

디젤 엔진용 싸이클론 내부 수치 해석 A Numerical Study on Axial Inlet Cyclone for Diesel Engine

김성광 · 손창석 · 김인관
S. K. Kim, C. S. Son and I. K. Kim

Key Words : CFD(전산유체역학), cyclone dust collector(싸이클론집진기), helical guide vane(나선형유도깃)

Abstract : On this study, numerical analysis was performed for the 3 dimensional flow field of gas and particle phase for axial inlet cyclone, a part of dust collector. We applied FVM to visualize the gas phase. The flow was solved using $k-\epsilon$ turbulence model. The major parameters considered in this study were helical guide vane, inner diameter, length. Particle trajectory calculations were performed for the particle sizes of $5\mu\text{m} \sim 75\mu\text{m}$. The distribution curve of particle sizes was made of Rosin-Rammler function. The simulation results show various gas flows, particle trajectories on numerical models.

1. 서 론

원심력을 이용하여 특정크기의 먼지입자를 제거하는 싸이클론 집진기는 먼지 제거에 있어서 저비용으로 효과적인 성능을 발휘하는 오염 방지 장치로 널리 쓰이는 집진기 중 하나이다. 싸이클론의 제진원리는 처리가스를 싸이클론의 입구로 유입시켜 선회류를 형성시키면 처리가스내의 분진은 이에 의한 원심력을 얻어 선회류를 벗어나 본체 내벽과 충돌하여 집진되는 것이며, 가동부가 없는 것이 특징이다. 하지만, 원심력을 제진에 직접적으로 이용하므로 입자가 큰 먼지의 제거에 있어서는 단독으로 사용되어 효과적인 성능을 발휘하지만, 일반적으로 미세한 입자의 제진의 경우에는 전기집진기, 백필터 등의 고효율 집진기의 전처리 장치로서 활용되고 있다.

이러한 싸이클론의 내부 유동은 역학적으로 강한 와류를 가지며, 특수한 경우에는 역흐름의 공동영역이 존재하기도 하는 등 무척 복잡한 형태를 띠고 있다. 이에, 현재까지 싸이클론 내부 유동에 대한 실험, 이론적 방법, 수학적 모델링을 통한 연구가 수행되어지고 있다.

Zhou와 Soo등(1990)은 실험과 수치해석적 연구결

과를 통해, 싸이클론 중심부에 특수한 기하학적 물체를 장착하였을 경우, 압력강하가 30% 이상 향상되었고 집진 효율도 증가되었음을 보여주었다.¹⁾ 전영남과 전태인(1995)은 싸이클론의 기하학적 형상인자인 Vortex Finder 직경 및 길이, 분진 출구 직경 등에 대한 수치해석적 연구를 수행하여, 경험적으로 알려진 설계조건, 운전조건 및 성능에 정성적으로 일치함을 보여주었다.²⁾

본 연구에서는 디젤 엔진 흡입용 공기정화기에 장착되는 싸이클론 집진기의 나선형 유도깃 형상, 내부 직경 변화, 실린더 길이 변경 등의 형상 변경에 따른 포집효율과 압력손실에 대한 영향을 알아보고자 한다.

2. 수치 모델

2.1 $k-\epsilon$ 난류 모델 및 지배방정식

$k-\epsilon$ 난류모델은 난류 운동에너지(k)와 소산율(ϵ)에 대한 수송방정식에 기초를 둔 Semi-empirical 난류 모델로 가장 보편적으로 널리 사용되고 있다. 이 모델의 k 와 ϵ 는 다음 수송방정식에서 도출된다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

접수일 : 2006년 1월 20일
김성광(책임저자) : 국방기술품질원
E-mail : skkimgo@naver.com Tel. 017-678-9677
손창석 : 국방기술품질원
김인관 : 부경대학교 RIC

상기 식에서, G_k 는 평균 속도 구배에 의한 난류 운동에너지의 발생, G_b 는 부력등에 의한 난류 운동 에너지의 발생을 의미하며, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 은 상수, σ_k , σ_ϵ 은 난류 프란틀 수이다. 난류 운동 에너지의 생성 항인 G_k 는 k 의 수송에 대한 완전 방정식으로부터 다음 식(3)과 같이 정의된다.

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

Boussinesq이론에 일치하도록 G_k 를 산출하기 위해서는 식(4)와 같이 표현된다.

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (4)$$

여기서 S 는 다음 식(5)에서 정의하는 바와 같이 평균 변형을 계수이며, 평균변형을 S_{ij} 는 식(6)으로 주어진다.

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

G_b 는 부력에 의한 k 의 생성항으로서 중력장이 존재하고 온도구배가 동시에 있는 경우에 해당하는 것으로, ϵ 의 발생에 상당한 기여를 하며, 다음 식(7)과 같이 표현된다.

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (7)$$

Pr_t 는 난류 프란틀 수이다.

와류 혹은 난류 점성도인 μ_t 는 k 와 ϵ 의 조합으로 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

식(8)에서 C_μ 는 상수이다.

2.2 입자 추적 모델

FLUENT에서는 입자궤적을 추적하는데 있어서, 입자에 작용하는 힘의 균형을 적분하여 사용한다. 이러한 힘의 균형(force balance)은 입자의 관성력과 입자에 작용하는 힘과 일치하며 다음 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho) / \rho_p + F_x \quad (9)$$

식 (9)는 직교좌표계에서 x 방향의 힘을 표현한 것이다. 여기서 $F_D(u - u_p)$ 는 단위 입자 질량당 작용하는 항력이며, 다음 식(10)과 같이 표현된다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (10)$$

여기서, u 는 유체의 속도, u_p 는 입자속도, μ 는 유체의 분자 점성도, ρ 는 유체의 밀도, ρ_p 는 입자의 밀도, D_p 는 입자의 직경이다.

또한, Re 는 Reynolds수로서 식 (11)로 표현된다.

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \quad (11)$$

항력계수 C_D 는 식 (12)로 표현된다.

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (12)$$

여기서 a 는 Morsi & Alexander가 고안한 특정범위의 Re 값을 넘어서는 구형태의 입자에 적용되는 상수이다.

3. 수치 해석 및 실험 결과

3.1 해석 모델

본 연구에서는 싸이클론의 형상에 따른 내부 유동 현상 및 입자 궤적에 대한 영향에 대해 FLUENT라는 CFD코드를 사용하여 3-D 수치해석을 수행하였다. Fig. 1에 본 연구에 사용된 기본형 싸이클론의 3-D Surface Mesh를 표현하였다.

해석 모델은 Fig. 1의 모델을 중심으로 나선형 유도깃 형상, 내부 직경 변화, 실린더 길이 변경 등의 총 14개 모델에 대한 해석을 수행하였으며, 다음 Table 1, 2, 3과 같다.

Table 1 Models of helical guide vanes

Model No	Value	Etc.
HJ-135Degree	Basic model	-
HJ-90Degree	90° rotated	
HJ-105Degree	105° rotated	
HJ-120Degree	120° rotated	
HJ-145Degree	145° rotated	
HJ-150Degree	150° rotated	
HJ-165Degree	165° rotated	

Table 2 Models of cylinder lengths

Model No	Value	Etc.
HJ-72L	72 mm	-
HJ-74L	74 mm	
HJ-70LP	HJ-135Degree	

Table 3 Models of inner diameters

Model No	Value	Etc.
HJ-20D	20.8 mm	-
HJ-18D	18.8 mm	
HJ-16DP	HJ-135Degree	
HJ-14D	14.8 mm	
HJ-12D	12.8 mm	

모델은 HJ-135Degree로 지정된 모델을 기본형으로 하여, Table 1은 Fig. 1의 ㉓부분인 나선형 유도깃을 형성하는 4개의 베인의 회전각을 90° ~165° 까지 변경한 모델이며, Table 2는 Fig. 1의 ㉔부분인 원통 실린더의 길이를 증가시켜 변경한 모델이다. 또한, Table 3은 Fig. 1의 ㉕부분인 내경을 12.8mm~20.8mm까지 변경시킨 모델이다.

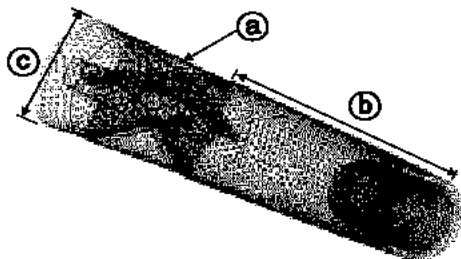


Fig. 1 3-D mesh of cyclone

상기 14개의 모델은 IDEAS V9.0에서 3-D Solid 모델링을 하여, IGES 파일 포맷으로 변환한 다음, FLUENT에서 3-D 격자 생성, 경계조건 및 해석을 수행하였다. 모델별 형상의 차이로 인해 약간씩 다르지만 전체 메시의 수는 85,000개이며 tetrahedral 형태이다.

본 연구에 사용된 싸이클론은 Fig. 1과 같은 형태의 소형 단품을 350개 병렬로 연결하여 Fig. 2와 같이 디젤 엔진 흡입용 공기정화기를 구성하고 있다.

Fig. 2에서 보듯이 소구경 축류식 싸이클론을 대량 병렬로 연결한 multicyclone 방식으로 구성되어 있다.

본 디젤 엔진 흡입용 공기정화기는 전체 분당 65 m³/min의 Intake Fan으로 흡입하여, Fig. 2의 청정 공기 출구측은 59m³/min, 더스트 출구측은 6m³/min의 유량으로 배출된다. 수치 해석을 위한 경계조건을 산출하기 위해 입구측 면적과 전체 유량을 비교 계산하여 18m/sec의 속도로 입구조건을 정하였다. 단, Table 3과 같이 내경을 변경시킨 모델의 경우, 입구 면적이 변하므로, 경계조건도 달라진다. 또한, 입자 궤적을 표현하기 위한 입자의 크기는 5 μ m~75 μ m로 주었으며 입자의 크기 분포는 Rosin-Rammler 분포도를 따르도록 하였다.

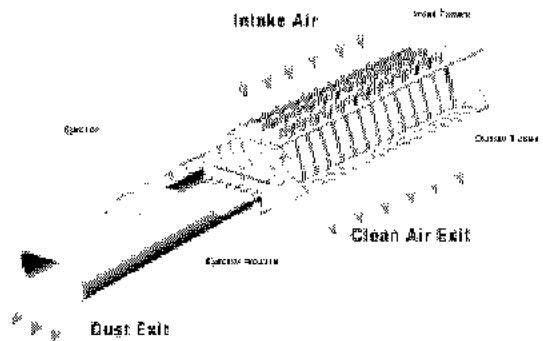


Fig. 2 Diagram of cyclones

3.2 수치 해석 결과

3.2.1 나선형 유도깃 형상에 따른 결과

입구의 나선형 유도깃(helical guide vane)은 축류식 싸이클론에 있어서 핵심적인 역할을 담당하는, 원심력 형성에 있어서 가장 중요한 부분이다. 따라서, 나선형 유도깃의 형상은 집진율에 있어서 가장 큰 영향을 주는 인자로 8개의 모델 변수를 주어 상부 입구, 하단 청정공기 출구 및 먼지 배출구측의 총압비교, 속도크기 비교, 입자 궤적 분석을 수행하였다.

나선형 유도깃의 형상 변경은 입구측의 압력에 미치는 영향이 큰 부분으로, 각도에 따른 입구측 총압력인 Table 4와 Fig. 3에서 보는 것 같이 나선형 유도깃의 회전각이 클 수록 입구측 유로를 확보해 주지 못하여 총압이 커짐을 알 수 있으며, 이는 압력 손실을 뜻하게 된다. Fig. 4는 X축 입자크기(μ m), Y축 먼지 배출구측의 입경 분포(%)를 나타낸 그래프로 대략 36 μ m를 전후로 135°의 모델이 큰 입경의 먼지에 대한 포집이 더 우수하다는 것을 볼 수 있다.

Table 4 Total pressure(unit:Pascal)

	Inlet	CleanAirOut	DustOut
90Degree	955.6776	219.8832	115.1055
105Degree	1079.888	217.9439	131.4727
120Degree	1170.468	212.7844	145.4506
130Degree	1230.066	212.9317	160.5734
135Degree	947.1918	218.3841	137.8642
145Degree	1335.003	209.9821	150.1191
150Degree	1316.852	209.8122	158.0537
165Degree	1468.747	205.4757	176.1428

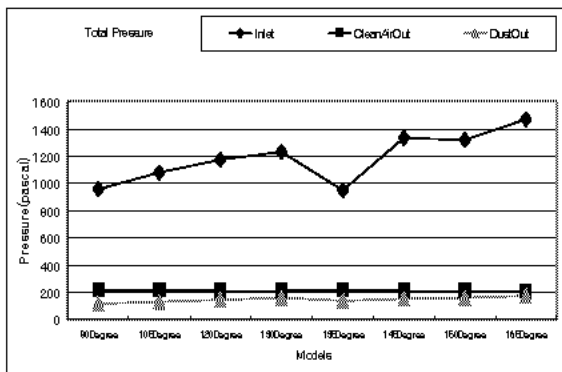


Fig. 3 Chart of total pressure

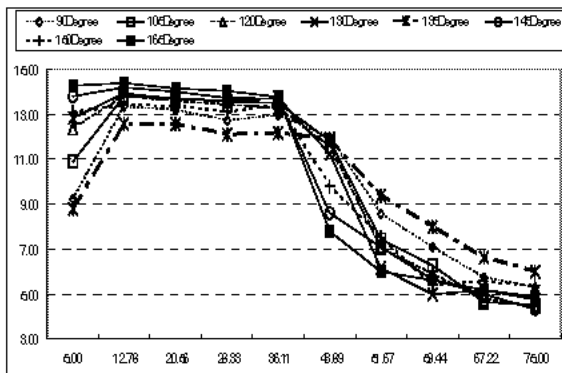


Fig. 4 Profile of particle diameter at dustout

3.2.2 원통형 실린더 길이 변경에 따른 결과

원통형 실린더는 싸이클론에서 나선형 유도깃을 통해 원심력이 형성된 유동이 먼지 배출구 측으로 효과적으로 유도할 수 있는 형상 인자로서 길이를 길게 하면 먼지 배출 효과는 커질 수 있으나 압력강하를 유발할 수 있다.

Table 5와 Fig. 5는 X축 압력크기(P), Y축 각도(Degree)로 보는 바와 같이, 길이를 늘여줌에 따라 발생할 것으로 예측되는 압력강하는 눈에 띄게 발

생하지는 않았으나, 이는 실린더부의 길이 변경이 크지 않았기 때문으로 생각된다. 이에 비해, Fig. 6는 X축 입자크기(μm), Y축 먼지 배출구측의 입경분포(%)로 먼지 배출구의 입경분포는 약 $40\mu m$ 이상의 입자에 대해서 포집율이 기본형보다 낮다는 것을 알 수 있다. 이는 먼지가 배출되는 유로의 범위가 확대됨으로써 유로 형성, 속도 구배 등에 유리해진 이유로 사료된다.

Table 5 Total pressure(unit:Pascal)

	Inlet	CleanAirOut	DustOut
135Degree(70)	947.1918	218.3841	137.8642
72L	1072.834	95.75288	145.0286
74L	912.4514	51.70661	122.9755

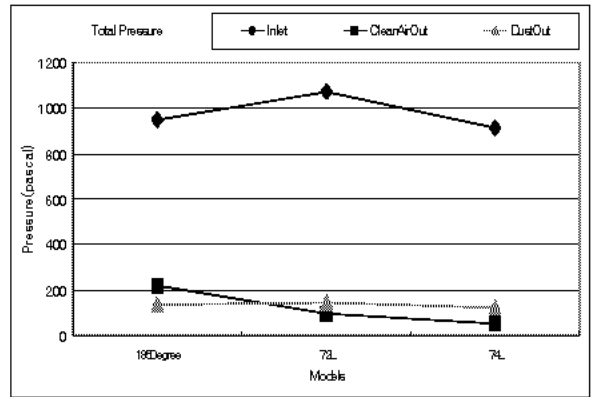


Fig. 5 Chart of total pressure

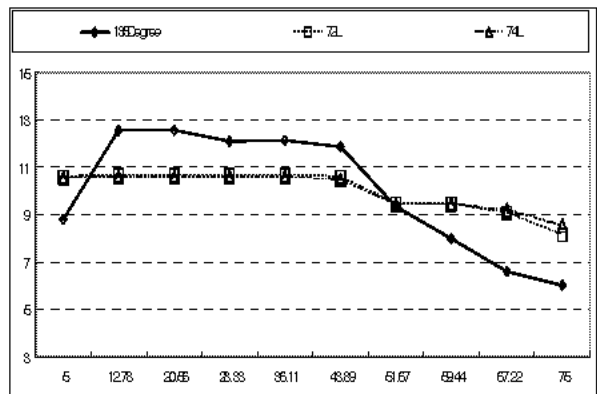


Fig. 6 Profile of particle diameter at dustout

3.2.3 내경 변경에 따른 결과

싸이클론의 내경의 변화는 기본형 모델에 대해서 나선형 유도깃을 통해 형성될 원심력의 크기 및 유로 형성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

Table 6 total pressure(unit:Pascal)

	12D	14D	16DP	18D	20D
Inlet	1394.8	1334.8	947.2	1220.4	1219.3
CleanAir Out	151.23	186.67	218.38	222.44	230.23
DustOut	167.22	166.16	137.86	159.93	162.87

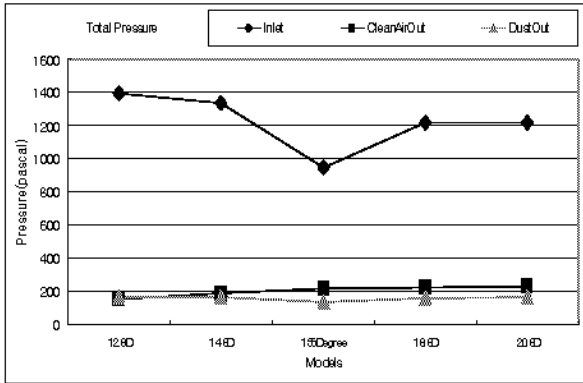


Fig. 7 Chart of total pressure

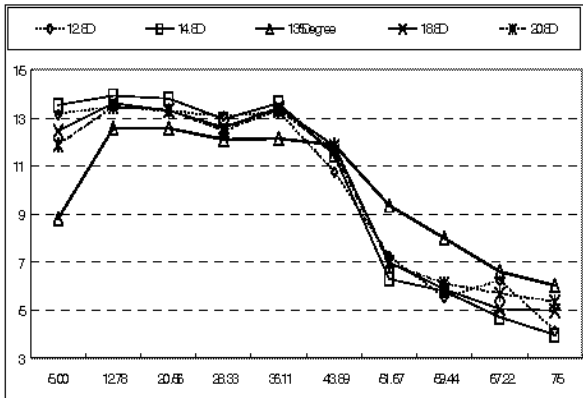


Fig. 8 Profile of particle diameter at dustout

입구측 형상은 압력강하 등 싸이클론 성능에 영향을 미치는 인자 중의 하나라, Table 6, Fig. 7을 통해 내경을 크게 하는 경우에 입구측 유로 형상에 기여하여 압력강하가 더 적어지는 것을 볼 수 있다. 하지만, 먼지 배출구측에 있어서 영향은 Fig. 8은 X축 입자크기(μm), Y축 먼지 배출구측의 입경 분포(%)로 입경 분포 등을 통해 보이는 것과 같이 큰 사이즈의 먼지에 있어서 효율은 떨어짐을 알 수 있다. 이는 입구측 유로 형상은 원활히 이루어져 압력 강하 등에서 이점을 보였으나, 먼지배출구 측 형상에 있어서는 변화가 주어지지 않았기 때문에, 속도 크기, 입경 분포 등에서 내경 변화의 효과가 영향을 주지 못 했기 때문이다.

3.3 실험 결과

상기 수치해석결과를 토대로, HJ-135Degree모델이 $30\mu\text{m}$ 이상의 입자 포집율에서 좋은 결과를 보여 줌과 동시에 압력강하도 상대적으로 양호하여 기존 품과 실험비교를 실시하였다.

시험은 KS R 1041에 충실히 따르는 시험설비를 Fig. 9, Fig. 10과 같이 제작, 청정효율 및 통기저항 실험을 실시하였다.

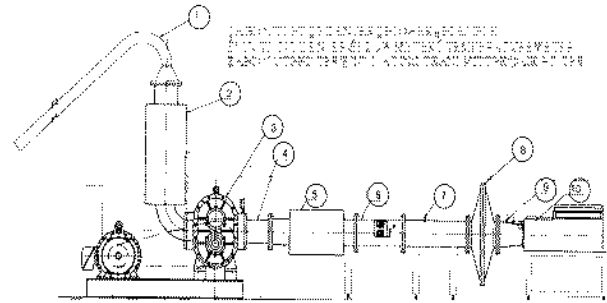


Fig. 10 Diagram of test unit

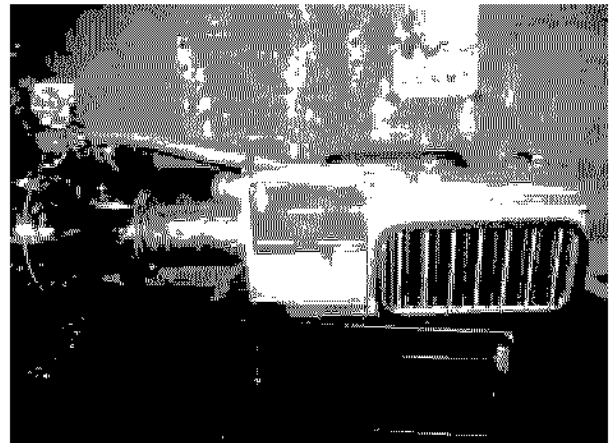


Fig. 10 Photo of test assembly

Table 7, Table 8은 통기저항 및 청정 효율 시험의 조건표이다. 청정효율실험의 경우, 가동시간은 3시간이며, 기준필터의 질량, 엘리먼트의 질량, 공급될 먼지의 무게를 먼저 측정하고, 먼지혼합비는 일정하게 유지한다. 청정효율의 계산식은 다음 식(13)과 같다.

Table 7 Conditions of ventilation resistance

flow rate (m^3/min)	percent(%)	condition
30.0	50.0	temperature : $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ relative humidity : 50%
45.0	75.0	
60.0	100.0	
75.0	125.0	

Table 8 Conditions of clean efficiency

flow rate (m ³ /min)	dust weight(g/m ³)
30.0	1.0+ 0.05

$$Efficiency(\%) = 1 - \frac{\text{Increased weight of filter}}{\text{total supplied dust weight}} \quad (13)$$

Table 9 Test results

item	new	old	result
ventilation resistance	23.9mbar	24.2mbar	good
clean efficiency	99.91%	99.91%	good

상기 실험장치 및 조건에 따라, 실험한 결과 기존 도입품에 비해 동등 이상의 성능을 발휘하는 것을 Table 11에서 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 나선형 유도깃의 형상변경, 원통형 실린더 길이 치수 변경 및 싸이클론 내경 치수 변경 등의 형상 인자 변화를 통해 총 14개 수치모델을 확보하여, 압력 강하, 속도분포, 먼지 배출구 측 입경 분포 등에 대해 수치해석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 나선형 유도깃의 형상 변경의 경우, 유도깃의 회전각이 클 수 록 입구 측 유로 형성 확보가 어려워 압력 강하 등의 현상이 나타났으나, 135°의 회전각인 경우, 압력강하, 약 30 μ m이상의 먼지배출에서 우수하다.
- 2) 원통형 실린더의 길이의 치수변경은, 먼지 배출구의 유로 형성에 영향을 주어 속도 크기, 먼지배출율도 증가한다.
- 3) 싸이클론 내경 치수 변경의 경우, 압력강하면에서는 내경 치수를 증가할 수 록, 즉 싸이클론을 크게할 수 록 좋아지지만, 먼지배출에서 큰 먼지 입자에 대한 배출율은 안 좋아진다.
- 4) 수치해석을 통한 결과를 토대로, 실험한 결과 기존 도입품에 비해 청정효율 및 통기저항 실험에서 동등이상의 결과를 나타내었다.

본 연구의 수치해석을 통해 나선형 유도깃의 회전각, 원통형 실린더 길이 치수 변경 등이 디젤 엔진 흡입용 공기정화기의 성능에 영향을 미치는 중

속적 요소이며, 이 부분에 대한 다양한 조건에 따른 수치해석 및 실험이 필요하다는 것을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Zhou, L. X. and Soo. S. L., 1990, "Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator", Powder Technology, Vol.63, pp. 45-53
2. 전영남, 엄태인, 1996, "싸이클론 집진기의 수치해석적 연구", 한국대기보전학회지 제12권 제1호, pp. 43-53
3. Alamgir H. Jamal N., Kerry Mc, and Greg R., 2003, "CFD Investigation of Particle Deposition and Distribution in a Horizontal Pipe", 3rd International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Csiro Melbourne, Australia, Dec. 10-12, pp. 66-72
4. Fluent Press, 2004, "Fluent Users Guide Vol.14", Fluent Co., America
5. 명현국, 2004, "CFD 입문", 문운당, 서울, pp.299-305, 306-312