

가솔린 엔진에서 연료 분사량 및 오일 온도에 따른 피스톤 마찰손실 특성 연구

강종대* · 조진우** · 박성욱†

Study on the Characteristics of Piston Friction Losses for Fuel Injected Mass and Oil Temperature in a Gasoline Engine

Jongdae Kang, Jinwoo Cho, and Sungwook Park

Key Words: Gasoline engine(가솔린 엔진), Lubricant friction(윤활마찰), Combustion pressure(연소압), Oil temperature(오일 온도)

Abstract

To measure the change in friction loss due to the control of fuel mass and oil temperature in a gasoline engine, the floating liner method was used to measure the friction generated by the piston of a single-cylinder engine. First, to check the effect of combustion pressure on friction, the friction loss was measured by adjusting the fuel mass. It was confirmed that the friction loss increased as the fuel mass increased under the same lubrication conditions. In addition, it was confirmed that the mechanical efficiency decreased as the fuel mass increased. Next, to check the effect of lubrication conditions on friction, the friction loss was measured by controlling the oil temperature. It was confirmed that friction loss increased as the oil temperature decreased at the same fuel mass. As the oil temperature decreases, the viscosity increases, resulting in decreased mechanical efficiency and increased friction loss.

1. 서 론

자동차 산업은 점차 강화되어 가는 환경 규제를 충족시키기 위해, 친환경 자동차의 개발을 목표로 고효율 엔진의 개발과 하이브리드 자동차 개발 등의 다양한 연구를 단계별로 진행하고 있다. 엔진에서 연료의 연소 과정을 통해 얻는 구동력은 열손실 및 기계손실 등 많은 요인들에 의해 손실된다⁽¹⁾. 따라서 고효율 엔진을 개발하

기 위해서는 이와 같은 손실을 줄이는 것이 중요하다고 볼 수 있다. Liu⁽²⁾의 연구에서는 선박용 중속 디젤 엔진의 에너지 손실을 줄이기 위해 다중 연료 분사 장치를 장착하여 열 손실 및 NOx를 저감 시켰다. Wang⁽³⁾은 연속 가변 벨브 리프트 시스템을 통해 가솔린 엔진의 연소 효율을 향상시켰다.

엔진의 연료 에너지 중에서 마찰에 의한 손실은 최대 15%까지 차지하며, 연소 과정에서 발생하는 모든 손실을 제외한 제동 열효율이 약 30% 정도를 차지하는 것을 고려한다면, 마찰손실이 연소 효율에 기여하는 부분은 다소 크다고 볼 수 있게 된다⁽⁴⁾. 따라서 고효율 엔진의 개발을 위해서는 마찰손실을 줄이는 방법에 대한 연구도 중요하다고 볼 수 있게 된다.

엔진에서 발생하는 마찰손실 중에서 피스톤 어셈블리, 크랭크샤프트, 캠샤프트 등과 같이 동력 전달과 관련된

(Received: 7 Sep 2022, Received in revised form: 19 Sep 2022, Accepted: 21 Sep 2022)

*한양대학교 융합기계공학과

**현대자동차 엔진기능시험1팀

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : parks@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0430 FAX : (02)2220-4588

부품에서 발생하는 마찰은 엔진 전체에서 발생하는 마찰 중에 약 60%까지 차지하고⁽⁵⁾, 이 부품들은 엔진 오일의 윤활 정도에 따라 마찰이 크게 변하게 된다. 이로 인해 해당 부품들의 마찰을 고려할 때는 오일에 의한 윤활마찰이 중요한 요인으로 작용하게 된다. 윤활마찰을 저감 시키기 위해 많은 연구가 진행되었다. Turnbull⁽⁶⁾은 피스톤의 상단 압축링의 마찰손실 해석 방안을 제시하였다. 피스톤링 해석에 중요한 파라미터인 윤활 상태와 블로바이 가스에 대한 분석을 통해 마찰손실 예측의 정확성을 높였다. He⁽⁷⁾의 연구에서는 물체 표면에 DLC(Diamond Like Carbon) 필름 코팅을 적용시킴으로써 윤활성능을 향상시켜 마찰을 크게 낮추었다.

대부분의 마찰 연구는 피스톤 어셈블리의 마찰을 줄이기 위해 윤활 마찰과 접촉 마찰의 저감을 중점으로 진행되었다. 연소실 내부에 있는 피스톤은 연소압, 윤활 마찰, 접촉 마찰, 그리고 커넥팅로드 힘에 의해 힘평형을 이루어 왕복 직선운동을 한다. 따라서 본 연구에서는 가솔린 엔진의 몇 가지 연소 조건을 선정하여 피스톤 마찰에 어떠한 영향을 주는지를 연구하였다. 연료 분사량과 온도를 컨트롤하여 측정되는 피스톤 마찰을 통해, 각각의 요인들이 마찰에 어떠한 영향을 주는지 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 연소 시 발생하는 마찰손실을 측정하기 위해, 단기통 엔진을 사용하는 플로팅 라이너 기법을 활용하여 연소실 내 피스톤의 마찰을 직접 측정하였다. 실험을 통해 연료 분사량과 오일 온도를 컨트롤하여 피스톤의 마찰손실이 어떠한 영향을 받는지를 분석하고자 한다.

2.1 플로팅 라이너 실험

플로팅 라이너 방법은 연소 마찰을 측정할 수 있는 실험 기법으로, 단기통 엔진의 실린더 하단부에 로드셀을 장착하여 엔진 구동 시 발생하는 피스톤 마찰을 직접적으로 측정할 수 있는 실험적인 방법이다. 실험에 사용된 플로팅 라이너 장치와 개략도는 Fig. 1에서 볼 수 있다. 실험에 사용된 단기통 엔진의 세부적인 스펙은 Table 1에 표기하였다. 4개의 로드셀은 실린더 하단부에 균등한 위치에 장착되어 각 부위별 마찰력을 측정한다. 따라서 피스톤 마찰을 취득하기 위해서는 4개의 데이터



Fig. 1 Apparatus of floating liner engine

Table 1 Specifications of floating liner engine

Engine type	Gasoline Single-cylinder
Bore	81 mm
Stroke	97 mm
Displacement	0.5 L
Injector type	Port fuel injection
Injection Pressure	0.4 MPa
Engine oil	SAE 5W-20
Lambda Sensor	Bosch LSU 4.9

의 평균값을 계산해야 하며, 마찰력 데이터는 Fig. 2와 같은 예시로 도출된다.

엔진의 구동 속도는 엔진 크랭크축과 연결된 모터를 컨트롤하여 목표 속도로 일정하게 유지시켰다. 엔진 연소를 위한 연료 분사량, 분사시기, 점화시기 등의 변수 조건들은 NI사의 LabVIEW 소프트웨어와 함께 DAQ 장비를 사용하여 컨트롤하였다. 엔진 공연비는 배기부에 장착된 람다 센서를 통해 람다값을 취득하였다. 또한 엔진의 연소 안정성을 확보하기 위해, 데이터 취득 전에 약 30분 동안 연소 조건을 유지시킨 후에 데이터를 취득하였다. 연소압과 로드셀 데이터 또한 동일한 LabVIEW 소프트웨어를 통해 취득하였고, 데이터 후처리 과정을 통해 100 사이클의 데이터의 평균값을 결과값으로 도출하였다.

피스톤에서 발생하는 윤활마찰은 온도에 영향을 크게 받기 때문에, 엔진 외부에 온도 컨트롤 시스템을 따로 구축하여 냉각수와 오일을 엔진으로 순환시켰다. 온도는 엔진 냉각수와 오일 각각의 입구 및 출구에 장착된 서모커플을 통해 측정되었다. 장착된 온도 컨트롤러를

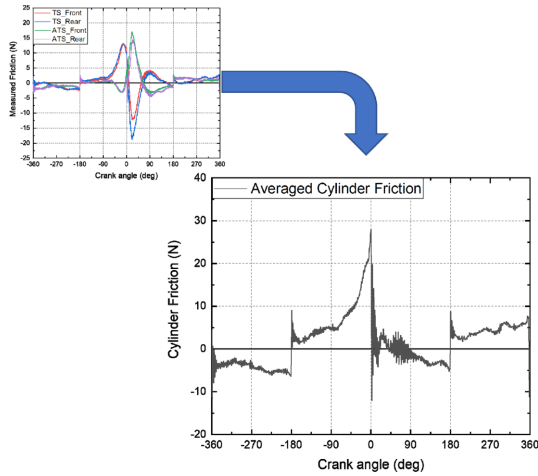


Fig. 2 Friction force measured by four load cells and actual piston friction force through averaging

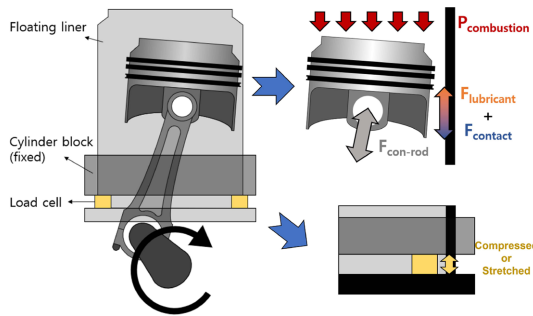


Fig. 3 Schematic diagram of the force equilibrium acting on the piston and the force acting on the load cell

통해 냉각팬과 히터의 출력을 조절하며 엔진으로 공급되는 냉각수와 오일의 목표 온도를 세밀하게 조절하였다. 입구 및 출구에서 측정된 온도의 평균값을 출력하여, 해당 목표 온도의 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 범위 내에 도달하였을 때 데이터를 취득하도록 설정하였다.

2.2 실험 변수 조절

피스톤의 마찰손실을 분석하기 위해서는 피스톤에 작용하는 요인들에 대한 분석이 필요하다. 피스톤에 작용하는 요인들에 대한 개략도는 Fig. 3에서 볼 수 있다. 개략도를 통해 확인할 수 있듯이, 엔진이 구동하는 과정에서 피스톤은 연소에 의한 연소압과 오일 유막에 의한 윤활마찰을 받으며 힘평형을 이루어 왕복 직선 운동을 하게 된다. 즉 연소압과 윤활마찰에 의해 피스톤 마찰이 결정되는 것이다. 따라서 본 연구에서는 연료 분사량과

오일 온도를 컨트롤하여 연소압과 윤활조건이 마찰에 어떠한 영향을 주는지를 확인하였다.

실험 간 고정 변수로 공연비는 램다 1.0으로 고정하며 흡기 유량과 연료량을 조절하였고, 점화시기는 BTDC 15° 로 설정하였으며, 높은 속도에서 발생하는 진동에 의한 실험 편차를 줄이기 위해 엔진 속도는 1000 RPM을 유지하여 실험을 진행하였다. 우선 흡기 포트 전단부에 유량계를 설치하여 흡기 유량을 확인하였고, 스톱 밸브에 수동 컨트롤러와 각도 센서를 장착하여 스톱 각도를 컨트롤하며 흡기 유량을 조절하였다. 다음으로 가솔린 연료는 엔진 외부에 연료 공급 장치를 설치하여 연료를 순환시켰고, 인젝터는 NI LabVIEW 프로그램을 통해 통전기간 조절을 통해 분사량을 조절하였다. 연료 분사량은 엔진 실험 전에 통전기간 별 연료 분사량 측정 실험을 통해 데이터를 얻었다. 배기 포트에 장착된 램다 센서는 DAQ 모듈과 연결시킨 후 LabVIEW 프로그램을 통해 램다값을 실시간 측정하였다. 실험 변수로 연료 분사량은 14/15/16/17/18 mg/stroke로 설정하고, 온도는 $50/60/70/80^{\circ}\text{C}$ 로 설정한 후, 각 조건별로 마찰 데이터를 취득하였다. 각각의 연료 분사량은 단기통 엔진의 이론적인 전부하 조건에 대비하여 6.6/8.0/9.4/10.8/12.3%WOT에 해당된다. 최종적으로 취득한 마찰력 데이터를 마찰손실(FMEP)로 계산하여, 각 케이스 별 엔진출력(IMEP)을 통해 기계 효율을 도출하였다.

$$\text{기계 효율 (\%)} = 1 - \frac{\text{마찰손실 (FMEP)}}{\text{엔진출력 (IMEP)}}$$

3. 실험 결과

3.1 연료 분사량 별 마찰손실

연료 분사량에 대한 마찰손실의 변화를 분석하기 위해, 실험 간 엔진 온도는 80°C 를 유지하고 고정 변수를 유지한 채로 마찰을 측정하였다. 실험을 통해 측정된 연료 분사량 별 연소압 데이터는 Fig. 4에서 확인할 수 있으며, 마찰손실의 계산 결과는 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 연료 분사량 증가로 인해 연소압이 증가하게 되고, 이는 엔진출력의 증가와 이어지게 된다. 또한 연소압의 증가로 인해 피스톤이 받는 힘이 증가하게 되어, 피스톤에 작용하는 마찰 또한 증가하게 된다. 각 조건 별로 도출된 기계 효율은 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 연료 분사량을 14 mg/stroke에서 15 mg/stroke로 증가시켰을 때, 증가된 연소압으로 인해 피스톤 마찰 또한 증가하게 되

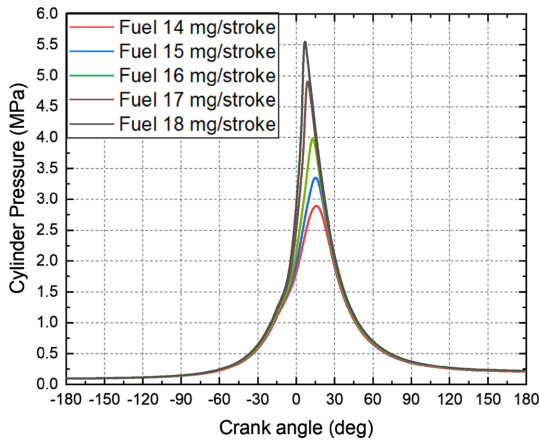


Fig. 4 Comparison of combustion pressure by fuel injection mass

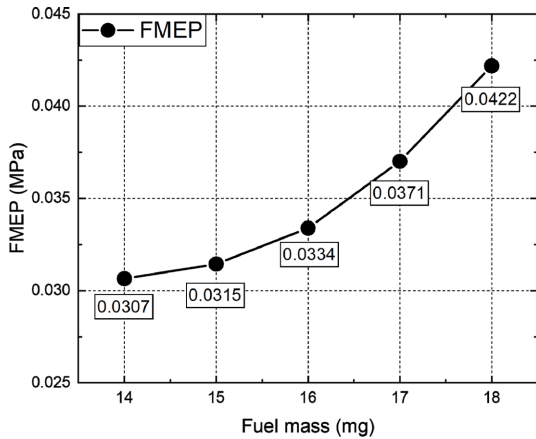


Fig. 5 Friction loss comparison by fuel injection mass

지만 출력 상승량이 더 높아 기계 효율이 상승하게 된다. 그러나 15 mg/stroke 이상의 조건부터는 마찰의 증가폭이 출력의 증가폭보다 크게 작용되어 기계효율이 점차 감소하게 되는 것을 확인할 수 있다.

정리하면, 연료 분사량이 많을 수록 연소압이 증가하며 엔진 출력의 상승과 함께 마찰손실 또한 크게 측정되는 것을 확인하였다. 엔진 구동 속도와 온도 조건은 고정된 채로 측정하였기 때문에, 피스톤에 가해지는 윤활마찰은 모든 조건에서 동일하게 된다. 따라서 연료 분사량과 마찰을 비교하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 기계 효율의 계산을 통한 효율적인 관점에서 분사량과 마찰의 관계를 분석한 결과, 특정 조건 이상에서는 마찰 손실량이 더욱 크게 증가하여 엔진 효율이 감소하는 것을 확인하였다. 연료량이 15 mg/stroke 조건에서 연소압 데이터를 분

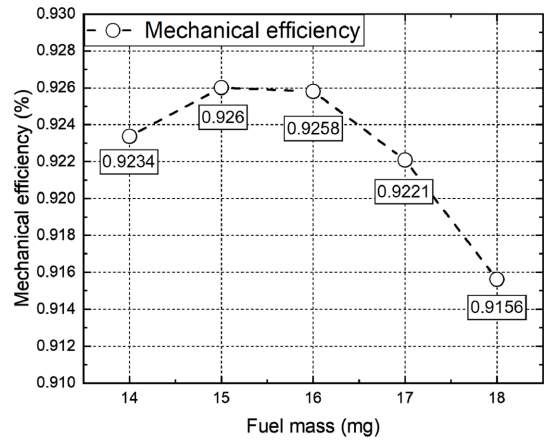


Fig. 6 Comparison of mechanical efficiency by fuel injection mass

석한 결과, CA50이 ATDC 7°에 위치하여 이상연소 조건을 나타냈다. 하지만 분사량이 더 높은 조건에서는 CA50이 ATDC 2~4°에 위치하였고, 이로 인해 이상연소 조건을 벗어나 연소 효율이 감소한 것으로 추정된다. 결과적으로 점화시기나 연료량 등을 복합적으로 고려하여 이상 연소 조건을 유도하게 된다면 마찰 증가폭보다 출력 증가가 더 상승하여 엔진 효율이 증가할 수 있게 된다. 따라서 마찰 손실을 줄이기 위해서는 연료량 조절뿐만 아니라 연소 조건을 복합적으로 고려할 필요가 있다.

3.2 온도 별 마찰손실

다음으로 오일 온도에 의한 마찰손실의 변화를 측정하기 위해, 실험 간 연료 분사량을 15 mg/stroke으로 고정시켜 실험을 진행하였다. 오일 온도와 마찬가지로 냉각수 온도도 같은 온도 조건을 유지시킴으로써 오일 온도와 피스톤-실린더 표면 온도를 최대한 동일하게 유지하도록 셋업하였다. 모든 온도 조건에서 연소압은 유사하게 측정되었기 때문에, 온도 변수가 피스톤 마찰에 작용하는 영향력을 확인할 수 있었다. 실험을 통해 측정된 마찰손실은 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다. 베이스 온도인 80°C보다 온도가 낮을수록 마찰손실이 크게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 오일 온도의 감소로 인해 오일의 점도가 증가하게 되어, 결과적으로 윤활 마찰이 증가하는 것으로 확인되었다.

각 온도 조건 별로 엔진의 기계 효율을 계산한 결과는 Fig. 8을 통해 확인할 수 있다. 연소압은 거의 유사하게 측정되었기 때문에 엔진 출력은 동일하게 된다. 따라서 기계 효율은 마찰손실이 클수록 작게 측정되므로,

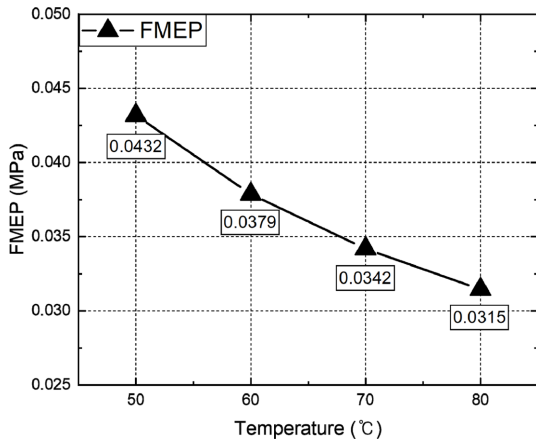


Fig. 7 Friction loss comparison by temperature

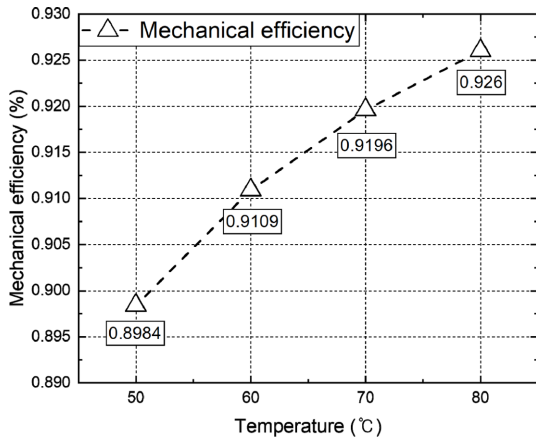


Fig. 8 Comparison of mechanical efficiency by temperature

다음과 같은 결과가 도출되게 된다.

정리하면, 엔진의 작동 온도가 낮을수록 엔진 오일의 점성이 증가하여 윤활마찰이 증가하게 된다. 연소압을 동일하게 할 경우, 엔진의 기계 손실은 구동 온도가 낮을수록 크게 감소하게 되는데, 이는 엔진 출력은 동일하나 마찰손실이 크게 작용되기 때문이다. 따라서 마찰손실의 관점에서, 엔진 효율의 관점에서, 엔진의 구동 온도가 낮은 경우에는 효율적이지 못하다는 것으로 결론지을 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서 엔진의 구동 조건을 변화시켰을 때 피스

톤 마찰이 어떠한 특성을 나타내는지를 분석하였다. 엔진의 연소 마찰을 측정하기 위해 플로팅 라이너 방법을 활용하여 단기통 엔진으로 실험을 진행하였다. 피스톤 마찰에 영향을 주는 요인으로 연소실 압력과 윤활 마찰 두 종류로 나누었고, 각각의 요인에 대한 실험 변수로 연료 분사량과 구동 온도를 결정하였다. 각각의 실험 변수를 변동시켜 얻은 마찰 데이터로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) 연료 분사량 조절을 통해 연소 실험을 진행한 결과, 분사량이 많을수록 연소압이 증가하여 결과적으로 엔진 출력이 증가하게 된다. 실험 간 엔진의 구동 속도와 온도는 동일하게 유지하므로 피스톤에 작용하는 윤활 마찰은 동일하기 때문에 연소압 만이 피스톤에 영향을 주게 되며, 실험 간 연소압에 비례하는 마찰 상승값을 취득하였다. 따라서 마찰은 연소압에 비례하는 특성을 나타내는 것으로 결론지을 수 있다. 추가로 엔진 출력과 마찰손실의 비를 통해 기계 효율을 계산한 결과, 특정 분사량에서 엔진 효율이 최대로 계산되는 것을 확인하였다. 따라서 마찰손실을 줄이기 위해서는 단순히 분사량을 줄이는 것이 아니라 엔진 효율의 관점까지 복합적으로 고려하여야 한다.

(2) 엔진에 공급되는 오일과 냉각수의 온도를 조절하며 연소 실험을 진행한 결과, 구동 온도가 낮을수록 마찰손실이 크게 측정되는 것을 확인하였다. 저온 조건에서 오일은 점도가 크게 증가하여 마찰이 증가하기 때문에, 엔진의 온도는 윤활마찰과 반비례하는 관계로 나타나게 된다. 이를 통해 엔진의 냉간 시동 조건에서 엔진의 효율이 감소하게 되는 이유로 마찰 증가가 하나의 요인으로 작용할 수 있다는 것을 확인하였다.

후 기

본 논문은 현대자동차 그룹과 ‘2022년도 4단계 두뇌 한국21 사업(4단계 BK21사업)’의 지원으로 작성되었습니다. 아낌없는 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) S. Milojević, R. Pesic and D. Taranović, “Tribological Principles of Constructing the Reciprocating Machines”, Tribology in Industry, Vol. 37, 2015, pp. 13~19.

- (2) D. Liu, Y. Guo, L. Liu, Q. Xia and Y. Gui, "Optimization of Marine Medium Speed Diesel Engine Performance based on Multi-Injector System", E3S Web of Conferences, Vol. 236, 2021, p. 01026.
- (3) J. Wang, X. Duan, W. Wang, J. Guan, Y. Li and J. Liu, "Effects of the continuous variable valve lift system and Miller cycle strategy on the performance behavior of the lean-burn natural gas spark ignition engine", Fuel, Vol. 297, 2021, p. 120762.
- (4) D. E. Richardson, "Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 122, No. 4, 2000, pp. 506~519.
- (5) M. Hoshi, "Reducing friction losses in automobile engines", Tribology International, Vol. 17, No. 4, 1984, pp. 185~189.
- (6) R. Tumbull, N. Dolatabadi, R. Rahmani, and H. Rahnejat, "An assessment of gas power leakage and frictional losses from the top compression ring of internal combustion engines", Tribology International, Vol. 142, 2020.
- (7) D. He, C. He, W. Li, L. Shang, L. Wang and G. Zhang, "Tribological behaviors of in-situ textured DLC films under dry and lubricated conditions", Applied Surface Science, Vol. 525, 2020, p. 146581.