

T-GDI 엔진의 속도 및 하중이 블로우바이 가스의 오일입자 크기와 오일분리기 성능에 미치는 영향에 대한 실험 및 수치적 연구

정수진*[†] · 오광호**

Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Load and Speed of T-GDI Engine on the Particle Size of Blow-by Gas and Performance of Oil Mist Separator

Soo-Jin Jeong and Kwangho Oh

Key Words: T-GDI Engine(Turbocharged Gasoline Direct Injection Engine: 과급형 가솔린 직분식 엔진), Blow-by gas(블로우바이가스), Oil-mist separator(오일 분리기), Separation efficiency(분리효율), CFD(전산유체역학), Particle size analyzer(입자분석기)

Abstract

The worldwide focus on reducing the emissions, fuel and lubricant consumption in T-GDI engines is leading engineers to consider the crankcase ventilation and oil mist separation system as an important means of control. In today's passenger cars, the oil mist separation systems mainly use the inertia effect (e.g. labyrinth, cyclone etc.). Therefore, this study has investigated high efficiency cylinder head-integrated oil-mist separator by using a compact multi-impactor type oil mist separator system to ensure adequate oil mist separation performance. For this purpose, engine dynamometer testing with oil particle efficiency measurement equipment and 3D two-phase flow simulation have been performed for various engine operating conditions. Tests with an actual engine on a dynamometer showed oil aerosol particle size distributions varied depending on operating conditions. For instance, high rpm and load increases not only blow-by gases but the amount of small size oil droplets. Submicron-sized particles (less than 0.5 μm) were also observed. It is also found that the impactor type separator is able to separate nearly no droplets of diameter lower than 3 μm . CFD results showed that the complex aerodynamics processes that lead to strong impingement and break-up can strip out large droplets and generate more small size droplets.

1. 서 론

하이브리드 및 내연기관 차량에서 엔진 연소로 인해 발생하는 고온·고압의 연소가스는 연소실 내의 팽창과

열적 변형을 촉진하여, 피스톤 패키지에 관련된 피스톤 라이너/링, 링 그루브, 링 갭과 같이 밀폐가 취약한 미세한 틈새를 통해 일부 연소가스가 연소실 밖으로 유출되는데 이를 블로우바이 가스(Blow by gas)라고 칭하며, 이 과정에서 연소 가스에 혼합되는 연료 증발가스와 윤활유 증기, 배출가스 등이 크랭크케이스 환기시스템의 재순환 과정에서 분리되지 않고, 연소실 내로 다시 유입되면 불완전 연소를 유발시켜서 유해가스 배출과 미세먼지 발생을 증가시키기 때문에 이를 저감시키기 위한 초미세 오일분리기 핵심부품소재 기술개발이 필요하다.

최근 시행중인 엄격한 환경규제를 만족시키기 위해

(Received: 14 Aug 2020, Received in revised form: 4 Sep 2020, Accepted: 22 Sep 2020)

*한국자동차연구원 강소특구지원단

**인지컨트롤스 기술연구소

[†]책임저자, 회원, 한국자동차연구원 정수진

E-mail : sijeong@katech.re.kr

TEL : (041)559-3059 FAX : (041)559-3057

하이브리드 및 가솔린 차량의 엔진 다운사이징(Downsizing)율이 크게 증가하면서⁽¹⁾, 공간적인 제약을 극복하기 위해 실린더헤드커버 내에 오일분리기를 장착하기 때문에 기존 재래식 설계방법으로는 오일분리기의 성능 저하가 불가피하며, 최근 도입된 WLTP(Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure), RDE(Real Driving Emission) 등의 확장된 주행테스트 운전영역에서 발생하는 0.4~1.0 μm 크기의 초미세 오일 입자의 분리를 위해서는 플리스와 같은 핵심소재를 최적화하여 적용한 초미세 오일분리기 기술개발이 요구된다.⁽²⁾

오일 입자를 포함한 블로우바이 가스는 크랭크케이스를 거쳐 오일 분리기에서 걸러내게 되는데 최근 다운사이징율의 증가로 공간적인 제약이 커지므로 실린더 헤드커버 내에 오일 분리를 장착하고 있으며, 기존의 오일분리기는 오일 입자의 관성력을 이용한 미로형⁽³⁾과 원심력을 이용한 원심분리기형⁽⁴⁾을 독립적으로 또는 혼용하여 설계하고 있지만⁽⁵⁾ 이러한 재래식 오일분리기는 1.5 μm 이하의 입자의 분리효율은 최근 연구에 의하면 매우 낮게 보고되는 상황이다⁽⁹⁾. 특히, 최근 국내외에서 큰 화제가 되고 있는 미세먼지는 오일분리기에서 포집되지 못한 미세 오일 입자들의 엔진유입으로 인해 다량 배출되고 있는 상황이며, 따라서 향후 자동차회사는 배기구제를 떠나서 고성능의 오일분리기를 반드시 개발해야 하는 실정이다. 왜냐하면, 흡기관로에 유회유 입자가 유입되면 HC와 미세먼지 등의 유해가스 배출이 상승하며, 이는 과급기와 인터쿨러, 흡기밸브 등과 같은 주요 부품 표면에 흡착되어 증장기적인 작동 내구성고 출력 저하를 유발하기 때문에 환경적인 측면 뿐만 아니라 내구성과 출력 측면에서도 매우 긴급하게 집중적인 연구개발이 절실하다. 또한 고 EGR적용에 따른 연소 및 배출가스 안정성 확보와 Ring Pack 설계기법의 향상으로 인하여 오일의 캐리오버(carry-over)량 감소에 따른 저유량 블로우바이가스의 포집성능 향상을 위하여 액적의 관성력에 의존하지 않는 고성능 오일분리기 개발이 필요하다. 그러나 이에 대한 연구는 실린더 헤드에 장착된 미로형, 원심분리기형 및 스윌러가 장착된 캡사프트 일체형에 관한 연구가 대부분을 이루고 있으며⁽⁶⁻⁸⁾, 최근에 들어서야 플리스가 장착된 임팩터형 오일분리기에 관한 연구가 진행된바 있다⁽¹⁰⁾. 그러나 플리스를 적용한 오일분리기는 플리스에 액적이 지속적으로 포집되어 포화되었을 경우 오일 분리기 내의 급격한 압력상승 및 분리효율 저하를 가져올 수 있어 이를 개선하기 위하여 국외 선진 관련업체에서는 최근 이와 관련된 연구를 진행

하고 있다⁽¹¹⁾.

따라서 본 연구에서는 하이브리드 및 내연기관 차량에 적용 예정인 다운징화된 T-GDI 엔진용 오일분리기의 설계를 위하여 실 엔진실험을 통하여 오일분리기로 유입되는 입자분포를 분석하였으며, 상류에 2개의 타공판(Perforated Plate)을 설치하고 하류에 멀티 임팩터 어셈블리를 장착한 고성능 미로 및 임팩터형 오일분리기를 개발하여 분리효율을 측정하였다. 또한 3차원 CFD 해석을 통하여 기존의 미로 및 임팩터형 오일분리기가 미세 오일입자에 대한 포집효율이 저하되는 원인을 분석하여 향후 저유량 블로우바이가스 내 미세액적을 포집 수 있는 고효율 오일분리기 개발의 기초 설계자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실린더 헤드 일체형 오일분리기 샘플을 제작하여 1.6 리터급 T-GDI엔진에 장착하여 다양한 운전조건에 대하여 오일분리기 전단과 후단에서의 입경분포를 측정하였다.

Table 1은 본 연구의 실험대상인 T-GDI엔진의 제원을 나타내었다.

2.1 실험장치

본 연구에서는 Table 1에 나타난 엔진을 다이내모에 설치하였으며 1 m 길이, 98 mm 직경의 회석관을 엔진 위에 수평으로 설치하였으며 블로우바이가스의 샘플링은 헤드커버 입구와 출구에서 수행하였다. 회석관의 설치목적은 응축을 방지하고 샘플링된 가스 안의 입자농도를 측정가능한 범위안으로 유지해 주는 역할을 한다. Fig. 1에 전체 실험 및 측정장비와 오일 입자분석기 세트(Topas GmbH)를 나타내었다. 펌프가 주변으로부터 유입된 공기를 HEPA 필터를 통하여 1번 스위칭 유닛으

Table 1 Engine specifications

| | |
|---------------------------------|-----------------|
| Displacement (cm ³) | 1,591 |
| Bore×Stroke (mm) | 77×85.4 |
| Compression Ratio | 9.5 |
| Power (PS@rpm) | 177 @ 5500 |
| Oil type | 5W20 |
| Torque(Nm@rpm) | 265@1,500~4,500 |
| Number of cylinder | 4 |

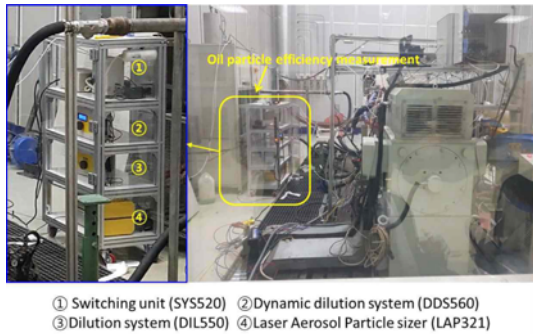


Fig. 1 Photograph of aerosol sampling apparatus installed in an engine cell

로 들어와 100:1의 비율로 블로우바이 가스와 섞이며 2,3번 장치에서 운전조건 별로 달라지는 샘플링 블로우바이 가스량에 맞춰 희석공기량을 조절하여 항상 동일한 희석율을 유지한다. 희석된 블로우바이가스는 4번의 레이저 입자분석기에서 입자크기별 개수를 측정한다. 측정은 엔진의 온도가 균일해질 때 수행하였으며 샘플링 시간은 82초이다.

Fig. 2에 본 연구에 사용된 엔진의 흡기계 및 CCV (Closed Crankcase Ventilation)의 흐름도를 간략히 도식화하였으며 샘플링 위치를 나타내었다.

2.2 실험대상 오일분리기

본 실험에서는 Fig. 3에 나타난 것과 같은 오일분리기에 대해서 연구를 수행하였다. 직경 5 mm의 15개의 구멍을 2열 형태로 가지고 있는 멀티 임팩터를 장착한 오

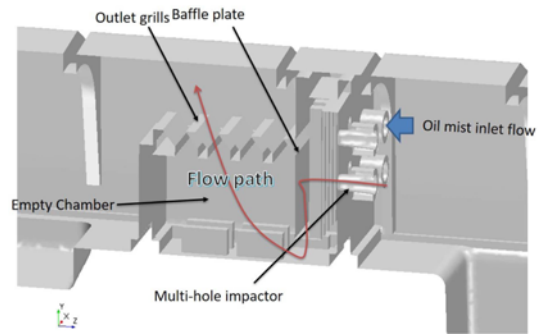


Fig. 3 Multi-impactor type oil separator implemented in the test engine head

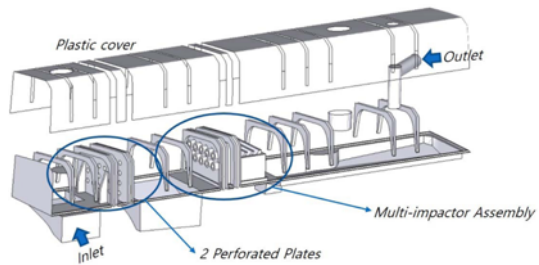


Fig. 4 Geometry of cylinder head-integrated Oil-mist Separator

일분리기이다. 오일분리기의 유증기 유입부 후단에 2개의 타공판(Perforated Plate)을 설치 한 후 하류에 Fig. 3에 나타난 것과 같이 그릴 출구를 가진 체적과 격벽, 그리고 멀티 임팩터가 혼합된 분리기를 장착하여 오일 입자의 관성력을 충분히 이용하도록 설계되었다. Fig. 4는

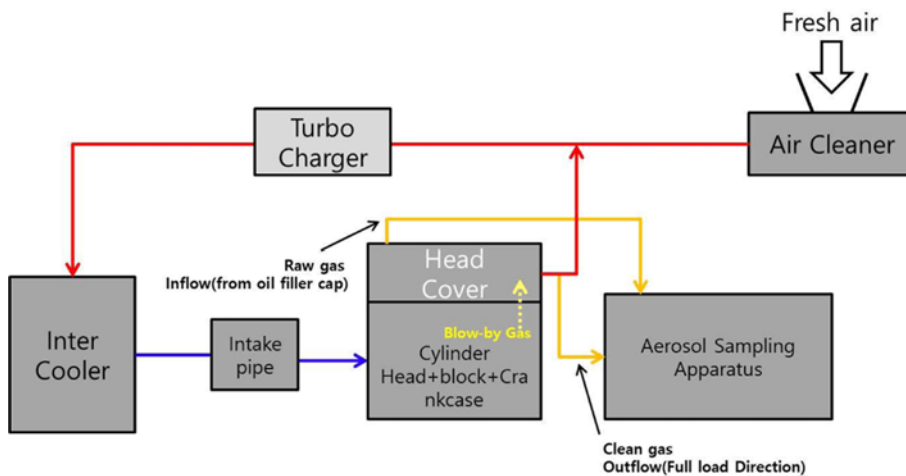


Fig. 2 Schematic Diagram of CCV Flows and Sampling Positions

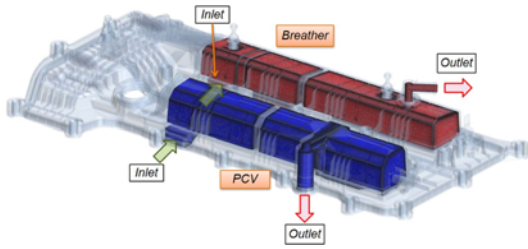


Fig. 5 Computational grid system overlaid with CAD model of cylinder head cover

실린더 헤드 일체형 임팩터 타입 오일분리기의 전체 구조를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 유입되는 유증기 내의 큰 입자들은 상류에 위치한 타공된 격벽 2개에 부딪혀 대부분 액막 형태로 흘러내려 제거되게 된다. 나머지 미세입자들은 하류에 설치된 멀티 임팩터에서 관성과 이에 따른 벽면에서의 액적의 퍼짐 (spread)에 의하여 제거되게 된다.

3. 수치해석

3.1 해석모델

본 수치해석의 오일 분리기는 실린더헤드 일체형이며 Fig. 5에 실린더 헤드와 오일분리기의 3차원 격자를 중첩하여 나타내었다. 모델의 총 계산격자는 1,041,596개, 535,71개로 구성되어 있으며 평균 계산셀의 크기는 1.5 mm이며 경계층은 2개로 설정하였다. 또한 계산의 정확도를 높이기 위하여 총 계산격자의 92~95%는 육면체로 구성하였다. 해석모델의 계산은 상용 CFD 코드인 AVL의 Fire[®]를 사용하여 수행하였다.

3.2 수치해석 및 경계조건

본 해석은 오일입자의 증발을 고려한 3차원 압축성 이상 난류유동으로 고려하였다.

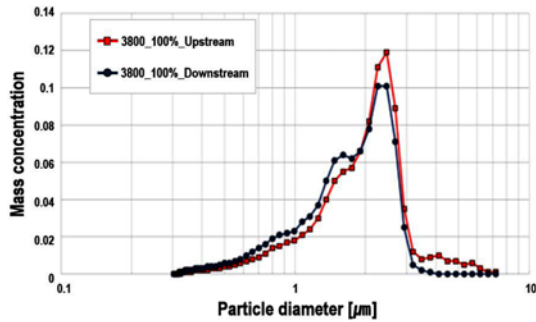
기체상유동을 모사하기 위하여 k- ϵ -f 난류모델⁽¹⁰⁾을 사용하였으며 이상 기체방정식을 사용하여 유체의 압축성을 계산하였다. 대류항 차분법은 운동량방정식과 에너지 방정식 그리고 난류방정식에서는 2차 정도를 지니는 TVD(Flux Correction: MINMOD Relax)⁽¹⁰⁾를 사용하였으며 연속방정식은 중앙차분법을 사용하였다. 속도장과 압력장의 연계는 정상상태에서는 SIMPLE을, 비정상상태에서는 PISO알고리즘을 사용하였다. 계산은 먼저 입자거동을 고려하지 않은 유체유동만을 계산하여 얻은

수렴된 계산결과를 입자거동을 고려한 비정상상태 계산의 초기조건으로 사용하여 해의 수렴성을 높였다. 정상상태 계산에서 유입조건은 5,500 rpm WOT에 해당하는 50 L/min의 유량과 120°C의 온도로 설정하였고 출구는 대기압으로 설정하였으며 벽면은 120°C의 등온조건을 사용하였다. 오일입자의 거동을 모사하기 위하여 입구에 입자분사시간은 0.5초이며 총 비정상상태 계산시간은 10 ms의 시간증분을 사용하였고, 총 계산시간은 2초로 설정하였다. 각 입자별 유입질량은 3 g/h이며 오일입자의 물성치는 5W20의 윤활유를 사용하였으며 입자의 분열은 TAB모델을 사용하였다. 난류 유동특성이 입자 거동에 미치는 영향을 모사하기 위하여 Gosman/Ioannides, O'Rourke 모델⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 입자의 벽면거동을 예측하기 위하여 Kuhnke⁽¹¹⁾모델을 사용하였으며 이 모델은 입자와 벽면과의 반동(rebound), 열적분열, 흡착, 흩어짐(splash)의 거동을 입자의 속도, 표면장력, 포화온도, 밀도, 점도 그리고 벽면의 온도에 따라 예측할 수 있는 모델이다. 입자와 증기와의 열 및 물질전달은 Nu와 Sh수를 기준 실험식⁽¹⁰⁾으로부터 구하여 계산하였다. 각 모델의 케이스 당 계산시간은 Intel® Xenon CPU E5-1620 @3.6GHz 컴퓨터에 8 코어를 사용하여 평균 5시간이 소요되었다.

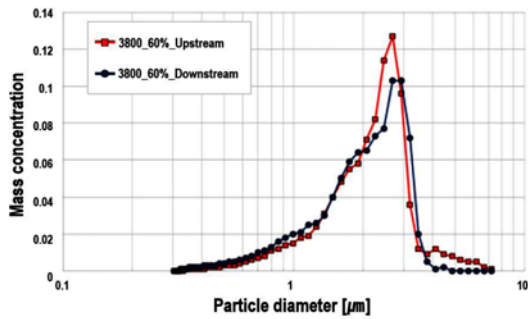
4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

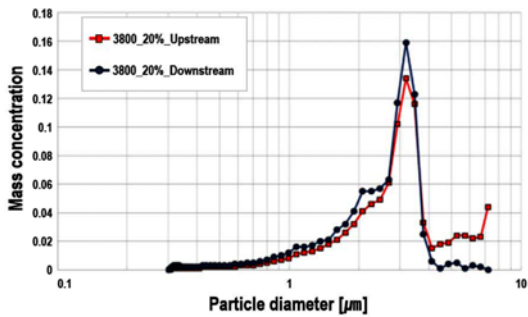
본 실험의 목적은 높은 다운사이징율을 지닌 T-GDI 엔진의 문제점인 높은 블로우바이율과 블로우바이 가스 중 포함되는 미세마이크로미터 입자를 효과적으로 제거할 수 있는 오일 분리기를 개발하는 것이다. 다운사이징 엔진은 고부하에서 운전되기 때문에 링팩을 통과하는 블로우바이 가스의 높은 속도 및 온도로 인하여 오일 캐리어오버량의 증가 및 블로우바이 가스 중 미세마이크로입자가 다량 함유되어 있는 것은 기존 연구⁽¹²⁾로부터 잘 알려진 사실이다. 본 연구의 대상 T-GDI엔진의 블로우바이 가스 중 오일입자의 사이즈분포를 알아보기 위하여 Fig. 6과 Fig. 7에 3800 rpm과 3000 rpm에서 20~100% 하중에 대한 입자의 크기 별 질량농도분포를 오일분리기의 입구와 출구에서 측정하여 나타내었다. 질량농도(mass concentration)는 전체 질량 대비 각각의 입자 크기 별 질량이다. 즉, 총 질량 10 g 중 1미크론 입자 질량 1 g 발생 시 입자의 질량농도는 0.1이다.



(a) 100% load



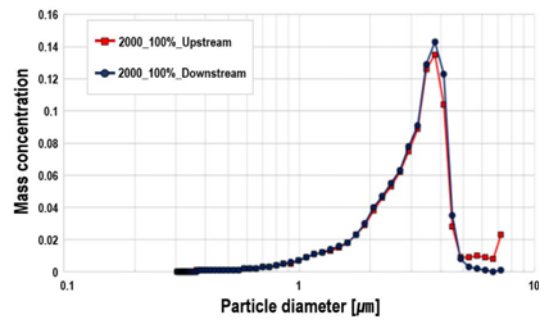
(b) 60% load



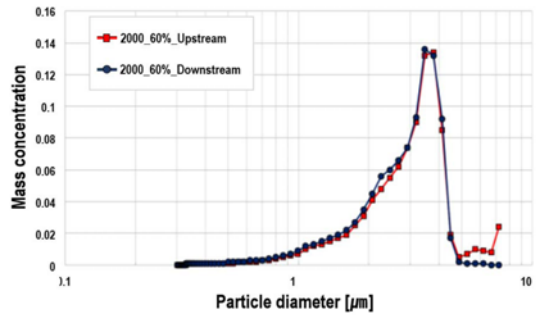
(c) 20% load

Fig. 6 Particle mass concentration distributions for various engine loads at 3800 rpm

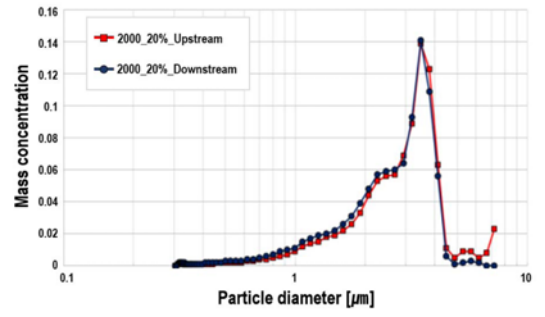
결과로부터 알 수 있듯이, 엔진의 속도와 부하가 증가할수록 블로우바이 가스의 유속 및 온도가 증가하여 윤활유막의 미립화가 촉진되고 비등점이 낮은 윤활유의 증발율이 증가하여 3 μm 이하의 배출입자 개수의 비중이 급격히 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 최근의 기존 연구결과^(2,12,13)와 일치하는 결과이다. 즉 같은 부하의 경우라도 3800 rpm 100%부하의 경우는 약 2.5 μm 의 액적이 최대 질량농도이나 3000 rpm의 경우 100%의 경우 약 3.8 μm 에서 최대 질량농도분포를 보이고 있다.



(a) 100% load



(b) 60% load



(c) 20% load

Fig. 7 Particle mass concentration distributions for various engine loads at 3000 rpm

3800 rpm의 경우 20~100%의 부하변동 시 2.5~3.3 μm 범위에서 최대 입자농도를 나타내고 있으며 3000 rpm의 경우, 약 3.5~3.8 μm 의 영역에서 최대 입자농도분포를 나타낸다. 또한, Fig. 6와 Fig. 7에서 공통적으로 확인할 수 있는 것은 약 3 μm 이하의 입자는 오일분리기의 입구와 출구에서의 질량농도가 변화가 없거나 출구의 질량농도가 오히려 높게 형성되어 있다는 것이다.

이는 이 영역의 입자들을 본 연구에서 적용된 고성능 멀티임팩터 오일분리기가 전혀 분리하지 못하고 있음을

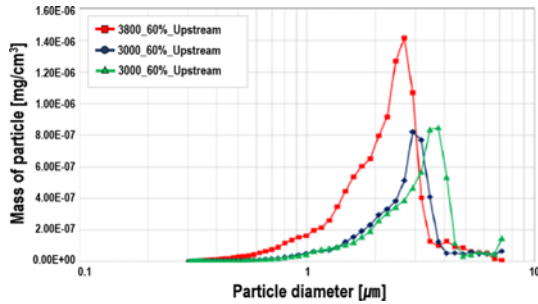


Fig. 8 Particle mass distribution for 60% load at various engine speeds

나타내 주는 것이다. 그리고 출구에서 더 높은 질량농도를 나타내는 것은 오일 분리기 내의 격벽의 다공을 통과하며 가속되어 다른 격벽에 부딪히며 보다 더 작은 입자들로 분산되어 나타나는 현상⁽¹³⁾이다. 따라서 3 μm 이하의 입자들이 다량으로 배출되는 T-GDI엔진의 경우, 관성력을 이용하는 임팩트형 오일분리기는 더 이상 이 영역의 입자의 분리능력을 기대할 수 없다는 사실을 본 연구결과들로부터 확인할 수 있다. 그러므로 T-GDI엔진의 블로우바이 가스내의 3 μm이하의 미세 오일입자를 포집하기 위해서는 플리스와 같은 미세입자 흡착능력을 지닌 재료를 임팩트형 분리기에 적용하거나⁽¹⁷⁾ 전기동력을 이용하여 엔진의 운전조건에 따라 원심력을 차별적으로 이용하는 능동형 원심형 오일분리기등을 적극적으로 고려해야 한다고 생각된다⁽¹⁷⁾.

Fig. 8에는 오일분리기 유입부에서 엔진부하 60%에서 다양한 엔진속도에 대한 입자크기 별 질량밀도를 나타내었다. 전반적으로 rpm이 높아질수록 입자의 유입량이 많아지고 있으며 최대치를 나타내는 입자 크기도 작아지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 1 μm 이하의 입자의 유입도 3800 rpm의 경우 두드러지게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 고속영역이 강조되는 최근 연배기 주행모드의 경우, 링팩을 통과하는 블로우바이 가스의 높은 속도 및 온도로 인하여 오일 캐리오버량의 증가 및 블로우바이 가스 중 미세마이크로입자가 다량 함유되어있음을 본 연구결과로부터 확인할 수 있다.

4.2 해석결과

본 연구에서는 실험적으로 분석할 수 없는 실린더 헤드 일체형 멀티 임팩터 오일분리기 내의 유동 및 입자 거동 특성을 분석하기 위하여 3차원 다상유동 및 입자 거동 해석을 수행하였다. Fig. 9에 오일분리기 내의 유

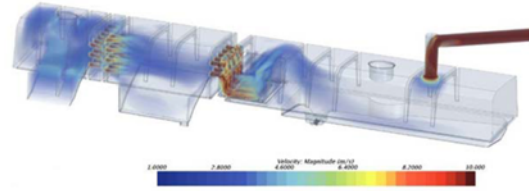


Fig. 9 Computational result of oil-mist velocity distribution in the separator

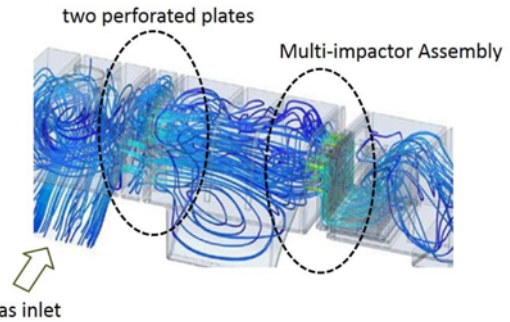


Fig. 10 Particle Streaklines in the region of Perforated Plates and Multi-impactor Assembly

증기의 속도분포를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 상류에 설치된 다공형 격벽에 의해 유증기가 크게 가속되어 하류로 빠져나가고 있음을 볼 수 있는데 이는 입자간 충돌을 증가시키고 격벽에 큰 유입속도로 충돌하기 때문에 관성이 큰 입자들을 제거하기 유용하다. 나머지 작은 입자들은 하류로 이동하여 멀티임팩터에 충돌하거나 홀을 통하여 가속되어 격벽에 재차 충돌하게 되며 아래쪽을 흐르며 챔버내로 유입되게 된다. 유입된 가스는 루버핀 출구로 가속되어 빠져나가면서 오일분리기 위쪽 벽면에 재차 충돌하게 된다. Fig. 10은 2개의 타공판과 멀티 임팩터 주변의 유증기의 유적선을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 유입부 상류에 위치한 2개의 타공판 사이에서 강한 제트류가 형성되어 2번째 타공판에 강하게 충돌되고 있음을 확인할 수 있다. 이후 유증기는 하류로 이동하여 멀티 임팩터 홀 근처에서 급격히 감속되며 홀을 가속되어 빠르게 빠져나가고 바로 벽에 강한 충돌을 일으키고 있음을 볼 수 있다. Fig. 11는 입자크기에 따른 분리효율과 입자의 증발율(%)을 나타낸 것이다.

먼저 3 μm이하의 입자의 경우는 모든 경우의 오일분리기가 매우 낮은 분리효율을 보이는데 이는 작은입

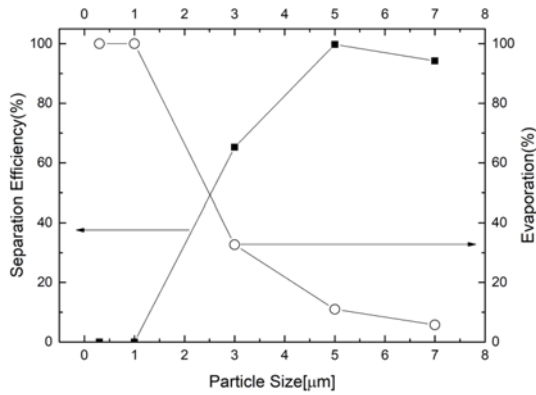


Fig. 11 Separation efficiencies and evaporation rate with respect to particle size

자들의 높은 증발율로 인한 질량의 감소로 인한 관성력의 감소 때문이다. 특히 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 입자의 경우 모든 경우의 분리효율은 0인데 이는 입자가 작아 100% 증발로 기화됨을 의미한다. 이러한 결과로부터 실제 운전조건에서는 입자들의 증발로 인한 $3\ \mu\text{m}$ 이하의 입자들에 대한 분리효율 감소에 대응할 수 있는 기술이 필요함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 및 내연기관 차량에 적용 예정인 고다운징화된 T-GDI 엔진용 오일분리기의 설계를 위하여 실 엔진실험을 통하여 오일분리기로 유입되는 입자분포를 분석하고 미로 및 임팩트형 오일분리기의 분리효율을 측정하였다. 또한 3차원 CFD 해석을 통하여 기존의 미로 및 임팩트형 오일분리기가 미세 오일 입자에 대한 포집효율이 저하되는 원인을 분석하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 엔진의 속도와 부하가 증가할수록 블로우바이 가스의 유속 및 온도가 증가하여 윤활유막의 미립화가 촉진되고 비등점이 낮은 윤활유의 증발율이 증가하여 $3\ \mu\text{m}$ 이하의 배출입자 개수의 비중이 급격히 증가하였다. 본 연구의 경우, 3800 rpm의 경우 20~100%의 부하변동 시 $2.5\sim 3.3\ \mu\text{m}$ 범위에서 최대 입자농도를 나타내고 있으며 3000 rpm의 경우, 약 $3.5\sim 3.8\ \mu\text{m}$ 의 영역에서 최대 입자농도분포를 나타내었다.

(2) $3\ \mu\text{m}$ 이하의 입자는 오일분리기의 입구와 출구에

서의 질량농도가 변화가 없거나 출구의 질량농도가 오히려 높게 형성되어 있으며 이 영역의 입자들을 본 연구에서 적용된 고성능 멀티임팩터 오일분리기가 전혀 분리하지 못하고 있음을 확인하였다. 따라, 입자의 관성력을 이용한 오일 분리는 $3\ \mu\text{m}$ 이하의 입자배출이 대부분을 이루는 T-GDI엔진에 부적합함을 알 수 있었다.

(3) 입자의 증발을 고려한 3차원 다상유동해석을 수행한 결과, $3\ \mu\text{m}$ 이하의 입자의 분리효율은 급격히 떨어짐을 확인 할 수 있었으며 격벽이나 임팩터와 같은 입자의 관성을 이용한 분리기로는 이 영역의 입자분리가 불가능함을 확인 하였으며 이는 실험으로도 확인되었다. 따라서 향후 T-GDI엔진에 대응하기 위한 오일분리기는 액적의 크기에 따라 관성력을 조절할 수 있는 전자식 능동형 오일분리기 개발이 필수적이라고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 주관 “소재부품기술개발사업 (소재부품패키지형, 20004900)”의 일환으로 수행되었으며, 관계자분들께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) M. Shibata, M. Kawamata, H. Komatsu, K. Maeyama, M. Asari, N. Hotta, K. Nakada and H. Daicho, “New 1.0L I3 Turbocharged Gasoline Direct Injection Engine”, SAE Technical Paper 2017-01-1029, 2017.
- (2) K. Bendl, G. Gorbach, T. Gruhler and H. Coolens, “Lightweight Polymer Valve Cover with Integrated Oil Separation”, MTZ, Vol. 71, 2010, pp. 1~7.
- (3) Z. Xinjie, “Analysis of Plastic Oil-Gas Separator for Diesel Engine Valve Chamber Cover”, Int. J. Vehicle Structures & Systems, Vol. 6, No. 3, 2014, pp. 47~50.
- (4) J. Seo, B. Na, J. Kim, S. Park and D. Lim, “A Study on Oil Performance of Crank-Case Ventilation System”, Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 3, 2008, pp. 144~150.
- (5) W. Kee, H. An, Y-S. Cho and B. Na, “An Experimental Study on Separation Efficiency for Oil Particle Diameter of Oil Separator in Cylinder Head Cover”, KSAE Spring Conference Proceedings, 2009, pp. 184~189.
- (6) G. Kissner and S. Ruppel, “Highly Efficient Oil Separation Systems for Crankcase Ventilation”, SAE Tech-

- nical Paper 2009-01-0974, 2009.
- (7) T. Schellhase, H. Sauter and S. Ruppel, "Assembled Camshaft with Integrated Oil Mist Separation", SAE Technical Paper 2007-01-0260, 2007.
- (8) J-E. Yun, K. Chae, H. Kang and D. Chung, "Numerical Analysis of Floe Characteristics of the Filter for Separating Oil Mist from Blow-by Gas", Transactions of KSAE, Vol. 24, No. 5, 2016, pp. 549~555.
- (9) Y. Wada, K. Nakano, K. Mochizuki and R. Hata, "Development of a New 1.5L I4 Turbocharged Gasoline Direct Injection Engine," SAE Technical Paper, 2016-01-1020, 2016.
- (10) AVL FIRE® Main Program User Manual ver.2011.1, 2012
- (11) D. Kuhnke, Spray/Wall-Interaction Modelling by Dimensionless Data Analysis, Ph.D. Dissertation, Darmstadt University of Technology, Darmstad, 2004, pp. 85~150.
- (12) T. Delvign, "Oil Consumption Sources in a Modern Gasoline Engine Including Contribution of Blow-by Separator and Turbocharger: An Experimental Study Based on the Use of Radiotracers", SAE Int. J. Fuels Lubr., Vol. 3, No. 2, 2010, pp. 916~924.
- (13) D. Uy, J. Storey, C. S. Sluder, T. Barone and S. Lewis, "Effects of Oil Formulation, Oil Separator, and Engine Speed and Load on the Particle Size, Chemistry, and Morphology of Diesel Crankcase Aerosols," SAE Int. J. Fuels Lubr., 2016, Vol. 9, No. 1, pp. 224~238.
- (14) M. Gokten, G. Kurnaz, O. Ergen and D. Copley, "The Development of High Efficiency Crankcase Ventilation and Oil Mist Separator for a Heavy-Duty Diesel Application", SAE Technical Paper 2008-01-2687, 2008.
- (15) A. Nicolas and B. Samuel, "Engine Lube-Oil Consumption Stakes and Benefits from Significant Blow-by Oil Mist Reduction", SAE Technical Paper 2012-01-1617, 2012.
- (16) S. Jeong, K. Oh, D. Ha, J. Lim, M. Lee and W. Choi, "Experimental and Numerical Study of Development of the High Efficiency Cylinder Head-Integrated Oil-Mist Separator for T-GDI Engine", Transactions of KSAE, Vol. 26, No. 2, 2018, pp. 254~263.
- (17) Achim Brömmel & Eike Stitterich, "Hengst Active Crank Case Ventilation", 2017, Hengst GmbH, Germany, pp. 1~4.