

하중 및 온도에 따른 습식 클러치 마찰재의 트라이볼로지 특성

박혜선 · 정구현[†]

울산대학교 기계공학부

Effect of Normal Force and Temperature on Tribological Properties of Wet Clutch Friction Material

Hyeseon Park and Koo-Hyun Chung[†]

School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

(Received December 25, 2018; Revised January 20, 2019; Accepted January 25, 2019)

Abstract – The tribological properties of paper-based friction materials are crucial to the performance of a wet clutch system. In this work, the friction and wear characteristics of a paper-based friction material in boundary lubrication state was experimentally investigated using a pin-on-reciprocating tribotester under various normal forces and temperatures. It was found that the wear rate of the friction material increased from $5.8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N/cycle}$ to $5.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N/cycle}$ after 1,700 cycles of testing at 80°C as normal force increased from 2 N to 7 N. The friction coefficient was also found to increase from 0.135 to 0.155 with increasing normal force from 2 N to 7 N. The increase in contact pressure with increasing normal force may be responsible for these results. In addition, as temperature increased from 20°C to 80°C , the wear rate of the friction materials increased from $2.0 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N/cycle}$ to $3.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N/cycle}$ while the friction coefficient decreased from 0.163 to 0.146. This result may be associated with the decrease in the hardness of friction materials with increasing temperature. Furthermore, plastic deformation on the friction materials was mainly observed after the test. The outcome of this work may be useful to gain a better understanding of the tribological properties of friction materials, and therefore can contribute to the development of friction materials with enhanced performance for wet clutch systems.

Keywords – friction (마찰), friction material (마찰재), wear rate (마모율), wet clutch (습식 클러치)

1. 서 론

현재 전세계적으로 환경 및 에너지 문제가 대두되고 있으며, 이를 해결하기 위하여 많은 산업에서 다양한 규제가 만들어지고 있다. 자동차 산업에서도 환경 규제를 만족시키고 에너지 효율을 개선하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 자동차에서 소모되는 총에너지의 약

38%는 기계적 요소에서 발생하며, 이중 마찰과 관련된 에너지 손실은 약 33%인 것으로 제시되고 있다[1]. 자동차의 변속 시스템에서는 약 15%의 에너지 손실이 발생하는 것으로 알려지고 있는데 [2], 특히, 자동 변속기에서 발생하는 에너지 손실은 수동 변속기에 비하여 약 5~15% 정도 큰 것으로 나타나고 있다[3]. 자동 변속기에서 에너지 손실을 유발하는 요인 중 하나는, 기어 선택을 위한 동력 전달 장치로써 많이 사용되는 클러치(clutch)로써, 클러치에서 사용되는 마찰재의 기초적 마찰 특성은 클러치의 동력전달 효율에 직접적인 영향을 끼치며, 마찰재의 마모로 인한 성능 저하는 추가적인 에너지

[†]Corresponding author: khchung@ulsan.ac.kr
Tel: +82-52-259-2744, Fax: +82-52-259-1680
<http://orcid.org/0000-0002-9092-6784>

© 2019, Korean Tribology Society

손실을 유발하기도 한다. 이에 따라, 클러치에서 발생하는 에너지 손실을 줄이고, 효과적으로 동력을 전달하기 위하여 클러치의 마찰, 마모, 윤활 특성, 그리고 drag 토크 특성 등을 이해하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다[4-8].

자동 변속기용 클러치에서는 일반적으로 paper 기반 습식 마찰재를 디스크에 부착시켜 사용하고 있다. Paper 기반 마찰재는 cellulose, mineral, aramide, carbon, glass 등으로 이루어진 섬유질(fiber), diatomaceous earth, cashew nut, carbon, mica, calcium, nitride, silica 등과 같은 마찰조절제, 그리고 이들을 결합하기 위한 phenolic resin, silicon resin 등의 binder로 다양하게 구성된다[9-11]. 그러므로, 높은 동력전달 효율 및 내구성을 가지는 습식 마찰재를 개발하기 위해서는 다양한 형태를 가지는 습식 마찰재의 마찰 및 마모 특성을 다양한 조건에서 평가함으로써, 각 소재의 역할을 근본적으로 이해하고 최적의 조합을 제시하기 위한 데이터를 축적하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 자동변속기 클러치 시스템에 사용되는 습식 마찰재의 마찰 및 마모 특성을 실험적으로 이해하기 위하여, pin-on-reciprocating tribo-tester를 이용한 실험을 수행하였다. 실험 시편으로는 실제 자동 변속기용 클러치 시스템에 사용되는 습식 마찰재를 이용하였으며, 수직 하중과 온도 변화에 따른 마찰 및 마모 특성을 평가하였다. 이러한 연구 결과는 궁극적으로 보다 향상된 성능을 가지는 습식 마찰재 개발을 위한 기초적 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 실험 시편

본 연구에서는 상용화된 클러치용 습식 마찰재를 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 습식 마찰재는 디스크에 부착되어 있었으며, 실험 장치에 장착하기 위하여 일정 크기로 잘라서 사용하였다. Fig. 1(a)는 실험에 사용된 습식 마찰재의 주사전자현미경(scanning electron microscopy) 이미지를 나타내며, 섬유질이 표면에 존재하고 있는 것을 명확하게 알 수 있다. Fig. 1(b)는 공초점 현미경(confocal microscopy)를 사용하여 관찰한 습식 마찰재 표면의 3차원 이미지를 나타내며, SEM 이미지에서 관찰한 바와 같이, 수십 μm 의 직경과, 수백 μm 의 길이를 가지는 섬유질이 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 임의의 서로 다른 5곳의 위치에서

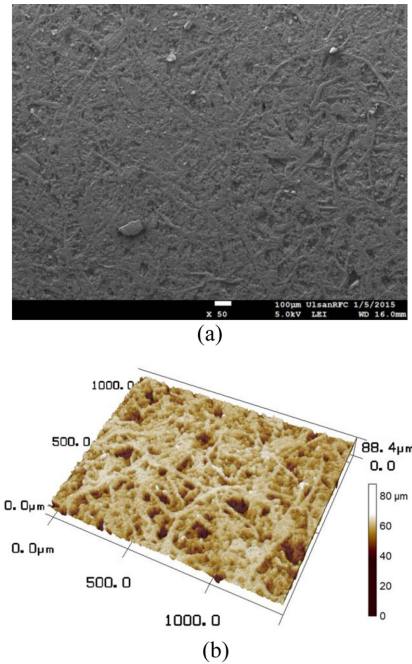


Fig. 1. (a) SEM and (b) 3-dimensional confocal microscopy images of the specimen.

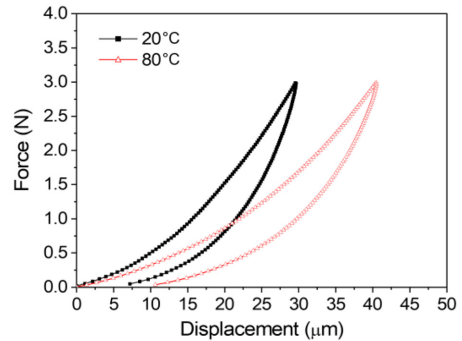


Fig. 2. Force-displacement curve measurement result using DMA.

측정하여 데이터를 얻은 결과, 습식 마찰재 표면의 평균 표면거칠기, R_a 는 $4.6 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 나타났다.

실험에 앞서, 습식 마찰재 시편의 기계적 물성을 이해하기 위하여 dynamic mechanical analyzer (DMA)를 이용한 압입(indentation) 시험을 수행하였다. 압입 시험은 1 N/min의 압입 속도, 3 N의 최대 하중 조건으로 이루어졌으며, 직경 4 mm의 구형 압입자가 이용되었다. 또한, 온도에 따른 습식 마찰재의 기계적 물성 변화를

파악하기 위하여 압입 시험은 상온(20°C)과 습식 클러치의 작동 온도로 예상되는 80°C에서 이루어졌다. Fig. 2는 20°C와 80°C에서 얻은 force-displacement curve를 나타내며, 온도가 20°C와 80°C로 증가함에 따라 3 N 하중에서의 압입 깊이는 30 μm 에서 40 μm 로 30% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 온도가 증가함에 따라 경도가 크게 감소하는 것을 알 수 있으며, 온도에 따라 마모가 증가할 것을 예측할 수 있다.

습식 마찰재와 상대운동을 하기 위한 소재로는 볼 베어링에 사용되는 크롬 강구를 사용하였다. 공초점 현미경을 이용하여 측정된 실험 전 크롬 강구의 반경은 $1.56 \pm 0.02 \text{ mm}$ 이었으며, 강구 표면의 R_a 값은 $283 \pm 212 \mu\text{m}^2$ 의 측정영역에서 $0.03 \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 윤활유로는 자동 변속기에서 실제 사용되는 automatic transmission fluid (ATF)를 이용하였다.

2-2. 실험 방법

본 연구에서는 pin-on-reciprocating plate tribo-tester를 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 실험장치의 도식도를 나타낸다. 실험장치는 온도 조절시스템, 구동부, 마찰력을 측정하기 위한 센서, 그리고 데이터 수집장치 등으로 구성되어 있다. 수직하중은 dead weight를 이용하여 가하였으며, 시편과 크롬 강구사이의 마찰력은 load cell을 이용하여 측정하였다. 실험시 온도는 시편의 아래쪽에 위치한 heater를 이용하여 변화시켰으며, 습식 마찰재가 장착되어 있는 디스크에 위치시킨 thermocouple을 이용하여 온도를 측정하였다.

본 연구에서는 수직 하중과 온도 변화에 따른 습식 마찰재의 마찰 및 마모 특성을 평가하기 위하여, 수직 하중은 2 N, 3 N, 5 N, 7 N으로, 온도는 20°C, 50°C, 80°C, 100°C로 변화시켰다. 수직 하중 조건은 기존 연구 결과[4]와 예비 실험 등을 통하여, 기관의 영향을 배제하고 측정 가능한 마모량을 효과적으로 얻기 위하여 선정되었다. 또한, 실험 온도는 실제 습식 클러치의 작동 조건을 고려하여 결정하였다. 미끄럼 속도는 시편의 중앙부에서 25 mm/s가 되도록 일정하게 유지하였다. 또한, 실제 습식 마찰재의 마모가 경계 윤활에서 많이 발생할 수 있음을 고려하여 모든 실험은 경계 윤활에서 진행하였다. 상용화된 습식 마찰재로부터 얻은 시편의 크기를 고려하여 이송 거리는 16 mm로 설정하였다.

실험 후 습식 마찰재의 표면에 형성되어 있는 트랙을 공초점 현미경을 이용하여 관찰하였다. 또한, 공초점 현

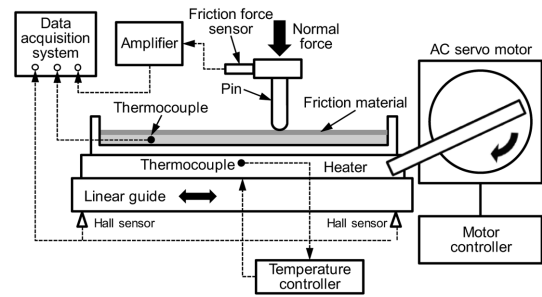


Fig. 3. Schematic of tribo-tester.

미경 데이터로부터 마모 트랙의 평균 단면 프로파일을 얻었으며, 이로부터 마모 트랙의 단면적을 구하였다[12]. 특히, 마모 트랙의 단면적 계산 시에는 마모 트랙 주변에 존재하는 버(burr)의 영향이 포함되지 않도록 주의하였다. 마모 트랙의 단면적과 이송 거리(16 mm)를 곱하여 시편의 마모 부피를 구하였으며, Archard의 마모 법칙에 기반하여, 마모율(wear rate)을 정량적으로 얻었다[13]. 시편의 측정 가능한 마모 부피를 얻기 위해 요구되는 왕복 운동 회수는 약 1,700회 정도였으며, 이는 약 54 m의 미끄럼 거리에 해당하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 수직하중의 영향

Figs. 4(a)-(d)는 2 N, 3 N, 5 N, 7 N의 수직하중에서 1,700회의 왕복 운동 실험을 수행한 후 얻은 결과로써, 습식 마찰재 표면에 형성된 마모 트랙의 3차원 공초점 현미경 이미지를 나타낸다. 이 때, 실험 온도는 습식 클러치의 실제 작동 온도를 고려하여, 80°C로 유지하였다. 또한, 수직하중 변화에 따른 습식 마찰재의 마모 특성을 보다 명확하게 비교하기 위하여, 공초점 현미경 데이터로부터 얻은 시편 접촉부의 평균 단면 프로파일을 Fig. 4(e)에 제시하였다. Figs. 4(a)-(d)에 표시한 바와 같이, 실험 후 마찰재 시편의 접촉부에는 마모 트랙이 형성되어 있음을 명확하게 알 수 있다. 2 N 수직하중에서 형성된 마모 트랙의 깊이는 상대적으로 매우 작았으며, 수직하중이 증가할수록 마모 트랙의 폭과 깊이가 증가하는 것을 명확하게 알 수 있다. 특히, 7 N 수직하중의 경우에는 마모 트랙의 주변에 버가 형성된 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 4(e)에 제시한 마모 트랙의 평균 단면 프로파일로부터 확인할 수 있다. 이와 같은 결과로부터, 본 연구에 사용된 습식 마찰재의 경

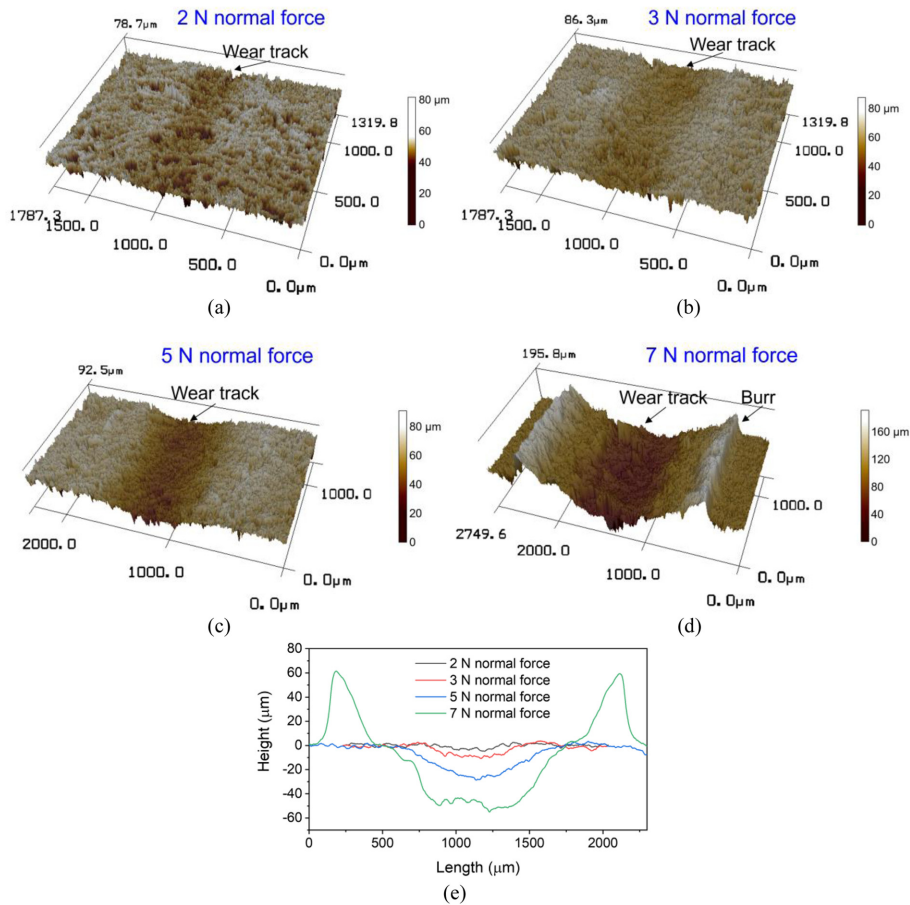


Fig. 4 Three-dimensional confocal microscopy images of the specimen after the tests under (a) 2 N, (b) 3 N, (c) 5 N, and (d) 7 N normal forces with 25.3 mm/s sliding speed at 80°C, and (e) cross-sectional height profiles.

우, 접촉 미끄럼 운동으로 인하여 소성 변형이 발생하고, 이에 따라 그루브(groove)가 형성되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존 연구 결과[4]와 일치하는 것이었으나, 마찰재의 표면에 존재하는 섬유질이 끊어져 길이가 짧아지거나, 심각하게 압축되는 파손은 관찰되지 않았다.

Fig. 5(a)는 수직 하중 변화에 따른 습식 마찰재의 마모율 변화를 나타낸다. 수직 하중이 2 N에서 7 N으로 증가함에 따라 습식 마찰재의 마모율은 $5.8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}/\text{cycle}$ 에서 $5.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}/\text{cycle}$ 로 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 하중이 약 3.5배 정도 증가함에 따라 마모율은 약 10배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이, 수직 하중 증가에 따라 마모율이 증가하는 것은 접촉 압력의 증가에 기인하는 것으로 여겨진다. 그러나,

앞서 제시한 마모율은 기존에 보고된 다른 종류의 마찰재에 비하여 비교적 우수한 것으로서, 이는 마찰재를 구성하는 재료 자체의 성분 및 비율 등의 차이 때문인 것으로 여겨진다[4]. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 습식 마찰재의 마모가 주로 소성 변형에 의한 것임을 고려할 때, 마찰재 구성 재료, 조합에 따른 경도, binder의 결합력 등이 습식 마찰재의 마모 특성에 큰 영향을 미치는 주된 요소임을 유추할 수 있다.

클러치에서 효과적인 동력 전달을 위해 요구되는 중요한 성능 중 하나는 높은 마찰이다. 실험을 수행하는 동안 지속적으로 관찰한 결과, 본 연구에서 사용된 습식 마찰재의 경우, 1,700회의 왕복 운동 동안 마찰력이 비교적 일정하게 유지되었으며, 각 수직 하중에서 마찰 계수의 평균값을 구하여 Fig. 5(b)에 제시하였다. 수직

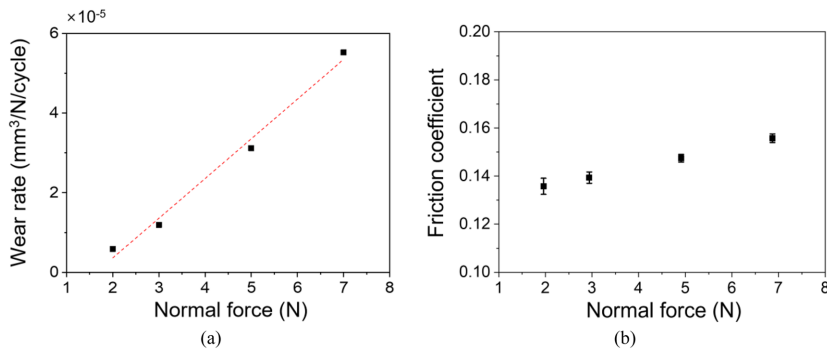


Fig. 5 (a) Wear rate and (b) friction coefficient of the specimen with 25.3 mm/s sliding speed at 80°C with respect to normal force.

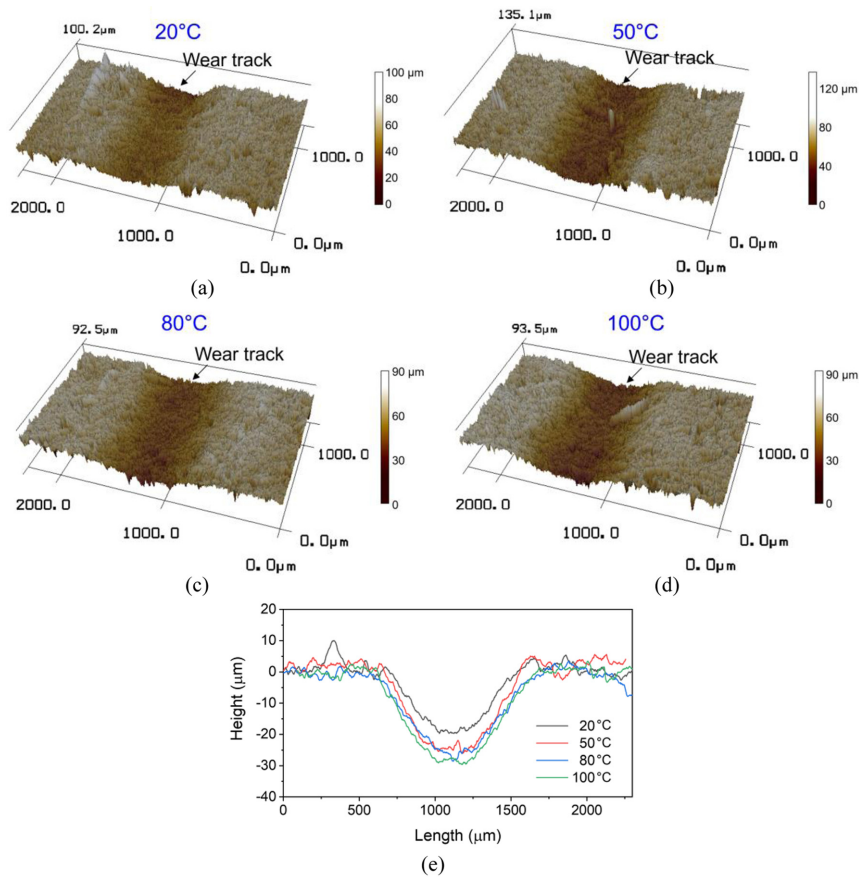


Fig. 6. Three-dimensional confocal microscopy images of the specimen after the tests under 5N normal force with 25.3 mm/s sliding speed at (a) 20°C, (b) 50°C, (c) 80°C, and (d) 100°C, and (e) cross-sectional height profiles.

하중이 2 N에서 7 N으로 증가함에 따라 마찰계수가 0.135에서 0.155로 미세하게 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 증가는 하중 증가에 따른 접촉 압력의 증가와 이에 따른 소성 변형시의 전단 응력 증가 때문으로 생

각된다. Fig. 5(b)에 제시된 마찰 특성은 기존에 평가된 다른 습식 마찰재의 마찰계수와 비슷한 것으로써[4], 결론적으로, 본 실험에 사용된 습식 마찰재는 클러치 부품으로써 요구되는 높은 마모 저항성과 함께 비교적 양호한 마찰 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

3-2. 온도의 영향

Figs. 6(a)~(d)는 온도를 20°C, 50°C, 80°C, 100°C로 증가시키며 실험한 결과로써, 1,700회의 왕복 실험 후 습식 마찰재 표면에 형성된 마모 트랙의 3차원 공초점 현미경 이미지를 나타낸다. Fig. 6에 제시한 결과는, 마모의 가혹도(severity) 및 마모량 측정의 불확도(uncertainty)를 고려하여 5 N의 수직하중에서 얻었다. Fig. 6(e)는 공초점 현미경 데이터로부터 얻은 마모 트랙의 평균 단면 프로파일을 나타낸다. Fig. 6에 제시한 결과로부터, 온도 증가에 따라 습식 마찰재의 마모량이 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 온도가 20°C에서 50°C로 증가할 때의 마모량은 상대적으로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 온도가 증가함에 따라 습식 마찰재의 마모율이 증가하는 것은, Fig. 2에 제시된 바와 같이 온도 증가에 따라 마찰재의 경도가 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7(a)는 온도변화에 따른 습식 마찰재의 마모율 변화를 나타낸다. 온도가 20°C에서 100°C로 증가함에 따라, 습식 마찰재의 마모율은 $2.0 \times 10^5 \text{ mm}^3/\text{N/cycle}$ 에서 $3.6 \times 10^5 \text{ mm}^3/\text{N/cycle}$ 로 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 온도가 약 5배 정도 증가함에 따라 마모는 약 1.8배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 수직하중에 비하여 온도의 영향이 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 5 N의 수직하중에 온도변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸다. 온도가 20°C에서 100°C로 증가함에 따라, 마찰계수는 0.163에서 0.146으로 미세하게 감소하였다. 이는 온도 증가에 따라 소재의 기계적 물성이 감소하고, 이에 따라 소성 변형을 유발하는데 필요한 전단 응력이 감소하기 때문으로 생각된다. 실제 클러치에 유입되는 윤활유의 온도는 80°C 이상일 것으로 예상되므로, 마찰재를 이용한 동력 전달 효율을 보다 향상시키기 위해서는 고온에서 높은 마찰을 유지하는 것이 보다 효과적일 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수직 하중과 온도 변화에 따른 습식

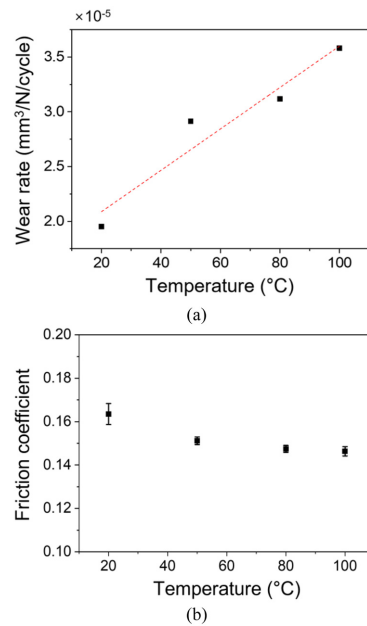


Fig. 7. (a) Wear rate and (b) friction coefficient of the specimen under 5 N normal force with 25.3 mm/s sliding speed with respect to temperature.

마찰재의 마찰 및 마모 특성을 정량적으로 이해하기 위하여, pin-on-reciprocating plate tribo-tester를 이용한 실험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 마찰 및 마모 특성 평가 결과로부터, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었으며, 이러한 결과는 향후 보다 우수한 신뢰성과 작동 성능을 가지는 클러치용 습식 마찰재의 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1) 본 연구에 사용된 습식 마찰재의 마모율과 마찰계수는, 강구와 상대 운동하는 경우 각각 $10^5 \sim 10^6 \text{ mm}^3/\text{N/cycle}$ 과 0.135~0.163로 나타났다.

2) 수직하중 증가에 따른 접촉 압력의 증가는 마모율은 크게 상승시키는 것으로 나타났으나, 마찰계수의 증가는 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

3) 습식 마찰재의 마모율은 온도 증가에 따라 증가하였으나, 마찰계수는 약간 감소하는 것으로 나타났다. 온도 증가에 따른 습식 마찰재의 기계적 물성의 감소는 마모율의 증가를 유발하나, 소성 변형시 요구되는 전단 응력을 감소시키므로 마찰계수는 감소하는 것으로 생각된다.

4) 습식 마찰재의 주된 마모 기구는 소성 변형인 것으로 나타났으며, 이는 마찰재를 구성하는 재료 및 조

함에 따른 경도, binder의 결합력 등을 향상시킴으로써, 마모 특성을 향상시킬 수 있음을 의미한다.

Acknowledgements

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: NRF-2017R1A2B4009651)임.

References

- [1] Holmberg, K., Andersson, P., Erdemir, A., "Global energy consumption due to friction in passenger cars", *Tribol. Int.*, Vol. 47, pp. 221-234, 2012.
- [2] Li, S., Delvin, M. T., Tersigni, S. H., Jao, T. C., Yatsunami, K., Cameron, T. M., "Fundamentals of anti-shudder durability: Part I - Clutch plate study", *SAE Technical Paper*, Paper No. 2003-01-1983, 2003.
- [3] Takagi, Y., Nakata, H., Okano, Y., Miyagawa, M., Katayama, N., "Effect of two-phase flow on drag torque in a wet clutch," *J. Advanced Res. Phys.*, Vol. 2, No. 2, Paper No. 021108, 2011.
- [4] Cho, H. R., Je, Y., Chung, K. H. "Assessment of wear characteristics of paper-based wet friction materials", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 19, No. 5, pp. 705-711, 2018, doi:10.1007/s12541-018-0084-1.
- [5] Marklund, P., Larsson, R., "Wet clutch friction characteristics obtained from simplified pin on disc test," *Tribol. Int.*, Vol. 41, Nos. 9-10, pp. 824-830, 2008.
- [6] Eguchi, M., Yamamoto, T., "Shear characteristics of a boundary film for a paper-based wet friction material: Friction and real contact area measurement," *Tribol. Int.*, Vol. 38, No. 3, pp. 327-335, 2005.
- [7] Nyman, P., Mäki, R., Olsson, R., Ganemi, B., "Influence of surface topography on friction characteristics in wet clutch applications," *Wear*, Vol. 261, No. 1, pp. 46-52, 2006.
- [8] Ingram, M., Spikes, H., Noles, J., Watts, R., "Contact properties of a wet clutch friction material," *Tribol. Int.*, Vol. 43, No. 4, pp. 815-821, 2010.
- [9] Kearsy, A., Wagner, D., "Carbon fiber for wet friction applications", *SAE Transactions*, Vol. 106, pp. 262-281, 1997.
- [10] Aphale, C. R., Schultz, W. W., Ceccio, S. L., "The influence of grooves on the fully wetted and aerated flow between open clutch plates", *ASME J. Tribol.*, Vol. 132, pp. 011104-7, 2009.
- [11] Gopal, P., Dharani, L. R., Blum, F.D., "Load, speed and temperature sensitivities of a carbon-fiber-reinforced phenolic friction material", *Wear*, Vol. 181-183, pp. 913-921, 1995.
- [12] Kim, H., Jeon, H. G., Chung, K. H., "Effect of sliding speed on wear characteristics of polyurethane seal", *Tribol. Lubr.*, Vol. 34, No. 2, pp. 49-54, 2018.
- [13] Archard, J. F., Hirst, W., "The wear of metals under unlubricated conditions", *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, Vol. 236, No.1206, pp. 397-410, 1956.