

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 18, No. 4: September 2022 pp. 97-107

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2022.18.4.097>

Wave plate 습분제거기의 형상 변경을 통한 성능 개선

노 정 훈^{1)*} · 조 민 철¹⁾ · 이 승 중²⁾

¹⁾고등기술연구원 지능기계시스템센터

²⁾고등기술연구원 플랜트공정개발센터

(2022년 6월 8일 투고, 2022년 8월 12일 수정, 2022년 8월 24일 게재확정)

Performance improvement of wave plate mist eliminator through geometry modification

Jung-Hun Noh^{1)*} · Min-Cheol Cho¹⁾ · Seung-Jong Lee²⁾

¹⁾*Institute for Advanced Engineering, AI & Mechanical System Center*

²⁾*Institute for Advanced Engineering, Plant Process Development Center*

(Received 8 Jun 2022; Revised 12 Aug 2022; Accepted 28 Aug 2022)

Abstract

The geometry of popular wave plate type mist eliminator for the wet flue gas desulfurization process was improved, fabricated, and experimentally evaluated. A Mist eliminator is a type of inertial particle collector which collection efficiency is proportional to the velocity of the gas phase. However, as the amount of re-entrainment is also proportional to the gas phase velocity, there is a limitation for the gas phase flow rate. Re-entrainment is one of the most important issues in a mist eliminator and is likely to occur as the input of the liquid phase and flow rate of the gas phase increase. In order to resolve this problem, the projection angle of the improved mist eliminator is set to 30° from the conventional one while maintaining the cross-section. With low flow rate conditions, the modified mist eliminator showed a similar pressure drop and overall collection efficiency. However, with conditions in which re-entrainment is obviously occurring, the modified mist eliminator showed better performance in draining droplets than the conventional one. As a result, the modified mist eliminator showed higher overall collection efficiency.

Keywords: Collection efficiency, Droplet, Flue gas desulfurization, Mist eliminator

*Corresponding author.

Tel : +82-31-330-7418, Fax : +82-31-330-7117

Email : junghunoh@iae.re.kr

1. 서론

습분제거기는 관성집진기의 한 종류로서 기상 유동 내에 포함되어 있는 액적을 제거하기 위한 목적으로 개발되었으며 다른 집진장치에 비해 매우 넓은 유동과의 접촉 면적을 나타내어 낮은 압력강하와 높은 포집효율을 특징으로 한다. 이에 따라 습분제거기는 주로 화학 물질의 제조 과정 중간에 삽입되어 결과물의 순도를 높이기 위한 용도, 화력발전소의 탈황설비와 같은 배기가스 후처리장치 용도 그리고 습분제거기 후단에 위치하는 장비를 보호하기 위한 용도로 주로 사용된다.

습분제거기의 종류는 크게 철망(wire mesh) 형태와 채널 경사면(wave plate) 형태로 나눌 수 있으며 액적 제거 성능에 영향을 미치는 인자들은 다음과 같다. 우선 철망 형태의 습분제거기의 경우 wire의 충전 밀도, 격자 생성 방법, 패드의 두께, wire의 지름, 내부 기류의 속도에 영향을 받는다(Brunazzi and Paglianti, 1998; Al-Dughaiter et al, 2010). 채널 경사면 형태의 습분제거기는 plate 사이의 거리, hooked vane의 형상, 절곡의 개수, plate의 각도, 내부 기류의 속도가 주요 인자로 작용한다(Gharib and Moraveji, 2012; Narimani and Shahhoseini, 2011; Galletti et al, 2008). 철망 형태와 채널 경사면 형태의 습분제거기의 형상 차이만큼 주요 성능 인자는 위와 같이 대부분 일치하지 않지만 둘 다 관성집진기의 한 종류이므로 내부 기류 속도 인자를 공유하게 된다. 하지만 습분제거기는 포집성능이 가장 높게 나타날 수 있는 최적의 내부 기류 속도 범위가 존재하는 것으로 알려져 있다(Burkholz, 1989). 높은 내부 유속을 나타낼수록 액적을 강하게 벽면으로 유도할 수 있으므로 높은 집진효율을 나타내지만, 적정 유속 범위가 존재하는 이유는 습분제거기 내부에서 발생하는 재비산 때문이다. 재비산이란 습분제거기의 표면에 흡착되었던 액적이 다시 공기 중으로 비산되는 것을 의미하며 높은 유속을 나타낼수록 재비산이 일어나기 쉬운 조건이 되어 결과적으로 포집 효율을 악화시키게 된다.

재비산 문제는 습분제거기에서 발생하는 주요 문제점 중 하나이며 이에 따라 재비산에 대한 다수의 선행연구들이 보고되고 있다. Azzopardi and Sanaullah (2002)는 채널 경사면 형태의 습분제거기

내부에서 재비산이 일어나는 조건을 모사하였으며 액적의 흡착으로 plate 표면에 형성되는 수막의 두께와 재비산이 일어나는 임계 속도 사이에 일정한 상관관계가 있음을 실험적으로 밝혔다. 또한 재비산이 채널 경사면 형태의 습분제거기 내부에서 편평한 면 보다는 주로 굴곡진 부분에서 일어남을 규명하였다. Mao et al. (2018)은 채널 경사면 형태의 습분제거기 표면에 형성된 수막에서 재비산이 일어나는 현상을 수학적으로 모델링하였으며 습분제거기 절곡이 수직면과 이루는 각도가 26.6°일 때 가장 높은 임계속도를 나타내어 재비산이 덜 일어날 수 있음을 밝혔다. James et al. (2003)은 채널 경사면 형태의 습분제거기의 모서리 부분에 수막의 형성이 집중되는 점을 이용해 채널 경사면 형태의 습분제거기 각 모서리마다 배수 채널을 추가로 설치한 형상을 제안하였다. 배수 채널을 설치한 모델은 효과적으로 재비산을 억제하는 것으로 나타났다. 이에 따라 배수 채널을 설치하지 않은 모델보다 높은 액적 제거 성능을 나타내었다. Kim, M. W et al. (2021)은 배수 채널 전면에 90°의 각도를 이루는 slit plate를 부착한 형상을 제안하였다. slit plate는 기류 방향을 바꾸는데 효과적이며, 관성으로 인해 입경이 큰 액적의 포집 효율을 향상시켜 2 μm 액적에서 기준 모델보다 포집 효율이 10% 이상 향상되고 압력 강하는 5~10% 낮게 형성되어 습분제거기의 성능을 개선하였다. Fabian et al. (1993)은 동일한 채우기 밀도에 대해 200 μm 와 10 μm 의 철망 형태의 습분제거기 성능을 비교하였다. 실험 결과 10 μm 모델은 낮은 속도에서 높은 제거 성능을 나타내었으나 200 μm 모델보다 낮은 속도에서도 재비산 문제가 발생하여 유속이 일정 수준보다 빠른 조건에서는 오히려 200 μm 모델이 높은 제거 성능을 나타내었고, 이에 따라 wire의 지름과 임계속도 사이에 상관관계 있음을 밝혔다. Kouhikamali et al. (2014)은 상용 전산유체역학 프로그램을 활용하여 일정한 패턴을 나타내는 철망 형태의 습분제거기를 모델링하였고 공기과 물을 활용하는 다상 시뮬레이션을 통해 재비산을 구현하였다. 시뮬레이션 결과 철망의 충전 밀도가 높을수록, wire의 지름이 작을수록 높은 효율을 나타내었고, 10 m/s 이상의 속도에서 재비산이 확연하게 일어나는 바 8 m/s 수준의 유속을 나타낼 때 가장

높은 포집효율을 달성할 수 있음을 보였다.

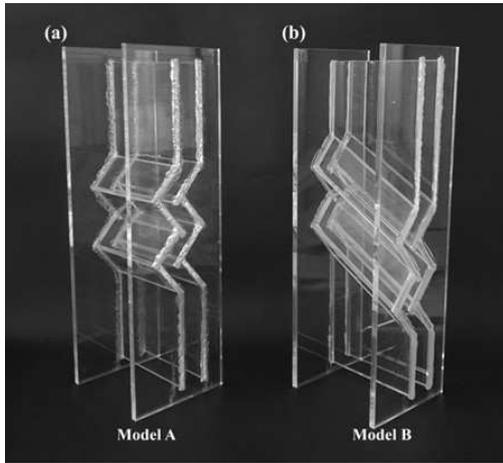


Figure 1 Schematic diagram of the mist eliminators (a) Model A (b) Model B.

본 연구에서는 습식 탈황설비에 사용되는 습분제거기의 형상 변경을 통한 성능 개선을 목표로 하였으며 이에 따라 채널 경사면 형태의 습분제거기를 대상으로 하였다. 또한 실제 탈황설비의 흡수탑에서 유동이 아래에서 위로 향하는 바 습분제거기의 배치를 이에 맞춰 진행하였다. 그림 1은 본 연구에서 활용한 두 가지 종류의 습분제거기의 형상을 나타낸다. 그림 1 (a)는 일반적으로 널리 사용되는 채널 경사면 형태의 습분제거기를 의미하고 Model A로 명명하였다. 그림 1 (b)는 본 연구에서 개선한 채널 경사면 형태의 습분제거기를 의미하고 Model B로 명명하였다. Model A와 같이 기존 형상에서는 채널 경사면을 유동 방향에 수직으로 배열하였고, 이에 따라 습분제거기 표면에 흡착된 액적의 배수가 어려운 구조를 나타낸다. 이에 따라 습분제거기 표면에 수막이 생성되기 쉬워 비교적 낮은 속도에서도 액적의 재비산이 발생하였다. 본 연구에서는 기존 형태에서 배수가 원활하게 이뤄지지 못하는 단점을 개선하고자, 채널 경사면이 지면에 대해 30°의 각도를 이루도록 설계하였고 이에 따른 성능 변화를 관찰하였다.

2. 실험방법

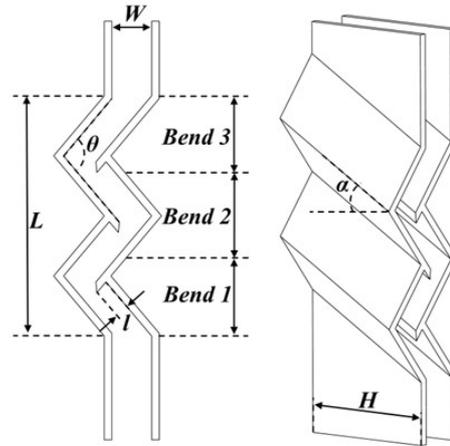


Figure 2 Geometric parameters of the mist eliminator.

그림 2는 본 연구에서 활용한 습분제거기의 형상 변수를 나타낸다. 기존 채널 경사면 형태의 습분제거기와 본 연구의 개선된 채널 경사면 형태의 습분제거기는 동일한 단면을 나타낸다. 단면은 일반적으로 널리 사용되는 습분제거기의 형상을 참고하였으며 plate와 plate 사이의 간격을 의미하는 W는 20 mm, 습분제거기 절곡 구간의 길이 L은 110 mm로 설정하였다. 습분제거기 유로의 각도 θ 는 100°, hooked vane은 plate 끝단에 위치하는 갈고리 모양의 베인이며, hooked vane의 길이 l은 5 mm로 설계하였다. 이때 습분제거기의 높이 H는 80 mm로 설정하였으며 습분제거기 절곡이 수평면 이루는 각도 α 는 30°로 하였다. 이때 α 의 값이 0°인 경우는 Model A를 의미하며 α 값만이 Model A와 Model B의 차이점이다.

실험은 일반적인 채널 경사면 형태의 습분제거기인 Model A와 본 연구에서 제안하는 수평면에 30°의 각도를 나타내는 습분제거기인 Model B의 성능을 비교하는 방식으로 진행하였다. 습분제거기의 액적 제거 성능을 평가할 때 직경에 따른 포집 효율을 측정하는 방법을 사용하기도 하지만 액적의 크기가 수 mm까지 도달할 수 있다는 점, 습분제거기 내부에서 액적이 상호작용을 일으켜 합쳐지거나 나뉠 수 있다는 점, 습분제거기 표면에서

포집된 액적이 재비산을 일으킬 수 있다는 점 때문에 정확한 직경에 따른 포집효율의 측정이 고체 입자에 비해 매우 까다롭다. 이러한 특성 덕분에 습분제거기의 성능을 평가할 때 액적 대신 일정한 형태를 유지할 수 있는 고체 입자를 활용하거나, 투입한 액적의 질량과 포집된 액적의 질량을 비교하는 방식을 사용하기도 한다(El-Dessouky et al, 1999; Atia and Lee, 2003). 본 연구에서도 각 모델의 습분제거기 성능을 비교할 때 위와 같은 이유로 투입된 액적의 질량과 포집된 액적의 질량을 비교하는 방식으로 전체 포집효율을 구하도록 하였으며 사용한 공식은 아래와 같다.

$$\eta = \frac{M_{trap}}{M_{in}} \times 100(\%) \quad (1)$$

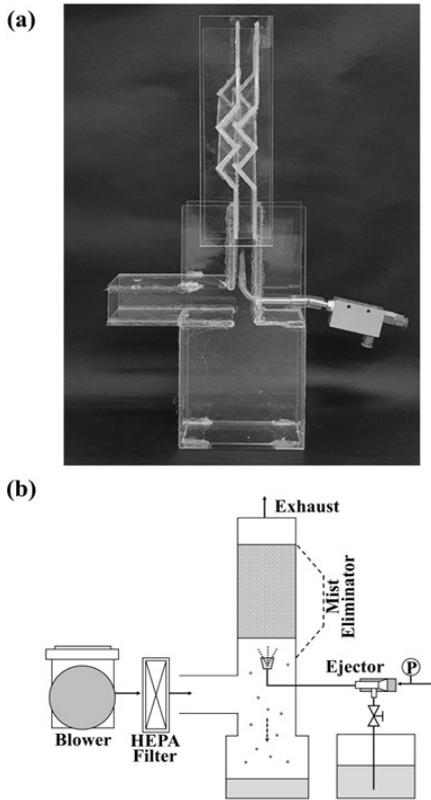


Figure 3 Experimental setup of the mist eliminator
(a) Photo (b) Schematic diagram.

여기서 M_{in} 과 M_{trap} 은 각각 습분제거기로 투입한 물의 질량과 습분제거기에서 포집된 물의 질량을 의미한다.

그림 3은 실험 장치의 사진과 schematic diagram을 나타낸다. 화력발전소에서 사용하는 탈황설비를 모사하기 위해 그림 3과 같이 수직한 형태로 습분제거기를 설치하였다. 실험에 필요한 공기는 블로워를 통해 공급하였으며 HEPA 필터를 거치도록 하여 습분제거기에 유입되기 전 외부 입자를 제거하였다. 블로워팬은 속도 조절기를 통해 토출되는 유량을 조절할 수 있었으며 습분제거기의 상단에서 측정된 유속 값을 기준으로 2~8 m/s 사이에서 조절하였다. 액적은 직접 제작한 이젝터를 통해 분사하였으며 이젝터에는 압축공기와 물을 공급하였다. 압축공기는 5000 Pa의 압력조건을 나타내었고

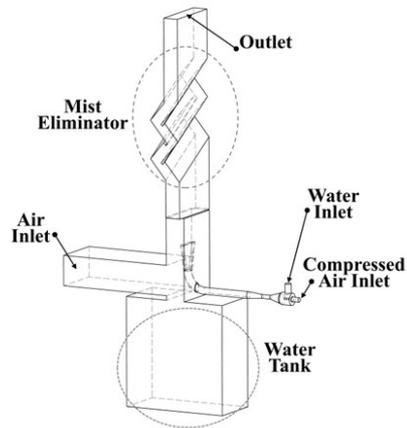


Figure 4 Schematic diagram of computational fluid dynamics domain.

물탱크로 연결된 관에는 needle valve를 설치하여 밸브의 개폐 정도를 조절함으로써 투입되는 물의 양을 조절할 수 있었다. 투입된 물의 양은 0.2~0.8 L/min 사이에서 조절하였으며 실험 시작 전 눈금 표시가 되어있는 물통을 활용해 토출량을 확인하는 과정을 거쳤다. 액적은 이젝터에서 분사된 후 관 끝단의 형상을 직사각형으로 하여 액적이 습분제거기 단면에 고르게 유입될 수 있도록 하였다. 이와 같은 방식으로 투입된 액적은 습분제거기

를 통과하지 못하고 상당 부분이 아래로 떨어져 결과적으로 습분제거기 하부에 위치한 통에 포집되었다. 실험 후에는 저울을 이용하여 포집된 물의 질량과 투입한 물의 질량을 비교하는 방식으로 전체 포집효율을 산출하였다. 실험은 투입된 물의 양과 공기 유속을 기준으로 총 9가지 경우에 대해 진행하였으며 각 경우에 대해서 3분씩 총 3번 반복한 결과를 토대로 효율을 산출하였다.

3. 수치해석 방법

기존 습분제거기의 형상인 Model A와 개선된 습분제거기의 형상인 Model B의 내부 유동분포, 절단직경, 압력강하 등을 모사하기 위해 수치해석을 진행하였다. 실제 습식 탈황설비에 사용되는 습분제거기는 수십 개 이상의 채널을 나타내지만 본 연구에서는 하나의 채널만을 선택하여 해석을 진행하였으며 각 채널은 벽을 통해 분리되어 있으므로 하나의 채널만으로도 충분히 대표성을 나타낼 수 있다. 기존 연구에서는 주로 2차원 유동을 가정하여 해석을 진행하였으나, 본 연구에서는 습분제거기의 절곡이 지면과 이루는 각도가 존재하므로 Model A와 Model B 모두에 대해 3차원 해석을 진행하였다. 해석에는 상용 프로그램인 ANSYS FLUENT Release 16.1을 사용하였으며 습분제거기 해석에 적합한 것으로 알려진 standard k-ε 모델을 활용하여 유동해석을 진행하였다(Galletti et al, 2008; Gharib and Moraveji, 2012; James et al, 2005; Zhao et al, 2007).

습분제거기의 유동해석 및 입자거동해석에 사용된 지배방정식은 식 (1)-(5)에 설명되어 있다.

- 질량 보존 방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

- 운동량 보존 방정식:

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) \quad (2)$$

- 난류 운동에너지 k에 대한 운송 방정식:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = \Delta \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + (-\rho \epsilon - Y_M) \quad (3)$$

- 난류 소산율 ε에 대한 운송 방정식:

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

- DPM 입자의 운동 방정식:

$$\frac{d(m_p \vec{v}_p)}{dt} = \vec{F}_{drag} + \vec{F}_{pressure} + \vec{F}_{virtual\ mass} + \vec{F}_{gravitation} + \vec{F}_{other} \quad (5)$$

여기서, \vec{F}_{others} 는 rotational force, thermophoretic force, Brownian force, Saffman's lift force, virtual mass force 등이다.

해석에 사용된 형상은 그림 4와 같다. 공기가 유입되는 air inlet과 compressed air inlet에는 velocity inlet 조건을 주었고 compressed air inlet에는 5000 Pa의 압력 조건을 추가로 설정하였다. 물이 유입되는 water inlet에도 velocity inlet 조건을 주었으며 유입되는 유체의 종류만을 변경하였다. Outlet에는 pressure outlet 조건을 주어 공기와 물 모두 빠져나갈 수 있도록 하였고 모든 벽면에 대해서는 no-slip 조건을 적용하였다. 해석은 정상상태 해석과 비정상상태 해석으로 나눠 진행하였다. 정상상태 해석은 습분제거기의 압력강하, 유속 분포, 그리고 Discrete Phase Model (DPM)을 활용한 절단직경 측정 목적으로 진행하였으며 이젝터를 배제하고 공기만을 해석하였다. 비정상상태 해석은 이젝터를 모사하여 액적을 분사, 하부 water tank에 고인 물의 양을 측정하여 액적 제거 성능을 평가하였다. 해석의 격자 의존성 검사는 습분제거기 부분에 대해 100만 개, 200만 개, 400만 개 수준의 격자로 진행하였다. 해석 결과 압력강하와 최대 유속 측면에서 각 격자 수준에 대해 유의 차를 나타내지 않아 해석 시간적으로 가장 효율적인 100만 개 수준의 격자를 사용하였다. 이때 Y^+ 값은 standard k-ε 모델에서 일반적으로 권장되는 30으로 설정하였고 이에 따라 벽면 근처에서의 격자 간격을 1 mm 이

하로 하였다. 정상상태 해석에서는 유동해석 후 DPM을 활용해 입자 해석을 진행하였으며 구형의 1000 kg/m^3 의 밀도를 나타내는 비반응성 입자를 가정하였다. 입자 해석에 있어서는 중력, Stokes 항력, 그리고 브라운 운동이 고려되었고 습분제거기 단면에 대해 고르게 유입되도록 하였다. 이때 입자는 모든 벽면에 부딪힐 경우 계산을 종료하고 trap 되는 것으로 가정하였으며 투입한 입자의 개수와 포집된 입자의 개수를 비교하는 방식으로 유속에 따른 절단직경을 산출할 수 있었다. 비정상상태 해석에서는 다상 유체 해석을 진행하였으며 Eulerian multi-phase model를 활용하였다. Time step size는 0.01초로 하였으며 투입한 물의 부피와 하부 water tank에 고인 물의 부피를 비교하는 방식으로 성능을 비교하였다.

4. 실험 및 수치해석 결과

일반적인 형태의 습분제거기를 의미하는 Model A와 배수 성능에 중점을 두어 개선을 진행한 Model B의 성능을 비교하였다. 그림 5에는 습분제거기 Model A와 Model B의 유속조건이 4 m/s 일 경우의 중심부 단면에서의 속도 분포를 비교한 결과이다. Model A와 Model B의 단면이 완전히 동일함에 따라 내부 유속 또한 거의 동일한 것으로 나타났다. 두 모델의 단면 속도 분포에서 공통적으로 hooked vane을 전후해 유속이 크게 변화함을 알 수 있다. Hooked vane의 역할로 인해 습분제거기 내부의 유동을 맞은편 벽면으로 가속하게 되고 이에 따라 유동 내에 포함되어있는 액적을 벽면으로 강하게 유도할 수 있게 된다. 따라서 hooked vane은 유동의 이동방향에 급격한 변화를 줌으로써 액적의 관성 효과를 높여 제거하는 원리로 습분제거기 내에서 액적이 포집되는 주요 부위인 동시에 포집된 액적으로 인해 수막이 두텁게 형성되어 재비산이 일어나기 쉬운 조건이 형성되는 곳이다.

단면의 유속 분포가 유사한 만큼 습분제거기 내부에서의 압력강하 역시 Model A와 Model B가 유사하게 나타났다. 그림 6은 Model A와 Model B가 그림 5의 유속을 조건일 때 습분제거기 내부에서 나타내는 정압 분포이다. 그림 5에서 hooked vane

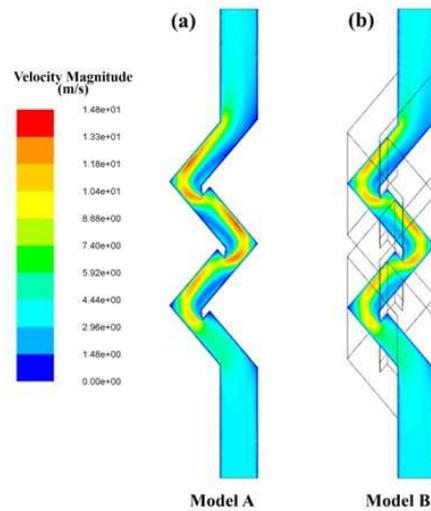


Figure 5 Velocity magnitude contour of the mist eliminators.

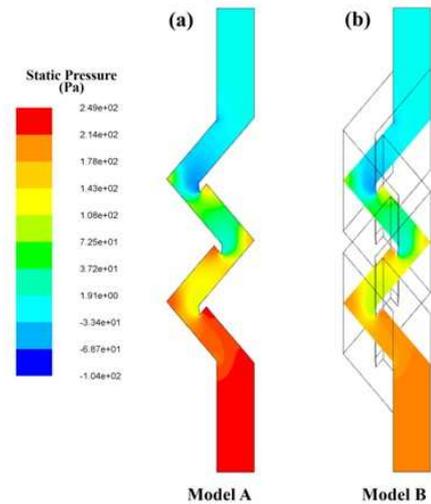


Figure 6 Static pressure contour of the mist eliminators.

을 전후해 유속이 크게 변화한 만큼 습분제거기 내부의 정압 또한 hooked vane을 통과한 후 크게 낮아지는 경향성을 나타내었고 Model A와 Model B의 경향성이 일치하였다. 그림 7에는 공기 유속에 따른 습분제거기 전후의 압력강하에 대한 실험 값과 시뮬레이션 값을 비교하였다. 압력은 실험과 시뮬레이션에서 모두 습분제거기의 절곡이 위치한 구간 사이에서 측정하였다. 앞선 결과와 같이

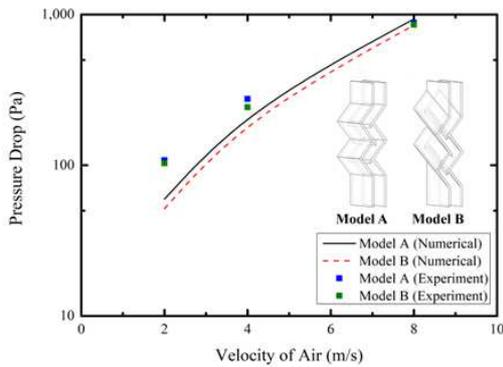


Figure 7 Pressure drop across the mist eliminators according to air velocity.

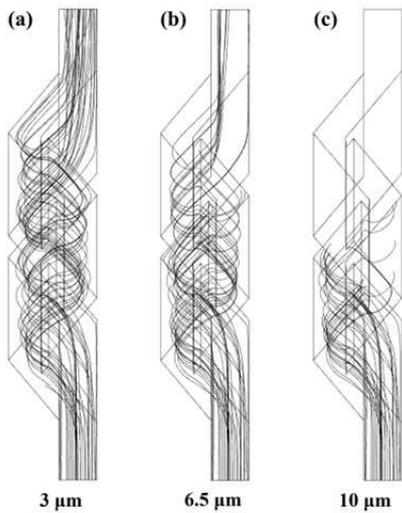


Figure 8 Particle trajectory of the mist eliminator Model B.

Model A와 Model B가 동일한 단면을 공유하는 만큼 압력강하에 있어 두 모델 사이에 두드러지는 차이가 발생하지 않았다. 실험적으로 내부 유속이 2 m/s인 조건에서 Model A는 108 Pa, Model B는 103 Pa를 나타내었고, 4 m/s인 조건에서 Model A는 276 Pa, Model B는 243 Pa를 그리고 8 m/s인 조건에서 Model A는 882 Pa, Model B는 855 Pa를 나타냈다. 수치해석적으로 예측된 압력강하 또한 실험과 거의 동일한 결과를 나타내었으며 유속이 낮을 때 보다 높을 때 유사한 결과를 나타내었다.

표 1은 정상상태 수치해석의 DPM을 통해 얻어진 Model A와 Model B의 유속에 따른 절단직경을

나타낸다. 절단직경은 습분제거기의 단면에서 400~500개의 입자를 분사하여 입경별 포집효율을 산출하는 방식으로 측정하였다. 2 m/s 조건에서는 Model A와 Model B의 절단직경이 각각 9.4 μm,

Table 1 Numerically attained cut-off diameter of the mist eliminators.

	Cut-off Diameter (μm)		
	2 m/s	4 m/s	8 m/s
Model A	9.4	6.4	4.1
Model B	9.6	6.5	4.2

9.6 μm로 나타났고, 4 m/s 조건에서는 Model A와 Model B의 절단직경이 각각 6.4 μm, 6.5 μm로, 8 m/s 조건에서는 Model A와 Model B의 절단직경이 각각 4.1 μm, 4.2 μm로 나타나 거의 동일한 성능을 보였다. 정상상태 수치해석에서는 습분제거기 내부에서 일어나는 재비산을 고려하지 않았으며 이에 따라 유속이 증가할수록 절단직경이 감소하는 경향성을 나타내었다. 입경에 따른 포집효율의 경향성은 그림 8을 통해서 확인할 수 있으며 그림 8은 습분제거기 Model B에서의 4 m/s 공기 유속 조건일 때의 직경에 따른 입자 궤적을 나타낸다. 그림 8b는 4 m/s 조건에서의 절단직경인 6.5 μm를 나타내었고 그림 8a와 8c는 각각 3 μm와 10 μm 입자를 나타내어 절단직경보다 매우 작은 경우와 큰 경우를 의미한다. 그림 8a와 같이 절단직경보다 매우 작은 입자들은 습분제거기 내부 유선을 벗어나지 않고 따라가다 대부분 상부로 빠져나가 포집 효율이 높지 않다. 하지만 그림 8b, c와 같이 입자의 직경이 커 질수록 관성에 의한 영향이 증가하여 유선을 따라가지 못하는 경향성이 증가하고, 이에 따라 유선이 급격하게 변하는 hooked vane 근처에서 대부분의 입자가 포집되었다. Model A와 Model B에 대해 4 m/s 유속 조건에서 입경별로 입자가 포집되는 위치를 정리하면 그림 9와 같다. 그림 9의 Bend 1, 2, 3은 그림 2에 나타난 습분제거기의 절곡을 의미한다. Bend 1, 2, 3은 각각 35 mm, 40 mm, 35 mm의 길이를 갖으며 해석 시 각기 다른 벽면으로 지정하여 포집된 위치를 알 수 있도록 하였다. 절단직경보다 충분히 작은 3 μm 조

건에서는 Bend 1에서 Bend 3으로 갈수록 입자 포집량이 증가하는 경향성을 나타내었으며 Model A와 Model B에 대해 Bend 3에서 각각 43.6%, 36.1%의 포집량을 나타내었다. 절단직경과 동일한 6.5 μm 입경 조건에서는 중간 지점인 Bend 2에서 가장 높은 포집량을 나타내었고 Model A와 Model B에 대해 각각 50.8%, 40.4%의 포집량을 보였다. 마지막으로 절단직경보다 매우 큰 10 μm 조건에서는 높은 관성으로 인해 습분제거기에 유입되자마자 대부분의 입자가 포집되었고 이에 따라 Bend 1에서 가장 높은 포집량을 나타내었다. 10 μm 입자에 대해 Bend 1에서 Model A와 Model B의 포집량은 각각 85.0%, 72.9%로 나타났고 이러한 결과를 통해 입자의 직경이 매우 클 경우 전면에 위치하는 절곡에 포집되지만 입경이 작아질수록 후미에 위치하는 절곡에 포집됨을 알 수 있었다. 이때 모든 입경에 대해 Model A에 비해 Model B의 각 절곡에서의 포집량 편중이 적었으며 Bend 1, 2, 3에 걸쳐 비교적 고르게 포집됨을 알 수 있었다. 재비산은 습분제거기 표면에 형성되는 수막의 두께가 두꺼울수록 일어나기 쉽다. 이에 따라 포집이 비교적 고르게 나타난 Model B가 재비산을 억제하는데 유리할 것으로 판단되었다.

그림 10에는 실험을 통해 산출한 전체 포집 효율 결과를 나타내었으며 습분제거기 내부 공기의 유속에 따라, 물의 투입 양에 따라 결과를 구분하였다. 우선 그림 10a에는 습분제거기 내부 공기의 유속이 2 m/s일 때 물의 투입 양에 따른 전체 포

Table 2 Overall collection efficiency of the mist eliminations.

Water Flow Rate (L/min)	Air Velocity (m/s)	Model A Collection Efficiency (%)	Model B Collection Efficiency (%)
0.2	2	84.8	84.3
	4	92.1	94.6
	8	97.5	98.0
0.4	2	80.2	82.3
	4	82.6	93.2
	8	81.8	89.2
0.8	2	78.8	81.2
	4	78.5	90.4
	8	75.6	85.3

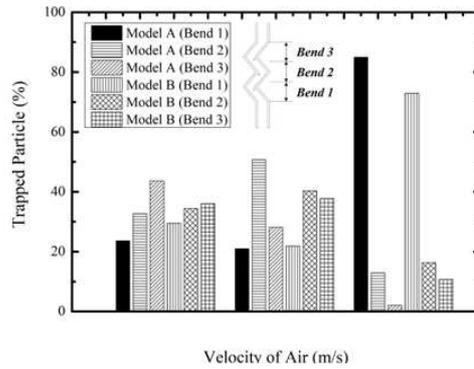


Figure 9 Percentage of trapped particles at each bend of mist eliminators.

집 효율 결과를 나타내었으며 Model A와 Model B가 2.3% 이내의 포집 효율 차이로 거의 동일한 성능을 보였다. 이때 물의 투입량이 증가할수록 포집 효율 결과가 다소 감소하는 경향성을 나타내었는데 이는 물의 투입량이 증가함에 따라 습분제거기 표면에 액적의 흡착으로 생성되는 수막의 두께가 크게 증가하고 수막의 두께가 증가할수록 낮은 공기 속도 조건에서도 재비산이 일어나기 쉬워지기 때문이다. 그림 10b에는 습분제거기 내부 공기의 유속이 4 m/s일 때의 조건을 나타내었으며 그림 10a의 결과와는 달리 Model A와 Model B의 차이가 확연하게 나타났다. 물의 투입 양이 0.2 L/min에서 0.8 L/min으로 증가할 때 개선된 형상인 Model B는 약 4.2%, 기존 형상인 Model A는 13.6% 전체 포집효율이 감소하였고 유의미한 성능 차이를 나타내었다. 그림 10c에는 습분제거기 내부 공기의 유속이 8 m/s 조건일 때의 결과를 나타내었으며 전체적으로 그림 10b와 유사한 경향성을 나타내었다. 물의 투입 양이 0.2 L/min에서 0.8 L/min으로 증가할 때 개선된 형상인 Model B는 약 12.7% 전체 포집효율이 감소할 때 기존 형상인 Model A는 21.9% 감소하였고, 이에 따라 재비산이 일어나기 쉬운 조건을 적용할수록 Model B가 우수한 전체 포집효율을 나타냄을 알 수 있었다. 그림 10의 물 투입량에 대한 결과를 습분제거기 내부 공기 유속에 따라 표 2와 같이 정리할 수 있다. 물의 투입량이 0.2 L/min일 때는 습분제거기 내부 유속이 2~8 m/s로 변화함에 따라 이에 비례하여 Model A와 Model B 모두 전체 포집효율이 상승하

였으며 유속과 포집효율이 비례하는 관성집진기에서 일반적으로 나타나는 경향성을 보였다. 물의 투입량이 0.4 L/min일 때는 0.2 L/min과 다른 경향성을 나타내었다. Model A와 Model B 모두 유속이 2~4 m/s로 변할 때는 전체 포집효율과 공기 유속이 비례하였지만 공기 유속이 8 m/s일 때는 오히려 4 m/s일 때보다 약간 낮은 전체 포집효율을 나타내었다. 물의 투입량이 0.8 L/min일 때 Model

B는 유사한 경향성을 나타내어 내부 유속이 4 m/s일 때 가장 높은 전체 포집효율을 나타내었으나, Model A는 내부 유속이 2~4 m/s로 변할 때 거의 동일한 전체 포집효율을 나타내었고 8 m/s 조건에서는 오히려 감소한 전체 포집효율을 나타내었다.

앞선 정상상태 해석에서 DPM을 통한 결과로는 Model A와 Model B가 거의 동일한 성능을 나타낼 것으로 예측되었지만 위와 같이 실제 액적을 활용한 실험에서는 물의 투입량과 유속에 따라 전체 포집효율의 차이가 발생하였다. 이러한 차이가 나타날 수 있었던 원인은 재비산에 있으며 정상상태 해석의 DPM에서는 이를 구현할 수 없다. 이에 따라 비정상상태 해석을 추가로 실시하였다. 비정상상태 해석은 공기만을 활용하였던 정상상태 해석과는 달리 이젝터를 포함하여 공기와 물을 동시에 활용했다. 해석 조건은 실험을 통해 Model A와 Model B의 차이가 크게 나타날 것으로 예측되었던 유속 8 m/s, 물의 투입량이 0.8 L/min로 설정하였다. 비정상상태 해석의 time step size가 0.01초이고, 각 time step당 20번 해석을 진행하여 실험과 동일한 180초 조건을 충족하기 위해서는 각 케이스당 360,000번의 iteration이 요구되었다. 해석 완료시의 Model A와 Model B의 water volume fraction contour는 그림 11과 같다. 부피 측정 결과 물 투입량 0.8 L/min, 유속이 8 m/s인 조건에 대해 Model A에서는 총 2.4 L의 물 중 1.21 L가, Model B에서는 1.46 L가 하부 water tank에 모였다. 이에 따라 Model A는 50.4%의 전체 포집효율을, Model B는 60.8%의 전체 포집효율을 나타내었다. 그림 11을 통해 습분제거기의 결국 하부에서 Model A에 비해 Model B의 water volume fraction이 높음을 확인할 수 있었으며 특히 Model B의 30°의 사면 하부에서 배수가 집중적으로 일어남을 알 수 있었다. 동일한 조건에서 행해진 실험 결과의 경우 Model A는 75.6%의 전체 포집효율을, Model B는 85.3%의 전체 포집효율을 나타내어 정상상태 해석의 DPM을 통해 산출한 효율보다 비정상상태 다상유체 해석을 통해 산출한 효율이 실험과 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

재비산은 습분제거기 표면에 형성된 수막이 두꺼울수록, 내부 공기 유속이 빠를수록 일어나기 쉽다. 이에 따라 내부 공기 유속이 동일한 조건에서 재

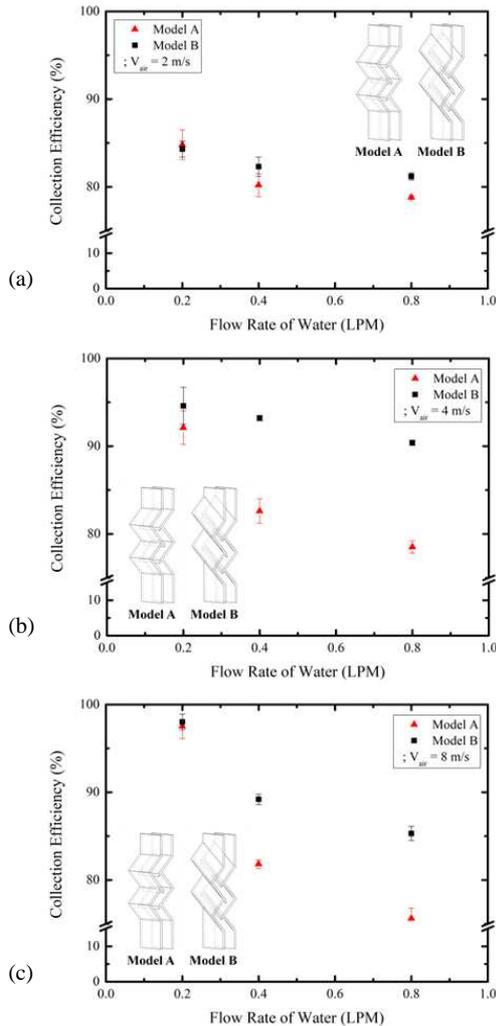


Figure 10 Overall water collection efficiency according to water flowrate with (a) 2 m/s air velocity condition (b) 4 m/s air velocity condition (c) 8 m/s air velocity condition.

비산을 억제하기 위해서는 수막의 두께를 줄일 수 있어야 한다. 개선된 형상인 Model B에서는 Model A에 비해 각 절곡에서의 포집량 편중이 작은 것으

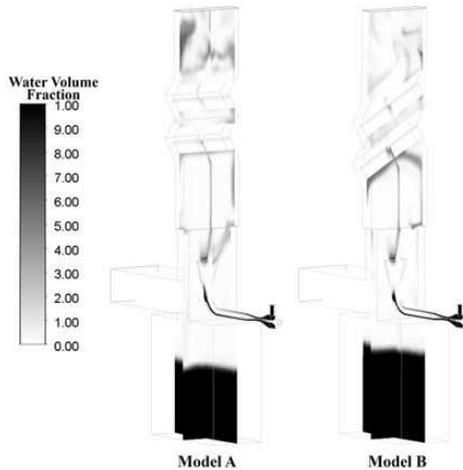


Figure 11 Water volume fraction contour of the mist eliminators.

로 나타났다. 이로 인해 각 절곡마다 액적의 포집량이 비교적 균등하게 분배될 수 있었고 수막의 두께를 Model A에 비해 얇게 유지할 수 있었다. 이에 더해 바닥면에 대해 30°의 기울기를 나타내는 형상적인 차이로 인해 Model B의 배수능력이 Model A보다 높게 나타났고 이에 따라 효과적으로 습분제거기 표면에 형성되는 수막의 성장을 억제할 수 있었다. Model A와 같은 경우는 일반적인 습분제거기와 같이 수평한 형태를 나타내어 하부에서 상승하는 기류에 수직한 방향으로 습분제거기의 굴곡이 형성되어 있다. 이에 따라 표면에 흡착된 액적의 원활한 배출이 어렵게 되고 결과적으로 일정수준 이상의 흡착량을 나타낼 경우 매우 큰 액적 형태로 공기 중에서 낙하하거나 내부 기류에 의해 다시 습분제거기 상부로 올라가는 재비산이 일어날 수 있다. 이러한 과정에서 액적들은 서로 상호작용을 일으켜 더 작은 물방울로 나뉘질 수 있으며 이는 기존 습분제거기에서 포집효율을 악화시키는 주된 원인으로 작용한다. Model B의 경우 Model A와 달리 습분제거기 표면에 흡착된 액적이 누적되어 수막이 성장하기 전에 30°의 사

면을 통해 습분제거기 양쪽 벽면으로 물을 유도할 수 있고 이에 따라 더 높은 물 투입량에서도 수막의 두께를 임계점 이하로 유지할 수 있었다. 또한 포집된 액적을 Model A와 같이 공기 중에서 낙하시켜 새롭게 올라오는 액적과 충돌하게 하는 구조가 아니라 사면을 통해 양쪽 벽면으로 유도하는 구조를 나타냄으로써 배출되는 액적에 의한 재비산을 효과적으로 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 특성으로 인해 Model B는 Model A에 비해 재비산이 활발하게 일어나는 조건에서 높은 전체 포집효율을 나타낼 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 일반적인 습분제거기의 형상을 나타내는 Model A와 동일한 단면 구조를 공유하면서 지면에 대해 30°의 각도를 나타내는 Model B의 포집효율을 평가하였다. 습분제거기 내부의 압력강하와 정상상태 해석으로 예측된 절단직경은 두 모델에서 거의 동일한 수준으로 나타났다. 하지만 실험결과에서는 물 투입량과 공기 유속에 따라 동일한 조건에서 Model B가 Model A에 비해 11.9%까지 높은 성능을 나타내었다. 이와 같이 실험에서 전체 포집효율의 차이가 생긴 원인은 실험적으로는 재비산이 고려되었고 Model B가 형상적인 차이로 인해 Model A보다 재비산이 적게 일어났기 때문이다. 이에 따라 재비산이 활발하게 일어날 수 있는 조건에서 비정상상태 시뮬레이션을 진행하였다. 해석 결과 Model A와 Model B의 전체 포집효율이 각각 50.4%, 60.8%로 나타났다. 동일한 내부유속 조건에서 재비산이 적게 일어나기 위해서는 습분제거기 표면에 형성된 수막이 얇을수록 유리하고 Model B는 이러한 점에서 강점을 나타내었다. 정상상태 시뮬레이션을 통해 Model B는 Model A에 비해 각 절곡에서 균일한 포집량을 나타냄과 동시에 수막이 비교적 고르게 형성됨을 예측할 수 있었다. 또한 실험과 비정상상태 해석을 통해 Model B는 Model A에 비해 습분제거기 표면에 포집되는 액적을 비교적 수월하게 배출할 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 연구결과를 실제 습식 배연탈황설비용 습분제거기에 적용할 경우

개선된 액적 배출 구조로 인해 더 높은 내부 유속과 물 투입량을 적용할 수 있을 것이고 이에 따라 처리량과 전체 포집효율을 동시에 높일 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20181110200170)

References

- Al-Dughaiter, A. S., Ibrahim, A. A., and Al-Masry, W. A. (2010). Investigating droplet separation efficiency in wire-mesh mist eliminators in bubble column, *Journal of Saudi Chemical Society*, 14(4), 331-339.
- Atia, S., and Lee, C. I. (2003). Optimization of the Length of the Mist-eliminator Blades for Small Size Water Powered Scrubber, *Geosystem Engineering*, 6(2), 27-32.
- Azzopardi, B. J., and Sanaullah, K. S. (2002). Re-entrainment in wave-plate mist eliminators, *Chemical engineering science*, 57(17), 3557-3563.
- Brunazzi, E., and Paglianti, A. (1998). Design of wire mesh mist eliminators, *AIChE journal*, 44(3), 505-512.
- Burkholz, A. (1989). *Droplet separation*. VCH Publishers.
- El-Dessouky, H. T., Alatiqi, I. M., Ettouney, H. M., and Al-Deffeeri, N. S. (1999). Performance of wire mesh mist eliminator, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 39(2), 129-139.
- Kim, M. W., Noh, S. Y., Zahir, M. Z., and Yook, S. J. (2021). Performance improvement of a horizontal zigzag type mist eliminator using slit plates. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(5), 2229-2236.
- Fabian, P., Cusack, R., Hennessey, P., and Neuman, M. (1993). Demystifying the selection of mist eliminators, *Chemical engineering*, 100(11), 148.
- Galletti, C., Brunazzi, E., and Tognotti, L. (2008). A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels, *Chemical engineering science*, 63(23), 5639-5652.
- Gharib, J., and Moraveji, M. K. (2012). Determination the factors affecting the vane-plate demisters efficiency using CFD modeling, *J. Chem. Eng. Process. Technol. S*, 1, 1-5.
- James, P. W., Wang, Y., Azzopardi, B. J., and Hughes, J. P. (2003). The role of drainage channels in the performance of wave-plate mist eliminators, *Chemical Engineering Research and Design*, 81(6), 639-648.
- James, P. W., Azzopardi, B. J., Wang, Y., and Hughes, J. P. (2005). A model for liquid film flow and separation in a wave-plate mist eliminator, *Chemical Engineering Research and Design*, 83(5), 469-477.
- Kouhikamali, R., Abadi, S. N. R., and Hassani, M. (2014). Numerical study of performance of wire mesh mist eliminator, *Applied Thermal Engineering*, 67(1-2), 214-222.
- Mao, F., Tian, R., Chen, Y., Chen, B., Wang, B., and Sun, L. (2018). Re-entrainment in and optimization of a vane mist eliminator, *Annals of Nuclear Energy*, 120, 656-665.
- Narimani, E., and Shahhoseini, S. (2011). Optimization of vane mist eliminators, *Applied Thermal Engineering*, 31(2-3), 188-193.
- Zhao, J., Jin, B., and Zhong, Z. (2007). Study of the separation efficiency of a demister vane with response surface methodology, *Journal of Hazardous Materials*, 147(1-2), 363-369.