

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.3.015>

기밀소재 Graphite의 고온마모 특성에 관한 연구

양호영* · 김재훈**† · 하재석*** · 김연욱* · 박성한**** · 이환규****

Wear Properties of Seal Graphite at Elevated Temperature

Ho-Young Yang* · Jaehoon Kim**† · Jaeseok Ha*** · YeonWook Kim* · Sunghan Park**** · Hwanky Lee****

ABSTRACT

The graphites as airtight structure seals prevent high-pressure and high-temperature gas from flowing into actuator of propulsion system and generate lubricant film during wear procedure to assist lubricant and sealing. In this study, the tribological characteristics of the graphite in high-temperature are evaluated. In order to evaluate the tribological characteristics of high density graphite(HK-6), variables which are temperature, sliding speed and contact load are set. this study suggest optimized environment conditions through the wear properties of graphite. Consequently, high temperature is better than at room temperature to generate lubricant film, so that friction coefficient of graphite is lower at high temperature than at room temperature.

초 록

Graphite는 고온/고압의 가스가 추진기관 내의 구동장치에 유입되지 않게 기밀 소재로 사용되며, 마모 과정에서 윤활막을 형성하여 구조물 안에서 윤활과 기밀을 돕는다. 본 연구는 기밀 소재로 사용되는 Graphite의 고온 마모 시험을 통해 고온 마모 특성을 평가하였다. 고밀도 Graphite (HK-6)에 대하여 실제 작동환경에 기초 한 온도, 미끄럼 속도, 접촉 하중 조건에 따른 마모 특성을 평가 및 고찰하였다. 마모 표면 관찰을 통해 마모 메커니즘을 파악하고 고온 마모 특성을 통하여 최적화된 작동 환경 조건에 대하여 제안 하였다. 결과적으로, 상온에서 보다 고온 환경에서 윤활막 형성에 유리 하여 마찰 계수가 비교적 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

Key Words: Pintle(핀틀), Graphite(흑연), Wear(마모), Solid Lubricant(고체윤활제), Elevated Temperature (고온)

접수일 2012. 11. 27, 수정완료일 2013. 4. 18, 게재확정일 2013. 4. 24

* 학생회원, 충남대학교 기계설계공학과

** 중신회원, 충남대학교 기계설계공학과

*** 정회원, 국방과학연구소 7기술연구본부

**** 정회원, 국방과학연구소 4기술연구본부

† 교신저자, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23, 여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

고온 고압의 구조 내에서 고체윤활제 Graphite 소재는 온도조건에 따라 마찰 특성이 변화하게 된다. Graphite는 균일하고 안정된 윤

활막을 형성하여 기밀성, 내마멸성, 윤활이 우수하다. 또한 안정된 윤활막의 형성은 마모량의 감소와 마찰계수의 안정성을 향상시킨다. Graphite는 층상구조(Layer Structure)를 가지며, 각 층간 결합은 약한 Van der-Walls 결합을 이루고 있다. 이들 결합은 작은 전단응력에도 쉽게 분해되어 윤활제로서의 역할을 한다[1-3].

기밀구조의 소재로 사용되는 Graphite는 고온, 고압의 환경에서 기밀을 유지하기 위한 설계 변수로 공차를 이용한 억지 끼워 맞춤 설계를 하게 된다. 공차의 크기에 따라 구조 표면사이에 접촉 하중이 발생하게 된다. 또한 열팽창으로 인하여 소재 사이에 접촉압력이 형성되기도 한다. 이러한 고온 환경에서 마모가 발생한다. 마찰계면에 윤활막 형성과 유지를 위해서는 온도, 접촉 하중, 속도에 따라 마모 특성을 고려하여 설계하여야 한다[3-7].

본 논문은 고체윤활제인 Graphite 소재의 접촉 온도, 접촉하중, 미끄럼 속도에 따라 변화하는 마찰 마모 특성과 마모 메커니즘에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 고체윤활제(Solid Lubricant)의 특징

고체윤활제의 대표적인 Graphite 소재는 육각 판상의 구조로 고온, 진공 환경에서 우수한 마모 특성을 갖는다. 일정 온도 영역 내에서는 마찰계

수가 일정하고, 임계 온도와 접촉하중 이후에는 윤활막 전단이 발생한다[1, 2].

2.2 마찰계수와 비마모율(Specific Wear Rate)

마찰계수, 비마모율은 마모 특성을 나타낸다. 마찰계수 f_c 는 마찰 운동 중 마찰 계면에 발생하는 마찰하중 F_F 을 수직하중 F_N 으로 나눈 계수의 값으로 다음 식과 같다[6, 7].

$$f_c = \frac{F_F}{F_N} \quad (1)$$

비마모율은 재료간의 비교를 위하여, 마모량을 운동 거리와 하중의 값으로 나누어준 다음 식과 같다[6, 7].

$$W_s = \frac{Wear\ Loss}{Distance \times Load} (mm^3/Nm) \quad (2)$$

2.3 마모메커니즘(Wear Mechanism)

Figure 1과 같이 마모면 사이의 미세돌기와 접촉에 의하여 표면으로 마모입자가 이탈되는 현상을 연삭(Abrasive Wear)마모라고 한다.

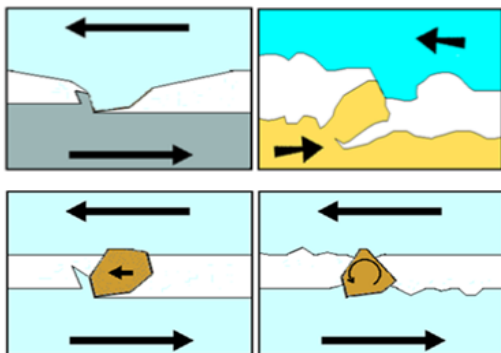


Fig. 1 Mechanism of Abrasion

3. 재료 및 시험 방법

3.1 시험 재료 및 시험편

Table 1, 2는 W-25Re 및 HK-6 소재에 대한

Table 1. Mechanical Properties of W-25Re

Density (g/cm^3)	Tensile Strength (MPa)	Poissons Ratio (GPa)	Shear Modulus	Shore Hardness
19.7	1370	0.290	159	43

Table 2. Mechanical Properties of HK-6

Density (g/cm^3)	Flexural Strength (MPa)	Shore Hardness	Grain Size (μm)
1.86	85	68	3

기계적 성질을 각각 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 W-25Re 재료는 핀틀에 사용되는 소재로써, 텅스텐 기반에 25%의 Re를 첨가한 합금으로 뛰어난 기계적 안정성과, 고온 강도/내마멸성이 좋다.

기밀 재료로 사용된 Graphite HK-6는 Tokai Carbon사에서 제작되었다. 건식 마모특성이 좋고, 동적 마찰 조건에서 안정적인 마찰계수를 확보하고, 광범위한 온도에서 가스나 액체의 투과를 방지하는 우수한 기밀능력을 갖는다.

3.2 시험 방법

마모시험은 상온에서부터 22, 250, 350 및 실제 기밀 소재 작동 환경인 485℃까지의 온도에 대하여 온도가 마모 특성에 미치는 역할을 분석한다. 실제 마모 변위 8 mm 에 대하여 0.016, 0.08, 0.16 m/s (1, 5, 10 Hz)의 미끄럼 속도와 25, 50, 75, 100 N의 접촉하중에서 시험하였다. 접촉하중은 핀틀 구조가 연소가스에 의해 받는 편심 하중의 영향을 고려하여 2.5~10 kg 범위의 하중을 설정하였다.

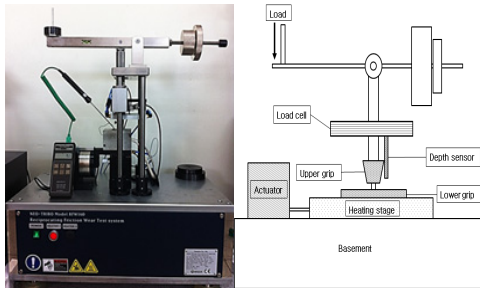


Fig. 2 Wear Test Machine (RFW-160)

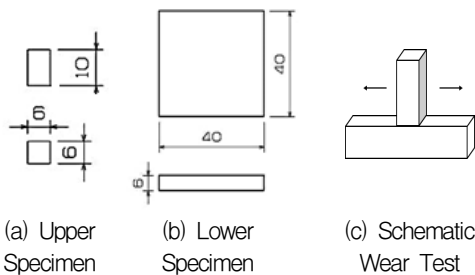


Fig. 3 Test Specimens and Schematic Wear Test

고온 마모 시험은 Fig. 2의 고온 왕복동 시험기를 이용하여 시험을 실시하고, 시험편은 Fig. 3과 같이 하부는 HK-6 소재를 판 형태로 제작하여 사용하였고, 상대재는 W-25Re으로 블록 형태로 시험편을 제작하여 Block-on-Block 형태의 마모 시험을 실시하였다. 마모과정 중 실시간 마모 깊이를 측정하여 마모 거동을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 속도에 따른 상온/고온 마모특성

Figure 4와 5는 상온(Room Temperature, RT)과 실제 기밀소재가 받는 485℃의 온도에서 하중 범위 50 N부터 100 N에 대하여 속도가 마찰계수 및 비마모율에 미치는 영향을 나타낸 것이

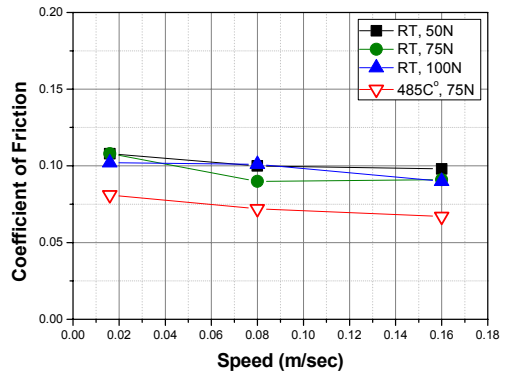


Fig. 4 Coefficient of Friction as a Function of Speed

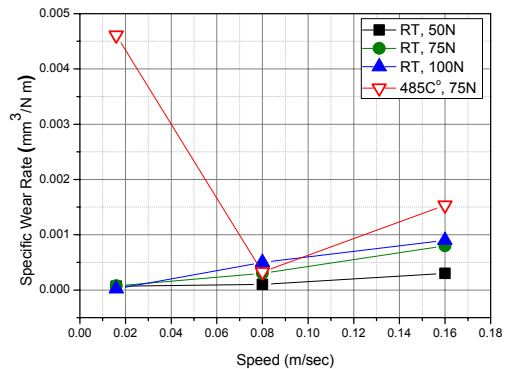


Fig. 5 Specific Wear Rate as a Function of Speed

다. 상온에서 하중의 증가에 따른 마찰속도의 영향은 최대하중 100 N까지 일정한 마모 특성을 나타내고, 485°C의 고온의 경우 상온의 마찰계수보다 20% 낮은 마찰계수를 나타낸다. 일반적으로 일정 고온의 영역에서 그래파이트는 마모과정에서 용접효과와 같은 응착이 용이해지며 응착 마모가 주로 일어나는 것으로 알려져 있다[8]. 마모 과정에서 생성된 마모 입자들은 마모 표면에 응착과 탈락을 반복하면서 윤활막을 형성하게 된다. 이러한 윤활막의 형성은 마모 표면의 관찰로 확인할 수 있으며, 이에 대한 결과를 마모 표면 관찰 결과에서 고찰한다.

Figure 5의 비마모율 결과는 0.08 m/s에서 가장 좋은 비마모율을 나타내고 있다.

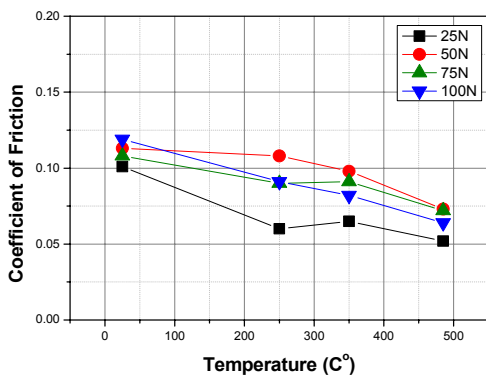


Fig. 6 Coefficient of Friction as a Function of Elevated Temperature

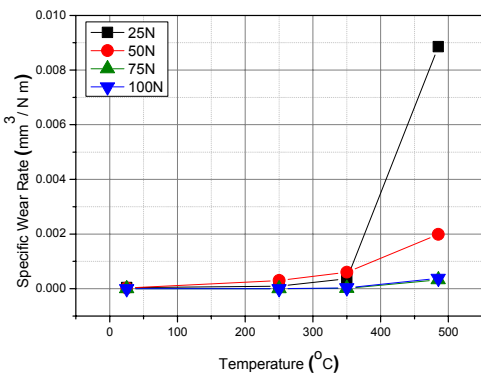


Fig. 7 Specific Wear Rate as a Function of Elevated Temperature

4.2 온도 상승에 따른 마모특성

Figure 6의 각 하중 조건의 온도 상승에 따른 마모 특성의 결과를 나타낸다. 온도가 상승함에 따라 마찰계수가 감소한다. 이는 고체윤활재의 윤활막 생성에 온도의 영향이 크다는 것을 알 수 있다[5]. Fig. 7의 비마모율 결과를 비교하면 400°C이하의 온도에서 비마모율은 일정하다. 400°C이상의 고온 485°C에서 하중이 감소함에 따라 비마모율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 Graphite가 400°C이상에서 산화가 급격히 발생함으로 인해 마모 특성이 변화하는 그래파이트 소재의 특성 때문이다[9]. 윤활 조건에 있어 25, 50 N의 저하중은 어려움이 있다는 것을 알 수 있다. 이에 반해 75, 100 N은 고온에서도 하중이 윤활 작용이 용이하여 비마모율이 우수하게 나타나는 것을 알 수 있다.

Figure 8과 9는 고온에서 시험된 속도에 따른 마모 표면의 관찰 사진과 상온에서 시험된 마모 표면의 사진이다. Fig. 8의 속도 변화에 대한 마모 표면을 관찰한 결과 고속 및 저속에 비해 중속인 0.08 m/s에서 비교적 윤활막이 잘 형성되었음을 확인하였으며, Fig. 9(b)의 상온 조건과도 상이하게 마모 표면에 응착된 윤활막을 확인할

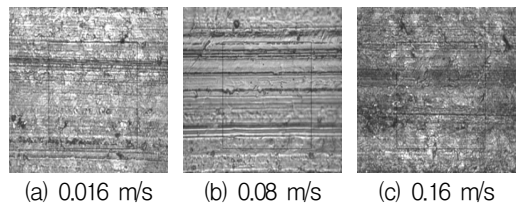


Fig. 8 SEM Photos of Worn Surface for HK-6 of Speed (485°C, 75 N)

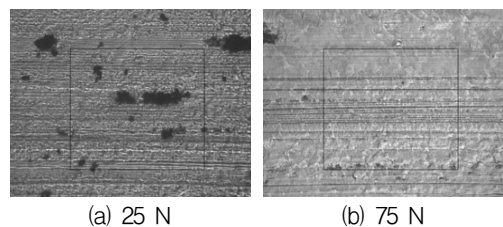


Fig. 9 SEM Photos of Worn Surface for HK-6 of Axial Load (0.08 m/s, RT)

수 있다. 상온보다 고온에서 윤활막이 잘 형성된 결과는 마찰계수의 결과와 관련되어 있으며, 형성된 윤활막은 접촉하중을 완화시켜 주고 이로 인해 마찰하중이 감소하여 상온보다 약 20% 낮은 마찰계수를 얻게 된다.

Figure 9(a) 25 N의 경우 마멸 입자들이 떨어져나가 움푹 패인 곳이 관찰 된다. 이는 적은 접촉하중에서 마멸된 Graphite 입자들이 윤활막 형성에 어려움이 있는 것을 나타내고, Fig. 9(b) 75 N의 적정 하중조건인 경우 마멸된 입자들이 마찰표면에 응착마모를 일으켜 윤활막 형성을 돕는 다는 것을 알 수 있다.

4.3 하중에 따른 상온/고온 마모특성

하중에 따른 마모특성을 상온과 고온을 비교해본결과 두 온도 조건 모두 100 N 이후의 하중에서 마모 특성의 변화를 나타냈다. Fig. 10의

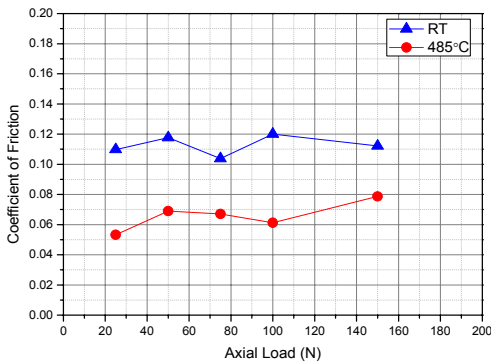


Fig. 10 Coefficient of Friction as a Function of Load

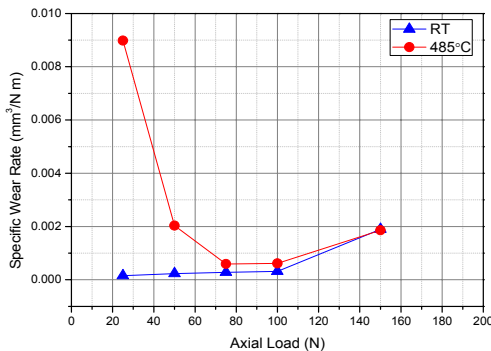


Fig. 11 Specific Wear Rate as a Function of Load

고온의 마찰계수는 상온에 비해 고온이 20% 낮게 나타나고 있다.

Figure 11의 하중에 따른 비마모율을 비교한 결과 상온의 경우 임계하중 이전의 비마모율이 일정하게 나타나고, 고온의 경우 75, 100 N 하중 영역에서 안정화를 보이는 것을 나타낸다. 이는 고온, 일정 하중 조건에서 윤활막의 형성이 유리하여 비마모율이 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

Figure 12의 485°C, 75 N에서의 마찰면을 50 배로 확대 해본결과 응착으로 인한 윤활막이 형성되었다는 것을 알 수 있다.

4.4 마모특성을 고려한 최적 설계조건 제시

Figure 13 온도와 속도 및 접촉하중 조건에 따른 비마모율을 나타낸 것이다. 비마모율이 적은 영역은 마모량이 적다는 것을 의미한다. 기밀성을 유지해야하는 구조에서 마모량은 기밀과 중요한 상관관계에 있다. 그래프 상에서 온도와 속

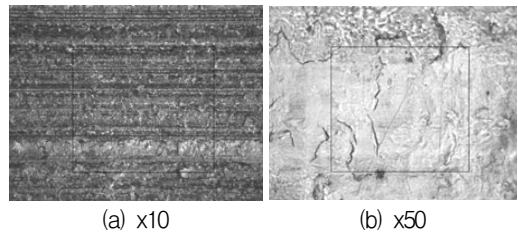


Fig. 12 SEM photos of Worn Surface for HK-6 of Load at 485°C, 75 N

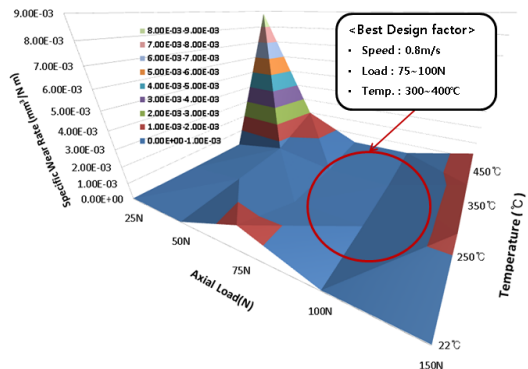


Fig. 13 Optimum Design Conditions

도 및 접촉 하중을 고려하여 비마모율 결과값이 가장 낮게 나타나는 조건이 최적 조건이다. 결론적으로, 비마모율과 윤활막 생성의 최적의 조건은 마모특성이 균일한 300~400℃의 온도영역에서 구동기의 왕복동 속도를 0.08 m/s 제안하고, 열팽창과 공차를 고려하여 접촉하중을 75~100 N로 제안하는 것이 고온/고압의 환경에서의 기밀 유지가 유리하다.

5. 결 론

본 논문은 동적 기밀소재의 온도, 속도, 접촉 하중 조건에서의 마모특성을 평가하고, 마모특성에 따른 최적안의 설계조건에 대하여 연구한 결과 다음과 같다.

- (1) 속도에 따른 상온/고온 마모시험평가의 결과 상온의 경우 하중 조건의 결과 속도의 큰 영향이 없다. 고온, 고속의 경우 윤활막의 생성이 어렵다. 0.08 m/s의 조건에서 윤활막 생성의 최적 조건이다.
- (2) 온도에 따른 마모의 영향을 살펴본 결과 온도 조건은 고체윤활제의 윤활막 생성에 도움을 주고, 400℃이상의 온도에서 산화에 의해 HK-6의 마모 특성이 변한다.
- (3) 하중에 따른 상온/고온 마모 시험평가의 결과 HK-6의 마모에 대한 임계하중 값은 100 N이고, 상온에서는 100 N까지 유사한 마모 특성을 나타낸다. 고온의 75~100 N이 윤활막 생성의 적정 하중이다.
- (4) 비마모율과 윤활막 생성의 최적의 조건은 속도 0.08 m/s, 하중 75~100 N, 온도 300~400 ℃의 조건이 최적안의 설계조건으로 제시된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약

번호 UD110093CD)

참 고 문 헌

1. Kim, S. J., Cho, M. H., Cho, K. H., and Jang, H., "Complementary Effects of Solid Lubricants in the Automotive Brake Lining," *Tribology International*, Vol. 40, 2007, pp.15-20
2. Singer, I. L. and Pollock, H. M., Editors, "Solid Lubrication Processes in Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Processes," London: Kluwer Academic Publishers, 1992, pp.237-261
3. Michale, N. G., "The Synergistic Effects of Graphite on the Friction and Wear of MoS₂ Films in Air," *Tribology Transactions*, Vol. 31, 1987, pp.214-227
4. Donald, H. B., *Surface Effects in Adhesion, Friction Wear, and Lubrication*, Elsevier Scientific Publishing Co., 1981, pp.569-583
5. Allam, I. M. "Solid Lubricants for Applications at Elevated Temperatures," *Journal of Materials Science*, Vol. 26, 1991, pp.3977-3984
6. 이한영, *마찰마모공학*, 초판, 태일사, 2005
7. 문한규 외, *재료시험법*, 한국 표준 연구소, 1987
8. Chen, B. M., "Tribological Properties of Solid Lubricants (Graphite, H-BN) for Cu-based P/M Friction Composites," *Tribology International*, Vol. 41, 2008, pp.1145-1152
9. Cho, K. Y., "Oxidation Behavior of Nuclear Graphite(IG110) with Surface Roughness," *Journal of Korean Ceramic Society*, Vol. 43, No. 10, 2006, pp.613-618