

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.5.095>

고체윤활 Graphite 소재의 마모 특성에 관한 연구

양호영^a · 김재훈^{a,*} · 김연욱^a · 하재석^a · 박성환^b · 이환규^b

A Study on Wear Properties of Solid lubricating Greaphite Materials

Hoyoung Yang^a · Jaehoon Kim^{a,*} · Yeonwook Kim^a · Jaeseok Ha^a ·
Sunghan Park^b · Hwankyuu Lee^b

^aDepartment of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Korea

^bAdvanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

ABSTRACT

The important design factors for designing solid lubricating of dynamic seal are tightness, wear resistance and lubricant films. In this study, the effect factors influenced solid lubricating properties of the graphite were analyzed and wear behaviour caused for various test conditions was compared with results obtained from reciprocating wear tests. Also the optimal conditions for formation of lubricant films were investigate to evaluate wear properties of graphite materials. The repeated procedure for the formation of wear particles and lubricant films, and the dissipation of lubricant films was estimated the wear mechanisms with changes of wear depth. Therefore the lubricant film of graphite seal was generated by adhesion of wear particles on the worn surface and it was very useful in wear characteristics.

초 록

동적 기밀구조에 사용되는 고체윤활재의 선택에 있어 중요 설계 변수들은 기밀성, 내마멸성, 윤활막의 형성 등이 있다. 본 연구에서 그래파이트의 고체윤활 특성에 영향을 미치는 영향인자들이 분석되었고 다양한 시험 조건들에 대하여 발생하는 마모거동이 왕복동 마모시험으로부터 얻은 결과들과 비교되었다. 또한 윤활 막들의 생성에 대한 최적조건들이 그래파이트 소재의 특성들을 평가하기 위하여 조사되었다. 마멸입자의 생성, 윤활 막의 생성, 윤활 막의 소멸의 과정을 반복하는 과정이 마모 깊이의 변화와 통하여 마모 메커니즘을 평가하였다. 따라서 그래파이트 씰의 윤활막은 마모된 표면에 마모 입자들의 응착에 의해 발생한 윤활막이 발생되었고 이는 마모특성에 매우 유용하였다.

Key Words: Pintle(핀틀), Graphite(흑연), Wear(마모), Solid lubricant(고체윤활제)

Received 2 December 2012 / Revised 9 September 2013 / Accepted 15 September 2013

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

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

1. 서 론

고고도 미사일 요격을 위해서는 고고도에서

Kill Vehicle(KV)의 궤도와 자세를 정밀하고 신속하게 제어할 필요가 있다. KV의 궤도와 자세 수정을 위해서는 여러 개의 추력기로 구성된 DACS (Divert and Attitude Control System)이 필요하다. 이러한 DACS에는 고온 고압의 연소 가스를 지속적으로 제어 가능하도록 구동기로 작동되는 연속 가변형 추력 제어용 노즐이 장착된다. 이러한 추력 제어용 노즐은 핀틀의 왕복동을 이용하여 노즐 목 면적 조절을 통해 추력을 조절하며, 핀틀 구조를 적용한 노즐은 초고온, 고압 환경에 노출되므로, 구동기가 고온 고압의 가스의 영향을 받지 않게 기밀을 확보하는 것이 중요하다[1,2].

동적 기밀 구조에 사용되는 고체윤활제의 마찰특성은 표면에 형성되는 윤활막의 특성에 크게 영향을 받는다. 균일하고 안정된 윤활막 형성은 마모량 감소와 마찰계수의 안정성을 향상시킨다[3-6].

윤활막의 형성을 좌우하는 주된 인자는 고체윤활제(solid lubricant), 응착(adhesion) 등이 있다. graphite는 층상구조(layer structure)를 가지며, 각 층간 결합은 약한 Van der-Walls 결합을 이루고 있다. 이들 결합은 작은 전단응력에도 쉽게 분해되어 윤활제로서의 역할을 하며, 흑연은 상대적으로 습도가 높은 상온에서 향상된 윤활 효과를 나타낸다. 또한 마찰 계면의 습기, 탄화수소등과 함께 더욱 더 향상된 윤활 효과를 나타낸다[7-9].

응착에 의한 윤활막의 성장은 마찰표면의 흠에 마찰제로부터 분리된 성분(transferred particles)이 압축응력에 의해 물리적으로 채워지거나(physical trapping) 온도상승에 따른 각 구성 성분간의 화학작용으로 이루어지게 된다[10].

윤활막의 형성에 미치는 영향으로 표면 거칠기의 정도가 작을수록 윤활막 형성에 유리하나 거칠기가 매우 작은 매끈한 표면의 경우 오히려 윤활막의 형성에 적합하지 않으며, 마모량의 증가를 수반하는 것으로 알려져 있다[11].

윤활막의 파괴는 마찰시 지속적으로 윤활막에 가해지는 열응력, 전단응력, 압축응력 등에 의해 윤활막 형성에 기여하는 성분인 고체 윤활제가

열분해 되어 발생하거나 결합제로 사용되는 페놀수지가 열적 손상을 받아 구성 원료간의 결합력을 약화(loss of cohesion)를 초래하여 발생하기도 한다[12].

본 연구에서는 DACS구조 기밀 재료로 선정된 graphite의 윤활막 현상이 마찰특성에 미치는 영향과 마모 과정동안의 윤활막 형성과 파괴에 대한 고찰을 연구하였다.

2. 이론적 배경

2.1 고체윤활제 (solid lubricant)의 특징

고체윤활제의 대표적인 graphite 소재는 육각 판상의 구조로 고온, 진공 환경에서 우수한 마모 특성을 띄고 있다. 일정 온도 영역 내에서는 마찰계수가 일정하고, 임계 온도 이후에는 윤활막 전단이 발생한다[3,4].

2.2 마찰계수와 비마모율(Specific wear rate)

마찰계수, 비마모율은 마모특성을 나타낸다.

마찰계수 f_c 는 마찰 운동 중 시험편의 계면에 작용하는 마찰 하중 F_F 를 수직 하중 F_N 으로 나눈 무차원의 값으로 다음식과 같다.

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

비마모율은 재료간의 비교를 위하여, 마모량을 운동 거리와 하중의 값으로 나누어준 다음 식과 같다[13].

$$W_s = \frac{\text{wear loss}}{\text{distance} \times \text{load}} (\text{mm}^3/\text{Nm}) \quad (2)$$

3. 재료 및 시험 방법

3.1 시험 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 상대재로는 핀틀에 사용되는 W-25Re로써, 텅스텐 기반에 25%의 Re을 첨가한 합금으로 뛰어난 기계적 안정성과, 고

Table 1. Mechanical properties of W-25Re.

Density (g/cm^3)	Tensile strength (MPa)	Poissons ratio (GPa)	Shear modulus (G)	Shore hardness (Hs)
19.7	1370	0.290	159	43

Table 2. Mechanical properties of graphite.

Material	Density (g/cm^3)	Flexural strength (MPa)	Shore hardness (Hs)	Grain size (μm)
HK-6	1.86	85	68	3
ATJ	1.76	32.8	46	25

은 강도/내마멸성이 좋다. Table 1은 W-25Re 소재의 기계적 성질을 나타내는 표이다.

고체 윤활제는 건식 마모 특성이 좋고, 동적 마찰 조건에서 안정적인 마찰계수를 확보하고, 광범위한 온도에서 가스나 액체의 투과를 방지하는 기밀능력을 갖는다. 선정된 고밀도 고체 윤활 graphite (HK-6)를 하중조건과 온도조건의 변화에 따른 마모시험을 통하여 마모거동을 살펴본다. 또한 밀도차이와 입자 크기에 따른 윤활막 생성거동을 비교하기 위해 ATJ graphite 소재를 선택하였다. Table 2의 ATJ와 HK-6의 밀도, 경도, 입자 크기 등을 나타낸 것이다. 밀도, 경도, 입자의 크기가 윤활막 형성에 어떤 차이를 주는 지 평가한다.

3.2 시험 방법

소재에 따른 윤활막 형성 조건을 비교하기 위해 상온에서 마모 시험을 실시하였고, 왕복동 폭을 8mm로 정하여 5 Hz로 속도를 정하여 하중 변화에 따른 윤활막 형성 시험을 실시하였다. 마모 시험은 Fig. 1의 왕복동 마모 시험기를 이용하였다. 시험편은 Fig. 2와 같이 하부는 HK-6, ATJ 소재를 판형태로 제작하여 사용하였고, 상대재는 W-25 Re으로 블록 형태로 시험편을 제작하여 시험을 실시하였다. Fig. 3은 마모과정 중 비접촉 선형센서(MS-40)을 이용하여 하부시험편의 마모로 발생하는 마모 깊이의 변화를 엔코더를



Fig. 1 Wear test machine (RFW-160).

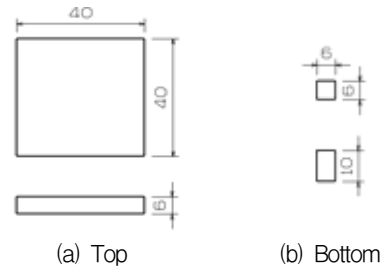


Fig. 2 Test specimens.

이용하여 실시간 깊이 변화를 측정하여 마모 거동을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 마찰계수의 거동

Fig. 4의 하중변화에 따른 각 소재의 마찰계수의 거동을 비교해본결과를 나타낸다. 고밀도의 HK-6가 ATJ에 비하여 마찰계수가 높게 나타난다. 25 N에서의 두 소재의 마찰계수에 대한 차이는 거의 없으며 하중이 증가함에 따라 마찰계수의 차이가 크게 나타난다. 이는 Table 2의 입자 크기와 연관이 있다.

윤활막 생성의 조건인 온도, 하중 조건에서 온도를 제외한 하중조건만 고려하였을 때, 입자의 크기가 약 1/8로 작은 HK-6가 윤활막 생성에 어려움이 있다. Fig. 5는 25 N 접촉 하중 조건에서의 마모 표면의 미세조직을 관찰한 사진이다.

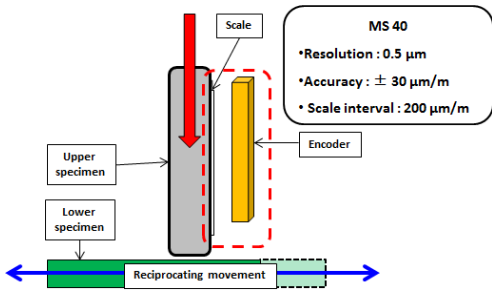


Fig. 3 Description for MS40 wear depth measurement sensor.

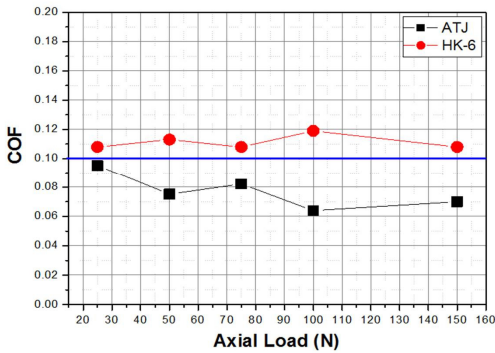
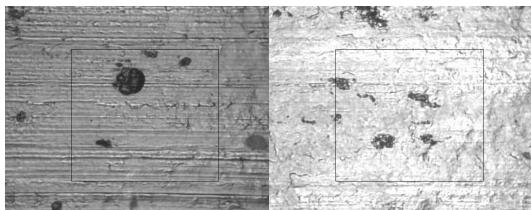


Fig. 4 Coefficient of friction as a function of axial load.



(a) HK-6 (b) ATJ

Fig. 5 Magnified photos of worn surface for HK-6 and ATJ (axial load, 25 N, x50).

마모 표면의 비교 결과 ATJ가 윤활막 생성이 잘 이뤄진 것을 볼 수 있다.

4.2 마모량을 고려한 비마모율 비교

Fig. 6 마모량을 고려한 두 소재의 비마모율을 비교한 결과이다. ATJ의 비마모율이 HK-6보다 높게 나타난다. 그 원인은 두 소재의 밀도차이에 따른 강도와 경도에 상관성이 크다. 상대적으로 밀

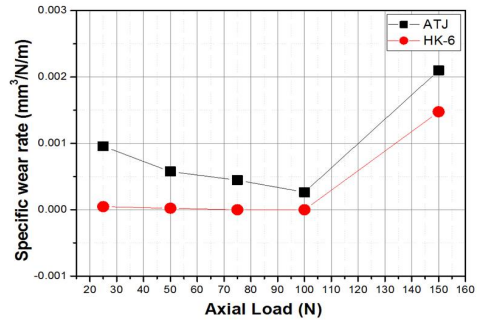


Fig. 6 Specific wear rate as a function of load (ATJ, HK-6).

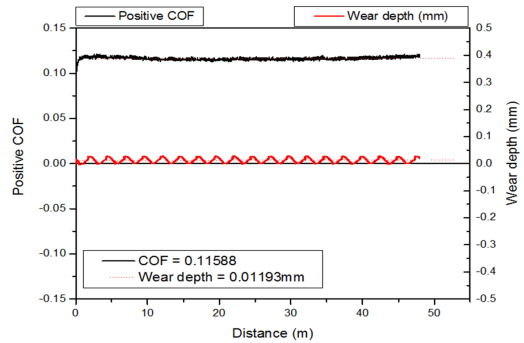


Fig. 7. Results of positive COF and wear depth for HK-6 tested on 75 N, 1Hz at RT.

도가 적고, 경도가 약한 소재의 경우 내마모성이 작기 때문에 마멸이 쉽게 일어나기 때문이다.

Fig. 6의 결과 중 100 N의 하중 조건을 살펴보면 두 소재의 비마모율 차이가 가장 적게 나타난다. 일정 하중 조건은 마모과정 중 발생하는 마모 입자들의 윤활막 생성에 도움을 주기 때문이다.

4.3 윤활막 생성과 소멸의 거동

Fig. 7은 HK-6의 윤활막 형성에 대한 마모값이 변화를 관찰하기 위하여 기존의 5 Hz의 미끄럼 속도에서보다 정확한 결과를 얻기 위해 저속 1 Hz의 미끄럼 속도에서 마모 시험을 진행한 결과를 마찰계수의 결과와 함께 비교하여 나타낸 것이다. 마찰계수는 75 N의 하중조건에서 윤활막의 생성과 일정시간 후에 안정화된 마찰계수를 갖는다. 비접촉 선형센서에 의해 1 Hz 속도

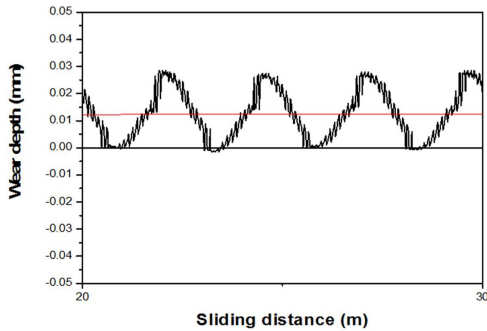
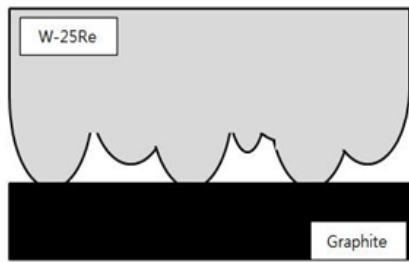
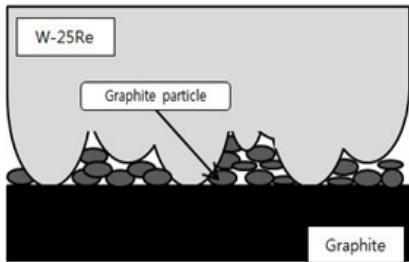


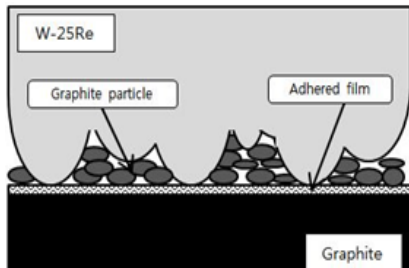
Fig. 8. Magnified results of wear depth for HK-6 tested on 75 N, 1 Hz at RT.



(a) Step 1



(b) Step 2



(c) Step 3

Fig. 9 Schematic illustration of adhered films, wear particle between contact surface.

로 실시간 측정된 마모깊이의 변화를 관찰해본 결과로부터 고속에서는 나타나지 않는 미끄럼 거리에 따른 주기적인 거동을 확인하였다. Fig. 8는 wear depth 결과의 20~30 m 구간을 확대한 그래프이다. 마모깊이는 초기 기저면 0에서 0.03 mm범위에서 주기로 반복하고 있다. 이는 윤활막 생성과 윤활막의 소멸의 반복이 주기적으로 반복하고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 9는 초기 접촉, 마모 입자의 생성, 윤활막의 생성의 과정을 도식화한 것이다. Fig. 9(a)는 초기 두 접촉면 사이 마모가 이루어지지 않은 과정을 나타낸 것이고, Fig. 9(b) 과정은 왕복동 마멸로 인한 graphite 입자의 생성을 나타낸 것이다. Fig. 9(c)는 생성된 마멸입자들이 일정하중 조건에서 윤활막이 형성된 것을 나타내고 있다. 고체윤활제 graphite는 이러한 3과정을 주기적으로 반복하는 거동을 나타낸다고 예측할 수 있으며, 마모 과정에서 발생하는 윤활막의 소멸, 생성의 과정에 대한 구체적인 현상은 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

5. 결 론

본 논문은 고체윤활제 graphite의 마모 특성에 관한 연구로 하중에 따른 마모과정 동안의 거동을 연구로 그 결과는 다음과 같다.

- (1) HK-6와 ATJ의 입자의 크기에 따른 마찰계수를 비교해본 결과 약 8배 큰 입자의 크기를 가진 ATJ소재가 윤활막 형성에 유리하다.
- (2) 마모량을 고려한 비마모율의 차이는 밀도와 경도가 높은 HK-6가 내마모성이 좋다. 하중에 따른 결과를 고찰한 결과 100 N의 하중 조건이 윤활막 생성에 유리한 하중 조건이다.
- (3) 고체윤활제 graphite는 윤활막으로 인한 마찰계수의 안정화를 유지한다. 저속 마모 시험을 통해 확인한 결과, 마모 거리에 따라 윤활막의 형성과 소멸을 반복하는 주기적 거동을 보이며 윤활막 생성주기에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 진심으로 감사를 드립니다.

References

1. Wilbeck, J.S., Herwig, S.B., Kilpatrick, J.M., Faux, D.R., Weir, R.J., Hertel, E.S. and Dutta, M.K., "Hypervelocity impact of spaced plates by a mock kill vehicle," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 26, pp. 853-864, 2001.
2. Kim, S.S., Huh, H.I. and Lee, H.S., "Patent review on drive mechanism of multi-axis pintle thrusters," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2012 KSPE Spring Conference, pp. 262-267, 2012.
3. 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, pp. 15-20, 2007.
4. Singer, I.L. and Pollock, H.M., Editors, "Solid lubrication processes in fundamentals of friction: macroscopic and microscopic processes," *London: Kluwer Academic Publishers*, pp. 237-261, 1992.
5. Michale, N.G., "The synergistic effects of graphite on the friction and wear of MoS₂ Films in Air," *Tribology Transactions*, Vol. 31, pp. 214-227, 1987.
6. Donald, H.B., "Surface effects in adhesion, friction wear, and lubrication," *Elsevier science*, pp. 569-583, 1981.
7. Bowden, F.P. and Tabor, D., "The Friction and lubrication of Solids," *Oxford University Press*, pp. 186-199, 1964.
8. Lansdown, A.R., "Molybdenum Disulphide Lubrication," *Elsevier science*, 1999.
9. Kim, S.J., Choi, N.C. and Jang, H., "Effect of humidity on friction characteristics of automotive friction material," *Journal of the Korean society of tribologists and lubrication engineers*, Vol. 28, pp. 323-329, 1998.
10. Lancaster, J.K., "Transfer Lubrication for High Temperatures," *Journal of Tribology*, Vol. 107, pp. 437-443, 1985.
11. Ramachandra, S. and Ovaert, T.C., "The Effect of Controlled Surface Topographical Features on the unlubricated Transfer and Wear of PEEK," *Wear*, Vol. 206, pp. 94-99, 1997.
12. Allam, I.M. "Solid lubricants for applications at elevated temperatures," *Journal of materials science*, Vol. 26, pp. 3977-3984, 1991.
13. Juri, P., Mart, V. and Sergei, L., "Friction and dry sliding wear behaviour of cermets," *Wear*, Vol. 260, pp. 815-824, 2006.