

배기가스 세정장치내 유체 유동에 대한 다공성 매질 적용 기반의 전산해석적 연구

홍진표^{*,#}, 윤상환^{*}, 윤현규^{*}, 김래성^{*}, 안준태^{**}

^{*}창원대학교 첨단방위공학과정, ^{**}창원대학교 기계공학과정

Computational Study on the Application of Porous Media to Fluid Flow in Exhaust Gas Scrubbers

Jin-pyo Hong^{*,#}, Sang-hwan Yoon^{*}, Hyeon-kyu Yoon^{*}, Lae-sung Kim^{*}, Jun-tae An^{**}

^{*}Graduate School of Advanced Defense Engineering, Changwon National University

^{**}Graduate School of Mechanical Engineering, Changwon National University

(Received 19 October 2021; received in revised form 25 October 2021; accepted 02 November 2021)

ABSTRACT

Exhaust gases emitted from internal combustion engines contain nitrogen oxides (NO_x) and sulfur oxides (SO_x), which are major air pollutants causing acid rain, respiratory diseases, and photochemical smog. As a countermeasure, scrubber systems are being studied extensively. In this study, the pressure drop characteristics were analyzed by changing the exhaust gas inflow velocity using a scrubber for a 700 kW engine as a model. In addition, the fluid flow inside the scrubber and the behavioral characteristics of the droplets were studied using CFD, and the design compatibility of the cleaning device was verified. Flow analysis was performed using inertial and viscous resistances by applying porous media to the complex shape of the scrubber. The speed of the exhaust passing through the outlet nozzle from the inlet was determined through the droplet behavior analysis by spraying, and the flow characteristics for the pressure drop were studied. In addition, it was confirmed through computational analysis whether there was a stagnation section in the exhaust gas flow in the scrubber or the sprayed droplets were in good contact with the exhaust gas.

Keywords : Porous Media(다공성 매질), Droplet(액적), NO_x(질소산화물), SO_x(황산화물), Scrubber(배기가스 세정장치)

1. 서 론

내연 기관으로 부터 배출되는 배기가스에는 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x) 등이 포함되어 있으며 이러한 대기오염물질은 산성비와 호흡기 질환 및 광화학 스모그의 주요 원인으로 알려져 있다^[1]. 이에 따라 국내는 물론 국제적으로 배기가스에 대한 규제를 지속적으로 강화하고 있는 추세에 있으며 대응기술 또한 활

발하게 연구 및 개발 되고 있다^[2]. 대표적인 기술로는 질소산화물(NO_x) 저감을 위한 선택적 환원촉매 기술(SCR, Selective Catalytic Reduction)과 황산화물(SO_x) 저감을 위한 습식탈황기술(Scrubber)을 들 수 있다. 이러한 기술들에서는 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x) 등을 처리할 수 있는 동시처리기술^[1,3]과 처리효율을 높이기 위한 배기가스 세정장치(Scrubber)에 대한 유동해석이 많이 연구되고 있다.

본 연구와 관련한 기존 연구사례는 습식 스크러버의 분무유량, 형상비 및 충진율 변화가 스모그 저감에 미치는 영향에 대한 연구^[1], 선박 배기 가스내 SO_x/NO_x

Corresponding Author : jp_hong@changwon.ac.kr

Tel: 055-213-2946 Fax: 055-213-2984

처리용 습식 스크러버에 대한 연구^[2], 스프레이형 스크러버의 배출가스에 포함된 액적(Droplet)의 제어방법에 관한 전산해석적 연구^[3], 수치해석을 이용한 중, 대형 스크러버 시스템 내 유체 유동 및 열적 특성 분석에 대한 연구^[4], CFD 해석 및 PIV 실험을 통한 연료유 스크러버의 노즐 위치 선정에 대한 연구^[5], 사각 습식 스크러버 내부구조에 따른 유동특성^[6], 스프레이형 수막에 대한 CFD 모델링^[7] 및 Mist Eliminator 설계기술 확보를 위한 유동해석^[8] 등 많은 연구들이 진행되었다. 그러나 배기가스가 복잡한 형상의 세정장치 내를 통과할 때 다공성 매질(Porous Media)을 적용한 관성저항과 점성저항 산정에 따른 유동해석에 대한 연구와 동시에 스프레이 분사에 의한 액적(Droplet) 거동해석을 통해 입구측에서 유입된 배기가 출구측 노즐을 통과하기까지 세정장치내 속도-압력 강하에 대한 유동특성을 함께 연구한 사례는 많이 없었다.

이에 본 연구에서는 기업과의 연구과제 추진을 통해 제작되고 있는 700kW급 내연기관용 배기가스 세정장치를 모델로 하여 배기가스 유입속도를 변화시키면서 압력강하 특성을 분석하고 세정장치 내부 유체유동 및 액적(Droplet)의 거동 특성을 CFD를 통해 함께 연구하여 세정장치의 설계 건전성에 대하여 고찰하였다. Fig. 1은 본 연구에 선정된 세정장치의 유동 해석 모델이다. 입구측에서 유입된 배기가스는 세정장치를 통과해 배기가 출구측 노즐을 통과하기까지 속도-압력 강하에 Water Spray 장치, 가이드 베인 장치, 분배판, 타공판, 집진기를 거치면서 정화된 배기가스가 대기중으로 방출하게 된다. 이때 세정장치 내 복잡한 형상을 다공성 매질(Porous Media)을 적

용하여 관성저항과 점성저항에 의한 유동해석을 수행 하였으며 스프레이 분사에 의한 액적(Droplet) 거동해석을 통해 입구측에서 유입된 대한 유동특성을 연구하였다. 이를 통해 세정장치내 배기가스 흐름상 정체구간이 발생하는지, 분사된 액적이 배기가스와 잘 접촉을 하는지 등 설계 건전성을 전산해석 연구를 통해 확인하였다.

2. 전산해석조건 및 격자생성

2.1 배기가스 유입조건

배기가스는 700kW급 내연기관에서 배출되는 가스를 기준으로 하였으며 배기가스내에는 황산화물, 질소산화물, PM, CO₂ 등 다양한 물질이 포함되어 있으나, 유동해석시에는 공기의 물성치를 적용하여 유동해석을 진행하였다. 또한 배기가스의 온도는 263℃(내연기관 100% Load 기준)이지만 SOx와 NOx를 씻겨내기 위해서 스프레이 분사하는 Water에 의해서 최종 냉각되어, 배출되는 온도인 40℃를 기준으로 공기 밀도를 환산하였고 배기가스 유입속도는 Table 1과 같이 14.71m/s(내연기관 100% Load 기준)를 산정 하였다.

또한 유동해석의 정합적 검증을 위하여 세정장치 내부의 배기가스 평균속도를 100% Load 기준으로 1.84m/s으로 Table 2와 같이 산정하였으며 이를 기준으로 유동해석의 결과중의 하나인 속도 분포와 비교해 보고자 하였다.

Table 1 Exhaust gas inflow conditions

Engine load(%)	120	100	80	50	
Flow rate	(kg/s)	1.837	1.531	1.224	0.765
	(m ³ /s)	1.643	1.369	1.093	0.684
Air density(kg/m ³)	1.1181(at 40℃)				
Inlet area(m ²)	0.093				
Flow velocity(m/s)	16.81	14.71	11.77	7.36	

Table 2 Average velocity in the scrubber sys. of exhaust gas

Engine load(%)	120	100	80	50
Flow rate(m ³ /s)	1.643	1.369	1.093	0.684
Internal cross sectional area(m ²)	0.7448			
Average velocity(m/s)	2.47	1.84	1.47	0.92

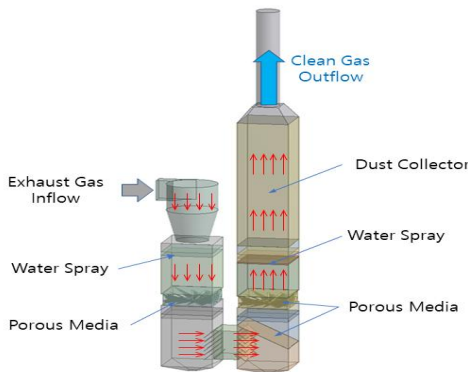


Fig. 1 3D Modeling of Scrubber

Table 3 Create a calculation mesh for flow analysis

Grad type	Tetrahedron & Hexahedron
Number of nodes	3,744,033
Number of elements	17,730,414

2.2 전산유체 해석 모델과 격자 생성

세정장치 내부 구성품에 대해서 Ansys 2020 R1 Mesh Tool을 이용하여 유동해석용 계산 격자를 생성하였으며, 이때 세정장치 내부 형상이 복잡하여 계산격자는 주로 Tetrahedron(사면체)이 사용되었고 간단한 형상에 대해서는 Hexahedron(육면체)를 적용하였다.

특히 가이드 베인 등 주요부품 주변은 격자 밀도를 높여 계산격자를 생성 하였는데 이때 생성된 총 Node (절점)과 Element(요소) 수는 각각 Table 3과 같이 374만개와 1,773만개로 구성 되었다.

3. 다공성 매질적용 속도-압력강하 관계 산정

3.1 다공성 매질에 대한 관계식

세정장치 내부 모든 기계장치를 유동해석 모델화 할 경우 방대한 계산으로 많은 시간 소요가 예상되어 식(1)과 같이 Darcy's law 관계식^[4,9]을 활용하여 해당 해석 영역을 다공성 매질(Porous Media)^[4,8,9]로 설정하여 압력변화를 계산할 수 있었다.

$$\Delta P = \frac{1}{2} C_2 \rho \Delta n V^2 + \frac{1}{\alpha} \mu \Delta n V \quad (1)$$

여기서,

- C_2 : 관성저항(Inertia Resistance, 1/m)
- ρ : 배기가스에서 측정된 밀도(kg/m³)
- V : 매질을 통과하는 속도(m/s)
- $\frac{1}{\alpha}$: 점성저항(Viscosity Resistance, 1/m²)
- Δn : 매질의 두께 (Porous zone, m)
- μ : 배기가스에서 측정된 점성 계수(kg/ms)

본 연구에서 적용된 다공성 매질(Porous Media)에

대한 속도-압력 관계 산정 절차는 다음과 같다.

첫째 해당 장치만 따로 분리하여 유동해석 모델 및 유동해석용 계산 격자 생성한다.

둘째 입력값인 속도를 0에서부터 장치가 작동되는 동안 예상되는 속도 이상까지 점점 상승시켜 가면서 압력강하 값을 반복적인 Case Study를 수행하여 도출한다.

셋째 도출된 속도-압력강하 Data를 Curve Fitting을 통해서 속도에 대한 2차 다항식을 도출하여 계수를 구하며 이때 Darcy's Law 관계식 형태로 도출한다.

넷째 Darcy's Law 관계식에서 구해진 계수와 주어진 배기가스의 밀도(ρ), 매질의 두께, 배기가스의 점성계수(μ)를 이용하여 관성저항(C_2)과 점성저항($1/\alpha$)을 구한다.

다섯째 ANSYS FLUENT에서 제공되는 Porous Media 설정 탭에서 해당 유동영역에 전 단계에서 구해진 관성저항(C_2)과 점성저항($1/\alpha$)을 입력하여 유동해석을 수행한다.

여섯째 유동해석 수행시 해당 유동영역의 다공성 매질(Porous Media) 영역에 유입되는 속도에 따라서 Darcy's Law 관계식에 의해 압력강하가 해석적으로 산정되게 된다^[9].

3.2 분배판 유동해석

배기가스는 세정장치로 유입되면서 심한 와류가 형성되게 되는데, 배기가스를 최대한 균일하게 흐르게 하기 위해서 Fig. 2와 같은 분배판(Distribution Panel)을 세정장치 내에 설치하게 된다.

다공성 매질(Porous Media)을 적용한 속도-압력강하 관계 산정 절차에 따라 아래와 같이 분배판을 세정장치 내 유동영역에서부터 별도로 분리하여 유동해석 모델 및 계산 격자를 생성하였다.

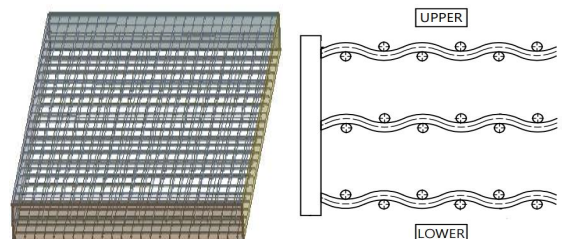


Fig. 2 Distribution panel

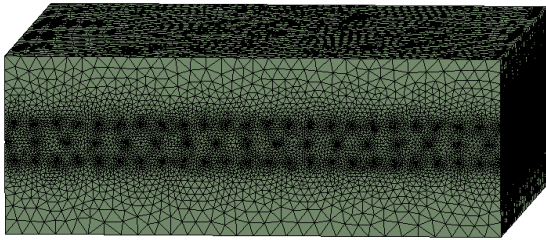
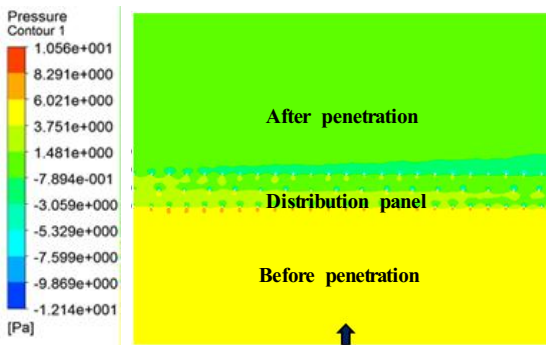
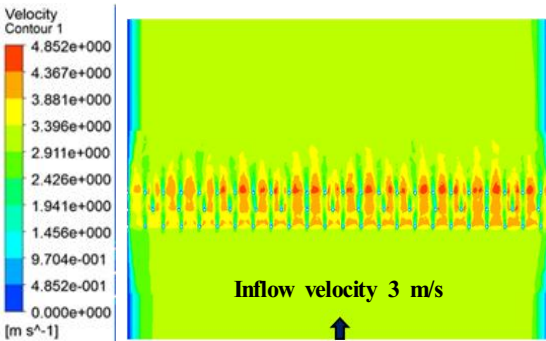


Fig. 3 Calculation mesh for flow analysis



(a) Pressure distribution(Pressure drop 5.8 Pa)



(b) Velocity distribution(Max. velocity 4.9 m/s)

Fig. 4 Pressure & velocity distribution(Distribution Panel)

유동해석용 격자는 Fig. 3과 같이 1개의 분배판이 890 만개(Element 기준)가 넘게 나타났으며 세정장치내의 유동영역의 여러개 분배판을 모두 포함할 경우 과도한 계산시간이 소요되어 다공성 매질을 적용하여 유동해석을 진행하였다.

세정장치내 배기가스 평균 속도가 2m/s내외이므로 최대 7m/s까지 Case Study를 수행하였으며, Fig. 4는 유입속도 3m/s인 경우의 분배판 주위의 압력분포 및 속도

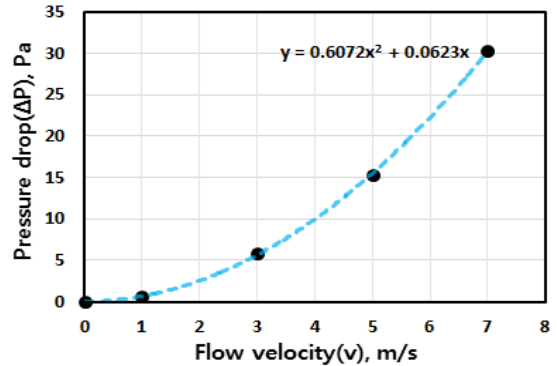


Fig. 5 Velocity & Pressure drop and curve fitting by flow analysis

분포를 나타낸다. 유입속도가 3m/s인 경우 분배판에 의한 압력강하는 5.8Pa로 비교적 작은 압력강하를 보이고 있으며 최대속도는 분배판 내에서 와이어와 와이어 사이를 통과할 때 가장 큰 속도 분포를 보이는데 이때 최대속도는 4.9m/s로 나타났다.

분배판으로 유입되는 각각의 유입속도를 입력값으로 하여 유동해석을 수행하면 Fig. 5와 같은 유입속도 대비 압력 강하의 관계 Data 를 얻을 수 있다.

이 속도-압력강하 관계 Data를 이용하여 Curve Fitting을 수행하면 식(2)와 같은 Darcy's Law 관계식과 유사한 형태의 속도-압력강하 관계식과 계수를 구할 수 있다.

$$\Delta P = 0.6072 V^2 + 0.0623 V \quad (2)$$

이 계수(0.6072, 0.0623)와 주어진 배기가스 밀도와 매질의 두께, 배기가스의 점성계수(μ)를 이용하여 Table 4와 같이 관성저항(C_2)과 점성저항($1/\alpha$)을 구하였다. 얻어진 관성저항(7.165 1/m)과 점성저항(49737.3 1/m²)값을 전산유체해석 Tool(ANSYS Fluent Porous Media)의 설정 탭에 입력하여 유동해석을 수행하였다.

Table 4 Inertia & Viscosity resistance of distribution panel obtained by Darcy's law relational expression

Items	Value
Inertia resistance (C_2 , 1/m)	7.165
Viscosity resistance ($1/\alpha$, 1/m ²)	49737.3

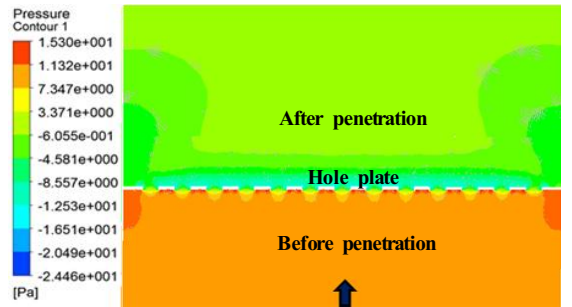
3.3 수평 및 경사 타공판 유동해석

내연기관에서 세정장치로 배기가스가 유입되고 입구측 및 출구측 가이드 베인을 통과한 배기가스는 Wash Water와의 접촉면적을 높이기 위해서 가이드 베인에 의해 와류가 형성되는데 집진기내에서는 가능한 균일한 유동이 형성되어야 많은 그을음을 제거할 수 있다. 따라서 출구측 가이드 베인을 통과한 와류의 배기가스를 집진기로 유입되기전 수평 및 경사 타공판을 이용하여 균일한 배기가스 흐름을 만들어 주게 된다.

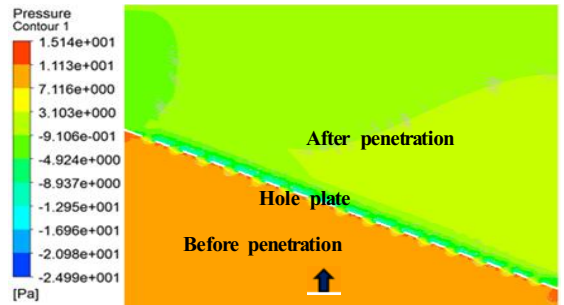
타공의 Hole이 많기 때문에 세정장치 유동모델에 직접 포함시키지 않고 다공성 매질(Porous Media)을 적용한 속도-압력강하 관계 산정 절차에 따라 수평 및 경사 타공판을 별도로 분리하여 유동해석 모델 및 계산 격자를 생성하였다. 유동해석용 격자는 수평 타공판 하나만으로도 332만개(Element 기준)가 넘어서 세정장치내의 유동영역에 수평 타공판을 포함할 경우 역시 과도한 계산시간이 소요될 수 있다. 세정장치내 배기가스 평균 속도가 2m/s내외이므로 최대 7m/s까지 Case Study를 수행하였다. Fig. 6은 유입속도 3m/s인 경우의 수평 및 경사 타공판 주위의 압력분포 및 속도분포를 나타내고 있다. 유입속도가 3m/s인 경우 수평 타공판에 의한 압력강하는 10.6Pa, 경사 타공판에 의한 압력강하는 10.2Pa로 분배판에 비해 각각 2배 가까운 압력강하를 보이고 있으며, 최대속도는 타공판 Hole을 통과할 때 가장 큰 속도분포를 보이는데 수평 타공판에서 최대 6.7m/s, 경사타공판에서 6.1m/s로 나타났다. 타공판으로 유입되는 각각의 유입속도를 입력값으로 하여 유동해석을 수행하면 Fig. 7과 같은 유입속도 대비 압력강하의 관계 Data를 얻을 수 있다. 이 속도-압력강하 관계 Data를 Curve Fitting을 수행하면 식(3)과 식(4)와 같은 Darcy's Law 관계식과 유사한 형태의 속도-압력강하 관계식과 계수를 구할 수 있다. 이 계수와 주어진 배기가스 밀도와 매질의 두께, 배기가스의 점성계수(μ)를 이용하여 Table 5 와 같이 타공판의 관성저항과 점성저항을 구하여 유동해석을 수행할 수 있다.

$$\Delta P = 1.1687V^2 + 0.0124V \quad (3)$$

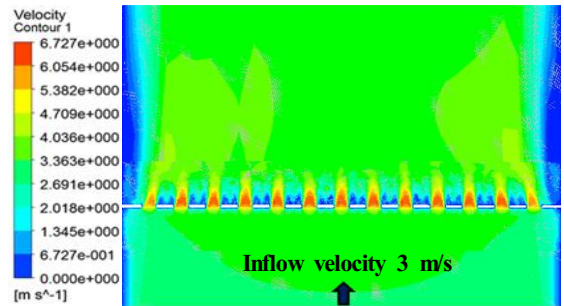
$$\Delta P = 1.1135V^2 + 0.0699V \quad (4)$$



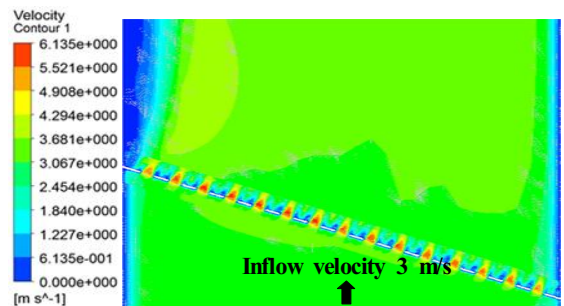
(a) Pressure of horizontal hole plate(Pressure drop 10.6Pa)



(b) Pressure of inclined hole plate(Pressure drop 10.2Pa)



(c) Velocity of horizontal hole plate(Max. velocity 6.7m/s)



(d) Velocity of inclined hole plate(Max. velocity 6.1m/s)

Fig. 6 Pressure & Velocity distribution

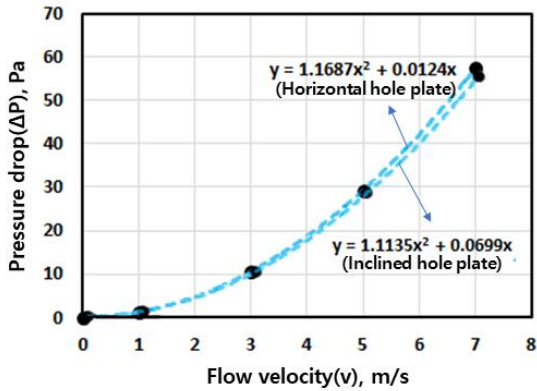


Fig. 7 Velocity & Pressure drop and curve fitting by flow analysis

Table 5 Inertia & Viscosity resistance of Horizontal hole plate obtained by Darcy's law relational expression

Items	Hole plate	Value
Inertia resistance (C_2 , 1/m)	Horizontal	318.01
	Inclined	302.99
Viscosity resistance ($1/\alpha$, 1/m ²)	Horizontal	115,495
	Inclined	654,056

3.4 집진기 유동해석

배기가스는 집진기를 통과하는 동안 큰 압력강하 없이 그을음을 최대한 많이 제거하는 것이 좋지만 너무 적은 압력강하는 오히려 집진기의 집진 효율을 떨어지게 만들기 때문에 세정장치의 압력강하 사양(최대 500Pa)내에서 압력강하를 확인하고자 하였다. 집진기는 방전 기둥과 별모양 방전판이 설치되어 있는 등 형상이 매우 크고 복잡하게 구성되어 있다. 따라서, 집진기 또한 세정장치내 유동영역에서부터 분리하여 유동해석 모델 및 계산 격자를 Fig. 8과 같이 생성하여 다공성 매질(Porous Media)를 활용, 속도-압력강하 관계 산정 절차에 따라 유동해석을 수행하였다.

이 속도-압력강하 관계 Data를 Fig. 9와 같은 Curve Fitting으로 식(5)와 같은 Darcy's Law 관계식과 유사한 형태의 속도-압력강하 관계식과 계수를 구할 수 있었다. 이 계수(0.4719, 1.1016)와 주어진 배기가스 밀도 및 매질의 두께, 배기가스의 점성계수(μ)를 이용하여 Table 7과

같이 관성저항(C_2 , 0.403 1/m)과 점성저항($1/\alpha$, 32,231.7 1/m²)을 구하여 ANSYS FLUENT Porous Media 를 활용해서 유동해석을 수행하였다.

$$\Delta P = 0.4719 V^2 + 1.1016 V \quad (5)$$

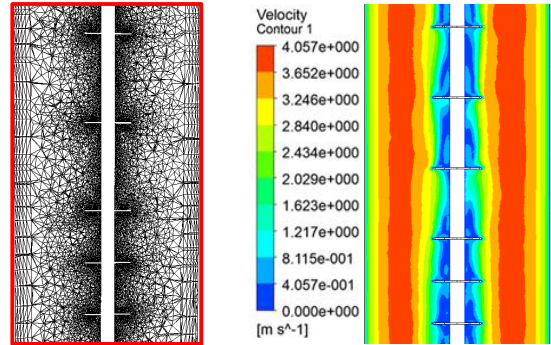


Fig. 8 Pressure & velocity distribution(Dust collector)

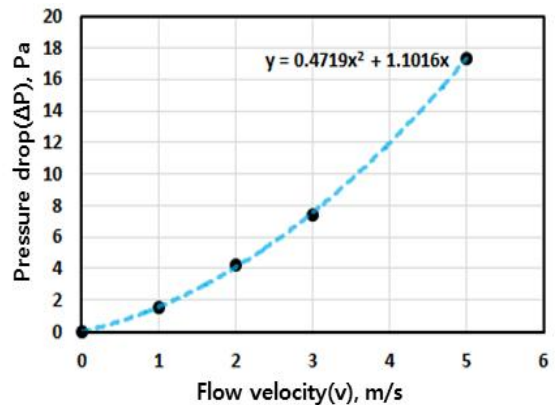


Fig. 9 Velocity & Pressure drop and curve fitting by flow analysis

Table 7 Inertia & Viscosity resistance of Inclined hole plate obtained by Darcy's law relational expression

Items	Value
Inertia resistance (C_2 , 1/m)	302.99
Viscosity resistance ($1/\alpha$, 1/m ²)	654,056.2

4. 유동해석 결과 및 고찰

4.1 압력분포 특성

세정장치 내부 중심 단면의 배기가스 압력분포 특성은 Fig 10과 같이 나타내었으며 배기가스의 입구측 압력 대비 출구측의 압력변화(압력강하)는 343.81Pa로 나타나 설계사양 500Pa 아래에서 하회하고 있어 설계가 잘 이루어졌다고 판단된다.

입구측에서는 14.71m/s의 높은 속도가 유입되면서 사이클론(Cyclone)에 의한 심한 선회류가 발생하기 때문에 압력 변화가 심한 편이며, 그 이후 분배판(Distribution Panel)의 3단 와이어 사이를 통과할 때 약 5Pa의 작은 압력강하를 동반하면서 배기가스는 비교적 균일한 유동현상을 보이기 때문에 압력변화가 상대적으로 작아진다. 가장 큰 압력변화를 보이는 곳은 입구측 타워의 하단부, 출구측 타워의 연결부, 그리고 출구측 타워 하단부이다. 이는 배기가스의 흐름이 급격하게 변하기 때문인데, 출구측 타워 입구부터 하

강하던 배기가스는 연결부로 유입되기 위해서 U자 형태로 흐름이 바뀌게 되고 연결부의 좁은 가이드를 지나면서 평균 2m/s 내외의 배기가스 속도가 10m/s내외의 까지 상승하는 등 비교적 압력강하의 원인이 되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 연결부를 통과한 배기가스는 출구측 타워 하단부에서 또다시 급격히 U자 형태로 흐름이 상승하는 변화를 겪게 되면서 압력강하가 이루어지게 된다. 다공성 매질(Porous Media)로 설정된 분배판(Distribution Panel), 수평 타공판, 경사타공판 및 출구측 타워의 집진기에서는 배기가스가 주로 출구 방향으로만 압력변화가 있고 측면으로는 압력변화가 거의 관찰되지 않는데 이는 미리 산정된 관성저항과 점성저항은 주흐름 방향으로만 설정하고 측면 방향으로서는 매우 높은 수치(보통 10배 정도)를 설정하여 측면 방향으로서는 유동이 거의 발생하지 않도록 설정했기 때문이다. 특히 집진기에서는 주흐름 방향으로서는 배기가스 흐름이 발생하나 측면으로는 거의 흐르지 않는 것으로 고찰 된다.

4.2 속도분포 특성

기관 Load 100% 에서 세정장치 내부 속도분포를 Fig 11 (a) 에 나타내었다. 출구부 연돌 쪽에서 최대 속도 17.46m/s 로 나타나며 단면적이 축소되는 입구측 타워와 출구측 타워의 연결부 가이드에서 10m/s 이상으로 속도가 상승하는 것을 확인 할 수 있다. 배출된 배기가스가 빠른 속도로 유입되면서 사이클론 형상의 입구부, 가이드 베인, 단면적이 감소되는 입구측 타워와 출구측 타워 사이의 연결부 등을 지나면서 심한 속도 변화가 발생하고 다양한 정체구간이 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

이는 압력강하를 유발하여 세정장치와 연결 되어 있는 송풍기의 배압성능에 나쁜 영향을 미치며 Wash Water와 배기가스의 접촉이 원활하게 이루어지지 못하게 하는 역효과를 발생시킬 수 있으므로 정체구간을 최소화시킬 필요가 있다는 것을 확인 할 수 있다.

또한 입구측의 사이클론 형상에서는 심한 선회류가 발생하여 속도 변화가 크게 관찰되고 사이클론 형상의 하단에서는 중앙부에는 5m/s 내외의 빠른 배기가스 흐름이 발생하나 가장자리로 갈수록 속도가 떨어지는 현상을 확인할 수 있다.

출구측 타워 내의 가이드 베인을 통과한 배기가스는 중앙부에서는 약간의 정체구간이 발생하나 가장자리 근처에서

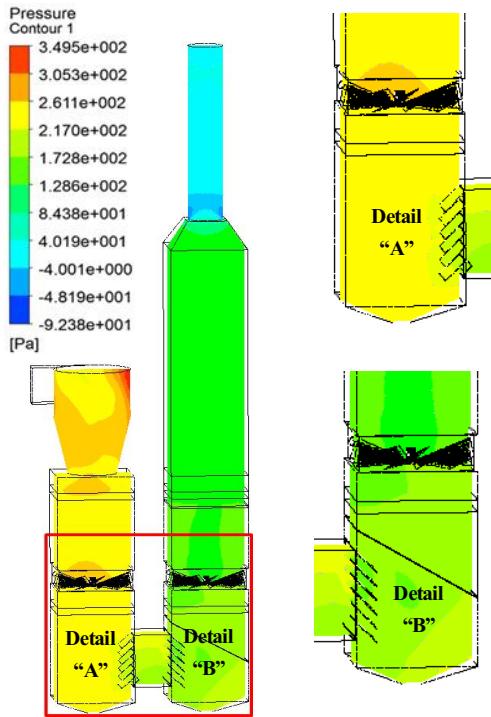
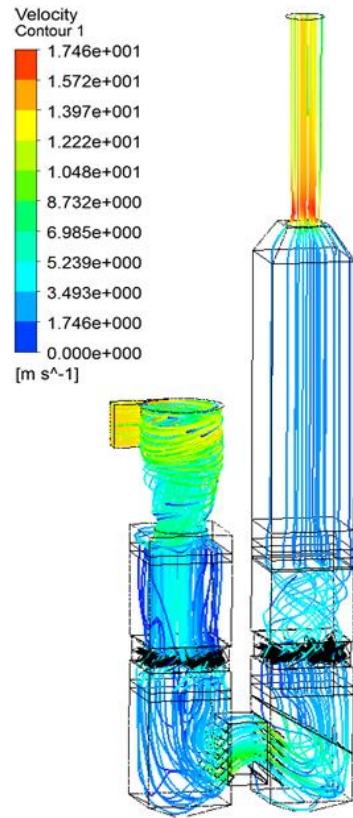


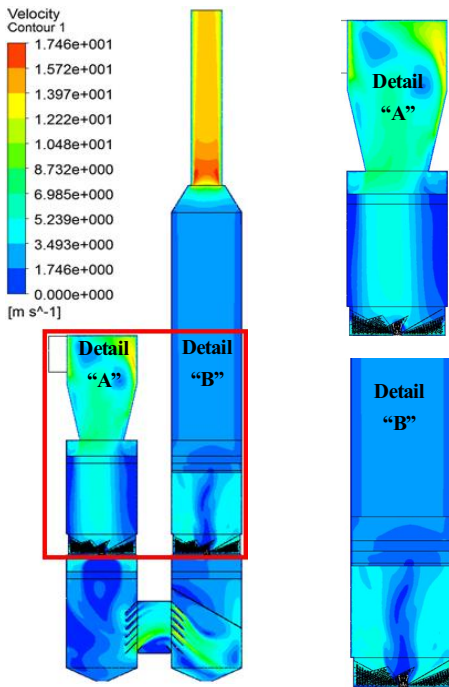
Fig. 10 Pressure distribution characteristics

는 4m/s 내외의 속도가 발생하고 있는 것이 확인된다. 따라서 배기가스와 Wash Water 사이에 실제 많은 접촉이 발생할 것으로 예상된다. 또한 입구측 가이드 베인의 하부에 크고 선명하게 정체구간이 보이고 있으며, 입구측 타워 좌측에도 비교적 큰 정체구간이 나타나고 있다. 가이드 베인에서 유출된 배기가스가 연결부로 빠르게 유입되는 과정에서 입구부 타워 하단까지는 원활하게 하강하지 않는 것으로 판단되며 입구측 타워와 출구측 타워 연결부 하단에서도 정체구간이 발생하고 있는 것이 보이는데, 연결부의 우측 상부 가이드를 통해서 빠르게 빠져나 간 배기가스 일부가 우측 하부 가이드를 통해서 다시 역류를 하고 재순환되는 현상이 나타나기도 한다. Fig 11 (b) 는 세정장치 내부 배기가스 흐름에 대한 유선(Stream lines)을 나타내고 있다. 입구부의 싸이클론 형상에 의해서 선회류가 선명히 보이고 있고 가이드 베인 전까지는 상당히 촘촘하고 많은 양의 배기가스가 유입되고 있으나 입구측 가이드 베인에 의한 저항으로 배기가스 양이나 속도 줄어드는 모습도 나타나고 있다. 출구측 가이드 베인에서 배출된 배기가스는 와류를 잘 형성하고 있는 것으로 판단되며, 이를 통해서 Wash Water와 배기가스가 잘 접촉할 수 있을 것으로 판단이 된다.



(b) Stream lines characteristics

Fig. 11 Velocity distribution & Stream lines characteristics



(a) Velocity distribution characteristics

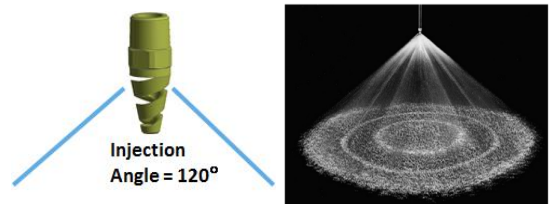


Fig. 12 Wash water nozzle and droplet solid cone

4.3 액적거동 특성

액적(Droplet) 거동해석^[3]을 위해서 ANSYS Fluent에서 제공하는 Species transport와 Discrete phase model(DPM) 기능을 사용하였으며 Fig. 12와 같이 분사 타입(Injection type)은 Solid one (Cone 내부에서도 액적이 분사되는 타입), 분사 각도(Injection Angle) 120°, 분사 속도(Injection Velocity)는 각각 1.42m/s(입구측 노즐),

1.14m/s(중간층 노즐), 2.27m/s(출구층 노즐)로 산정하였으며, 액적 직경(Droplet Diameter)에 대해서는 500 μ m로 가정하여 액적 거동해석을 수행하였다. 액적(Droplet)의 거동해석은 우선 액적의 분사없이 세정장치 내부로 배기가스만 유입시켜 배기가스에 대한 유동해석을 수행하여 전체 세정장치 내에 배기가스 상(Phase)이 존재하게 한 다음, 입구층, 중간층, 출구층의 노즐로부터 액적이 분사되어 배기가스와 접촉하면서 액적이 움직이는 궤적을 추적하였다. Fig. 13(a)는 세정장치의 입구층 노즐에서 분사된 액적의 움직임 을 나타내고 있다. 색깔은 액적의 체류시간을 보여주고 있는데, 파란색은 액적이 분사된지 얼마 지나지 않은 상태를 나타내고 빨간색으로 갈수록 분사 이후 시간이 많이 경과 됨(최대 5 sec)을 보여주고 있다. 입구층 노즐에서의 액적이 액적 직경 500 μ m와 액적 분사 속도 1.42m/s인 경우, 입구층의 사이클론(Cyclone) 형상에 의한 원심력으로 액적이 가장자리로 치우치고 강한 선회궤를 형성하면서 비교적 천천히 하강하는 모습을 보이고 있으며, 이는 사이클론 형상에의해서 배기가스와 액적사이에 많은 접촉이 이루어진다고 판단할 수 있다. 중간층 노즐에서 분사된 액적은 액적 직경 500 μ m와 액적 분사 속도 1.14m/s로 입구층과 출구층 노즐에 비해서 낮은 속도를 갖지만 아주 원활하게 배기가스와 함께 하강하고 있음을 Fig. 13(b)에서 볼 수 있으며 가이드 베인과 가이드 베인 표면의 Hole을 통과하면서 배기가스와 액적이 더욱 활발하게 접촉하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 입구층 타워 내에서 배기가스와 액적이 활발하게 접촉하고 있다고 판단되므로 배기가스 제거효율도 높을 것으로 판단된다. 출구층 노즐에서 분사된 액적은 대부분 가이드 베인에 의해 발생된 와류(Vortex)로 인해서 가이드 베인 위에서 회전하면서 배기가스와 많은 접촉을 보이는 것으로 판단된다. 반면 노즐에서 분사된 액적의 일부는 가이드 베인 표면에 생성된 작은 Hole을 통해서 출구층 타워 하단부까지 하강하여 입구층 타워에서 유입된 배기가스와 접촉하면서 큰 와류를 형성하고 있다. 배기가스의 흐름은 출구층 타워 하단부에서 출구쪽으로 향하고 있는 반면, 액적은 타워 하단부로 향해서 분사되기 때문에 액적의 직경이 작은 경우에는 배기가스와 함께 액적이 출구로 빠져나갈 수도 있으나 액적 직경 500 μ m와 액적 분사 속도 2.27m/s에 대해서는 배기가스와 함께 상승하여 대기로 배출되는 액적이 거의 보이지 않는다. 따라서 수분이 대기로 배출되지 않기 위해서는 액적 직경이 500 μ m내외는 되어야 할 것으로 판단된다.

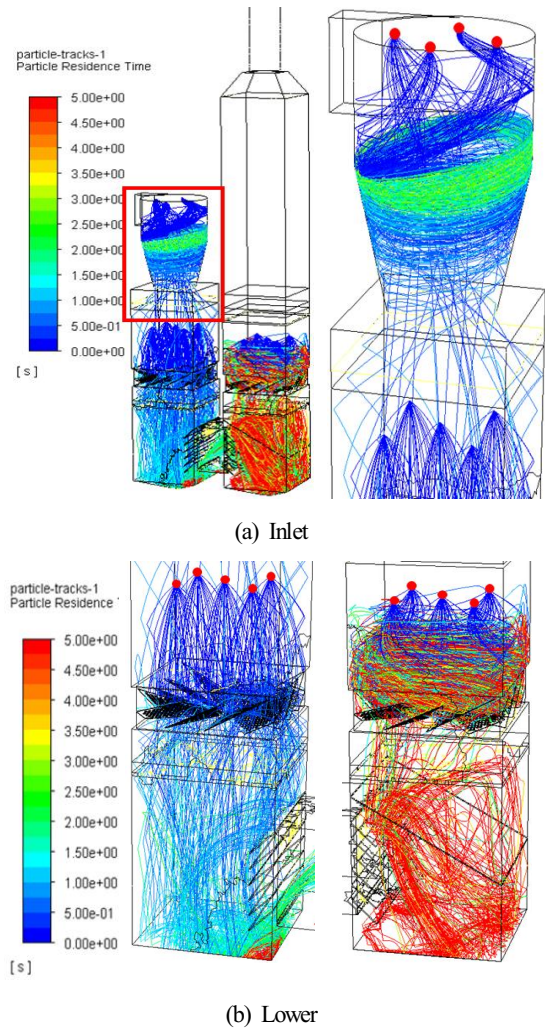


Fig. 13 Droplet behavior characteristics

5. 결론

본 연구는 기업과의 연구과제 추진을 통해 제작되고 있는 제품을 모델로 해석수행을 하였으며 해석결과를 바탕으로 제품을 개선하여 제품테스트 결과 연돌의 배출속도에서 해석결과와 거의 유사한 결과(7%범위)를 확인함으로써 신뢰성을 검증하였다. 해석에 있어 복잡한 형상에 따른 방대한 계산격자 생성으로 인해 유동해석이 원천적으로 힘들 것으로 판단되는 세정장치 내의 분배판(Distribution Panel), 타공판(수평형 및 경서형),

집진기를 다공성 매질(Porous Media)을 활용하여 Darcy's Law 관계식에 맞는 관성저항과 점성저항을 산정하여 유동해석을 진행하였다. 유동해석을 위한 입력 조건으로 입구측에 배기가스 속도 14.71 m/s를 설정하고 출구측 압력조건으로 대기압 1 atm을 설정하여 유동 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 배기가스의 입구측 압력 대비 출구측의 압력 변화(압력강하)는 343.81Pa로 설계 요구사양인 500Pa 이하를 만족 함을 확인 하였다.
- 2) 최대 속도는 17.46m/s로 출구부 연돌에서 발생하고 있고 단면적이 축소되는 입구측 타워와 출구측 타워의 연결부 가이드에서 10m/s 이상의 속도 상승이 확인 된다.
- 3) Load 100%의 엔진에서 배출된 배기가스가 빠른 속도로 유입되면서 싸이클론 형상의 입구부, 가이드 베인, 단면적이 감소되는 입구측 타워와 출구측 타워 사이의 연결부 등을 지나면서 심한 속도 변화가 발생하고 다양한 정체구간이 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.
- 4) 출구측 타워 내의 가이드 베인을 통과한 배기가스는 중앙부에는 약간의 정체구간이 발생하나 가장자리 근처에서는 4m/s 내외의 속도가 발생하고 있는 것이 확인된다. 따라서 배기가스와 NOx를 제거하기 위해서 분사되는 Wash Water 사이에 많은 접촉이 발생될 것으로 판단된다.
- 5) 액적(Droplet) 거동해석을 위해서 ANSYS Fluent에서 제공하는 Species transport와 Discrete phase model(DPM) 기능을 사용하였으며 분사 타입(Injection type)은 Solid one(Cone 내부에서도 액적이 분사 되는 타입), 분사 각도(Injection Angle) 120°로 설정하였으며 액적 직경(Droplet diameter)에 대해서는 실험값을 알 수 없었기 때문에 문헌을 참고하여 500 μ m로 가정하여 액적 거동해석을 수행하였다.
- 6) 출구측 노즐에서 분사된 액적은 대부분 가이드 베인에 의해 발생된 와류(Vortex)로 인해서 가이드 베인 위에서 회전하면서 배기가스와 많은 접촉을 보이는 것으로 판단된다. 반면, 노즐에서 분사된 액적의 일부는 가이드 베인 표면에 생성된 작은 Hole을 통해서 출구측 타워 하단부까지 하강하여 입구측 타워에서 유입된 배기가스와 접촉하면서 큰 와류를 형성하고 있다.

REFERENCES

1. Son, K., Lee, J. Y., and Park, K. H., "The effect of spray flow rate, aspect ratio, and filling rate of wet scrubber on smoke reduction," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 3, pp. 217-222, 2015.
2. Choi, J. S., Kim, J. G., Park, B. H. and Lee, J. Y., "Study on wet scrubber for SOx/NOx treatment in ship flue gas," Journal of Korean Oil Chemists Society, Vol. 34, No. 1, pp. 183-188, 2017.
3. Lee, C. H., Jang, H. S. and Koo, S. M., "Computational analysis on the control of droplet entrained in the exhaust from the spray type scrubber system," Clean Technology, Vol. 21, No. 3, pp. 191-199, 2015.
4. Heo, J. S., "Numerical Analysis of Fluid Flow and Thermal Characteristics within Medium and Large Size Ship Scrubber System," A Thesis for a Master, Wonkwang University, Republic of Korea, 2016.
5. Kim, I. C., Kim, C. G., Park, S. J., Cho, D. Y. and Lee, Y. H., "Designation of fuel oil scrubber nozzle positioning using CFD analysis and PIV methods," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 7, pp. 773-778, 2015.
6. Lee, S. M., Kwon, B. M. and Park, K. H., "Flow characteristics according to internal structure of square wet scrubber," Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 43, No. 1, pp. 1-7, 2019.
7. Gant, S. E., CFD Modelling of water spray barriers, Health & Safety Laboratory, pp. 11-31 2006.
8. Bae, J. H., Bae, M. A., Ahn, J. K., Kim, M. H., Kang S. J. and Lee M. S., "Computational Fluid Dynamic(CFD) for Design of Mist Eliminator," Journal of the Korea Academia Industrial Cooperation Society Fall Conference, 2011.
9. Min, K. S., Kim, D. H., Chan, W. S., Lee, S. Y., Jang, S. P. and Koo, J., "Experimental Study of Pressure Drop in Compressible Fluid through Porous Media," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 37, No. 8, pp. 759-765, 2013.