

## 고온차단 기밀용 그래파이트의 고온 미끄럼마모 특성 평가<sup>§</sup>

김연욱\* · 김재훈\*<sup>†</sup> · 양호영\* · 박성한\*\* · 이환규\*\* · 김범근\*\*\* · 이성범\*\*\* · 곽재수\*\*\*\*

\* 충남대학교 기계설계공학과, \*\* 국방과학연구소,  
\*\*\* 인제대학교 기계자동차공학부, \*\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

### Sliding Wear Properties of Graphite as Sealing Materials for Cut off Hot Gas

YeonWook Kim<sup>\*</sup>, JaeHoon Kim<sup>\*†</sup>, HoYeong Yang<sup>\*</sup>, SungHan Park<sup>\*\*</sup>, HwanKyu Lee<sup>\*\*</sup>,  
BumKeun Kim<sup>\*\*\*</sup>, SeungBum Lee<sup>\*\*\*</sup> and JaeSu Kwak<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> School of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ., <sup>\*\*</sup> Agency for Defense Development,  
<sup>\*\*\*</sup> Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Inje Univ.,  
<sup>\*\*\*\*</sup> Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.

(Received March 29, 2013 ; Revised September 10, 2013 ; Accepted September 12, 2013)

**Key Words:** Sealing Materials(기밀 소재), Graphite(그래파이트), Wear Debris(마모 입자), Solid Lubricant(고체 윤활제), Third Body(표면 응착층), Elevated Temperature(고온)

**초록:** 고온의 가스유로를 조절하는 개폐식(On-Off)밸브의 구동축과 라이너 사이에 위치하여 구동장치로의 고온 가스유입을 방지하는 기밀 소재에 대하여 연구하였다. 기밀 소재로 사용된 그래파이트(Graphite)는 구동장치에 의한 구동축의 지속적인 움직임으로 인해 마모가 발생한다. 본 논문은 고온가스 조절 밸브 내의 기밀 소재로 사용된 그래파이트(Graphite, HK-6)에 대한 상·고온 마모 특성을 평가하였다. 구동축의 소재인 레늄합금(W-25Re)에 대하여 그래파이트의 마모 시험을 수행하고 마찰계수와 비마모율을 비교하였다. 상온과 실제 작동 환경인 고온 485℃에서 미끄럼속도와 접촉하중의 변화에 따른 마찰계수와 비마모율을 평가하였다. 마모표면의 SEM 분석을 통하여 상·고온 마모표면에 관찰되는 third body 를 확인하고 이로 인한 윤활효과를 고찰하였다.

**Abstract:** Sealing structure to prevent flowing hot gas into the driving device, located between the driving shaft and the liner of On-Off valve for controlling the hot gas flow path was studied. Wear occurs due to the constant movement of the driving shaft controlled by actuator on graphite as the sealing material. In this paper, the dynamic wear behavior in high temperature of graphite(HK-6) to be used as sealing material was evaluated. Reciprocating wear test was carried out for the graphite(HK-6) to the relative motion between shaft materials(W-25Re). The results of friction coefficient and specific wear rate according to contact load, sliding speed at room temperature and 485℃ considering the actual operating environment were evaluated. Through the SEM analysis of the worn surface, third body as lubricant films were observed and lubricant effect of third body was considered.

- 기호설명 -

- $\dot{w}$  : 비마모율
- $\Delta m$  : 손실 질량,
- $\Delta t$  : 시험시간
- $v$  : 속도
- $\rho$  : 밀도

### 1. 서론

개폐식(On-Off) 밸브는 유체 또는 기체의 유로나 그 입구를 개폐하는 방식으로 유량을 조절하여 유량, 압력, 온도를 조절하는 제어 밸브 중 구현이 용이하고 구동기의 작동에 요구되는 에너지 소모의 효율성 때문에 산업시설에 다양하게 응용되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 유로의 개방과 차단은 라이너(Liner)를 따라 구동되는 구동축(Driving shaft)에 의해 이뤄지며 구동축은 구동장치(Actuator)로 제어된다. 가스터빈이나 엔진 등과 같이 500℃ 이상의 고온 가스를 제어하는 구조

§ 이 논문은 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2013년도 춘계 학술대회 (2013. 4. 25.-26., 디오션리조트) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

물은 고온의 영향으로 인해 제어 장치의 오작동이나 파손을 방지하기 위한 구조가 필요하다. 이러한 열적 문제를 해결하기 위해 구동축과 라이너 사이에는 고온 환경으로부터 기밀(Sealing)을 유지할 수 있는 구조가 요구된다. 기밀 구조의 소재는 고온 환경으로부터 구조물의 제어 장치를 안전하게 유지할 수 있어야 하며 또한, 기밀 소재와 구동축 사이의 끼워맞춤이나 열팽창 그리고 구동축의 구동에 의해 지속적인 마모가 발생하기 때문에 소재의 내마모성 역시 고려되어야 한다.

본 논문에서 기밀 소재로 연구된 그래파이트(Graphite) 소재는 고온에 의한 변성이 적고, 열흡수와 열분해가 우수하며 고체윤활제로써 마모 과정에서 윤활막을 형성하여 안정적인 마모 특성을 갖는 등의 내마모성이 뛰어나 다양한 산업분야에서 마찰 마모기구로 사용되고 있다.<sup>(3)</sup>

본 논문은 고온가스 조절 밸브 내에서 기밀 소재로 사용되는 그래파이트의 미끄럼마모 특성에 관하여 연구하였다. 상온과 실제 작동환경인 고온 환경에서 접촉하중 및 미끄럼속도 조건을 다르게 하여 왕복동 마모시험을 수행하고 변화하는 그래파이트의 미끄럼마모 특성에 대하여 고찰하였다.

## 2. 재료 및 시험 방법

### 2.1 재료 및 시편

고체 윤활제의 대표적인 그래파이트 소재는 육각 판상의 구조로 층상의 C-C 결합에 비해 층위 사이의 van der Waals 결합력이 약해 판상을 따라 전단이 쉽게 일어나며, 마모 과정에서 생성되는 입자들은 점점 작아지게 되어 third-body contact 에 유리해 진다. 마모 과정에서 생성된 마모 입자들이 접촉면에 효과적으로 채워지게 되고 이러한 잔여물들은 지속적으로 단단하고 조밀한 윤활막을 형성하게 됨으로써 마모에 대한 저항성 향상에 도움을 준다. 또한, 그래파이트는 일정 온도 영역 내에서는 마찰계수가 일정하고, 임계온도와 접촉 하중 이 후 에는 윤활막의 전단이 발생한다.<sup>(4)</sup> 그래파이트의 구조를 Fig. 1 에 나타냈다.

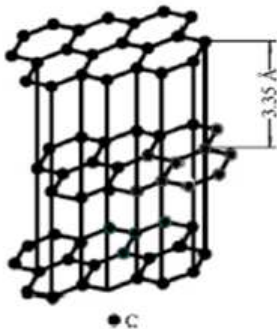


Fig. 1 The structure of a general graphite

미끄럼마모 특성 평가 소재로 사용된 그래파이트는 Tokai carbon 社에서 제공하는 HK-6 를 사용하였다. HK-6 는 극초미세 결정립 그래파이트로 건식 마모 특성이 좋고, 동적 마찰 조건에서 안정적인 마찰계수를 확보한다. 또한 고온에 대한 내성이 강하며, 광범위한 온도에서 가스나 액체의 투과를 방지하는 우수한 기밀능력을 갖는다.<sup>(5)</sup>

Table 1 에 HK-6 의 기계적 성질을 나타냈다.

상대재인 W-25Re 는 텅스텐을 기반으로 한 레늄 합금이다. 3,050℃에서 용융하고 1900℃에서 재결정하는 과정에서 합금의 강도와 가소성, 용접성을 개선시키고 금속의 재결정 취성을 상당 부분 감소시킨다. 또한, 열전도도와 고온강도가 우수하기 때문에 2000~2400℃의 온도범위에서 알려져 있는 금속 중 가장 강한 금속 재료로 항공 및 추진기관에 사용되는 금속이다.<sup>(6)</sup>

Table 2 에 W-25Re 의 기계적 성질을 나타냈다.

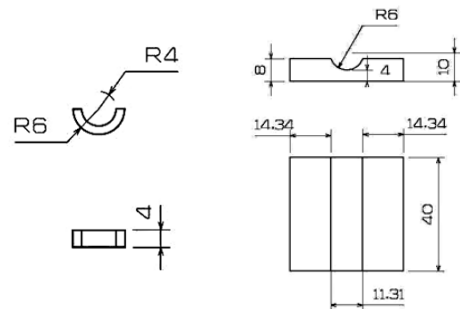
시편의 형상은 Fig. 2 와 같이 레늄 합금 소재(W-25Re)의 상부 시편은 반지름이 6 mm 인 반원의 형태이고, 그래파이트 소재(HK-6)의 하부 시편은 사각 블록에 원형의 홈이 파여 홈을 따라 상부 시편이 마모 운동을 할 수 있도록 실제 작동환경을 고려하여 제작하였다.

Table 1 Mechanical properties of HK-6

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Flexural strength (MPa)	Grain size (μm)	Shore Hardness (Hs)
1.86	85	3	68

Table 2 Mechanical properties of W-25Re

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)	Poisson ratio	Shear Modulus (MPa)	Shore Hardness (Hs)
19.7	1370	0.29	159	43



(a) Upper specimen (b) Lower specimen

Fig. 2 Schematic diagram of test specimens

2.2 왕복동 마모 시험(Reciprocating wear test)

기밀 소재인 그래파이트와 상대재 사이에서 발생하는 마모를 모사하기 위해 고온 왕복동 시험기 (Fig. 3, Reciprocating friction wear tester, RFW-160) 를 이용하여 시험하였다. 상·하부 시편에 대한 지속적인 미끄럼마모를 발생시키는 방식으로 마모시험은 온도, 미끄럼속도, 접촉하중에 따른 영향을 분석한다. 시험 온도는 상온과 실제 기밀 소재의 작동 환경인 고온 485°C에서의 온도에 따른 영향을 분석하고, 마모 변위 4 mm 에 대한 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz 의 미끄럼속도 각각 0.04, 0.08, 0.12 m/s 에 대하여 고온가스에 의해 발생하는 편심 하중을 고려한 접촉하중 100 N, 150 N, 200 N 의 범위에 대하여 시험을 수행하였다. 마모 시험 중 실시간으로 마모 깊이와 마찰하중이 측정되어 도출되는 결과 값을 분석하여 마모 거동을 분석하였다.

일반적으로, 마찰 마모 특성을 나타낼 때 마찰계수(friction coefficient)와 비마모율(specific wear rate)로 비교한다. 마찰계수  $f_c$  는 소재의 계면에 작용하는 마찰하중  $F_F$  에 대한 수직하중  $F_N$  의 비를 나타낸다. 식으로 나타내면 다음과 같다.

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

비마모율  $\dot{w}_s$  은 소재간의 마모 정도를 비교하기 위한 값으로, 마모량에 대한 미끄럼 거리와 수직하중의 값으로 다음의 식과 같다.

$$\dot{w}_s = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{1}{\nu p F_N} \quad (2)$$

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 마모 시험 후 표면 조도 변화

Fig. 4 는 시험 전과 상온 및 고온 485°C에서 마

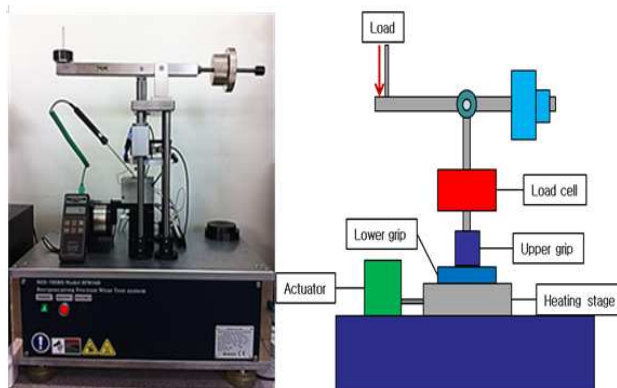


Fig. 3 The Reciprocating wear tester, RFW-160

모 시험 후, 마모흔에 대한 표면조도를 측정하는 것이다. 표면조도 측정은 ISO1997 규격에 따라 측정거리 4 mm 에 대하여 기준거리 0.8 mm 로 각 3 번씩 측정하여 평균값으로 정리하였다. 시험 전의 그래파이트 소재인 하부 시편의 표면조도는 평균적으로 Ra 0.4  $\mu\text{m}$  이며 상부 시편은 연마지 1000 번으로 연마하였다. 상온에서 수직 하중 200 N, 미끄럼 속도 0.08 m/s (5 Hz)에서 시험된 마모 표면의 조도는 Ra 0.2  $\mu\text{m}$  이고, 같은 조건의 고온 485°C에서 시험된 마모 표면의 조도 역시 비슷한 결과인 약 Ra 0.2  $\mu\text{m}$  로 나타났다. 마모가 진행된 후, 거친 표면이 좀 더 평탄해졌음을 알 수 있다. 또한, 시험 후에 표면에 생긴 마모흔은 상온의 것에 비해 고온 485°C에서 시험된 시편의 마모흔은 색이 탁하고 어둡다. 이러한 이유는 그래파이트가 400°C 이상에서 산화가 급격히 진행되기 때문이며 산화로 인해 표면의 마모흔이 상온의 것과 다르다.<sup>(7)</sup>

3.2 하중 및 속도에 의한 상·고온 마모 특성

상온과 고온 환경인 485°C에 대하여 접촉하중 및 미끄럼속도 변화에 따른 마찰계수(friction coefficient) 및 비마모율(specific wear rate) 결과를 Figs. 5 와 6 에 나타냈다. 마찰계수에 대한 미끄럼속도의 영향은 크지 않으나 속도가 증가함에 따라 미세하게 증가한다. 접촉하중의 증가에 따라 상온과 고온 485°C에서 모두 마찰계수가 점차 감소한다. 고온의 경우 상온의 마찰계수보다 약 40% 낮은 마찰계수를 나타내고 있다.

비마모율에 대한 결과로, 접촉하중이 증가함에 따라 감소하며 상온에 비해 고온 환경에서 접촉하중의 영향이 크게 나타나고 있다. 또한, 속도가 증

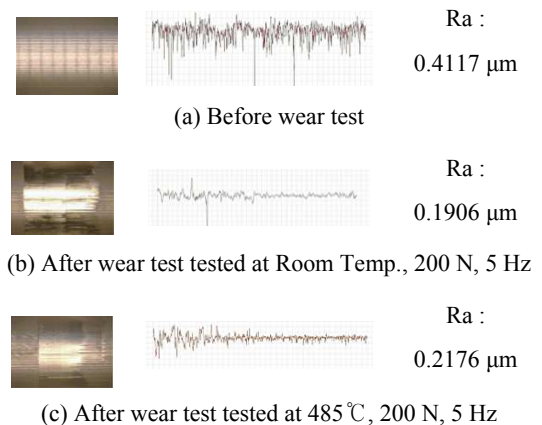


Fig. 4 Photos of worn surface and results of roughness measurement

가함에 따라 감소하는 경향을 보이며 접촉하중이 클수록 속도의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 고온의 경우, 속도 증가에 따른 비마모율의 변화량은 100 N 에서 보다 200 N 에서 적게 나타나며, 하중 200 N 에 대한 비마모율은 각 미끄럼 속도에 대해  $2.1 \times 10^{-4}$ ,  $1.9 \times 10^{-4}$ ,  $1.7 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  이다.

고체윤활제로 상용되는 그래파이트의 경우 마모 과정에서 third-body 역할을 하는 표면 응착층을 형성하며 이 층은 마모과정에서 생성되는 마모입자들이 접촉소재 사이에 응착되면서 형성된다. 따라서, 접촉하중은 생성된 마모입자를 소재표면에 응착시켜주는 역할을 하며 미끄럼속도가 관여한다.<sup>(8)</sup> 이러한 이유로 접촉하중 증가에 따라 마찰계수와 비마모율이 감소한다.

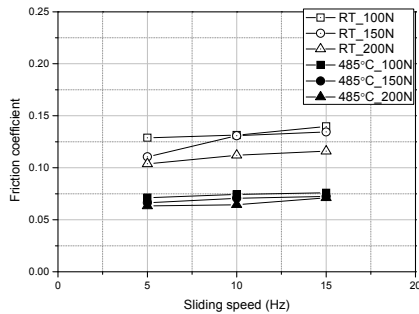


Fig. 5 Friction coefficient as a function of speed

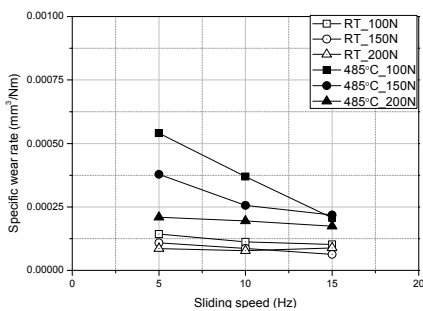


Fig. 6 Specific wear rate as a function of speed

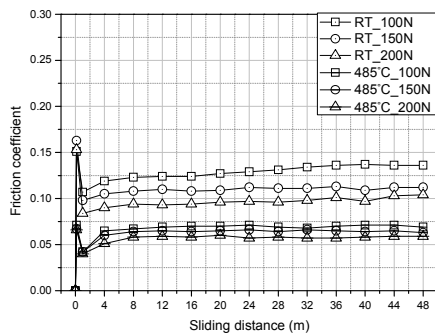


Fig. 7 Comparison of friction coefficients as a function of sliding distance at speed of 0.04 m/s (5 Hz)

Fig. 7 과 8 은 미끄럼 속도 0.04 m/s(5 Hz)와 0.12 m/s(15 Hz)에서 미끄럼 거리에 따른 마찰계수를 나타낸 것이다. 마찰계수는 일정 수준의 마모가 진행된 후에 안정적인 값으로 수렴하는 경향을 보이며, 미끄럼속도의 영향으로 0.04 m/s 에 비해 0.12 m/s 에서 상온의 마찰계수가 다소 불안정하다. 마찰계수가 일정 마모거리에서 안정되는 것은 접촉하는 두 소재의 접촉 표면에 형성되는 third body 가 일정 마모 진행 후 증가나 감소 없는 안정상태가 되고 이와 같은 안정상태 이 후에 마찰계수 역시 일정상태를 유지하기 때문이다.<sup>(9)</sup> 그래파이트와 레늄 합금의 마모시험 결과에서도 같은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

3.3 마모 표면의 관찰

마모 표면에 대한 SEM 분석결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 결과에서 가장 두드러지는 차이점은 온도에 의한 영향이다. 3.1 절에서 언급한 것과 같이 그래파이트는 400°C 이상에서 산화되기 때문에 SEM 분석

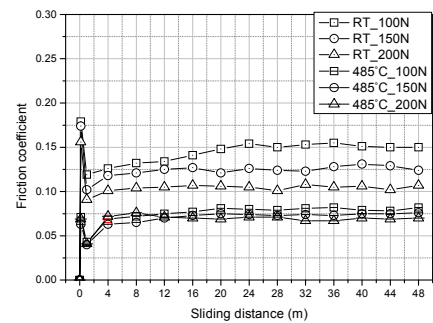
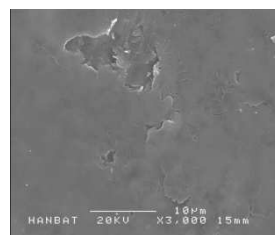
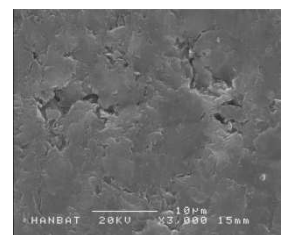


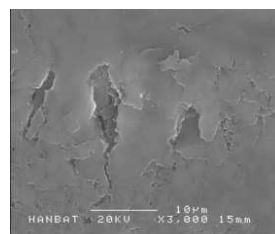
Fig. 8 Comparison of friction coefficients as a function of sliding distance at speed of 0.12 m/s (15 Hz)



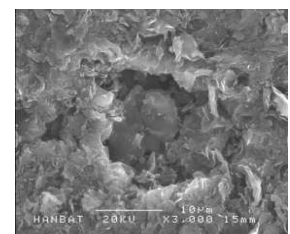
(a) RT, 200N



(b) 485°C, 200N



(c) RT, 100N



(d) 485°C, 100N

Fig. 9 SEM photos of worn surface for graphite HK-6 tested at 0.08 m/s(5 Hz)

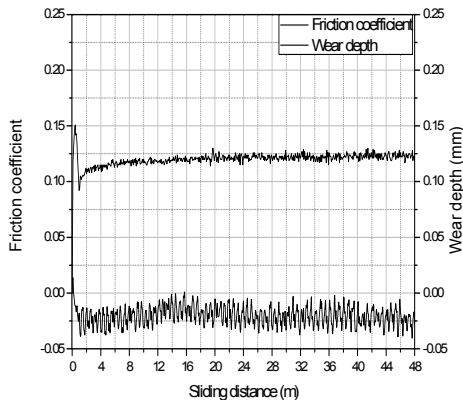


Fig. 10 Results of friction coefficient and wear depth for graphite HK-6 tested at 200 N, 0.08 m/s and Room Temp

결과 고온 485°C에서 시험된 시편의 표면에서 산화에 의한 표면변화가 확연히 나타난다. 고온의 비마모율이 높게 나타나는 이유는 산화로 인해 표면의 전단이 용이해지면서 마모입자 발생이 증가하는 것이 예상된다.

이렇게 생성된 마모 입자는 접촉하중에 의해 표면에 응착되면서 third body 를 형성한다. 상온에 비해 고온 485°C에서 비마모율이 높게 나타나며, 이것은 마모 입자가 많이 생성되는 것을 의미한다. Fig. 9(a)와 (b)에 나타나 있듯이 상온에 비해 고온의 표면에 마모입자의 응착이 확연히 나타나며 이것은 고온 485°C의 비마모율이 높기 때문이다. 이렇게 응착되어 형성된 층은 third body 의 역할을 하며 표면에 작용하는 응력을 완화시켜주거나 소재간의 직접적인 접촉을 줄여줌으로써 윤활을 돕는 윤활막의 효과를 갖는다.<sup>(10)</sup> 또한 Fig. 9(a)에서 표면결합의 흔적이 보이며, 주변에 크랙이 형성되어 있고 결합은 표면이 박리되어 떨어져 나간 형태로 형성되어 있다.

접촉하중에 대한 영향으로 Fig. 9(a)와 (c)를 비교했을 때 접촉하중 200 N 에서 시험된 마모 표면이 비교적 평탄하게 나타나며 100 N 에서 시험된 마모표면의 경우 표면에 크랙과 결함이 많이 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)와 (d)에서도 같은 결과로 접촉하중이 큰 경우 표면이 평탄함을 알 수 있으며, 이것은 3.1 절의 마모 시험 후 표면 조도가 오히려 감소하는 결과와 상응된다. 또한 Fig. 9(d)의 결합은 입자가 박리되어 발생한 Fig. (a)의 결합과는 달리 표면이 뜯겨져 나간 형태로 소재 표면에 응착된 층이 소재간의 응착에 의해 떨어져 나간 형태이다.

Fig. 10과 11은 비접촉 선형 센서 (M-40)에 의해

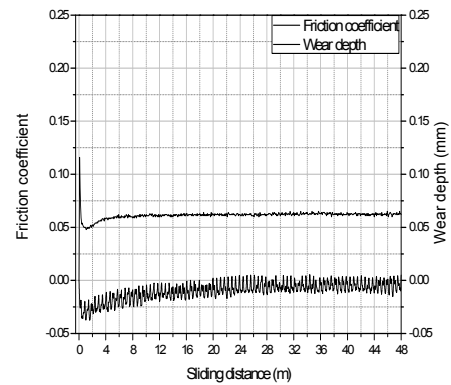


Fig. 11 Results of friction coefficient and wear depth for graphite HK-6 tested at 200 N, 0.08 m/s and 485°C

실시간으로 측정되는 마모 깊이의 변화를 마찰 계수와 함께 비교한 것이다. 상온과 고온 모두 마모 초기상태에서 마모에 의해 마모 깊이가 증가한 뒤 상온의 경우, 일정 미끄럼 거리 후에 마찰계수는 비교적 안정되지만 마모 깊이는 불특정하게 나타난다. 이것에 비해 고온 485°C에 대한 마모 시험의 경우, 마모 깊이가 마모 초기 기저면으로부터 마멸 된 후 점차 마찰계수가 안정되면서 마모 깊이가 초기 기저면까지 다시 증가한다. SEM 분석에서도 나타났듯이 마모입자형성에 유리한 고온 485°C에서 시험된 마모표면에 응착되어 형성된 층이 확인되며 그 결과, 적은 마찰계수를 얻게 된다. 마모 깊이의 증가는 응착되어 형성된 third body 층이 미세하게 증가하는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

본 논문은 고온가스 조절 밸브 내 기밀 소재인 그래파이트 HK-6 에 대하여 작동 환경을 고려한 온도, 미끄럼속도, 접촉하중을 변수로 하여 왕복동 마모 시험을 진행하고 미끄럼 마모 특성을 평가하였다. 상온과 고온에서 변화하는 기밀 소재의 마모 특성에 대하여 연구한 결과는 다음과 같다.

(1) 그래파이트 마모 표면의 시험 전과 후의 표면조도 측정하여 비교한 결과, 시험 전 Ra 0.4 μm 에서 시험 후의 표면조도는 대략 Ra 0.2 μm 로 표면조도가 감소하였으며 일정 조건에서 마모 시험 후 표면이 오히려 평탄해 짐을 확인하였다.

(2) 하중 변화에 따른 상온 및 고온에 따른 마모 특성을 평가하였다. 하중이 증가함에 따라 마찰계수는 감소하였으며, 고온의 마찰계수가 상온보다 대략 40% 정도 작게 나타났다. 비마모율은 고하중에서 저하중으로 감소함에 따라 증가하였으

며 상온보다 고온에서 큰 값을 보였다. 마찰계수에 대한 속도의 영향은 크지 않았으며, 속도가 증가함에 따라 비마모율은 감소하는 경향을 보였다.

(3) 마모표면의 SEM 분석을 통해 마모기구를 관찰하였다. 분석 결과, 상온에 비해 고온에서 마모입자의 표면응착이 유리하였으며, 응착으로 형성된 표면은 third body 역할을 함으로써 마찰계수를 줄여주는 윤활 효과를 나타낸다. 미끄럼 거리에 따른 마모 깊이를 측정된 결과, 고온에서 third body 는 일정거리 마모의 진행 후에 기저면으로부터 증가 한 뒤 안정상태에 이르는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약번호 UD110093CD)

## 참고문헌

- (1) Kwon, S. K., Kim, Y. W., Ko, S. H. and Suh, S. H., 2011, "Pressure Control of a Variable Thrust Solid Propulsion System Using On-Off Controllers," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Vol. 2011, No. 11, pp. 942~948.
- (2) Kim Y. B., Ha, K. H., Kim, B. H. and Kuk, M. S., 2006, "A Study on Flow Characteristics for High Pressure and High Temperature Control Valve," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 2006, Issue. 6, pp. 1604~1609.
- (3) Senouci, A., Frene, J. and Zaidi, H., 1999, "Wear Mechanism in Graphite-Copper Electrical Sliding Contact," *Wear*, Vol. 225-229, Part 2, pp. 949~953.
- (4) Wang, L. L., Zhang, L. Q. and Tian, M., 2012, "Effect of Expanded Graphite(EG) Dispersion on the Mechanical and Tribological Properties of Nitrile Rubber/EG Composites," *Wear*, Vol. 276-277, pp. 85~93.
- (5) Tokai Carbon Co. LTD (2013. March 26), "Tokai's Isotropic Graphite Data Sheet," Down Loads Datasheets, <http://en.tokaicarbon.eu/wp-content/uploads/HK-6-2.pdf>
- (6) Todd, L. H., 2009, "Properties of Tungsten-Rhenium and Tungsten-Rhenium with Hafnium Carbide," *Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 61, Issue. 7, pp. 68~71.
- (7) Cho, K. Y., Kim, K. J., Lim, Y. S. and Chi, S. H., 2006, "Oxidation Behavior of Nuclear Graphite(IG110) with Surface Roughness," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 43, No. 10, pp. 613~618.
- (8) Chen, B., Bi, Q., Yang, J., Xia, Y. and Hao, J., 2008, "Tribological Properties of Solid Lubricants(Graphite, h-BN) for Cu-Based P/M Friction Composites," *Tribology international*, Vol. 41, pp. 1145~1152.
- (9) Fillot, N., Iordanoff, I. and Berthier, Y., 2007, "Wear Modeling and the Third Body Concept," *Wear*, Vol. 262, pp. 949~957
- (10) Luo, X. W., Yu, S. Y., Sheng, X. Y. and He S. Y., 2005, "Temperature Effect on IG-11 Graphite Wear Performance," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, pp. 2261~2274.