

사료 부원료 하역과정에서 발생하는 비산먼지의 여과특성

Filtration Characteristics of the Fugitive Dust Emitting from Animal Feedstuff Handling

방진철 · 한세현 · 정용원*

인하대학교 환경공학과

(2005년 10월 4일 접수, 2006년 1월 18일 채택)

Jin-Chul Bang, Sehyun Han and Yong-Won Jung*
Department of Environmental Engineering, Inha University

(Received 4 October 2005, accepted 18 January 2006)

Abstract

Animal feedstuff handling is one of the major fugitive dust sources in the port of Incheon. For the effective control of fugitive dusts emitting from the port of Incheon, dust control facilities with bag filter systems should be designed properly considering the characteristic of the fugitive dusts including those from animal feedstuffs.

The ultimate goal of this study is thus to develop the optimum fugitive dust control system which will be applicable for the renovation of the port. As the first step to achieve this longstanding goal, filtration characteristics of soybean shell, the largest dust sources in the port, were investigated with the specially designed filter testing apparatus for this study. The variables tested for the experiments included filter materials, dust concentrations, relative humidities, and filtration velocities. Also, the filtration characteristics of the other animal feedstuffs such as sunflower seed shell, tapioca, and palm shell were investigated to determine K_2 as a function of filtration velocity. The information on K_2 will be used to design the optimum bag filter systems for animal feedstuffs handling in the port.

Key words : Fugitive dust, Bag filter, Pressure drop, Animal feedstuff, Dust cake

1. 서 론

우리나라 주항의 하나이자 수도권의 배후 항인 인천항에서는 사료부원료, 곡물, 고철 등 많은 양의 원자재 형태의 화물이 취급되고 있다. 그러나 낙후된

하역시설로 인하여 하역 과정에서 많은 양의 비산먼지가 발생하여 인천항 뿐만 아니라 인근 주거지역에 심각한 환경 피해를 입히고 있는 실정이다. 특히 취급 양이 가장 많은 화물 중의 하나인 사료부원료는 인근 사료공장의 저장설비가 부족한 관계로 많은 양이 항만에 장기간 야적되고 있다. 따라서 사료부원료를 선박으로부터 야적장으로 내리는 과정이나 야적된 사료를 사료공장으로 이송하기 위해 수송용 차량

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-860-7508, E-mail : jungyw@inha.ac.kr

에 옮기는 과정에서 다량의 비산먼지가 발생된다. 발생된 먼지는 강한 해풍을 타고 인천항 뿐만 아니라 인근 지역으로까지 퍼져나가 비산먼지로 인한 피해를 확산시키고 있는 실정이다.

인천항에서는 이러한 노천 하역으로 인한 비산먼지 발생을 줄이기 위하여 170 m × 50 m × 25 m 규격의 dome을 제작하여 비산먼지 발생량을 줄이는 노력을 하고 있으나, dome 내부에 국소 환기시스템이 설치되어 있지 않아 수송용 차량의 이동, 사료부원료의 상·하차 시에 강한 해풍에 의하여 다량의 분진이 돔 외부로 유출되고 있는 실정이다 (Jeon *et al.*, 2000).

인천항에서 하역되는 사료부원료 중 몰동량 면에서 가장 큰 비중을 차지하는 대두박의 입경분포를 조사한 결과, 비산가능성이 매우 큰 공기역학적 직경 100 μm 이하 분진의 양이 대두박 중량의 약 1%에 달하고 있어 보다 근본적인 비산먼지방지시스템의 구축이 시급한 실정이다.

본 연구의 궁극적인 목적은 사료부원료를 밀폐된 실내공간에서 하역한다는 것을 전제로 하역과정에서 발생하는 비산먼지를 효과적으로 제거할 수 있는 최적 여과시스템을 개발하고자 하는 것이다. 이를 위해 시험분진으로는 대표적 비산먼지 오염원인 대두박, 타피오카, 해바라기박, 야자박 등 총 4종류의 사료부원료를 선택하였고, 여과재 (filter)로는 poly-ester, poly-propylene, acrylic, poly-imide, aromatic-aramide 등 5종의 여과재를 사용하여 일련의 여과특성 실험들을 수행하였다. 실험 변수로는 여과속도, 상대습도, 분진종류, 분진농도, 여과재 종류, mass areal density 등을 선정하였고, 이에 따른 압력강하를 측정하여 이들 변수에 대한 압력강하 변화특성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

통상 여과재의 성능은 집진 효율과 압력강하에 의하여 판정되는데, 이 두 가지 특성을 함께 고려한 인자가 quality factor이며, 그 값은 압력강하가 작을수록 집진 효율이 클수록 커지게 된다 (Brown, 1993). 즉, dome에서 발생하는 분진에 대하여 가장 좋은 백필터 소재로는 가장 큰 quality factor를 가지는 소재를 선정하는 것이 합리적이다.

한편, 기존의 연구결과에 의하면 (Chen *et al.*, 2001), 여과재 소재로 많이 사용되는 부직포형 여과재 (needlefelted filter)의 집진효율은 99% 이상으로 여과초기로부터 종료 시까지 증가 폭이 매우 작은 반면 압력강하는 집진이 진행됨에 따라 초기의 값에 비해 수배 이상 증가되므로, 필터의 quality factor를 예측하는데 있어 압력강하(ΔP)가 집진 효율보다 더 중요한 인자로 작용함을 알 수 있다. 이와 같은 논리로 본 연구에서는 집진 효율에 관한 언급은 생략하고 압력강하만으로 여과특성을 평가하였다.

여과 시의 압력강하는 여과재 자체에서의 압력강하와 여과재 위에 형성되는 분진케익(dust cake)의 항력에 의한 압력강하의 합으로 나타나며, Darcy의 법칙에 의해 다음 식으로 표현 할 수 있다 (Davis, 2000; 조광명, 1999).

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_c = \frac{x_f \mu_g V_f}{K_f} + \frac{x_c \mu_g V_f}{K_c} \quad (1)$$

여기에서 ΔP_f는 여과재만의 압력강하이고, ΔP_c는 분진케익층에 걸리는 압력강하이다. V_f는 표면 여과속도 (filtration velocity), x_f는 여과재의 두께, x_c는 분진케익의 두께이고, μ_g는 공기의 점성이다. K_f와 K_c는 각각 여과재 및 분진케익의 투과도(permeability)이다. 식(1)을 다시 쓰면,

$$\Delta P = \frac{x_f \mu_g V_f}{K_f} + \frac{\mu_g}{\rho_c K_c} V_f^2 L_d t \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있으며, L_d는 여과재에 가해지는 합진 가스의 분진농도, ρ_c는 분진케익의 밀도(bulk density)이고 t는 여과시간이다. 한편 이 식을 여과속도로 나누어주면 다음 과 같은 식이 된다.

$$S = \frac{\Delta P}{V_f} = S_e + K_2 \omega \quad (3)$$

식(3)에서는 압력강하를 여과속도로 나눈 값을 여과항력(filter drag)으로 정의하여, mass areal density의 함수로 나타내었다. 이 수식에서 S_e는 잔류저항(residual drag)이며, ω는 단위 여과 면적 당 분진케익의 질량, 즉 mass areal density이다. 또한, 분진케익의 특성치인 K₂는 분진의 종류에 따라 다르며, 분진케익의 압축성에도 관계가 있는 것으로 판단된다.

3. 실험 방법

3.1 실험장치

본 연구에서 백필터의 압력강하특성 실험을 위해 고안한 장치는 기존 연구자가 사용하였던 장치를 그림 1과 같이 개선하여 제작되었다(Schmidt, 1995).

장치 설계의 주안점은 실험장치 내부의 전반적인 공기의 흐름과 여과재 표면이 평행이 되도록 그림 1에서와 같이 여과재를 설치하여 실제 백필터 주위에서의 공기의 유동 상황과 가능한 유사하게 설계하였다. 실험장치의 규격은 200 mm×200 mm×950 mm 이고 재질은 아크릴 소재를 사용하였다.

또한 분진의 외부 비산을 방지하기 위하여 흡인식 공기펌프를 사용하였는데, 공기흡인에 사용된 펌프는 압력강하의 변화와 무관하게 일정한 유량으로 공기를 흡입할 수 있는 정량펌프(Sibata SL)를 사용하였다. 시험분진은 실험장치 상부에 설치된 분진 공급기(screw feeder형)에 의해 실험장치 내부로 정량적으로 주입하였다. 상대습도의 조절은 장치 하부에 온도

및 습도 자동측정 센서와 습도공급 장치를 설치하여 일정 상대습도가 유지되도록 하였다.

3.2 압력강하의 측정

여과재 및 분진케이에서의 압력강하를 연속적으로 측정하기 위하여, 여과재 전·후부에 probe를 설치하고 압력강하를 differential pressure transducer를 사용하여 측정하였다. 측정된 압력강하는 data acquisition system을 사용하여 컴퓨터에 저장하였다. 한편 differential pressure transducer는 주기적으로 마노미터를 사용하여 보정하였다.

3.3 시험분진의 제조 및 물성분석

본 연구에서는 하역과정 시의 실제 비산먼지가 아닌 시험분진을 제조하여 사용하였는데, 실제 하역과정에서 발생하는 비산먼지의 물성과 인위적인 분쇄 과정을 통해 제조된 실험용 분진과는 물성 면에서 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 그러나 실험실에서 동일 조건 하에서 많은 반복 실험을 수행하기 위해서는 다량의 시험용 먼지제조가 불가피한데, 향후 현장 실험을 통해 실험실에서 시험분진을 사용하여 얻어진 결과와의 차이점을 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

시험분진 제조에 사용된 사료부원료로는 인천항에서 물동량이 가장 많은 대두박을 비롯하여 타피오카, 해바라기박, 야자박 등 4종을 사용하였다. 시료는 종류별로 야적되어 있는 사료부원료 pile에서 원추사분법을 이용하여 균일하게 채취하였고, 채취된 사료원료를 분쇄기를 사용하여 일정시간 분쇄한 후, 표준망체(U.S. standard sieve No.40, 420 μm)를 통과한 분진을 본 연구의 시험분진으로 사용하였다.

시험분진의 물성 파악을 위하여 분진밀도(particle density), 중앙직경(count median diameter), 최빈직경(mode diameter), 평균직경(mean diameter), 표준편차(standard deviation), 비표면적(specific surface area) 등을 측정하였다.

한편 분진밀도는 Le Chatelier 비중병법(대신기술 편집부, 1992)을 입경분포 및 비표면적 등은 Aerosizer(TSI Inc., U.S.A.)를 사용하여 측정하였으며, 입자의 표면상태는 전자주사현미경(SEM) 사진을 이용하여 관찰하였다.

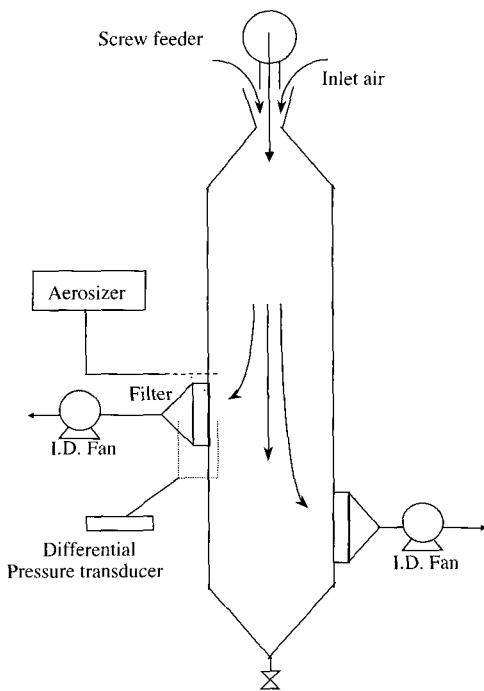


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

4. 결과 및 고찰

4.1 여과재의 영향

분진케익이 여과재의 전면에서 형성되는 여과 초기 단계에서는 여과재 표면 근처의 공극에 분진 입자가 퇴적되는 형태 (deposition morphology)에 따라 분진 케익에서 서로 다른 압력강하 증가 경향을 보일 가능성이 크다.

본 연구에서는 분진케익에서의 압력강하에 대한 여과재의 영향을 확인하기 위하여, 전체 압력강하에서 분진케익이 형성되지 않은 사용 전 여과재 (clean filter)에 의한 압력강하를 뺀 압력강하로써 여과재 종류에 의한 영향을 비교하였다. 시험여과재는 poly-ester, poly-propylene, acrylic, poly-imide, aromatic-aramide 등 5종의 여과재에 대하여 비교실험을 행하였으며, 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 중축은 전체 압력강하에서 사용 전 여과재 (clean filter)에 의한 압력강하를 뺀 압력강하이며, 횡축은 여과재 단위면적당 퇴적된 분진의 질량을 나타내는 mass areal density이다. 시험분진은 대두박 분진을 사용하였으며, 여과속도는 5.0 cm/s이다. 그림 2에서 확인할 수 있는 바와 같이, 여과재의 종류에 따라 서로 상이한 압력강하 증가추세를 나타내는데, 이러한 결과를 통해 다음과 같은 추론이 가능하다. 즉, 본 연구에서와 같이 동일한 시험분진을 사용하는 경우에, 만일 여과재 표면의 영향이 없다면 분진케익을 통한 압력강하는 동일하게 나타나야 하는데, 실제 결과는 그림 2에 제시된 바와 같이 필터의 종류에

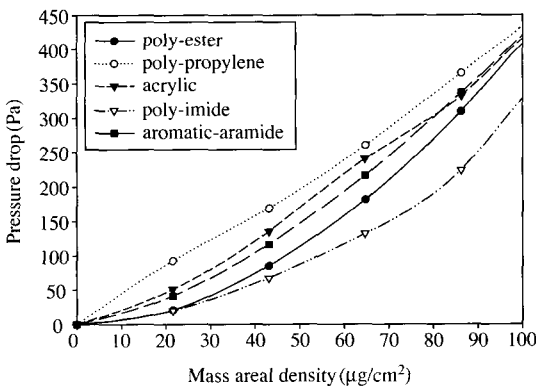


Fig. 2. Effect of filter media on pressure drop.

따라 상이하게 나타난다. 따라서 이는 여과초기에 분진입자가 여과재의 공극을 메우는 현상, 다시 말해 여과 초기의 분진의 퇴적형태 (deposition morphology)에 따라 분진케익의 형성에 영향을 미치게 되며 그 결과 그 후에 계속적으로 형성되는 분진케익에서의 압력강하도 크게 달라질 수 있음을 시사해 주고 있다 (Chen et al., 2001).

또한 그림 2에서 주목할 만 한 점은 mass areal density가 대략 60 µg/cm²보다 큰 영역에서 압력강하의 증가율이 현저히 증가함을 볼 수 있는데, 이는 분진케익의 두께가 증가함에 따라 여러 요인 (예컨대, 압축현상 등)들에 의해 분진케익 내부의 분진의 퇴적형태 (deposition morphology)가 달라지고 있음을 시사하며, 다시 말해 여과가 진행됨에 따라 분진케익의 특성이 계속적으로 변화하고 있음을 의미한다.

4.2 분진농도의 영향

분진이 발생하는 작업장 환경의 일시적 변화에 의하여 백필터로의 유입 분진 농도가 급격히 변할 경우 필터에서 발생하는 압력강하의 변화를 확인하기 위한 실험도 수행하였다.

실험은 일정한 여과속도에서 여과재에 유입되는 분진의 농도를 고농도와 저농도의 두가지 경우에 대해 수행하였으며, 이를 mass areal density와 압력강하의 그래프로 나타내어 그림 3에 제시하였다. 실험에서 여과속도는 5.0 cm/s로 설정하였고, 시험분진은 대두박을 사용하였다. 그림 2에 나타난 바와 같이 분진 농도가 71.9 mg/m³일 경우와 41.1 mg/m³인 경우에 mass areal density의 증가에 따른 압력강하의 증가는

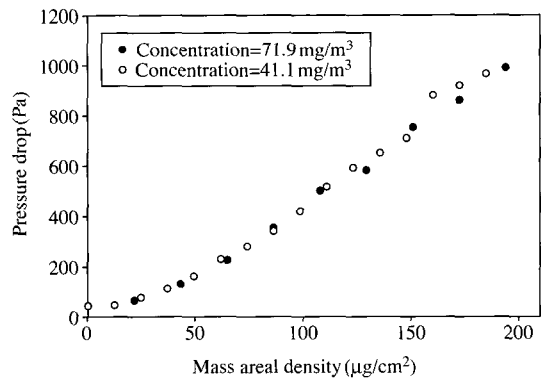


Fig. 3. Effect of dust concentration on pressure drop.

거의 동일한 양상을 보이는 것을 알 수 있다

즉 사료원료를 취급하는 시설에서 백필터를 운전할 경우, 분진농도의 급격한 변화에 관계없이 mass areal density에 따른 압력강하에는 변화가 없음을 알 수 있다.

4.3 여과속도의 영향

여과 시 압력강하는 공기의 흐름에 대한 여과재 및 분진케익의 항력(drag force)에 의하여 발생되고, 식 (2)와 같이 여과속도의 함수로써 표현된다. 즉, 다른 조건이 동일할 때, 여과재에서의 압력강하는 여과 속도에 비례하며, 분진케익에서의 압력강하는 여과속도의 제곱에 비례하여 증가가 예상된다. 그림 4는 세 가지 여과속도에 대해, mass areal density의 변화에 따른 압력강하 변화를 나타낸 그림이다. 실험에서 시험분진은 대두박, 시험여과재는 poly-ester 소재의 여과재가 사용되었으며, 분진농도는 71.9 mg/m³이다.

그림 4에서 확인할 수 있는 바와 같이, 여과속도가 증가할수록 동일한 mass areal density에 대한 압력강하가 증가함을 알 수 있다. 한편 여과재 자체에 의한 압력강하(즉, 여과 초기상태의 압력강하 또는 mass areal density가 0인 상태)는 여과속도가 증가함에 따라 약간 증가하고 있는 것으로 나타났는데, 이러한 차이는 분진케익에 걸리는 압력강하의 증가에 비하면 상대적으로 무시할 만 하므로 결국 분진케익의 특성이 여과속도에 따른 압력강하의 증가특성에 결정적인 영향을 미치는 것을 본 연구를 통해 재차 확인할 수 있다.

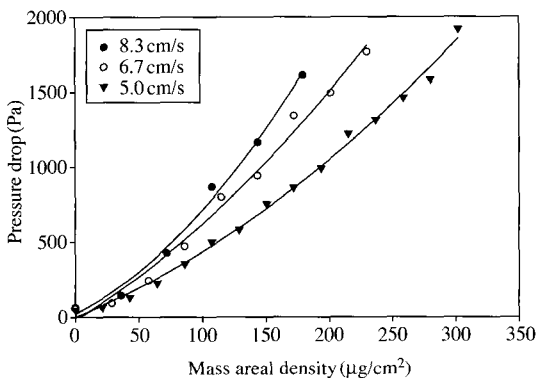


Fig. 4. Effect of face velocity on pressure drop.

4.4 상대습도의 영향

백필터 운전조건으로서 중요한 인자로 작용하는 상대습도의 영향을 알아보기 위하여, 상대습도 80%인 경우와, 45%의 두 가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 시 온도는 22°C, 여과속도는 5.0 cm/s, 시험분진은 대두박이었다.

그림 5는 두 가지 상대습도의 조건에서 mass areal density의 증가에 따른 압력강하의 증가 경향을 도시하고 있는데, 동일 mass areal density에서 상대습도가 높은 경우 압력강하가 작게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

분진케익에서의 입자의 퇴적형태는 여러 가지 변수에 의해 결정이 되겠지만, 그 중에서 상대습도가 압력강하에 미치는 영향은 다음과 같은 요인을 예상할 수 있다. 즉, 공기 중 상대습도가 매우 높을 경우 특히 입자간의 접촉면에서의 수분이 응축으로 인한 물의 표면장력의 효과가 분진 입자간의 부착력을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다는 점이다(Spurny, 1998; Morris and Allen, 1996).

일반적으로 여과의 초기단계에서 일정 유속에서 여과재 표면에 순차적으로 쌓이던 분진 입자는 여과가 진행됨에 따라 그 두께가 증가하며, 이로 인해 필터 내에 공기의 통과로 인한 항력이 증가되어 가장 큰 힘을 받게 되는 분진케익의 하부층에 위치하는 입자부터 압축이 시작되어 전체적으로 입자케이크 내부에 압축현상이 발생하게 된다. 그 결과 특히 분진케익의 하부의 공극률은 압축으로 인해 크게 감소되며, 이는 해당 분진층에서의 압력강하의 추가적인 증가를 의미한다(Endo et al., 1998). 또한 이러한 압

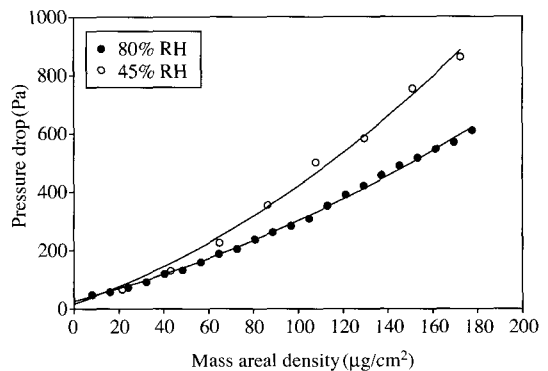


Fig. 5. Effect of relative humidity on pressure drop.

축현상은 입자간의 마찰력에도 좌우가 되는데, 따라서 결국 분진케익에서의 압축현상은 입자의 부착력, 입자간의 마찰력, 입자에 작용하는 압축력 등의 대소에 의해 그 정도가 좌우되는 것으로 사료된다(Jeon and Jung, 2004).

그러므로 분진입자의 물성이 동일할 경우, 상대습도가 증가함에 따라 분진입자간의 부착력이 증가되고, 이로 인해 형성되는 분진케익은 분진입자간의 증가된 부착력으로 인해 상대습도가 작은 경우보다 압축이 덜 일어나게 된다. 따라서 동일한 무게의 분진케익을 고려할 경우, 상대습도가 높은 경우에 상대습도가 낮은 경우보다 분진케익층의 공극률이 크게 되고 이로 인해 분진케익에서의 압력강하가 작아지게 되는데, 이러한 정성적 경향은 전산모사 결과로도 이미 예측된 바 있다(Jeon and Jung, 2004).

4. 5 분진종류에 따른 압력강하 변화

사료원료의 종류에 따른 여과특성을 조사하기 위하여, 4종의 사료부원료의 분진을 대상으로 mass areal density에 따른 압력강하 변화를 측정하였다. 실험 시 설정한 여과속도는 6.7 cm/s이었으며, 시험여과재는 poly-ester 소재의 여과재가 사용되었다. 분진은 인천항에서 물동량이 가장 많은 대두박을 비롯하여, 타피오카, 해바라기박, 야자박 등 4종의 사료부원료를 이용하였다. 각 사료종의 분진을 사용한 실험결과를 그림 6에 도시하였다.

그림 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 타피오카와 대두박의 압력강하가 다른 사료원료에 비하여 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 표 1에 제시된 바와 같이 대두박과 타피오카의 비표면적이 해바라기박과 야자박의 비표면적에 비하여 상대적으로 크기 때문인 것을 풀이된다. 즉, 야자박과 타피오카는 평균입경과 표준편차가 거의 동일함에도 불구하고 동일 mass areal density에서 입자의 표면적이 거의 2.3배 정도로 이 같은 해석이 가능할 것으로 판단된다. 그 이유는 입자의 비표면적이 증가할 경우, 여과 시 공기와의 접촉 면적이 증가하여 증가된 항력에 의하여 압력강하가 증가하기 때문이다.

한편 그림 6에서 거의 동일한 비표면적을 가진 대두박과 타피오카의 압력강하 곡선을 비교해보면, 타피오카의 압력강하가 대두박의 압력강하에 비하여 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 전술

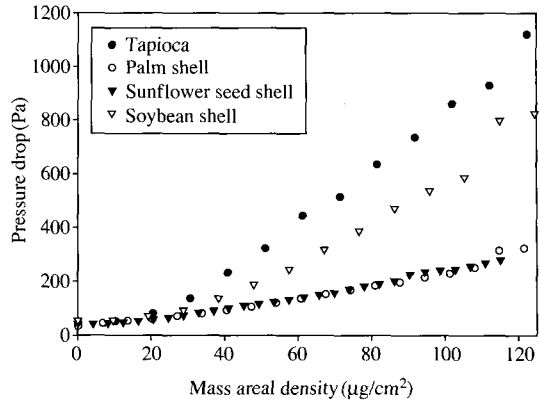


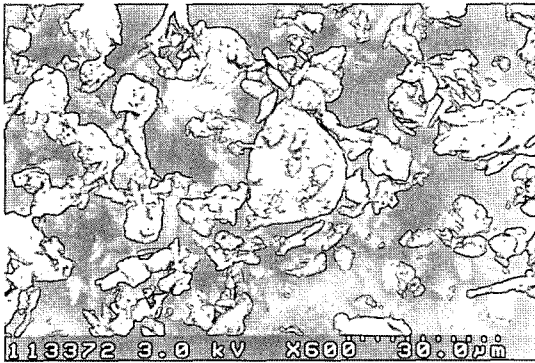
Fig. 6. Pressure drop of each animal feedstuff.

Table 1. Dust property of each animal feedstuff.

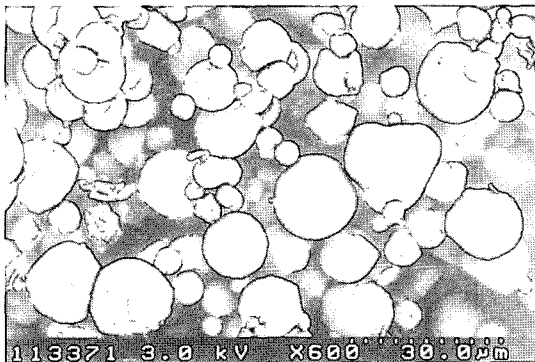
Characteristics	Soybean shell	Tapioca	Sunflower seed shell	Palm shell
Density (g/cm ³)	1.32	0.660	1.18	1.63
Mean diameter (µm)	2.97	6.05	4.14	6.12
Standard deviation	1.49	1.65	1.94	1.52
Count median diameter (µm)	3.04	6.20	4.32	6.16
Mode diameter (µm)	2.36	5.13	3.09	5.37
Specific surface area (m ² /g)	0.925	0.914	0.572	0.397

한 비표면적 외에도 분진 입자 표면의 형상 및 거칠기 등도 압력강하에 영향을 미치기 때문인 것으로 사료되며, 이를 확인하기 위하여, 전자주사현미경(SEM) 사진을 촬영하여 비교해 보았다. 그림 7은 전자주사현미경에 의하여 촬영된 대두박과 타피오카 분진의 사진이다. 사진에서 확인할 수 있는 바와 같이, 타피오카가 대두박에 비하여 분진의 모양이 더 매끄럽고 크기가 보다 균일함을 알 수 있다.

일반적으로 분진이 필터 위에 쌓여서 분진케익을 형성할 때, 분진입자의 표면이 거칠수록 표면의 마찰력이 커져서 입자 간에 가교가 형성되는 bridging 현상이 잘 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 입자의 모양이 거칠고 불균일한 대두박 분진의 경우 상대적으로 큰 마찰력으로 인해 bridging 현상의 발생 가능성이 증가하며, 이로 인해 비교적 균일한 타피오카 분진보다 상대적으로 큰 공극을 가질 가능성이 많아진다. 따라서 표면이 거칠고 모양이 각이 진 대



a. Soybean shell



b. Tapioca dust

Fig. 7. Scanning electron photo-micrographs of soybean and tapioca.

두박의 경우 상대적으로 표면이 매끄럽고 둥근 모양의 타피오카의 경우보다 mass areal density가 증가함에 따라 압력강하가 상대적으로 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

4.6 분진케익의 여과 특성치, K_2

백필터의 설계 시 필수 인자인 여과속도를 결정하기 위하여, 여과재 소재 및 분진케익에서 발생하는 압력강하의 예측은 매우 중요하다. 잘 알려진 바와 같이 여과속도가 증가할수록 필요한 여과 면적이 줄어들어 백필터의 크기는 작아져 초기 설치비용을 줄일 수 있으나, 그로 인하여 증가된 압력강하로 인해 백필터의 탈진주기가 짧아지게 된다. 빈번한 탈진은 백의 수명을 단축시키게 되므로 자주 여과재를 교환해 주어야 하고 이로 인해 백필터의 운전비용이 증

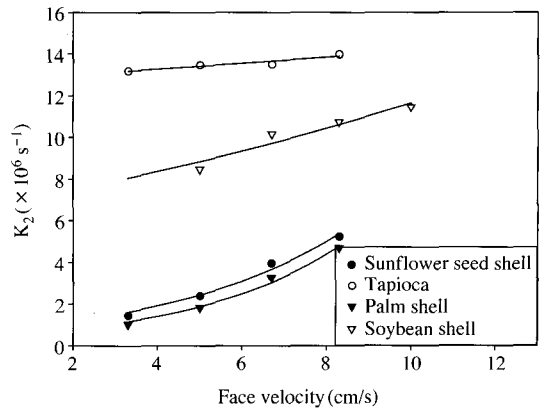


Fig. 8. K_2 of each animal feedstuff dust as a function of face velocity.

가되게 된다.

따라서 이러한 점을 감안하여 적절한 여과속도를 결정하게 되는데, 이때 사용되는 비교 인자로 각각의 분진의 여과 특성치 K_2 값이 사용된다. 여과속도의 함수인 K_2 값과 잔류항력 Se 가 결정이 되면, 해당 여과속도에서 mass areal density에 대한 압력강하를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 각 사료원료에서 발생하는 분진의 고유 여과 특성치 K_2 값을 여과속도의 함수로서 표현하여, 사료원료 취급시설에 설치될 백필터 설계 시 유용하게 이용될 수 있도록 제시하였다.

K_2 를 결정하기 위하여 각각 다른 세 가지 유속에서 mass areal density에 대한 여과항력 S 의 변화를 도시하였다. 이때 각 유속별로 mass areal density에 대한 압력강하 변화 그래프의 기울기가 K_2 값이 되며, 각 유속에서의 K_2 값의 계산 결과를 그림 8에 도시하였다.

그림 8에 도시된 바와 같이 유속이 증가할 때 K_2 값은 증가하는 것으로 나타났으며 대두박과 타피오카의 K_2 값이 다른 사료원료에 비하여 크게 나타났다.

K_2 를 여과속도의 함수로 표시하기 위하여 다음과 같은 형태의 식을 가정하였다(Davis, 2000).

$$K_2 = k \cdot V_f^x \tag{4}$$

여기에서 k 와 x 는 경험상수이며, mass areal density와 압력강하의 관계로부터 결정된 K_2 와 여과속도의

관계 그래프에서 회귀분석에 의하여 구해된다. 사료 부원료 종류 별로 구한 K_2 에 관한 경험식은 다음과 같다.

타피오카

$$K_2 = 1.23 \times 10^7 \cdot V_f^{0.0555} \quad (5-1)$$

대두박

$$K_2 = 4.36 \times 10^6 \cdot V_f^{0.4261} \quad (5-2)$$

해바라기박

$$K_2 = 1.37 \times 10^5 \cdot V_f^{1.6587} \quad (5-3)$$

야자박

$$K_2 = 2.63 \times 10^5 \cdot V_f^{1.4107} \quad (5-4)$$

결론적으로 특정사료와 여과속도에 대하여 구한 K_2 값을 식 (3)에 적용하여 특정사료의 분진케익의 압력강하를 예측하여 최적 백필터시스템의 설계를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

사료부원료의 하역과정에서 발생하는 비산먼지의 여과특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 여과재의 재질이 분진케익을 통한 압력강하에 예상보다 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타났는데, 이는 여과초기 단계에서의 입자퇴적형태가 분진케익의 입자퇴적형태에 영향을 미쳐 이 같은 결과가 나온 것으로 풀이된다. 즉, 여과초기 단계의 입자퇴적형태는 여과재 표면의 공극률과 표면의 형상에 의해 좌우가 될 것이므로 이 같은 추론이 가능할 것으로 판단된다.

2. 상대습도가 높을수록 분진케익을 통한 압력강하가 작아지는 것으로 나타났는데, 이는 입자 간의 부착력의 증가에 의해 분진케익의 압축이 덜 일어났기 때문인 것으로 해석된다. 이 같은 결과는 기존의 전산모사 결과에 의해서도 예측이 되고 있다.

3. 사료 종류별로 압력강하 변화를 측정된 결과 타피오카와 대두박의 경우 분진케익의 압력강하가 동일 mass areal density에서 타 종류의 사료보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 그 이유는 타피오카와

대두박의 비표면적이 다른 사료에 비해 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 타피오카와 대두박의 압력강하를 비교하면 타피오카의 경우 동일 mass areal density에서 압력강하가 높게 나타나고 있는데, 그 이유는 타피오카의 표면이 상대적으로 매끄러워 입자간의 마찰력이 작은 관계로 분진케익의 압축이 더 많이 일어나기 때문인 것으로 풀이된다.

4. 사료원료 별로 K_2 에 관한 여과속도에 연관시킨 상관관계식을 도출하였는데, 향후 백필터시스템의 설계에 실질적인 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

결론적으로 본 연구의 결과의 해석은 분진케익의 여과특성을 중심으로 이루어졌으며, 향후 보다 정확한 결론을 도출하기 위해서는 분진층의 내부 구조를 관찰하는 실험과 같은 매우 정교한 실험과 전산모사 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

대신기술 편집부 (1992) 분체기술 핸드북, 대신기술, 55-62 pp.
 조광명 (1999) 대기오염, 청문각, 236-244 pp.
 Brown, R.C. (1993) *Air Filtration*, Pergamon Press, Oxford.
 Chen, C.C., W.Y. Chen, S.H. Huang, W.Y. Lin, Y.M. Kuo, and F.T. Jeng (2001) Experimental study on the loading characteristics of needlefelt filters with micrometer-sized monodisperse aerosols, *Aerosol Science and Technology*, 34, 262-273.
 Davis, W.T. (2000) *Air Pollution Engineering Manual*, Air & Waste Management Association, U.S.A., Wiley Interscience, New York, 99-116 pp.
 Endo, Y., D.R. Chen, and David Y.H. Pui (1998) Effects of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading on air filters, *Powder Technology*, 98, 241-249.
 Jeon, K.J., D.Y. Ryu, and Y.W. Jung (2000) A study on the dust control characteristics inside a test dome in the port of Incheon, *J. of Korean Society for Atmos-*

- pheric Environment, 16(E), 47-57.
- Jeon, K.J. and Y.W. Jung (2004) A simulation study on the compression behavior of dust cakes, Powder Technology, 141, 1-11.
- Morris, K. and R.W.K. Allen (1996) The influence of dust and gas properties on cake adhesion in fabric filters, Filtration and Separation, April, 339-343.
- Schmidt, E. (1995) Experimental investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media, Filtration & Separation, September, 789-793.
- Spurny, K.R. (1998) *Advances in Aerosol Filtration*, Lewis Publishers, New York, 349-360.

