

오일점도에 따른 디젤엔진용 핀부시 베어링의 유막거동에 관한 연구

김청균 · 이병관

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

A Study on the Oil Film Behaviors of Pin Bush Bearings for Diesel Engines with Various Engine Oil Viscosities

Chung Kyun Kim and Byoung Kwan Lee

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – A pin bush bearing is one of the most important element in the piston engine which is joined a piston to a connecting rod. A pin bush is suffered by heat and changeable repeat loads, which are come from the explosive gas heat and pressures during a reciprocating stroke. Therefore, a tribological behavior of pin bush bearings is very severe compared to other parts of a piston assembly. To keep a stable operation of pin bush bearings effectively, it would be satisfied with proper oil film strength for severe operating conditions and durability, which are strongly related to the oil film thickness, oil film pressure, and a friction loss power. The computed results show that the viscosity of engine oils slightly affects to the minimum oil film thickness and oil film pressure distribution, but is an influential parameter on a total friction loss power. Thus the low viscosity engine oils for an increased operation condition should select a high level of base oil and add a viscosity index improver as an oil film additive.

Key words – pin bush bearing, oil film, engine oils, oil film pressure, minimum oil film thickness, friction loss power

1. 서 론

핀부시(pin bush)는 커넥팅로드의 소단부에 압입되어 장착된 후에 내마모성이 우수한 피스톤핀으로 회전·지지되어 피스톤과 연결된다. 오일탱크에서 피스톤 상부로 압상된 윤활유는 커넥팅로드의 작은 오일구멍(oil hole)을 통해 핀부시의 내면과 피스톤핀의 외면 사이의 미세한 간극에 공급되도록 설계되어 있다. 그러나 피스톤핀과 핀부시 상호간의 마찰접촉 운동표면은 360°C의 회전운동을 하는 것이 아니고 제한된 진자운동을 하기 때문에 충분한 윤활유가 공급되지 못할 경우는 유체유막을 형성하기가 어려워 엔진베어링보다 하중지지 용량은 떨어지고 마찰손실은 증가하므로, 이로 인한 열적마

멸과 표면손상이 빠르게 진행된다는 사실이다.

최근의 엔진기술은 고출력, 고속, 경량화, 저마찰 및 내마멸과 같은 작동조건에 큰 관심을 갖고 있으며, 연비향상과 저공해 기술개발에 사활을 걸고 있다. 자동차 엔진기술의 핵심은 결국 내구성 품질에 기반한 연비향상이므로 핀부시와 같은 부품에 대한 윤활기술을 개선하는 기술개발이 중요하다. 엔진구동부에서 핀부시는 항상 열악한 윤활상태를 유지하므로 특히 엔진오일의 점도에 대한 유막거동 특성을 해석하는 것은 하나의 해결책이 될 것이다.

핀부시의 마찰접촉 계면에서 발생하는 마찰 및 마멸 특성에 대한 연구[1-3], 피스톤과 실린더 사이의 유막에 의한 압력분포[4], 엔진베어링의 점도특성에 대해 연구[5]가 있지만, 본 연구에서 제시한 디젤엔진용 오일을 사용한 유막거동에 대한 연구는 아직 없다.

†주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@empal.com

본 논문은 디젤엔진에서 사용하는 엔진오일은 시동 초기, 워업기간, 정상작동 온도조건에 따라 발생하는 점도가 높고, 오일의 점도조건에 따라 유막거동에 미치는 영향이 크기 때문에 이에 대한 해석적 연구를 수행하고자 한다. 따라서 커넥팅로드의 소단부에 장착한 핀부시에 대한 최소유막두께와 유막압력, 전체적인 유체마찰 동력손실을 오일의 온도 및 점도조건에 따라 유막거동 해석은 중요한 설계조건이 될 것이다.

2. 이론 해석

2-1. 레이놀즈 방정식

핀부시의 미끄럼마찰 운동표면에 윤활유 공급이 원활하게 이루어진다면, 핀부시의 마찰표면에는 유체윤활박막이 잘 형성될 것이라는 가정이 가능하다. 따라서 본 연구에서 해석하려는 디젤엔진용 핀부시의 유막 거동에 유체윤활 방정식을 적용하여 수치해석을 할 수 있다. 즉, 핀부시 베어링의 마찰표면에 형성된 유막(oil film)에 의한 압력분포는 레이놀즈 방정식(Reynolds equation)으로 구할 수 있다[6].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h(u_1 + u_2)}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h(w_1 + w_2)}{2} \right) - \rho u_2 \frac{\partial h}{\partial x} + \rho w_2 \frac{\partial h}{\partial z} + \rho(v_2 - v_1) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3 \partial p}{12 \eta \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3 \partial p}{12 \eta \partial z} \right)$$

여기서, p 는 유막압력, h 는 유막두께, η 는 오일점도, ρ 는 오일밀도, u 는 x 방향의 속도, v 는 y 방향의 속도, w 는 z 방향의 속도를 각각 나타낸다.

2-2. 운동 방정식

피스톤의 왕복운동에 따라 핀부시에 작용하는 관성력은 핀부시의 윤활간극에 형성된 유막거동에 영향을 미치게 된다. 즉, 관성력에 의한 핀부시에 미치는 외부하중을 계산하기 위해 다음과 같은 운동 방정식을 사용할 수 있다.

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = f$$

$$f = f^{(a)} + f^* + i^*$$

여기서, M 은 핀부시의 질량, D 는 핀부시의 댐핑상수, K 는 핀부시의 강성도, q 는 변위벡터, $f^{(a)}$ 는 핀부시에 작용하는 외부하중, f^* 는 핀부시의 구속하중, i^* 는 비선형 관성력을 각각 나타낸다.

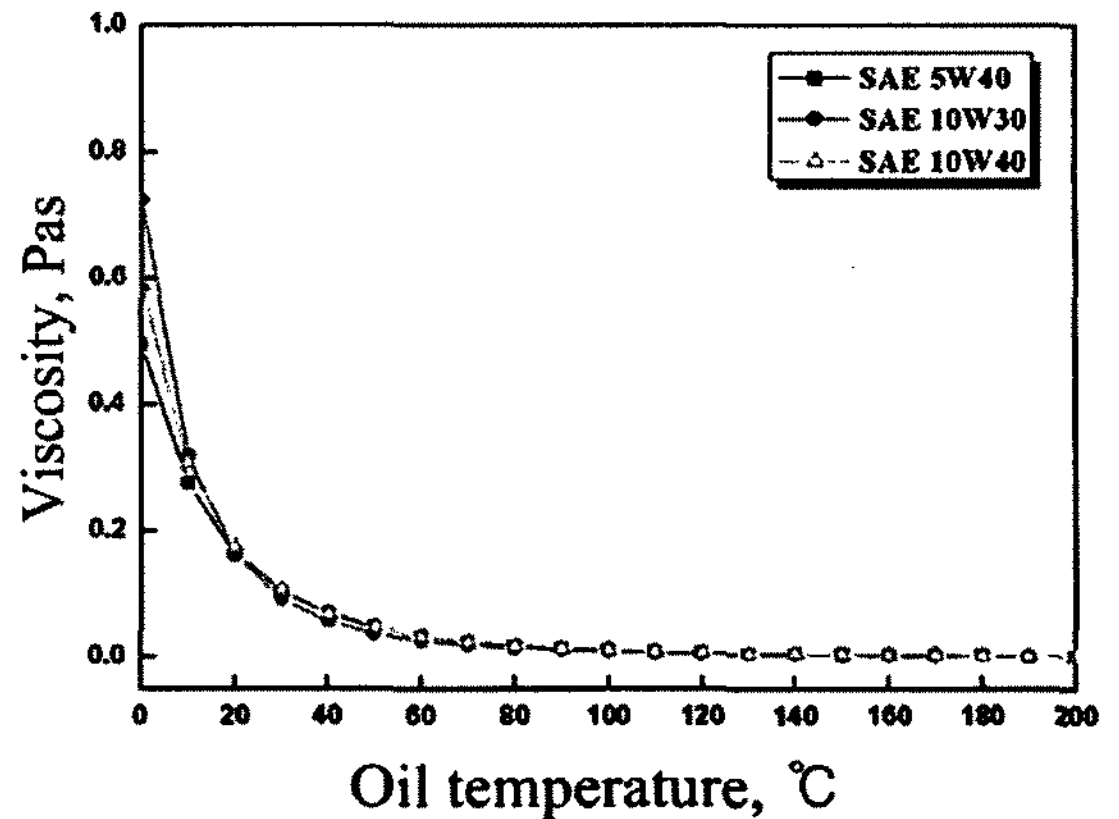


Fig. 1. Viscosity of engine oils.

2-3. 점도-온도 관계식

핀부시 유막의 윤활해석에 사용한 점도모델 관계식은 윤활유나 작동조건에 따라 여러 가지의 점도-온도 관계식을 제시할 수 있으나, 본 연구에서는 광유계 오일(mineral oil)의 점도를 온도만의 함수로 표현하는 보겔(Vogel) 점도모델을 사용하여 해석하기로 한다. 즉,

$$\eta = Ae^{\left(\frac{B}{T+C}\right)}$$

여기서, η 는 오일점도, T 는 오일온도, A, B, C 는 오일특성에 의해 결정되는 상수를 각각 나타낸다.

본 연구에서 사용한 디젤엔진용 오일은 SAE 5W40, 10W30, 10W40이고, 이들 엔진오일의 점도특성은 온도가 상승함에 따라 포물선으로 감소하는 전형적인 광유계 특성을 Fig. 1에서 보여주고 있다. 엔진오일에 대한 실험결과에서 보여주는 것처럼 20°C 이하에서는 온도에 따른 점도변화가 뚜렷하게 달라지지만, 오일의 정상작동 범위에 해당하는 80°C 이상에서는 점도특성의 변동폭이 거의 없음을 잘 나타내고 있다.

3. 수치 해석

3-1. 해석모델

4기통 디젤엔진에서 제1번 실린더로 장착된 커넥팅로드를 선정하여 측정된 Fig. 2와 같은 가스압력 데이터를 사용하여 해석하였다. Fig. 2는 디젤엔진의 회전속도가 5,000 rpm인 상태에서 발생한 연소실의 가스압력 데이터를 나타낸 것이다. 여기서 확보된 연소실의 압력은 피스톤 헤드를 거쳐 핀부시로 전달되어 구동력을 발생하고, 핀부시의 오일구멍에 공급된 윤활유는 미

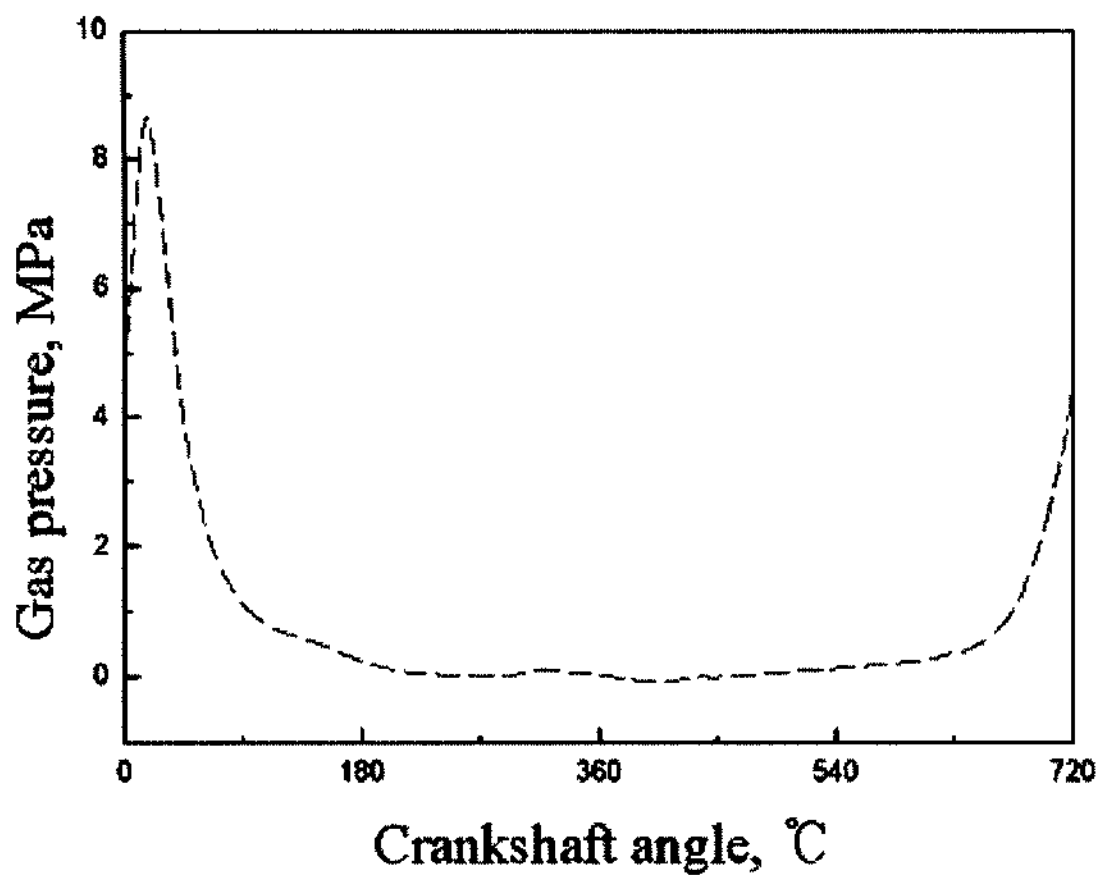


Fig. 2. Gas pressure distribution of a combustion chamber at 5000 rpm.

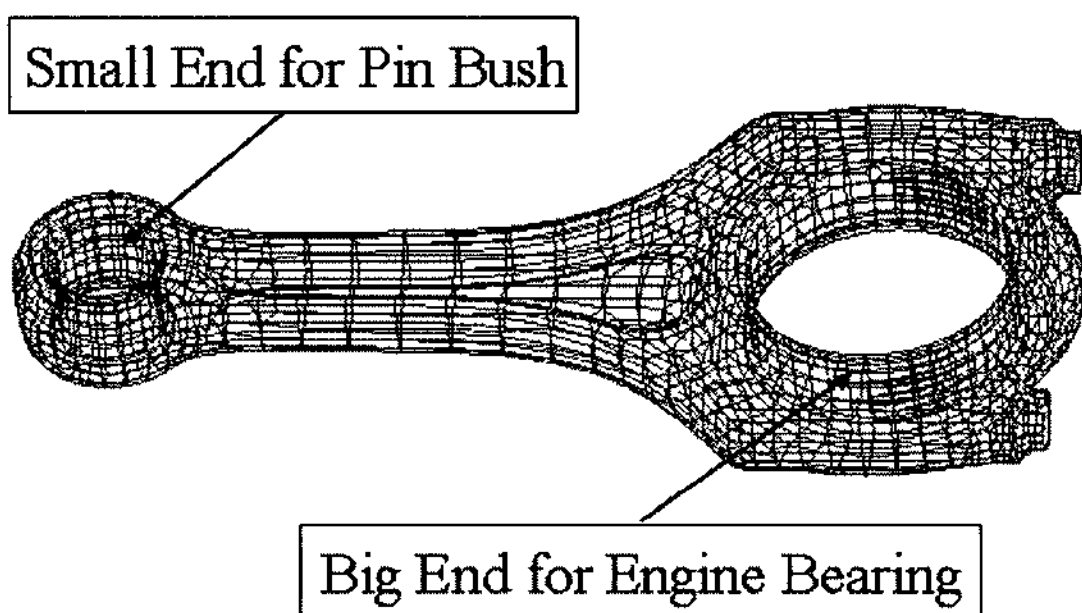


Fig. 3. Finite element model of the connecting rod.

끄럼마찰 진자운동에 의해 유막이 형성된다. 이 유막은 피스톤에 작용하는 외부하중을 지지하기 위해 최소한의 유막두께를 형성하고, 유막압력에 의한 하중지지, 유막의 미끄럼 마찰작용에 의한 동력손실이 발생하게 된다.

Fig. 3은 커넥팅로드의 유한요소 해석모델을 보여준 것으로 피스톤핀과 연결되는 핀부시를 설치하기 위한 소단부가 있고, 엔진베어링을 조립하기 위한 대단부가 있다.

3-2. 해석방법

커넥팅로드의 소단부에 장착된 핀부시 표면의 오일 온도가 유막의 거동특성에 어떠한 영향을 미치고 있는가를 파악하고자 상기의 레이놀즈 방정식과 운동 방정식을 연계하여 핀부시의 유막두께, 유막압력분포와 유체마찰 동력손실에 대한 수치해석을 수행하였다.

상기의 운동 방정식에서 계산한 하중으로부터 핀부시의 유한요소 해석모델에 대한 탄성변형량을 구하고,

여기서 계산된 값으로부터 핀부시에 발생하는 유막압력분포를 계산하고, 이 계산결과로부터 핀부시에 발생한 압력분포를 적분한 하중값과 운동 방정식으로부터 계산한 하중값을 서로 비교하여 이들의 계산치가 오차 범위 내에서 수렴한다면 이때의 유막두께와 유막압력분포를 각각 구한다. 본 해석을 위해 사용한 레이놀즈 방정식은 2차 후방 차분법으로 이상화하기 위해 가우스 자이델(Gauss-Seidel) 방법을 사용하였고, 운동 방정식은 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 방법으로 계산하여 엔진오일의 유막에 대한 거동특성을 각각 고찰하였다.

4. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 핀부시 베어링에 공급된 엔진오일의 점도특성은 작동온도에 따라 달라지는 핀부시의 유막압력, 최소유막두께, 유체마찰 동력손실에 대한 해석결과를 제시하고 있다. 오일거동 특성해석의 외력으로 고려한 디젤엔진의 피스톤에 작용하는 팽창행정, 배기행정, 흡입행정, 압축행정의 가스압력분포는 Fig. 2와 같다.

Fig. 4는 엔진오일의 작동온도가 80°C~250°C까지 변화할 때 크랭크축의 회전각도, 즉 엔진의 흡입, 압축, 팽창, 배기의 4행정과정에서 발생한 Fig. 2의 연소가스 압력에 의해 생성되는 최소유막두께(minimum oil film thickness)에 대한 해석결과를 보여준다. 해석결과에 의하면 폭발행정에서 발생하는 최고압력에 의해 유막은 가장 얇게 변형되고, 배기행정에서는 상대적으로 가장 두꺼운 유막을, 흡입행정과 압축행정으로 이동하면서 유막두께는 점차로 얇아지는 경향을 나타낸다.

유막의 최소두께는 엔진의 폭발행정에서 발생한 높

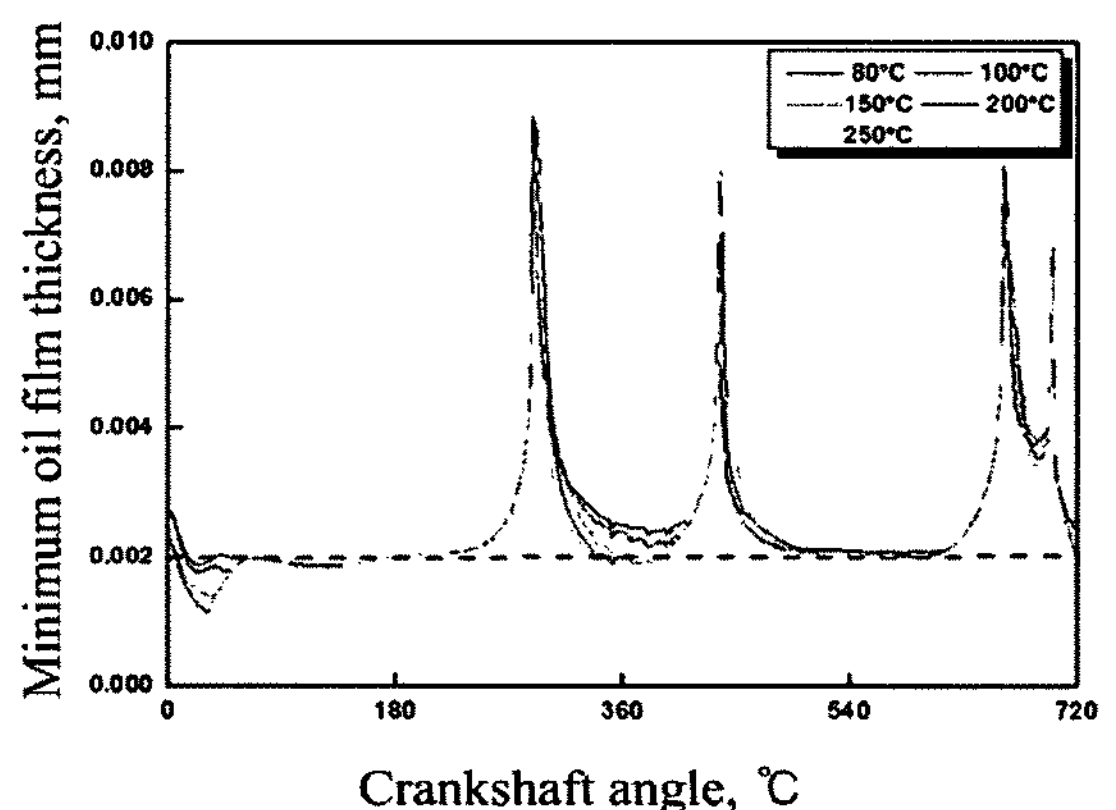


Fig. 4. Minimum oil film thickness for various oil temperatures as a function of a crankshaft angle.

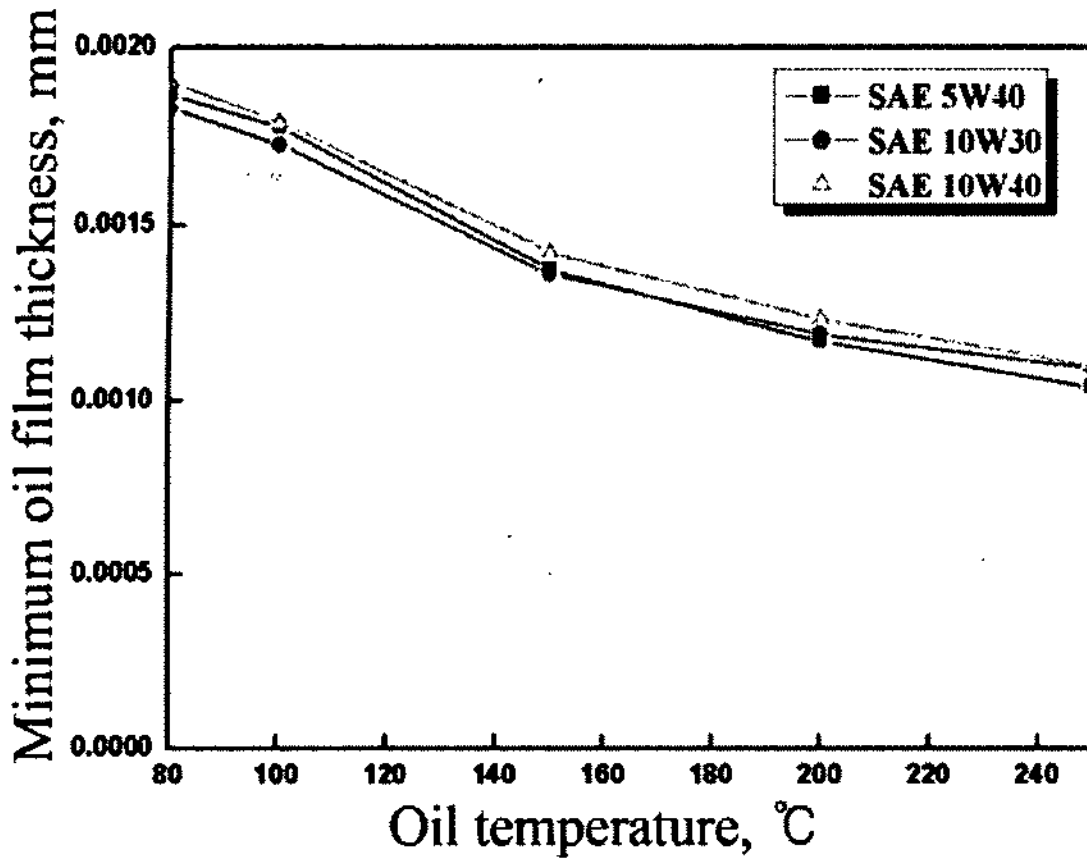
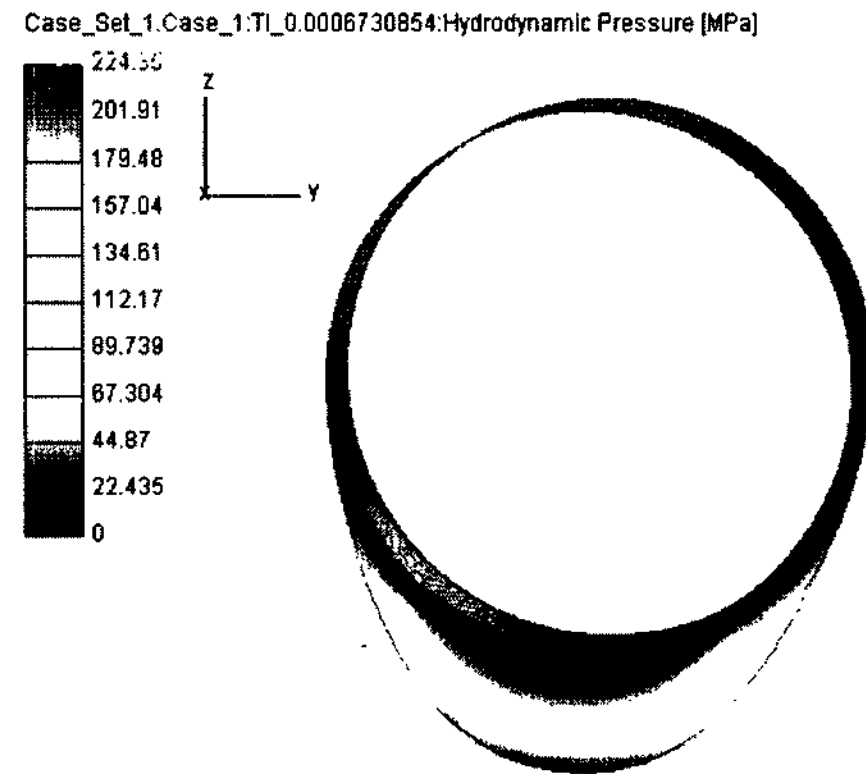


Fig. 5. Minimum oil film thickness for various engine oils as a function of oil temperature.

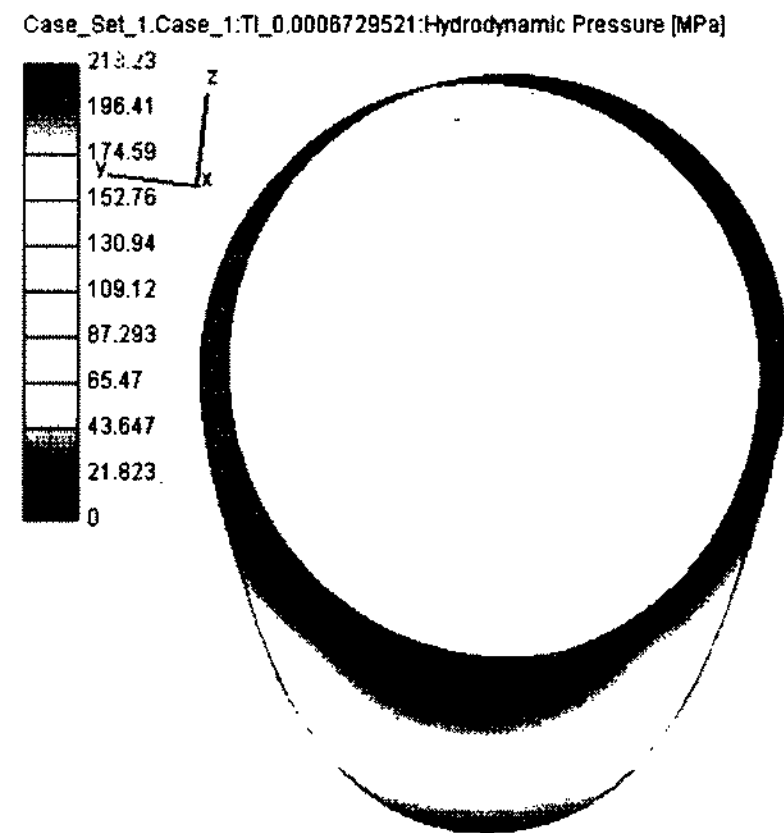
은 연소가스압력으로 $1.9 \mu\text{m}$ 이하로 나타났고, 나머지 배기행정, 흡입행정, 압축행정에서는 $2 \mu\text{m}$ 이상으로 안정된 유막두께를 유지하고 있음을 알 수 있다. 유막의 두께는 하중지지, 마찰손실, 마멸발생에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 중요한 설계요소이다.

선정된 엔진오일(SAE 5W40, 10W30, 10W40)과 오일의 작동온도에 대해 해석한 Fig. 5의 최소유막두께 결과를 보면, 온도가 높아짐에 따라 최소유막두께는 빠르게 얇아지고 있음을 보여준다. 엔진오일의 정상 작동온도인 100°C 부근에서 형성된 최소유막두께는 $1.8 \mu\text{m}$ 정도로 핀부시의 유체유회를 보장하기 어려운 구역으로 바뀌어가고 있음을 알 수 있다. 즉, 보통의 핀부시 표면가공 평균거칠기가 $2 \mu\text{m}$ 정도인 것을 감안하면 Fig. 5와 같은 결과로는 혼합유회구역에서 작동할 것이라는 예측이 가능해진다[2]. 따라서 엔진오일의 유막강도를 강화시켜 혼합유회지역에서 열악한 경계마찰 유회지역으로 천이되는 현상을 차단하기 위해서는 유막강화 첨가제를 혼합한 유회유를 사용하거나 또는 핀부시의 표면가공 정밀도를 좀 더 높여서 최소유막두께 감소로 인한 혼합유회 또는 경계마찰, 최악의 경우 건조마찰로 연결되는 응착마멸 또는 시저문제를 방지해야 한다.

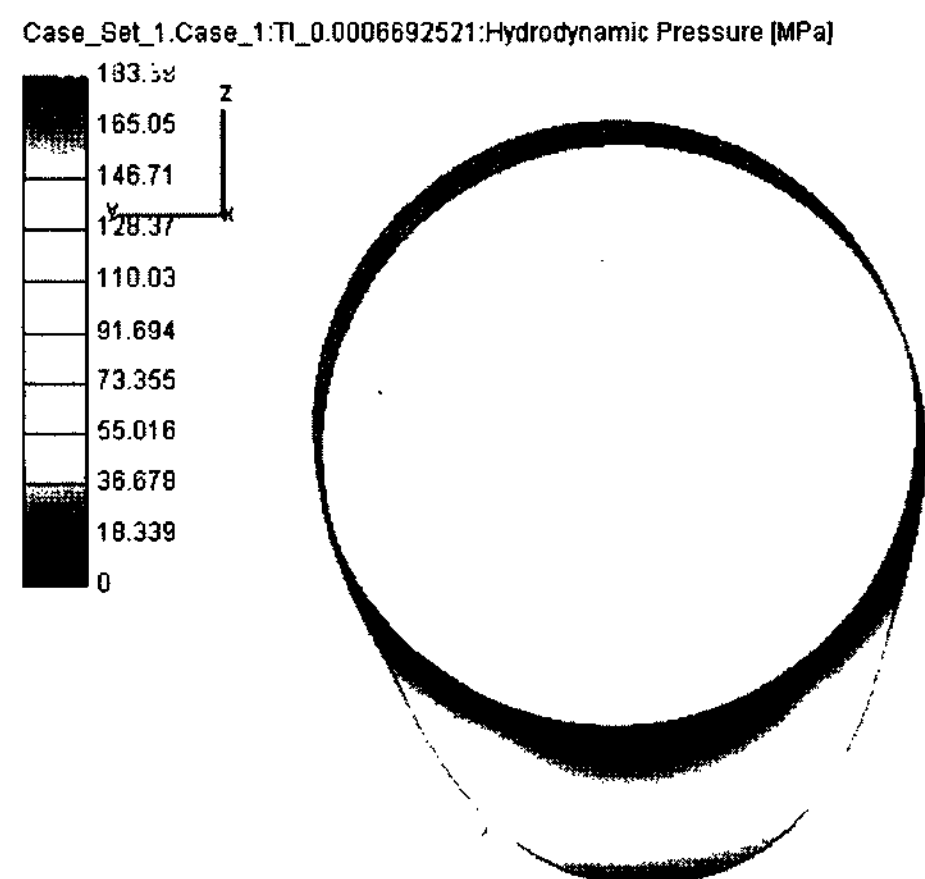
Fig. 6은 디젤엔진에 공급한 엔진오일 SAE 10W40의 유막거동 압력분포를 레이놀즈 방정식으로 해석한 대표적인 결과를 보여주고 있다. Fig. 6의 유막압력 해석결과에서 의하면, 엔진오일의 작동온도가 상승할수록 점도가 낮아지면서 유막에 의한 하중지지 용량은 떨어지기 때문에 유막압력은 점차적으로 감소하고 있



(a) Engine oil temperature: 80°C



(b) Engine oil temperature: 100°C



(c) Engine oil temperature: 150°C

Fig. 6. Hydrodynamic oil film pressure distributions at the speed of 5000 rpm.

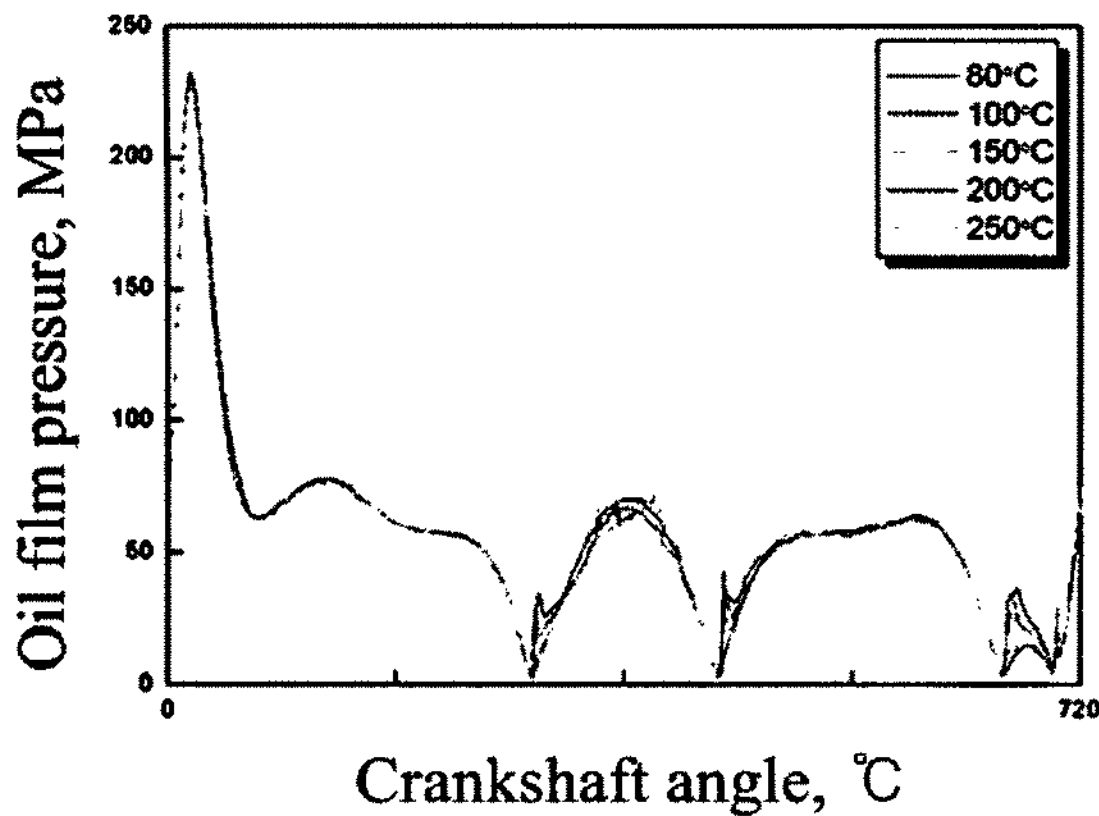


Fig. 7. Peak oil pressure for various oil temperatures as a function of a crankshaft angle.

음을 알 수 있다.

Fig. 7은 엔진오일의 작동온도가 80°C~250°C까지 변화할 때 4행정 동안에 발생하는 유막압력(oil film pressure)을 크랭크축의 회전각도에 대하여 보여주고 있다. Fig. 4의 최소유막두께와 마찬가지로 유막에 작용하는 230 MPa 이상의 최고압력은 연소실의 폭발압력이 작용하는 부근에서 발생하였다. 이러한 최고압력은 유막두께를 최소로 낮추는 원인으로 작용한다. 연소가스에 의한 높은 압력은 유막강도에 의해 지지되어야 유체박막은 끊어지지 않고 작동하는 탄성유체윤활을 할 수 있게 된다. 핀부시의 마찰운동면에 초박막을 유지한다는 것은 유체마찰손실 증가로 이어질 수 있지만, 부시표면의 마멸이나 시저현상으로는 이어지지 않기 때문에 내구성은 크게 향상된다.

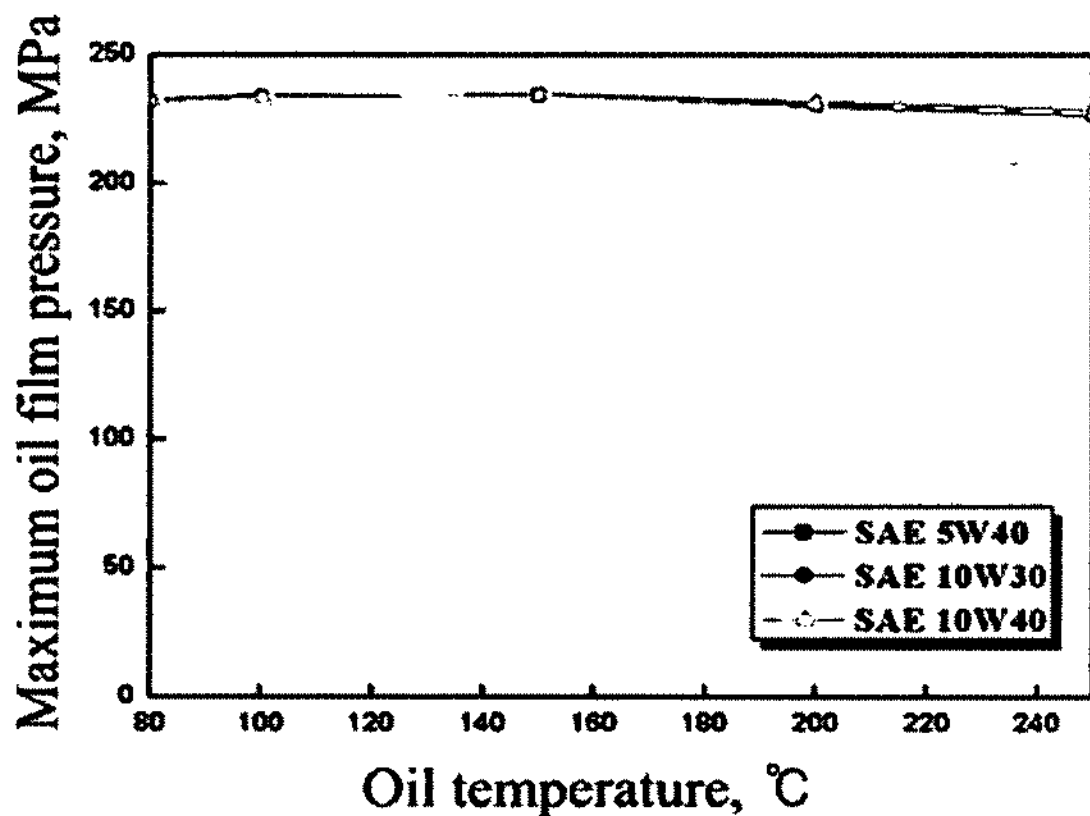


Fig. 8. Variation of peak total pressure for various engine oils as a function of oil temperature.

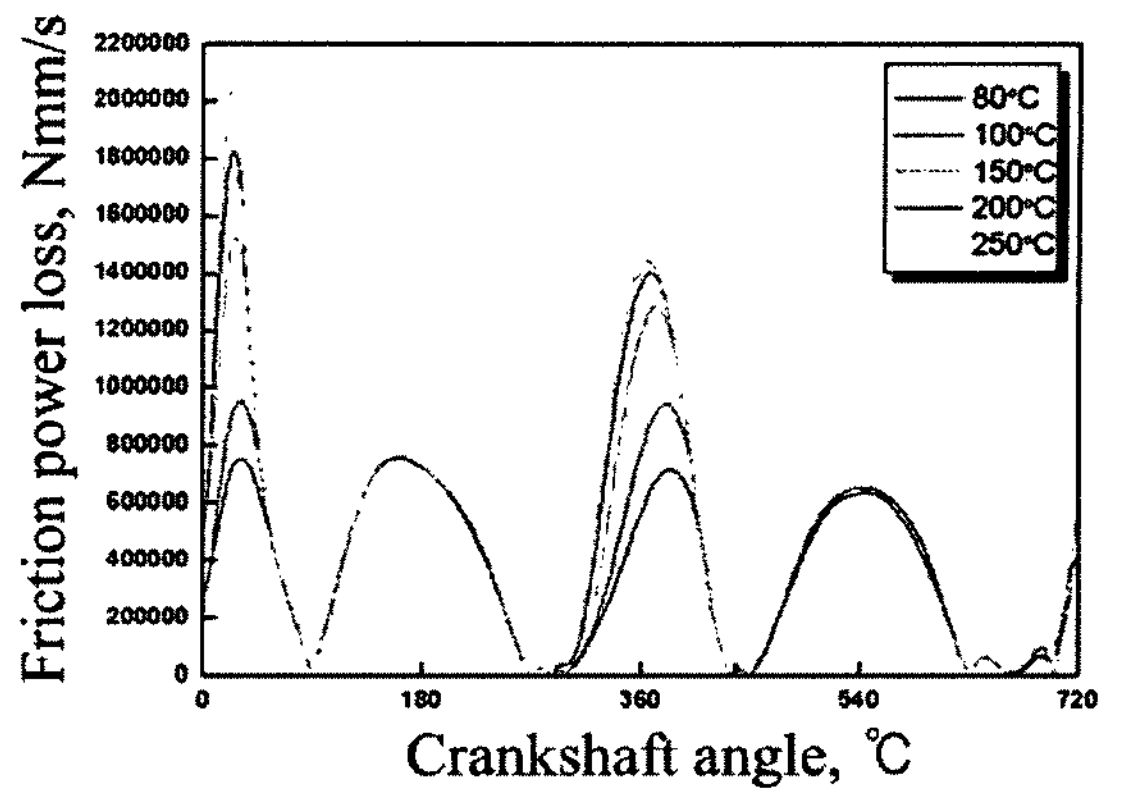


Fig. 9. Friction loss power for various oil temperatures as a function of a crankshaft angle.

Fig. 8은 유막에서 발생할 수 있는 최고압력을 오일의 작동온도에 대하여 해석한 결과이다. 유막에 의해 발생하는 최고압력은 80°C~150°C의 온도범위에서 유사한 경향을 보여주다가, 150°C 이상에서는 감소한다. 이것은 온도가 증가함에 따라 발생하는 엔진오일의 점도저하 때문이다. 또한, 엔진오일의 점도에 관계없이 유막압력은 거의 같은 것으로 나타났는데, 이것은 엔진오일의 작동온도가 80°C~100°C를 넘어서게 되면 점도특성이 거의 같아지는 광유특성 때문이다.

Fig. 9는 크랭크축이 회전함에 따라서 핀부시의 유막에 의해 발생하는 유체마찰 손실동력(friction loss power)을 보여주고 있다. 피스톤의 왕복행정에서 오일의 온도가 상승함에 따라 핀부시 베어링에서 발생하는 마찰손실은 더 크게 나타나는 경향을 보여준다. 특히 최소유막두께가 가장 작게 나타나고 유막압력이 높게

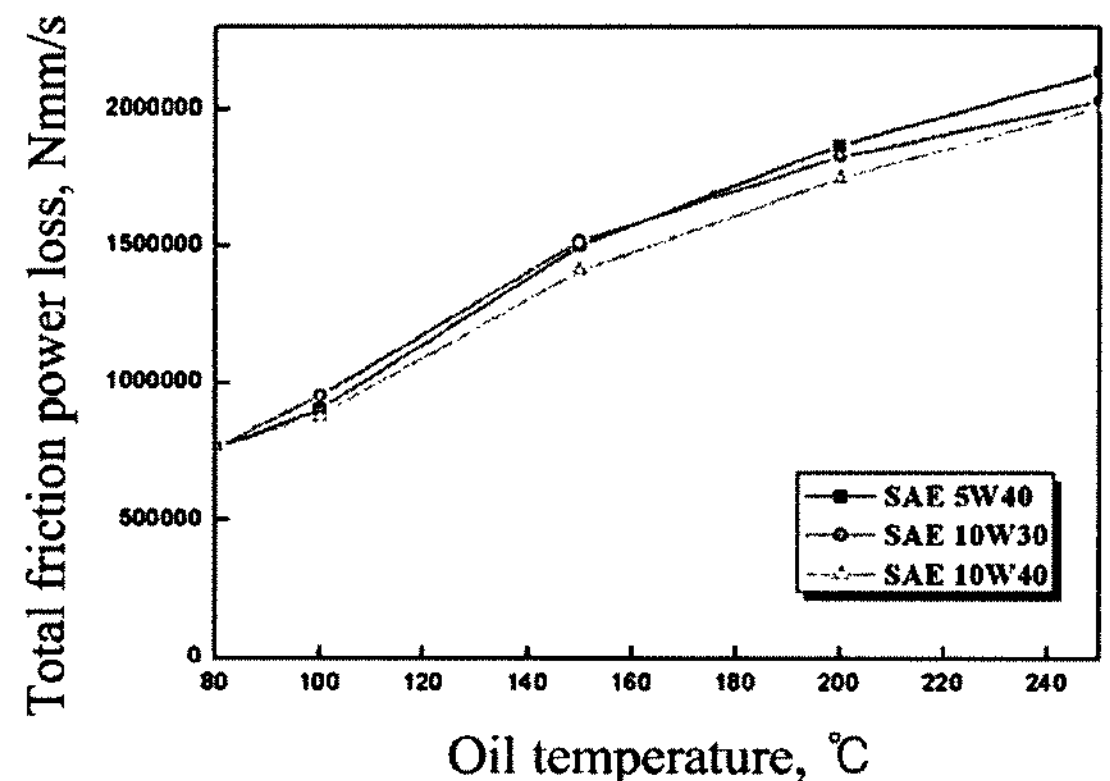


Fig. 10. Total friction loss power for various engine oils as a function of oil temperature.

발생하는 폭발행정 부근에서 오일온도에 따른 마찰손실의 차이는 작동온도 조건에 따라 가장 크게 나타나는데, 이것은 온도상승에 따른 점도저하에 의한 유막 감소가 가장 큰 원인이다. Fig. 10은 오일의 작동온도에 따른 마찰손실 전체동력(total friction loss power)을 계산한 결과로 온도가 100°C 이상으로 상승함에 따라 마찰손실은 급격하게 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 오일의 점도가 낮아질수록, 그리고 오일의 작동온도가 올라갈수록 마찰손실은 높아지기 때문에 고온에서 저점도유 사용에 의한 마찰손실 저감효과는 낮다할 수 있다. 결국 저점도유는 저온의 작동조건에서 마찰저감효과는 크게 기대할 수 있지만[7], 이것을 높은 작동온도에서 사용하고자 할 경우는 유막강도가 우수한 고점도 기유를 사용하거나 또는 점도지수 강화제를 첨가해야 마찰손실 저감효과를 기대할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 디젤엔진용 핀부시에 오일을 충분히 공급할 경우 유막에 의해 발생하는 유막압력, 최소유막두께, 유체마찰 손실동력을 레이놀즈 방정식과 운동방정식을 사용하여 해석하였다.

해석결과에 의하면, 핀부시의 온도조건(80°C~250°C)에 따른 오일자체의 상대적 점도변화는 크지 않기 때문에 최소유막두께, 유막압력 등의 변동폭은 작음을 알 수 있다. 다만, 엔진의 폭발과정에서 발생한 연소압력이 작용할 경우는 유막두께를 1.8 μm 이하로 대단히 얇아지기 때문에 핀부시 표면의 열적손상 문제를 예상할 수 있다. 즉, 최소유막두께를 핀부시의 평균거칠기 2 μm 이하로 떨어뜨릴 경우는 핀부시의 유체윤활 작동조건을 보장할 수 없다. 따라서 저점도 엔진오일을 사용할 경우는 고점도 고급기유를 사용하거나 점도지수 향상제를 첨가하여 윤활유의 유막특성을 강화해야 핀부시 마찰표면에서 응착마멸이나 시저현상을 방지할

수 있다. 또한 엔진의 오일온도 상승은 점도저하로 인한 유체마찰 동력손실이 크게 증가하는 것으로 나타났기 때문에 유막형성에 의한 유체마찰 유지가 대단히 중요함을 알 수 있다.

결과적으로 핀부시의 유막거동을 살펴보면 고온에서 크게 낮아진 오일의 점도는 최소유막두께에 미치는 영향이 작았지만 마찰손실에 의한 동력손실에는 큰 영향을 미치고 있었다. 핀부시는 실린더에서 전달되는 폭발압력에 의한 충격반복하중을 직접적으로 받기 때문에 최소유막에 의한 하중지지력 저하, 마찰손실동력 증가 등에 연결된 마찰접촉 표면손상을 예상할 수 있어 충분한 윤활유의 공급과 유막강도를 높이고, 핀부시의 가공정밀도를 함께 고려한 윤활설계가 중요함을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 김청균, 김도현, “마찰조건에 따른 핀부싱 베어링의 접촉면압분포에 관한 연구,” 한국윤활학회지, Vol. 23, No. 6, pp. 255-260, 2007.
2. 김청균, 오경석, “내연기관용 무연 핀부싱의 마찰특성에 관한 실험적 연구,” 한국윤활학회지, Vol. 23, No. 6, pp. 306-311, 2007.
3. 김청균, “자동차 엔진용 핀부싱 베어링의 SEM/EDX 이용 성분·결합분석에 관한 연구,” 한국윤활학회지, Vol. 23, No. 5, pp. 195-200, 2007.
4. 김청균, 한동철, “Finite Element Analysis to Analyzing the Oil Film Pressure Distribution due to Viscosity Conditions in Engine Bearing,” *J. of KSTLE*, Vol. 11, No. 1, pp. 12-19, 1995.
5. 김한구, 김청균, “엔진오일의 저점도화에 따른 엔진 베어링의 유막거동에 관한 연구,” 한국윤활학회 제 40회 춘계학술대회, pp. 202-207, June 2005.
6. 김청균, “트라이볼로지,” 형설출판사, pp. 58-62, 2006.
7. 김청균, 김한구, “저점도 엔진오일이 마찰특성에 미치는 영향에 관한 해석적 연구,” 한국윤활학회지, Vol. 21, No. 6, pp. 249-255, 2005.