

# 전산유동해석을 통한 가솔린 엔진용 오일분리기의 성능분석

김창수<sup>1</sup>, 박성영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 일반대학원 기계공학과, <sup>2</sup>공주대학교 공과대학 생산기술연구소

## Performance Analysis of Oil Separators for Gasoline Engine Using CFD Simulation

Chang-Su Kim<sup>1</sup> and Sung-Young Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Dept., Graduate School, Kongju National University

<sup>2</sup>Industrial Technology Research Institute, College of Engineering, Kongju National University

**요약** 본 논문은 전산해석을 수행하여 가솔린 엔진에 적용되는 오일분리기의 성능을 비교/분석하여 적절한 오일분리기를 선정하고자 하였다. 두 가지 다른 형태의 오일분리기를 해석하였으며, 포집된 오일입자를 분석하여 포집성능을 대표하는 d50과 포집효율을 계산하였다. 계산결과 모델 A는 우수한 포집성능과 효율을 나타내었고, 모델 B는 양호한 압력강하량 특성을 보였다. 크랭크 케이스의 압력이 높지 않고, 오일소모량이 적은 일반적인 가솔린 엔진의 경우에는 압력강하량이 우수한 모델 B 오일분리기를 추천한다. 크랭크 케이스의 압력이 높고, 오일소모량이 큰 엔진, 특히 오일입자의 오염이 치명적인 특수 배기처리장치를 장착한 엔진에는 큰 압력강하량과 우수한 포집효율을 가지는 모델 A 오일분리기를 추천한다.

**Abstract** Computational simulation has been conducted to analyze the oil separation performance of gasoline engine oil separators. Two models are compared to select a proper oil separator for the engine. To analyze oil separation characteristics, d50 and separation efficiency have been calculated for each separator. As a result, model A shows excellent d50 and separation efficiency, and model B shows good pressure-drop characteristics. Model B is recommended for the general gasoline engine with low crank-case pressure and low oil consumption. Model A is recommended for the engine with high crank-case pressure and high oil consumption, especially equipped with special exhaust gas treatment system, that is critical to the oil contamination.

**Key Words** : Oil Separation, Computational Fluid Dynamics, Gasoline Engine, Blow-by Gas

### 1. 서론

블로바이가스(Blow-by gas)란 고온고압으로 연소한 가스가 피스톤 링과 그루브의 틈새 등을 통하여 실린더 내벽과 피스톤링 사이로 유출되는 가스를 말한다. 이러한 블로바이가스는 미연탄화수소, 수분, 엔진오일 증발분 및 카본입자 등으로 구성되어있어 대기중으로 직접 배출할 수 없으므로, 흡기관을 통하여 연소실에 재공급되어 연소되도록 한다. 하지만 오일입자를 연소실로 공급하는 것은 과도한 엔진오일 소모, 흡기계 오염 및 유해배기가스

증가의 주 원인으로 작용한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 일반적으로 오일분리기(Oil separator)를 설치하여 비교적 큰 오일입자들을 분리한다. 따라서 오일분리기의 성능은 흡기계의 청정도 유지 및 유해배기가스 저감에 중요한 역할을 담당하고 있다[1].

그림 1은 오일분리기의 종류를 도시화한 것이다. 디젤용 엔진에서 대표적으로 사용되는 원심력을 이용한 사이클론(Cyclone)형태가 있으며, 가솔린 엔진에 사용되는 미로(Labyrinth)형태의 오일분리기가 있다. 그 외에도 철조망과 같이 사이사이에 장애물을 두어 오일을 포집하는

본 논문은 2010년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

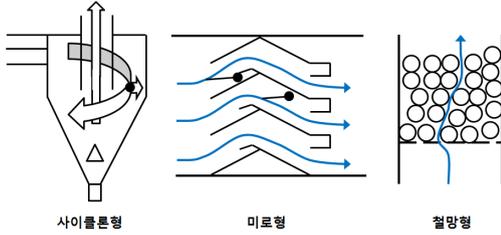
\*교신저자 : 박성영(sungyoung@kongju.ac.kr)

접수일 11년 11월 16일

수정일 (1차 12년 01월 04일, 2차 12년 01월 06일)

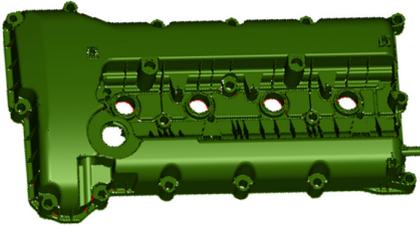
게재확정일 12년 02월 10일

철망(Wire)형태의 오일분리기 등도 있다[2].



[그림 1] 오일분리기의 종류  
[Fig. 1] Different types of separators

그림 2는 일반적인 가솔린 엔진의 헤드커버로서 오일 분리기는 실린더헤드 커버의 하부나 측면에 설치되어진다. 따라서 실린더 헤드커버의 모양에 따라 적절한 오일 분리기가 선정되고 설계되어야 한다.



[그림 2] 일반적인 가솔린 엔진용 헤드커버  
[Fig. 2] Head cover for general gasoline engine

본 연구에서는 가솔린 엔진에 사용되는 오일분리기를 해석적으로 모델링하고 계산하여 성능과 효율을 예측하고자 한다. 특히 두 가지 다른 형태의 오일분리기를 모델로 하여 각각의 특성과 성능특성을 분석하여 엔진헤드커버 설계를 위한 기초자료로 사용하고자 한다.

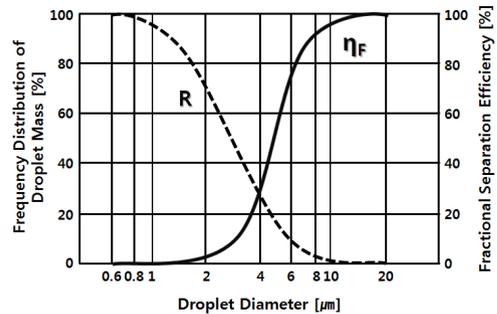
## 2. 본론

### 2.1 해석 모델

블로바이 홀로부터 유입되는 블로바이가스의 유동해석과 오일입자의 포집효율을 계산하기위하여 상용 소프트웨어인 Star-CD[3]를 사용하였다. 해석 모델은 직육면체 격자를 사용하였으며, 100만개 이상의 계산격자로 적용하였다. 해석을 위한 난류 모델로는 k-epsilon/RNG 모델을 사용하였다. 블로바이가스의 유량을 속도로 환산하여 입구 경계조건을 부여하였다.

일반적으로 10 $\mu$ m이하의 오일입자를 함유한 블로바이

가스는 저밀도 다상유체이기 때문에 가스의 유동과 입자 유동을 분리(uncoupled)하여 계산하였다[4]. 각 오일입자 크기별로 10,000개의 입자를 투입하여 포집효율을 계산하였다. 블로바이 홀로 유입되는 오일입자의 분포는 일반적으로 입자질량의 분포(R)로 표기된다[2]. R은 오일입자 총질량에 대한 임의 크기 이상을 포함하는 입자들의 질량률이다. 예를들어, 오일입자 분포 및 입자크기별 포집효율을 보여주고 있는 그림 3에서, 입자크기가 2 $\mu$ m일 때, R은 약 70%를 나타내고 있다. 이는 2 $\mu$ m이상이 되는 오일입자 질량이 블로바이가스에 포함된 총 오일입자 질량의 70%가 됨을 의미한다. 입자크기별 포집효율( $\eta_F$ )은 해당되는 입자크기가 포집될 가능성을 나타내고 있다. 예를 들어, 입자크기 6 $\mu$ m의  $\eta_F$ 는 약 75%를 나타낸다. 이는 6 $\mu$ m의 오일입자가 특정 오일분리시스템에 들어가면, 포집될 확률이 75%가 됨을 의미한다.



[그림 3] 오일입자 분포 및 입자크기별 포집효율[2]  
[Fig. 3] Droplet distribution and fractional separation efficiency[2]

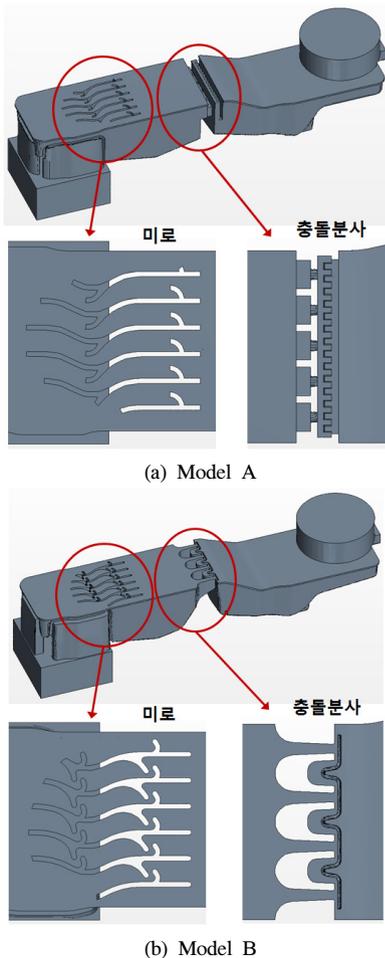
각 입자크기에 대한 포집효율을 다음과 같이 적분하면 시스템의 총 포집효율을 구할 수 있다.

$$\eta_0 = \int \eta_F \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial D}\right) dD \quad (1)$$

여기서  $\eta_0$ 는 총 포집효율,  $\eta_F$ 는 특정 크기의 오일입자에 대한 포집효율, R은 오일입자 총질량에 대한 임의 크기 이상을 포함하는 입자들의 질량률, 그리고 D는 오일입자의 크기( $\mu$ m)를 의미한다. 또한 본 연구에서 사용된 오일입자 포집모델은 Bai-Gossman과 Satoh의 Spread-Rebound 모델을 산술평균하여 사용하였다[4-6].

그림 4는 본 연구에 사용된 각각의 해석 모델을 나타낸 것이다. 모델 A는 기존에 상용화된 제품으로 미로 부분은 비교적 단순하게 설계되어졌다. 충돌 분사(Impinging jet)부분은 5개의 원형 노즐로 구성되어 있으며 노즐의

직경과 길이는 각각 2.8mm와 3.0mm이다. 원형 노즐을 통과한 오일입자는 격판에 고속으로 충돌하여 포집효율이 증대될 수 있는 구조로 설계된 것이 특징이다. 이는 오일 입자의 포집효율면에서는 우수하지만, 협소한 노즐 단면적으로 인해 압력강하량 측면에서는 열악한 성능을 나타낼 것으로 예상된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 4(b)의 모델 B에서는 헤드커버가 허용하는 한도 내에서 미로 부분의 유로를 개선하여 오일의 포집효율은 높이고, 충돌분사 부분에서 유동이 흘러 나갈 수 있는 면적을 넓혀 압력강하량을 개선하고자 하였다. 모델 B의 충돌분사부 최소 단면적은 모델 A의 약 3배 수준이다.

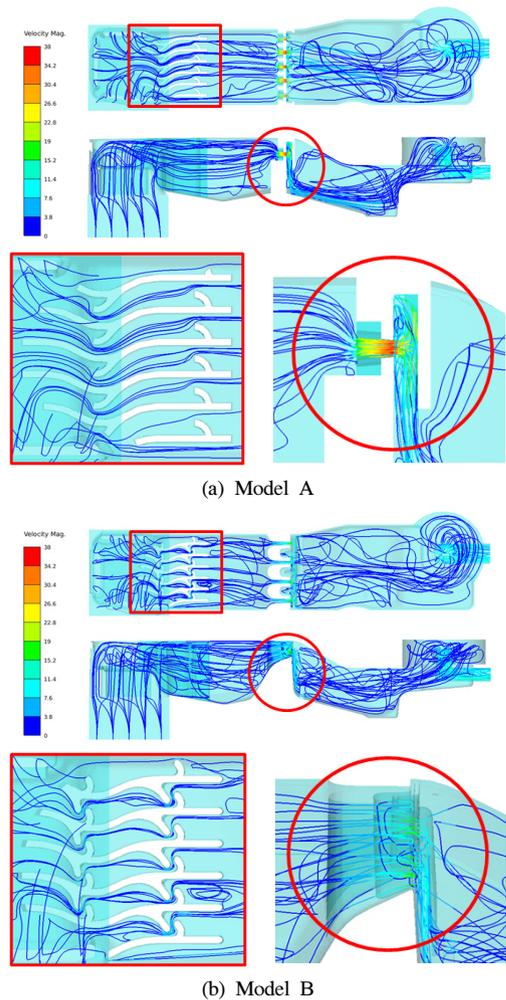


[그림 4] 계산에 적용된 모델  
[Fig. 4] Applied models

## 2.2 해석 결과

미세한 오일입자를 함유한 저밀도 블로바이가스에서

의 전산해석은 유동과 입자거동을 분리하여 진행하였다 [4]. 그림 5는 우선적으로 블로바이가스의 유동을 해석하여 유선 및 속도장을 도시화한 것이다. 모델 A에서는 유선이 미로 부분에서 원활하게 흘러나가는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 원활한 유동형태는 가스유동에 동화되어 거동하는 오일입자들의 포집률을 저하시키는 원인으로 작용할 수 있다. 충돌분사 부분에서는 작은 노즐의 영향으로 면적이 줄어들어 속도가 상승하며, 유동이 수직으로 충돌하고 있다. 이는 포집 효율에서는 우수한 성능을 나타낼 수 있지만, 상대적으로 협소한 노즐부 단면적의 영향으로 인해 압력강하량이 증대될 것으로 판단된다.

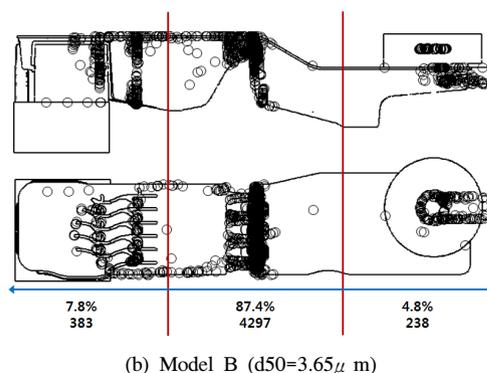
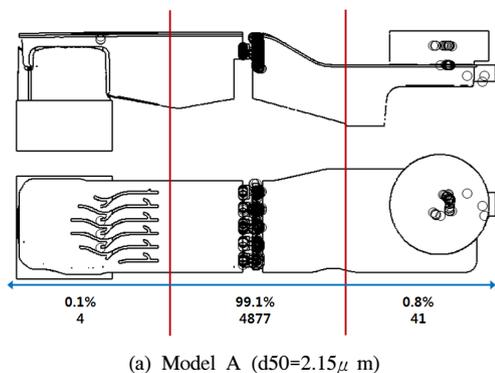


[그림 5] 오일분리기 내의 유선 및 속도장  
[Fig. 5] Streamline and velocity magnitude in the oil separator

모델 A에서 예상되는 문제점을 보완하기 위하여 모델 B가 설계되었다. 먼저, 모델 B의 미로 부분에서는 기존의 측지부를 추가하고 중첩시켜 유동저항을 일부 증가시켰다. 이러한 유동저항의 증가는 국소부위의 지역적 유동속도를 증가시켜 오일입자 포집률이 향상될 것으로 기대된다. 충돌분사 부분에서는 모델 A의 문제점이었던 압력강하량을 완화시켜주기 위하여 수직의 슬롯형태로 유동이 진행되면서 충돌하도록 설계하였다. 이러한 설계변경은 최대속도 감소로 인한 오일입자 포집율의 저하로 이어질 수 있지만, 노즐에서의 최소단면적이 증가하여 압력강하량은 개선될 것으로 기대된다.

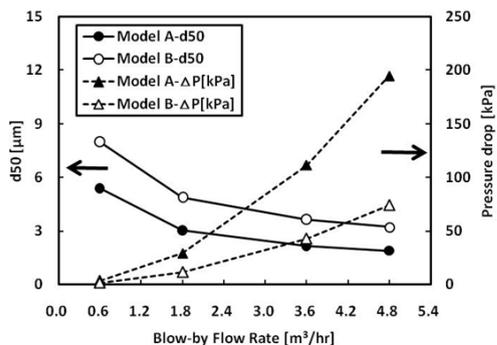
유동해석이 완료되면 해석된 유동장에 특정 크기의 오일입자 10,000개를 입구부의 불특정 위치에서 출발시켜 오일분리기내에서 포집되도록 하였다. 일반적으로 오일분리기의 포집성능을 50%의 포집율을 가지는 오일 입자 크기인 d50으로 대표된다. 예를들어, 특정 오일분리기에 직경 4 μm의 오일 입자 10,000개를 투입하여, 5,000개의 오일입자가 포집되고 5,000개의 오일입자는 분리기를 통과하였다고 가정하자. 즉, 직경 4 μm의 오일 입자에 대한 오일분리 시스템의 포집효율은 50%이며, 이때의 오일입자 크기를 d50이라 한다. 따라서 오일입자 크기 4 μm를 기준으로 입자의 크기가 커질수록 포집효율은 50%이상으로 증가하게 되며, 입자의 크기가 작아질수록 포집효율은 50%미만으로 감소하게 됨을 의미한다.

그림 6은 각 모델별 d50의 오일입자 포집위치와 위치별 포집된 입자의 갯수를 나타낸 그림이다. 모델 A의 경우 예상했던 바와 같이 충돌분사 부분의 오일 포집 효율이 99.1%로 가장 우수했으며, 그 외의 부분에서 오일 입자는 거의 포집되지 못하였다. 모델 A대비, 모델 B의 d50은 증가하였지만, 미로 부분의 오일 포집 효율이 0.1%에서 7.8%로 급격하게 증대되었다.



[그림 6] 오일입자 포집위치 (60 l/min)  
 [Fig. 6] Oil droplet collection location (Blow-by gas=60 l/min)

그림 7은 각 유량별 d50 및 압력강하량을 그래프화한 것이다. 두 모델 모두 유량이 증가함에 따라 블로바이가스의 유동속도도 증가하여, d50이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 유량이 증가함에 따라, 모델 A 대비, 모델 B의 d50값이 약 60% 증가하였지만, 압력강하량은 60%이상 감소하였다. 따라서 모델 A는 오일분리 효율은 우수하나 압력강하량이 과다하고, 모델 B는 압력강하량은 양호하나 오일분리 효율이 모델 A대비 열세한 상황이다.

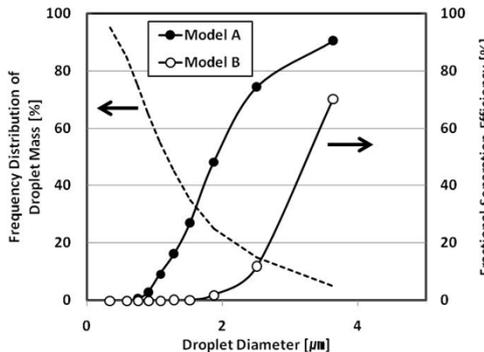


[그림 7] d50 및 압력강하량  
 [Fig. 7] d50 and pressure drop

본 연구에 사용된 1400cc급 가솔린 엔진에 적용되는 오일분리기의 경우 일반적인 설계기준으로 최대 3.6 m³/hr의 블로바이가스 유량에서 50 kPa 이하의 압력강하량을 추천하고 있다. 예를들어 가솔린 엔진의 작동조건으로 최대 작동 압력강하량을 50 kPa로 선정하면, 모델 B는 약 3.84 m³/hr의 블로바이가스 유량을 허용하고, 모델 A는 약 2.22 m³/hr의 블로바이가스 유량을 허용한다. 이러한 결과로 모델 B의 d50은 약 3.6 μm가 되고, 모델 A

는 약 2.8  $\mu\text{m}$ 가 된다.

그림 8은 그림 3에서 설명된 블로바이가스의 오일입자 분포를 본 연구의 두 가지 모델에 적용하여 해석을 수행하였다. 오일입자 분포곡선 R은 문헌의 측정값[2]을 적용하였으며, 블로바이가스 유량은 4.8  $\text{m}^3/\text{hr}$ 으로 설정하였다. 그림 상에서 볼 수 있는 바와같이 모델 A가 모델 B대비 우수한 포집특성을 보이고 있으며 식(1)의 정의에 따라 총 포집효율을 계산하면, 모델 A는 27%, 모델 B는 8.5%의 포집효율을 보이고 있다. 모델 A는 포집효율 측면에서 매우 우수한 성능을 보이고 있으나 압력강하량이 추천 설계치의 2배에 이르는 문제점이 있다. 반면에, 모델 B는 포집효율은 열세이나 압력강하량이 우수하다.

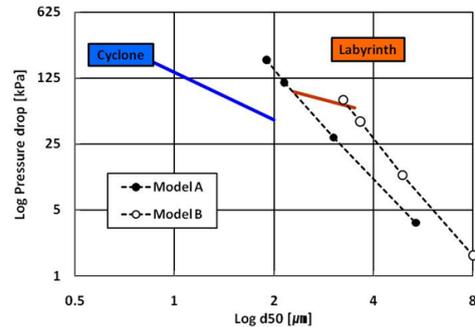


[그림 8] 엔진오일입자 분포 및 입자별 포집효율  
[Fig. 8] Droplet distribution and fractional separation efficiency

일반적으로 오일분리기의 성능적 수준을 파악하기 위하여 압력강하량 대비 d50 그래프가 자주 사용된다[7]. 그림 9는 오일분리기에 사용되는 사이클론형과 미로형 오일분리기의 일반적인 성능 영역을 보여주고 있다. 일반적으로 오일분리기가 그래프의 좌측하단에 위치하면 낮은 압력강하량과 우수한 포집성능을 가진 이상적인 오일분리기이다. 적용된 오일분리기가 우측하단에 위치하면 압력강하량은 우수하지만 포집효율은 열세인 오일분리기이고, 좌측상단에 위치하면 포집효율은 우수하나 압력강하량이 열세인 오일분리기이다. 그림 9를 통하여 미로형 오일분리기 중에서 모델 A는 우수한 포집성능과 열세인 압력강하량을 가지고 있으며, 모델 B는 상대적으로 우수한 압력강하량과 열세인 포집성능을 보이고 있다.

오일분리기의 선정은 많은 부분이 장착하고자 하는 엔진의 특성에 의해 결정되며, 특히 크랭크 케이스 압력과 오일입자 분포에 의하여 지배적인 영향을 받게 된다. 크랭크 케이스의 압력이 크고, 오일소모량이 큰 엔진이면 모델 A와 같이 큰 압력강하량과 우수한 포집효율을 가지

는 오일분리기가 적용되어야한다. 특히 오일의 유입이 치명적인 SCR(Selective Catalytic Reduction) 또는 매연여과장치 등과 같은 특수한 배기처리장치를 장착한 엔진은 압력강하량을 희생해서라도 오일분리 효율이 극대화된 오일분리기를 적용하여야 한다. 반면에 크랭크 케이스의 압력이 높지 않고, 오일소모량이 적은 일반적인 가솔린 엔진의 경우에는 모델 B와 같이 압력강하량이 우수한 오일분리기가 장착될 수 있다.



[그림 9] 오일분리기의 형태별 성능추세[7]  
[Fig. 9] Performance trend for each separator type[7]

### 3. 결론

본 연구를 통하여 가솔린 엔진용 오일분리기의 성능을 전산해석을 통하여 비교 및 분석하였다. 두 가지 다른 형태의 오일분리기를 해석하였으며, 포집된 오일입자를 분석하여 포집성능을 대표하는 d50과 포집효율을 계산하였다.

- 1) 모델 A의 총 포집효율은 27%, 모델 B는 8.5%로 모델 A가 미로형 오일분리기 중에서도 우수한 포집 성능 특성을 보이고 있다.
- 2) 5개의 작은 노즐을 적용한 모델 A는 우수한 오일입자 포집성능과 효율을 나타내었지만, 노즐을 통한 유동의 저항으로 과도한 압력강하량을 나타내었다. 모델 B는 모델 A 대비 열세한 포집성능을 보이고 있으나, 우수한 압력강하량을 가지고 있다.
- 3) 오일분리기는 엔진의 특성에 맞게 적용되어야 하므로, 크랭크 케이스의 압력이 높지 않고, 오일소모량이 적은 일반적인 가솔린 엔진의 경우에는 압력강하량이 우수한 모델 B 오일분리기를 추천한다. 크랭크 케이스의 압력이 높고, 오일소모량이 큰 엔진, 특히 오일입자의 유입이 치명적인 특수 배기처리장치를 장착한 엔진에는 큰 압력강하량과 우수한 포집효율을 가지는 모델 A 오일분리기를 추천한다.

## References

- [1] J. Seo, et al., "A Study on Oil Separation Performance of Crank-Case Ventilation System", Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 3, pp.144-150, 2008.
- [2] Franz Koch, et al., "Lubrication and Ventilation System of Modern Engines-Measurements, Calculations and Analysis", SAE Paper, 2002-01-1315, 2002.
- [3] CD-adapco, "Star-CD V4.06.011 User's Manual", 2009.
- [4] K. Kim, "Numerical Simulation of Blow-by gas and Oil Droplet Separation", Proceedings of KSAE Fall Conference, pp.612-617, 2006.
- [5] C. Bai and A. D. Gosman, "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation", SAE 950283, pp.69-87, 1995.
- [6] K. Satoh, T. Kawai, M. Ishkawa, T. Matsuoka, "Development of Method for Predicting Efficiency of Oil Mist Separators", SAE Paper 2000-01-1234, 2000.
- [7] P. Bastias, et al., "Air/Oil Separation in Cylinder Head Covers", SAE Paper 2004-01-2933, 2004.

### 박 성 영(Sung-Young Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ., 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교, 기계자동차공학부, 부교수

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발

### 김 창 수(Chang-Su Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부(공학사)
- 2011년 2월 : 공주대학교 기계공학과(공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

열유체 해석, 재생에너지, 내연기관 성능개발