

## 피스톤 링과 실린더 라이너에서의 마찰저감 기술개발

김완호 · 차금환 · 김대은\* · 임윤철\*

연세대학교 기계공학과 대학원  
\*연세대학교 기계전자공학부

### Development of Friction Reduction Method between Piston Ring and Cylinder Liner

Wan-Ho Kim, Kum-Hwan Cha, Dae-Eun Kim\* and Yoon-Chul Rhim\*

Graduate School, Yonsei University  
\*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

**Abstract**—The friction loss between piston rings and cylinder liner is due to the tension of the piston rings. Lubricant is usually supplied to reduce the friction. However, the sliding speed of the piston varies during the reciprocating cycle and is very low near TDC(Top Dead Center)/BDC(Bottom Dead Center), where the hydrodynamic lubrication cannot be sustained. Since the lubrication regime is shifted from the hydrodynamic to the boundary lubrication near TDC/BDC, wear particles are easily generated so that the friction loss becomes bigger and bigger due to the plowing effect of wear particles. In this study, for the purpose of reducing the friction loss, an undulated surface is adopted to the cylinder liner to trap wear particles. The friction force variations, which are measured by strain gages, show that the concept of undulated surface is one of the promising methods to effectively reduce the friction between piston rings and cylinder liner.

**Key words**—undulated surface, friction loss, friction reduction, wear particle trap.

#### 1. 서 론

내연기관의 에너지 손실 중 40~20%가 실린더와 피스톤 링 사이의 마찰손실이며 고속회전보다는 저속회전일 때 더 큰 비중을 차지한다[1]. 이는 피스톤의 속도가 마찰과 관계 있음을 의미한다. 피스톤의 속도는 크랭크의 1회전 동안 연속적으로 변화하는데 상·하사점 부근에서의 피스톤의 속도는 거의 정지상태이므로 유체윤활에 의한 유막형성이 어려우며 저속회전일 경우 이러한 영역이 고속회전의 경우와 비교하여 커지게 된다. 이러한 유막형성의 어려움으로 인하여 특히 상·하사점 부근에서의 실린더와 피스톤 링의 윤활상태는 유체윤활 상태에서 건식 윤활상태로 바뀌게 되며 마찰은 급격히 증가하게 된다. 상·하사점 부근에서의 심한 마찰은 실린더의 수명을 단축시킬 수 있

으므로 이 부분에서의 마찰을 줄이면 연비 및 내연기관 전체의 내구성을 향상시킬 수 있다. 특히 대형 선박용 디젤엔진과 같은 중, 저속용 내연기관의 경우 상·하사점 부근에서 마찰에 의한 마멸로 실린더 라이너가 손상을 입어서 정기적으로 라이너를 보수 또는 교환하여야 하므로[2] 마찰저감을 위한 기술개발은 중요한 의미를 갖고 있다.

피스톤 링은 연소가스가 크랭크 케이스로 누설되어 연소가스의 압력이 저하되는 것을 방지하는 압축 링과 윤활유가 크랭크 케이스로부터 연소실로 흘러 들어가는 것을 방지하는 오일 링으로 구성된다. 피스톤 링은 누설방지에 있어서 가장 효과적인 부품으로 알려져 있으며 내연기관이 개발된 이래 지금까지 널리 사용되고 있다. 피스톤 링의 탄성은 누설방지에 필수적이나 또한 마찰의 원인이기도 하다. 피스톤 링과 실

린더 내벽 사이의 마찰저감을 위한 연구는 주로 피스톤 링의 탄성이나 단면형상 또는 윤활방법 등에 초점이 맞추어져 왔다[3-6]. 그러나 마찰현상에 대한 근본적인 이해 없이는 효율적인 마찰저감 방안이 제시되기 어렵다고 판단되어 본 연구에서는 기계적인 관점에서의 마찰과 마멸의 관계로부터 피스톤 링과 실린더 내벽사이의 마찰저감 방법을 실험적으로 제시하고자 한다.

마찰현상은 크게 응착(adhesion), 갈림(plowing), 요철변형(Asperity deformation)의 세 가지 요인에 의해 발생한다[7]. 경계윤활 상태이거나 건식마찰의 경우 두 상대운동하는 재료 사이에서는 응착현상에 의해 마멸입자가 발생하며 발생한 마멸입자는 두 재료사이의 틈새에 끼어 마찰력의 증가를 유발한다. 이와 같이 마멸입자가 상대운동하는 두 재료사이에 끼어 재료의 표면을 긁음으로서 발생하는 마찰력의 증가효과를 갈림효과라 한다[7]. 이러한 마멸입자의 갈림효과가 마찰에 미치는 영향은 마찰 발생과정 중에서 매우 중요한 부분이며 일단 마멸입자가 발생하면 마찰계수가 급격히 증가하는 것이 여러 연구결과에 의해 증명되었다[8]. 따라서 발생한 마멸입자를 접촉 경계면에서 제거할 수 있다면 마찰을 효과적으로 감소시킬 수 있다.

마멸입자를 표면에 인위적으로 가공한 미세요철의 틈에 가두는 방법이 몇몇 연구에서 제시되었으며[8,9] 본 연구에서도 마멸입자를 제거하기 위하여 피스톤이 상·하사점의 위치에 있을 때 피스톤 링이 접촉하게

되는 라이너의 상·하부 면에 미세요철을 가공한 후 마찰력 측정실험을 수행하였다. 본 연구에서는 실험을 위하여 선삭으로 미세요철을 추가 가공하였으나 실제 양산의 경우에는 실린더 내면 가공시 추가 공정 없이 가공할 수 있으므로 기존의 생산라인에 본 연구에서 제안하는 기술을 용이하게 적용할 수 있다.

## 2. 실험장치

### 2-1. 실험장치의 구성

마찰손실은 마찰력의 크기를 비교함으로써 알 수 있다. 피스톤 링과 실린더 내벽과의 마찰력을 측정하기 위하여 실린더 라이너가 장착된 상용 단기통 디젤 엔진의 부품을 사용하였으며 실린더 라이너를 엔진에서 분리하여 Fig. 1과 같은 실험장치를 구성하였다. 2.2 kw 용량의 가변속 직류모터를 사용하여 크랭크 축을 구동하였고 라이너는 70계열의 알루미늄으로 제작된 지그를 사용하여 양쪽 옆의 지지벽에 고정하였다. 라이너의 고정부에는 풀브릿지 회로로 구성된 스트레인 게이지를 장착하여 라이너를 지지벽에 고정시킴과 동시에 상하방향으로의 마찰력을 측정하였다. 고정부를 알루미늄으로 제작한 이유는 지그가 라이너를 지지하기에 충분한 강성을 갖으면서도 마찰력이 가해졌을 때 스트레인 게이지로 측정 가능한 범위의 변형률이 생겨야하기 때문이었다. 이러한 조건을 고려하여 두께 2 cm, 폭 4 cm의 알루미늄 바 2개를 사용하여 라이너를 고정하였고 정하중을 이용하여 보정한 후

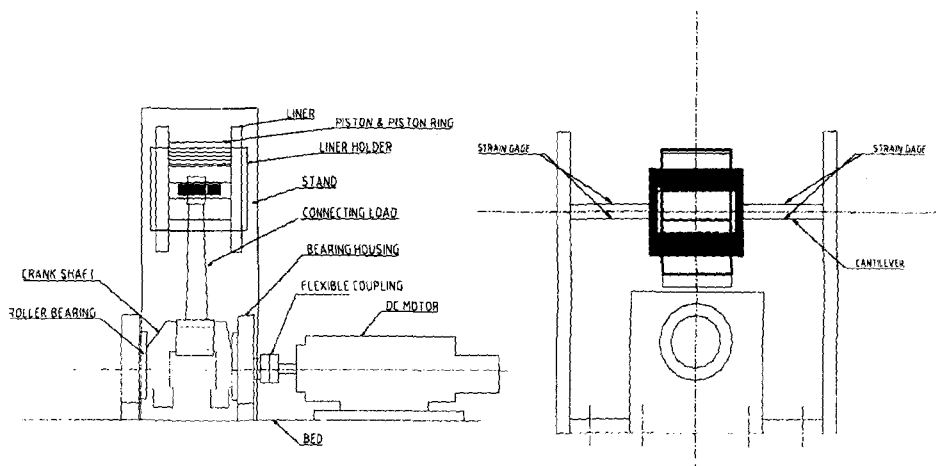


Fig. 1. Experimental setup.

**Table 1. Specification of cylinder liner assembly**

피스톤 링	압축링	두께	2.4 mm
		단면형상	직사각형
	오일링	두께	3.9 mm
		단면형상	ㄷ자형
실린더 라이너	내경	94.85 mm	
	외경	104 mm	
	길이	170 mm	
	무게	2.3 kg	
피스톤	외경	90 mm	
커넥팅 로드	길이	165 mm	

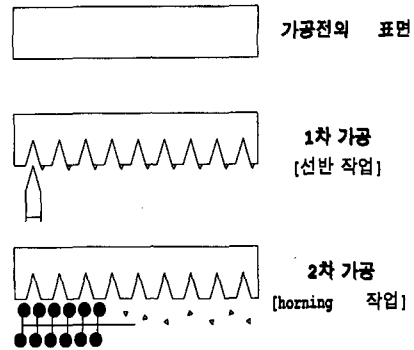
실험하였다. 스트레인 게이지로부터의 신호는 앰프에서 증폭(5,000배)한 후 필터(cut-off frequency: 1 KHz)를 통과시킨 뒤에 디지털 신호로 변환하여 저장하였다. 실험장치에 사용된 엔진의 각 부품에 대한 사양은 Table 1과 같다.

**2-2. 미세요철 표면의 가공**

미세요철의 가공방법에는 기계적인 방법과 화학적인 방법이 있다. 본 연구에 사용된 실린더 라이너는 원통형이며 미세요철의 가공면은 이 원통의 내면이므로 화학적인 방법으로 가공하기는 부적절한 형상이어서 기계적인 방법으로 미세요철 표면을 가공하였다.

피스톤 링에 의하여 가장 심각한 마멸이 발생하는 실린더 라이너의 상·하사점 부근에 선반을 이용하여 나사 산 내기로 실린더의 내면에 홈을 가공하였다. 가공깊이는 100 μm, 선반 회전속도는 100 rpm, 이송속도는 나사 산 피치(pitch)가 0.5 mm가 되도록 가공하였다. 나사 산을 가공한 뒤 호닝 공구를 드릴링 머신에 장착하여 나사 산의 버어를 제거하였다. 호닝 공구의 회전속도는 450 rpm이었으며 수초간씩 3회 가공하였고 가공후의 이랑부분의 표면조도가 3~6 μm (Rmax) 정도 되도록 하였다. 이 과정을 도식적으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

가공 후의 표면형상을 표면형상 측정기로 측정하여 본 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 미세요철에서 골의 깊이는 100 μm이고, 골간의 거리는 250 μm, 이랑의 폭은 150 μm이다. 압축 링의 두께가 2.4 mm이므로 위와 같이 가공하면 약 10개의 요철이 압축 링 밑에 놓이게 된다. 실제 실린더에서 발생하는 마멸입자의 크기는 여러 조건에 따라 매우 다양하지만 대략 2~10 μm의 범위가 대부분이므로 본 실험에서 가공한 미세



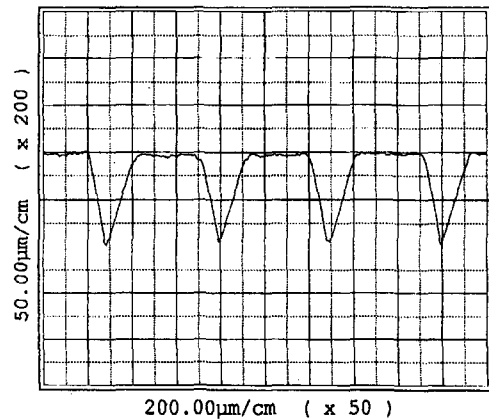
**Fig. 2. Manufacturing process of undulated surface.**

요철의 크기는 마멸입자들을 포획할 수 있는 충분한 크기이다.

**3. 실험방법과 결과고찰**

**3-1. 실험방법**

실험은 농기계용으로 많이 사용되고 있는 단기통 디젤엔진의 크랭크샤프트, 메인 베어링, 콘넥팅 로드, 피스톤, 실린더 라이너들을 조립하여 수행하였으며 실린더 라이너와 피스톤 링은 매 실험마다 신품을 사용하였다. 피스톤에는 3개의 압축 링과 2개의 오일 링을 사용할 수 있도록 5개의 홈이 가공되어 있었으나 마찰력을 측정하기 위하여 설치한 고정부의 강성을 고려하여 과도한 마찰력이 발생하지 않도록 압축 링을 위 상단에 1개만 장착하였다. 그러나 압축 링 한 개만으로는 피스톤 스킴트 부의 실린더 라이너와의



**Fig. 3. Surface profile of undulated surface.**

마찰을 방지 할 수 없고 또한 실제 윤활상태를 구현할 수 없기 때문에 피스톤의 최저 하단에 오일 링 1개를 추가 장착하여 피스톤의 균형을 잡으면서 실제와 비슷한 윤활상태가 이루어지도록 하였다. 각 운동부에 윤활을 위해 주입한 윤활유는 자동차용 엔진오일로서 40°C에서 68.5 cSt, 99°C에서 10.93 cSt의 동점성계수를 가지며, 밀도는 887 kg/m<sup>3</sup>이다.

실험은 신제품인 실린더 라이너가 실험장치에 적용되기 위한 일정시간의 런인 과정(run-in process), 마찰력 측정 과정 및 가속화 실험에서의 마찰력 측정과정으로 나뉜다. 런인 과정은 윤활유를 충분히 공급하면서 약 8시간 동안 200 rpm의 속도로 운전하며 진행된다. 런인 과정에 8시간을 할당한 데에는 특별한 이유는 없으나 그 정도의 시간이 경과한 후에 실시한 실험에서 얻어진 결과들이 반복성이 있고 일관성이 유지되는 것으로 판단되어 그렇게 정하였다.

런인 과정을 마친 후 잔여 윤활유 및 마멸입자들을 제거한 뒤에 마찰력을 측정하였다. 마찰력 측정은 100 rpm에서 300 rpm까지 100 rpm씩 크랭크 축의 속도를 변화시켜가면서 측정을 하였는데 이러한 운전속도는 일반 중, 대형 선박에서 사용하는 디젤 엔진의 작동환경과 유사하다.

가속화 실험은 마멸입자의 생성을 촉진시킨 후 마멸입자에 의한 마찰력의 변화를 관찰하고자 실시하였다. 실험에 사용한 마멸입자는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(#6000)이며 이를 윤활유에 섞어서 공급하였다. 미세요철의 효과를 측정하기 위하여 마멸입자가 포함된 윤활유의 공급을 중단하고 정상적인 윤활유를 최소유량(1방울/10초)으로 공급하면서 마찰력의 변화를 측정하였다. 최소유량은 별도의 실험을 통하여 급격한 마찰력의 변화가 발생하지 않는 공급 윤활유의 양으로 정하였다. 마찰력은 매끈한 라이너와 미세요철이 가공된 라이너에 대하여 같은 회전속도 상태에서 3분간의 데이터를 크랭크 앵글에 따라 측정하여 평균하였으며, 크랭크축의 속도를 증가시키면서 이 과정을 3번 반복하여 평균마찰력을 구하였다.

### 3-2. 실험결과 고찰

런인 과정을 끝내고 마멸입자를 제거한 후의 미세요철 표면과 매끈한 표면에 대하여 최소윤활 상태에서의 크랭크 앵글에 대한 마찰력의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 피스톤이 상사점에 위치할 때를 크랭크

앵글 0°로 설정하였으며 주기적으로 반복되는 신호가 출력됨을 볼 수 있다. 매끈한 표면의 마찰력 변화 진폭보다 미세요철 표면의 진폭이 작은 것을 Fig. 4로부터 알 수 있는데, 이는 매끈한 표면의 마찰력이 미세요철 표면의 마찰력보다 큰 것을 의미하는 것으로서 매끈한 표면에서는 피스톤 링에 의하여 윤활유가 상당히 제거된 상태에서 운전된 반면 미세요철이 가공된 표면에서는 윤활유가 미세요철 속에 남아 있어서 비교적 저속으로 운동하는 피스톤 링과 표면 사이에 윤활유를 공급하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 본 실험에서와 같이 모터로 크랭크를 구동하는 방식(motoring)이 아닌 실제 연소가 일어나는 상황(firing)에서는 미세요철 속의 윤활유가 일부 연소하게 되므로 마찰력의 차이는 다소 작아질 것으로 예상된다. 또한, 크랭크 앵글에 따라 피스톤의 속도가 변화하는데 피스톤의 속도가 가장 빠른 90°와 270° 부근에서는 유체윤활 상태를 유지하여 마찰력의 감소가 기대되었으나 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 그러한 효과는 보이지 않았다. 이는 최소윤활 상태와 100 rpm의 운전조건이 유체윤활 상태를 유지하기에는 부적절하였기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5에는 마멸입자를 첨가한 가속화 실험의 결과를 나타내었다. 마멸입자가 포함된 윤활유의 공급을 중단하고 정상적인 윤활유를 최소유량으로 공급하는 상태에서 마찰력의 변화를 측정하였다. 미세요철 표면의 경우 마찰력의 증가가 5% 이하인데 비하여 매

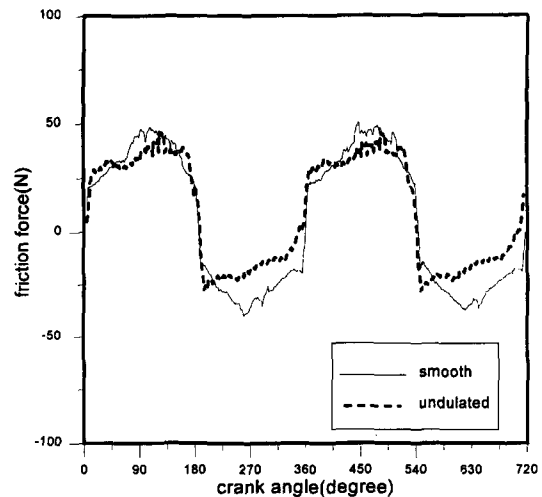


Fig. 4. Friction force vs. crank angle at 100 rpm without particles.

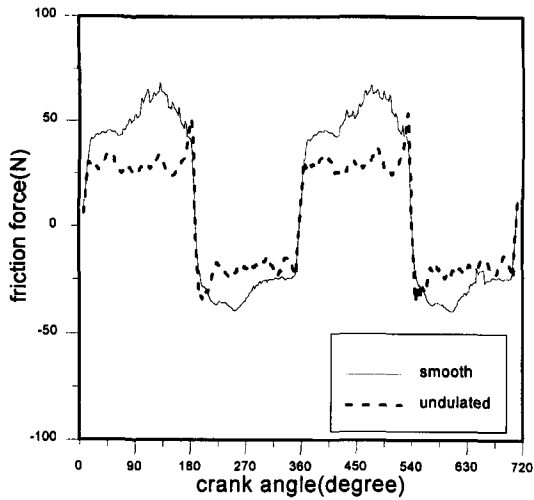


Fig. 5. Friction force vs. crank angle at 100 rpm with particles.

끈한 표면의 경우는 마찰력 변화 곡선의 진폭이 마멸 입자를 첨가하지 않았을 경우보다 10% 이상 증가한 것을 볼 수 있다. 이로부터 미세요철 표면이 첨가한 마멸입자 및 그로 인한 라이너의 마멸분을 흡수에 포획하여 마찰을 성공적으로 감소시킬 것이라는 예상이 맞았음을 알 수 있다.

300 rpm에서 마멸입자를 첨가하지 않았을 경우와 첨가하였을 경우의 크랭크 앵글에 대한 마찰력변화 그래프를 각각 Fig. 6과 7에 나타내었다. 진폭을 비교하여 보면 100 rpm에서의 경우와 마찬가지로 미세요철 표면에서의 마찰력이 매끈한 표면의 경우보다 마멸입자의 유무에 관계없이 작은 것을 알 수 있다. Fig. 4 및 5와 비교하여 보면 속도의 증가에 따라 마찰력 변화 곡선의 진폭이 증가하였음을 알 수 있는데 이것은 속도가 증가할수록 마찰력이 커짐을 의미하는 것으로서 일반적으로 알려져 있는 마찰계수는 속도에 무관하거나 또는 속도증가에 따라 다소 감소한다는 내용과 상충되는 실험결과를 보여준다. 또한 마찰력의 방향이 바뀌는 상·하사점 부근에서 마찰력이 급격히 변화하지 않고 완만하게 바뀌는 경향을 보이는데 이는 라이너에서의 마찰력을 측정하기 위하여 설치한 지그와 고정부를 포함한 측정시스템 전체의 강성이 변동하는 마찰력을 측정하기에 충분치 못하였던 결과라고 판단된다. 한편, 마멸입자를 첨가한 실험에서는 마찰력이 진동하는 현상을 보이는데 이 역시 실험장치의 강성이 부족한 결과라고 생각된다. 따라서

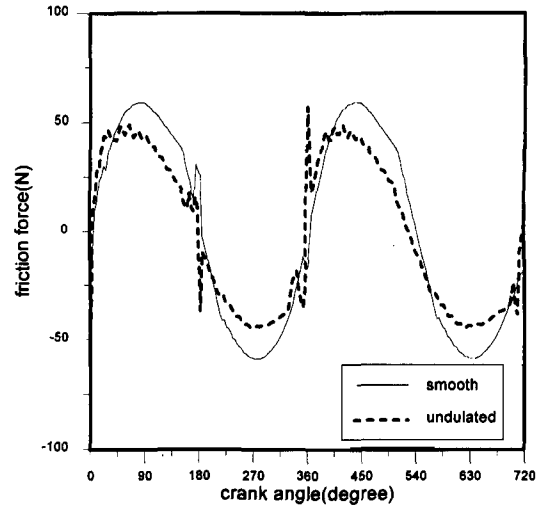


Fig. 6. Friction force vs. crank angle at 300 rpm without particles.

본 실험에서 측정된 마찰력의 절대값은 그 신뢰성에 문제가 제기될 수 있으나 본 실험의 목적이 마찰력 저감 방법의 개발이며 미세요철을 가공한 라이너가 매끈한 라이너와 비교하여 동일한 실험조건에서 마멸입자의 유무에 관계없이 정성적으로 적은 마찰력을 보이고 있으므로 실험의 목적은 달성하였다고 평가될 수 있다.

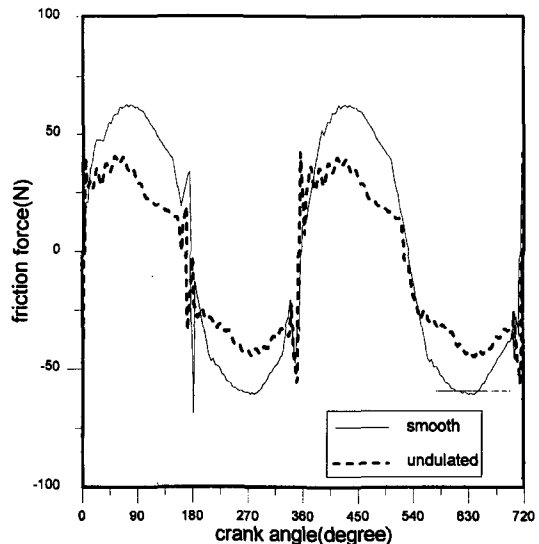


Fig. 7. Friction force vs. crank angle at 300 rpm with particles.

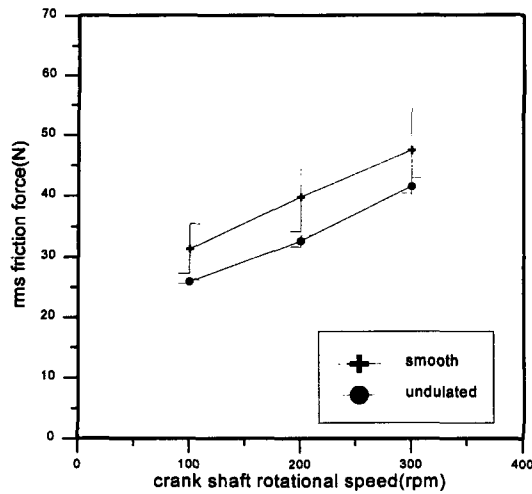


Fig. 8. RMS friction force vs. crank shaft rotational speed without particles.

마찰력의 변화를 보다 정성적으로 비교하기 위하여 크랭크 앵글에 따른 마찰력 데이터들의 자승평방제곱근(root mean square)을 구하여 Fig. 8과 9에 도시하였다. 각 회전속도에 대하여 3회의 반복실험을 통하여 취한 평균값을 보면 마멸입자가 없을 때에도 미세요철 표면에서의 마찰력이 매끈한 표면에서의 마찰력보다 15~10% 정도 작은 것을 알 수 있으며 마멸입자를 첨가한 후에도 역시 비슷한 정도로 마찰력의 감소를 보여주고 있다. 이상으로부터 라이너에 미세요철을 가공할 경우 매끈한 표면과 비교하여 상당한 마찰력

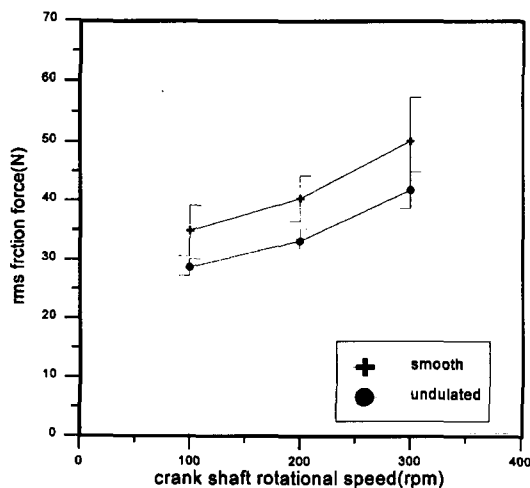


Fig. 9. RMS friction force vs. crank shaft rotational speed with particles.

의 감소를 유도할 수 있으며 그 감소율은 크랭크의 회전수가 낮을수록 더욱 커진다. 따라서 비교적 낮은 회전수에서 운전되는 선박용 엔진에 본 연구에서 개발한 방법을 적용한다면 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다. 미세요철의 가공은 별도의 추가공정없이 라이너의 최종 선삭가공시 가공할 수 있으며 또한 특수 보링 툴을 사용하여 호닝공정에서 마무리 작업을 할 수 있으므로 마찰력 저감, 에너지 및 운전비용 절감의 측면에서 보다 더 정밀한 추가연구가 필요하다고 생각된다.

#### 4. 결 론

내연기관에서 실린더 라이너와 피스톤 링 사이의 마찰력 변화를 매끈한 표면과 미세요철을 가공한 표면에 대해 마멸입자의 첨가여부에 따라 실험을 수행하여 측정하였고 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 마멸입자의 유무에 관계없이 실린더 라이너 내벽에 미세요철을 가공하면 매끈한 표면보다 마찰손실을 줄일 수 있다.
2. 마찰력의 감소율은 낮은 회전수에서 더욱 증가하므로 미세요철 표면을 사용한 마찰저감 효과는 선박용 엔진과 같은 저속기관에서 더욱 유용하다.

#### 후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술 연구조성비 기계공학분야 지원과제(ME96-E-21)에 의하여 이루어졌으며 실험에 많은 도움을 주신 대동공업주식회사 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, pp. 712-734, 1988.
2. O'Connor, J. J. and Boyd, J., Standard Handbook of Lubrication Engineering(Chapter 36 : Marine Machinery), McGraw-Hill, pp. 36-8-36-16, 1968.
3. Yang, Q. and Keith, T. G. Jr., "Two-Dimensional Piston Ring Lubrication - Part I: Rigid Ring and Liner Solution," Tribology Transactions, Vol. 39, No. 4, pp. 757-768, 1996.

4. Yang, Q. and Keith, T. G. Jr., "Two-Dimensional Piston Ring Lubrication - Part II: Elastic Ring Consideration," Tribology Transactions, Vol. 39, No. 4, pp. 870-880, 1996.
5. Ting, L. L., "A Review of Present Information on Piston Ring Tribology," SAE Paper, No. 852355, pp. 1135-1146, 1985.
6. Gommel, K. and Etsion, I., "Parametric Study of the Dynamic Performance of Gas Lubrication Ringless Pistons," ASME, Journal of Tribology, Vol. 116, pp. 63-69, 1994.
7. Suh, N. P., Tribophysics, Prentice-Hall Inc., pp. 63-83, 1986.
8. Tian, H., Saka, N. and Suh, N. P., "Boundary Lubrication Studies on Undulated Titanium Surfaces," Tribology Transactions, Vol. 32, No. 3, pp. 289-296, 1989.
9. Kim, D. E. and Suh, N. P., "Decoupled Design of Cylinder Liner for IC Engines," SAE paper 911231, pp. 99-107, 1991.