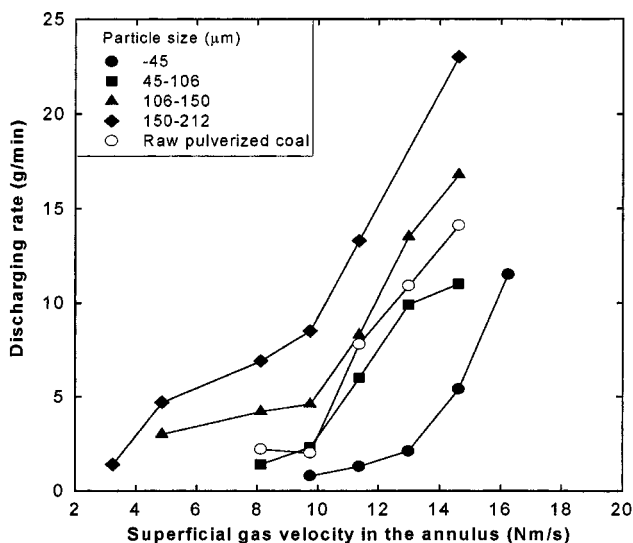


Fig. 8. Effect of superficial gas velocity in the annulus on the discharging rate with respect to size range of coal powders.

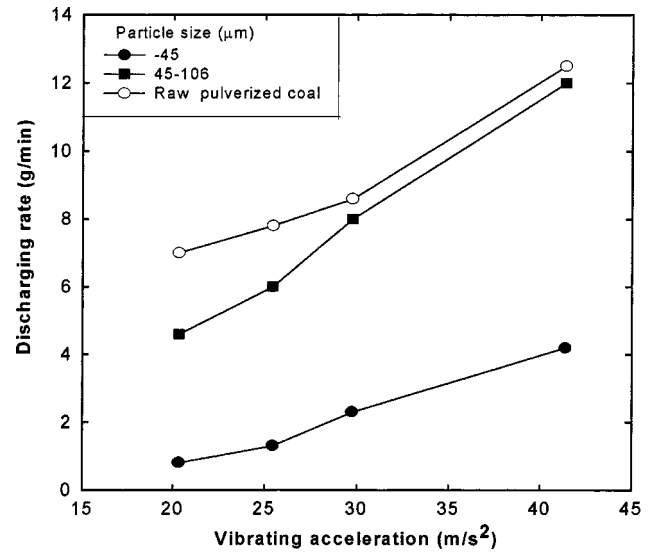


Fig. 9. Effect of vibrating acceleration on the discharging rate with respect to size range of coal powders.

Fig. 9는 부분 유동화를 위한 annulus에서의 공탑 가스유속을 11.36 Nm/s , 배출시간을 10분으로 한 조건에서 배출속도에 대한 진동가속도의 영향을 나타낸 결과이다. 진동 가속도가 증가함에 따라 미분탄과 분급한 미분탄의 배출속도가 모두가 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 진동을 주지 않고 부분 유동화 가스만을 이용하였을 경우에는 초기에는 배출되지만, 약 1분 정도 경과 후에는 배출되지 않았다. 이는 저장조의 미분탄이 브릿지를 형성하게 되어 배출관 하부로 내려오지 않기 때문이다. 본 실험에서 사용한 진동장치는 60 Hz 로 일정한 주파수 하에서, 배출속도에 대한 진동가속도의 영향력은 부분 유동화를 위한 공탑 가스유속보다 약하지만 브릿지 형성을 억제하고 형성된 브릿지를 깨는데 중요한 역할을 하는 것으로 판단되었다.

3-2. 자성 및 비자성 미분체의 연속적 자성분리 장치

3-2-1. 전자석 세트의 on/off 시간의 영향

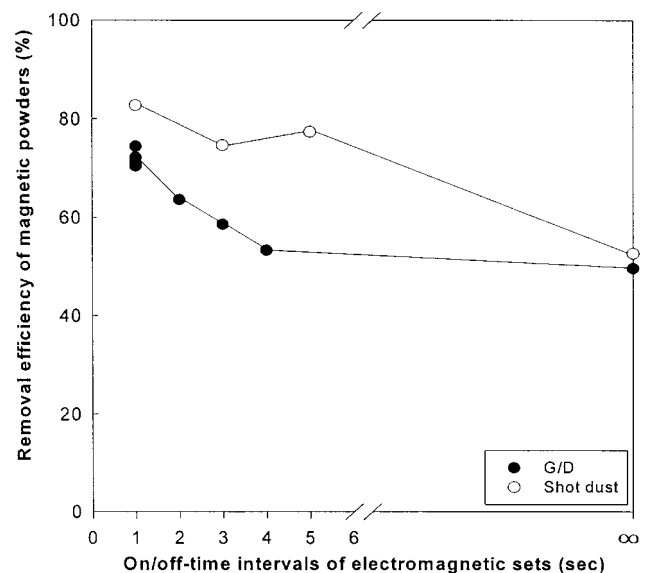


Fig. 10. Effect of on/off-time intervals of electromagnetic sets on removal efficiency of magnetic fine powders.

Fig. 10은 3단으로 설치된 전자석의 on/off 시간에 따른 자성 미분체의 제거율 변화를 나타낸 결과이다. 자성 미분체로는 G/D와 shot 분진을 단일 성분으로 사용하였으며, 공탑 가스유속은 0.31 Nm/s, 각 전자석에 의한 자장강도는 2.54 kOe, core에서의 개구율은 25%로 하였다. G/D 및 shot 분진 모두 전자석 세트를 on/off를 하지 않고 계속 자기장을 주었을 경우 즉, on/off 시간이 무한대(∞)로 비연속 조업인 경우에는 자성 미분체 제거율이 약 50% 정도 밖에 되지 않았다. 이는 시간의 경과에 따라 자성 분리탑의 반경방향(자력선 방향)으로 자성 미분체의 사슬이 형성되면서 내관에서 외관으로 자성 미분체의 흐름이 방해받고, 또한 비개구면의 내측에 일부 자성입자들이 붙어있는 현상이 일어나기 때문으로 판단된다. 한편 자기장을 첫 번째 및 세 번째 단과 두 번째 단의 전자석을 번갈아 가면서 on/off시켰을 경우에는 구멍사이에서 자성 미분체의 사슬 형성을 억제할 뿐만 아니라 연속적인 조업도 가능해진다. On/off 시간이 1초일 때 shot 분진 경우에는 제거율은 약 50%에서 약 80% 정도로 상승하였고, G/D 경우에는 약 70% 정도로 증가하는 경향을 보였다. On/off 시간이 증가할 경우에는 자성 미분체의 사슬 형성이 core부분까지 연장된다. 하강하는 자성 미분체는 자장에 의해 가속도가 붙기 때문에 비개구면에 형성된 사슬을 뚫겨 나가게 하는 현상도 초래한다. 따라서 on/off 시간이 클수록 제거효율이 감소하는 경향을 보였다. Shot 분진에서 더 높은 제거율을 보이는 것은 자장강도가 2.4 kOe일 때 shot 분진의 질량 자화율이 G/D 보다 약 1.5배 높을 뿐 아니라, 식 (3)에서 보는 바와 같이 x방향으로 작용하는 자성력(F_m)은 입자의 자화율(χ)과 부피(v)에 비례하는데[2], 평균 입경에서도 shot 분진이 더 크기 때문이다.

$$F_m = v(\chi_p - \chi_m)H(r) \frac{dB(r)}{dx} \quad (3)$$

3-2-2. 자성 미분체의 혼합비에 따른 영향

Fig. 11은 자성 미분체 혼합비에 따른 자성 미분체의 제거율과 미분탄의 회수율을 나타낸 것이다. 자장강도는 2.5 kOe, 공탑 가스유속은 0.31 Nm/s, core에서의 개구율은 25%, on/off 시간은 1초로 하였다. G/D, shot 분진 모두 혼합비가 증가함에 따라서 자성 미분체의 제거율이 상승하는 경향을 보였다. 자성 미분체의 혼합비가 작을 경우는 비자성 미분체인 미분탄이 자성 미분체에 부착되어 순수한 자성 미분체의 자화율보다 감소하게 되고, 자장의 영향을 받아 annulus로 빠져나가기에 있어서 미분탄의 흐름

으로 방해받기 때문이라 판단되며, 혼합비를 증가시켰을 경우에는 미분탄의 감소로 인해서 자성 미분체 제거율이 증가됨을 알 수 있다. 자성 미분체만을 분리탑으로 통과시켰을 때는 G/D, shot 분진의 제거율이 약 75-82% 정도를 보였는데 이는 자장의 영향을 받는 비개구율이 75%이므로 자성 미분체가 core의 외벽에 붙어서 annulus로 빠져 나오지 못하기 때문이다. 미분탄의 회수율은 G/D, shot 분진의 제거율이 상승함에 따라서 반대로 약간 감소하는 경향을 보였다. 자성 미분체가 core를 빠져 나올 때 미분탄이 부착되어 나오기 때문에 자성 미분체의 제거율이 높을수록 비자성 미분체의 회수율이 감소하였다. G/D는 shot 분진보다 자화율이 낮을 뿐만 아니라, 평균입경에서도 작으므로 미분체 상호간의 부착력이 더 크게 작용하여 제거율이 낮아지는 경향을 보였다.

3-2-3. 공탑 가스유속의 영향

자성 분리탑 내의 자성 미분체에 작용하는 외력으로는 크게 식 (3)의 자성력에 의해 중력과 항력을 들 수 있는데 이들은 각각 식 (4) 및 (5)로 정의된다.

$$F_g = \frac{4}{3}\pi b^3(\rho_p - \rho_f)g \quad (4)$$

$$F_D = \frac{C_D U^2 \rho_f A_p}{2} \quad (5)$$

식 (6)에서 보는 바와 같이 자성 미분체에 작용하는 자성력(F_m)이 항력과 중력으로 형성되는 반대되는 힘들의 합, 즉 $F_g + F_D$ 보다 커야만 자성 미분체가 core에서 annulus로 빠져나오게 된다.

$$F_m^{(mag)} > (F_g + F_D)^{(mag)} \quad (6)$$

중력과 자성력은 가스유속에 관계없이 미분체 물성에 따라 결정되지만 항력은 미분체 물성뿐만 아니라, 가스유속의 제곱에 비례한다. Fig. 12는 shot 분진이 10% 혼합된 미분체에 있어서 공탑 가스유속의 영향을 나타낸 결과이다. 상대적으로 높은 자장강도(2.54 kOe)일 때는 공탑 가스유속이 증가함에 따라 shot 분진의 제거율이 약간 감소하였으며, 낮은 자장강도일 때는 제거율이 더 크게 감소하는 경향을 보였다. 공탑 가스유속이 증가하면 항력이 증가하게 되어 자장이 미치는 영역에서 체류시간은 감소하게 된다. 하강흐름의 경우에는 공탑 가스유속의 증가에 따라서 자성 분리탑 내 반경방향의 농도 분포는 core 내벽에서 증가하게 되고, 입자가 받는 자성력은 반경방향의 거리에 비례하기 때문

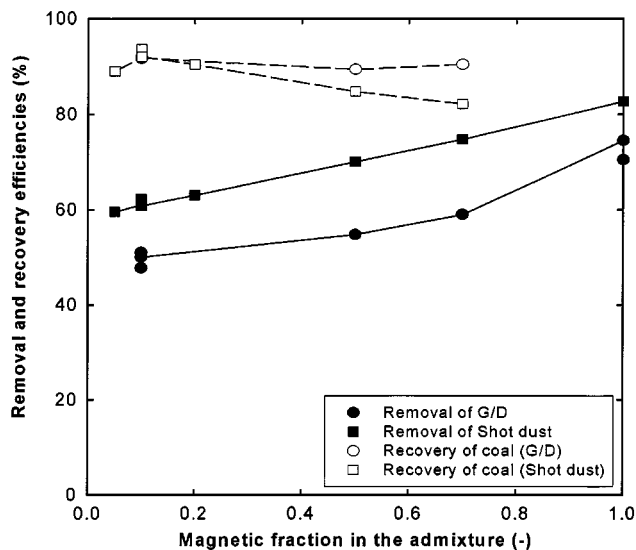


Fig. 11. Effect of magnetic fraction in the admixture on removal and recovery efficiencies of magnetic and non-magnetic fine powders respectively.

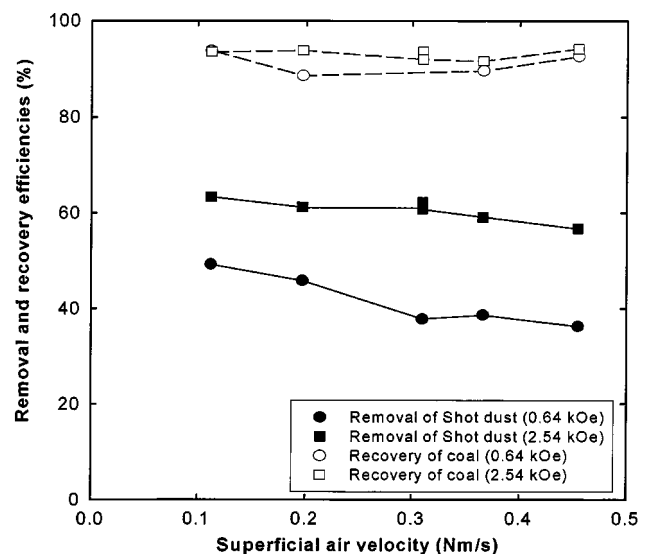


Fig. 12. Effect of superficial gas velocity on removal and recovery efficiencies of magnetic and non-magnetic fine powders respectively.

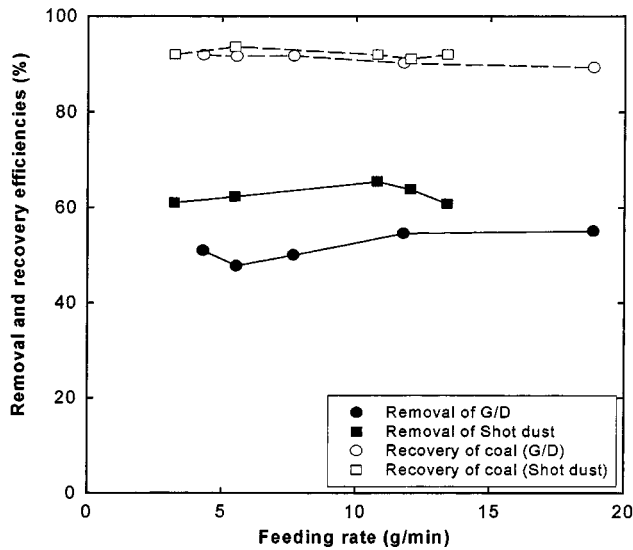


Fig. 13. Effect of feeding rate on removal and recovery efficiencies of magnetic and non-magnetic fine powders respectively.

에 자성력이 더 커지게 된다. 따라서 외부자장이 클수록 자성 미분체의 제거율에 대한 공급 가스유속의 영향은 약해지게 된다.

3-2-4. 공급속도의 영향

Fig. 13은 G/D, shot 분진이 각각 10% 혼합된 미분체에서 개구율 25%, 공급 가스유속 0.31 Nm/s, 자장강도 2.54 kOe, 전자석 세트의 on/off 시간을 1초로 하였을 때 자성 미분체의 제거율과 비자성 미분체의 회수율에 대한 단일 노즐로부터 분산되는 혼합 미분체의 공급속도의 영향을 나타낸 결과이다. G/D, shot 분진 모두 공급속도에 큰 영향 없이 일정한 자성 미분체의 제거효율과 미분탄의 회수율을 보였다. 이 결과에 의하면 본 자성분리 장치는 본 실험 조건 내에서 공급속도의 변동에 잘 대처할 수 있어 처리 속도의 제어에 탄력적으로 조절할 수 있다고 판단된다. 공급속도가 크게 증가되면 자석에 포집되는 자성 미분체의 양이 증가되면서 자성 미분체 사슬의 길이가 core의 개구멍을 막을 수 있는데 이 경우 전자석의 on/off 시간을 적당히 조절해 주어야 한다. 본 실험의 조건에서 on/off 시간을 1

초로 하였을 경우에는 annulus에서 사슬의 문제는 일어나지 않았다.

3-2-5. 비자성 분체의 영향

Fig. 14는 비자성 분체로는 평균 입경이 52 μm 인 미분탄과 평균 입경이 106 μm 인 모래에 각각 shot 분진을 10% 혼합한 미분체에 대해서 공급 가스유속을 0.31 Nm/s, core에서 개구율을 25%로 하였을 때 자장강도에 따른 자성 미분체의 제거율과 비자성 미분체의 회수율의 변화에 대한 비자성 분체의 물성 영향을 본 것이다. Shot 분진의 제거율에 있어서 미분탄과 혼합하였을 때 보다 모래에 혼합하였을 때 더 높은 제거율을 보였다. 비자성 분체의 회수율도 미분탄보다 모래에 혼합하였을 때 더 높은 경향을 보였다. 보통 40-70 μm 이하의 미분체들은 입자 상호간의 부착력이 크게 작용하게 되는데 본 실험에서 사용한 미분탄의 평균입경이 52 μm 이므로 부착력이 크게 작용하는 영역에 있고, 평균입경이 87 μm 인 shot 분진은 상대적으로 부착력이 작다. 반면에 모래는 평균입경이 106 μm 이므로 모래간의 부착력이 작을 뿐 아니라, shot 분진과의 부착력도 미분탄의 경우보다 상대적으로 작게 작용하게 된다. 분체간의 부착력이 작은 모래는 shot 분진이 core를 빠져나올 때 거의 동반되지 않기 때문에 비자성 분체의 회수율이 약 99% 이상으로 높은 회수율을 보였다. 그러나 미분탄은 분체 상호간의 높은 부착력에 의해 shot 분진의 제거율이 높아질수록 회수율이 감소되는 경향을 보였다.

3-2-6. Core에서 개구율의 영향

자성 미분체가 자장의 영향을 받아 core에서 annulus로 빠져나오기 위해서는 내경 2 mm의 구멍을 통과하는데 구멍과 구멍사이에는 비개구면이 존재하게 된다. 이 부분에도 자장이 미치므로 자성 미분체의 일부가 붙어 있다가 전자석이 on/off되는 도중에 annulus로 나오지 못하고 비자성 미분체와 같이 자성 분리탑을 그대로 통과하게 된다. 전자석이 있는 core 부분의 개구율을 25%에서 50%로 바꾸고, shot 분진을 10% 혼합한 미분체를 공급 가스유속을 0.31 Nm/s, on/off 시간 간격을 1초로 하여 자장강도에 따른 shot 분진의 제거율과 미분탄의 회수율의 변화를 나타낸 것이 Fig. 15이다. 개구율이 25% 보다 50% 일 경우에 shot 분진의 제거율이 더 높은 경향을 보였다. 비개구면에 붙어있는 자성 미분체들은 외부자장이 있을 경우에 자화가 되어 작은 자성 미분체가 되며 시간이 지날수록 자력선 방향으로 사슬의 길이가 증가하게 된다. 자성 미분체의 사슬은 자성 분리탑 상부에서 공급되는 자성 미분체들이 자장의 영향을 받아 개구멍으로 빠지는 것을 방해하

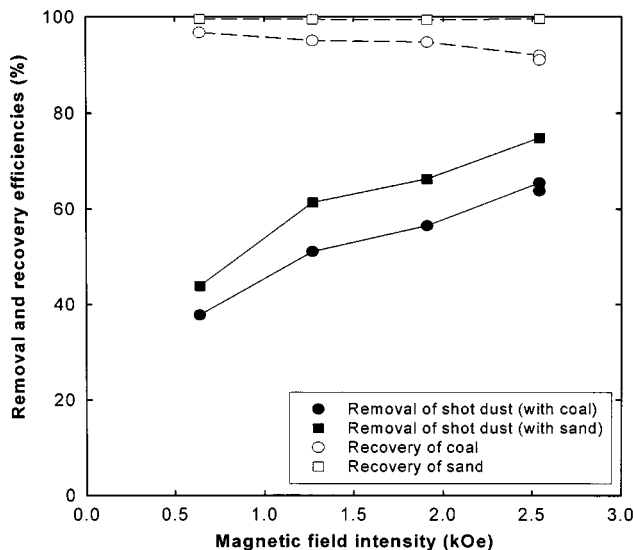


Fig. 14. Effect of magnetic field intensity on removal and recovery efficiencies of magnetic and non-magnetic fine powders, respectively, with respect to non-magnetic fine powders.

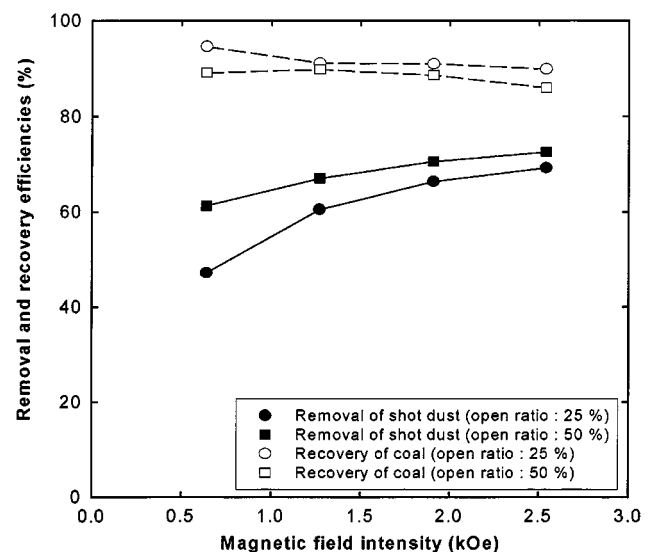


Fig. 15. Effect of magnetic field intensity on removal and recovery efficiencies of magnetic and non-magnetic fine powders, respectively, with respect to open ratio in the core.

는 역할을 하기 때문에 제거율의 저하를 초래한다. 그러므로 개구율의 증가는 자성 미분체의 사슬 문제를 감소시킬 수 있다고 판단된다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 개구율을 25%에서 50%로 증가되면서 약 5-20% 정도로 자성 미분체의 제거를 증가를 보였다. 반면에 자성 미분체의 제거율이 증가되면서 자성 미분체에 미분탄의 부착과 개구율의 증가로 인해 소량의 미분탄이 core를 빠져나오기 때문에 미분탄의 회수율은 상대적으로 감소되었는데 이는 실질적 작업에서는 경제성과 효율의 관점에서 매우 중요한 사항이다.

4. 결 론

진동과 부분적인 유동을 이용한 미분체 공급기술과 자성 및 비자성 미분체를 연속적으로 분리·회수하기 위한 자성분리장치로써 하향흐름을 가지는 이중관식 자성분리 시스템의 적용가능성을 확인하고자 한 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

미분체 공급특성에서는

- (1) 미분체를 공급하는데 있어 진동과 부분적인 유동이 입자 상호간 부착력과 브릿지 형성을 최소화하는데 중요한 역할을 하였으며,
- (2) 부분 유동화를 위한 곱탕 가스유속의 증가에 따라 미분체의 입경별로 배출속도가 현저히 증가되기 시작하는 임계 가스유속이 나타났으며,
- (3) 미분체 공급장치는 미분체의 입경이 클수록, 진동가속도와 부분유동화 가스유속이 증가할수록 배출속도가 증가됨을 확인하였다.

자성분리 특성에서는

- (1) 하향흐름을 가지는 이중관식 자성분리 시스템에서 전자석 세트를 on/off 함으로써 연속적으로 자성 및 비자성 미분체를 분리·회수할 수 있었으며,
- (2) 미분체의 입자 상호간의 작용력은 자성분체의 제거 및 비자성 분체의 회수에서 중요한 역할을 하며,
- (3) 자성분체의 혼합비, 화화율, 전자석의 자장세기가 높을수록 자성 미분체의 제거율은 증가하지만, 비자성 미분체의 회수율은 감소됨을 확인하였다.

본 자성 및 비자성 미분체의 분리장치는 미분탄의 공급선에서 탈황·탈회와 제철 공정의 분진 배출선 등에서 철 성분의 분리·회수와 같은 자원 리사이클링 등에 유용하게 이용될 수 있다고 판단된다.

감 사

본 연구는 한국학술진흥재단의 97년도 학술연구조성비 신진교수과제로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

사용기호

A_p	: cross-sectional area of particle [m^2]
B	: magnetic induction [T]
b	: radius of particle [m]
C_D	: drag coefficient [-]
F_D	: drag force [N]
F_g	: gravity force [N]
F_m	: magnetic force [N]
$f_{i,m}$: magnetic fraction in influent powders [-]
$f_{o,m}$: magnetic fraction in effluent powders [-]

$f_{i,nm}$: non-magnetic fraction in influent powders [-]
$f_{o,nm}$: non-magnetic fraction in effluent powders [-]
g	: acceleration of gravity [m/s^2]
H	: total magnetic field strength acting on particle [A/m]
M	: magnetization of the particle [A/m]
r	: a point within the particle having volume v [m]
U	: superficial gas velocity [Nm/s]
x	: x-component of the force due to the x-component of the field gradient [m]
η_m	: removal efficiency of magnetic powders [%]
η_{nm}	: recovery efficiency of non-magnetic powders [%]
v	: volume of particle [m^3]
ρ_f	: fluid density [kg/m^3]
ρ_p	: particle density [kg/m^3]
χ_m	: volume susceptibility of media [-]
χ_p	: volume susceptibility of the particle [-]

참고문헌

1. Tsouris, C. and Yiaccoumi, S.: *Separation Science and Technology*, **32**, 599(1997).
2. Oberteuffer, J. A.: *IEEE Transactions on Magnetics*, **Mag-10**, 223 (1974).
3. Oder, R. R.: *IEEE Transaction on Magnetics*, **Mag-12**, 428(1976).
4. Kim, Y. H. and Suh, I. K.: *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, **6**, 17(1997).
5. Lehner, P. and Wirth, K.-E.: *The Canadian J. of Chem. Eng.*, **77**, 199 (1999).
6. Yang, Y. L., Jin, Y., Yu, Z. Q. and Bi, H. T.: *AIChE Symp. Ser.*, **296**, 81(1993).
7. Zhu, J. X. and Wei, F.: *Proc. 8th Int. Conf. on Fluidization*, Tours., France, 907(1995).
8. Zhang, H., Zhu, J.-X. and Bergougnou, M. A.: *The Canadian J. of Chem. Eng.*, **77**, 194(1999).
9. Wei, F. and Zhu, J.-X.: *The Chemical Engineering Journal*, **64**, 345 (1996).
10. Zhu, J. X., Yu, Z. Q., Jin, Y., Grace, J. R. and Issangya, A.: *The Canadian J. of Chem. Eng.*, **73**, 662(1995).
11. Wang, Z., Bai, D. and Jin, Y.: *Powder Technology*, **70**, 271(1992).
12. Kim, J. M. and Seader, J. D.: *AIChE J.*, **29**, 353(1983).
13. Matsusaka, S. and Masuda, H.: *Chemical Engineering(in Japanese)*, **41**, 780(1996).
14. Baeyens, J., Geldart, D. and Wu, S. Y.: *Powder Technology*, **71**, 71(1992).
15. Wibberley, L. J. and Phong-Anant: *Combust. Sci. Technol.*, **49**, 93 (1986).
16. Annamalai, K. M., Ruiz, N. V. and Anand, V.: *Powder Technology*, **73**, 181(1992).
17. Ijichi, K., Uemura, Y., Yosizawa, H., Hatate, Y. and Yoshida, K.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **24**, 365(1998).
18. Buchanan, J. S. and Schoennagel, H. J.: *Powder Technology*, **78**, 281 (1994).
19. Yeo, P. M. and Kim, Y. H.: *Theories and Applications of Chemical Engineering*, **5**, 893(1999).
20. Svoboda, J.: "Magnetic Methods for the Treatment of Minerals," ELSEVIER. SCIENCE PUBLISHER B. V., 1(1987).
21. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering," 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 80(1991).