

액적 표면에서 증발 및 응축을 고려한 곡면 형상 액적 제거장치의 제거 효율에 대한 수치 해석

송 동 근*

한국기계연구원 환경에너지기계연구본부 환경시스템연구실
(2016년 11월 11일 투고, 2016년 12월 21일 수정, 2016년 12월 25일 게재확정)

Numerical Analysis on Removal Efficiency of Water Droplets in a Curved Vane Mist Eliminator with Consideration of Evaporation and Condensation at Surface of Droplets

Dong Keun Song*

*Department of Eco-Machinery Systems, Environmental and Energy Systems Research Division,
Korea Institute of Machinery & Materials*

Abstract

Removal of water contents in a gas is needed in industrial field of gas processing related on energy production/conversion, and environmental treatment. Inertial separators are economic devices for separating droplets from the gas stream. For accurate understanding of removal process in a curved vane mist eliminator, a numerical model including turbulent dispersion, evaporation and condensation of water vapor at surface of droplets is required. A two-stage curved vane mist eliminator has been modeled, and fluid flow of mixture of air and water vapor and droplet trajectories were solved simultaneously with taking into account two-way coupling. Removal efficiency of droplets with various inlet condition of relative humidities (RH, 40%, 90%, and 100%) were compared. As RH increased, the effect of evaporation decreased and inertial separation efficiencies of droplets obtained increased especially for droplets of diameter below 10 micrometers.

Keywords : Curved vane mist eliminator, Removal efficiency, Water droplet, Evaporation, Condensation, CFD

* Corresponding author.
Tel : +82-42-868-7271
E-mail : dksong@kimm.re.kr

1. 서 론

화학 공정의 흡수탑, 충전탑, 분무탑 등의 기액 접촉 조작, 보일러 등에서의 액체 비등 조작, 또는 스크러버 등의 세정 집진 조작에서 자주 발생하는 액적을 기체 또는 증기 흐름으로부터 분리하기 위하여 액적 제거장치(mist eliminator)가 사용된다. 액적 분리를 위해서 관성력, 정전기력 등 다양한 원리를 적용한 분리장치의 적용이 가능하지만, 설치 및 유지비용을 고려하여 관성력을 이용한 액적 분리장치가 산업 현장에서 널리 이용되고 있다(Song et al., 2013). 액적 제거장치는 오염물질 배출 저감, 후류 장비의 손상 방지, 유용 생산물의 회수, 부식 또는 침적을 유발하는 유해한 액체 미스트 제거, 기체 또는 증기의 온도 향상, 설비 전체의 운전비용 절감 등을 위해 필요하며, Zig-zag 형상의 파도 형상(wave-plate, vane 또는 blade type) 액적 제거장치와 곡면 형상(curved vane) 액적 제거장치가 주로 이용된다(Galletti et al., 2008; Zamora et al., 2011). 이러한 액적 제거장치는 고점성 유체의 액적 분리에 적용하는 경우에도 분리장치 표면에서 응축에 의한 막힘이 덜하여 반영구적으로 사용이 가능하고, 유동 저항이 적어 비교적 빠른 유속에 적용 가능하다. 상대적으로 낮은 유속 조건에서는 작은 크기의 액적 및 입자 제거를 위해서 wire mesh 액적 제거장치가 이용된다. 또한 적용 대상 시스템의 조건에 따라 구조 변경이 용이한 장점으로 인하여 산업 분야에 널리 사용 되고 있다(Galletti et al., 2008; Rafee et al., 2010; Venkatesan et al., 2014).

파도 형상 액적 제거장치의 형상은 Fig. 1.과 같으며, 벽면 배출구가 없는 액적 제거장치의 제거 효율(η_0)은 다음 식과 같이 주어진다(Burkholz, 1981).

$$\eta_0 = 1 - (1 - \eta_B)^n, \quad \eta_B = \frac{\rho_d v d_p^2}{18 \mu S} \alpha \quad (1)$$

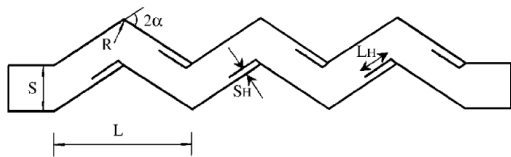


Fig. 1. Schematic diagram of the idealized wave-plate mist eliminator(James et al., 2003)

여기서, n은 액적 제거장치의 단(stage) 수이며, 하나의 꺾임 단(bend stage)의 효율(η_B)에 의해 결정되고, ρ_d 는 액적의 밀도, d_p 는 액적의 직경, v 는 채널을 통과하는 유동의 면속, μ 는 유동의 점도, S 는 채널의 너비, α 는 제거장치의 꺾임각이다.

액적 제거장치의 제거 효율을 높이기 위해, 채널 벽면에 액적이 충돌하여 형성된 수막의 배출을 위한 배출구(drainage channel)를 추가하여 이용하고 있다. 배출구는 벽면의 물을 배출하는 역할과 배출구 내부로 유입되는 액적의 제거 효율을 높이는 효과를 가져 온다. 배출구가 추가된 액적 제거장치의 제거 효율은 기존 제거효율 산출식과 차이를 보이며, 다양한 배출구 형상에 따른 액적 제거 효율을 예측하기 위해 다상유동에 대한 전산유체해석이 이용되고 있다.

2차원 zig-zag 형상의 액적 제거장치를 대상으로 STD(standard) k-ε 난류모델을 이용하여, 배출구 유/무에 따른 제거효율 변화를 수치해석을 통해 살펴 보았으며, 배출구 추가에 의해 액적 제거 효율이 크게 증가하는 결과를 도출하였다(James et al., 2003). 동일한 계산 영역을 대상으로 벽면에 형성되는 수막과 수막으로부터의 액적 재유입 가능성을 고려한 해석도 수행하였다(James et al., 2005).

액적 제거장치의 해석에 적합한 난류 모델 확인을 위해 총 4단의 2-D zig-zag channel을 대상으로, CFX solver의 STD k-ε 모델과 SST (Shear Stress Transport) 모델과 액적 확산 모델로 변화 EIM(Eddy Interaction Model)을 이용하여, 5~10 μm 이하의 액적 제거효율에서 SST 모델이 실험 결과와 더 유사한 결과를 보임을 확인하였다(Galletti et al., 2008). 또한 Fluent solver의 SST k-ω 모델과 증강 벽면 조건(Enhanced wall treatment)과 RSTM 모델을 적용하여 C_L (Life time of eddy)에 따라 실험 결과와 잘 일치하는 결과($C_L = 0.15$ for SST k-ω, $C_L = 0.2$ for RSTM)를 도출하였다(Estakharsar and Rafee, 2013). 곡면 형상 액적 제거 장치에 대한 droplet breakup 및 lift를 고려한 수치 해석과 실험 결과와의 비교를 통해, 실험 결과와 유사한 결과를 보이는 수치 모델에 대한 평가를 수행하였다(Venkatesan et al., 2014). 난류 모델로 SA(Spalart-Almaras)와 RSM(Reynolds Stress Model), RKE(Realizable k-ε) 모델을 이용하였으며,

RSM 난류 모델 외에 breakup 모델로 Wave 모델을 사용한 경우, lift와 stochastic collision 적용 여부와 관계없이 실험 결과와 일치하는 결과를 보였다.

최근에는 곡면 형상 액적 분리장치의 20 μm 이하 크기의 액적 제거 효율을 실험적으로 평가하였으며(Lee et al., 2013), 곡면 형상 액적 분리장치의 입구 습도 변화에 따른 액적 및 수증기 제거 효율에 대해 실험적 평가를 통해 입구 습도에 따라 액적 제거 효율이 달라짐을 보였다(Song et al., 2013). 하지만, 이송 기체의 습도에 의한 영향을 고려한 액적 제거장치의 제거 효율 변화에 대한 해석 결과는 보고되지 않았다.

본 연구에서는 세일가스 생산 공정과 같이 고압 조건에서 상압으로 배출되어 다량의 응축 액적을 함유한 연료가스의 액적 제거 현상을 파악하기 위해, 입구 습도에 따른 액적 크기 변화와 이에 의한 액적 제거 효율의 변화를 전산해석을 통해 살펴보고자 한다.

2. 수치해석 모델

2.1 계산 영역

곡면 형상의 판으로 구성된 액적 제거장치의 단일 채널의 2단 구성은 Fig. 2와 같다. 하나의 단은 총 10개의 채널로 이루어져 있으며, 단일 채널의 폭(S)은 20 mm, 길이(L)는 165 mm이다. 하나의 단에는 서로 크기가 다른 총 3개의 배출구가 벽면에 설치되어 있다.

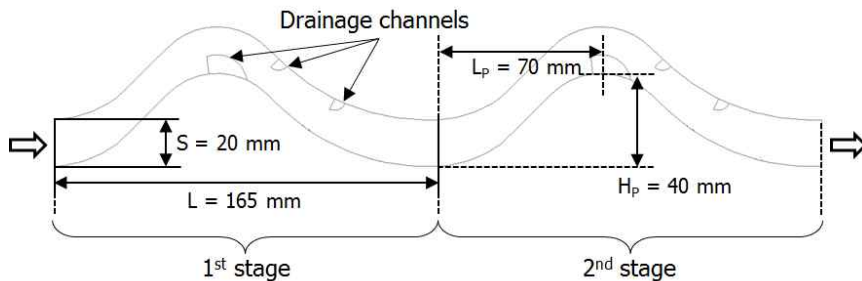


Fig. 2. Computational domain of a curved vane mist eliminator of two stages

2.2 지배방정식

액적을 포함한 수증기 유동의 해석을 위해 연속 유체 영역에서 연속방정식, 운동량 보존방정식과 수증기의 대류-확산 이송방정식의 해를 구하고, 액적의 거동과 액적 표면에서의 열 및 물질 전달을 고려하였다. 정상상태 유동에 대한 연속방정식과 운동량 보존 방정식, 수증기의 대류-확산 이송방정식은 다음과 같다.

연속방정식:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도이며, S_m 은 다상유동에서 액적의 증발에 의한 질량 생성항이다.

운동량 보존방정식:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

여기서 p 는 정압, $\rho \vec{g}$ 와 \vec{F} 는 각각 중력과 기타 체적력, $\vec{\tau}$ 는 스트레스 텐서로 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4)$$

수증기의 대류-확산 이송방정식:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (5)$$

여기서 Y_i 는 수증기의 질량분율(mass fraction)이며, R_i 는 화학반응에 의한 수증기의 생성율이고, S_i 는 액적으로부터 생성되는 수증기 생성율을 의미한다. 수증기 생성과 관련된 화학반응은 포함되지 않

아, R_i 는 고려하지 않았다. 난류 유동내의 질량 확산은 다음 식과 같다.

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (6)$$

여기서, Sc_i 는 난류 Schmidt 수(= $\mu_t/(\rho D_i)$)이며, μ_t 와 D_i 는 각각 난류 점도(turbulent viscosity)와 난류 확산계수(turbulent diffusivity), $D_{i,m}$ 는 분자 확산계수이다. 일반적으로 난류 Schmidt 수는 0.7을 사용하며, 난류 확산은 층류 확산에 비해 압도적으로 커서 별도로 층류 확산계수를 설정할 필요는 없다.

액적의 거동은 액적에 작용하는 힘의 균형에 의해 다음 식으로부터 구한다.

$$\frac{d\vec{u}_d}{dt} = \frac{\vec{v} - \vec{u}_d}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_d - \rho)}{\rho_d} + \vec{F} \quad (7)$$

여기서 \vec{F} 는 중력 이외의 액적에 작용하는 추가 가속항이며, \vec{u}_d 는 액적의 속도, $(\vec{v} - \vec{u}_d)/\tau_r$ 는 액적의 단위 질량당 작용하는 항력으로 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_r = \frac{\rho_d d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_D Re_d} \quad (8)$$

여기서 τ_r 는 액적의 완화시간(relaxation time)이며, C_D 는 항력 계수, Re_d 는 액적의 상대 Reynolds 수로 다음과 같이 정의된다.

$$Re_d \equiv \frac{\rho_d d_p |\vec{u}_p - \vec{v}|}{\mu} \quad (9)$$

항력계수(C_D)는 다음과 같은 식으로 표현되며, 항력계수의 Re_d 범위에 따른 모델 상수는 표 1에 나타내었다.

Table 1. Drag coefficient model constants for different Droplet's Reynolds numbers (Morsi and Alexander, 1972)

Re_d range	K_1	K_2	K_3
$Re_d < 0.1$	24.00	0.00	0.00
$0.1 < Re_d < 1$	22.73	0.0903	3.69
$1 < Re_d < 10$	29.1667	-3.8889	1.222
$10 < Re_d < 100$	46.50	-116.67	0.6167
$100 < Re_d < 1000$	98.33	-2778.0	0.3644
$1000 < Re_d < 5000$	148.62	-47,500.0	0.357
$5000 < Re_d < 10,000$	-490.546	578,700.0	0.46
$10,000 < Re_d < 50,000$	-1662.50	5,416,700.0	0.5191

$$C_D = \frac{K_1}{Re_d} + \frac{K_2}{Re_d^2} + K_3 \quad (10)$$

액적과 연속 유체와의 열 및 물질전달은 액적 온도 범위에 따라 달라진다. 액적의 온도가 증발 온도보다 낮은 조건에서는 액적과 유체 사이에 열전달만 발생하며, 다음 식과 같이 액적 표면에서의 대류 열전달로 표현할 수 있다.

$$m_d c_d \frac{dT_d}{dt} = h A_d (T_\infty - T_d) \quad (11)$$

여기서 m_d 는 액적의 질량(kg), c_d 는 액적의 열용량(heat capacity, J/kg-K), h 는 대류열전달 계수(W/m²-K), A_d 는 액적의 표면적(m²), T_d 는 액적의 온도(K), T_∞ 는 액적이 위치하는 지점의 유체 온도(K)이다.

액적의 온도가 증발온도보다 높고 끓는점보다 낮은 경우, 액적 표면에서 증발에 의한 물질 전달이 발생한다. 액적 주위의 대류 유동의 영향이 큰 경우, 다음과 같은 대류/확산 지배 모델을 사용할 수 있다.

$$\frac{dm_d}{dt} = k_c A_d \rho \ln(1 + B_m) \quad (12)$$

여기서 k_c 는 물질전달 계수이고, B_m 는 Spalding mass number로 다음과 같이 주어진다.

$$B_m = \frac{Y_{i,s} - Y_{i,\infty}}{1 - Y_{i,s}} \quad (13)$$

여기서 $Y_{i,s}$ 는 액적 표면에서의 증기 질량분율이고, $Y_{i,\infty}$ 는 유체 내의 증기 질량분율이다. 물질전달이 일어나는 경우, 액적과 유체와의 열전달에는 다

음과 같이 주어지는 잠열(h_{fg})에 의한 항이 추가로 적용된다.

$$m_d c_d \frac{dT_d}{dt} = h A_d (T_\infty - T_d) - \frac{dm_d}{dt} h_{fg} \quad (14)$$

3. 결과 및 고찰

액적을 포함한 유동 해석을 위해서 수증기를 포함한 유체 유동은 연속 유체로, 액적은 분산 유체로 가정하고 해석을 수행하였다. Fig. 2에 제시한 2단의 액적 제거장치의 단일 채널을 대상으로, 유체 유량 10 m³/min 조건에서 입구의 상대 습도가 각각 40%, 90%, 100%인 조건에 대해 해석을 수행하였다. 유체 유동은 비압축성 정상상태 유동으로 가정하였으며, 2차원 계산영역에서 증력에 의한 영향은 무시하였다. 해석 프로그램으로 FVM 기반의 Fluent(v13)를 사용하였으며, 난류 모델로는 증강 벽면 조건이 적용된 RKE 모델을 적용하였다.

3.1 격자 민감도

격자 크기에 따른 해석 결과의 차이를 알아보기 위해 격자 크기 및 벽면에서의 경계층 격자 크기 변화에 따른 액적 제거장치 1단 출구에서의 유속 분포를 비교하였다. 민감도 분석에 사용한 격자 정보는 표 2와 같으며, 각 격자를 이용한 출구에서의 유속 비교는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. Grid2에서 벽면 경계층의 크기를 줄인 Grid3와 큰 차이가 없어, 이후 해석은 Grid2를 이용하여 수행하였다.

3.2 경계 조건

유량 10 m³/min 기준으로 각 채널에 유입되는 유체 유동의 평균 속도는 약 3.15 m/s이며, 출구는 압력 출구 조건으로 정압을 0 Pa로 설정하였다. 벽면에서 유동의 미끄러짐이 없는 조건(no-slip)을 적용

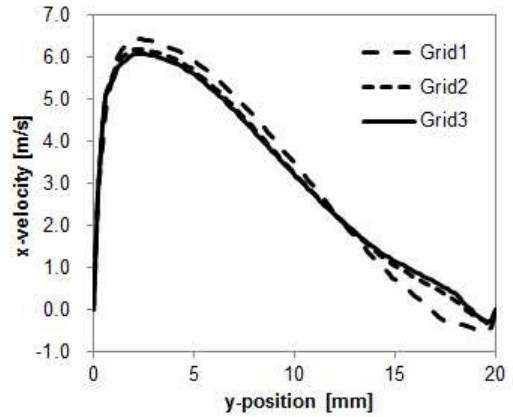


Fig. 3. Velocity profiles with different grids at the outlet of the 1st stage.

하였다. 상대습도는 각각 40%와 90%, 100%로, 작동 온도는 27°C이며, 입구의 수증기 질량 분율은 각각 8.8584e-3와 1.9973e-2, 2.2192e-2이다. 액적이 벽면에 충돌하는 경우, 벽면에 부착되어 제거되는 것으로 가정하였다.

3.3 액적 크기 분포

액적과 유체 유동과의 열 및 물질전달에 의한 액적 크기 변화가 수반되는 경우에는 크기 분포를 갖는 액적 거동 해석을 고려해야 한다. 액적의 크기 분포를 표현하기 위해 다양한 방법이 이용될 수 있으며, 대표적인 방법으로 Rosin-Rammler 분포가 이용된다. Rosin-Rammler 분포는 액적 직경에 대한 지수 함수로 표현되며, D보다 큰 액적 직경이 갖는 질량분률(Y_D)로 다음과 같이 표현된다.

$$Y_D = e^{-(D/\bar{D})^s} \quad (15)$$

여기서 \bar{D} 는 평균 액적 직경이고, s 는 분산 인자 (spread parameter)이다. 액적의 거동에 의한 유체 유동 변화를 고려하여 해석을 수행하였으며, 해석에

Table 2. Sizes of grids and boundary layers for test of grid sensitivity

Grid	Max. size	Boundary layers			No. cells	Max. y+
		No. of layers	Growth rate	Max. thickness		
1	1e-3 m	5	1.2	5e-4 m	10,953	4.4
2	5e-4 m	5	1.2	5e-4 m	34,379	3.3
3	5e-4 m	5	1.2	1e-4 m	35,513	2.9

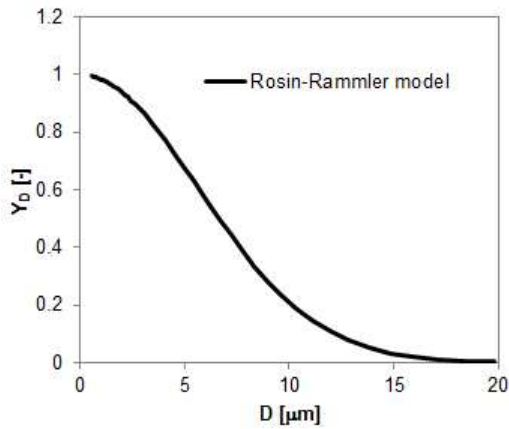


Fig. 4. Rosin-Rammler distribution of droplet at the inlet.

사용된 입구에서의 액적 크기 분포는 Rosin-Rammler 분포를 이용하여 적용하였다. Rosin-Rammler 분포의 최소 액적 크기는 $0.5\ \mu\text{m}$, 최대 액적 크기는 $20\ \mu\text{m}$, 평균 액적 크기는 $8\ \mu\text{m}$, 분산인자는 2로 설정하였으며, 해당 크기 분포는 Fig. 4와 같다.

3.4 해석 결과

해석 결과로 얻은 액적 제거장치의 유속 및 온도 분포는 Fig. 5와 같다. 1단의 첫 번째 갈고리에 의해 유동이 상부로 집중되고, 두 번째 갈고리에서 유속의 방향 변화가 급격하게 일어나며, 갈고리 끝부분에서 큰 유속 분포를 보인다. 1단의 두 번째 갈고리 부근에서의 급격한 유속 변화로 인해, 이 영역에서 관성에 의한 액적 분리가 주로 일어날 것으로 예측할 수 있다. 액적 제거장치 1단과 2단의 유속 분포는 동일하게 형성됨을 확인할 수 있다.

액적 제거장치의 수증기 질량 분율 분포는 Fig. 6과 같으며, 입구와 출구의 차이가 크지 않았다. 상대 습도가 낮은 경우, 액적의 증발에 의해 수증기 질량 분율이 증가하였으며, 상대 습도가 높은 경우에는 그 차이가 거의 없었다. 관성에 의한 액적 분리가 주로 일어날 것으로 예측한 두 번째 갈고리 내부에서 상대적으로 높은 수증기 농도를 보이며, 이는 관성에 의해 유동 흐름과 분리된 액적들이 상대적으로 유속이 낮은 갈고리 내부에서 오랜 시간 체류하며 증발하기 때문인 것으로 파악된다.

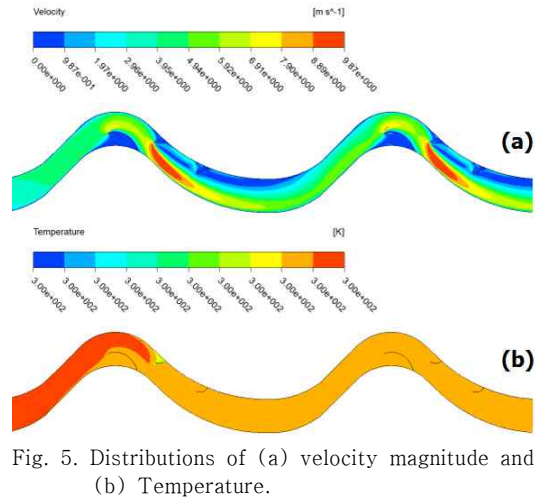


Fig. 5. Distributions of (a) velocity magnitude and (b) Temperature.

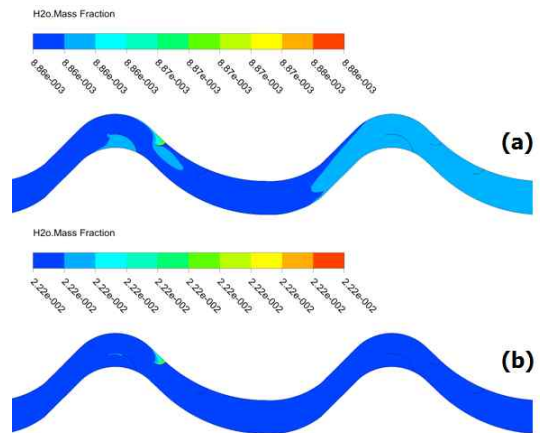


Fig. 6. Distribution of H2O mass fraction for (a) R.H. = 40% and (b) R.H. = 100%.

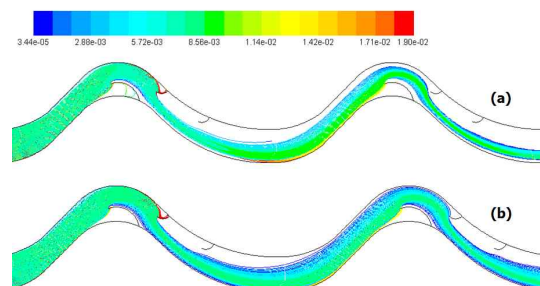


Fig. 7. Droplet trajectories without consideration of turbulent dispersion at (a) R.H. = 40% and (b) R.H. = 100%.

상대 습도가 다른 경우, 액적 제거장치 내부의 액적 경로를 비교하면 Fig. 7.과 같다. 상대 습도가 높은 경우, 2단으로 유입되는 액적의 수가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 작은 크기 액적의 수량 증가가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 증발에 의한 작은 액적의 증발이 감소하고, 관성에 의해 제거되지 않기 때문으로 파악된다. 이때, 액적 경로 해석에 난류 확산(turbulent dispersion) 효과는 고려하지 않았다.

3.5 액적 제거 효율

액적 크기 변화에 따른 제거 효율을 얻기 위해, 입구에 공급된 액적 크기를 기준으로 제거 효율을 계산하였다. 상대 습도에 따라 액적 표면에서 증발이 일어나 액적 크기가 변하며, 이를 고려하여 증발에 의한 제거와 부착에 의한 제거 효율을 각각 산출하였다. 난류 확산에 의한 제거 효율 변화를 비교하기 위해, 난류 확산 고려 유무에 따른 제거 효율을 비교하였다. (Fig. 8.) 난류 확산을 고려한 경우, 증발에 의한 액적 제거 효율은 액적 크기 $7\mu\text{m}$ 를 기준으로 작은 크기에서는 감소하고 큰 크기에서는 증가하는 결과를 보였으나 그 차이는 크지 않았다. 반

면, 관성에 의한 제거 효율은 난류 확산을 고려한 경우에 크게 증가하는 결과를 얻었다. 난류 확산을 고려하지 않은 경우, 액적이 위치한 유동 흐름에 따라 관성에 의한 제거 여부가 결정되고 하나의 갈고리를 통과한 후에도 동일한 유선을 따라 이동하게 된다. 반면 난류 확산을 고려한 경우에는 관성에 의해 분리된 이후에 확산에 의해 이웃한 유선으로 액적이 확산되어 다음 갈고리 영역에서 추가적인 제거가 가능한 것으로 파악된다.

난류 확산을 고려하여, 액적 제거장치의 입구 습도 변화에 따른 액적 제거효율을 정리하면, Fig. 9-11.과 같다. 유체 유동의 상대 습도가 증가함에 따라 증발에 의해 제거되는 액적의 크기가 크게 감소하였으며, 관성 부착에 의한 액적 제거효율은 모든 액적 크기에 대해 증가하였다. 이는 상대 습도가 증가함에 따라 액적 표면에서 증발이 감소해서, 입구에서의 액적 크기가 감소하지 않아 초기 분포를 유지하고, 이에 따라 관성에 의한 액적 분리가 증가한 것이다. 상대 습도 변화에 따른 제거 효율의 변화는 $10\mu\text{m}$ 보다 작은 액적에서 크게 나타났으며, 미세한 액적일수록 습도 변화에 따른 액적의 크기 변화와 이에 의한 제거 효율 변화 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 3. Boundary conditions and operating parameters

Boundary	Property	Value/Condition
Inlet	Velocity	3.15 m/s
	Temperature	27°C
	Mass fraction of water vapor	8.8584e-3@R.H. = 40% 1.9973e-2@R.H. = 90% 2.2192e-2@R.H. = 100%
Outlet	Static pressure	0 Pa
Walls	Wall function, velocity	Enhanced wall treatment, no-slip
	Min. size	$0.5\mu\text{m}$
	Max. size	$20\mu\text{m}$
Droplets	Mean size	$8\mu\text{m}$
	Spread parameter	2.0
	Divisions	20

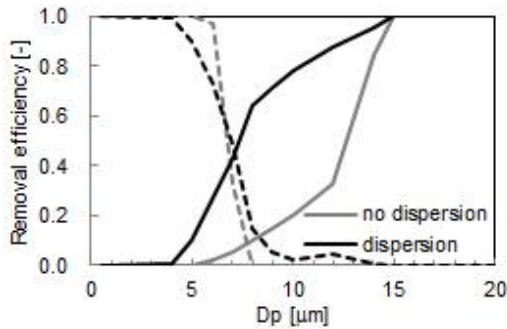


Fig. 8. Droplet removal efficiency of mist eliminator with and without consideration of turbulent dispersion.

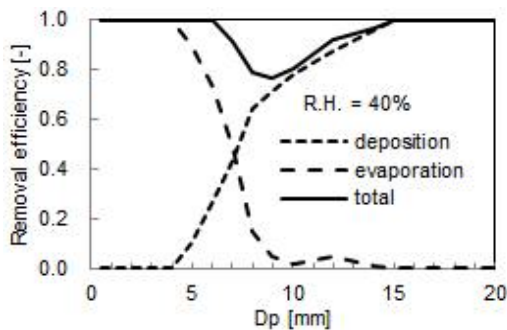


Fig. 9. Droplet removal efficiency at R.H. = 40%.

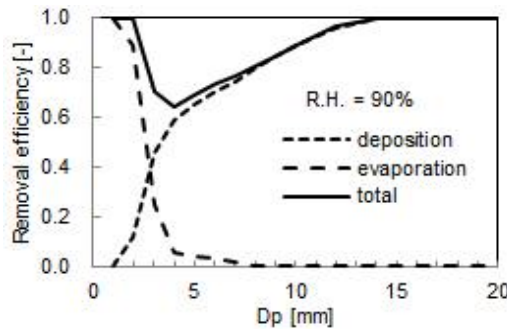


Fig. 10. Droplet removal efficiency at R.H. = 90%.

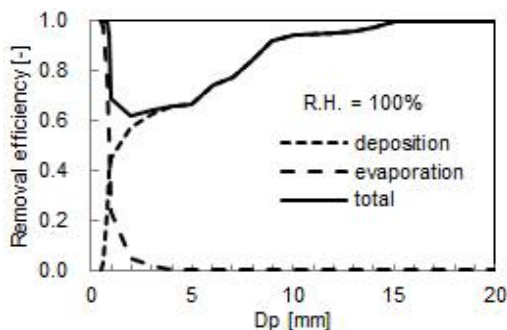


Fig. 11. Droplet removal efficiency at R.H. = 100%.

4. 결 론

본 연구는 액적 및 증기 상태의 수분을 포함한 기체에서 액적을 제거하는 액적 제거장치의 초기 상대습도 변화에 따른 액적 제거효율을 액적 표면에서의 증발-응축을 고려하여 살펴보았다. 액적 제거 효율 예측을 위해서는 난류에 의한 확산 고려가 매우 중요하며, 10 μm 이하의 액적의 크기 변화는 상대습도 변화에 따라 크게 나타나는 것을 확인하였다. 상대습도가 증가함에 따라 증발에 의한 제거 효과는 감소하고, 관성에 의한 제거효율은 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 주요사업(NK176B, NK197B)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Burkholz, A. (1981). Mist Elimination, in Air Pollution Control (Part 4), Bragg, G.M. and Strauss, W. (eds.), Wiley Interscience, New York, USA.
- Estakhrsar, M.H.H., and Rafee, R. (2013). Effect of drainage channel dimensions on the performance of wave-plate mist eliminators. *Korean J. Chem. Eng.* 30(6). 1301-1311.
- 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. *Chem. Eng. Sci.*, 63. 5639-5652.
- 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. *Chem. Eng. Research and Design*, 83. 469-477.
- 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. *IchemE*, 81. 639-648.
- Lee, S.Y., Hong, W.S., Shin, W., Kim, G., and Song, D.K. (2013). Evaluation of Removal Efficiency

- of Water Contents using Inertial Impaction Separator. *Par. Aerosol Res.*, 9(1). 23-29.
- Morsi, S.A., and Alexander, A.J. (1972). An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems. *J. Fluid Mech.*, 55(2). 193-208.
- Song, D.K., Lee, S.Y., Hong, W.S., Shin, W., Kim, G., and Kim, H. (2013). Removal efficiency of water contents using inertial impaction separators with change in relative humidity. *Par. Aerosol Res.*, 9(4). 247-252.
- Venkatesan, G., Kulasekharan, N., and Iniyar, S. (2014). Numerical analysis of curved vane demisters in estimating water droplet separation efficiency. *Desalination*, 339, 40-53.
- Zamora, B., and Kaiser, A.S. (2011). Comparative efficiency evaluations of four types of cooling drift eliminator, by numerical investigation. *Chem. Eng. Sci.*, 66. 1232-1245.