

# 사이클론의 작동온도가 압력손실에 미치는 영향에 관한 연구

곽지영\* · 송명준\*\* · 이 열\*\*\*†

## A Study on Effects of Operating Temperatures of Cyclone on Pressure Drop

Ji Young Kwak\* · Myung Jun Song\*\* · Yeol Lee\*\*\*†

### ABSTRACT

A numerical study was performed to observe the relation between internal flow characteristics and operating temperatures in a Lapple cyclone. The present numerical results agree reasonably well with previous experimental and numerical results. As the operating temperature increases, the pressure drop decreases due to decrease of wall shear stress and tangential velocities. A detailed comparison of pressure drops in the cyclone between theoretical prediction models and the present numerical simulations is also presented for wide range of operating temperatures.

### 초 록

Lapple 방식의 사이클론 내부유동 특성과 작동온도와의 연관성이 수치해석적으로 관찰되었다. 수치 계산의 결과는 과거 실험적/수치해석적 연구결과와 좋은 일치율을 보였다. 사이클론 작동온도의 상승으로 벽면전단응력과 접선방향속도가 감소되어 압력손실이 저감되는 것이 관찰되었으며, 아울러 다양한 작동온도 조건에서 수치해석의 결과와 이론적 예측모델들의 압력손실 결과가 비교 분석되었다.

Key Words: Cyclone(사이클론), High Temperature(고온), Pressure Drop(압력강하)

### 1. 서 론

사이클론은 내부에 유입되는 유동에 포함된 입자의 원심력을 이용하여 입자를 기체와 분리하는 집진장치이다. 사이클론은 간단한 구조로 그 설치비용이 적고[1] 고온, 고압, 부식성 작동유체를 수용할 수 있어[2], 석탄가스화 복합발전(IGCC) 및 가압유동층(PFBC) 복합발전 등 다양

한 산업분야에서 응용되고 있다. 특히 발전 시스템에서 사이클론은 터빈 블레이드의 마모와 침식을 방지하는데 사용되며[3, 4], 대부분 고온, 고압의 조건으로 운용되고 있다.

사이클론의 성능은 운전조건에 민감하며[5], 사이클론의 중요한 성능지표인 집진효율과 압력손실은 서로 상충관계에 있다[3]. 특히 압력손실은 사이클론의 운전비용에 직결되므로 이에 대한 정확한 예측은 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 수치해석적 방법을 이용하여 사이클론 내부의 유동특성과 작동온도의 관계를 관찰하였다. 아울러 다양한 작동온도

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 한국항공대학교(원) 항공우주 및 기계공학과

\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: ylee@kau.ac.kr

와 유입속도에서 수치해석과 이론적 모델을 이용하여 계산한 압력손실의 결과가 비교 분석되었다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 해석 모델 및 방법

본 연구의 수치해석은 원통과 원추로 구성되는 전형적인 Lapple 사이클론에 대하여 수행되었다. 수치계산에는 상용코드인 Fluent 6.3이 응용되었으며, 난류모델은 Gimbun 등[6]이 제시한 바와 같이 1123 K까지의 고온조건에서도 그 정확도가 입증된 Reynolds Stress Model(RSM)이 사용되었다.

다음 Fig. 1에는 해석에 사용된 사이클론의 기하학적 형상 및 설계변수의 정의가 나타나 있다. 3차원 수치계산 격자의 수는 약 4만 8천개로 벽면근처와 복잡한 3차원 유동이 나타날 것으로 예상되는 사이클론의 유입구 및 주원통과 원추부 사이의 영역에는 격자가 조밀하게 구성되었다.

### 2.2 수치해석 결과 검증

본 연구에서 얻어진 수치해석의 결과는 과거 Wang 등[7]의 실험 및 수치해석 결과와 비교 검증되었다. 직경( $D$ )이 0.2 m인 Lapple 사이클론으로, 작동유체인 공기의 유입속도는 20 m/s, 출구압력은 대기압으로 설정하였으며, 본 연구에서는 고온조건을 유동특성에 주안점을 두고 유동내부에 입자는 포함시키지 않았다.

Figure 2는 Wang 등[7]의 연구와 동일한 조건

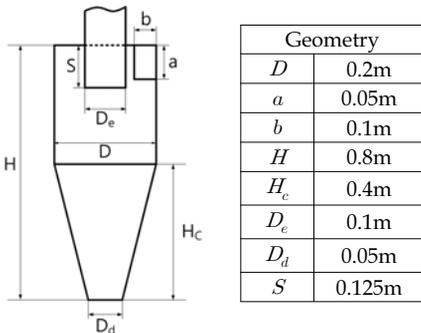


Fig. 1 Schematic of the Typical Lapple Cyclone

에서 수행된 본 연구의 수치해석 결과에서 세 가지 단면의 접선방향속도 분포도를 비교한 것으로 사이클론 내부유동의 주요 속도성분인 접선방향속도가 Wang 등[7]의 수치해석 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 추가적인 검증으로 Fig. 2에 제시된 사이클론 원통부 특정단면 B-B에서 원통부 반경방향의 접선방향속도 분포를 Wang 등[7]의 연구결과와 비교한 결과가 Fig. 3에 도시되어 있으며, 본 연구의 수치해석 결과가 기존 연구 결과와 정량적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 작동온도 변화

Figure 4는 사이클론에 유입되는 공기의 온도가 298K, 700K 그리고 1100K까지 증가할 때 사

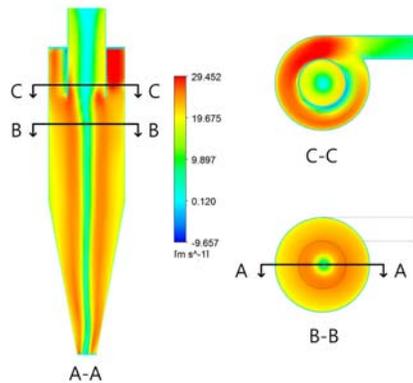
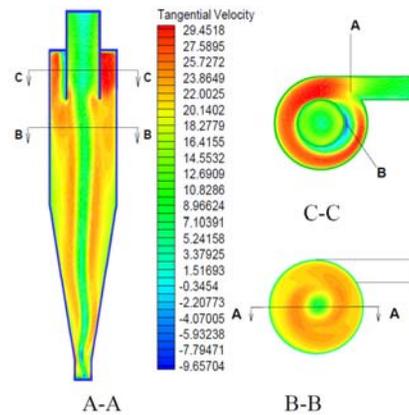


Fig. 2 Comparison of Tangential Velocity Contours

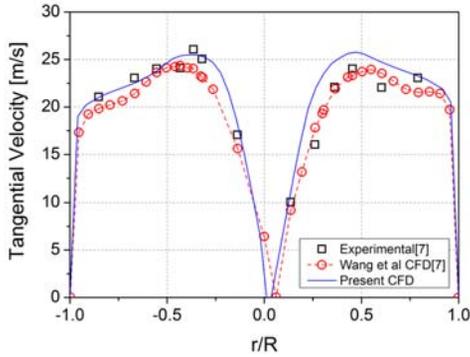


Fig. 3 Comparison of Tangential Velocity

이클론 원통부(B-B 단면)에서 접선방향속도 분포의 변화를 나타내고 있다. 사이클론의 작동온도 상승에 따라 증가된 기체의 점성은 벽면의 마찰계수를 증가시켜 유입되는 유동의 속도가 접선방향속도 성분으로 변환되는 비율의 감소를 유발한다[3]. 따라서 작동온도가 높을수록 원통부 내부 접선방향속도는 감소하여 벽면의 전단응력이 감소하는데, 이러한 경향이 다음 Fig. 5에 제시된 사이클론 벽면에서의 전단응력 변화로 나타나 있다. 또한 작동온도 상승으로 감소된 접선방향속도는 출구관까지 과급되어 정압으로 회복되지 못하고 마찰로 소멸된다[8]. 따라서 온도증가에 따라 접선방향 속도의 벽면 마찰손실이 적어지고 이는 사이클론 입구와 출구 사이의 압력손실 감소로 나타난다.

다음 Fig. 6은 세 가지 입구유동 온도에 대하여 입구속도의 변화에 대한 사이클론의 압력손실을 보여주고 있다. 과거 경험에 의거한 압력손실 예측모델[9]에서 제시된 바와 같이 압력손실

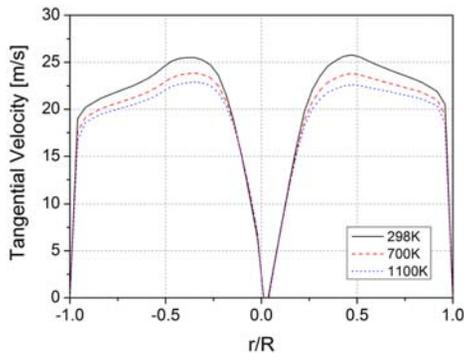


Fig. 4 Variation of Tangential Velocity for Different Gas Temperatures (Inlet Velocity = 20m/s)

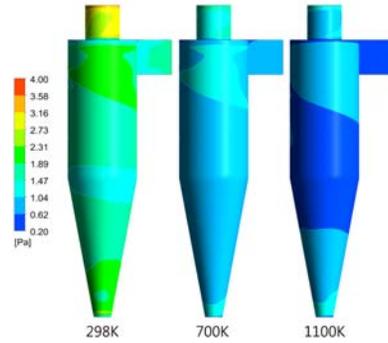


Fig. 5 Comparison of Wall Shear Stresses for Various Gas Temperatures (Inlet Velocity = 20m/s)

은 입구속도의 제곱과 비례하며(Fig. 6에 나타난 곡선접합 참조), 높은 온도조건에서도 그러한 관계는 그대로 유지하고 있다.

### 3.2 이론적 모델 비교

Figure 7은 세 가지 작동온도에서 유입속도에 따른 수치해석과 이론적 모델의 압력손실 계산 결과를 나타내고 있다. Chen 등[10]의 모델은 다양한 형상비, 입구유속, 입자농도 그리고 작동온도조건이 고려되었으며, 온도의 경우 최대 973K 조건에서 수행된 실험결과와 비교 검증된 바 있다. Chen 등[10]은 사이클론 내부에서 발생하는 손실을 유입부를 지난 기체가 팽창되어 발생하는 손실( $\Delta P_1$ ), 사이클론 내부의 상승기류가 출구관으로 유입되면서 수축으로 발생하는 손실( $\Delta P_2$ ), 회전유동으로 벽면에서 발생하는 마찰손실( $\Delta P_3$ ), 그리고 출구관에서 회전유동의 동압에너지가 정압으로 회복되지 못하고 소멸되는 손실( $\Delta P_4$ )로 구분하였으며, 각 손실항의 정의가 다

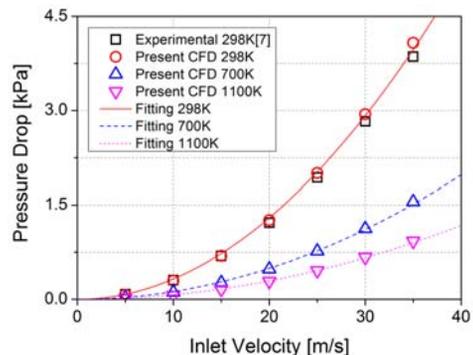
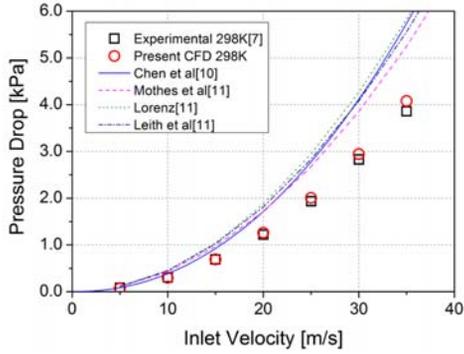


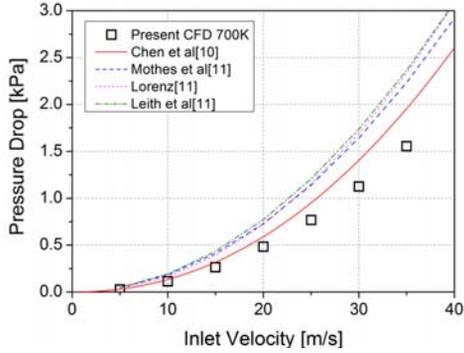
Fig. 6 Pressure Drop for Various Gas Temperatures

음 식 (1) ~ 식 (4)에 나타나 있다. Chen 등은 네 가지로 분류된 압력손실의 총합을 식 (5)와 같이 압력손실계수( $\xi$ )를 도입하여 무차원화 하였으며, 경험에 전적으로 의거한 모델[9]과 달리 제시된 압력손실계수는 입구속도에 대해 종속적으로 나타난다. 본 연구에서는 입자의 농도를 0으로 고려하여 수치해석과 운전조건을 동일하게 설정하고, 입구유속이 20 m/s인 조건에서 Chen

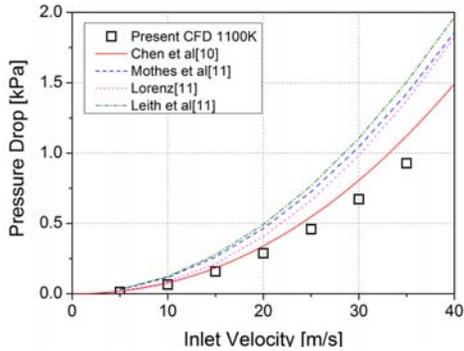
등의 모델을 이용하여 각 손실항의 크기와 비율을 계산하였으며, 그 결과가 다음 Table 1에 나타나 있다. 그 결과, 본 연구의 조건에서는 출구관 동압의 소멸( $\Delta P_4$ )이 가장 큰 손실항으로 나타났으며, 온도증가에 따라 그 손실량이 크게 감소하나 전체 압력손실의 약 70%인 비율은 크게 변화하지 않는 것이 관찰되었다.



(a) Operating Temperature = 298K



(b) Operating Temperature = 700K



(c) Operating Temperature = 1100K

Fig. 7 Comparison of Pressure Drop with CFD and Four Models

$$\Delta P_1 = \left(1 - \frac{2k_i \bar{b}}{1 + 1.33b\bar{d}_r}\right)^2 \frac{\rho_g V_i^2}{2} \quad (1)$$

$$\Delta P_2 = \left(4.5 \frac{1 - \bar{d}_r}{K_A^2}\right)^2 \frac{\rho_g V_i^2}{2} \quad (2)$$

$$\Delta P_3 = 1.11 f_0 K_A \bar{F}_s \bar{V}_{\theta w} \bar{d}_r^{-1.5n} \frac{\rho_g V_i^2}{2} \quad (3)$$

$$\Delta P_4 = \left[ \frac{\bar{V}_\theta^2}{(r_c \bar{d}_r)^n} + \frac{1}{K_A^2 (\bar{d}_r^2 - r_c^2)^2} \right] \frac{\rho_g V_i^2}{2} \quad (4)$$

$$\Delta P_{drop} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 = \xi \frac{\rho_g V_i^2}{2} \quad (5)$$

Chen 등의 모델 외에 Mothes 등, Lorenz, Leith 등의 이론적 모델 계산은 상용 프로그램인 CYCLONE[11]을 이용하였다. CYCLONE은 과거의 이론적 성능예측모델을 다양한 형상비와 운전조건에서 실험결과와 검증하였으며, 자세한 검증자료 및 관련 수식들은 참고문헌[11]에 기술되어 있다.

Figure 7(a)에는 상온조건의 입구유속에 따른 압력손실의 수치해석 결과와 이론적 모델 계산 결과, 그리고 Wang 등[7]의 실험결과가 서로 비교되어 있다. 예측모델들의 결과는 서로 유사하였으며 수치해석 결과가 이론적 모델 결과보다 실험결과와 더 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Figure 7(b), (c)에는 각각 700 K, 1100 K의 작동온도에서 다양한 입구유속에 대한 수치해석과

Table 1. Pressure Drop Components Calculated using Chen et al Model[10] (Inlet Velocity = 20m/s)

Temp		$\Delta P_1$	$\Delta P_2$	$\Delta P_3$	$\Delta P_4$
298K	Pa	159.3	6.752	362.4	1187
	%	9.28	0.39	21.12	69.21
700K	Pa	67.80	2.874	111.5	407.2
	%	11.50	0.49	18.91	69.10

Table 2. Standard Deviations of Pressure Drop

S.D.	298K	700K	1100K
Chen et al[10]	20.7%	13.1%	10.6%
Mothes et al[11]	15.9%	23.9%	28.8%
Lorenz[11]	23.1%	26.2%	24.2%
Leith et al[11]	19.9%	28.3%	33.5%

이론적 모델의 압력손실 결과가 서로 비교되어 있다.

네 가지 각 예측모델 결과의 정량적인 비교를 위하여 다음 식 (6)으로 정의되는 표준편차를 계산하였다. 이때 식 (6)에서  $\Delta P_{CFD,max}$  는 수치해석 결과의 압력손실 최대값을,  $\Delta P_{Model,p} - \Delta P_{CFD,p}$  는 이론적 모델과 수치해석 결과의 압력손실 차이를 의미한다.

표준편차의 결과비교를 나타낸 Table 2에서, 고온의 경우에는 Chen 등[10]의 결과가 타 모델과 비교하여 수치해석 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. CYCLONE 프로그램을 이용하여 계산한 세 가지 모델은 비슷한 결과를 보였으며, 상온조건에서 계산된 결과와 유사하게 압력손실을 과대평가하는 경향이 유지되었다. 또한 사이클론의 작동온도가 높아질수록 대체적으로 수치해석결과와 차이가 커지는 것이 관찰되었다.

$$S.D. = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{p=1}^n (\Delta P_{Model,p} - \Delta P_{CFD,p})^2}}{\Delta P_{CFD,max}} \times 100(\%) \quad (6)$$

#### 4. 결 론

고온조건에서 작동하는 Lapple 사이클론의 내부유동 특성을 수치해석적 방법으로 관찰하였다. 본 연구를 통하여 작동온도의 증가는 압력손실을 감소시키는 것으로 나타났다. 세 가지 온도조건에서 이론적 모델의 압력손실 계산결과는 다소 과대평가 되었으며, Chen 등의 모델로 계산한 압력손실에서 출구관 동압의 소멸이 주요 손실항으로 평가되었다. 상온조건에서 이론적 모델의 압력손실 결과는 서로 유사하였으나 고온의 작동조건에서는 Chen 등의 예측모델의 결과가 수치해석 결과와 가장 잘 일치하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 정진도, 이상권, Bohnet, M., “고효율 사이클론의 집진효율에 관한 연구,” 대한기계학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, 2003, pp.2227~2232.
2. Xiang, R., Park, S.H., Lee, K.W., “Effects of Cone Dimension on Cyclone Performance,” *Aerosol Science*, 2001, pp.549~561.
3. 정진도, “고온·고압 초 미세입자 제거용 사이클론,” 대한기계학회 2003년도 에너지 및 동력공학부문 추계학술강연/논문집, 2003, pp.112~122.
4. 최주홍, 정진도, “고온고압 집진기술,” 화학공학회지, 13권, 5호, 1995, pp.475~484.
5. 신미수, 김혜숙, 장동순, “고온 작동 싸이클론 유체역학적 거동 전산 연구,” 대한환경공학회지, 제31권, 제11호, 2009, pp.1033~1040.
6. Gimbut, J., Chuah, T.G., Fakhrlrazi, A., Choong, T., “The Influence of Temperature and Inlet Velocity on Cyclone Pressure Drop: a CFD Study,” *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 44, 2005, pp. 7~12.
7. Wang et al, “Numerical Study of Gas-solid Flow in a Cyclone Separator,” *Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, 2003, pp.371~376.
8. Hoffmann, A.C., Stein, L.E., *Gas Cyclones and Swirl Tubes*, 2nd ed., Springer, 2007.
9. Ramachandran et al, “Cyclone Optimization Based on a New Empirical Model for Pressure Drop,” Vol. 15, No. 2, 1991, pp.135~148.
10. Chen, J., Shi, M., “A Universal Model to Calculate Cyclone Pressure Drop,” *Powder Technology*, Vol. 171, 2007, pp.184~191.
11. Altmeyer et al, “Comparison of Different Models of Cyclone Prediction Performance for Various Operating Conditions using a General Software,” *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 43, 2004, pp.511~522.