

## 식물성 오일의 혼합조건에 따른 윤활 특성 연구

정희영<sup>1</sup> · 김현준<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 정밀기계공학과 학부과정생

<sup>2</sup>경북대학교 정밀기계공학과 부교수

<sup>3</sup>경북대학교 미래과학기술융합학과 부교수

### Study on Lubrication Characteristics of Vegetable Oil Based on Blending Condition

Hee-Young Jung<sup>1</sup> and Hyun-Joon Kim<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Undergraduate Student, Dept. of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University

<sup>2</sup>Associate Professor, Dept. of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University

<sup>3</sup>Associate Professor, Dept. of Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University

(Received October 20, 2020 ; Revised November 24, 2020 ; Accepted November 24, 2020)

**Abstract** – The rapidly increasing threats to the environmental has increased the demand for biodegradable lubricants. Vegetable oils, such as olive, coconut, and sunflower oils, are readily obtainable and are not harmful, unlike synthetic and mineral oils. The tribological characteristics of these oils should be adequately examined for industrial applications. In this study, the lubrication characteristics of olive oil is investigated using a pin-on-disk-type tribometer under 500 gf of normal force, and the examination results are compared and analyzed with those of commercial synthetic lubricants for friction and wear. In addition, stearic acid, which is a type of saturated fatty acid, is mixed with olive oil as an additive to improve its lubrication characteristics. Olive oil with stearic acid additive is thus observed to exhibit the lowest friction coefficient for rotational speeds of 200 to 800 rpm. According to the wear analysis, a minimal amount of wear is observed when no additive is used. Hence, olive oil is able to effectively reduce friction and wear at relatively low speeds. These low friction and wear characteristics of olive oil are attributed to its compatibility with the substrate.



© Korean Tribology Society 2020. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

**Keywords** – olive oil(올리브유), fatty acid(지방산), lubrication(윤활), additives(첨가제), wear(마모)

### 1. 서 론

지난 수십년간 환경오염과 에너지 절감, 그리고 천연자

원의 보존 등에 대한 논의가 산업계 및 사회전반에서 널리 이루어져 왔다. 인류가 소비하는 자원량은 매년 급속히 증가하여 오늘날에는 연간 400 exajoules (EJ)에 이르고 알려져 있으며, 화석연료 소모로 인한 이산화탄소 배출은 지구온난화의 주된 원인으로 작용하고 있어 국가적 차원에서의 대응이 요구되고 있다[1]. 마찰 및 마모와 같은 트라이볼로지적 문제는 환경 및 경제적 문제와 매우 밀접한 관계를 맺고 있어 이에 관한 많은 연구가 지속적

\*Corresponding author: Hyun-Joon Kim

Tel: +82-54-530-1273, Fax: +82-54-530-1278

E-mail: [hjoonkim@knu.ac.kr](mailto:hjoonkim@knu.ac.kr)

<https://orcid.org/0000-0002-6817-1004>

<https://orcid.org/0000-0002-0993-8893> (Hee-Young Jung)

으로 발표되고 있다[2]. 일찍이 많은 연구자들은 트라이볼로지 문제로 인한 경제적 손실이 무시할 수 없을 정도로 크다는 점을 지적하였고, 최근까지도 트라이볼로지적 현상과 환경 및 경제적 문제의 상관관계에 대한 논의가 지속적으로 진행되고 있다[3,4].

그 중에서도 윤활유는 환경과 매우 밀접한 관계를 가지고 있는데, 각종 기계시스템과 제조업에서 사용되는 윤활유의 80% 이상은 석유에서 비롯하며, 이들을 사용하고 폐기하는 과정에서 심각한 토양, 수질, 대기오염을 일으킨다는 사실이 잘 알려져 있다. 뿐만 아니라 이러한 광유계의 윤활유는 인체에 유해하다는 것 역시 널리 알려진 사실이다[5,6]. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 동식물로부터 얻어지는 친환경 윤활유에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 이러한 윤활유는 생분해특성을 가지며 독성이 없어, 기존에 널리 사용되어 온 광유 및 합성유에 비하여 환경에 미치는 영향이 매우 적다는 장점을 지니고 있다[7]. 기존의 생분해성 윤활유에 대한 연구동향을 살펴보면 다음과 같다.

Nagabhooshanam 등은 카놀라유를 기유로 삼아 나노스케일의 지르코니아 입자를 첨가함으로써 절삭유로서의 특성 향상에 대한 연구를 수행하였다. 식물성 윤활유의 트라이볼로지적 특성 규명을 위해 4-ball 시험이 수행되었고, 시험 종료 후에는 볼의 마모를 측정함으로써 각기 다른 조건의 윤활유의 특성을 정량적으로 비교평가 하였다. 그 결과로, 식물성 윤활유에 적정 수준의 지르코니아 입자를 투입할 경우 마찰력과 마모 모두 개선된다는 사실을 제시하였다[8]. Suthar 등은 호호바(Jojoba)로부터 추출한 식물성 유를 기유로 선정하고, 여기에 알루미늄 나노입자를 소량(0.05~0.2 wt%) 첨가하여 트라이볼로지적 특성을 측정하였다. 연구결과에 따르면, 마찰을 최소화하는 적정조건의 첨가제 함량이 존재하며, 이 조건에서는 마모량과 마모된 표면의 정도 역시 가장 좋은 것으로 나타났다[9]. 앞서 언급한 연구와 유사하게 피마자(Castor)유를 기유로 하고 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 첨가제로 하는 윤활유의 특성에 대한 연구가 Singh 등에 의해 수행되었다[10]. 피마자유를 기유로 하되, 첨가제로 육방정 구조의 질화붕소 (hexagonal boron nitride)를 사용한 연구 역시 발표된 바 있는데, 첨가제의 함량 및 크기에 따라 마모특성을 크게 개선할 수 있음을 제시하였다 [11]. 그 외에도 올리브유[12], 혹은 팜유[13]를 기유로 하여 윤활특성을 시험한 연구도 발표된 바 있다.

이처럼 생분해가 가능한 다양한 식물성 오일을 윤활유로 활용하고 더 나아가 광유 혹은 합성유를 대체하고자 하는 연구가 다수 발표된 바 있으나, 여전히 식물성

오일의 윤활특성 및 첨가제의 영향은 충분히 규명되지 않았으며 산화안정성이나 열적 특성이 상용 윤활유에 비하여 충분하지 않아 지속적인 연구가 이루어질 필요성이 있다. 또한 상당수의 연구에서 알루미늄, 혹은 지르코니아와 같은 세라믹 계통의 나노입자나 그래핀 등을 첨가제로 활용하였는데, 이 경우 친환경 윤활유로서의 특성을 저해하는 요소로 작용할 수 있어 생분해를 통하여 환경영향을 최소화하고자 하는 본래의 취지와 상충하는 우려 또한 있다.

이 연구에서는 일상에서 흔히 접할 수 있는 올리브유를 윤활유로 선정하고, 지방산을 첨가하여 윤활특성의 변화를 관찰하고자 하였다. 윤활유의 조성과 속도조건을 달리하여 윤활시험을 수행한 뒤, 마찰 및 마모특성을 상용 윤활유와 비교 분석함으로써 식물성 오일의 윤활유로서의 사용 가능성을 살펴보고자 하였다.

## 2. 연구방법 및 내용

### 2-1. 시편 및 윤활유 준비

이 연구에서는 생분해 특성을 갖는 윤활유로 일상에서 쉽게 획득할 수 있는 올리브유를 활용하였다. 윤활 특성을 상대비교 하기 위한 대조군으로는 polyalphaolefin(PAO)을 기유로 사용하는 상용 엔진오일 (SAE10W40)을 선정하였고, 첨가제를 달리하여 총 4가지 조건에서 윤활시험을 수행하였다. 상용 엔진오일은 점도지수 향상제 등을 포함한 다급 점도유로서 온도 변화에 의한 점도 차이가 크지 않고, 균일한 윤활성능을 발휘할 수 있으므로 대조군으로 선정되었다[14]. 각 시험조건의 윤활유 조성은 Table 1에 기재한 바와 같다. 각 시험에서 윤활유의 사용량은 30 mL로 동일하게 진행하였다.

올리브유는 글리세린(glycerin)에 3개의 불포화지방산이 에스테르(ester) 형태로 결합되어있는 트리글리세라이드(triglyceride) 구조이며, 분자 내 55~80% 가량이 불포화지방산인 올레산(oleic acid)으로 구성되어 있으며, 올레산의 화학식은 CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>CH=CH(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>COOH이다 [15]. 올레산의 이중결합을 단일결합으로 대체할 경우 포화지방산인 스테아르산(stearic acid)이 되며, 스테아르산은

**Table 1. Composition of lubricants and additives**

Symbols	Lubricant mixture condition
O	100% Olive oil
C	100% Commercial lubricant (PAO)
O+S	Stearic acid 0.1wt% to olive oil
O+C	Olive oil : PAO = 1:1

마그네슘이나 아연과 결합할 경우 mag-nesium stearate, 혹은 zinc stearate가 되어 윤활제나 증주제(thickening agent)로 사용된다. 또한, 스테아르산은 이중결합을 가지고 있지 않아 불포화지방산인 올레산에 비하여 상대적으로 산화안정성이 우수하며[16], 18개의 탄소사슬 구조를 가지고 있어 윤활특성 역시 기대할 수 있다고 알려져 있다[17]. 이 연구에서는 스테아르산을 윤활특성 개선을 위한 첨가제로 선택하여 올리브유에 첨가하여 시험하였다.

Table 1에서 확인할 수 있듯, 4가지의 윤활유 조건은 올리브유, 상용 엔진오일, 스테아르산의 조합을 통해 수립하였다. 순수한 올리브유를 사용한 경우는 기호 O로 표기하였고 상용 엔진오일만을 사용한 경우는 기호 C로, 30 mL의 올리브유에 0.1 wt%의 스테아르산을 첨가한 경우는 기호 O+S로, 올리브유와 상용 엔진오일을 1:1로 혼합한 경우를 O+C로 표기하였다. O+S 및 O+C에 해당하는 혼합윤활유의 경우 균일한 품질을 획득하기 위하여 24 시간에 걸쳐 기계적 교반을 수행하였다. Fig. 1은 이렇게 준비된 4가지 조건의 윤활유의 사진이며, 윤활유의 조성에 따라 색상에 차이가 있음을 확인할 수 있다.

마찰시험의 대상이 되는 디스크형태의 시편으로는 하드디스크 플래터를 선정하였다. 하드디스크 플래터는 표면조도가 매우 작고 균일하여 일관성 있는 시험을 하기에 유리하며, 시험이 종료된 후 표면에 발생한 마모흔적을 측정하기에도 용이한 장점을 지니고 있어 시험대상 소재로 선택하였다.

## 2-2. 윤활시험 방법 및 조건

이 연구에서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 자체 제작한 Pin-on-disk 형식의 마찰시험기를 활용하여 윤활시험을 진행하였다. 하드디스크 플래터를 접시 형태의 시편홀더에 장착하고 미리 준비한 30mL의 윤활유를 채운 후에 시험을 시행하였다. 시편홀더 상면에는 O-ring이 장

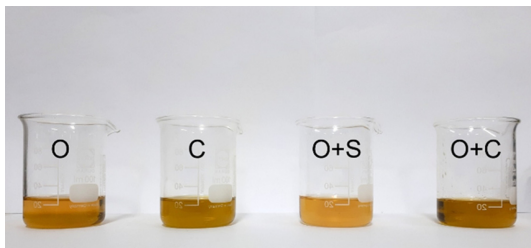


Fig. 1. Photographs of lubricants type of O, C, O+S and O+C.

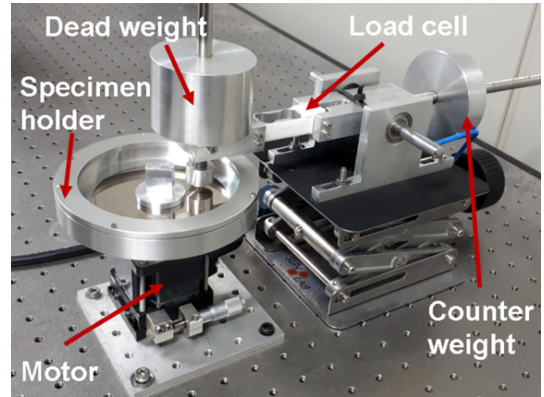


Fig. 2. Image of pin-on-disk type tribometer.

Table 2. Experimental conditions

Rotational speed	200, 400, 800 rpm
Amount of lubricant	30 mL
Normal force	500 gf
Examination time	200 sec.
Temperature	21~23°C
Humidity	RH ~30%

착된 덮개를 덮어 고속회전 시 원심력에 의해 윤활유가 이탈하는 것을 방지하였다. 하드디스크 플래터와 접촉하는 상대재료로는 5 mm의 지름을 갖는 지르코니아 볼을 선정하였다. 모든 윤활시험은 500 gf의 수직하중을 인가하여 실시하였고, 데이터의 신뢰성을 위하여 최소 5회 이상의 반복시험을 수행하였다. 매번 시험을 진행할 때마다 볼을 교체하여 지르코니아 볼 표면의 마모가 마찰에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다.

회전속도는 200, 400, 800 rpm의 세가지 조건을 사용하였고, 선속도로 환산할 경우 각각 0.7, 1.3, 2.7 m/s에 해당한다. 이 회전속도는 상용 엔진오일이 경계윤활에서 혼합윤활상태로 전이되는 수준의 조건에 해당하며, 비교적 마찰력이 높은 조건에서 시험을 수행함으로써 윤활유의 종류와 조성에 따라 나타나는 변화를 명확하게 파악하고자 하였다[18]. 온도와 습도의 변화에 의한 영향을 배제하기 위하여 시험장치 주변의 온도와 습도는 상시 21°C~23°C, RH 30% 수준으로 유지하여 시험을 수행하였다. 매 회의 윤활시험은 측정이 가능한 수준의 초기 마모 현상이 발생할 때까지 마찰력을 측정하였으며 약 200초 동안 시험이 진행되었다. 상기 시험조건을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 마찰력 측정 결과

윤활유의 조성 and 회전속도를 다르게 하여 윤활시험을 수행한 결과, 시험 조건에 따라 마찰력이 상이하게 나타남을 확인하였다. Fig. 3(a), (b)는 각각 상용 엔진오일과 스테아르산을 첨가한 올리브유의 마찰시험의 결과로 획득된 마찰력의 그래프이다. 두 경우 모두, 약 200초 동안 시험을 수행하는 동안 마찰력의 변화는 거의 나타나지 않아 마모가 심각하게 일어나지 않았음을 추정할 수 있다. 윤활유의 조성에 따라 마찰력의 크기는 명확하게 다른 경향을 보여주었으며, 특히 마찰력의 크기가 클 경우, 마찰력의 편차 역시 크게 나타남을 알 수 있다.

마찰력 데이터의 신뢰성을 향상시키기 위하여 각 조건 당 5~10회의 시험을 수행하였다. 매 시험마다 마찰력 측정값에 약간의 편차가 있어, 이를 통계적으로 분석하기 위하여 box plot으로 마찰력의 분포를 표현하였다. 윤활유의 모든 조성 및 속도조건에 따른 마찰력 측정결과는 Fig. 4에 나타난 것과 같다. 그림에서 볼 수 있듯, 회전속도가 빠를수록 마찰력이 감소하는 경향을 확인할 수

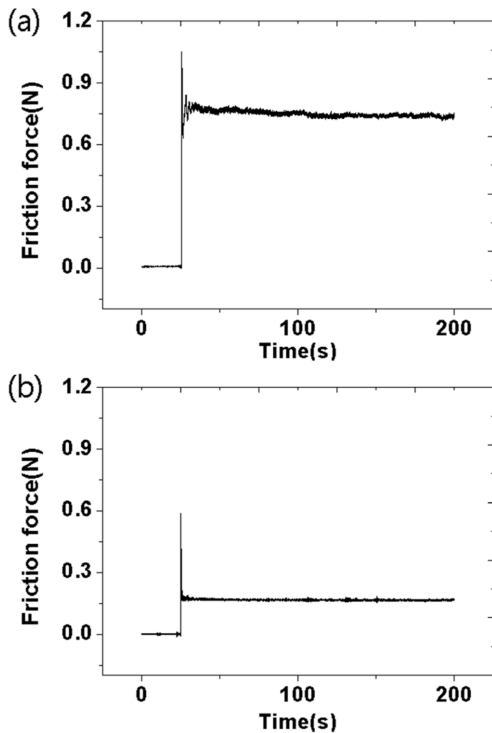


Fig. 3. Friction force obtained using the tribometer with (a) C lubricant condition, (b) O+S lubricant condition.

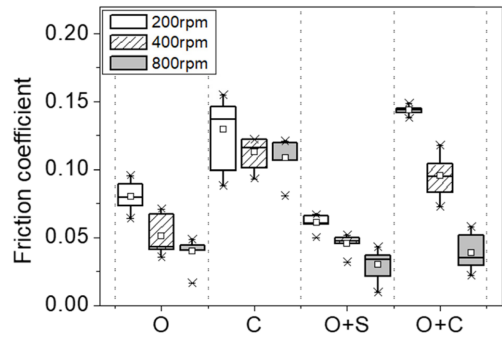


Fig. 4. Friction coefficient with respect to condition of lubricants and rotating speed.

있는데, 이는 시험에서 사용한 회전속도가 경계윤활 내지, 혼합윤활 거동을 나타내는 조건에 해당하기 때문이며, 일반적인 스트라이브 커브 (Stribeck curve)의 형태를 고려하면, 속도가 증가할수록 유체윤활 조건에 접근하기 때문에 마찰력이 감소한다고 판단할 수 있다. 윤활유의 종류에 따른 마찰력의 편차는 매우 두드러지게 나타나는데, 올리브유와 스테아르산의 혼합물인 O+S 타입의 윤활유의 경우 모든 속도조건에서 가장 낮은 마찰계수를 나타내었고, 순수한 올리브유인 O 타입 윤활유의 마찰계수는 그 보다 약간 높은 수준으로 측정되었다. 상용 엔진오일인 C 타입의 윤활유는 가장 높은 마찰계수를 나타냄을 확인할 수 있었다. 상용 엔진오일과 올리브유의 혼합물인 O+C타입의 윤활유의 경우 저속에서는 상용 엔진오일에 준하는 높은 마찰계수를 나타내었으나, 고속조건에서는 순수한 올리브유의 수준으로 크게 마찰계수가 낮아졌음을 알 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로, 식물성 오일인 올리브유가 마찰저감 측면에서 상용 엔진오일에 비하여 상대적으로 우수하다고 판단할 수 있다. 특히 상용 엔진오일과 올리브유를 혼합할 경우 저속에서는 마찰계수의 변화가 거의 없으나, 회전속도가 증가함에 따라 하중지지력이 향상되어 마찰력이 큰 폭으로 저감된다는 사실을 알 수 있다. 또한 지방산의 한 종류인 스테아르 산을 올리브유에 첨가할 경우 유의미한 수준의 마찰저감 효과가 있으며, box plot의 범위가 줄어든 것을 통해 개별 시험의 윤활시험에서 얻어지는 마찰력의 편차 역시 감소한다는 사실을 유추할 수 있다.

#### 3-2. 윤활 및 마모특성 분석

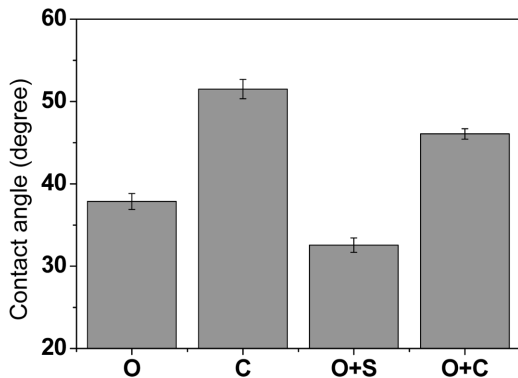
올리브유가 상용 엔진오일에 비하여 우수한 윤활특성을 나타내는 원인을 파악하기 위하여 윤활유의 점도와와

**Table 3. Viscosity of lubricants**

Lubricant type	Viscosity (cP)
O	71.8
C	166.6
O+S	76
O+C	111.1

접촉각을 측정하였다. 점도의 경우 약 20°C의 온도에서 측정하였고, Table 3에 정리된 것과 같이, 상용 엔진오일이 가장 높은 166.6 cP, 올리브유가 가장 낮은 71.8 cP로 확인되었다. 올리브유에 스테아르산을 첨가한 경우 점도가 소폭 상승하였으며, 상용 엔진오일과 올리브유의 혼합물의 점도는 각각의 개별 윤활유 점도의 평균값으로 측정되었다. 점도가 낮은 올리브유가 점도가 높은 상용 엔진오일에 비하여 낮은 마찰계수를 나타낸 실험결과는 일반적으로 알려진 저속의 구동속도조건(경계윤활조건)에서 윤활유의 점도가 높을수록 충분한 하중지지력을 발휘하여 낮은 마찰계수를 보여주는 현상과는 상반되는 것으로, 점도 이외의 원인이 있을 것으로 예상되었다.

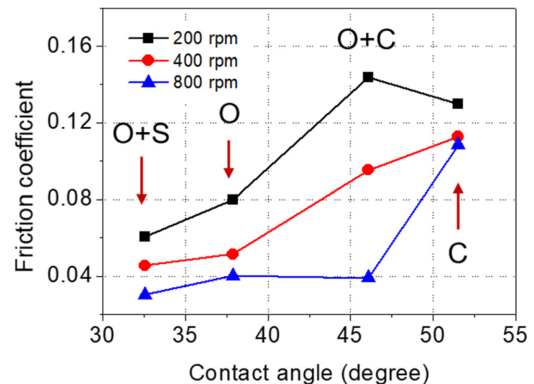
Fig. 5는 하드디스크 플래터 위에서 4가지 종류의 윤활유가 나타내는 접촉각을 나타낸 것이다. 윤활유에 따라 접촉각이 30~50° 범위에서 측정되었는데, 상용 엔진오일의 접촉각이 51°로 가장 높게 나타났으며, 올리브유의 접촉각은 37°, 상용 엔진오일과 올리브유의 혼합유인 O+C의 경우에는 그 중간 정도의 값인 46°, 스테아르산을 혼합한 O+S의 접촉각은 가장 낮은 32°로 나타났다. 액체의 접촉각을 이루는 원인은 고체, 액체, 기체가 만나는 3상 경계지점에서의 표면장력이 균형을 이루는 상호 작용이며, 이 실험에서는 모든 실험에 대해 동일한 바닥면과 기체환경을 활용하였다. 따라서 접촉각 측정 결과



**Fig. 5. Contact angle of lubricants on hard disk platter.**

는 각각의 윤활유와 하드디스크 플래터 사이의 표면에 너지의 크기를 상대적으로 나타내는 것이라고 할 수 있으며, 그러한 추론을 바탕으로 고려할 때, 올리브유 혹은 올리브유와 스테아르산의 혼합유가 하드디스크 플래터와의 점착특성이 상용 엔진오일에 비하여 높다고 할 수 있다. 기존의 연구에 따르면, 고체와 액체사이의 계면에너지가 높은 경우 고체표면에 윤활유가 더욱 강하게 흡착되고 후막을 형성하여 마찰을 저감할 수 있다고 알려져 있다[19]. 따라서 낮은 접촉각을 나타내는 윤활유는 보다 우수한 윤활특성을 나타낸다고 추론할 수 있다. Fig. 6은 마찰계수와 접촉각 사이의 상관관계를 나타내고 있으며, 앞서 언급한 바와 같이 대체로 접촉각이 감소함에 따라 마찰계수 역시 감소하는 경향이 나타남을 알 수 있다. 특이한 점으로 올리브유가 포함된 경우에는 회전속도가 증가함에 따라 마찰계수가 크게 감소하는 현상을 확인할 수 있는데 비하여 올리브유가 포함되지 않은 순수한 상용 엔진오일(접촉각 51°)의 경우에는 상대적으로 속도증가 시 마찰계수 감소 폭이 작게 나타났다. 이러한 현상의 원인은 상용 엔진오일의 유체유회 조건이 이 실험에서 사용한 속도조건에 비하여 훨씬 높은 수준이기 때문에 속도증가에 따른 마찰계수 감소 비율이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 기존의 연구결과에 따르면 최소 1500 rpm 이상의 고속조건에서 유체유회 상태에 도달하는 것으로 확인되었다[18]. 다시 말해서 올리브유는 유체유회 상태에 도달하는 속도조건이 상용 엔진오일에 비하여 낮을 것으로 추정되며, 이는 올리브유를 저속으로 작동하는 기계요소에 활용할 경우 보다 효과적일 수 있음을 시사한다.

한편, 윤활유의 종류와 특성이 마찰계수에 영향을 미



**Fig. 6. Correlation between friction coefficient and contact angle.**



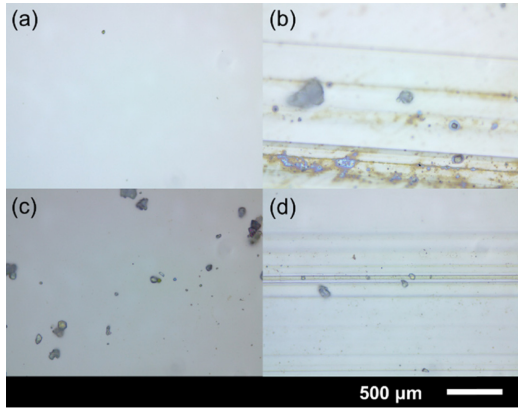


Fig. 7. Optical microscope images of wear tracks on platter surfaces when lubricant types of (a) O, (b) C, (c) O+S, and (d) O+C were examined.

친 것과 같이 마모경향 역시 차이가 나타날 것으로 기대 되었다. 마모특성을 파악하기 위하여 마찰시험을 마무리 한 뒤, 하드디스크 플래터 표면에 대한 분석을 수행하였다. Fig. 7은 400 rpm 조건에서 윤활시험을 수행한 하드 디스크 플래터 표면의 마모흔적을 광학현미경으로 관찰 한 사진이다. Fig. 7(a)에서 7(d)까지 순서대로 O, C, O+S, O+C 타입의 윤활유를 이용하여 윤활시험을 수행 하였을 때의 마모흔적을 50 배율로 측정된 결과이며 올리브유를 사용하여 윤활시험을 수행한 경우, 마모흔적을 발견하기 어려웠다. 반면 상용 엔진오일로 시험을 수행 한 경우에는 Fig. 7(b), (d)에 나타난 것과 같이, 명확한 연삭마모의 흔적을 발견할 수 있었다. 이러한 현상의 원 인은 각 윤활유의 마찰계수 경향을 통해서 추정할 수 있 다. 상용 엔진오일이 포함된 C 그리고 O+C 윤활유가 상 대적으로 O, 그리고 O+S 윤활유에 비하여 마찰계수가 높았으며, 이는 상용 엔진오일의 윤활상태가 올리브유에 비하여 경계윤활에 가깝기 때문으로 판단된다. 다만, 광 학 현미경 사진만으로 마모거동을 파악하는 것은 충분 하지 않다고 판단되어 마모량을 정량적으로 분석하고자 하였다.

표면 조도계를 이용하여 마모흔적이라고 추정되는 부 분을 측정된 결과 대부분의 시편에서 Fig. 8과 같은 단 면 형상을 획득할 수 있었다. 각 윤활유의 마모에 대한 영향을 확인하기 위하여 단면 형상 데이터로부터 마모 면적을 계산하였다. 마모면적은 마모가 일어나지 않은 면 을 기준으로 삼아 아래로 패인 부분을 적분하여 계산하 였으며 마모흔적의 양쪽 측면에 솟아오른 burr는 마모체 적 계산에서 제외하였다. 다만, 이 연구에서 활용한 하

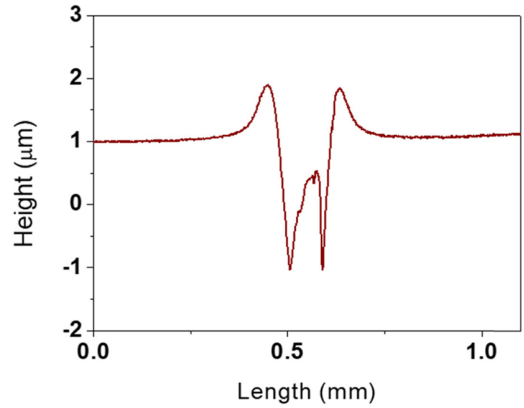


Fig. 8. Surface profile of the wear track on platter when experiment was conducted using O+C type lubricant

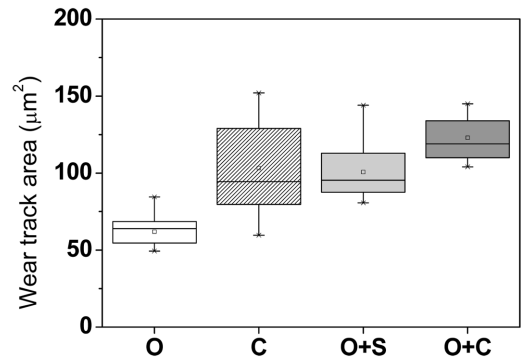


Fig. 9. Cross-sectional area of wear track with respect to type of lubricants examined with rotation speed(400 rpm).

중 조건(500 gf)으로 Hertz 접촉압력을 계산해본 결과 최 대 압력이 약 800 MPa로 나타났는데, 하드디스크 플래 터 (알루미늄 합금)의 항복강도는 대략 100 MPa 수준으 로 알려져 있다. 따라서 Fig. 8의 단면 형상은 마모흔적 과 소성변형을 동시에 보여주는 결과라고 할 수 있다. 그 러나, 윤활유의 종류가 달라질 경우 마모 및 소성변형의 경향이 달라질 수 있어 두 요소를 완벽하게 분리하여 분 석하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 이 연구에서는 마모량과 소성변형량을 합산하여 통칭 마모량으로 규정 하였다.

모든 윤활유에 대해서 400 rpm 회전속도 조건으로 마 찰시험을 수행한 뒤 측정된 마모면적의 결과는 Fig. 9에 도시된 바와 같다. 광학 현미경 사진 결과와 마찬가지로 올리브유를 이용한 시험 결과에서 마모면적이 가장 낮 게 나타났고 그 이외의 조건에서는 상대적으로 마모면 적이 크게 나타났으며 상호 간의 우열을 가리기 어려웠

다. 상용 엔진오일이 포함된 윤활유의 경우 400 rpm에서의 마찰계수는 0.1 수준으로 O 및 O+S 타입의 윤활유에 비해 상당히 높은 편이므로 마모면적 역시 크게 나타났다고 추론할 수 있다. 그러나, O+S 타입의 윤활유는 올리브유에 비하여 더 낮은 마찰계수를 나타냈음에도 불구하고 마모면적은 오히려 높게 나타나, 예상과는 다른 결과를 보여주었다. 기존의 연구에 따르면 올레산과 스테아르산이 각각 표면에 흡착되어 있을 경우 화학구조의 차이에 의하여 기계적 거동 역시 차이가 난다는 사실이 알려져 있다 [20]. 이중 결합을 갖는 올레산은 포화지방산인 스테아르산에 비하여 상대적으로 구조적 강성을 지녀 압축응력이 가해질 때 외부 물질의 침투에 보다 저항하는 성질을 보여준다는 해당 연구결과를 토대로 생각해보면, 스테아르산이 첨가된 O+S 타입의 윤활유는 간헐적인 진동과 같은 불규칙한 현상이 일어날 때 표면 돌기들 사이의 접촉을 효과적으로 차단하는 능력이 O 타입 윤활유에 비하여 상대적으로 저하되어 마모가 증가했다고 추론할 수 있다. 다만, 첨가제가 마모에 미치는 영향에 대해서는 추가적인 연구를 통해 보다 명확한 메커니즘을 규명할 필요가 있다고 판단된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 3가지의 속도조건에서 식물성 오일과 상용 엔진오일을 여러가지 조성으로 혼합하였을 때 윤활특성의 변화에 대해 실험적으로 규명하였다.

1. 올리브유는 상용 엔진오일에 비하여 낮은 점도를 가지고 있음에도 불구하고 더 낮은 마찰계수를 나타내었다. 이는 올리브유와 하드디스크 플래터 사이의 표면에너지가 상용 엔진오일에 비하여 높아 표면에 비교적 두꺼운 윤활막을 형성하였기 때문으로 추정된다.
2. 상대운동 속도를 증가시킬 경우 마찰계수의 감소율은 올리브유가 상용 엔진오일에 비하여 높게 나타났는데, 이는 올리브유가 상대적으로 느린 속도조건에서도 유체윤활에 도달할 수 있음을 의미한다. 따라서 저속으로 작동하는 기계요소들에 올리브유를 적용할 경우 효과적인 윤활특성을 획득할 수 있을 것으로 기대된다.
3. 올리브유가 상용 엔진오일에 비하여 마모량 역시 낮게 나타났으며, 올리브유에 스테아르산을 첨가할 경우 표면에 흡착되는 윤활막의 강성이 저하되어 마모가 증가하는 현상이 나타났다. 이는 식물성 윤활유의 윤활 및 마모특성에 지방산의 화학구조가 매

우 큰 영향을 미친다는 사실을 나타낸다.

이러한 연구 결과는 식물성 윤활유의 트라이볼로지적 특성에 대한 이해를 제고하고 다양한 기계분야에 친환경 윤활유를 활용하기 위한 기초지식으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### Acknowledgement

이 성과는 2015년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1C1A1A01053416).

#### References

- [1] Holmberg, K., Erdemir, A., "The impact of tribology on energy use and CO<sub>2</sub> emission globally and in combustion engine and electric cars", *Tribol. Int.*, Vol.135, pp.389-396, 2019.
- [2] Tzanakis, I., Hadfield, M., Thomas, B., Noya, S., Henshaw, I., Austen, S., "Future perspectives on sustainable tribology", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol.16, pp.4126-4140, 2012.
- [3] Holmberg, K., Erdemir, A., "EInfluence of tribology on global energy consumption, costs and emissions", *Friction*, Vol.5, pp.263-284, 2017.
- [4] Kim, H.-J., Kim, D.-E., "Nano-scale friction: A review", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol.10, pp. 141-151, 2009.
- [5] Shashidhara, Y., Jayaram, S., "Vegetable oils as a potential cutting fluid-an evolution", *Tribol. Int.*, Vol.43, pp.1073-1081, 2010.
- [6] Alves, S., Barros, B., Trajano, M., Ribeiro, K., Moura, E., "Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions", *Tribol. Int.*, Vol. 65, pp.28-36, 2013.
- [7] Ruggiero, A., D'Amato, R., Merola, M., Valašek, P., Müller, M., "Tribological characterization of vegetable lubricants: Comparative experimental investigation on *Jatropha curcas* L. oil, Rapeseed Methyl Ester oil, Hydrotreated Rapeseed oil", *Tribol. Int.*, Vol.109, pp. 529-540, 2017.
- [8] Nagabhooshanam, N., Baskar, S., Prabhu, T. R., Arumugam, S., "Evaluation of tribological characteristics of nano zirconia dispersed biodegradable canola oil methyl ester metalworking fluid", *Tribol. Int.*, Vol.151, pp.106510, 2020.
- [9] Suthar, K., Singh, Y., Surana, A. R., Rajubhai, V. H., Sharma, A., "Experimental evaluation of the

- friction and wear of jojoba oil with aluminium oxide ( $Al_2O_3$ ) nanoparticles as an additive”, *Mater. Today Proc.*, Vol.25, pp.699-703, 2020.
- [10] Singh, Y., Chaudhary, V., Pal, V., “Friction and wear characteristics of the castor oil with  $TiO_2$  as an additives”, *Mater. Today Proc.*, 2020.
- [11] Wang, Y., Wan, Z., Lu, L., Zhang, Z., Tang, Y., “Friction and wear mechanisms of castor oil with addition of hexagonal boron nitride nanoparticles”, *Tribol. Int.*, Vol.124, pp.10-22, 2018.
- [12] Keri, L., Raina, A., Haq, M. I. U., “Friction and wear performance of olive oil containing nanoparticles in boundary and mixed lubrication regimes”, *Wear*, Vol.426, pp.819-827, 2019.
- [13] Hamdan, S., Chong, W., Ng, J.-H., Chong, C., Zhang, H., “Nano-tribological characterisation of palm oil-based trimethylolpropane ester for application as boundary lubricant”, *Tribol. Int.*, Vol. 127, pp.1-9, 2018.
- [14] Guan, L., Feng, X., Xiong, G., “Engine lubricating oil classification by SAE grade and source based on dielectric spectroscopy data”, *Anal. Chim. Acta*, Vol. 628, pp.117-120, 2008.
- [15] Irmak, S., Tokusoglu, O., “Saturated and unsaturated fatty acids composition of olive oils obtained from less salty black table olives preserved with vacuum, map and gamma irradiation technologies”, *J. Nutr. Food Sci.*, Vol.7, pp.582, 2017.
- [16] Jayadas, N., Nair, K. P., “Coconut oil as base oil for industrial lubricants-evaluation and modification of thermal, oxidative and low temperature properties”, *Tribol. Int.*, Vol.39, pp.873-878, 2006.
- [17] Fox, N., Tyrer, B., Stachowiak, G., “Boundary lubrication performance of free fatty acids in sunflower oil”, *Tribol. Lett.*, Vol.16, pp.275-281, 2004.
- [18] Yun, C.-S., Oh, D.-S., Kim, H.-J., “Study on Influence of Carbon Nanotubes and Alumina Additives to Lubrication and Wear Characteristics”, *Tribol. Lubr.*, Vol.33, No.5, pp.220-227, 2017, <https://doi.org/10.9725/kstle.2017.33.5.220>
- [19] Liu, S., Luo, J., Li, G., Zhang, C., Lu, X., “Effect of surface physicochemical properties on the lubricating properties of water film”, *Appl. Surf. Sci.*, Vol.254, pp.7137-7142, 2008.
- [20] Doig, M., Warrens, C. P., Camp, P. J., “Structure and friction of stearic acid and oleic acid films adsorbed on iron oxide surfaces in squalane”, *Langmuir*, Vol.30, pp.186-195, 2014.