

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.12.1035>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

미세유동의 경계면 특성을 적용한 엔진 마찰 손실 연구[§]

박 초 희* · 김 보 흥**

* 울산대학교 기계공학부

A Study on Friction Loss of Engine using Microfluidics Approach

Cho Hee Park* and Bo Hung Kim**

* School of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan

(Received May 16, 2014 ; Revised September 4, 2014 ; Accepted September 11, 2014)

Key Words: Molecular Dynamic(분자 동역학), Engine Friction(엔진 마찰), Oil Film Thickness(유막두께), Lubrication(윤활)

초록: 엔진 마찰 저감은 엔진 개발의 중요한 항목이 되어왔다. 엔진의 기계적 마찰 손실 중 피스톤계의 마찰이 40~55%에 해당하고, 피스톤 부분의 마찰을 제거할 수 있다면 투입되는 전체 에너지의 5% 정도 향상시킬 수 있다. 엔진의 마찰 손실을 감소시키기 위해서 각 요소에서의 마찰 수준, 이에 영향을 미치는 인자에 대한 분석 및 다른 엔진들과의 비교분석이 필요하다. 하지만 기존 연구에서 마찰이 발생하는 윤활막의 연구들이 유체역학 바탕의 모델링에서 수행해 왔으나, 피스톤계의 윤활막이 크게는 마이크로에서 작게는 나노단위의 영역에 해당하므로 분자들간의 상호관계를 고려할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 엔진 실린더 라이너를 따라 형성하는 유막의 운동을 미시적으로 접근하여 분자들간의 상호작용에 따른 마찰변화를 제시하고자 한다.

Abstract: Reducing the friction of engine parts is an important issue in engine design. The loss of energy in the piston assembly due to mechanical friction ranges from 40 to 55%, and there is an increase in the total energy of about 5% if the friction of the piston can be removed. In order to reduce the friction loss at the level of each engine part, it is necessary to perform a comparative analysis with other engines to determine the important factors affecting the energy loss. Several studies have been performed to analyze the lubrication based on hydrodynamic modeling, since a piston lubrication system has dimensions in the nanoscale to microscale domain. Therefore, it is necessary to determine the correlations between the molecular and continuum systems. In this study, we investigated the friction changes due to the various interactions between molecules in the wall/fluid interface, where a microscopic movement of the oil film occurs along the cylinder liner of the engine.

- 기호설명 -

U : 피스톤의 벽속도
H : 엔진 실린더의 유막두께
u : 내부 유체속도
h : 나노채널의 높이
L_s : 슬립 길이

k_b : 볼츠만 상수 [1.3807×10⁻²³J/K]
m : 분자질량
r : 분자간거리
t : 시간

그리스문자

τ : 전단응력 또는 특성시간 [$\sigma\sqrt{m/\varepsilon}$]
μ : 점성계수
γ̇ : 전단율
σ : 분자직경
ε : L-J potential depth well

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술대회(2014. 5. 15.-16., 부산 해운대 한화콘도) 발표논문임.

† Corresponding Author, bohungk@ulsan.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

하첨자

wf : 벽과 유체분자 사이의 상호작용

ff : 유체분자 사이의 상호작용

$ratio$: ff 및 wf 의 비

$wall$: 나노채널 벽

$fluid$: 유체

1. 서 론

국제해사기구(IMO)는 온실가스 저감 노력에 부응하기 위해 선박의 탄소가스 규제를 오랫동안 논의하여 왔다. EEDI(Energy Efficiency Design Index)는 1톤의 화물을 1해리 운송하는데 발생하는 에너지 효율을 설계부터 측정 및 계산하여 평가하는 지수로서 CO₂ 배출량이 규제치 이하를 만족시키지 못할 경우 운항이 금지되는 강력한 규제이다. 또한 최근 시장에서 bunker유 가격이 높은 수준으로 형성되고 있다. 선박의 환경규제 및 연료비 상승은 미래 조선업계의 패러다임을 바꿀 큰 변수가 될 것으로 예상되고 있고, 선박 관련 산업체 및 기관들은 이러한 규제에 대응하기 위해 에너지 효율 향상 기술을 통한 경쟁력 확보를 위해 노력하고 있다. 에너지 효율 향상을 위해 기존 디젤엔진 추진기관을 주 동력원으로 사용하는 선형의 최적화를 통한 저항감소, 추진기 및 추진효율 향상, 폐열회수 시스템 등이 개발되고 있고, 연료소모가 많은 대형 컨테이너선의 경우 10%의 연비 절감 선박의 용선료는 평균적인 선박에 비하여 50% 이상 상향되는 것으로 계산된다.⁽¹⁾

기존 디젤엔진의 연료효율에 가장 큰 영향을 주는 요인은 연소기관 내부의 마찰 손실인데, Fig. 1은 엔진 부품들의 마찰 손실이 총 에너지의 4~15%에 해당하고, 기계적 마찰 손실의 절반이 피스톤계에서 발생하는 것을 나타낸다. 피스톤계의 마찰 특성에 대한 규명은 피스톤계에서 발생하는 마찰 손실을 줄이고 성능을 개선하기 위해 무엇보다 중요한 과제이다. 따라서 피스톤계의 마찰 특성에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.⁽²⁾

마찰을 연구하는 방법은 실험적 또는 이론적으로 발전했다. 실험적으로는 실험의 신뢰성 파악이 중요한데, 피스톤 결합체의 마찰력 측정을 위해 가변위 보어법(movable bore method)을 이용하여 데이터의 신뢰성을 파악, 유막두께 및 마찰력을 측정하고,^(3,4) 엔진 요소별 마찰을 구하기 위해 엔진 부품을 단계적으로 탈거하면서 엔진의 모터링 구동력 차이를 측정하는 부품 탈거법(strip-down method)을 적용하여 마찰을 분석하였다.⁽⁵⁾ 이론적

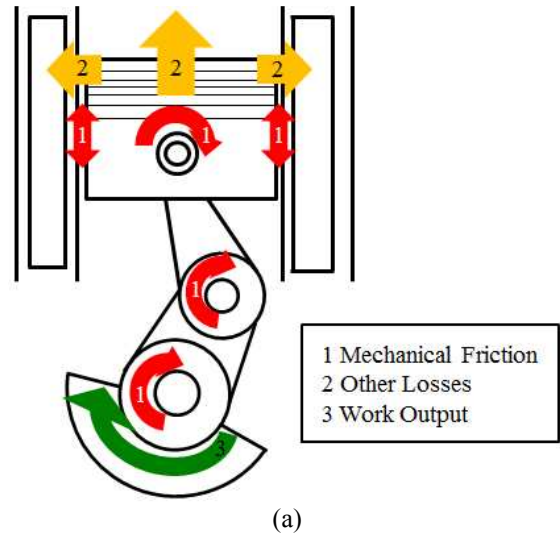


Fig. 1 Schematic diagram of the piston-cylinder and Distribution of total energy and total engine mechanical friction

인 연구에는 엔진 마찰 모델의 기여가 중요하다. 이러한 모델은 내부 연소 엔진 동작의 전체 시뮬레이션 프로그램에서 사용될 수 있고, 설계 및 개발 시간을 단축할 수 있다. 엔진 마찰 모델은 일반적으로 평균 마찰 모델과 평균 및 순간(크랭크 각 당) 마찰 토크를 계산하는 순간 마찰 모델로 구분한다. 마찰 평균 효율 압력(FMEP) 반 실험식으로 평균 압력 모델을 집중하였고,⁽⁶⁻⁸⁾ 다양한 해석 프로그램을 이용하여 마찰손실, 유막두께, 압력 분포를 예측하였다.⁽⁹⁾

하지만 마찰이 발생하는 관찰 대상의 두께가 크기는 마이크로단위(10⁻⁶m)에서 작게는 나노단위(10⁻⁹m)의 영역에 해당한다. 마이크로/나노 유동에 접근하는 방법 중 하나가 Kn 수를 고려하는 것이

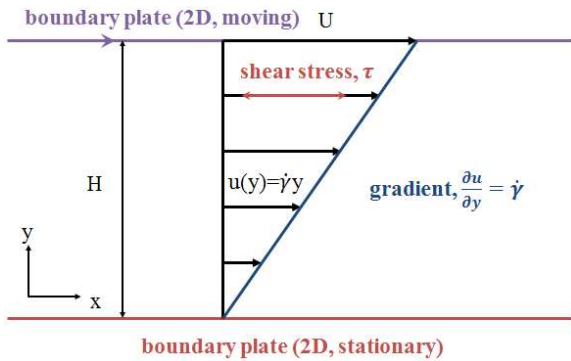


Fig. 2 Schematic diagram of the plane Couette flow geometry

다. 평균 자유 행로(mean free path, λ)는 밀도에 따라 달라질 수 있으므로 희박유동과 나노유동의 Kn 수가 같다면 동일한 상태로 볼 수 있었다. 하지만 희박유동에서 분자간의 상호작용 및 분자의 크기가 무시되고, 나노유동에서는 분자의 크기 및 분자간의 세기를 무시할 수 없기 때문에 같은 Kn 수라고 할지라도 연속체 접근법과의 차이가 존재한다고 볼 수 있다. 따라서 분자들간의 상호관계를 고려할 필요가 있고, 기존 거시적 접근 방법으로 해석하는데 한계가 있기 때문에 대체 수단으로 컴퓨터 시뮬레이션 방법인 분자동역학을 이용한다. 이 분야는 지난 수년 동안 나노 스케일 구조, 재료 및 장치에서 발생하는 열전달을 설명 및 측정하기 위해 이론적 또는 실험적으로 발전해 왔다.⁽¹⁰⁾ 액체-고체 경계면의 운동량 수송에 대한 연구는 벽과 유체 상호작용력, 유체/고체 밀도 및 전단율에 대한 슬립(slip)과 고착(stick) 조건을 보여 준다.⁽¹¹⁻¹³⁾

본 연구는 피스톤과 실린더 사이의 유동을 단순화한 Couette 유동에 대한 시뮬레이션 방법을 기술하고 시뮬레이션 결과를 바탕으로 분자간의 상호작용에 따라 변화하는 마찰손실을 비교하고자 한다.

2. 시뮬레이션

2.1 지배방정식

피스톤과 실린더 사이의 마찰손실은 저항력과 관계된다. 이 힘은 표면의 거칠기 또는 유체의 전단력에 의해서 야기된다. 표면(A)에 작용하는 전단력(F)은 전단응력(τ)이고, 점성계수(μ)과 전단율($\dot{\gamma}$)로 표현된다.

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

전단력이 전단응력이고, 전단응력을 감소시키는

방법은 점성계수와 전단율을 줄이면 된다. 그러나 점성은 물질의 고유특성이므로 전단력을 감소시키는 방법으로 전단율을 고려하기로 한다.

Fig. 2 는 내부에 유체로 채워진 두 평판에서 윗 평판은 x 축 방향으로만 일정한 속도 U로 움직이고, 아래 평판은 고정된 Couette 유동이다. Navier-Stokes 방정식으로부터 채널 내부 유동 운동 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(y) = \frac{U}{H}y \quad (5)$$

이와 같은 속도분포에 슬립 및 고착 조건이 미치는 영향을 확인하기 위하여 해당 Couette 유동을 분자동역학 시뮬레이션으로 수행하고자 한다.

2.2 시뮬레이션 방법

화학적 구조상 탄소와 수소 중심의 여러 모양으로 조합된 탄화수소계 고분자 화학물질인 오일은 구조가 복잡하고, 유동 특성 원인인 점성은 반데르발스 힘(van der Waals force)에 의해 나타난다. 이러한 특징 때문에 고분자 화학물질 자체를 분자동역학 시뮬레이션을 이용하여 해석하기에는 시간적으로 경제적이지 못하다. 반데르발스 힘을 적용한 단위자 분자는 마치 주행성능을 실험하기 위해 불필요한 장치들을 제거하여 단순화시킨 자동차와 같다. 고분자는 길이, 분자량에 따라 성질이 달라지고 사슬의 운동형태도 서로 달라지지만 고분자 사슬들은 그 사슬 특성 때문에 몇 가지 변수만 가지고 특징적인 양들을 예측할 수 있다. 이에 아르곤을 반데르발스 힘(분자력)으로 모델링 하게 되면, 고분자의 특징인 점성을 표현 가능하고, 단위자 분자이므로 시뮬레이션에 적합하다. 아르곤으로 시뮬레이션을 최대한 오일과 비슷한 환경으로 구성하여 점성이 전단응력에 영향을 미치지 않게 한다.

전단력이 마찰력으로 작용하고, 물질의 고유성질인 점성은 채널 폭에 상관없이 일정하므로, 전단율이 중요 파라미터가 된다. 관찰대상과 시뮬레이션의 전단율을 일치시키면, 시뮬레이션을 통해 오일이 전단응력으로부터 받는 영향을 관찰할 수 있다.

전단 유동 분자동역학 시뮬레이션을 수행하기 위해서, Fig. 3(a)는 578 개 액체 분자들로 이루어진 높이(h) 3.24nm, 너비(w) 2.16nm, 길이(l) 4.32nm 의 3D 채널을 선택하였다. 완벽한 분자동역학 시뮬레이션의 결과를 얻기 위해 모든 상황을 고려해야 하지만 시스템 가장자리 분자벽과 분자 사이의 상

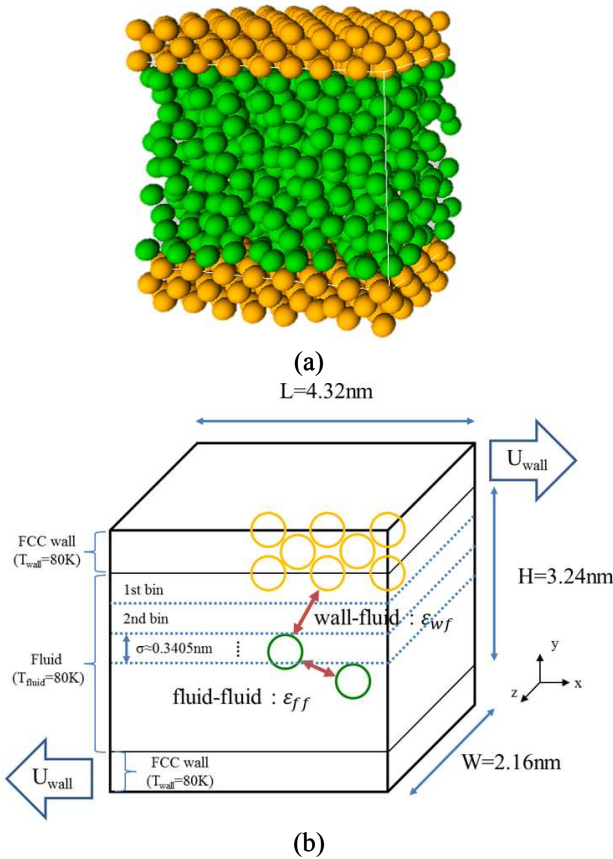


Fig. 3 Schematic and dimensions of the simulation domain (10 slab bin)

호작용을 포함해야 한다면 시뮬레이션 코드가 복잡해지고 시스템이 커지는 단점이 발생한다. 따라서 작은 규모의 시스템에서 벽과의 상호작용을 생략하기 위해 주기적 경계조건(Periodic Boundary Conditions, PBC)을 적용하고, PBC 안의 분자간의 거리로부터 상호작용을 계산하고, cutoff distance 를 고려하여 일정 이상 거리의 분자만 계산하여 시간을 줄인다. 이에 PBC 로 실제 규모의 결과에서 차이가 없기 때문에 3.24nm 채널에서 경계면 현상 및 유체의 거동이 모두 관찰 가능하다.⁽⁸⁾

아르곤 분자의 질량은 $m = 6.63 \times 10^{-26} \text{kg}$, 직경은 $\sigma = 0.3405 \text{nm}$, 분자간의 상호작용 포텐셜의 세기는 $\epsilon = 119.8 \times k_b (1.6539 \times 10^{-21} \text{J})$ 이다. 80K 액체 아르곤에 상응하는 시스템의 수밀도(Number Density)는 $\rho^* \approx 0.8$ 이다.⁽¹⁰⁾ 주기적 경계조건(Periodic Boundary Condition)은 x 및 z 방향으로 도입하여 물질의 bulk 성질을 조사할 수 있게 된다. 속도분포는 벽에 평행한 10 개의 수직 구간(bin)으로부터 얻어진다. 두 벽은 80K 등온이다. 시뮬레이션은 선형응답체제(linear response regime)에 이고, 분자간의 상호작용력을 위해 Lennard-Jones potential

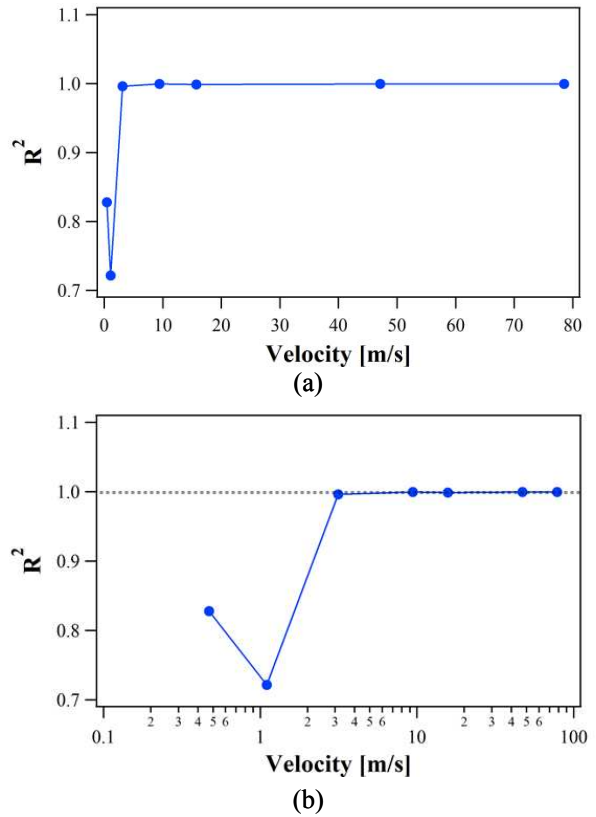


Fig. 4 Reliability by data with the change of a wall velocity ($\epsilon_{ratio} = 0.4$)

$V(r_{ij}) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^6 \right]$ 을 사용하고, 분자간의 상호력은 1.08nm(약 3 σ)에서 0 이 되도록 조정하다. Velocity Verlet Algorithm 을 이용하고, 특성 시간(Characteristic time) $\tau = \sigma\sqrt{m/\epsilon}$ 은 $2.16 \times 10^{-12} \text{s}$ 을 사용하며 시뮬레이션은 4fs ($\sim 0.002\tau$) time steps 을 이용한다. 시뮬레이션은 Maxwell-Boltzmann 속도분포에서 시작하고, 2×10^5 time steps(0.8ns)에서 계(System)이 평형상태에 도달한다. 이후, 4×10^5 time steps(1.6ns)동안 평균값 수집을 시행한다. 더 긴 시간 평균값을 확인해 본 바 정상상태로 속도 데이터의 수렴을 확인할 수 있었다.

3. 결 과

3.1 속도

Fig. 4 는 $\epsilon_{ratio} = 0.4$ 에서 3.24nm 나노 채널의 벽 속도 변화(78.5, 47.1, 15.7, 9.42, 3.14, 1.10, 0.471 m/s)에 따른 신뢰도(R^2)를 나타낸 것이다. 다양한 벽속도 범위 중 3.14m/s 보다 작은 속도 구간에서 신뢰도가 급격히 감소하고, 주기적인 데이터를 관찰할 수 없다.

중대형 선박 엔진의 실린더와 피스톤 사이에서

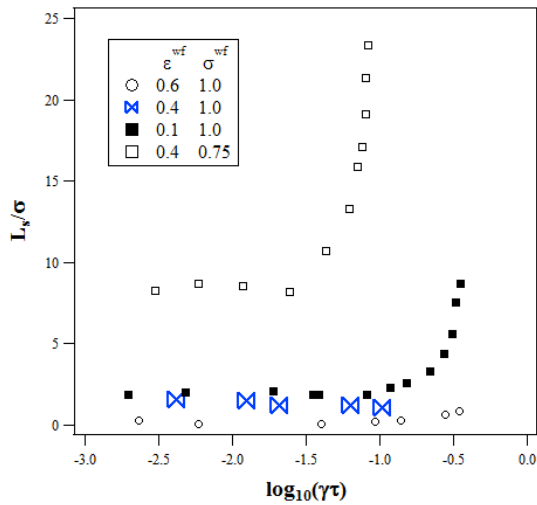


Fig. 5 Variation of the slip length⁽¹⁶⁾ L_s as function of the shear rate for systems

예측된 유막두께(Oil film thickness, OFT) 범위는 0.4~6 μm 이고,⁽¹⁴⁾ 실린더 내부에서 움직이기 위해 금속의 열팽창율을 고려한 피스톤-실린더 간극을 의미한다. 최소 OFT 에 대응하는 분자동역학 시물레이션의 채널 벽속도가 $4.05 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 이다. 이 속도에서 시물레이션 수행이 가능해야 하지만, 두 시스템의 전단율을 맞춘 벽속도를 적용한 나노채널을 구성하는 아르곤 분자의 기본 열진동에 의한 분자의 움직임에 영향을 받기 때문에 액체 아르곤이 벽속도에 대한 유동속도에 수렴되지 않아 신뢰도에 문제가 생겨 전단율을 일치시킬 수 없게 되었다.

Fig. 5 은 전단율($\dot{\gamma}$)에 따른 슬립 길이(L_s)를 나타낸 것이다. 전단율의 변화에 따라 슬립 길이가 거의 일정한 구간과 급격하게 변화하는 구간으로 구분할 수 있다. 이러한 경향은 이전 연구⁽¹⁶⁾에서 관찰되었다. Fig. 4 에서 신뢰도가 높은 데이터를 이용하여 Fig. 5 에 도시(파랑색 리본)하였고, 전단율이 증가하더라도 동일한 슬립 길이 구간을 형성하였다. 0.4~6 μm OFT 와 3.24nm 채널의 크기가 다르지만 전단응력을 알기 위해서 두 시스템의 전단율을 일치시킨다. 하지만 시물레이션의 최고 벽속도가 동일한 슬립 길이 구간에 존재하므로 낮은 신뢰도 영역의 벽속도에서 전단율을 일치시키지 않아도 동일한 비율로 locking 과 slip 이 발생한다.

Fig. 6 은 분자동역학 시물레이션의 분자벽 속도가 78.5m/s 일 때, 표면 wetting 에 대한 속도분포를 나타낸 것이다. Fig. 3(b)는 분자 직경($\sigma=0.3405\text{nm}$)과 비슷한 크기로 3.24nm 채널을 10 수직 구간으로 나눈 것을 표현한 그림이고, Fig. 6(a)는 10 수직 구간에서 속도들을 표면 wetting 에

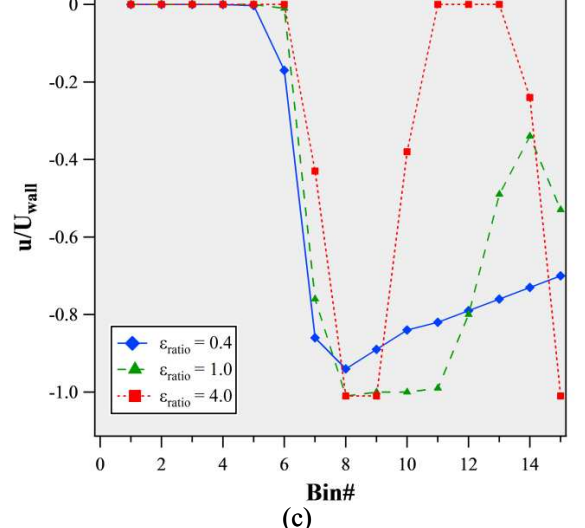
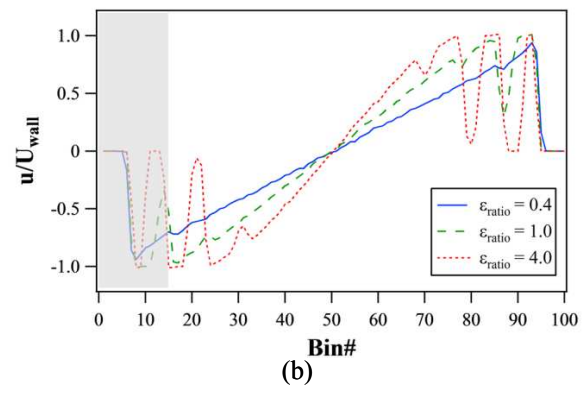
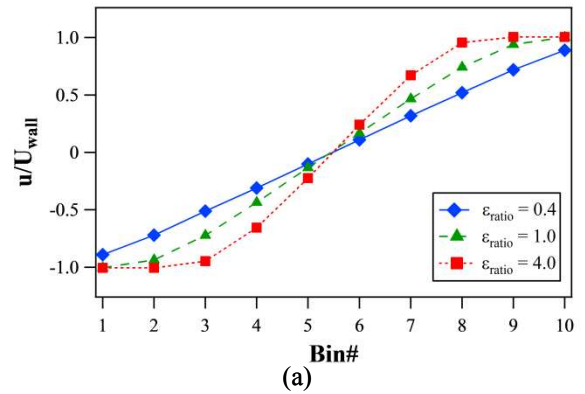


Fig. 6 Velocity distribution for surface wetting. (a) 3.24nm nanochannel divides into 10bin and (b) 100 bin. (c) Close-up of the 100bin channel ($U_{wall} = 78.5\text{m/s}$)

따라 표현한 그래프이다. 채널을 10 구간으로 나누게 되면 첫 번째와 열 번째 데이터는 벽에 근접한 유체구간이 된다. $\epsilon_{ratio} = 0.4$ 에서 벽에 근접한 유체의 속도가 벽속도에 도달하지 못하고, 고체-유체 분자 사이의 힘(ϵ_{wf})보다 유체분자들 사이의 힘(ϵ_{ff})이 상대적으로 커져 액체 아르곤이 분자벽에서 잘 미끄러질 수 있게 된다. 따라서, 접촉조건

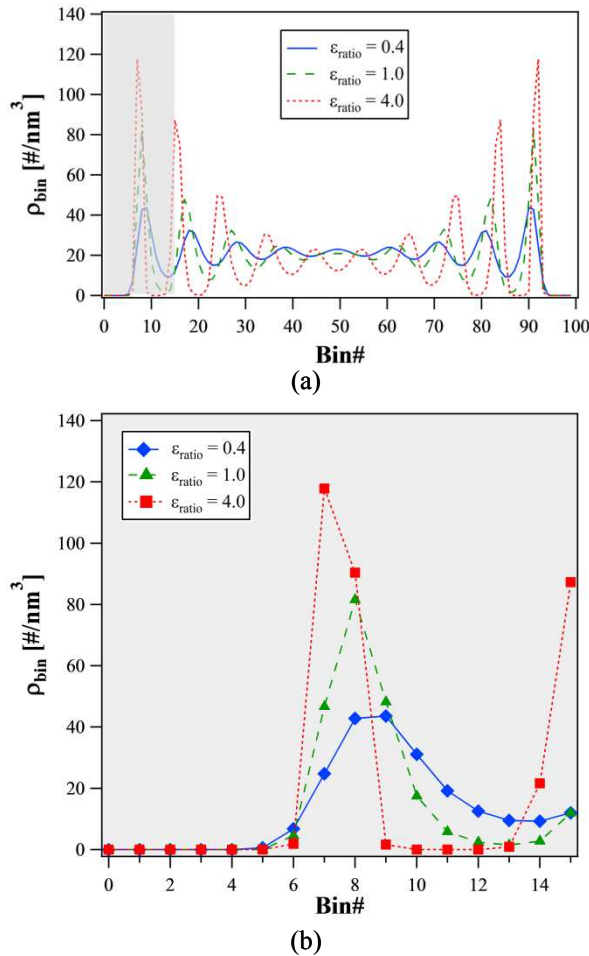


Fig. 7 Density distribution for surface wetting. (a) 3.24nm channel height divides into 100bin. (b) Zoom in from 1bin to 15bin ($U_{wall} = 78.5\text{m/s}$)

(No-slip)을 가정한 연속체 가정과는 달리 벽 근처 유체속도가 벽속도보다 느리게 되고, $\epsilon_{ratio} = 0.4$ 에서 78.5m/s 벽속도에 근접한 유체속도는 벽속도의 84%에 해당하게 된다. $\epsilon_{ratio} = 1.0$ 과 4.0 에서 연속체에서 가정한 점착조건의 결과와 같이 벽 근처 유체속도와 벽속도가 동일하게 나타나지만 속도분포는 선형적이지 않다. 특히, $\epsilon_{ratio} = 4.0$ 에서 벽에 제일 근접한 첫 번째, 열 번째 데이터 뿐만 아니라 2 번째, 9 번째 데이터에서도 고체벽과 동일한 속도가 나타나고, 벽에 근접하지 않은 유체에서 벽속도와 동일한 값이 나타나는 현상을 **locking** 이라고 한다. 이러한 유체 거동은 마치 채널의 두께가 좁아지는 결과를 초래하여, 전단력을 증가시킨다. 벽에 인접한 bulk 유체와 나노채널의 유체에 동일한 벽속도를 부여했을 때, 점착조건을 가정한 연속체의 일반적인 결과는 동일한 전단율을 나타나게 되지만, 분자간의 상호작용이 고려되는 미시적인(Microscopic) 시점부터는 동일한 벽의

이동속도에도 불구하고 slip 과 locking 이 발생하여 전단율이 변하게 된다.

Fig. 6(b)는 100 수직 구간으로 나눈 채널의 속도 분포를 정리한 그림이다. 나노 채널을 100 수직 구간으로 나누게 되면 각 구간은 분자 직경보다 작은 값에 해당한다.

Fig. 6(c)는 벽에서 15 번째 구간의 속도분포를 정리한 그래프이다. 채널을 10 수직 구간으로 나눈 속도분포와 다르게 벽에 근접한 4 번째 bin 까지 액체분자의 속도가 0 의 값을 나타낸다. Fig. 3(b)의 첫 번째 bin 은 FCC 구조의 분자벽과 자유로운 액체 아르곤 분자들로 구성된다. 이 비율은 분자벽을 이루는 분자들의 반지름에 해당하는 부분과 움직이는 유체분자들이 60% 차지하는 것처럼 여겨질 수 있다. 따라서 채널을 100 수직 구간으로 나누었을 때 10 번째 bin 까지 분자 지름의 크기에 해당하므로 벽에 근접한 4 번째 bin 까지 분자가 존재하지 않는 것처럼 보인다.

위에서 본 바와 같이 분자간의 상호작용 세기를 의미하는 ϵ_{ratio} 에 의해 경계면에서 slip 과 locking 이 발생한다. 또한 같은 ϵ_{ratio} 일 경우, 분자가 더 많은 구간에서 작용하는 힘이 크다. 이는 벽 분자의 밀도와도 관계가 있다.

3.2 밀도

Fig. 7 은 100 개 수직 구간으로 나눈 나노채널에서 분자들의 밀도분포를 표현한 그림이다. 채널 전구간에서 아르곤 분자의 밀도가 일정하지 않고, 표면 wetting(ϵ_{ratio})에 따라 벽근처 밀도가 다르며, 채널의 중심보다 벽 근처의 밀도가 더 큰 것을 확인할 수 있다. $\epsilon_{ratio} = 0.4$ 는 분자벽을 구성하는 아르곤 분자와 유체 분자 사이의 상호력이 상대적으로 유체분자간의 상호작용보다 작기 때문에 벽 근처에는 밀도가 가장 작고, $\epsilon_{ratio} = 4.0$ 에서는 유체-고체 분자 사이의 상호력이 강할 경우이며 벽 근처에 layering 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

3.3 효율

Fig. 8 은 시뮬레이션 가능한 속도범위(3.14 ~ 78.5m/s)에서 계산된 전단율을 이용하여 추세선식을 도출하였다. Table 1 은 점착조건을 가정한 유체의 전단율을 계산한 값과 $\epsilon_{ratio} = 1.0$ 에서 실제 분자 움직임을 기반한 값을 바탕으로 예측한 전단율을 정리하였다. 다양한 추세선 중에서 거듭제곱(power) 추세선이 점착조건을 적용한 전단율과 흡사하게 예측되었다. 거듭제곱 추세는 로그 추세와

Table 1 Predicted Shear rate using Igor

MD wall velocity [m/s]	OFT [μm]	No-Slip shear rate [s^{-1}]	Shear rate using Igor [s^{-1}]
0.041	0.4	2.500E+07	2.273E+07
0.014	1.2	8.333E+06	7.505E+06
0.007	2.4	4.167E+06	3.730E+06
0.004	4	2.500E+06	2.228E+06
0.003	6	1.667E+06	1.480E+06

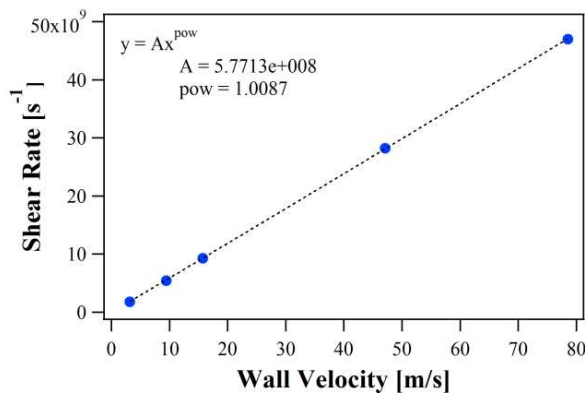


Fig. 8 Draw curve fitting to predict shear rate corresponding to OFT using the shear rate of Molecular dynamics calculations ($\epsilon_{ratio} = 1.0$)

마찰가지로 성장이 둔화되고 있거나 쇠퇴가 완만해졌다고 판단되는 경우 사용 되는데, $\epsilon_{ratio} = 1.0$ 은 점착조건을 가정한 연속체와 유사한 환경이기 때문에 예측되는 전단율이 점착조건을 적용한 전단율과 비슷해야 한다.

$\epsilon_{ratio} = 0.4$ 이고, 벽속도가 78.5m/s 일 때, slip 에 의해서 분자동역학 시뮬레이션의 분자벽 근처 유체의 속도는 벽속도의 84%에 해당한다. $\epsilon_{ratio} = 4.0$ 에서 벽과 유체 사이의 상호작용 강도가 증가하여 locking 이 발생하고, 채널의 두께가 감소하므로, $\epsilon_{ratio} = 1.0$ 보다 전단율이 증가하게 된다. 전단율의 증가는 실린더계가 오일의 유동에 의해 큰 마찰력을 받는 것을 의미한다.

Fig. 9 는 중대형 선박엔진의 평균속도 10m/s 를 기준으로 유막두께의 변화에 대한 마찰손실 결과를 계산한 그래프이다. 먼저, 유막두께가 증가함에 따라 모든 wetting 에서 마찰손실이 감소하는 경향이 나타났다. 두 번째, wetting 이 증가함에 따라 마찰 손실이 증가했다. $\epsilon_{ratio} = 1.0$ 을 기준으로 $\epsilon_{ratio} = 0.4$ 에서는 벽근처 유동이 벽에서 미끄러지고 벽속도에 비해 느려져 전단율이 감소하고, 낮은 마찰손실을 초래한다. $\epsilon_{ratio} = 4.0$ 의 경우에는

Table 2 Friction Losses with OFT and wetting

OFT [μm]	$\epsilon = 0.4$ Friction Loss [%]	$\epsilon = 1.0$ Friction Loss [%]	$\epsilon = 4.0$ Friction Loss [%]
0.4	123	173	323
1.2	40	57	108
2.4	19	28	54
4	11	17	32
6	7	11	21

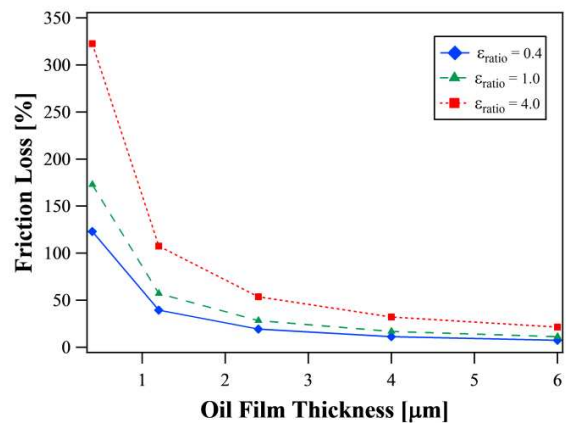


Fig. 9 Friction loss depending on OFT. Comprehensive result depending on wetting.

채널이 좁아지는 locking 이라는 현상에 의해 전단율을 증가시키고, 다른 wetting 에 비해 마찰을 증가시켰다. 마지막으로 유막두께가 6 μm 에서는 slip/locking 에 따른 마찰손실 차이가 거의 없는 반면에 0.4 μm 에서는 마찰손실 차이가 크게 나타났다. 이것은 미세영역일 수록 분자들간의 상호력에 대한 영향이 크다는 것을 나타낸다.

4. 결론

본 연구는 피스톤과 실린더 간극에서 발생하는 마찰이 엔진의 효율에 미치는 영향이 크고, 미세영역으로 간주될 수 있어 기존 유동해석에서 고려되지 않은 분자들간의 상호작용을 고려하는 분자동역학 시뮬레이션의 결과로부터 엔진 마찰 손실을 비교하였다.

엔진의 전체효율 중 기계적 마찰로 인한 손실이 4~15%에 해당한다. 기계적 마찰의 상당부분이 피스톤과 실린더 벽 사이(0.4~6 μm)의 오일 유동에 의해 발생하기 때문에 분자레벨의 유동모델 도입이 필요하다. 엔진 마찰은 경계면의 거칠기 또는 유체의 전단력에 의해 발생하고, 피스톤-실린더 표면의 전단력은 전단응력이다. 이 마찰은 전단율

에 의해 달라지게 된다. 피스톤과 실린더 사이의 오일의 유동을 Couette 유동으로 묘사하고, 분자동역학 시뮬레이션으로 이 유체의 거동을 계산하였다. wetting 에 대한 벽 근처의 유동을 관찰하면, 약한 wetting 에서는 슬립에 의해 벽 근처 속도가 벽 속도의 84%가 계산된다. 상대적으로 분자벽에서 유체를 당기는 힘이 큰 경우에는 기존 채널의 두께가 좁아지는 locking 이 발생하여, 벽 근처 유체에 발생하는 전단력을 증가시킨다. slip/locking 에 의한 전단율의 변화는 마찰에 영향을 끼친다. 모든 wetting 에서 유막두께가 증가함에 따라 마찰손실은 감소하였으나, wetting 이 커질수록 마찰손실 크기는 증가하였다. 마지막으로 유막두께가 작아질수록 wetting 에 대한 마찰손실차이가 증가하고, 분자들간의 상호작용에 대한 영향이 커진다는 것을 확인할 수 있었다.

피스톤-실린더의 오일막은 피스톤이 실린더에서 많이 흔들리지 않게 하고, 연소가스를 밀봉하는 역할을 한다. 이 역할을 효율적으로 수행하기 위해서 피스톤-실린더 간극은 점점 더 작아지는 방향으로 발전을 할 것이다. 채널의 표면을 매끈하게 가공이 가능하고, 그 폭을 점점 줄이는 기술이 발전할 때, 분자들간의 상호작용에 의해 발생하는 전단응력의 영향은 중요하게 될 것이다.

후 기

본 연구는 2012 년 울산대학교 기계공학부 일류화사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Yang, J. S., 2012, *Green-Ship-New Challenges and Opportunities in the Ship Industry*, The Export-Import Bank of Korea, Seoul, pp. 1~57.
- (2) Richardson, D., 2000, "Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*, Vol. 122, No. 4, pp. 506~519.
- (3) Cho, S. W. and Kim, S. S., 1996, "Friction Force Measurement between Piston Assembly and Cylinder Wall of a SI Engine Under Motoring Conditions," *Transactions of the KSAE*.
- (4) Cho, S. W., Choi, S. M., Bae, C. S. and Noh, S. H., 1998, "Measurements of Piston Assembly Friction Force and Oil Film Thickness in an SI Engine," *Transactions of the KSAE*.
- (5) Ha, K. P., Lee, S. J., Kim, W. T., 2009, "A study on the Analysis and Reduction of Engine Friction," *Transactions of the KSAE*.
- (6) McAulay, K. J., Wu, T., Chen, S. K., Borman, G. L., Myers, P. S. and Ueyehara, O. A., 1965, "Development and Evaluation of the Simulation of the Compression Ignition Engine," *SAE paper 650451*.
- (7) Millington, B. W. and Hartles, E. R., 1968, "Frictional Losses in Diesel Engines," *SAE paper 680590*.
- (8) Winterbone, D. E. and Tennant, D. W. H., 1982, "The Variation of Friction and Combustion Rates during Diesel Engine Transients," *SAE paper 810339*.
- (9) Kim, C. K., 2005, "Analysis on the Friction Characteristic of Low Viscosity Engine Oils," *Journal of KSTLE*, Vol. 21, No. 6, pp. 249~255.
- (10) Karniadakis, G., Beskok, A., Aluru, N., 2005, *Microflows and nanoflows fundamentals and simulation*, Springer Science, New York, pp. 75~112.
- (11) Kim, B. H., Beskok, A., Cagin, T., 2008a, "Thermal Interactions in Nanoscale Fluid Flow: Molecular Dynamics Simulations with Solid-liquid Interfaces," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 5, No. 4, pp. 551~559.
- (12) Kim, B. H., Beskok, A., Cagin, T., 2008b, "Molecular Dynamics Simulations of Thermal Resistance at the Liquid-Solid Interface," *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 129, No. 17, pp. 174701(9)
- (13) Kim, B. H., Beskok, A., Cagin, T., 2010, "Viscous Heating in Nanoscale Shear Driven Liquid Flows," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 9, No. 1, pp. 31~40.
- (14) Park, D. S., Kim, J. H., Kim, C. H. and Jeong, D. C., 2008, "Hydrodynamic Lubrication Analysis of Piston Running Part for Large Diesel Engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*.
- (15) Thompson, P. A. and Robbins, M. O., 1990, "Shear-Flow Near Solids-Epitaxial Order and Flow Boundary-Conditions," *Physical Review A*, Vol. 41, pp. 6830~6837.
- (16) Thompson, P. A. and Troian, S. M., 1997, "A general Boundary Condition for Liquid Flow at Solid Surfaces," *Nature*, Vol. 389, pp. 360~362.