

디젤유가 혼합된 엔진오일의 트라이볼로지 특성에 관한 실험적 연구

김한구 · 김청균*†

쌍용자동차 기술연구소, *홍익대학교 트라이볼로지연구센터

Experimental Study on the Tribological Characteristics of Diluted Engine Oil by Diesel Fuel

Han Goo Kim and Chung Kyun Kim*†

Ssangyong Motor Company Research Center, *Tribology Research Center, Hongik University

Abstract - An experimental study was conducted to evaluate characteristic variation of diluted engine oils in which contains diesel fuels and its tribological effects on engine components. In this study, diluted engine oils with 10%, 15%, and 20% of initial fuel content rate have been used for measuring the viscosity reduction rate, blow-by gas increment rate, main gallery pressure reduction rate, and fuel content rate in engine oils. These parameters are strongly related to the tribological characteristics of key engine components. The kinematic viscosity of engine oils in which is contained by diesel fuels from 10% to 20% in oils is decreasing to approximately 54% of initial diluted fuel-oil volume ratios. The experimental results show that the distilled engine oil decrease the viscosity of engine oil and its oil film stiffness, and increase the wear rate of rubbing parts of engine components. Thus we recommend that the containing volume rate of fuels in engine oils should be restricted to 3~4% for a sophisticated Diesel engine and 5~7% for a standard one.

Key words - diesel engine, PM(Particulate Matter), CDPF(Catalyzed Diesel Particulate Filter), blow-by gas, kinematic viscosity.

1. 서 론

디젤 자동차는 열효율이 높은 반면에 소음과 진동이 많이 발생하고, PM이나 NOx와 같은 유해 배기가스를 과다하게 배출하기 때문에 가솔린 자동차에 비해 관심을 덜 갖고 있었다. 그러나 최근 더 높은 출력과 완전 연소를 향한 커먼레일 연료분사장치와 유해 배출가스 저감을 위한 연속재생식 디젤매연여과장치(Diesel Particulate Filter: DPF)의 개발[1]로 디젤 자동차도 전자제어 가솔린 자동차에 근접하는 소음과 진동, 그리고 배출가스 저감 등의 성능을 나타내면서 상당한 관심을 기울이게 되었고 특히 유럽의 자동차 메이커를 중심으로 획기적인 기술발전을 거듭하고 있다.

경유(light oil)를 연료로 사용하는 디젤 엔진은 압축비를 크게 높여 연료의 미립화를 달성하여 압축점화에 의한 연료의 자연착화를 이끌어내고 있기 때문에 공기를 압축하는 과정과 연소가스를 팽창하는 과정에서의 피스톤-실린더 간극을 통한 블로바이 현상(blow-by)이나 연료를 분사하는 과정에서 습공기(wetted air)나 연료입자가 엔진오일에 혼합되는 현상이 발생한다.

디젤 자동차의 연비 향상에 의한 에너지 절약 및 유해 배기가스 규제가 나날이 강화되면서 디젤 엔진의 압축비는 더욱더 높아지고 있으며, 연료의 미립화를 실현하기 위하여 고압펌프를 사용한 초고압 분사가 실시되고 있다. 또한, 디젤 엔진에서 배출되는 각종 유해 배출가스를 정화하기 위한 여과장치 개발에도 심혈을 기울이고 있다.

엔진의 출력이나 마찰손실, 그리고 유해물질 배출은

†주저자 · 책임저자 : cckim@wow.hongik.ac.kr

엔진오일과 불가피하게 연계된다. 즉, 동력을 생산하는 엔진은 피스톤-실린더, 밸브 트레인, 베어링 등의 마찰 운동부에 대한 마찰저감, 냉각, 하중지지, 응력분산 등을 위해 엔진오일을 사용한다. 따라서, 엔진의 출력을 향상시키기 위한 과정에서 연료와 엔진오일은 피스톤-실린더와 같이 왕복운동을 하는 부품을 중심으로 회전 마찰 운동부에서 불가피하게 서로 혼합되는 현상이 발생한다.

디젤 자동차는 가솔린 자동차에 비해 열효율이 우수하고, 지구 온난화 현상의 주원인인 CO₂ 배출량이 상대적으로 적다는 장점이 있다. 최근에는 초고압 연료 분사의 대명사로 등장한 커먼레일 연료분사 시스템이 개발되면서 디젤 자동차의 단점인 진동과 소음 문제가 대폭적으로 개선되었다. 또한, 매연 발생량이 크게 줄어들면서 유럽을 중심으로 디젤 자동차 시장은 빠른 속도로 확대되고 있다. 그러나 아직도 입자상 물질 (Particulate Matter: PM)과 질소 산화물(NO_x)의 배출량이 가솔린 자동차에 비하여 많기 때문에 대도시 공해물질 발생의 주범으로 지목된다. 디젤 자동차에서 발생하는 PM은 인체 유해성에 대한 논란이 지속되고 있으며, 국내외적으로 PM의 저감요구가 높아지고 있다[2].

따라서, 디젤 자동차 메이커는 PM의 발생량을 줄이기 위해 후처리 저감장치의 일종인 디젤매연여과장치(DPF)를 사용하고 있으며, 이 기술은 가장 효과적인 PM 대책으로 알려져 있다. 현재 사용되고 있는 연속 재생식 DPF중의 하나는 촉매기반 디젤매연여과장치(Catalyzed Diesel Particulate Filter: CDPF)이다. CDPF는 DPF 표면의 촉매처리(백금 또는 백금/로듐) 기술로 PM의 재생온도를 400°C 이하로 낮추어 DPF의 재생을 원활하게 진행하도록 설계되어 있다. 일반적으로 디젤 엔진에서 배출되는 PM을 산소(O₂)로 재생하기 위해서는 500°C 이상의 높은 온도를 필요로 하였지만, CDPF 기술을 사용하면 재생온도를 300°C~400°C까지 낮출 수 있게 된다. 특히, CDPF는 후분사된 연료의 산화를 통해 배기가스 온도를 증가시켜 재생처리를 하게 된다. 이때 연소실에 후분사된 연료의 일부가 실린더 벽면에 흡착되어 미립자 연료가 엔진오일에 혼입되는 현상이 발생하게 된다[3-5]. 미립자 연료가 엔진오일에 혼입되는 현상은 직접 분사식 가솔린 엔진에서 발생하는 문제점으로 지적되었으나, 후분사를 사용하는 CDPF 장착 디젤 엔진에 대한 기술개발에서도 중요한 문제점의 하나로 대두되고 있다.

디젤 엔진에서 후분사된 연료 미립자가 왕복운동 과

정에서 엔진오일에 혼입되는 것은 불가피하게 진행된다. 즉, 피스톤이 하사점 부근에 도달했을 때 분사된 연료는 산화를 통해 배기가스 온도를 상승시키는 역할을 하고, 이로 인해 CDPF 시스템은 재생을 위한 적정 온도조건을 만족하게 된다. 그러나 연료가 후분사됨으로써 대부분의 연료는 피스톤 보울을 벗어나며, 이중 상당량은 실린더 벽면에 자연스럽게 흡착되면서 엔진오일과 혼합하게 된다.

결국 후분사가 진행되는 과정에도 실린더 벽면에는 미끄럼 마찰 운동부의 윤활성을 확보하고, 연소실의 압축력과 팽창력을 유지하는데 필요한 최소한의 유막(oil film)이 형성되어 있어야 한다. 유막의 상층부에서는 피스톤의 왕복운동에 의한 오일의 재순환 현상이 발생하고, 후분사된 연료/공기 혼합기에 포함된 연료 입자는 혼합기의 유동특성에 따라 부분적으로 윤활유막에 흡착되면서 순환하는 엔진오일에 혼입하게 된다.

오일팬(oil pan)에 저장된 엔진오일은 펌프에 의해 윤활유를 필요로 하는 피스톤-실린더의 간극에 지속적으로 공급되면서 피스톤의 왕복운동에 의해 실린더 벽면을 따라서 형성된 유막에는 연료입자가 흡착되는 현상이 발생되고, 연료가 혼입된 엔진오일은 다시 회수되어 오일팬으로 되돌아간다. 또한, 블로바이 가스(blow-by gas)가 피스톤의 링팩(ring pack)을 통해 오일팬으로 되돌아 가는 과정에서 경유 입자가 엔진오일에 혼입되는 현상이 발생한다.

회수된 엔진오일은 윤활작용을 하는 과정에서 연료 입자의 혼입은 물론 각종 배기가스, 습증기, 공기, 마멸입자 등이 섞이는 현상이 발생하면서 엔진오일의 점도를 비롯한 특성이 달라지는 열화현상이 진행된다. 특히 연료가 혼입된 엔진오일을 마찰 운동부에 다시 공급하면 엔진오일의 점도 저하에 따른 유막형성이 어려워지면서 기존의 유체윤활은 경계윤활이나 극단적인 고체마찰로 이어져 마멸이 발생한다.

본 연구에서는 PM의 발생량을 줄이기 위해 사용하는 후처리 저감장치인 CDPF장착식 후분사 때문에 발생하는 연료 미립자와 엔진오일의 혼합에 따른 엔진오일의 특성변화와 윤활부의 마멸문제를 고찰하고자 한다. 즉, 엔진오일의 점도저하는 엔진의 윤활성을 떨어뜨리는 것은 물론 마찰 운동면의 유막강도를 약화시키기 때문에 마찰 운동부의 하중지지를 정상적으로 유지할 수 없게 된다. 따라서 엔진오일에 대한 경유의 혼입은 엔진 마찰부의 트라이볼로지 성능을 크게 떨어뜨리는 원인이 된다.

Table 1. Engine specification

Engine type	4-stroke, 5-cyl.
Bore	86.2 mm
Stroke	92.4 mm
Valve arrangement	DOHC
Compression ratio	18:1
Number of injectors	5

Table 2. Properties of diesel fuel

Density at 15°C, g/cm ³	0.833
Cetane number	58.6
Ignition point, °C	82.0
Kinematic viscosity at 40°C, cSt	3.245

Table 3. Properties of engine oil

Viscosity grade	10W40
Density at 15°C, g/cm ³	0.8651
Flash point, °C	227
Viscosity at 40°C, cSt	100.70
Viscosity at 100°C, cSt	15.19
Viscosity index	159

본 연구결과는 엔진설계 과정에서 엔진오일의 윤활 성능 유지와 CDPF에 의한 배출가스 완화 기술개발에 필요한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험조건 및 방법

경유가 혼합된 엔진오일에 대한 실험을 위해 사용된 디젤 엔진은 5실린더 2700 cc의 직접 분사식 연료분사 시스템을 채택하고 있다. 본 연구에서 사용한 디젤 엔진의 구체적 사양은 Table 1과 같다. Tables 2와 3은 시험에 사용된 경유와 엔진오일의 물성치를 각각 나타내고 있다.

후분사를 사용하는 축매기반 디젤매연여과장치(CDPF)는 연료입자가 엔진오일에 혼합되는 불가피한 현상을 수반한다. 이러한 연료-오일의 혼합 현상이 엔진의 마찰 운동부에 영향을 미치지 않을 정도의 연료 혼합량에 대한 한계치를 제시하는 것이 필요하다. 일반적으로 세계적인 자동차 메이커와 엔진개발 전문업체들이 수행한 실험적 결과에 의하면 엔진오일의 6~10% 정도를 연료 혼합량의 한계치로 제시하고 있다.

그러나 본 실험에서는 디젤 엔진의 연료분사압력을 초고압으로 증가시킨 커먼레일 엔진의 급격한 도입을

고려하여 기존에 알려진 6~10%의 연료 혼합율을 올려서 실험을 수행하였다. 즉, 엔진오일에 10~20%의 연료를 혼합하여 통상적인 연료 혼합량 한계치보다 더 가혹한 조건에서 작동하는 엔진의 윤활특성을 고찰할 수 있도록 엔진오일을 제조한 다음, 이 시료를 사용하여 엔진시험을 수행하였다.

엔진오일에 혼합된 연료 혼합량을 측정하는 정확한 방법은 GC(Gas Chromatography)를 이용한 화학적 분석방법이 있지만, 측정 절차가 복잡하고 장비가 고가이며 오랜 측정시간을 필요로 한다는 단점이 있다. 엔진오일의 물리적 점도를 측정하여 연료의 혼합량을 예측하는 방법은 GC 분석법에 근접한 정량적 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 시험시간과 비용 측면에서 높은 경쟁력을 갖는다. 하지만 점도 측정방법은 측정된 점도 값에서 오일 속에 포함된 수트(soot) 및 다른 미세 성분에 대한 영향을 고려할 수 없다는 단점이 있다.

본 실험에서는 엔진오일에 혼합된 연료량을 예측하기 위해 엔진오일에 연료를 2%씩 추가하면서 점도를 측정하여 연료 혼합량에 따른 점도 보정곡선을 작성하였다. 측정된 보정곡선을 이용하여 디젤 엔진의 운전조건에 따른 오일의 점도변화 특성을 관찰하였고, 동시에 연료 혼합량을 예측하였다. 또한, 엔진오일의 점도변화가 엔진의 마찰 운동부에 미치는 영향을 평가하였다.

3. 실험 결과

Fig. 1은 본 실험을 통하여 구해진 동점도 보정곡선을 제시하고 있다. 실험 결과에 의하면, 디젤 엔진에서 널리 사용하는 10W40 엔진오일에 연료의 혼합율이 어

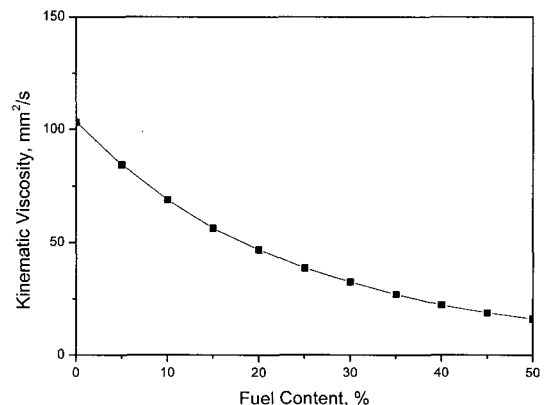


Fig. 1. Calibration curve of kinematic viscosity for predicting oil dilution level as functions of fuel contents.

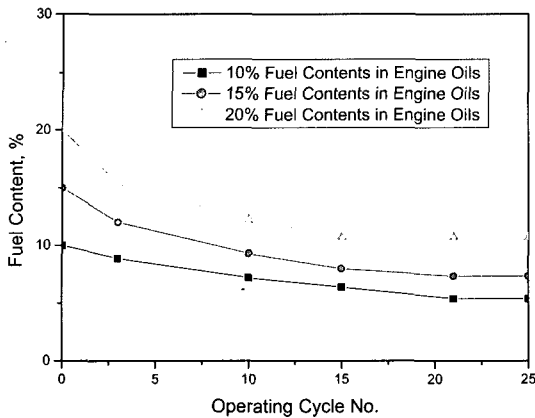


Fig. 2. Fuel content variation curves for various values of fuel contents in engine oils as functions of operating cycles.

는 정도 증가하게 되면 오일의 동점도는 완만하게 떨어지다가 동점도가 수렴하는 현상을 보여준다. 엔진오일에 약 18%의 경유가 혼입되면 엔진오일의 동점도는 반으로 떨어지는 심각한 점도저하 현상을 보여준다.

따라서 엔진오일에 혼입되는 연료의 혼입율을 일정 이하로 규제해야 오일의 점도를 일정하게 유지할 수 있다. 이러한 이유로 대부분의 자동차 메이커는 엔진오일에 혼입된 경유를 6~10% 이내로 규제치를 제시하고 있으나, 자동차의 트라이볼로지 성능향상을 위해서 고급 디젤 자동차에서는 3~4%, 그리고 보통 디젤 자동차에서는 5~7% 정도로 제한하는 것이 바람직하다.

Fig. 2는 엔진오일에 혼입된 초기의 연료량이 10%, 15%, 20%일 경우, 엔진의 운전시간에 따라 진행되는 오일의 점도변화를 이용하여 연료 혼입량의 변화율을 측정된 것이다. 엔진오일의 점도측정을 위해 연료-오일 혼합유 시료의 샘플링은 10사이클마다 실시하였다. 10~20%의 연료 혼합율을 갖는 엔진오일을 디젤 엔진에 넣고 실험을 수행한 결과에 의하면, 연료가 엔진오일에 혼입된 초기 혼입율 10%, 15%, 20%는 엔진의 운전시간이 경과함에 따라 완만하게 줄어들고 있음을 보여준다. 즉, 연료가 혼입된 엔진오일은 엔진의 운전시간이 약 20사이클 이상이 되면 엔진오일에 혼입된 초기 연료량 10%, 15%, 20%는 5.4%, 7.3%, 11.7% 정도로 각각 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 초기의 연료 혼입율은 시간이 경과함에 따라 약 절반정도는 증발되어 연료 혼입율이 개선되는 데이터를 제시하지만, 엔진에 따라서 연료 혼입율이 달라지기 때문에 엔진의 설계에 대단히 중요한 변수라 할 수 있다. 실

Table 4. Fuel distillation rate of engine oil used

Initial fuel content, %	Operated cycle	Fuel distillation rate, %
10	21	54.0
15	20	54.3
20	15	53.5

험을 더 진행한 20사이클 이후의 연료 혼입량은 더 이상 감소하지 않고 혼입과 증발의 평형을 나타내고 있다. 결국, 엔진오일의 온도상승에 따라 혼입된 연료의 증발온도가 오일에 비하여 낮기 때문에 오일에 함유된 연료가 먼저 증발하는 현상으로 생각할 수 있다.

운전중인 엔진에서 연료의 증발 현상이 발생할 수 있는 부분은 피스톤-실린더 벽면이나 피스톤 링팩과 같이 연료의 연소공정에 직접 노출된 부위로 제한된다. 실험에 사용된 경유가 완전히 증발하기 위해서는 약 380°C의 높은 온도조건을 요구한다. 그러나 엔진의 실린더, 피스톤을 비롯한 피스톤 헤드 등의 엔진 구조물 온도는 냉각 시스템에 의해 온도상승이 제한되므로 엔진오일에 혼입된 연료가 운전중에 모두 증발한다는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 엔진오일 중에 경유는 항상 혼입되어 축적되기 쉬운 운전조건을 갖는다.

Table 4는 연료가 10%, 15%, 20% 혼입된 엔진오일을 운전시간에 따라 변화하는 연료 혼입량 정도로 요약한 데이터이다. 연료 혼입율이 10%, 15%, 20%인 경우 21, 20, 15 사이클을 작동시킨 후에 측정된 연료 혼입량의 감소폭은 약 54%로 비교적 일정하게 수렴되어 있음을 알 수 있다. 이것은 엔진오일에 혼입된 연료 혼입량이 아무리 증가하여도 본 실험에 사용된 운전조건에서는 54% 정도만 운전중에 증발되고, 나머지 연료는 모두 엔진오일에 그대로 용해되어 점도를 저하시키는 역할을 한다는 것이다. 즉, 엔진의 과열에 의한 연료의 증발조건은 엔진의 속도, 연소온도, 연소압력 등과 같은 작동조건에 대하여 일정하므로, 엔진오일에 혼입된 연료의 증가는 오일의 점도를 더 떨어뜨리는 원인으로 작용한다는 사실이다.

따라서 엔진오일에는 온도변동에 따른 유막의 강도 안정성을 확보하기 위해 불가피하게 점도지수 향상제(viscosity index improver)를 첨가하여 사용한다. VI 첨가제는 운전중에 마찰 운동부에서 발생하는 점성 전단력에 의해 화학적 결합고리가 끊어져 점도를 떨어뜨리는 현상을 차단하는 작용을 하며, 일정기간 운전한 후 열화현상에 의해 화학구조가 다시 회복되면서 점도

가 향상되도록 작용하는 특성이 있다. 그러나, 엔진오일에 연료입자가 과도하게 혼합되면 엔진오일의 화학적 성분변화와 더불어 심각한 점도저하를 유발하고, 엔진의 마찰 운동부에 대한 유막 강성도에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 연료 혼합으로 엔진 마찰 운동부에 대한 하중지지, 냉각성, 유효성 등이 떨어지는 현상이 발생하는 것은 물론, 마찰 운동부의 마멸량 발생을 급격하게 증가시키는 원인으로 작용한다.

엔진에서 유효를 필요로 하는 부분은 고속 운동부와 하중 전달부로 크게 구분할 수 있다. 엔진오일을 공급하여 정상적인 유효성을 확보해야 하는 운동 마찰부에 연료가 혼합된 엔진오일을 공급함으로써 이들 마찰부에서 발생하는 트라이볼로지 영향을 평가하였다. 따라서, 엔진 실험을 종료한 후 터보차저, 링팩, 베어링 등의 마찰운동 부품에 대한 마멸상태를 관찰하였다. 연료가 혼합된 엔진오일과 혼합이 없는 일반 엔진오일의 두가지 경우에 대한 실험결과를 비교하였을 때, 링팩과 베어링의 경우는 점도저하로 인한 마멸량이 증가한 것을 알 수 있었다. 특히, 연소압력에 의한 하중이 전달되는 커넥팅로드의 대단부 베어링에서 발생된 마멸량은 심각할 정도로 많이 증가하였다. 하지만, 터보차저의 경우는 연료가 혼합된 엔진오일의 사용으로 인해 발생된 문제점은 거의 나타나지 않았다.

Fig. 3은 연료가 10~20% 정도 혼합된 엔진오일을 사용하고, 메인 갤러리의 오일 압력을 정상적으로 유지한 상태에서 피스톤-실린더 간극을 통하여 빠져나간 블로바이 가스에 대한 실험결과를 제시한다. 실험결과에 의하면 400~500 사이클의 운전 구간에서 가장 높은

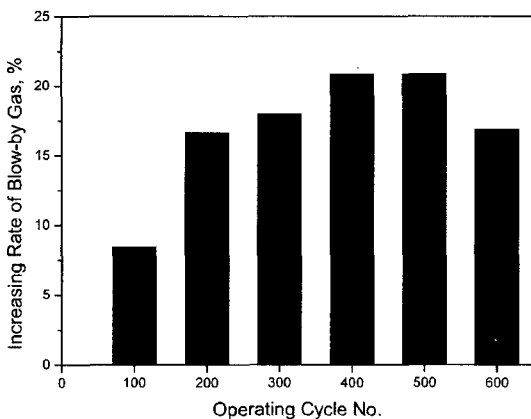


Fig. 3. Increasing rate of blow-by gas as functions of operating cycle number using pure engine oils.

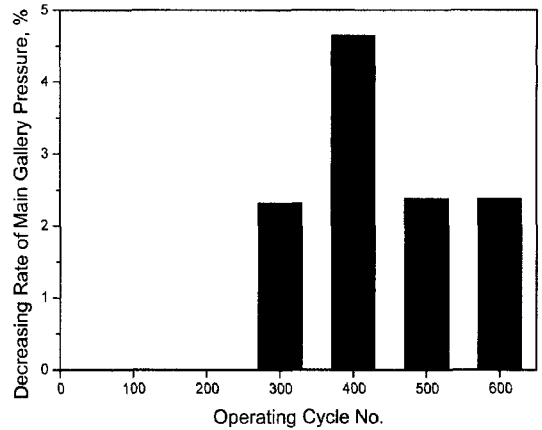


Fig. 4. Decreasing rate of main gallery pressure as functions of operating cycle number using pure engine oils.

블로바이 가스량이 발생하고 있음을 보여주고 있다. Table 4의 결과에 따르면, 20 사이클 정도의 실험에서 제시한 연료 증발율이 약 54%이고, 그 이상에서는 연료가 오일에 축적될 것이라고 고찰한 것처럼 결국 엔진오일에 경유가 혼합되는 축적율은 지속적으로 증가하고, 이것은 오일의 점도저하에 의한 유막 강성도를 약화시켜 마멸 진행에 따른 블로바이 가스량의 증가로 이어진다는 것으로 설명될 수 있다.

Fig. 4는 엔진오일의 메인 갤러리 압력을 운전기간에 대하여 측정된 것이다. 실험 결과에 의하면, 작동시간이 400 사이클일 때 메인 갤러리 압력이 가장 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 피스톤-실린더 링팩의 마멸량 증가는 블로바이 가스량 발생의 원인으로 작용하고, 오일의 점도저하로 인해 엔진의 모든 마찰 운동부에 대한 마멸은 메인 갤러리 압력을 저하시키는 원인으로 작용한다고 판단된다. 이러한 메인 갤러리의 압력 저하는 유효성을 필요로 하는 마찰 운동부에 충분한 오일을 공급하기 어렵다는 측면에서 유효성 확보가 더욱 어려워진다는 문제점이 있다.

4. 결 론

디젤 엔진의 작동과정에서 연료가 엔진오일에 혼합되는 불가피한 현상이 발생한다. 이것은 엔진오일의 점도를 변화시키고, 동시에 유막 형성의 불안정으로 이어져 피스톤-실린더를 비롯하여 베어링과 같은 주요 마찰 운동부에 대한 마멸을 발생시킨다. 본 연구에서는

이러한 현상을 파악하기 위하여 엔진오일의 연료 혼합율에 대한 실험을 수행하였다.

엔진오일에 대한 초기의 연료 혼합율은 10%, 15%, 20%이지만, 엔진의 작동시간이 경과함에 따라 엔진오일에 혼합되는 연료량은 엔진의 작동조건에 따라 변하게 된다. 엔진의 작동에 따라 엔진오일에는 지속적으로 미량의 연료가 유입된다. 특히, 연료는 오일에 비하여 증발온도가 낮기 때문에 작동온도가 상승함에 따라 혼합된 연료의 대부분을 증발하려는 특성은 있지만, 실제로 엔진의 작동조건에서 증발될 수 있는 연료는 약 54% 정도인 것으로 고찰되었다. 하지만, 혼합된 나머지 연료는 증발되지 못하고 엔진오일에 남아있기 때문에 엔진오일의 점도는 더 떨어지게 된다. 따라서, 엔진오일에 혼합된 연료량의 증가로 인한 점도저하는 엔진의 고속 회전부를 비롯한 마찰 운동부의 유막형성을 어렵게 만들어 피스톤의 링팩 및 커넥팅로드 베어링 등의 마멸을 심화시키는 것을 알 수 있었다. 결국, 엔진오일의 점도저하로 인해 발생된 마멸로 블로바이 가스량이 증가하였으며, 이러한 현상이 엔진 전체 오일 압력 시스템의 손실로 작용하고 있음을 알 수 있었다.

대부분의 자동차 메이커나 엔진개발 전문업체에서 엔진오일에 혼합된 연료량을 6~10% 이내로 설계 규제

치를 제시하고는 있지만, 디젤 자동차의 트라이볼로지 성능향상을 위해서는 고급 디젤 자동차에서는 3~4%, 그리고 보통 디젤 자동차에서는 5~7% 정도로 제한하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

1. Matsuo, S., Takami, K. and Yamamoto, H., "Influence of Properties of Diesel Fuel on Diesel Engine Performance," *JSAE*, Vol. 58, No. 11, 2004.
2. 김홍석 외 6명, "Peugeot 607 경유 승용차의 매연 여과장치 특성 분석," *Transaction of KSAE*, Vol. 12, No. 3, pp. 66-74, 2004.
3. Shayler, P.J., Winborn, L.D. and Scarisbrick, A., The Build-Up of Oil Dilution by Gasoline and the Influence of Vehicle Usage Pattern, SAE2000-01-2838, 2000.
4. Terrence Alger, Yiqum Huang, Matthew Hall and Ronald D. Matthews, "Liquid Film Evaporation of the Piston of a Direct Injection Gasoline Engine," SAE2001-01-1024, 2004.
5. Takumaru Sagawa, Hiroya Fujimoto and Kiyotaka Nakamura, "Study of Fuel Dilution in Direct-Injection and Multipoint Injection Gasoline Engines," SAE2002-01-1647, 2002.