

## 論文

## 오일입자 원심분리기 유동장의 수치해석적 연구

김상덕\*

A Numerical Study on the Flowfield of a Cyclone Separator  
for Oil Droplets

Sang-Dug Kim\*

## ABSTRACT

The cyclone separator is a simple device, which causes the centrifugal separation of materials such as droplets or particles in a fluid stream. The cyclone separator utilizes the energy obtained from fluid pressure and linear motion to create rotational fluid motion. This rotational motion leads the materials suspended in the fluid to separate from the fluid quickly due to the centrifugal force. The rotation is produced by the tangential or involuted introduction of fluid into the vessel. These materials may be droplets of fuel in blow-by gas through an engine. Droplets suspended in the feed liquid may separate according to size, shape, or density. And the change of part dimension in a cyclone separator can yield the its performance variation. The current study shows the influence of design parameters on the performance of a cyclone separator for blow-by gas.

**Key Words** : Cyclone separator(원심분리기), Oil droplet(기름방울), Two-phase flow(이상 유동), Rotational flow(회전유동)

## 1. 서 론

현재 전 세계적으로 환경 및 지구 온난화 문제가 크게 부각되고 있으며, 전 세계 온실 가스의 2%를 항공 산업에서 배출하고 있다. 항공 산업의 성장률을 고려할 때 2050년에는 약 3%를 차지할 것으로 전망된다. 이러한 이유로 항공 산업의 각계에서 친환경 효율성을 달성하기 위하여 항공 운항, 엔진, 지상 정비 등 가능한 모든 분야에서 친환경적 기술개발에 투자하고 있다[1].

특히, 대기오염 문제 관련하여 비행기 및 자동차 엔진에서 배출되는 각종 배기가스는 환경오염의 주범으로 알려져 있다. 엔진의 연소 후 배출

되는 배기가스뿐만 아니라, 노후 된 내연 기관의 피스톤과 실린더 사이의 기밀유지가 완전하지 못하게 되면 블로바이 가스(blow-by gas)가 발생될 수 있는데, 이 분출 가스에는 미연소 연료와 엔진 오일도 포함되어 있다. 블로바이 가스가 엔진 내부에 체류하게 되면 엔진 내부의 심각한 부식을 초래할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 흔히 엔진에서 대기로 방출한다. 이러한 대기 방출이 환경 문제가 되면서 대기 방출을 막는 방안이 추진되었고, CCV(Closed Crankcase Ventilation)의 장착이 의무화 되었다. 이러한 환경규제 강화에 따라 필요한 기술개발이 전 세계적으로 진행되고 있으며, 미래에는 환경 문제와 관련된 엔진 기능의 요구 사항이 더욱 많아질 것이다.

배출되는 블로바이 가스에는 엔진 오일 입자가 포함되어 있다. 이를 효과적으로 제거하기 위한 커먼레일(common rail) 디젤엔진용 CCV 시스템은 원심분리기 형태의 사이클론 분리기

2015년 8월 25일 접수 ~ 2015년 11월 15일 심사완료  
게재 확정(2015년 12월 10일)

\* 초당대학교 항공정비학과

연락처자, E-mail : sdkim@cdu.ac.kr

전라남도 무안군 무안읍 무안로 380

(cyclone separator)를 주로 사용한다. 이 원심분리기의 오일 제거 성능이 엔진의 성능 및 부식에 영향을 주므로, 원심분리기내의 유동 현상을 엄밀히 조사하고 성능에 영향을 줄 수 있는 설계 인자에 대한 연구가 필요하게 된다. 본 연구는 오일입자 제거(filtering)에 대한 CCV의 성능 시험 및 측정에 앞서, CCV 내부의 핵심 부품인 원심분리기 내의 유동장을 엄밀히 해석하고, 원심분리기의 중요 형상 변화가 오일 입자의 제거 성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

블로바이 가스가 원심분리기로 유입되어 내부의 원통(vessel) 형상을 따라 회전하며 흐를 때, 가스와 같이 유입된 상대적으로 무거운 물질(고체 입자, 엔진 오일, 혼합되지 않는 연료 등)은 큰 관성으로 인하여 원통을 따라 흐르는 가스의 유선을 가로지르게 된다. 결국, 이 무거운 입자들은 원심분리기 내부 회전유동의 중심에서 멀어지게 되고 원통 벽면에 부착되어 벽을 타고 아래로 흘러내리게 된다. 원심분리기는 산업적으로 다양한 응용분야에서 사용된다. 채광(mining), 광물처리공정(mineral processing), 석유화학(petrochemicals), 석유생산(oil production), 폐수(waste water), 식품가공(food processing), 제약(pharmaceuticals) 등의 분야에서 널리 사용되고 있다. Fig. 1은 일반적인 원심분리기의 개략적 형상을 보여주고 있다[2][3].

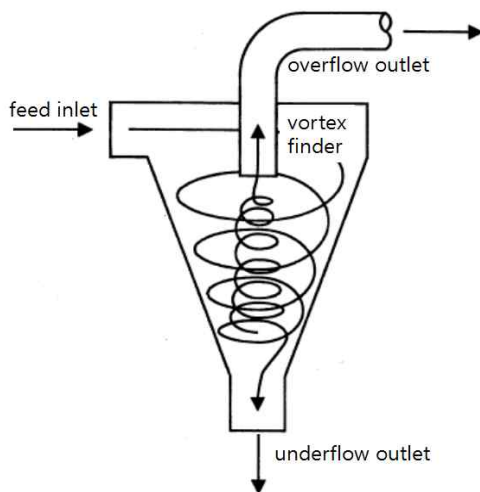


Fig. 1 Schematic diagram of cyclone system

원심분리기 성능에 영향을 주는 여러 가지 요소들 중에서 중요한 요소로는 오일 입자의 크기, 입자의 유입 속도 및 원심분리기 형상 등이 있

다. 입자의 크기가 크고 무거우면 원심분리기로 분리해내기 쉽다. 이것은 입자가 작고 가벼운 경우 원심분리기 내부 유동의 흐름을 따라 입자가 빠르게 적응해 움직이지만, 입자가 무거우면 큰 관성에 의해 원심분리기 내부 벽에 쉽게 부딪히기 때문이다. 원심분리기의 형상 변수로는 유입관(inlet) 및 유출관(outlet)의 길이, 원심분리기 원통(vessel) 직경 등이 있다. 원심분리기 원통 직경이 작아지면 내부 회전 유동의 회전 반경이 작아져서 운동량 보존에 의해 유동의 회전 속도가 증가한다. 회전 속도가 높아지면 오일 입자에 작용하는 원심력이 증가하게 되고 원심력이 크게 작용하는 입자들은 쉽게 원통 벽에 충돌하게 된다.

본 연구에서는 원심분리기의 여러 가지 형상 변수 및 입자 크기, 유입 속도의 변화에 따른 원심분리기 성능 변화를 살펴보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 유동장 해석을 위해 FLUENT 6.3 범용 소프트웨어[4]를 사용하였다. FLUENT는 복잡한 유동, 열전달, 물질전달 및 화학반응 등을 해석할 수 있는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 프로그램으로 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종 보존 방정식 등을 사용한다. 또한, 층류 및 난류, 비압축성 혹은 압축성 유동, 열전달 및 다상유동 등 다양한 유동 현상 해석에 사용되고 있다.

일반적으로 원심분리기 내부는 복잡한 3차원 비정상 난류 유동장이다. 원심분리기로 유입되는 가스의 속도가 크면 레이놀즈 수(Reynolds number)가 증가하게 되고 유동장의 난류 와류(turbulent eddy)의 크기가 작아진다. 이때 유동장을 엄밀히 해석하기 위해서는 보다 많은 계산 격자점이 필요할 뿐 아니라 정확도가 높은 난류 모델이 필요하게 된다. 하지만, 공학적인 필요와 효율성을 위하여 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용한 해석 방법이 널리 사용하고 있다. 이 방법을 사용하게 되면, 비정상 유동을 정상 유동으로 모사할 수 있게 되고 원심분리기내 완전 발달된 난류 유동장의 형성에 영향을 미치는 설계 인자에 대한 연구를 효율적으로 수행할 수 있게 된다. 본 연구에서는 이방정식 난류모델(two-equation turbulence model) 중 다양한 난류 유동장 예측에 널리 사용되고 있

는 SST(Shear-Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다[5][6][7].

전체 격자점의 수는 약 200만개이며, 격자 형성을 용이하게 하고 계산의 정확성을 위해 정렬 및 비정렬 격자를 혼용하였으며, 난류 계산을 위하여 벽면 가까이에 충분한 격자점을 밀집하였다. 입구와 출구 사이의 압력차는 400mmH<sub>2</sub>O가 되게 하였다.

## 2.2 유동해석 결과

Fig. 2(a)는 원심분리기 형상과 내부 단면을 보여주고 있다. 원심분리기는 블로바이 가스가 유입되는 유입관(inlet), 유입된 가스의 직선운동을 회전운동으로 변환시키는 원통부(vessel), 아래에 오일 배출구, 상부에 가스 유출관(outlet), 그 아래에 내부관(vortex finder)으로 구성되어 있다. Fig. 2(b)는 원심분리기 유동장내 블로바이 가스 속도 크기를 보여주고 있다. 유입관이 원통부를 만나는 부분에서 유입관 내부 유로의 반만 열려 있다. 이 때문에 블로바이 가스는 원통부 벽면 쪽으로 방향을 바꾸며 속력이 증가하고, 그 직선 운동이 효과적으로 회전 운동으로 변화된다. 내부관 바깥쪽의 원통부 내부 유동은 회전하며 아래방향으로 향하고, 속력은 상대적으로 느리다. 내부관 내부에서는 회전 속도보다 위쪽으로 향하는 상승 속도가 크게 나타난다. 전체적으로 유속은 내부관 안에서 크게 나타난다.

Fig. 3은 Fig. 2(a)에서 보인 내부 단면들에서 원심방향 속도( $V_r$ ) 크기를 보여주고 있다. 원심 방향의 속도는 원통 벽면으로 향하는 속도 성분이다. 이것이 크게 나타나는 영역에서 오일과 같이 상대적으로 질량이 큰 액체 입자가 벽면에 활발하게 부착되며 블로바이 가스로부터 제거된다. 유입구 높이에서 원심방향 속력이 크게 나타나므로 이 영역에서 많은 오일 입자들이 블로바이 가스로부터 분리될 것으로 생각된다. 아래쪽 원통 단면에서 속도 크기는 벽면 가까이에서 벽면을 따라 전체적으로 균일하게 분포하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 각 단면에서 블로바이 가스가 수직으로 상승하는 속도의 크기를 보여주고 있다. 수직 방향으로 상승하는 속도는 유출관에 연결된 원통부 중앙의 내부관 끝단 아래 영역에 국한되어 나타난다. 이와 같이 수직 상승하는 속도 성분이 넓은 영역에서 크게 나타나면 오일 입자들은 내부관으로 유입된 후 유출관을 통하여 원심분리기 밖으로 가스와 함께 쉽게 빠져나갈 수 있다. 반

면에 상승하는 속도의 크기가 작고 상승 속도가 좁은 영역에서 나타나는 원심분리기는 작은 입자까지 가스에서 제거할 수 있게 되어 우수한 오일 제거 성능을 보이게 된다.

## 2.3 원심분리기 형상변화의 영향

본 연구에서는 원심분리기의 내부 유동장에 영향을 줄 수 있는 중요한 형상 인자를 변화시키고 그 것에 의해 나타나는 원심분리기의 성능( $\beta$ ) 변화를 살펴보았다. 아래 식 (1)에서 보는 바와 같이 유입되는 입자의 질량에 비교되어 유출되는 입자의 질량이 적을수록 원심분리기 성능이 좋아진다. 앞서 원심분리기 내부 유동장 해석 결과를 바탕으로 원심분리기 성능에 영향을 줄 수 있는 중요한 형상 인자로 원통(vessel)의 직경, 내부관(vortex finder)과 유출관(outlet)의 직경과 길이, 유입관(inlet)의 직경을 선정하였다. 이러한 중요 형상들의 크기를 기본 설계를 기준으로 하여 변화시키며 원심분리기 성능( $\beta$ )을 살펴보았다. 입자는 크기가 1, 3 및 5 $\mu$ m의 가솔린 액체 입자로 가정하였고 각각의 오일 입자들은 가스와 같이 원심분리기에 유입된다.

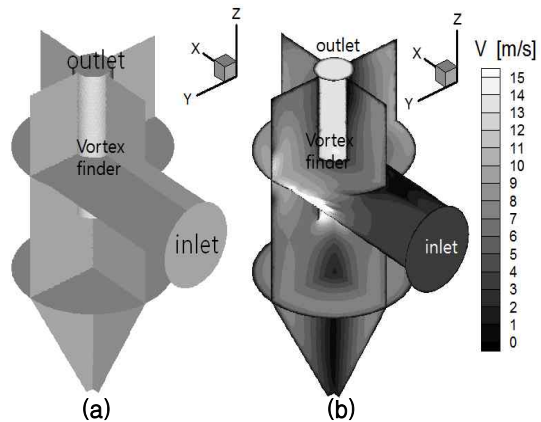


Fig. 2 Geometry and velocity contours in the flowfield of a cyclone separator

Fig. 5는 원심분리기 원통의 직경이 변화될 때 원심분리기의 성능( $\beta$ ) 변화를 보여주고 있다. 입자 직경 크기가 1과 3 $\mu$ m일 경우, 원통의 직경을 크게 하였을 때 약간의 성능 저하를 보이지만, 전체적으로 원통 직경 변화와 무관하게 거의 일정한 성능을 보여주었다. 그 이유는 작은 입자는 원심분리기 내부 유동에 빠르게 적응하여 움직이며 원통의 직경에 크게 영향을 받지 않고 원심분리기를 빠져나가기 때문이다.

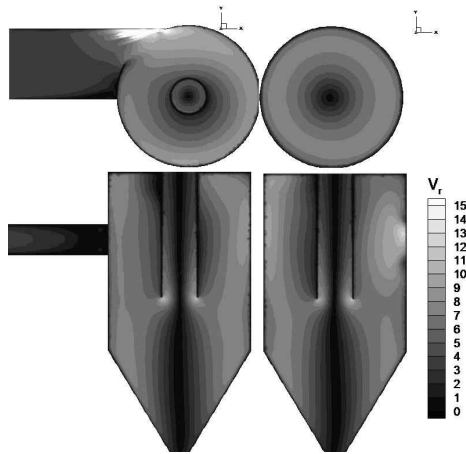


Fig. 3 Radial speed ( $V_r$ ) contours on cross sections in the flowfield of a cyclone separator

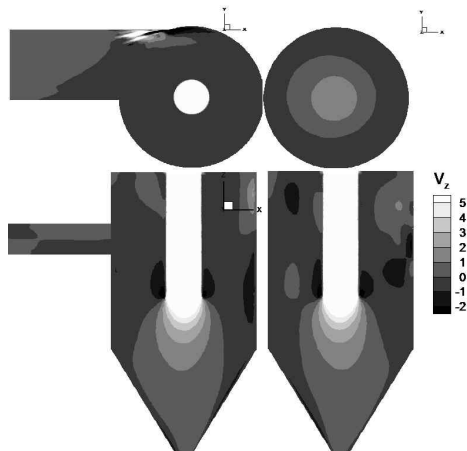


Fig. 4 Vertical speed ( $V_z$ ) contours on cross sections in the flowfield of a cyclone separator

$$\beta = 1 - \frac{M_{out}}{M_{in}} = 1 - \frac{\text{유출입자의 총 질량}}{\text{유입입자의 총 질량}} \quad (1)$$

반면에 입자 크기가 크면( $5\mu\text{m}$ ) 큰 관성을 가지므로 가스의 회전 유동에 적응하는데 상대적으로 긴 시간이 필요하다. 원통의 직경이 커서 회전 유동을 빠르게 발달시키지 않으면 큰 입자들도 유동에 적응할 수 있는 시간이 주어지므로 회전 유동에 적응하여 가스와 함께 흐르며 유출관을 통해 배출된다. 그러므로 원심분리기 원통의

단면적이 커지면 큰 입자의 경우도 유출량이 크게 증가하여, 성능이 나빠지는 것을 볼 수 있었다. 또한 일정 크기보다 원통의 직경이 작아지면 그 크기를 더 작게 하여도 성능이 크게 향상되지 않았다.

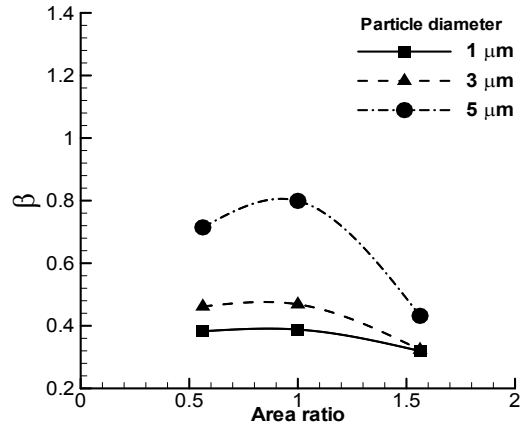


Fig. 5 Effect of vessel diameter on the performance of a cyclone separator.

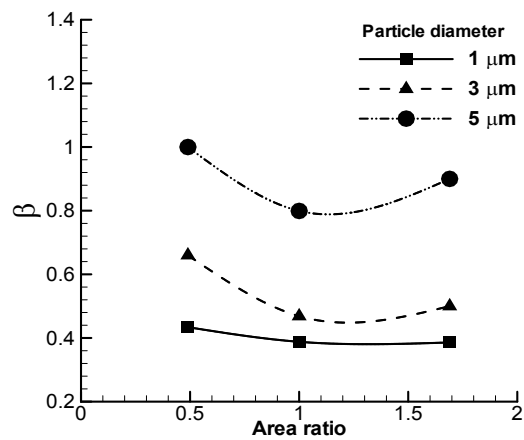


Fig. 6 Effect of inlet diameter on the performance of a cyclone separator.

Fig. 6은 유입구의 단면적을 변화시켰을 때 원심분리기의 성능 변화를 보여주고 있다. 기본 형상보다 작은 단면적을 가질 때 배출량이 상대적으로 줄어들어 오일 제거 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다. 특히  $5\mu\text{m}$ 처럼 큰 입자는 거의 배출되지 않았다. 앞에서 언급한 것과 같이 유입관이 원통부를 만나는 부분에서 유입관 단면의 반만 유로로 열려있어 유동이 원통 벽면으로 향하

고 가스가 벽면을 따라 회전하게 된다. 이와 같은 부분의 형상이 원심분리기 성능에 크게 영향을 줄 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 유입관의 단면적은 처리용량과 밀접한 관계가 있으므로 성능과 용량의 관계에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 7은 원심분리기 내부관과 그와 연결된 유출관의 단면적을 변화시켰을 때 원심분리기 성능 변화를 보여주고 있다. 상대적으로 가벼운 오일 입자들의 경우는 이 단면적이 변화하여도 입자의 유출량은 거의 변화하지 않았다. 하지만, 직경이  $5\mu\text{m}$ 인 입자와 같이 무거운 입자의 경우, 내부관 단면적 크기를 기본설계보다 작게 하면 성능이 나빠지는 것을 볼 수 있었다. 이것은 내부관 단면적이 작아질수록 내부관 입구 아래 부분과 내부관 내부의 속도가 증가하여 무거운 입자들도 잘 빨려들어 가고 쉽게 배출될 수 있기 때문이다. 반면에, 내부관의 단면적이 커지며 입자가 흐르며 유출될 수 있는 면적이 커지므로 입자의 유출량이 증가될 수 있다. 위의 원심분리기 형상 변수들 중 원통 및 내부관의 직경의 경우, 무거운 입자의 제거와 관련하여 원심분리기 성능이 최고가 되는 최적 형상 조건이 존재하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 원심분리기 중앙에 위치하는 내부관의 길이 변화에 따른 원심분리기 성능변화를 보여주고 있다. 원심분리기 내부관의 길이가 증가할수록 가스와 같이 배출되는 오일 입자의 배출량이 감소하여 원심분리기 성능이 향상되었다. 하지만 일정 길이 이상이 되면 그 변화가 원심분리기 성능에 크게 영향을 주지 않았다. 이유는 이 내부관이 길어질수록 내부관의 아래 끝단이 원통의 원추 형상 부분에 가까워지기 때문이다. 이 부분은 원통 단면적이 작아서 가스의 유속이 높아지므로 입자들이 가스와 같이 흐르며 쉽게 내부관으로 유입되고 배출된다. 이런 현상은 내부관 길이가 길어지며 얻을 수 있는 효과를 상쇄시키게 된다.

Fig. 9는 입자의 직경이 0.5, 1, 3, 5, 10, 25 및  $50\mu\text{m}$ 일 때 각각의 입자를 초기 1초 동안 투입하고 2초간 유출구를 통해 배출된 양을 가지고 성능을 평가하였다. Case 1의 경우, 직경이 작은  $3\mu\text{m}$  이하에서는 약 60% 이상이 배출되고 있다. 이것은 직경이 작은 가벼운 입자는 블로바이 가스의 유동을 따라 빠르게 적응하여 많은 입자가 가스와 함께 유출구로 배출됨을 보여주고 있다. 상대적으로 큰 입자들은 입자의 크기가 증가하면서 급격히 그 배출량이 감소되는 경향을 보이고

있다.

Case 1은 원심분리기의 유입관으로 유입되는 블로바이 가스의 유속이  $3.2\text{m/s}$ 이고, case 2는 case 1의 입구 유속의 약 3배인  $9.4\text{m/s}$ 이다. 입구 유속을 증가시키면 입자의 관성력이 증가하여  $3\mu\text{m}$  입자들도 대부분 원심분리기에서 제거되었다. 위 결과에서 원심분리기 성능에 유입 속도와 입자 크기 변화가 주는 영향을 비교해보면, 입자의 크기 증가보다 유입속도 증가가 원심분리기 성능에 보다 크게 기여하는 것을 알 수 있었다.

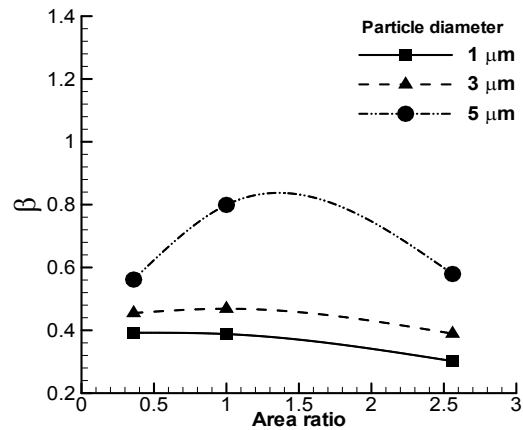


Fig. 7 Effect of outlet diameter on the performance of a cyclone separator.

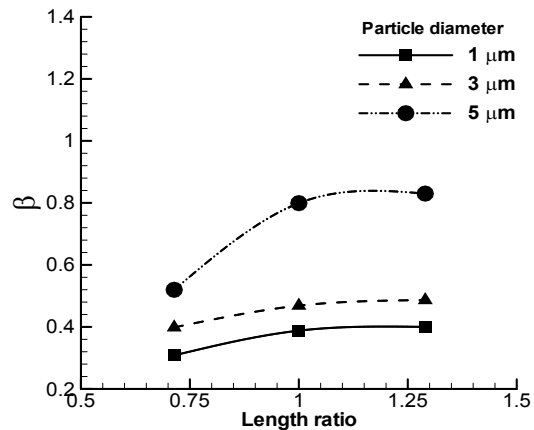


Fig. 8 Effect of vortex finder length on the performance of a cyclone separator.

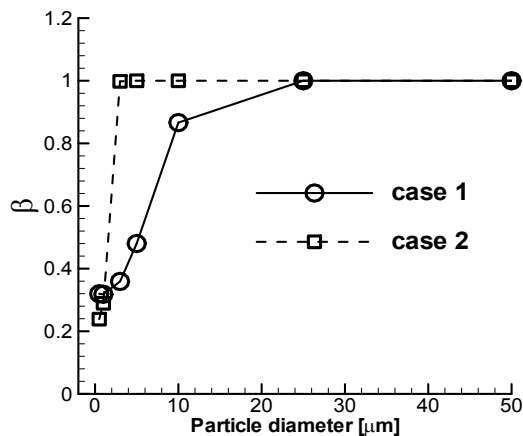


Fig. 9 Effect of particle diameter on the performance of a cyclone separator.

### 3. 결 론

왕복기관을 사용하는 항공기의 운항 중에 발생하는 블로바이 가스(blow-by gas)에는 대기 환경오염 문제를 야기하는 오일 및 연료 입자 등이 포함되어 있다. 이 가스를 대기로 방출하기 전에 함유된 오일 입자를 제거하기 위하여 CCV 시스템을 장착하고, 그 핵심 부품으로 원심분리기를 사용한다. 본 연구에서는 원심분리기 내의 유동장을 수치적 해석 방법을 통하여 연구하고 중요한 형상 변수가 원심분리기 성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 원심분리기 원통(vessel), 유입구(inlet) 및 유출구(outlet)의 단면적이 작을 때 대체로 원심분리기 입자 제거 성능이 좋았다. 하지만, 무거운 입자의 경우 원심분리기 성능이 최고가 되는 최적의 단면 크기 조건이 존재함을 알 수 있었다.

다양한 크기 입자들의 영향을 살펴보면, 입자의 크기가 증가하면 원심분리기의 입자 제거 성능이 급격히 향상되었다. 또한, 블로바이 가스의 유입 속도가 크면 상당부분 작은 크기의 입자들도 제거할 수 있었다. 가스의 유입 속도가 오일 입자 크기 증가보다 원심분리기 성능 향상에 보다 크게 기여하는 것을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) Climate Change 2007, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
- 2) Smith, J. L., "An Experimental Study of the Vortex in the Cyclone Separator", *Trans. ASME* Dec. 1962, pp. 602.
- 3) Ogawa, A., "Experimental Study of the Angular and Axial Momentum Fluxes in the Cylindrical Vortex Chambers", *World Congress III of Chemical Engineering, TyoKo, Vol. II, 1986, pp. 208.*
- 4) 임함, 김동현, 김유성, 김요한, 김석수, "충격파 및 유동박리 효과를 고려한 초임계 에어포일의 천음속 필터 특성", *한국항공운항학회, 제17권, 제2호, 2009, pp.8~17.*
- 5) Dong, L., Johansen, S. T., and Engh, T. A., "Flow Induced by an Impeller in an Unbaffled Tank-II: Numerical Modeling," *Chem. Eng. Sci.*, **49**, 1994, pp. 3511~3518.
- 6) Gosman, A. D., Lekakou, C., Politis, S., Issa, R. I., and Looney, M. K. "Multidimensional Modeling of Turbulent Two-Phase Flows in Stirred Vessels," *AIChe J.*, **38**, 1992, pp. 1946~1956.
- 7) Kim, S. D., and Song, D. J., "Computations of Droplet Impingement on Airfoils in Two-Phase Flow", *KSME International Journal*, Vol. 19, Dec. 2005, pp.2312~2320.