

## 사이클론 오일분리 장치 형상변화에 따른 유동 및 오일분리 성능에 관한 해석적 연구

조용석<sup>\*1)</sup> · 이성욱<sup>1)</sup> · 우근섭<sup>2)</sup> · 윤여빈<sup>2)</sup> · 박영준<sup>2)</sup> · 이덕영<sup>3)</sup> · 김현철<sup>4)</sup> · 나병철<sup>4)</sup>

국민대학교 기계자동차공학부<sup>1)</sup> · 국민대학교 자동차전문대학원<sup>2)</sup> · 대구대학교 자동차 산업 기계공학부<sup>3)</sup> · 자동차부품연구원<sup>4)</sup>

### A Numerical Analysis of Flow Characteristics and Oil Separation Performance for Cyclone Oil Separator Designs

Yong-Seok Cho <sup>\*1)</sup> · Seang-Wock Lee<sup>1)</sup> · Keun-Sup Woo<sup>2)</sup> · Yu-Bin Yoon<sup>2)</sup> · Young-Joon Park<sup>2)</sup> ·  
Dug-Young Lee<sup>3)</sup> · Hyunchul Kim<sup>4)</sup> · Byungchul Na<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>2)</sup>Graduated School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>3)</sup>School of Automotive, Industrial and Mechanical Engineering, Daegu University, Daegu 712-714, Korea

<sup>4)</sup>Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 20 August 2007 / Accepted 3 January 2007)

**Abstract** : A closed type crankcase ventilation system has been adopted to engines to prevent emission of blow-by gas to atmosphere. In the early closed type crankcase ventilation system, blow-by gas which contains engine lubricating oil is re-circulated into the intake system. The blow-by gas containing oil mist leads to increased harmful emissions and engine problems. To reduce loss of the engine oil, a highly-efficient oil separation device is required. Principle of a cyclone oil separator is to utilize centrifugal force in the separator and, therefore, oil separator designs depend on rotational flow which causes the centrifugal force. In this paper, flow characteristics and oil separation performances for cyclone type designs are calculated with CFD methodology. In the CFD model, oil particle was injected on a inlet surface with Rosin-Rammler distribution and uniform distribution. The major design parameters considered in the analysis model are inlet area, cone length and outlet depth of the oil separator. As results, reducing inlet area and increasing cone length increase oil separation performance. Changes in outlet depth could avoid interference between rotational flow and outlet flow in the cyclone oil separator.

**Key words** : CFD(전산유체역학), Blow-by gas(블로바이 가스), Crankcase ventilation(크랭크케이스 환기), Oil separation(오일분리), Oil separator(오일분리 장치)

### 1. 서 론

자동차 블로바이 가스의 대기 방출을 방지하고 유해배출물 저감을 위하여 차량의 크랭크케이스 환기 시스템이 종래의 대기 방출형(open-type) 구조에서 회수형(closed-type)구조로 전환되고 있다.<sup>1)</sup> 초기

에 개발된 회수형 크랭크케이스 구조의 경우 실린더 헤드커버로 보내진 블로바이 가스를 흡기 매니폴드를 통하여 연소실 내에서 재연소시킬 수 있도록 하였다. 그러나 블로바이 가스는 피스톤 링을 지나 크랭크케이스를 거치며 무화된 오일 액적(oil mist)을 포함하게 되며<sup>2)</sup>, 이러한 블로바이 가스가 흡기계로 유입되어 연소됨으로써 흡기계 오염 및 유

<sup>\*</sup>Corresponding author, E-mail: yscho@kookmin.ac.kr

해 배출가스의 중요한 원인이 된다.<sup>3)</sup> 따라서 오일 소모 저감 및 기관 신뢰성 향상을 위해 블로바이 가스 내에 포함되어 있는 오일을 효과적으로 분리할 수 있는 고효율 연료/오일 필터링 회수 부품은 회수형 크랭크케이스 환기 시스템 개발에 필요한 핵심적인 기술이다. 이러한 회수형 크랭크케이스 환기 시스템 중 외장형 사이클론 오일분리 장치를 사용하여 유해배출물 저감 및 연비 향상이 가능하다.<sup>4)</sup>

Fig. 1은 사이클론 오일분리 장치 내부에서 오일 입자의 거동을 시간에 따라 나타낸다. 오일분리 장치로 유입된 블로바이 가스는 장치 형상에 따른 유동에 의하여 회전운동을 하게 되고, 이에 따른 원심력에 의하여 오일입자가 블로바이 가스로부터 분리된다. 오일분리 성능을 향상시키기 위해서는 장치 내부 벽면 부근에서 빠른 속도의 유동이 회전하게 하고, 이러한 유동이 벽면전체에 분포하도록 하여야 한다. 오일분리 장치 형상과 오일분리 장치 내부의 유동은 밀접한 관계가 있으며, 고성능 오일분리 장치 개발을 위하여 오일분리 장치 형상에 따른 유동 및 오일분리 성능에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 실린더 헤드커버 내장형 오일분리 장치 설계에 앞서 회수형 크랭크케이스 환기 시스템에서 핵심부품인 사이클론 오일분리 장치의 형상 변화에 따른 장치 내부 유동과 오일분리 성능을 해석적으로 예측하고자 하였다.

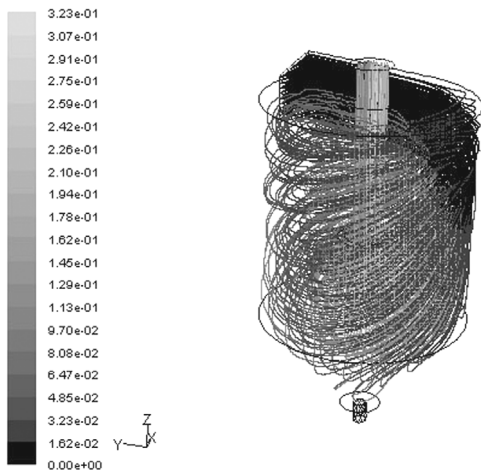


Fig. 1 Particle trace in a cyclone separator (gray scaled by particle residence time, sec)

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석기법

본 연구의 수치해석은 상용코드인 FLUENT6.2를 사용하였다. 비압축성, 난류, 점성유동으로 가정하고 정상 상태로 해석하였으며, 난류모델은 Standard  $k-\epsilon$  모델의 수송방정식을 사용하였다.<sup>5)</sup> FLUENT에서 사용하는 지배방정식을 간략히 요약하면 다음과 같다.

- Particle의 운동량 교환방정식<sup>6)</sup>

$$F = \Sigma \left( \frac{18\mu C_D Re}{\rho_f d_p^2 24} (v_p - v) + F_{other} \right) \dot{m}_p \Delta t$$

$d_p$  : diameter of the particle

$v_p$  : velocity of particle

$v$  : velocity of the fluid

$F_{other}$  : other interaction forces

$\dot{m}_p$  : mass flow rate of the particle

$Re$  : relative Reynolds number

$C_D$  : drag coefficient

$$C_D = 0.424 \quad (Re > 1000)$$

$$= \frac{24}{Re} \left( 1 + \frac{1}{6} Re^{\frac{2}{3}} \right) \quad (Re \leq 1000)$$

### 2.2 수치해석 과정 및 경계조건

수치해석을 위한 모델을 구성하기 위한 절차는 다음과 같다. 우선 Fig. 2와 같이 FLUENT 내의 모델링 프로그램인 GAMBIT을 이용하여 오일분리기의 형상을 구성한다. 다음으로 모델에 격자를 생성하고 FLUENT로 데이터를 옮겨 경계조건 및 초기조건을 입력시킨 후 해석을 수행한다. Fig. 2는 사이클론 타입 해석에 적용된 격자 모델을 나타낸다. 각 해석 모델의 유효 격자수는 평균 30만개로 구성하였다.

향후 실린더 헤드커버에 사이클론 오일분리 장치 3개를 적용할 예정이다. 이에 따라 오일분리 장치 입구로 유입되는 유량을 향후 오일분리 장치를 적용할 기관에서 발생하는 블로바이 가스 최대 유량의 1/3수준인 12 l/min으로 설정하였고 출구는 WOT (wide open throttle) 상태를 고려하여 대기압으로 설

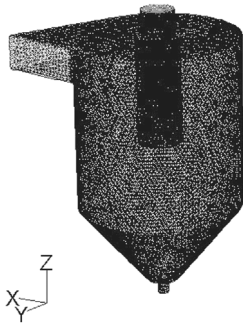


Fig. 2 Mesh generation for numerical analysis

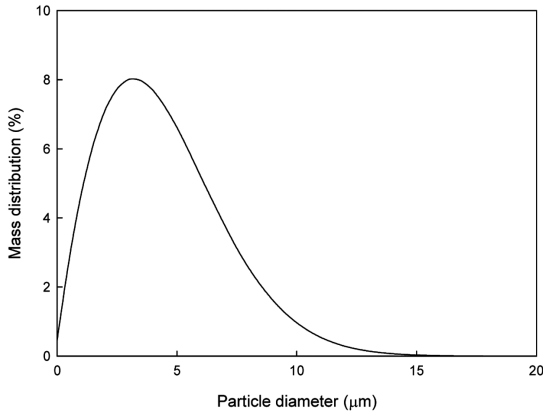


Fig. 3 Rosin-rammler distribution of particle for numerical analysis

정하였으며 작동유체로 공기를 고려하였다. 블로바이 가스에 포함된 오일입자의 거동을 해석하기 위하여 particles' trajectory calculation<sup>5)</sup>을 사용하였다. Rosin-Rammler 확률 질량분포 함수<sup>5)</sup>를 이용하여 Fig. 3과 같은 질량분포를 가지는 직경 0 ~ 20 μm의 오일입자를 오일분리기 입구에서 분무하였다. 또한 오일 입자 직경에 따른 오일분리 성능을 파악하기 위하여 직경 1~15 μm의 단일 직경의 오일 입자를 분무하였다. 주요 경계조건을 Table 1에 정리하였다.

Fig. 4는 사이클론 타입의 설계변수를 나타낸다. A, B는 입구의 폭과 높이를 나타낸다. C는 사이클론 타입의 콘(cone)길이를 나타내며, D는 사이클론 타입의 원통 길이를 나타내고, E는 출구의 깊이를 나타낸다. Base type 오일분리 장치의 형상은 A: 6.25 mm, B: 8 mm, C: 15 mm, D: 32 mm, E: 20 mm이고, C와 D의 높이의 합은 47 mm로 제한하였으며 출구 직경은 6 mm를 사용하였다. 각 케이스의 명명은 “S(입

Table 1 Boundary condition of numerical analysis

Inlet flow rate of air (ℓ/min)	12 ℓ/min
Inlet mass flow rate of oil (g/h)	0.33 g/h
Turbulence model	Standard k-ε
Initial turbulence Kinetic energy	2 % of velocity
Initial turbulence characteristic length (mm)	Varies for each geometrical design
Separator inner-wall BC type	Trap

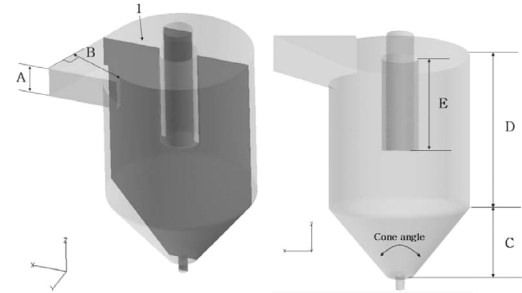


Fig. 4 Geometry of oil separator with defined design parameters

구면적) IW(B의 길이) CL(C의 길이) OD(E의 길이)”로 한다. 예를 들어 base type 오일분리 장치의 case 명명은 ‘S50 IW08 CL15 OD20’이다.

해석에 적용한 설계변수의 치수를 Table 2에 정리하였다. 입구 형상의 변화에 따른 오일분리 성능 해석은 입구면적을 변화시키고 동일 입구면적에서 입구의 폭을 변화시켜 수행하였다. 입구면적의 지나친 감소는 유입량 감소를 수반할 수 있기에 입구면적의 감소는 고정시킨 출구면적(28 mm<sup>2</sup>)을 고려하여 30 mm<sup>2</sup>까지로 제한하였다. 사이클론의 콘 형상 변화에 따른 오일분리 성능 해석은 콘 길이를 변화시켜 수행하였다. 출구 형상 변화에 따른 오일 분리 성능 해석은 출구 깊이를 변화시켜 수행하였다.

Table 2 Design parameters for numerical analysis

Design part	Differentiated design parameters	Value
Inlet	Inlet area (S)	30 ~ 60 mm <sup>2</sup>
	Inlet width (B)	5 ~ 10 mm
Cone	Cone length (C)	7 ~ 39 mm
Outlet	Outlet depth (E)	4 ~ 36 mm

$$\eta = \frac{\dot{m}_{trap}}{\dot{m}_{in}}$$

$\dot{m}_{in}$ : mass flow rate of trapped oil particle

$\dot{m}_{trap}$ : mass flow rate of injected oil particle

$$\epsilon = \frac{\eta_i}{\eta_{base}}$$

$\eta_i$ : oil separation efficiency of each case

$\eta_{base}$ : oil separation efficiency of base type

오일분리 성능은 base type의 오일분리 효율( $\eta_{base}$ )을 기준으로 오일분리 장치의 형상변화에 따른 효율( $\eta_i$ )을 구하여 그 비( $\epsilon$ )로 평가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 입구 형상 변화

##### 3.1.1 입구 형상 변화에 따른 속도분포

Fig. 5는 입구면적을 감소시킨 경우 장치 입구에서 바라본 Fig. 4의 단면 1에서의 속도분포를 나타내며 어두운 부분이 속도가 빠른 부분이다. Fig. 5에서 입구면적이 줄어들수록 입구 반대편 벽면 부근에서 유속이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 장치 벽면 부근 유속의 증가는 오일입자에 작용하는 원심력의 증대를 야기하여 오일분리 성능이 향상될 것으로 예상된다. Fig. 5에서 동일 입구면적에서 입구 폭을 넓게 한 경우 입구의 반대편 벽면 부근에서 유속이 증가하는 경향을 보인다. 즉, 입구면적을 줄이고 벽면 부근에서 유속을 빠르게 하면 오일분리 성능이 향상될 것으로 생각된다.

##### 3.1.2 입구 형상 변화에 따른 오일분리 성능

Fig. 6은 입구면적 변화와 동일 입구면적에서 입구 폭 변화에 따른 오일분리 성능을 보여준다. 입구면적을 줄일수록 동일 입구면적에서 입구 폭이 넓어질수록 오일분리 성능이 향상되는 경향성을 보인다. 이는 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 입구면적을 줄이고 입구 폭을 넓게 할수록 벽면에서의 유속이 증가하며 이에 따라 오일입자에 작용하는 원심력이 증가하기 때문으로 생각된다.

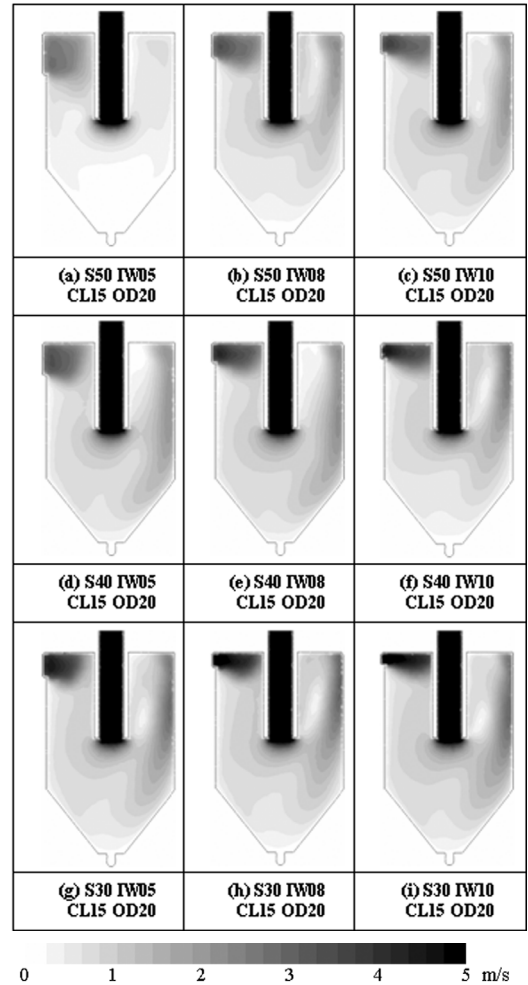


Fig. 5 Velocity distribution with various inlet designs(gray scaled by velocity magnitude)

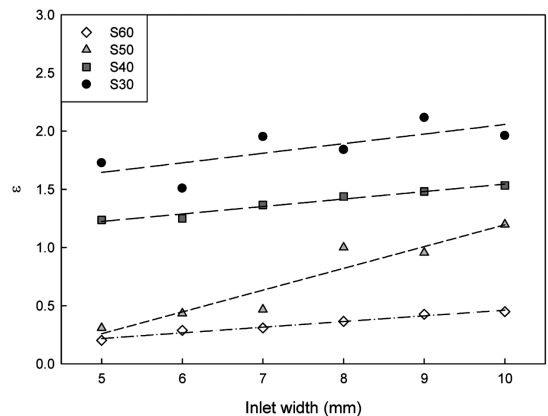


Fig. 6 Oil separation performance with various inlet designs

### 3.2 콘 형상 변화

#### 3.2.1 콘 형상 변화에 따른 속도분포

Fig. 7은 콘 길이 변화에 따른 단면 1에서의 속도 분포를 나타낸다. Fig. 7에서 콘 길이가 길어질수록 오일분리 장치 내부 체적이 감소되며 벽면 부근의 유속이 증가하는 경향성을 볼 수 있다. 이에 따라 오일입자에 작용하는 원심력이 증가하여 오일분리 성능이 향상될 것으로 생각된다.

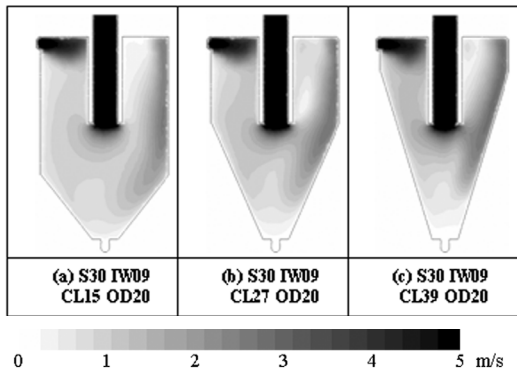


Fig. 7 Velocity distribution with various cone length(gray scaled by velocity magnitude)

#### 3.2.2 콘 형상 변화에 따른 오일분리 성능

Fig. 8은 콘 길이 변화에 따른 오일분리 성능을 나타낸다. 전체적으로 콘 길이가 길어질수록 오일분리 성능이 향상되는 경향을 보여주며, 콘 길이를 증가시킨 사이클론 오일분리 장치의 실험결과<sup>7)</sup>와 같은 경향성을 보인다. 이는 Fig. 7에서와 같이 콘 길이

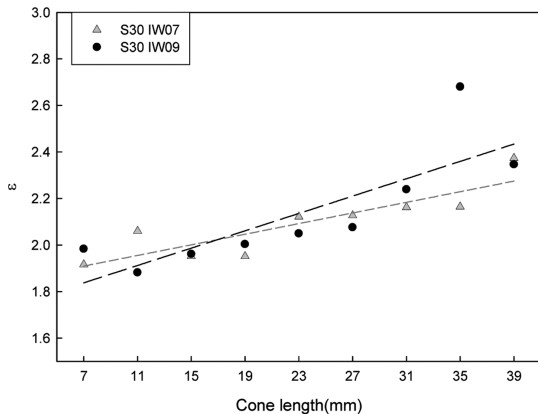


Fig. 8 Oil separation performance with various cone length

가 길어질수록 벽면부근의 유속이 증가되고 오일입자에 작용하는 원심력이 증가되기 때문인 것으로 생각된다.

### 3.3 출구 형상 변화

#### 3.3.1 출구 형상 변화에 따른 속도분포

Fig. 9는 출구 깊이 변화에 따른 단면 1에서의 속도 분포를 나타낸다. 출구 깊이가 깊어지는 경우 벽면 부근의 빠른 속도의 유동과 출구로의 유동 간의 간섭 위치가 점점 깊어지는 경향을 보인다. 한편 출구 깊이가 지나치게 깊어지는 경우 벽면과 출구 끝단 사이의 면적 감소로 빠른 속도로 유동이 유출될 것으로 예상된다. 출구 깊이가 얇아지는 경우 장치 벽면과 출구 끝단과 거리가 멀어져 벽면 부근의 빠른 속도의 유동과 출구로의 유동 간의 간섭 발생이 줄어드는 경향을 보인다. 한편 출구 깊이가 지나치게 얇아지는 경우 장치로 유입되는 유동이 장치 내부에서 회전운동을 하지 않고 출구로 유출되는 유동이 증가할 것으로 예상된다.

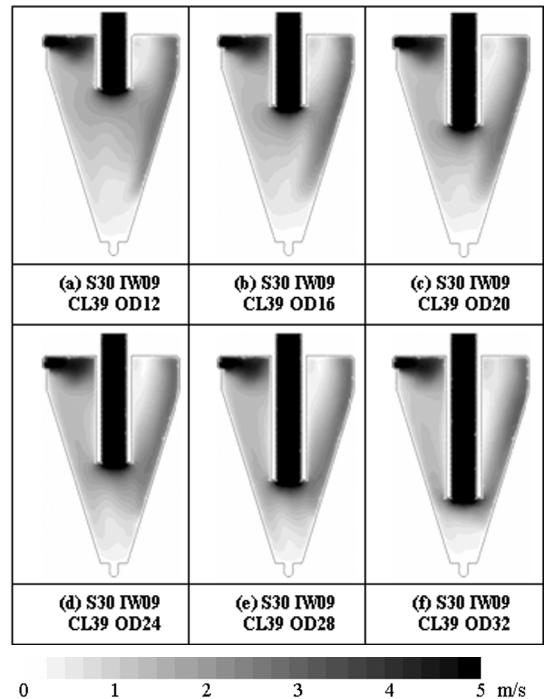


Fig. 9 Velocity distribution with various outlet depth(gray scaled by velocity magnitude)

3.3.2 출구 형상 변화에 따른 오일분리 성능

Fig. 10은 출구 깊이 변화에 따른 오일분리 성능을 나타낸다. 출구 깊이가 변화에 따른 경향은 뚜렷하지 않은 것으로 보인다. 이는 출구 깊이와 함께 입구 형상과 콘 형상이 복합적으로 사이클론 내부 유동에 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다.

출구 깊이가 32 mm로 깊어지는 경우 오일분리 성능이 감소하는 경향은 장치 벽면과 출구 끝단 사이의 면적 감소로 인하여 유동이 빠른 속도로 출구로 배출되기 때문인 것으로 생각된다. 출구 깊이가 32 mm로 깊어지는 경우 오일분리 성능 저하가 콘 길이가 31 mm일 때보다 콘 길이가 39 mm 일 때 더 큰 것은 콘 길이가 증가함에 따라 장치 벽면과 출구 끝단 사이의 거리가 더 가까워지기 때문인 것으로 생각된다.

출구 깊이는 오일분리 장치 벽면에 분포하는 빠른 속도의 유동과 출구로 향하는 유동 간의 간섭에 영향을 미치며 이를 조절하여 오일분리 성능을 향상 시킬 수 있을 것으로 생각된다.

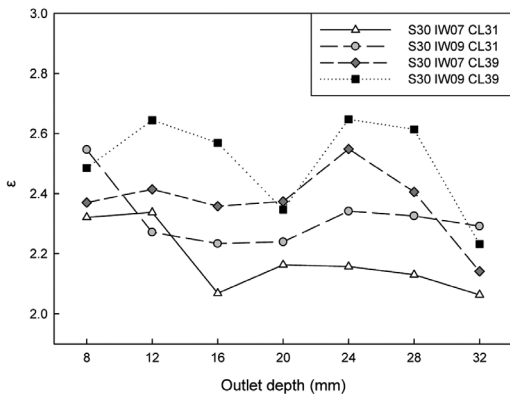


Fig. 10 Oil separation performance with various outlet depth

3.4 오일 입자 직경에 따른 오일분리 성능

Fig. 11은 base type과 입구면적을 줄인 Case S30 IW09 CL15 OD20과 콘 길이를 증가시킨 Case S30 IW09 CL39 OD20 형상에 관하여 오일 입자 직경별 오일분리 성능을 나타낸다. Fig. 11에서 입구면적이 작고 콘 길이가 긴 경우 전반적으로 오일분리 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다. 오일입자의 직경이 클수록 더욱 쉽게 분리되는 것을 볼 수 있다. 이는 오

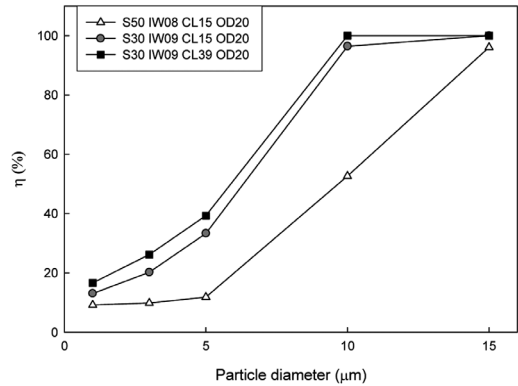


Fig. 11 Oil separation performance versus particle diameter

일입자의 직경이 클수록 원심력의 영향을 더 크게 받기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 실린더 헤드커버 내장형 오일분리 장치개발에 앞서 사이클론 오일분리 장치의 형상을 최적화하는데 그 목적이 있다. 오일분리 장치의 입구-출구 형상변화에 따른 유동과 오일분리 성능을 파악하기위한 해석적 연구를 수행하였으며 수치 해석 결과를 바탕으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 입구면적의 감소는 오일분리 장치 내부 유동의 속도를 증가시키고, 이에 따라 오일입자에 작용하는 원심력이 증가되며 오일분리 성능이 향상될 것으로 예상된다.
- 2) 동일 입구면적에서 입구 폭이 넓어질수록 입구 반대편 벽에서 빠른 속도의 유동이 넓게 분포되는 경향을 보인다.
- 3) 콘 길이가 길어질수록 오일분리 장치 내부의 체적 감소 및 원주방향거리 감소로 벽면 부근에서 유속이 증가하는 경향을 보인다. 이에 따라 오일입자에 작용하는 원심력의 증가로 오일분리 성능이 향상될 것으로 예상된다.
- 4) 출구 깊이는 오일분리 장치 벽면에 분포하는 빠른 속도의 유동과 출구로 향하는 유동 간의 간섭에 영향을 미치며 이러한 간섭이 최소화 되도록 출구 깊이를 설계해야할 것으로 생각된다.
- 5) 오일입자의 직경이 클수록 원심력의 영향을 크게 받아 포집이 잘되는 경향을 보인다.

## 후 기

이 논문은 산업자원부 핵심기반기술 개발사업 중 “자동차기반기술 개발사업” 및 2007년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구로, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) P. Bastias, D. Grafl, J. Wanger, D. Caloghero, M. Puckett and D. Nash, “Air/Oil Separator in Cylinder Head Cover,” SAE 2004-01-2933, 2004.
- 2) E. Yilmaz, T. Tian, V. W. Wong and J. B. Heywood, “The Contribution of Different Oil Consumption Sources to Total Oil Consumption in a Spark Ignition Engine,” SAE 2004-01-2909, 2004.
- 3) P. J. Shayler, L. D. Winborn and A. Scarisbrick, “Fuel Transport to the Crankcase, Oil Dilution and HC Return with Breather Flow during the Cold Operation of a SI Engine,” SAE 2000-01-1235, 2000.
- 4) J. Y. Kim, B. C. Na, J. H. Seo, S. U. Park, H. G. Lee, B. H. Lee and S. B. Choi, “A Study of Emission Characteristics of External Crankcase Ventilation System with Vehicle,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.9-14, 2007.
- 5) Fluent Manual V.6.1, Fluent Research Corporation, 2003.
- 6) A. B. Liu, D. Mather and R. D. Reitz, “Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays,” SAE 930072, 1993.
- 7) J. Y. Kim, B. C. Na, J. H. Seo, S. U. Park, Y. W. Jin and S. B. Cho, “An Experimental Study on Oil Separation Performance in Crank-Case,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.2439-2444, 2006.