CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 20, No. 3, September 2014, pp. 263~268

청정환경기술

사이클론 집진장치 내부의 압력강하에 대한 전산해석과 이론식의 결과 비교

현대근, 장혁상*

영남대학교 환경공학과
712-749 경북 경산시 대학로 280

(2014년 7월 10일 접수; 2014년 8월 18일 수정본 접수; 2014년 8월 19일 채택)

Theoretical and Computation Analysis on the Pressure Drop in the Cyclone Dust Collector

Daegeun Hyun, and Hyuksang Chang*

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University
280 Daehak-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 712-749, Korea

(Received for review July 10, 2014; Revision received August 18, 2014; Accepted August 19, 2014)

요 약

본 연구에서는 집진성능이 다른 6개의 서로 다른 형상의 사이클론 집진장치 내에서 이루어지는 압력강하에 대해 기존이론식과 CFD (computational fluid dynamics) 해석 결과를 비교하였다. 이론 계산에는 Shepherd와 Lapple (1939, 1940), First (1950), Alexander (1949), Stairmand (1949) 그리고 Barth (1956)의 식이 사용되었다. CFD 연구에서 난류 유동을 해석하기 위해 standard k-epsilon 모델을 사용하였고, 유체는 25 ℃ 공기, 입구에서 유속은 10 m/s, 온도는 25 ℃로 설정하였다. CFD 해석 결과 사이클론의 형상과 관계없이 압력분포는 일정한 형태를 나타내었다. 하지만 이론식에 의한 추정의 경우 형상에 따른 압력강하는 큰 차이를 보였으며, 오직 First (1950)의 식이 CFD 결과와 아주 유사한 결과를 나타내었다.

주제어 : 전산유체역학, 사이클론 집진장치, 압력강하

Abstract : Using the CFD method, the pressure drop in 6 cyclone dust collectors of different shape were calculated. And the results were compared with results of the conventional theories. Equations of Shepherd and Lapple (1939, 1940), First (1950), Alexander (1949), Stairmand (1949), Barth (1956) were used in the theoretical calculation. In CFD calculations, we used standard k-epsilon model for analysis of turbulent flow, fluid is 25 ℃ air, the velocity at inlet is 10 m/s and the temperature is 25 ℃. In CFD analysis results, the pressure distributions along the flow showed similar patterns in different cyclone shapes. But the pressure drop distributions estimated on the conventional theories had big difference in different cyclone shapes. Only First's theory and CFD analysis showed similar results.

Keywords : Computational fluid dynamics (CFD), Cyclone dust collector, Pressure drop

1. 서 론

현대 사회의 가장 중요한 환경적 이슈는 미세먼지(PM_{10})라고 할 수 있다. 미세먼지는 직경이 10 μm 이하인 먼지를 뜻하며 자연적 발생보다는 화력 발전소, 자동차 매연 등과 같은 인위적 발생이 지배적인 입자이다. 미세먼지는 대도시의 시정을 악화시키며 인체에 유입될 시 다시 배출되지 않고 폐에 축척되어 폐 기능 악화 호흡기 장애 등과 같은 인체에 유해한 역할을 한다. 이러한 미세먼지는 발생원 자체에서 제어하기에 어려움이 있으므로 발생 후 집진장치를 통한 제어가 필요하다. 미세먼지 제어를 위한 집진장치로는 중력식 집진장치, 세정식 집진장치, 사이클론 집진장치, 전기 집진장치 등이 있다. 이 중 사이클론 집진장치는 제작, 운전비가 저렴하며 고압, 고온과 같은 악조건에서도 운전이 가능하며 공간의 제약을 비교적 적게 받기 때문에 산업 현상에서 널리 사용되는 집진장치이다[3].

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hschang@yu.ac.kr http://cleantech.or.kr/ct/

doi: 10.7464/ksct.2014.20.3.263 pISSN 1598-9721 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the therms of the Ceative Commens Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is property cited..

사이클론 집진장치의 설계를 위해서는 집진효율과 압력강하라는 2가지 요소가 존재한다. 집진효율은 사이클론 집진장치의 운전 원인이 되는 입자 제거의 측면에서 매우 중요하며, 압력강하는 운전 시에 필요한 동력비 계산에 사용되는 정보이기 때문에 실질적인 측면에서 매우 중요한 요소이다. 사이클론을 설계하기 전 두 가지 요소들의 사전 예측이 필요하다.

사이클론 집진장치의 설계에서 압력강하의 사전 예측은 동력비와 직접적인 관계를 가지므로 매우 중요하다. 동력비 예측을 위하여 선행 연구자들이 실험에 의해 정의한 경험적 이론식들이 사용되고 있지만, 서로 다른 이론식에 대한 압력강하의 계산 결과 값은 상이하게 나타나기 때문에 집진장치 설계 전 압력강하 예측을 위한 최적의 이론식을 찾기란 어려운 실정이다. 본 연구에서는 기존의 경험적 이론식과 computational fluid dynamics (CFD)를 이용하여 해석한 결과를 비교하여 압력강하 예측을 위한 최적의 이론식을 찾는 것을 목표로 두고 있다. CFD는 공학 분야에서 광범위하게 사용되는 학문으로서 자동차, 선박 등에서 유체의 저항을 최대한 줄이기 위한 설계, 반응기 내에서 반응 물질의 균일한 혼합을 위한 반응기 형상 설계 등의 유체 유동을 해석하기 위해 사용된다. 하지만 본 연구의 CFD 해석결과를 신뢰하기 위해서는 신뢰성 검증이 필요하다고 판단되며 이는 차후에 논의하도록 할 것이다.

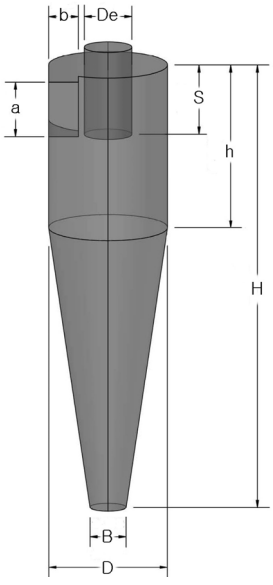


Figure 1. Schematics of cyclone.

2. 연구 방법

사이클론 집진장치는 유체의 유입방식에 따라 접선유입식과 축상유입식으로 나눌 수 있다. 본 연구에서 사용된 사이클론의 형상은 접선유입식이며 Figure 1에서 보는 것과 같다. 사이클론 집진장치는 사용목적과 형상을 제안한 연구자에 따라 형상의 비가 상이하며 본 연구에서는 Stairmand (1951), Swift (1969), Lapple (1951)에 의하여 제안된 형상을 사용하였으며 Table 1에 나타내었다[1].

2.1. 압력강하에 대한 이론식

사이클론 집진장치의 압력강하는 다음과 같다[1].

$$\triangle P = \frac{v_g^2 \rho_G \triangle H}{2 g \rho_L} \tag{1}$$

여기서 υ_g는 유입되는 가스의 속도, ρ_g는 가스의 밀도, g는 중력가속도, ρ_L은 액체의 밀도이다. ΔH는 집진장치 입구에서 속도수두로서 Shepherd와 Lapple (1939, 1940), First (1950), Alexander (1949), Stairmand (1949) 그리고 Barth (1956)에 의해 서로 다른 형태의 이론식으로 정의되어 있다.

2.1.1. Shepherd와 Lapple (1939, 1940)

Shepherd와 Lapple의 속도수두 식은 다음과 같다.

$$\triangle H = K \frac{ab}{De^2} \tag{2}$$

K는 상수로서 접선유입식 사이클론 집진장치에서 일반적으로 16으로 사용한다. 5가지의 이론식 중에 가장 간단한 형태로서 오직 입구의 면적과 출구의 직경만을 고려하고 있다.

2.1.2. First (1950)

First의 속도수두 식은 Shepherd와 Lapple의 식과 유사하며 사이클론의 몸체 직경과 높이를 고려해준 형태로서 다음과 같다.

$$\triangle H = \frac{ab}{De^2} \frac{12/Y}{[h(H-h)/D^2]^{1/3}} \tag{3}$$

Y는 상수로서 접선유입식 사이클론 집진장치에서 일반적으로 1로 사용된다.

Table 1. Cyclone standard designs

Source	Recommended duty	D	a/D	b/D	De/D	S/D	h/D	H/D	B/D
Stairmand (1951)	High efficiency	1	0.5	0.2	0.5	0.5	1.5	4.0	0.375
Swift (1969)	High efficiency	1	0.44	0.21	0.4	0.5	1.4	3.9	0.4
Lapple (1951)	General purpose	1	0.5	0.25	0.5	0.625	2.0	4.0	0.25
Swift (1969)	General purpose	1	0.5	0.25	0.5	0.6	1.75	3.75	0.4
Stairmand (1951)	High throughput	1	0.75	0.375	0.75	0.875	1.5	4.0	0.375
Swift (1969)	High throughput	1	0.8	0.35	0.75	0.85	1.7	3.7	0.4

2.1.3. Alexander (1949)

Alexander는 모든 압력손실이 유체유동의 운동으로 인해 발생한다고 가정하였으며 사이클론 높이에 대한 고려는 하지 않았고 몸체와 출구의 직경이 주된 변수이다. 이론식 중 유일하게 온도를 고려하였다.

$$\triangle H = 4.62\frac{ab}{D\,De}\left[\left\{\left(\frac{D}{De}\right)^{2n}-1\right\}\left\{\frac{1-n}{n}\right\}+f\left(\frac{D}{De}\right)^{2n}\right] \quad (4)$$

여기서 n, f는 다음과 같다.

$$n = 1-\left(1-\frac{(0.394\,De)^{0.14}}{2.5}\right)\left(\frac{T}{283}\right)^{0.3} \quad (5)$$

$$f = 0.8\left[\frac{1}{n(1-n)}\left(\frac{4-2^{2n}}{3}\right)-\left(\frac{1-n}{n}\right)\right] + 0.2\left[(2^{2n}-1)\left(\frac{1-n}{n}\right)+1.5(2^{2n})\right] \quad (6)$$

D_C는 사이클론 직경(cm), T는 절대온도(K)이다.

2.1.4. Stairmand (1949)

Stairmand의 속도수두 식은 위의 식보다 좀 더 많은 변수들을 포함하고 있으며 다음과 같다.

$$\triangle H = 1+2\phi^2\left(\frac{2(D-b)}{De}-1\right)+2\left(\frac{4ab}{\pi De^2}\right)^2 \quad (7)$$

여기서 ϕ는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{-\left(\frac{De}{2(D-b)}\right)^{1/2}+\left(\frac{De}{2(D-b)}+\frac{4GA}{ab}\right)^{1/2}}{\frac{2GA}{ab}} \quad (8)$$

G는 마찰계수로서 0.005를 사용하며, A는 회전하는 유체에 노출된 사이클론의 내부 표면적이며 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2-De^2)+\pi Dh+\pi De\,S + \frac{\pi}{2}(D+B)\left[(H-h)^2+\left(\frac{D-B}{2}\right)^2\right]^{1/2} \quad (9)$$

2.1.5. Barth (1956)

Barth의 속도수두 식은 Stairmand의 식과 같이 다른 식에 비하여 많은 변수를 포함하고 있으며 ε_e, ε_t로 표현된다.

$$\triangle H = \left(\frac{u_i}{v_i}\right)^2\left(\frac{4ab}{\pi De^2}\right)^2[\epsilon_e+\epsilon_t] \quad (10)$$

ε_e는 사이클론으로 유입될 때 손실과 내부마찰, 운동에너지에 대한 손실이며, ε_t는 출구에서의 손실이다.

$$\epsilon_e = \frac{De}{D}\left\{\frac{1}{[1-(u_i/v_i)(H-S)(2/De)\lambda]^2}-1\right\} \quad (11)$$

$$\epsilon_t = \frac{4.4}{(u_i/v_i)^{2/3}}+1 \quad (12)$$

$$\frac{u_i}{v_i} = \frac{(De/2)(D-b)\pi}{2ab\alpha+(H-S)(D-b)\pi\lambda} \quad (13)$$

$$\alpha \cong 1-1.2b/D \quad (14)$$

여기서 λ는 마찰계수로서 일반적으로 0.02로 사용된다.

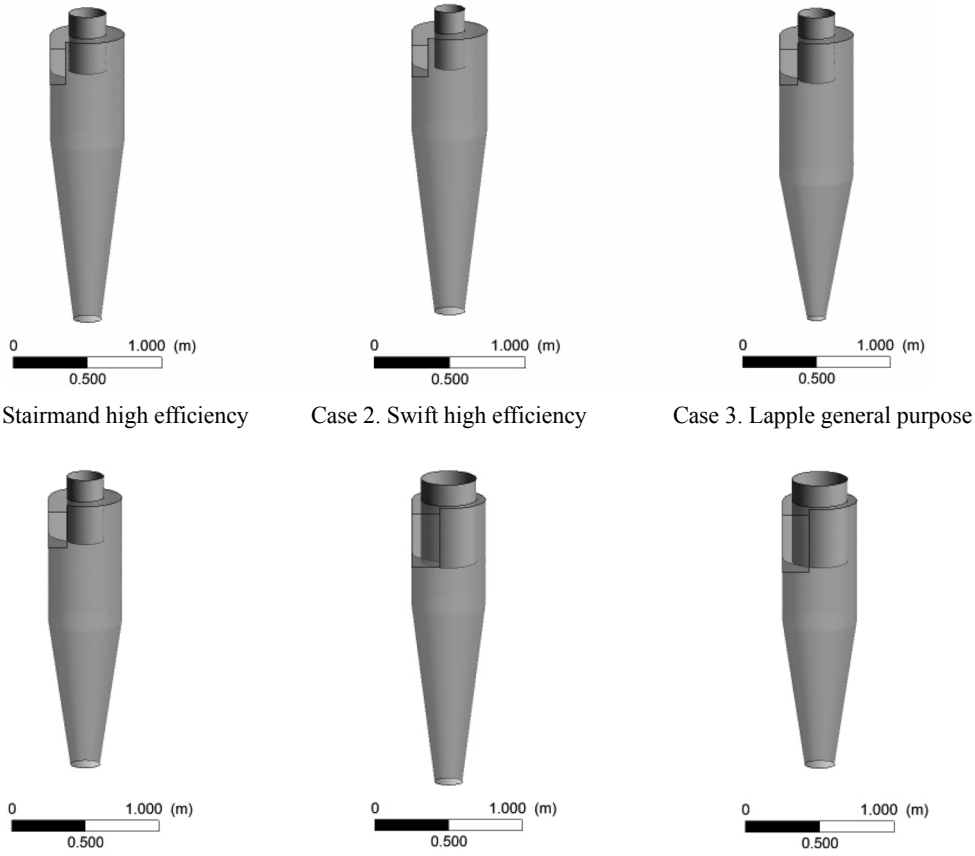
2.2. 압력강하에 대한 CFD 연구

CFD 연구를 진행하기에 앞서 전술한 바와 같이 해석 결과의 신뢰성 확보가 중요하다. 가장 확실한 방법은 CFD 결과와 실험결과를 비교하는 것이 바람직하지만, 시간적, 금전적 제약이 따르기 때문에 선행 연구자들의 사례를 토대로 신뢰성을 검토하였다. Gimbun et al.[2]은 사이클론 집진장치에서 온도와 유체의 유입속도에 따른 압력강하에 대한 CFD 연구를 실시하여 M. Bohnet[4]의 실험결과와 비교하였고, Narasimha et al.[5]와 Chuah et al.[6]도 사이클론 집진장치에 대한 CFD 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 선행 연구자들의 CFD와 실험결과 값은 매우 유사하게 나타났으므로 사이클론 집진장치에 대한 CFD 해석결과를 신뢰할 수 있다고 판단된다. 사이클론 이외에도 Shin et al.[7]은 역전기투석 장치, Seo and Chang [8]은 SCR 시스템 대한 CFD 해석을 진행한바 있으며, 이와 같이 여러 분야에서 CFD에 대한 연구가 실시되고 있다.

2.2.1. 해석형상 및 작동원리

접선유입식 사이클론 집진장치에는 1개의 입구와 2개의 출구가 존재한다. 입구는 사이클론 집진장치 몸체의 윗부분에 직사각형 형태로 존재하며 이곳으로 입자를 포함하고 있는 유체가 유입된다. 유입된 유체는 사이클론 집진장치 안에서 나선 운동으로 인해 외부 소용돌이가 형성되며 중력 방향으로 유체가 이동하여 하부로 도달하게 된다. 이때 원심력에 의하여 입자들은 하부에 존재하는 더스트 박스에 집진되며, 집진되지 못한 먼지와 유체는 내부 소용돌이를 형성하며 상부로 올라간 후 출구로 빠져나가는 방식으로 운전 된다.

사이클론 집진장치는 사용목적에 따라 그 형상이 상이하다. 사용목적은 크게 고효율 형상, 고용량 형상, 고효율과 고용량의 중간단계의 일반적인 형상 이렇게 3가지로 나뉘게 된다. 해석을 위한 사이클론 집진장치의 형상은 Figure 2에서 보는 것과 같으며, 사용목적과 설계요소를 제시한 연구자에 따라 서로 다른 6가지의 형상으로 나누어져 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 형상을 제시한 연구에 따라 약간의 차이는 존재하



Case 1. Stairmand high efficiency　Case 2. Swift high efficiency　Case 3. Lapple general purpose

Case 4. Swift general purpose　Case 5. Stairmand high throughput　Case 6. Swift high throughput

Figure 2. Schematics of each case.

지만 동일한 목적을 가질 경우 그 형상은 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 고효율이 목적인 형상에서는 유속을 높이기 위하여 입구와 출구의 면적이 비교적 작은 것을 볼 수 있고, 고용량이 목적인 형상에서는 입구와 출구의 면적이 다른 목적의 형상들보다 비교적 큰 것을 볼 수 있다.

이러한 6가지 형상에 대한 CFD 해석을 실시하기 위하여 사이클론 집진장치 몸통의 직경(D)을 0.5 m로 설정하였으며 나머지 입구, 출구 등의 치수는 길이의 비를 통하여 계산한 값들을 사용하여 형상을 설계하였다.

2.2.2. 해석모델 및 경계조건

해석 프로그램으로는 ANSYS CFX v14.0을 사용하였으며, 본 연구에서 몇 가지 가정을 바탕으로 해석을 실시하였다. 첫 번째, 사이클론 집진장치는 단열상태라고 가정하였다. 두 번째, 사이클론 집진장치의 내부 표면 거칠기에 따른 압력손실은 없다고 가정하였다. 사이클론 집진장치의 재질에 따라 표면 거칠기는 다를 것이고 선행 연구자들의 연구에서도 표면 거칠기에 대한 언급은 극히 드물기 때문에 본 연구에서도 표면 거칠기를 고려하지 않고 해석을 실시하였다. 세 번째, 해석에 사용된 유체는 비압축성 유체로 가정하였다. 비압축성 유체는 유동 중에 밀도가 일정하게 유지되는 유체를 뜻한다. 본 해석에서는 사이클론 집진장치 내부에서 온도 변화가 존재하지 않기 때문에 유체의 밀도와 점도 변화가 없으며, 유속 조건 또한 높지 않기 때문에 비압축성 유체라고 가정할 수 있다고 판단하였다. 전산해석을 위해 사용된 모델과 경계조건은 모든 형상에 대하여 동일하게 적용하였으며 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Model and boundary conditions in CFD analysis

Computational conditions		
Model	Heat transfer	Isothermal (25 ℃)
	Turbulence	Standard k-epsilon
Turbulence numerics		First order
Advection scheme		High resolution
Fluid		Air at 25 ℃
Boundary conditions		
Inlet		10 m/s
Outlet		Relative pressure (0 Pa)
Wall		No slip wall

CFD는 모델과 경계조건에 대하여 해석 결과에 확연한 차이가 존재한다. 그렇기 때문에 현재 CFD 해석에서 사용된 모델에 대한 타당한 이유가 필요할 것이다. 사이클론 집진장치의 경우 내부에서의 온도변화가 거의 희박하기 때문에 Isothermal 모델을 선택하여 주었다. 난류 모델은 난류 특성에 따라 다양

한 해석 모델들이 존재한다. 본 해석에서는 가장 대표적으로 사용되는 RANS (reynolds averaged navier stokes) 계열의 Standard k-epsilon모델을 사용하여 해석을 실시하였다[9]. 경계조건의 경우 6가지 형상에 대하여 동일한 유속 조건을 주어야 같은 조건에서의 압력강하를 볼 수 있을 것으로 판단되어 10 m/s로 가정하여 설정해주었으며 출구에서 압력조건은 내부 유동에 영향을 주지 않는 조건인 0 Pa로 설정하였다. 벽면의 경우 유체역학적으로 볼 때 벽면에서 유체의 유속은 0이기 때문에 No slip wall로 설정을 해주었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 사이클론 집진장치 내부의 압력분포

본 연구의 목적인 압력강하 값의 비교에 앞서 사이클론 집진장치 내부에서 압력분포를 살펴볼 필요가 있다고 판단되어, Figure 3에 집진장치 내부에서 5부분의 단면에 대한 압력을 나타내었다. Case별로 동일한 지점에서 압력 값은 상이하겠지만 6가지 case 모두 입구 영역에서 가장 높은 압력을 나타내고, 출구에 도달할수록 압력이 점차 낮아져 출구에서 가장 낮은 압력을 나타나는 것을 확인할 수 있다. 외부 소용돌이가 형성되는 사이클론 집진장치의 벽면에서 전체적인 압력값은 내부 소용돌이 영역보다 상대적으로 높은 것으로 관찰된다. 이는 유체역학적 관점에서 유체가 벽면에 가까워질수록 속도는 감소하며 벽면에서의 유속은 0이라고 정의되며, 베르누이 방정식에 의거하여 유속과 정압은 반비례 관계를 보이기 때문이라고 추측할 수 있다. 출구에서 가장 낮은 압력을 나타내는 원인 또한, 사이클론 집진장치의 경우 출구 부분에서 가장 높은 상승기류가 형성되어 유속이 가장 높기 때문이라고 판단할 수 있다.

3.2. CFD와 이론식의 결과 비교

사이클론 집진장치 내부의 압력분포는 위에서 언급한 바와 같으며, 이제는 선행 연구자들의 이론식을 이용하여 계산된 결과 값과 CFD로 얻어진 결과 값을 비교할 것이다. CFD에서의 압력강하 값은 사이클론 집진장치의 입구와 출구 압력의 차이로 계산하였다. 비교를 위하여 Table 3에는 그 값들을 수치로 나타내었으며, 유사성을 쉽게 판단하기 위하여 Figure 4에는 결과 값을 그래프로 나타내었다.

Table 3의 계산 결과를 보면 각 식에 따른 결과 값이 아주 상이한 것을 볼 수 있다. 이러한 결과가 나타난 이유는 각 식을 제시한 연구자에 따라 실험 환경이 다를 것이며 식에서 요구하는 항들이 서로 많은 차이를 가지기 때문이라고 추측할 수 있다. 하지만 그 중 비슷한 결과 값을 가지는 식들도

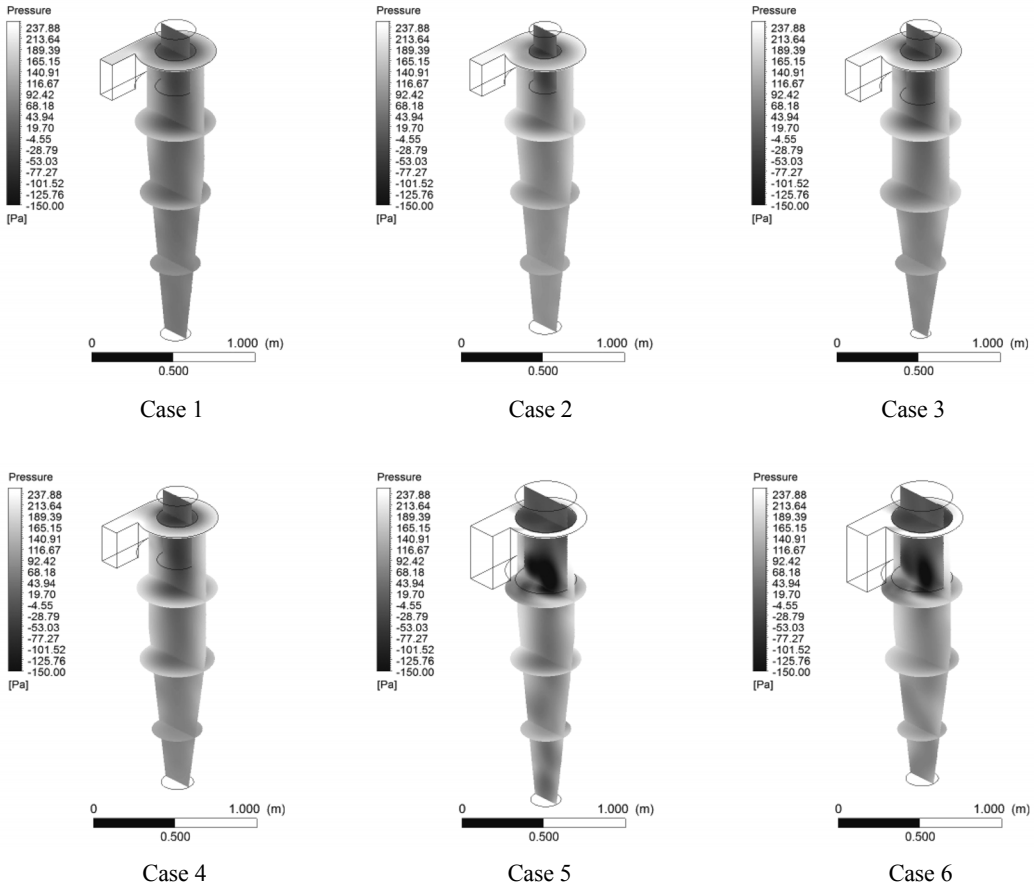


Figure 3. Pressure distribution of each case.

Table 3. Comparison of theoretical and computation analysis (unit : Pa)

Case	CFD	Shepherd and Lapple (1939)	First (1950)	Alexander (1949)	Stairmand (1949)	Barth (1956)
Case 1	178.85	377.63	182.30	325.22	308.82	319.09
Case 2	206.37	545.20	269.31	503.85	426.49	480.95
Case 3	207.54	472.03	223.02	406.52	326.99	396.81
Case 4	212.26	472.03	233.17	406.52	331.42	409.13
Case 5	236.26	472.03	227.87	348.60	185.77	333.08
Case 6	216.69	469.91	234.39	347.05	196.41	334.20

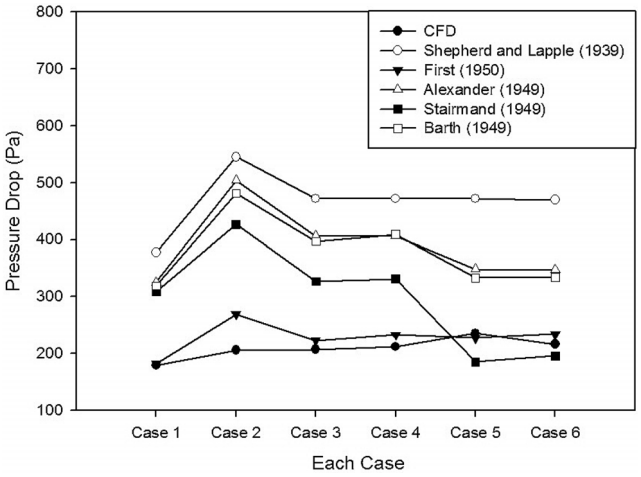


Figure 4. Graph of each case results.

존재를 한다. Alexander (1949)와 Barth (1956)가 그에 해당하며 두 식의 결과 값이 아주 유사한 것으로 나타났다. Shepherd와 Lapple (1939)의 결과 값은 다른 식들의 결과 값에 비해 가장 높게 나타났으며, Stairmand (1949)의 결과 값은 다른 식에 비하여 형상에 따라 변동이 가장 큰 것으로 나타났다. CFD 결과와 가장 유사한 결과 값을 나타낸 식은 First (1950)의 식이 되겠다. 전체적으로 CFD 해석결과와 이론식의 결과에 대한 차이를 확인해 보면 가장 큰 차이를 보이는 식은 Shepherd와 Lapple (1939)의 식으로 최대 338.83 Pa이라는 아주 큰 차이를 나타냈다. 전체 식 중에서 가장 유사한 결과를 가지는 Fist (1950)의 식에 대해서는 최대 62.94 Pa, 최소 3.45 Pa이라는 아주 적은 차이를 가지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

사이클론 집진장치의 설계에서 가장 중요한 요소는 집진효율과 동력비이다. 본 논문은 이 중 동력비와 아주 밀접한 연관을 가지는 압력강하에 대한 연구를 실시하였다.

사이클론 집진장치에 대하여 선행 연구자들이 제시한 5가지 경험적 이론식과 CFD를 이용한 해석결과와 비교를 실시하였으며, 사이클론 형상에 대해서는 사용목적에 따라 연구자들이 제시한 서로 다른 6가지 형상에 대하여 연구를 진행하였다.

전산해석 결과 다른 형상을 가진 사이클론에 대하여 압력분포는 서로 유사하게 나타났다. 그 이유는 사이클론 집진장치의 크기는 달라도 유체가 내부에서 형성하는 유동장은 서로 유사하기 때문이라고 추측할 수 있다. 이론식과의 결과 비교에 대하여는 First (1950)의 경험식으로 계산한 결과 값이 CFD 결과와 아주 유사하게 나타났으며 6가지 형상에 대하여 최대 62.94 Pa, 최소 3.45 Pa이라는 아주 적은 차이를 가지는 것을 알 수 있다. 차후 사이클론 집진효율에 대한 실험결과, 이론식, 전산해석에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

본 연구는 사이클론 집진장치 설계에서 동력비 예측을 위해 적용 가능할 것으로 예상된다.

감 사

이 논문은 2014년도 정원이앤씨의 연구비 지원으로 수행되었습니다(No. 214C000450).

References

1. Leith, D., and Mehta, D., “Cyclone Performance and Design,” *Atmos. Environ*., **7**(5), 527-549 (1973).
2. Gimbun, J., Chuah, T. G., Fakhru’l-Razi, A., and Choong, T. S. Y., “The Influence of Temperature and Inlet Velocity on Cyclone Pressure Drop : a CFD Study,” *Chem. Eng. Proc.: Process Intensificat.*, **44**(1), 7-12 (2005).
3. Wark, K., Warner, C. F., and David, W. T., Air Pollution : Its Origin and Control 3rd Edition, Addison-Wesley inc., 1998.
4. Bohnet, M., “Influence of the Gas Temperature on the Separation Efficiency of Aerocyclones,” *Chem. Eng. Proc.: Process Intensificat*., **34**(3), 151-156 (1995).
5. Narasimha, M., Brennan, M. S., Holtham, P. N., and Napier-Munn, T. J., “A Comprehensive CFD Model of Dense Medium Cyclone Performance,” *Minerals Eng*., **20**(4), 414-426 (2007).
6. Chuah, T. G., Gimbun, J., and Choong, T. S. Y., “A CFD Study of the Effect of Cone Dimensions on Sampling Aerocyclones Performance and Hydrodynamics,” *Powder Technol*., **162**(2), 126-132 (2006).
7. Shin, D. W., Kim, H. K., Kim, T. H., Park, J. S., and Jeon, D. H., “Numerical Analysis for the Effect of Spacer in Reverse Electrodialysis,” *Clean Technol*., **19**(1), 1-7 (2013)
8. Seo, M. H., and Chang, H., “Computational Study on Design of the AIG for the Enhancement of Ammonia Injection in the SCR System,” *Clean Technol*., **18**(4), 410-418 (2012)
9. ANSYS, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS inc., 2011.