

경유혼입 디젤엔진오일의 점도특성에 관한 실험적 연구

김청균[†] · 김한구

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Experimental Study on the Viscosity Characteristics of Diluted Engine Oils with Diesel Fuel

Chung Kyun Kim[†] and Han Goo Kim

Tribology Research Center, Hongik Univ.

Abstract – An experimental study was conducted to evaluate the viscosity characteristics of multi-grade engine oils in which contain diesel fuels. Unused engine oils of SAE 5W40, 10W40 and 15W40 were blended with a diesel fuel ratio of 5%, 10%, and 15%. The viscosity of a diluted engine oil was measured with temperature variation ranging from -20°C to 120°C using a rotary viscometer. The diluted engine oil in which is blended to a diesel fuel plays an important role for decreasing an engine oil viscosity, which may decrease the oil film thickness and a load-carrying capacity. Test results show that the viscosity tends to fall for the increased temperature when engine oil is mixed with a diesel fuel. Especially, the viscosity at a low temperature zone is radically decreased compared with a high temperature zone. Based on the experimental results, the empirical equation that can predict the viscosity of diluted engine oil is expressed in the exponential function with the variation of the temperature and a fuel ratio of diluted engine oil. This equation may be possible to predict the limitation of the oil-fuel dilution rate at the concept design stage of the CDPF system, which doesn't affect the influence of the tribological components.

Key words – engine oil, fuel dilution, viscosity, CDPF(Catalyzed Diesel Particulate Filter), PM(Particulate Matter)

1. 서 론

자동차에는 휘발유를 공기와 혼합하여 불꽃점화에 의해 연료를 태우는 가솔린 엔진과 고온고압으로 압축한 공기에 경유를 고압으로 분사하여 자연적으로 착화시키는 디젤 엔진의 두 가지가 있다. 가솔린 엔진은 NOx 나 입자상물질(Particulate Matter: PM) 발생량이 디젤 엔진에 비해 낮기 때문에 친환경적이라고 할 수 있으나, CO₂ 발생량은 상대적으로 높기 때문에 지구온난화의 주범으로 몰리면서 오히려 어려움을 겪고 있다[1]. 디젤 엔진은 열효율과 출력이 높고, CO₂ 발생량은 적다. 특히 디젤 엔진은 최근에 전자제어 초고압 연료분사장치인 커먼레일 시스템과 디젤매연여과장치(Diesel

Particulate Filter:DPF)가 도입되면서 획기적인 전환점을 맞이하였다. 가솔린 엔진 대비 단점으로 지적된 엔진의 진동과 소음, 입자상물질, NOx 등은 커먼레일 시스템과 DPF 장착으로 더 높아진 출력과 연비향상, 그리고 매연문제 완화라는 강점이 부각되면서 시장규모가 급격하게 증가하고 있다.

우리나라는 여기에 추가하여 자동차 연료유인 휘발유, 경유, LPG의 상대적 세율을 100:85:50으로 유지하는 세제정책 때문에 경유는 휘발유 대비 15%의 혜택을 누리게 되었으니 경유차 시장 확대에 큰 힘을 얻게 되었다[2]. 다만, 경유차에 대한 기존의 고정관념인 소음과 진동, 매연차량 이미지를 어떻게 벗느냐가 시장 확대의 관건이라 할 수 있다.

본 연구에 관련된 경유차 엔진오일은 PM의 저감대책으로 도입된 DPF와 밀접한 관련이 있다. DPF로 사

[†]주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@empal.com

용되는 촉매기반 디젤매연여과장치(Catalyzed Diesel Particulate Filter:CDPF)는 DPF 표면의 촉매(백금 또는 백금/로듐) 처리를 이용하여 PM의 재생온도를 400°C 이하로 낮춤으로써 DPF 재생을 원활하도록 설계되어 있다. 디젤 엔진에서 배출되는 PM을 산소로 재생할 경우는 500°C 이상의 온도가 확보되어야 하지만 CDPF를 이용할 경우는 재생온도를 300°C~400°C 까지 낮출 수 있다. 특히, CDPF는 후분사 연료의 산화를 통해 배기가스 온도를 증가시켜야 재생할 수 있다. 이때 연소실에서는 후분사 연료의 일부가 실린더 벽면에 흡착되어 연료가 엔진오일에 혼입되는 저점도화 현상이 발생한다[3-5]. 경유가 엔진오일에 혼입되는 현상은 보통 직분식 가솔린 엔진에서 발생하는 문제로 여겨져 왔으나 후분사를 사용하는 CDPF 장착 디젤 엔진에서도 중요한 문제점으로 지적되어 왔다.

후분사된 연료가 엔진오일에 혼입되는 과정은 다음과 같다. 피스톤이 하사점 부근에 도달하였을 때 분사된 연료는 산화로 인해 배기가스 온도를 상승시키는 역할을 한다. 이로 인해 CDPF 시스템은 재생을 위한 적정 온도조건을 만족하게 된다. 그러나 연료가 후분사 됨으로써 경유의 상당량이 피스톤 보울(bowl)을 벗어나 실린더 벽면에 흡착되는 현상이 발생한다. 이것은 결국 엔진오일과 유막형성 과정을 거치면서 오일과 연료는 혼합하게 된다. 즉, 실린더 벽면에는 엔진오일에 의해 일정유막을 이미 형성하고, 이 유막의 상층부에서 피스톤의 왕복운동에 의한 재순환 현상이 발생하며, 후분사된 연료/공기 혼합기에 포함된 연료는 혼합기의 유동특성에 따라 유막과 흡착되면서 엔진오일에 혼입하게 된다.

여기서 피스톤의 왕복운동은 오일탱크에 저장된 엔진오일을 실린더 벽면으로 공급하고, 이미 공급된 실린더 벽면의 오일은 연료를 혼입한 상태로 유막을 형성한다. 피스톤이 하사점으로 이동하면서 유막은 피스톤 링에 의해 아래로 긁어내려져 오일은 오일탱크로 되돌아오게 된다. 또한, 블로바이가스(blow-by gas)는 피스톤과 실린더 간극을 통과하여 오일탱크로 유입되는 과정에서 경유는 엔진오일과 혼입되는 현상이 발생한다[6].

따라서 엔진오일에 경유가 혼입되면서 발생하는 점도특성의 변화에 대한 실험적 연구결과는 CDPF 설계자의 큰 관심거리이다. 본 연구는 디젤 엔진의 매연저감을 위해 사용하는 CDPF에 관련된 기술개발 설계자료로 활용할 수 있도록 경유 혼입량에 따른 엔진오일

의 점도특성을 고찰하고, 이것을 간편한 실험식으로 표현하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

Fig. 1에서 보여준 것과 같은 회전형 점도계(RHEOLAB MC 1 Model)를 사용하여 경유가 혼입된 엔진오일 샘플에 대한 점도를 측정한다. 오일의 온도를 균일하게 유지하기 위해 오일순환장치를 사용한 간접가열 방식을 채택하고 있다.

2-2. 엔진오일

본 연구에서 사용한 디젤 엔진용 오일의 기본적인 물성치는 Table 1과 같다.

2-3. 실험방법

후분사법을 사용하는 디젤 엔진의 촉매기반 디젤매연여과장치(CDPF)는 경유가 엔진오일에 불가피하게 혼입되기 때문에 연료 혼입량이 엔진부품에 대한 윤활작용에 영향을 미치지 않을 정도의 제한치를 결정하는 것이 중요하다. 세계적인 자동차 메이커나 엔진개발 전

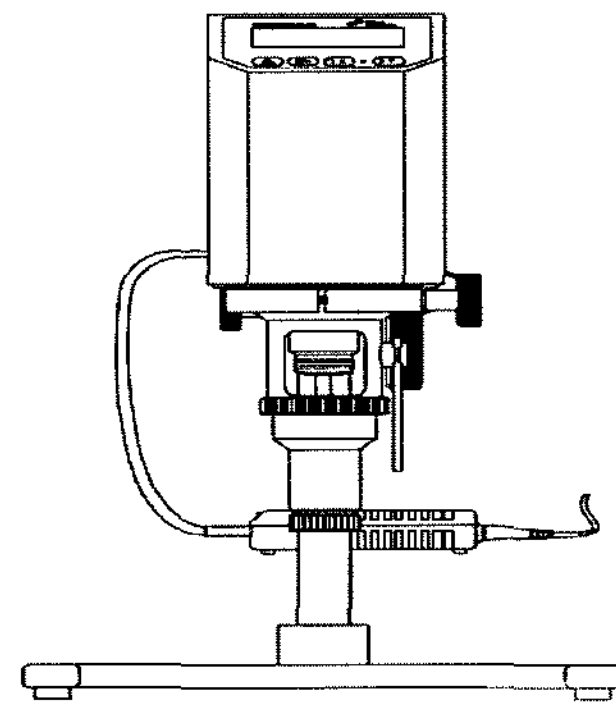


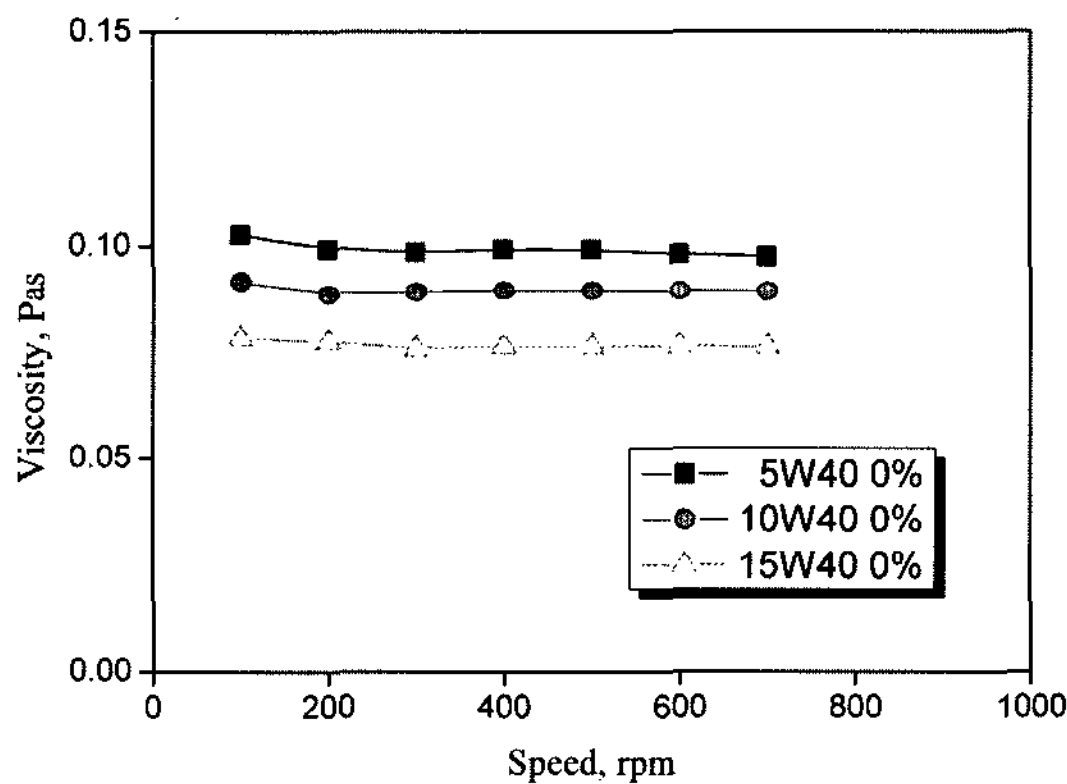
Fig. 1. Rotary type viscometer.

Table 1. Engine oil properties for a diesel engine

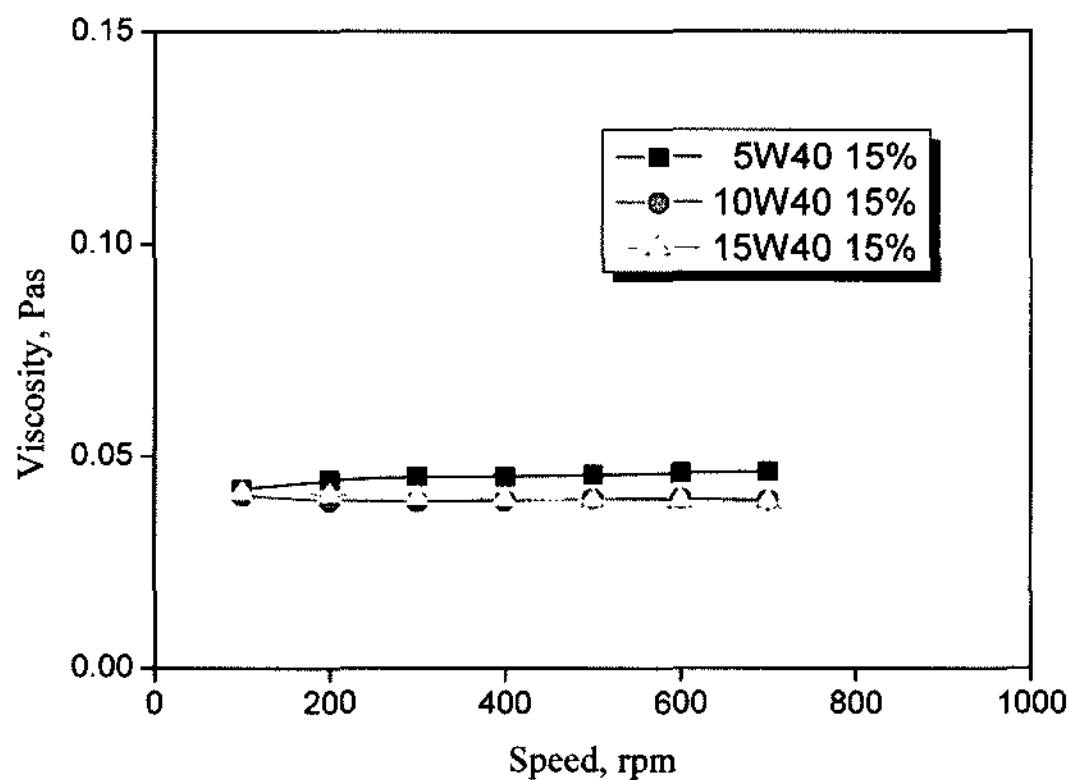
Physical Property	Viscosity Grade		
	15W40	10W40	5W40
Viscosity index	138	155	175
Flash point, °C	230	226	228
Density at 15°C, kg/l	0.872	0.862	0.856
Viscosity, cSt	40°C	109.7	101.3
	100°C	14.71	14.98

문업체는 엔진오일에 대한 경유 혼입을 한계치를 실험적 근거에 기반하여 6~10% 정도를 제시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 엔진오일에 5~15%의 경유를 첨가하여 이들이 제시한 연료 혼입량 한계치보다 약간은 가혹한 조건으로 엔진오일을 조성하여 경유혼합 엔진오일에 대한 점도특성 시험을 수행하였다. 점도실험은 혹한기의 윤활유 작동온도를 고려하여 -20°C부터 디젤 엔진의 베어링 윤활유 작동온도인 120°C까지를 실험범위로 결정하고, 20°C 간격으로 각각의 온도에 대한 점도변화를 측정하였다. 시료유는 저온특성이 서로 다른 5W40, 10W40, 15W40 디젤 엔진오일에 5%, 10%, 15%의 경유를 혼입하여 총 12가지 윤활유를 제조하여 실험을 진행하였다. 점도는 Fig. 1의 회전형 점도계를 사용하여 절대점도를 측정하였고, 측정시간은 시료유의 온도가 정상상태를 이루는 시간을 고려



(a) Fuel ratio of oil dilution, 0%



(b) Fuel ratio of oil dilution, 15%

Fig. 2. Viscosity of engine oils as a function of a rotating speed for various diesel engine oils.

하여 회전수를 750 rpm으로 고정한 상태에서 20분간 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 사용한 광유계 엔진오일이 뉴턴유체인지, 즉 점성저항 특성을 유지하는지를 파악하기 위해 엔진오일의 온도가 40°C일 때 회전수에 따른 점도변화를 측정하였다. Fig. 2는 측정결과를 제시한 것으로 디젤연료가 혼입되지 않은 엔진오일과 경유연료가 15% 혼입된 엔진오일 모두는 회전수에 무관하게 일정한 점도특성을 유지하고 있다. 이것은 사용된 디젤 엔진용 시료유가 모두 뉴턴유체라는 것을 말해준다.

Figs. 3~5는 저온특성이 서로 다른 엔진오일 5W40, 10W40, 15W40에 0%~15%의 경유를 혼입한 시료유에 대한 점도특성을 제시하고 있다. 실험결과에 의하면, 20°C 이하의 저온에서는 연료 혼입율에 따른 점도특성의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 시료유중에서 점도가 가장 높은 15W40을 -20°C에서 측정한 점도를 보면 5W40에 비해 2배 이상 높게 나타났다. 요약하면, 점도가 낮은 5W40에 연료가 혼입하게 되면 점도에 작은 영향을 미치지만, 점도가 높은 15W40에 경유가 혼입하게 되면 상대적으로 큰 영향을 미치고 있다. 특히 엔진오일의 온도가 80°C 이상으로 높아지게 되면 연료 혼입량에 관계없이 오일의 점도특성에 의해 지배받고 있음을 알 수 있다. 전반적으로 엔진오일 모두는 온도가 상승함에 따라 점도가 급격히 감소하는 것으로 나타났는데, 이것은 광유계 오일의 점도특성이 지배적인 인자로 작용하기 때문이다.

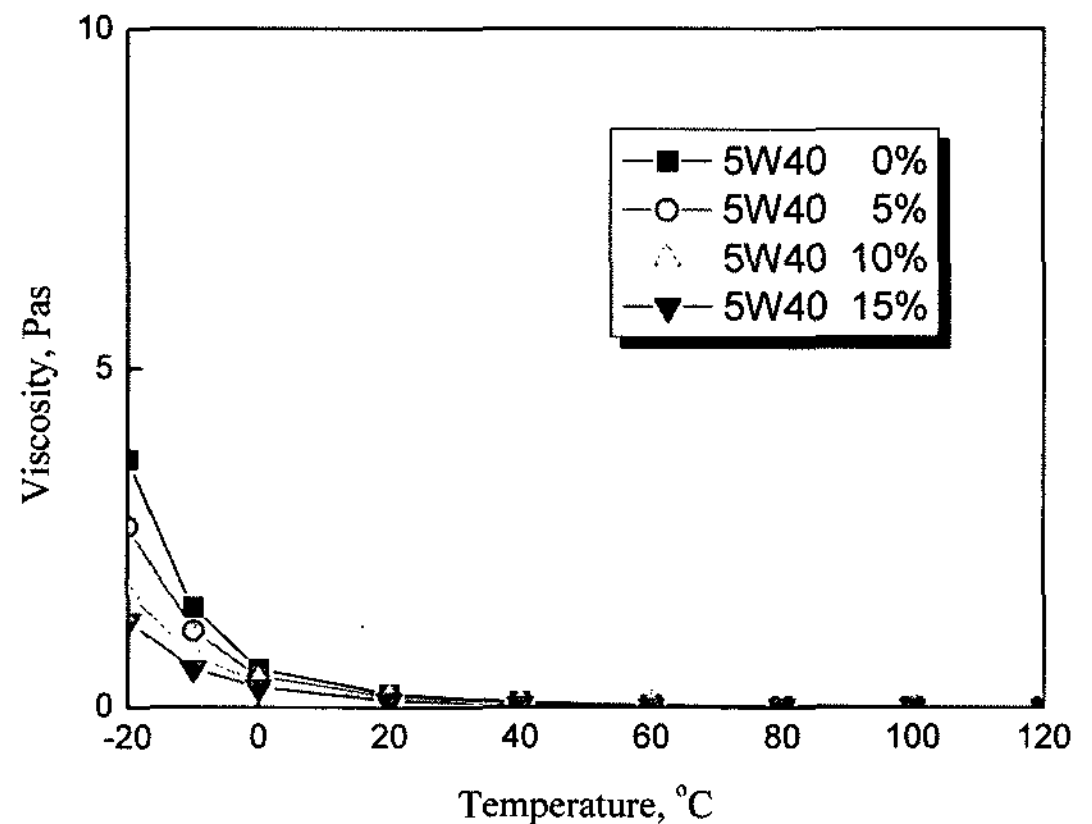


Fig. 3. Viscosity of a diluted 5W40 engine oil with various fuel inclusion ratio as a function of a temperature.

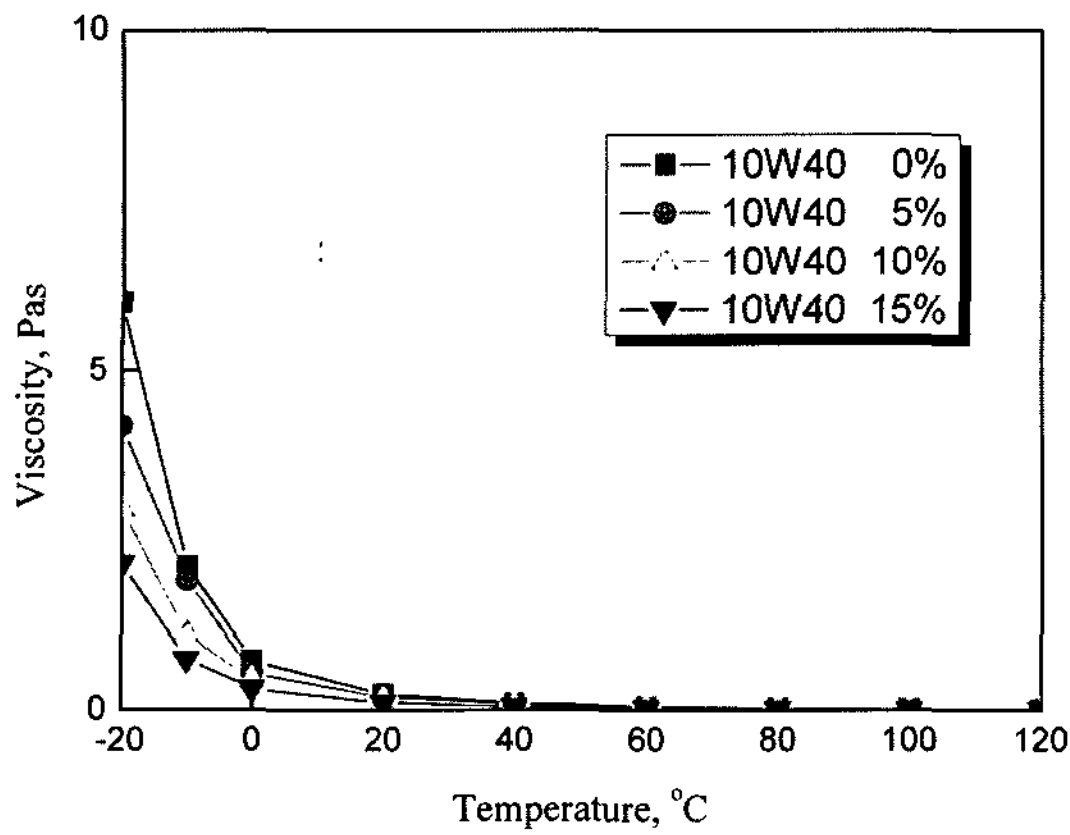


Fig. 4. Viscosity of a diluted 10W40 engine oil with various fuel inclusion ratio as a function of a temperature.

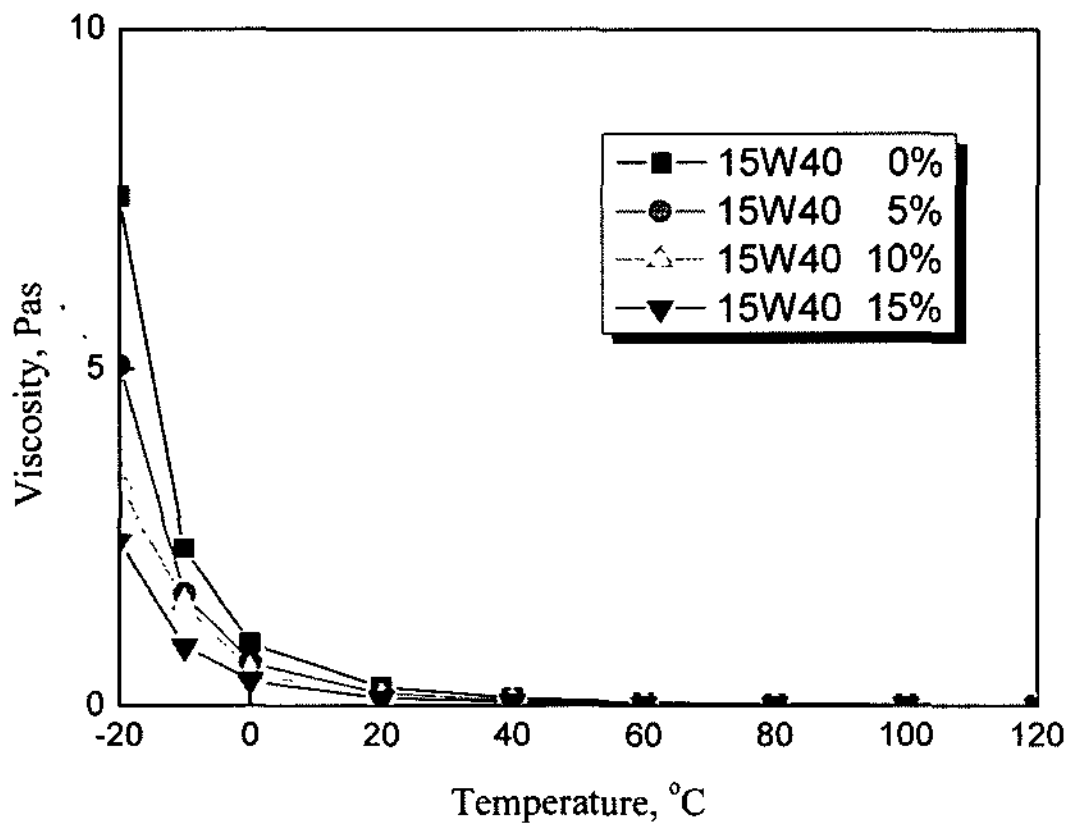


Fig. 5. Viscosity of a diluted 15W40 engine oil with various fuel inclusion ratio as a function of a temperature.

실험결과에서 엔진오일에 혼입된 연료량이 증가할수록 점도가 낮게 나타나고 있는데, 이것은 점도가 대단히 낮은 연료혼입에 따라 오일의 점도가 큰 영향을 받기 때문에 나타나는 현상이다. 결국, 엔진오일에 연료유가 혼입되면 오일의 점도는 떨어지고, 이런 현상은 저온에서 두드러지게 나타나고, 고온으로 가면서 연료유의 증발에 의한 희석도가 낮아져 오일의 점도에 미치는 영향은 크게 줄어든다. 따라서 엔진오일에 대한 연료유의 혼입은 온도가 낮은 겨울철이나 상대적으로 온도가 낮은 조석과 시동초기에 적절한 대안이 제시되어야 할 것이다.

상기의 실험결과 Figs. 3~5에 의하면 점도는 온도에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났는데, 점도를

온도의 함수로 표현하면 다음의 지수함수로 나타낼 수 있다.

$$\eta = Ae^{-\left(\frac{T}{B}\right)} \quad (1)$$

여기서 상수 A와 B는 엔진오일의 온도특성에 의해 결정되는 값이다. 엔진오일에 따른 실험결과를 지수함수로 표현할 때 A와 B를 Figs. 3~5의 실험치를 기반으로 구하면 Table 2와 같이 제시될 수 있다.

Table 2에서 제시한 실험결과를 기반으로 상수 A와 B값을 그래프로 제시하면 Figs. 6~7과 같다. 상수 A를 보여준 Fig. 6의 결과에 의하면, 저점도 특성을 나타내는 5W40 엔진오일의 경우는 연료 혼입량이 증가

Table 2. Coefficients A and B of diluted engine oils for a diesel engine

Engine Oil : 5W40				
Dilution Ratio	0%	5%	10%	15%
A	0.563	0.457	0.367	0.289
B	19.145	19.046	18.558	18.844
Engine Oil : 10W40				
Dilution Ratio	0%	5%	10%	15%
A	0.724	0.547	0.424	0.308
B	18.515	19.543	18.941	20.067
Engine Oil : 15W40				
Dilution Ratio	0%	5%	10%	15%
A	0.915	0.632	0.499	0.376
B	17.751	17.624	14.734	18.192

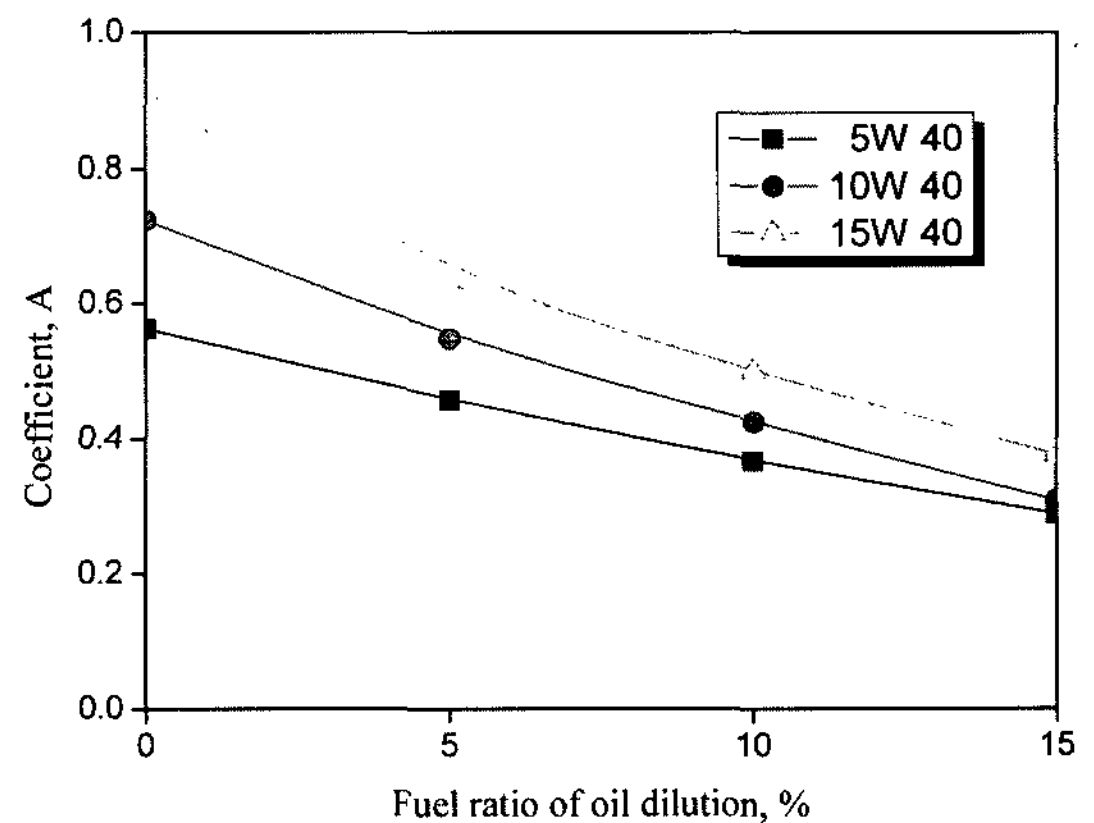


Fig. 6. Variation of coefficient A as a function of a fuel ratio of oil dilution for various engine oils.

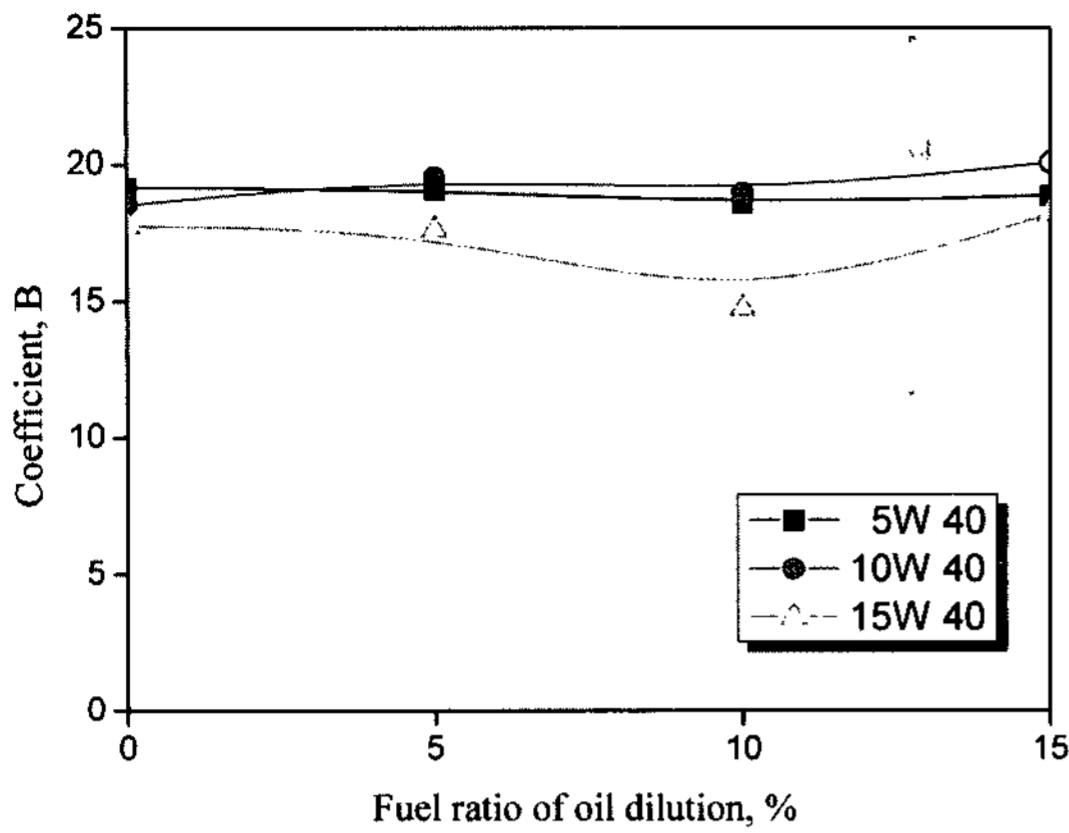


Fig. 7. Variation of coefficient B as a function of a fuel ratio of oil dilution for various engine oils.

할수록 선형적으로 감소하는 경향을 나타내지만, 저온에서 고점도 특성을 나타내는 15W40 엔진오일은 연료 혼입량이 증가하면 약간씩 감소하는 비선형성을 유지하는 특성을 보여주고 있다. 따라서 연료가 혼입된 엔진오일의 상수 A값이 선형적으로 변화한다고 가정할 경우 연료 혼입량 X에 따른 상수 A의 변화를 다음과 같은 식으로 간편하게 요약할 수 있다.

- SAE 5W40: $A = -0.018X + 0.556$
- SAE 10W40: $A = -0.027X + 0.706$
- SAE 15W40: $A = -0.035X + 0.868$

반면에 Fig. 7에서 제시한 상수 B는 연료 혼입율에 관계없이 거의 일정한 값을 유지하는 것을 보여주고 있다. 그러나 고점도 엔진오일에서 10% 이상의 연료 혼입은 불안정한 상수 B를 나타내고 있다. 이것은 고점도 엔진오일에 대한 연료혼입은 점도의 불안정이 심하기 때문에 상대적으로 오차가 증가될 우려가 있다.

결과적으로 연료가 혼입된 엔진오일의 점도변화는 상기의 점도-온도 관계식 (1)을 사용하여 연료 혼입율에 따른 새로운 점도-온도식으로 표현할 수 있다. 이때 상수 A값은 혼입율에 따른 선형식으로 표현할 수 있지만, 상수 B값은 혼입율에 관계없이 거의 일정한 값을 유지하기 때문에 평균값을 적용할 수 있다. 따라서 연료가 혼입된 엔진오일의 점도-온도식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 5W40: $\eta = (-0.018X + 0.556)e^{-\left(\frac{T}{18.898}\right)}$
- 10W40: $\eta = (-0.027X + 0.706)e^{-\left(\frac{T}{19.266}\right)}$
- 15W40: $\eta = (-0.035X + 0.868)e^{-\left(\frac{T}{17.075}\right)}$

4. 결 론

디젤 엔진에서 발생하는 입자상물질(PM)을 줄이기 위해 촉매기반 디젤매연여과장치(CDPF)의 도입은 기존의 불로바이가스 누출현상에 추가하여 엔진오일에 연료혼입을 촉진하는 불가피한 부작용으로 오일의 점도특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 자동차 메이커에서는 연료혼입에 따른 점도저하와 이에 따른 윤활특성 저하문제를 해결하기 위해 연료혼입 비율을 억제하는 대책을 제시하고 있다. 이와 같은 기술개발의 일환으로 본 실험에서는 엔진오일에 혼입된 연료의 혼입율에 따라 달라지는 엔진오일의 점도특성 데이터를 실험적으로 확보하고, 이들에 대한 점도특성을 분석하여 혼입비율에 따른 점도-온도식을 제시하고자 한다.

실험결과에 의하면 엔진오일의 점도는 온도변화에 민감하게 반응하고 있으며, 연료 혼입량에 따른 점도 변화에도 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 특히 오일의 작동온도가 낮고 점도가 높은 엔진오일의 경우는 연료혼입에 따른 점도특성 변화가 뚜렷하게 감지되는 것으로 나타났다. 반면에 엔진오일의 온도가 80°C 이상으로 작동하는 경우는 엔진오일의 저온특성이나 연료 혼입율에 관계없이 거의 비슷한 점도특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 결국 엔진오일에 대한 연료 혼입율은 고온영역보다 저온영역에서 점도저하에 미치는 영향이 크다는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 CDPF가 장착된 디젤 엔진을 저온에서 운전할 때 연료혼입에 따른 엔진오일의 점도저하는 엔진의 주요 회전운동 부품인 피스톤-실린더의 간극, 피스톤 링팩부, 메인 베어링, 편부싱 베어링 등의 마멸을 추가적으로 심화시킬 우려가 높다는 사실을 예상할 수 있다.

본 연구에서 연료혼입 엔진오일에 대한 실험적 연구 결과를 바탕으로 제시한 점도-온도-혼입율 실험식은 연료가 혼입된 엔진오일의 점도특성을 온도변화에 따라 간편하게 예측할 수 있으므로 CDPF를 장착한 디젤 엔진에 대한 엔진윤활요소 특성해석에 중요한 연료 혼입량 한계치를 예측할 수 있다.

후 기

본 연구에 필요한 시료유를 제공해주신 GS칼텍스 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김청균, 자동차엔진공학, 북두출판사, 2002.
2. 조대인, “2차 세계개편 탄력세율 적용 유력 - 관련법 개정안 2006년 시행 예정,” 가스산업신문, 2005.
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,” SAE 2000-01-2838, 2000.
4. Terrence Alger, Yiqum Huang, Matthew Hall and Ronald D. Matthews, “Liquid Film Evaporation of the Piston of a Direct Injection Gasoline Engine,” SAE 2001-01-1024, 2004.
5. Takumaru Sagawa, Hiroya Fujimoto and Kiyotaka Nakamura, “Study of Fuel Dilution in Direct-Injection and Multipoint Injection Gasoline Engines,” SAE 2002-01-1647, 2002.
6. Kim, H.G. and Kim, C.K., “Experimental Study on the Tribology Characteristics of Diluted Engine Oil by Diesel Fuel,” J. of the KSTLE, Vol. 21, No. 4, pp. 159-164, 2005.