

DOI <https://doi.org/10.9725/kstle.2017.33.5.220>

카본 나노튜브 및 알루미나 첨가제가 윤활 및 마모특성에 미치는 영향에 대한 연구

윤창석¹ · 오대산² · 김현준^{1,*}

¹경북대학교 정밀기계공학과, ²국방기술품질원 기동화력2팀

Study on Influence of Carbon Nanotubes and Alumina Additives to Lubrication and Wear Characteristics

Chang-Seok Yun¹, Dae-San Oh² and Hyun-Joon Kim^{1,*}

¹Dept. of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University

²2nd Land Systems Team, Defense Agency for Technology and Quality

(Received July 24, 2017; Revised September 13, 2017; Accepted September 13, 2017)

Abstract – In this work, carbon nanotube and nano-size alumina particle are exploited as additive for lubrication experiment. We used pin-on-disk type tribometer to investigate the tribological characteristics of lubricants with respect to additives and rotational speed. We conducted more than 15 trials of tribotests for two hours for each specimen to obtain stable and accurate frictional force and to create measurable wear track on the substrate. We conducted tests at the boundary/mixed lubrication regime to evaluate the influence of additives on the tribological characteristics. We found that the friction coefficient decreased as the rotational speed increased and as additives were added. In particular, the reduction of friction by adding additives was more significant at low rotational speed than at high rotational speed. We speculate that the additives helped to separate and protect the two contacting surfaces at low speed, while the influence of additives was not significant at high speed since sufficiently thick lubricant film was formed. The wear of the substrate was also reduced by adding additives to the lubricant. However, in contrast to friction, the amount of wear at high rotational speed was less when alumina particles were added to the lubricant than the amount of wear at low speed. We speculate that the increased wear at low rotational speed is as a result of the intermittent abrasive wear caused by alumina particles with uneven shape, while the reduced wear at high speed is as a result of sufficient film thickness which prevented the abrasive wear.

Keywords – lubrication(윤활), additives(첨가제), carbon nanotube(탄소 나노튜브), alumina particle(알루미나 입자)

1. 서 론

접촉을 토대로 작동하는 대부분의 동적 기계요소는 반드시 마찰현상을 수반한다. 마찰은 기계의 작동에너지 소산시켜 효율을 저하시키는 한편 마모현상을 초래하여 기계요소의 신뢰성과 수명을 저감시키는 주된 요인으로 꼽히므로, 이를 최소화 하기 위한 다양한 노력이 수백 년간 진행되어 왔다. 특히, 정밀 기계산업이

발전함에 따라 기계요소에 대한 높은 신뢰성과 내구성에 대한 요구가 점차 증대되고 있다. 기계요소가 소형화, 정밀화 됨에 따라 공차기준이 기존에 비하여 보다 엄격해지고 있으며 가혹한 환경조건에서의 작동에 대한 요구 또한 늘어나고 있다. 그에 따라 신뢰성 및 수명에 직접적 영향을 미치는 요소인 마찰 및 마모에 관한 연구 역시 활발히 진행되고 있다[1]. 마찰 및 마모를 저감하는 방법으로는 자기윤활 특성이 있는 표면코팅, 윤활유의 적용, 표면 텍스처링, 베어링과 같은 구름마찰의 활용 등을 들 수 있다[2-4]. 이러한 기법은 단독으로만 활용되기 보다는, 복합적으로 적용되는 것이 일반

*Corresponding author : hjoonkim@knu.ac.kr
Tel: +82-54-530-1273, Fax: +82-54-530-1278

적이며 각 기법의 장점이 조화롭게 발현되어 기계요소의 신뢰성을 향상시키고 수명을 연장시킬 수 있도록 많은 연구가 진행되고 있다[5, 6]. 이러한 다양한 트라이볼로지적 기법 중에서도 상업적으로 가장 널리 활용되고 있는 것은 윤활유의 적용이다. 윤활유는 표면의 직접적인 접촉을 방지함으로써 마찰 및 마모를 획기적으로 저감시킬 수 있으며 장시간 사용으로 인하여 윤활유에 열화가 일어나더라도 쉽게 교체할 수 있으므로 기계요소의 트라이볼로지적 성능을 일정하게 유지할 수 있다는 장점 또한 지니고 있다[7]. 오늘날에는 윤활유의 성능을 향상시켜 마찰 및 마모를 더욱 효과적으로 저감시키고, 교체주기를 연장시킴으로써 경제성과 기계요소의 신뢰성을 동시에 제고하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있으며, 대표적으로는 첨가제를 윤활유에 적용하는 방법을 들 수 있다.

나노입자를 윤활유에 첨가할 경우, 하중지지력 이 향상되고, 마찰 및 마모를 효과적으로 저감할 수 있다는 연구가 다수 발표된 바 있다[8-10]. 나노입자 첨가제가 윤활특성을 향상시키는 메커니즘으로는 볼베어링 효과, 박막 형성 효과 등이 제시된 바 있으며 첨가제로는 풀러렌(Fullerene), 그래핀, 나노금속입자, BN(Boron nitride), MoS₂(Molybdenum disulfide), 탄소나노튜브(Carbon nanotube), TiO₂(Titanium dioxide) 등, 나노미터 스케일의 입자들이 활용 및 연구되어 왔다[11-13].

다양한 첨가제의 마찰 및 마모저감 메커니즘 및 트라이볼로지적 특성 향상에 관한 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고, 여전히 윤활특성의 개선에 대한 지속적인 요구가 제기되고 있으므로, 본 연구에서는 나노미터 스케일의 첨가제를 활용할 경우 나타나는 윤활특성의 변화를 마찰 및 마모관점에서 알아보고자 하였다. 서로 다른 기계적 특징을 지닌 탄소나노튜브와 알루미늄 입자를 첨가제로 활용할 경우 시간에 따른 마찰계수가 및 마모체적의 변화를 마찰시험기를 이용하여 측정하고 비교, 분석하였다.

2. 실험 방법

2-1. 시편 및 윤활유의 준비

본 연구에서는 상용 윤활유(SAE10W40)를 활용하여 윤활시험을 수행하였다. 해당 윤활유는 다급점도유로서, 점도지수 향상제등을 포함하여 단급점도유에 비해 상대적으로 온도 변화에 따른 점도의 차이가 크지 않다는 특징을 가지고 있다[14]. 장시간 시험중 발생하는

마찰열 및 환경적 온도변화에 대한 민감성을 최소화하기 위하여 단급점도유가 아닌 다급점도유를 선정하였다.

나노미터 크기의 첨가제로는 탄소나노튜브와 알루미늄 입자를 활용하였다. 다층벽 탄소나노튜브(MWCNT) 분산액과 100~500 nm 크기의 알루미늄 입자를 각각 2.4 mg만큼 20 ml의 윤활유에 첨가하였는데, 이는 0.015 wt%에 해당하는 조건이다. 나노물질을 윤활 첨가제로 활용한 기존의 연구를 살펴보면 대체로 0.01~0.1 wt% 수준의 첨가 조건에서 시험을 수행한 사례를 찾아볼 수 있으며, 해당 조건에서 최상의 하중지지력을 발휘하는 사례도 발표된 바 있다[15-17]. 뿐만 아니라 알루미늄을 과도하게 첨가할 경우 연삭마모에 대한 우려가 있으므로 비교적 적은 양의 첨가제 사용이 요구된다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구와 비교하여 상대적으로 작은 비율인 0.015 wt%를 첨가제 투입 비율로 선정하여 실험하고자 하였다.

첨가제를 윤활유에 투입한 뒤 장시간 기계적으로 저어주는 한편, 초음파를 이용하여 고르게 혼합시키는 과정을 거쳐 윤활시험에 적용하였다. 혼합상태를 확인하기 위하여 이렇게 섞인 윤활유를 상온에서 2~3일간 두어 침전물이 생기는지 육안상으로 관찰하였으며, 초기상태와 비교하여 거의 변화가 없음을 확인하였다. 뿐만 아니라 첨가제를 넣은 윤활유의 경우 혼합공정 후에 일정 시간 상온에 방치시킨 뒤, 윤활시험에 적용하

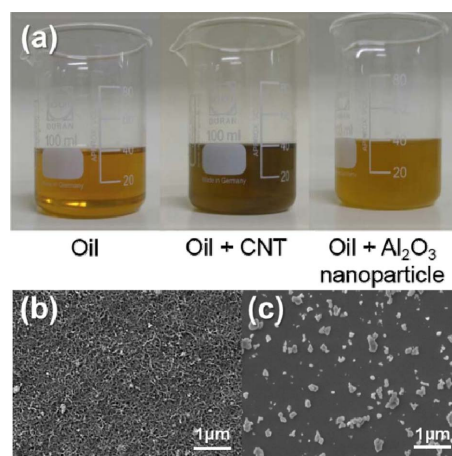


Fig. 1. (a) Photograph of lubricant without additive and with CNT and Al₂O₃ additives, SEM images of (b) MWCNTs deposited on Si wafer to show feature of individual nanotube, and (c) Al₂O₃ particles dispersed on Si wafer.

였는데, 이는 기계적 혼합과정에서 발생하는 열을 식히고 극소량의 침전입자를 제거하여 첨가제의 균일한 분산상태를 확보하기 위함이다.

Fig. 1은 상기 절차를 통하여 준비된 윤활유의 사진과 첨가제의 형태를 파악하기 위한 전자현미경(SEM) 사진이다. Fig. 1(a)에서 나타나듯, CNT를 첨가한 윤활유의 경우 다소 짙은 색상으로 나타나며, 알루미늄을 첨가한 경우에는 투명도가 저감되는 것을 알 수 있다. Fig. 1(b)의 경우 CNT의 형태를 확인하기 위하여 실리콘 웨이퍼에 CNT만을 단독으로 코팅하여 전자현미경으로 촬영한 것이다. 지름 수십 nm, 길이 수 μm 수준의 다층벽 탄소나노튜브가 얽혀있는 것을 볼 수 있다. 알루미늄의 경우 Fig. 1(c)에 드러나는 것과 같이 50~500 nm 정도의 다양한 크기를 갖는다는 사실을 알 수 있으며 형태 또한 일정하지 않음을 확인할 수 있었다.

윤활유의 첨가제를 포함하였을 경우 점도가 크게 변화한다면, 윤활유의 트라이볼로지적 특성 변화가 첨가제의 거동에 의한 것이 아닌 점도변화에 기인하는 결과가 되므로 이와 같은 상황을 명확하게 구분하기 위하여 첨가제를 포함하기 전 후의 절대점도를 점도계를 이용하여 측정하였다. 그 결과 23°C 기준으로 첨가제를 포함하지 않은 경우의 절대점도는 약 170 mPa·s, 그리고 첨가제를 포함한 경우의 절대 점도는 160 mPa·s로 확인되었다. 이는 약 6% 정도의 오차이며 SAE 등급에 영향을 미치는 수준은 아님을 알 수 있다.

마찰시험의 대상이 되는 시험편으로는 DLC코팅이 된 알루미늄 소재의 하드디스크 플래터를 이용하였다. 하드디스크 플래터는 매우 우수한 표면정도를 가지고 있으며 동일한 종류의 플래터를 사용할 경우 균일한 구성성분과 표면상태를 보장할 수 있으므로 신뢰성 있는 윤활시험 대상으로 적당하다고 판단하였다. 하드디스크 플래터와 접촉할 상대소재로는 지름 5 mm의 지르코니아 볼을 선정하였다.

2-2. 실험방법 및 조건

윤활특성 시험을 위해서 본 연구에서는 Fig. 2에 나타나는 것과 같이, 자체 제작한 pin-on-disk 형식의 마찰 시험기를 활용하였다. 시편(플래터)은 사진 우측의 시편홀더에 장착되고 접시형태의 시편홀더에 윤활유를 20 ml 만큼 채운 뒤 시험하였다. 모든 시험에 대해 동일하게 4.9 N의 수직하중을 인가하였고, 매 시험마다 지르코니아 볼을 교체하여 볼 표면의 상태변화에

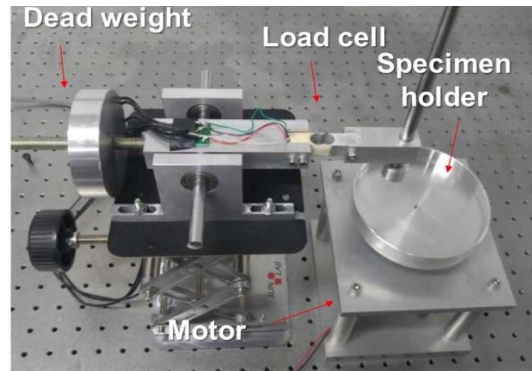


Fig. 2. Pin-on-disk type tribometer to measure friction and investigate wear characteristics.

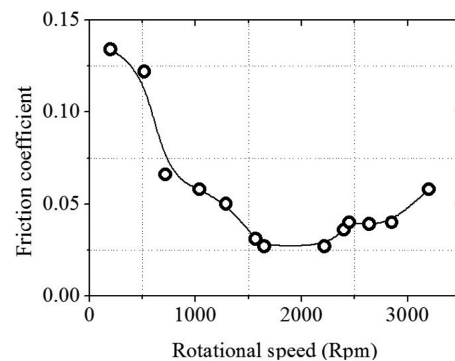


Fig. 3. Change of friction coefficient with respect to rotational speed.

의한 영향을 배제하고자 하였다.

마찰시험의 회전속도 조건을 선정하기 위하여 CNT 혹은 알루미늄이 첨가되지 않은 윤활유를 이용하여 속도에 대한 마찰특성을 획득하였다. 속도를 200 rpm에서 약 3000 rpm까지 달리하여 마찰시험을 수행하였을 때, 다음의 Fig. 3과 같은 마찰력의 변화를 확인할 수 있었다. Fig. 3은 전형적인 stribeck 곡선의 형태를 보여주고 있으며, 그래프의 형태와 마찰계수값의 범위를 미루어 볼 때 해당 속도구간에서 경계윤활(boundary lubrication), 혼합윤활(mixed lubrication), 그리고 유체윤활(hydrodynamic lubrication)이 모두 나타나는 것으로 추정해볼 수 있다. 일반적으로 유체윤활은 부적합 접촉(non-conformal contact)에서는 쉽게 나타나기 어려우나, ball-on-disk 타입의 실험을 통하여 유체윤활 조건을 도출한 기존의 여러 연구와 비교해보면 본 연구의 속도조건은 비교적 빠른 편이며, 하중조건 역시 크지 않아 유체윤활을 달성하였을 것으로 추정된다

[18-20]. 마찰계수와 그래프의 형태를 미루어 볼 때 대략 500 rpm 이하에서는 경계윤활, 500에서 1500 rpm 구간을 혼합윤활, 그리고 1500 rpm 이상의 고속조건에서는 유체윤활 상태라고 판단할 수 있다[21]. 본 실험에서는 첨가제의 효과를 명확하게 규명하기 위하여 충분한 하중 지지력이 나타나는 유체윤활 구간보다는 혼합윤활 혹은 경계윤활상태를 활용하는 것이 적합하다고 판단하였으므로, 경계윤활구간에 해당하는 400 rpm(1.34 m/s)과 혼합윤활구간에 해당하는 700 rpm(2.35 m/s)을 실험속도조건으로 선정하였다.

실험과정에서 실내온도는 19~21 °C, 습도는 30~40% 이내로 유지하여 온도 및 습도 변화에 의한 영향을 최소화하였으며, 충분한 마모량을 발생시키기 위하여 실험시간은 각 실험당 2시간으로 설정하였다. 마찰력은 하프 브리지(half-bridge) 구성을 갖는 로드셀과 데이터 수집장치(NI-9237, National Instruments, USA)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 첨가제에 따른 마찰특성

앞서 언급한 바와 같이 2종의 첨가제를 섞은 윤활유와 아무 첨가제도 포함하지 않은 윤활유에 대해서 두 가지 속도조건을 적용하여 마찰시험을 수행하였다. 시험결과의 신뢰성을 위하여 각 조건 당 15~20회의 시험을 수행하고 그 결과를 종합적으로 분석하였다. 다음의 Fig. 4는 첨가제가 포함되지 않은 윤활유를 700 rpm 조건에서 17회 시험한 결과를 나타내고 있으며, 결과에 약간의 편차가 있으나 대체로 일정한 범위 내의 값이 도출됨을 알 수 있다.

이와 같은 방법으로 나머지 첨가제가 포함된 윤활유

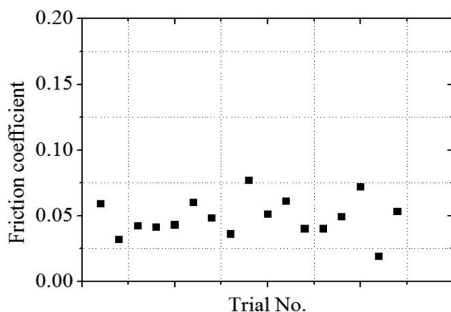


Fig. 4. Friction coefficient obtained under 700 rpm rotational speed condition using lubricant without additive.

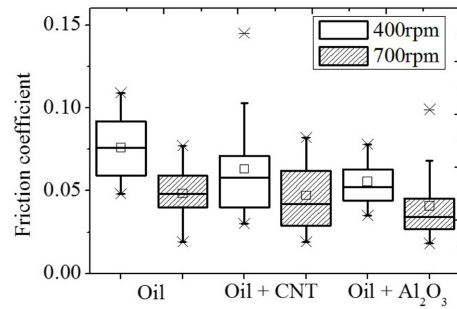


Fig. 5. Friction coefficient with respect to rotational speed and additives.

에 대해서 시험을 수행하였으며, 다수의 시험을 통해 획득된 데이터는 통계적인 처리를 통하여 분석하였다. Fig. 5는 윤활유와 회전속도에 따른 마찰계수의 변화를 박스플롯(box plot)으로 표현한 것이다. 마찰계수의 평균값의 위치는 각 항목의 박스 내부에 작은 정사각형 심볼로 표현하고 있으며, 박스의 크기와 박스 위아래로 뻗은 수염(whisker)의 크기를 통하여 대략적인 값의 분포를 추정해볼 수 있다. X축의 ‘Oil’은 첨가제가 포함되지 않은 윤활유를 의미하며, ‘Oil + CNT’, ‘Oil + Al₂O₃’는 각각 CNT와 알루미늄 입자가 첨가된 윤활유를 나타낸다.

윤활유의 종류와 무관하게 속도가 400에서 700 rpm으로 증가할 경우, 마찰계수가 감소함을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 첨가제의 유무 및 종류에 따라 속도 마찰계수에 변화가 있음을 알 수 있는데, CNT 및 알루미늄 입자를 첨가할 경우 모두 첨가제가 없는 윤활유에 비하여 마찰계수가 감소함을 확인하였다. 각 조건에서 얻어진 데이터로 그려진 박스의 크기를 살펴보면, 첨가제를 포함시킬 때 평균값의 감소와 더불어 박스의 전체적인 위치가 낮은 쪽으로 조정되는 현상을 확인할 수 있다. 각 조건 당 15회 이상의 시험을 통하여 얻어진 데이터인 만큼 이는 데이터의 오차가 다소 크더라도 첨가제에 의한 마찰계수 감소경향이 있음을 나타내는 지표라고 판단할 수 있다.

첨가제의 영향을 명확하게 확인하기 위하여 첨가제가 없는 윤활유를 사용하는 경우의 평균 마찰계수를 100%로 기준 삼아 첨가제를 활용하는 경우의 마찰계수와 정량적으로 비교하였다. 그 결과 Table 1에 나타난 것과 같이 회전속도에 따라 첨가제의 영향이 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 첨가제가 포함되지 않은 윤활유를 사용할 경우의 마찰계수를 100%라고 간

Table 1. Reduction rate of average friction coefficient with respect to rotational speed and additives

Speed (rpm)	400	700
Additives	COF (%)	COF (%)
Lubricant Only	100	100
Lub. + CNTs	82.9	97.9
Lub. + Al ₂ O ₃	73.7	81.3

주할 경우, 회전속도조건이 400 rpm일 때 CNT를 첨가한 경우가 약 83%, 그리고 알루미늄을 첨가한 경우가 약 74%로 저감됨을 알 수 있으며 700 rpm 조건에서 시험하였을 때, CNT를 첨가한 경우 약 98%, 알루미늄을 첨가한 경우에는 81%로 두 첨가제 모두 마찰력을 저감하는 효과가 있음이 확인되었다. 그러나, 비교적 저속인 400 rpm에서 마찰저감 효과가 뚜렷한 것에 비하여 고속인 700 rpm에서는 상대적으로 마찰계수의 감소 정도가 크지 않은데, 이는 속도 증가에 따라 윤활막의 두께가 증가함에 따라 두 접촉면이 저속에서보다 상대적으로 더 분리되어 첨가제의 영향이 줄어들었다고 판단할 수 있다. 다시 말해서, 첨가제가 효과적으로 작용하는 구간은 윤활막의 두께가 충분히 두껍지 못하여 두 표면을 분리시키지 못하는 저속조건이라고 추정할 수 있으며 이 경우, 알루미늄은 구름효과에 의하여[22], CNT는 두 표면 사이에서 비정질 탄소 필름을 형성하여[23] 마찰을 저감한 것으로 추정된다.

3-2. 첨가제에 따른 마모특성

윤활유를 사용하더라도 장시간 마찰이 일어날 경우 표면에 마모가 발생하는 것은 필연적이다. 따라서 마찰시험을 2시간 동안 수행한 뒤 플래터 표면에 발생한 마모량이 첨가제의 종류에 따라 어떻게 변화하는지 측정하였다. 마모량을 정량적으로 획득하기 위하여 레이저 주사 공초점 현미경을 이용하였으며, 약 20~30포인트를 측정한 결과를 평균내어 사용하였다. 마모량을 정확하게 측정하기 위하여 플래터 표면을 아세톤과 에탄올, 그리고 증류수를 차례로 이용하여 장시간 세척함으로써 표면의 잔존물을 제거하였다.

Fig. 6는 마찰실험으로 인해 발생한 마모 흔적을 레이저 주사 공초점 현미경을 이용하여 촬영한 것이다. 그림의 좌측은 표면형상의 3D 이미지이며 우측은 광학현미경 사진을 나타낸다. 마찰시험이 종료된 후에는 첨가제의 종류에 무관하게 육안으로 마모흔적이 확인

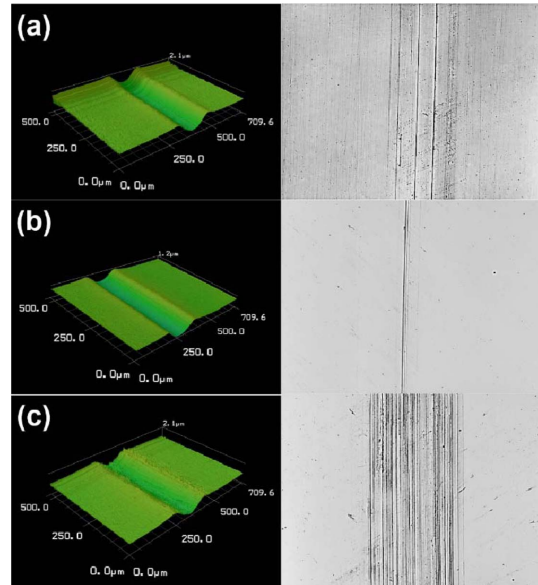


Fig. 6. 3D Topography and optical images of wear track on the substrate when lubricant (a) without additive, (b) with CNTs (b) and with Al₂O₃ were examined, respectively, under 700 rpm rotational speed.

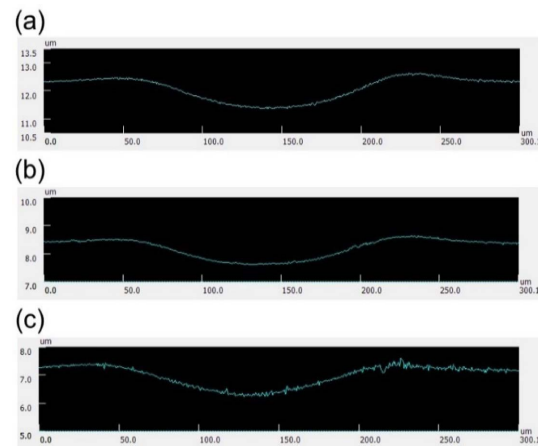


Fig. 7. Cross section of wear track on the substrate examined using lubricant (a) without additive, (b) with CNTs, and (c) with Al₂O₃ particles under 700 rpm of rotational speed.

되었으며, 광학현미경으로 관찰한 결과를 살펴보면 알루미늄을 첨가한 경우의 표면이 가장 뚜렷한 마모흔적을 나타내었다. 상대적으로 CNT를 첨가한 경우 광학현미경 사진상의 마모흔적이 가장 적게 나타나는 것으로 판단되나, 실제 마모량을 정량적으로 비교하기 위

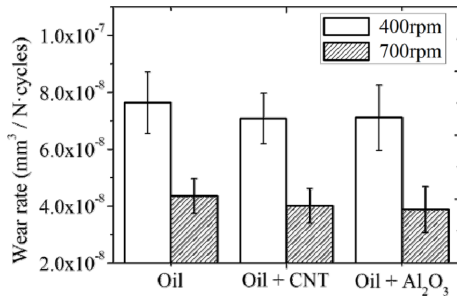


Fig. 8. Average area of wear track on the substrate with respect to types of additive and rotational speed.

해서 세가지 경우 마모흔적의 형상을 3D이미지로 획득하였다.

Fig. 7는 획득된 3D 표면형상으로부터 마모흔적의 단면을 추출하여 나타낸 것으로 x축(300 μm) 및 y축(3 μm)의 스케일을 균일하게 맞추어 표현하였다. Fig. 7(a), (b), (c)는 각각 첨가제를 사용하지 않은 윤활유, CNT를 첨가한 경우, 그리고 알루미늄을 첨가한 경우에 대해 실험한 결과 나타나는 마모흔적의 단면이다. Fig. 6에서도 확인할 수 있듯, 알루미늄을 첨가한 경우 마모면의 표면정도가 매우 거칠고, 반대로 CNT를 첨가한 경우의 표면이 가장 고른것을 알 수 있다.

마모량을 비교하기 위하여 마모흔적 위의 20~30 지 점을 선정하여 단면 형상을 추출한 뒤, 마모면적을 측정하였다. 그리고 이렇게 측정된 마모면적을 토대로 마모율을 계산한 결과, Fig. 8과 같은 경향을 확인할 수 있었다. 첨가제를 사용하지 않은 경우에는 400 rpm 및 700 rpm 두 가지 속도조건에서 마모면적의 변화가 거의 나타나지 않았다. 그러나 700 rpm 조건에서는 미끄럼 거리가 더 길기 때문에 마모율 기준으로는 400 rpm 조건보다 더 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 이는 700 rpm 조건에서 마찰계수가 더 낮아지기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다. 두 경우의 마모면적이 비슷한 것은 마찰력과 미끄럼거리의 변화가 동시에 작용한 결과로 추정되는데, 두 속도조건에서의 마모면적은 각각 2시간동안의 마찰시험 결과 획득된 것이므로 실제 미끄럼 거리는 700 rpm의 경우 400 rpm에 비하여 75% 더 길다. 반면, Fig. 5에서도 알 수 있듯, 700 rpm의 경우 400 rpm의 경우보다 마찰계수가 저감되므로 미끄럼 거리가 길어지더라도 단위 거리당 마모량이 감소하여 결과적으로 두 속도조건 모두 비슷한 수준의 마모면적이 도출되었다고 판단

Table 2. Reduction rates of wear area by rotational speed and additives

Speed (rpm)	400	700
Type	Area (%)	Area (%)
Lubricant Oil	100	100
Oil + CNTs	92.6	92.05
Oil + Al ₂ O ₃	93.1	89.1

된다.

CNT 및 알루미늄 입자를 첨가한 경우, 앞서 마찰계수의 변화경향과 유사하게 첨가제를 사용하지 않은 경우에 비하여 마모율이 다소 감소되었음이 확인되었다. 오차범위가 비교적 크게 나타나지만 각 조건당 15회 이상 다수의 시험을 통하여 얻어진 통계라는 점을 고려하면, 데이터의 집단적 분포 측면에서 첨가제에 의한 마모율 저감이 발생하였다고 판단할 수 있다. 그러나 각 조건에 따른 마모율의 변화가 크지 않으므로 마모율 저감 수준에 대한 보다 명확한 이해를 위하여 각 조건에서 도출된 마모율의 평균값을 정량적으로 비교하였다. 다음의 Table 2는 첨가제를 적용하지 않은 윤활유를 사용하여 시험하였을 때 나타난 마모율을 100%로 기준삼아 첨가제를 사용한 경우의 마모율을 나타낸 것이다. 400 rpm 조건에서 CNT 및 알루미늄을 첨가한 경우, 첨가제를 사용하지 않은 경우에 비하여 약 7~8%의 마모율 감소가 발생하였다. 반면 700 rpm 조건에서 CNT를 첨가한 경우에는 400 rpm조건과 유사하게 약 8%의 마모율 저감이 일어났으나 알루미늄을 첨가한 경우에는 약 11%의 마모율 저감이 발생하였다.

이와 같은 현상은 Table 1에서 드러난 마찰력의 변화 추이와는 다소 다른 경향이라고 할 수 있다. Table 1을 참고해 보면, 400 rpm 조건에서 알루미늄을 첨가한 경우, CNT를 첨가한 경우보다 마찰력의 감소가 두드러지게 나타났음을 알 수 있다. 그러나 마모측면에서는 두 첨가제 모두 유사한 수준의 저감효과를 보여주고 있다. 이는 알루미늄을 첨가제로 사용하였을 경우 400 rpm 속도조건에서 마찰력이 크게 저감된 것에 비하여, 두 접촉면 사이에 존재하는 알루미늄 입자의 일부가 연삭작용을 일으켰기 때문에 마모저감 효과가 크지 않았던 것으로 판단된다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯, 알루미늄 입자는 크기와 형상이 불규칙하여 일부 입자는 구름운동 등으로 윤활 및 마모저감 효과를 향상시키는 데 비하여 일부 입자는 두 접촉면 사이에

서 높은 압력을 야기함으로써 연삭마모를 일으켜 마모 저감 효과를 상쇄시키는 방향으로 거동하였을 것으로 추정된다.

속도를 700 rpm으로 증가시켜 시험한 경우에는 CNT 첨가제의 마모저감 효과가 400 rpm일 때와 유사한 수준으로 나타나는 것에 비하여, 알루미늄 첨가제의 마모저감 특성이 보다 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이는 미끄럼 속도가 증가함에 따라 윤활막 두께가 증가하여 두 표면이 충분히 분리되어 알루미늄 입자의 연삭효과가 크게 줄어든 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 실험에서는 CNT와 알루미늄을 윤활 첨가제로 사용하였을 때 마찰계수와 마모량의 변화에 대하여 실험적으로 규명하고자 하였다.

1. 첨가제를 사용하지 않았을 경우의 마찰계수와 비교하여 CNT와 알루미늄을 첨가하는 두 가지 경우 모두 마찰 계수가 줄어드는 것을 확인하였다. 뿐만 아니라 마모흔적의 단면적을 기준으로 마모량을 비교하였을 때 첨가제를 넣은 경우가 첨가제를 넣지 않은 경우에 비하여 마모흔적의 단면적 및 마모율이 감소하는 것을 확인하였다.

2. 첨가제의 마찰저감 효과는 상대적으로 저속구간에서 두드러지게 나타났으며 고속조건에서는 충분한 두께의 윤활막이 형성됨에 따라 첨가제의 영향이 상대적으로 적게 나타난 것으로 판단되었다.

3. 알루미늄 입자의 경우 구형이 아니더라도 마모저감효과를 획득할 수 있음이 확인되었다. 고속조건에서 알루미늄 입자를 첨가할 경우 마모량이 크게 저감되는 결과를 미루어 볼 때, 저속에서는 불균일한 알루미늄 입자의 크기와 형태로 인하여 표면 연삭현상이 일어나 마모량 저감에 부정적 영향을 미쳤다고 추정할 수 있다. 따라서 불균일한 형상의 세라믹 나노입자를 첨가제로 활용할 경우에는 고속작동 조건이 보다 적합한 것으로 판단된다.

4. 탄소나노튜브를 사용한 경우에는 마찰 및 마모 저감이 되는 한편, 마모면의 표면정도가 우수하며 이는 표면에 비정질 탄소필름이 형성되어 자기윤활 특성을 제공하였기 때문으로 추정된다.

이러한 실험 결과를 토대로 서로 다른 특성을 갖는 첨가제를 이용하여 윤활특성을 향상시키고자 할 때, 각기 다른 첨가제의 특징에 대한 이해를 제고할 수 있을

것으로 기대된다.

Acknowledgements

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

References

- [1] Kim, H.-J., Kim, D.-E., "Nano-scale friction : A review", *Int. J. Prec. Eng. Manuf.*, Vol. 10, pp. 141-151, 2009.
- [2] Han, J.-H., Han, G.-B., Jang, D.-Y., Ahn, H.-S., "Study on frictional characteristics of sub-micro structured silicon surfaces", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 33, No. 3, pp. 92-97, 2017.
- [3] Holmberg, K., Mathews, A., "Coatings tribology : A concept, critical aspects and future directions", *Thin Solid Films*, Vol. 253, pp. 173-178, 1994.
- [4] Oh, D.-S., Kim, H.-J., Kim, J.-K., Kim, D.-E., "Friction and deformation behaviors of ~60- μ m stainless steel micro-balls for application in small precision devices", *Tribol. Lett.*, Vol. 59, pp. No. 3, pp. 1-10, 2015.
- [5] Chouquet, C., Gavillet, J., Ducros, C., Sanchette, F., "Effect of DLC surface texturing on friction and wear during lubricated sliding", *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 123, pp. 367-371, 2010.
- [6] Basnyat, P., Luster, B., Muratore, C., Voevodin, A. A., Haasch, R., Zakeri, R., Kohli, P., Aouadi, S. M., "Surface texturing for adaptive solid lubrication", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 203, pp. 73-79, 2008.
- [7] Kim, H.-J., Seo, K.-J., Kang, K. H., Kim, D.-E., "Nano-lubrication : A review", *Int. J. Prec. Eng. Manuf.*, Vol. 17, pp. 829-841, 2016.
- [8] Binu, K. G., Shenoy, B. S., Rao, D. S., Pai, R., "A variable viscosity approach for the evaluation of load carrying capacity of oil lubricated journal bearing with TiO₂ Nanoparticles as Lubricant Additives", *Procedia Mater. Sci.*, Vol. 6, pp. 1051-1067, 2014.
- [9] Tarasov, S., Kolubaev, A., Belyaev, S., Lerner, M., Tepper, F., "Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil", *Wear*, Vol. 252, pp. 63-69, 2002.
- [10] Dong, J. X., Hu, Z. S., "A study of the anti-wear and friction-reducing properties of the lubricant additive, nanometer zinc borate", *Tribol. Int.*, Vol. 31, pp. 219-223, 1998.
- [11] Lee, K., Hwang, Y., Cheong, S., Choi, Y., Kwon, L., Lee, J., Kim, S. H., "Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication", *Tribol. Lett.*, Vol. 35, pp.

- 127-131, 2009.
- [12] Yao, Y., Wang, X., Guo, J., Yang, X., Xu, B., "Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive", *Mater. Lett.*, Vol. 62, pp. 2524-2527, 2008.
- [13] Kimura, Y., Wakabayashi, T., Okada, K., Wada, T., Nishikawa, H., "Boron nitride as a lubricant additive", *Wear*, Vol. 232, pp. 199-206, 1999.
- [14] Guan, L., Feng, X. L., 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] Cho, D.-H., Kim, J.-S., Kwon, S.-H., Lee, C., Lee, Y.-Z., "Evaluation of hexagonal boron nitride nanosheets as a lubricant additive in water", *Wear*, Vol. 302, pp. 981-986, 2013.
- [16] Eswaraiah, V., Sankaranarayanan, V., Ramaprabhu, S., "Graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 3, pp. 4221-4227, 2011.
- [17] Lin, J., Wang, L., Chen, G., "Modification of Graphene Platelets and their Tribological Properties as a Lubricant Additive", *Tribol. Lett.*, Vol. 41, pp. 209-215, 2011.
- [18] Chen, M., Kato, K., Adachi, K., "The comparisons of sliding speed and normal load effect on friction coefficients of self-mated Si₃N₄ and SiC under water lubrication", *Tribol. Int.*, Vol. 35, pp. 129-135, 2002.
- [19] Phillips, B. S., Zabinski, J. S., "Ionic liquid lubrication effects on ceramics in a water environment", *Tribol. Lett.*, Vol. 17, pp. 533-541, 2004.
- [20] Chen, M., Kato, K., Adachi, K., "Friction and wear of self-mated SiC and Si₃N₄ sliding in water", *Wear*, Vol. 250, pp. 246-255, 2001.
- [21] Kalin, M., Velkavrh, I., Vizintin, J., "The Stribeck curve and lubrication design for non-fully wetted surfaces", *Wear*, Vol. 267, pp. 1232-1240, 2009.
- [22] Luo, T., Wei, X., Huang, X., Huang, L., Yang, F., "Tribological properties of Al₂O₃ nanoparticles as lubricating oil additives", *Ceram. Int.*, Vol. 40, pp. 7143-7149, 2014.
- [23] Cornelio, J. A. C., Cuervo, P. A., Hoyos-Palacio, L. M., Lara-Romero, J., Toro, A., "Tribological properties of carbon nanotubes as lubricant additive in oil and water for a wheel-rail system", *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 5, pp. 68-76, 2016.