

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.5.113>

씰링 그래파이트의 고온 마모 거동에 관한 연구

김연욱^a · 김재훈^{a,*} · 양호영^a · 박성환^b · 이환규^b · 김범근^c · 이성범^c · 곽재수^d

A Study of Wear Behavior for Sealing Graphite at Elevated Temperature

Yeonwook Kim^a · Jaehoon Kim^{a,*} · Hoyoung Yang^a · Sunghan Park^b · Hwankyu Lee^b ·
Bumkeun Kim^c · Seungbum Lee^c · Jaesu Kwak^d

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

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

^cDepartment of Mechanical & Automotive Engineering, Inje University, Korea

^dDepartment of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

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

ABSTRACT

Graphite is commonly used as a solid lubricant leading to low friction coefficient and abrasion. In this study, wear behavior of sealing graphite(HK-6) at elevated temperature was evaluated. Reciprocating wear test was carried out as wear occurred graphite as a seal(HK-6) is positioned between the liner and driving shaft. Variables which are temperature, sliding speed and contact load are set. This study suggest optimized environment conditions through the wear properties of graphite.

초 록

마모 마찰기구로 널리 사용되는 그래파이트에 대하여, 고온가스 조절 밸브 내에서 가스 유입 방지용 씰링 그래파이트 소재(HK-6)의 고온 마모 거동에 대하여 연구하였다. 구동축과 라이너 사이에 위치하여 지속적인 마모의 발생을 모사하기 위해 왕복동 마모 시험을 수행하였다. 마모 거동 변화의 영향 인자로 접촉 하중, 미끄럼 속도, 온도를 설정하고 민감도를 확인하였다. 마모 발생이 가장 적고 씰링 그래파이트 소재(HK-6)의 효율이 증대되는 최적조건에 대해 논의하였다.

Key Words: Graphite(흑연), Sealing Material(기밀 소재), Wear Mechanism(마모 메커니즘), Lubricant Film(윤활막), Optimum Condition(최적조건)

Received 7 June 2013 / Revised 13 September 2013 / Accepted 19 September 2013
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>
[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 30-31, 부산 해운대 한화리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

내마모성은 구조물의 작업수명을 예측할 수 있는 중요한 기술적 정보 중 하나이다. 기밀용

셀(Seal), 또는 구동축과 라이너 등과 같이 지속적인 접촉에 의한 마찰 마모에 의한 손상으로 구조물의 수명 단축을 야기하기 때문에 이를 방지하기 위한 대책을 필요로 하게 된다[1]. 그라파이트는 고체 윤활제의 역할을 함으로써 내마모성을 증가시키기 위한 첨가제로 사용되어 왔으며 그 값이 저렴하고 효과가 우수하여 다양한 산업 전반에서 사용된다. 근래에는 그라파이트 소재 자체를 가공하여 구조물의 요소로 사용하면서 원자로 연료의 피막이나 로켓 엔진의 가스 터빈 및 왕복 압축기 등의 가스 차단용 셀(Seal) 등 고온 환경에서 마멸 저감을 위한 요소로 사용되고 있다[2]. 국내의 원자로에 사용되는 원자력용 흑연에 대한 연구는 다양하게 이뤄지고 있지만 셀링 소재로 사용되는 그라파이트에 대한 연구는 미진하다.

본 논문은 고온가스 조절 밸브 내에서 기밀용 셀(Seal)로 사용되는 그라파이트 소재에 대하여 연구하였다. 고온가스의 유입을 방지하기 위하여 구동축과 라이너 사이에 위치한 셀링 그라파이트는 작동 중 지속적인 마모를 발생한다. 따라서, 밸브의 작동 온도인 500℃ 내 범위에서 왕복동 마모 시험을 수행하고 마모 특성 변화에 영향을 미치는 인자에 대해 연구하였다. 결론적으로, 셀링 소재의 마모를 최소화 할 수 있는 조건을 찾고 이를 적용할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 재료 및 시험방법

2.1 재료 및 시험

그라파이트는 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 육각 판상의 구조로 층상의 C-C결합에 비해 층위 사이의 Van der Waals 결합력이 약해 판상을 따라 전단이 쉽게 일어나며[3], 마모 과정에서 생성되는 입자들은 접촉면에 효과적으로 채워지게 되고 이러한 잔여물들은 단단하고 조밀한 윤활막을 형성한다. 마모 과정에서 형성된 윤활막은 마모가 발생하는 접촉면 간의 직접적인 접촉을 줄이고 응력완화작용으로 마찰계수를 줄여준다

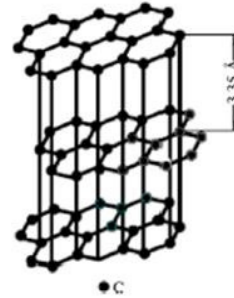
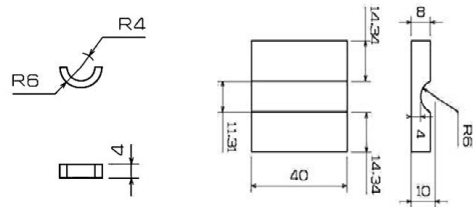


Fig. 1 Crystalline structures of graphite.



(a) Upper specimen (b) Lower specimen

Fig. 2 Schematic diagram of test specimens.

[4]. 또한, 그라파이트는 고온에 의한 변성이 적고, 열흡수와 열분해가 우수하기 때문에 고온 환경에서도 그 특성이 우수하며, 일정 온도 영역 내에서는 일정한 마찰계수를 나타낸다[5].

마모 특성 평가 소재로 사용된 그라파이트는 Tokai carbon 사에서 제공하는 HK-6를 사용하였다. HK-6는 극초미세 결정립 그라파이트로 건식 마모 특성이 좋고, 동적 마찰 조건에서 안정적인 마찰계수를 확보한다. 또한 고온에 대한 내성이 강하며, 광범위한 온도에서 가스나 액체의 투과를 방지하는 우수한 기밀능력을 갖는다[6].

상대재인 W-25Re는 텅스텐을 기반으로 한 레늄 합금이다. 3,050℃에서 용융하여 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[7]. Table 1과 2에 그라파이트 소재인 HK-6와 레늄-텅스텐 합금 소재인 W-25Re의 기계적 성질을 나타냈다.

Table 1. Mechanical properties of HK-6.

Density (g/cm ³)	Flexural strength (MPa)	Grain size (μm)	Shore hardness
1.86	85	3	68

Table 2. Mechanical properties of W-25Re.

Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Poisson ratio	Shear modulus (MPa)	Shore hardness
19.7	1370	0.29	159	43

시편의 형상은 Fig. 2와 같이 레늄-텅스텐 합금 소재, W-25Re의 상부 시편은 반지름 6 mm 반 원의 Ring 형태이고, 그래파이트 소재, HK-6의 하부 시편은 사각 블록에 원형의 Groove가 있어 파인 홈을 따라 상부 시편의 W-25Re가 왕복동 운동을 함으로써 마모가 발생하도록 제작하였다. 시편의 형상은 실제 그래파이트 소재와 구동축 소재의 마모 프로세스를 모사할 수 있도록 실제 작동 환경을 고려하여 제작되었다.

2.2 왕복동 마모 시험 (Reciprocating wear test)

씰링 소재(Sealing materials)인 그래파이트와 구동축의 작동으로 인해 소재 사이에서 발생하는 마모를 모사하기 위해 고온 왕복동 시험기 (Fig. 3, Reciprocating friction wear tester, RFW-160)를 이용하여 마모 시험을 수행하였다. 고정된 상부시편에 대하여 일정 변위를 움직이는 하부 시편에 의해 지속적인 상대운동으로 마모를 발생시키는 시험 방식이다. 마모 거동에 영향을 미칠 수 있는 요소는 주로 온도, 미끄럼 속도, 접촉 하중이다. 시험 온도는 상온부터 150, 250, 350℃ 및 실제 장치의 작동 환경인 485℃의 범위에 대하여 온도에 따른 영향을 분석하고, 구동축의 제어 범위를 고려한 마모 변위 8 mm에 대하여 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz의 미끄럼 속도에서 시험하였다. 가스에 의한 편심 하중과 열팽창을 고려한 임의의 접촉 하중 50 N, 125 N, 200 N의 범위에서 시험을 수행하였다.

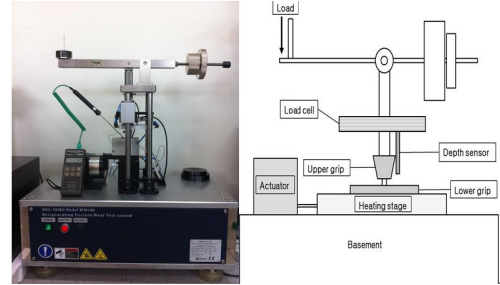


Fig. 3 Reciprocating friction wear tester, RFW-160 (Neoplus Co. Ltd.).

마모 시험 중 비접촉 선형 센서에 의해 실시간으로 측정되는 마모 깊이와 마찰 하중의 결과 값을 분석하여 마모 거동을 분석하였다.

일반적으로, 마찰 마모 특성을 나타낼 때 마찰 계수(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 나타내며 다음과 같다.

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

마모율(Wear rate)을 예측하기 위해 제안된 The Archard wear formula는 무차원의 마모 계수 (Wear coefficient)의 개념을 도입하여 마모되는 부피를 예측할 수 있는 식으로 다음과 같다[8].

$$V = \frac{ksF_N}{H} \quad (2)$$

여기서, V 는 마모된 부피, k 는 무차원의 마모 계수, s 는 미끄럼 거리, F_N 은 수직 하중, H 는 소재 중 연한소재의 경도이다. 이 후, J.K. Lancaster[8]는 실험을 통해 얻은 마모 계수의 개념으로 하중과 미끄럼 거리를 통해 마모부피를 예측할 수 있는 비마모율 (Specific wear rate)을 제시하였다. 비마모율 \dot{w} 는 다음과 같다.

$$\dot{w} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{1}{\nu \rho F_N} \quad (3)$$

여기서, $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ 는 손실된 질량에 대한 마모 시간의 비이고, v 는 미끄럼 속도, ρ 는 마모 소재의 밀도, F_N 은 수직 하중이다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 마모 시험 후 표면 조도 변화

Fig. 4는 각각 시험 전과 접촉하중 125 N의 미끄럼 속도 5 Hz에서 상온 및 485°C에서 마모 시험이 진행 된 후의 표면 사진으로 시험 후에 마모 흔을 확인할 수 있다. 마모 흔에 대한 표면 조도 측정으로 시험 전과 마모 후의 표면 조도 변화와 조건 변화에 따른 표면 조도 변화를 비교하였다. 표면 조도 측정은 3번씩 측정하여 평균값을 취하였으며 측정 결과는 Table 3과 같다. 시험 전의 그라파이트 소재인 하부 시편의 표면 조도는 평균적으로 Ra 0.4 μm 이다. 측정된 시편의 시험 속도는 모두 5 Hz에서 시험되었다. 조도 측정 결과는 하중과 온도의 영향으로 인해 비교적 다른 결과를 나타냈다. 상온과 485°C에 대하여 200 N의 경우는 시험 전 보다 모두 표면 조도가 감소하는 결과를 나타냈으나 125 N의 경우 상온에서 시험 전보다 증가하였으며, 50 N의 경우는 상온 및 고온에서 시험 전보다 조도가 증가하였다. 따라서 적정 하중의 영향으로 인해 마모 후 표면이 시험 전 보다 좀 더 평탄해짐을 알 수 있다. 온도 변화에 따른 마모 시험조건에서 조도 측정 결과는 250°C에서 가장 높게 나타났으며 시험 전 표면 조도 Ra 0.4 μm 보다 대략 2~3배 가량 증가하였음을 확인하였다. 이에 비해 350°C에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 결과적으로 조도 측정 결과는 마찰계수와 비마모율의 결과와도 부합되며 이에 대해 다음에서 논의한다.

3.2 하중 및 속도에 의한 마모 거동 변화

상온과 작동환경 485°C의 온도 범위에 대하여 접촉 하중 및 미끄럼 속도 변화에 따른 마찰계수(Friction coefficient) 및 비마모율(Specific wear rate) 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타냈다.

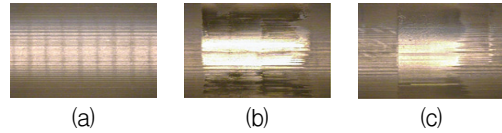


Fig. 4 Photos of surface before and after wear test. (a) is a before the test, (b) is tested at room temp., 5 Hz and (c) is tested at 485°C, 5 Hz. (applied load 125 N).

Table 3. Results of roughness measurement.

No.	Test temp. (°C)	Axial load (N)	Ra (μm)
1	Room Temp.	125	0.8351
2	150	125	0.9103
3	250	125	1.1444
4	350	125	0.1142
5	485	125	0.2000
6	Room Temp.	50	0.8867
7	485	50	0.6612
8	Room Temp.	200	0.3062
9	485	200	0.2165

마찰계수는 상온에 비해 고온 환경에서 낮은 것을 확인하였으며 속도의 영향은 크지 않았다. 하중의 영향으로 하중이 증가함에 따라 오히려 마찰계수가 감소하였다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 고체 윤활제인 그라파이트가 마모 과정에서 탈락한 입자들로 하여금 윤활막을 형성시키기 위해서는 적절한 하중이 필요하기 때문이다. 속도와 하중의 영향은 상온과 고온에서 동일한 거동을 보였다.

비마모율은 속도와 하중 및 온도의 영향을 모두 받는 것으로 나타났다. 저속일 때 보다 고속일 때 비마모율이 낮으며 저하중일수록 비마모율은 높았다. 상온에 비해 고온의 영향으로 인해 485°C에서 비마모율이 높은 값을 나타냈다. 저하중에서 윤활막을 형성시킬 수 있는 하중 부족으로 인해 마찰계수가 높게 나타났으며 이로 인해 비마모율 역시 높은 값을 얻었다. 속도에 의한 영향으로 저속에서 상·하부 시편 소재간의 실 접촉면적이 증가함으로 전단이 쉽게 일어나게 되어 중·고속에서 보다 비마모율이 증가한다.

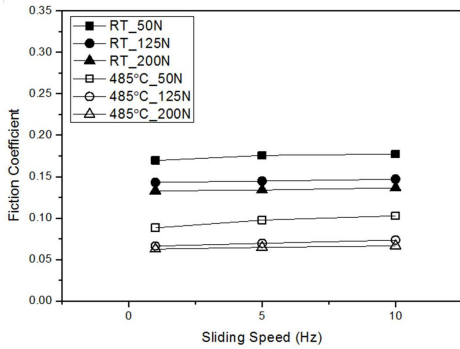


Fig. 5 Variation of friction coefficient with sliding speed.

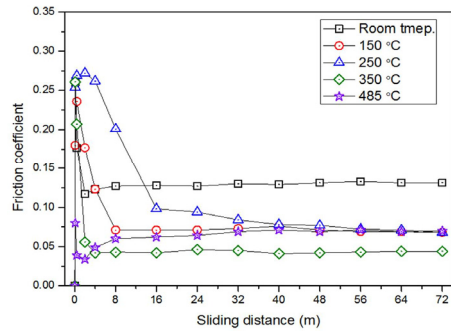


Fig. 7 Variation of friction coefficient with sliding distance.

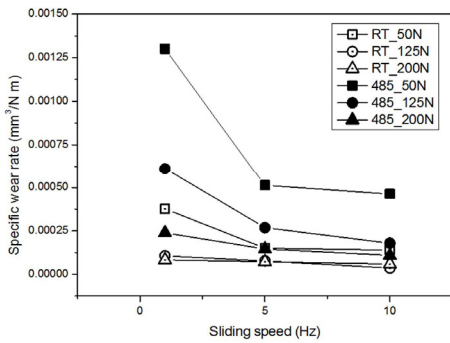


Fig. 6 Variation of specific wear rate with sliding speed.

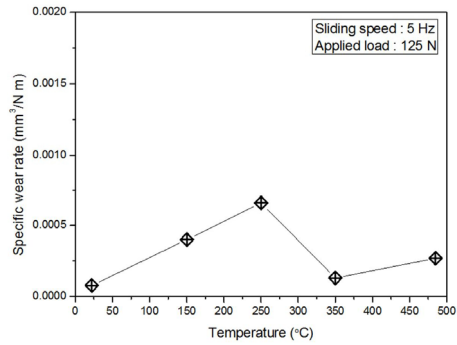


Fig. 8 Variation of specific wear rate with temperature.

3.3 온도 변화에 따른 마모 거동 변화

온도에 의한 그래파이트 소재의 마모 거동 변화를 위해 하중과 속도를 125 N, 5 Hz로 고정한 상태에서 온도에 따른 마모 시험을 수행하고 거리에 따른 마찰계수 변화와 온도에 따른 비마모율 결과를 비교하였다. Fig. 7은 상온(Room temperature)과 150, 250, 350 및 485°C에서 시험된 마찰계수 결과를 미끄럼 거리 변화에 따라 도시한 그래프이다. 시험 결과는 각각 3번씩 수행한 결과에 대하여 평균값을 취하였으며 시험 결과는 각 조건에서 비슷한 경향을 나타냈다.

미끄럼 거리 증가에 따른 마찰계수의 변화는 온도에 따라 약간씩 다른 경향을 보인다. 일정 미끄럼 거리를 진행 한 뒤, 상온 에서는 대략 마찰계수 0.13 정도의 값으로 수렴하는데 비해 150°C 이상의 온도에서는 상온 보다 40% 정도 낮은

마찰계수 0.05~0.06 값으로 수렴한다. 또한 표면 조도가 비교적 높았던 150, 250°C 조건에서 마찰계수의 수렴이 타조건에 비해 다른 경향을 보인다. 수렴하기까지 미끄럼 거리가 상당 부분 진행되는 동안 정마찰 계수로부터 높은 마찰계수를 유지한 상태에서 점차 감소하며 수렴한다. 초기 마찰계수가 높게 나타나는 마모 과정에서 높은 표면 조도 값을 얻은 것으로 예상된다. 마찰계수가 가장 낮은 조건은 350°C 조건이나 상온을 제외한 다른 온도 조건에서 일정 마모 거리 진행 후의 수렴하는 값과 큰 차이를 보이지 않는다.

Fig. 8에 나타낸 비마모율 결과는 상온에서 250°C 조건까지 증가하는 경향을 보이다가 다시 350°C에서 감소 후 485°C에서 증가했다. Fig. 7의 마찰계수 결과와 관련하여 150°C와 250°C 조건의 높은 마찰계수를 갖는 구간에서 마모가 많

이 일어난 것으로 예상된다. 마찰계수가 높다는 것은 표면에 높은 응력이 작용한다는 것을 의미하며 작용 응력이 소재 표면에 마모를 발생시켜 마모율이 높아진다. 비마모율과 마찰계수의 결과로 보아 최소 마찰계수와 비마모율 결과에 의해 350℃부근의 온도에서 마모가 가장 적게 일어난 것을 알 수 있다.

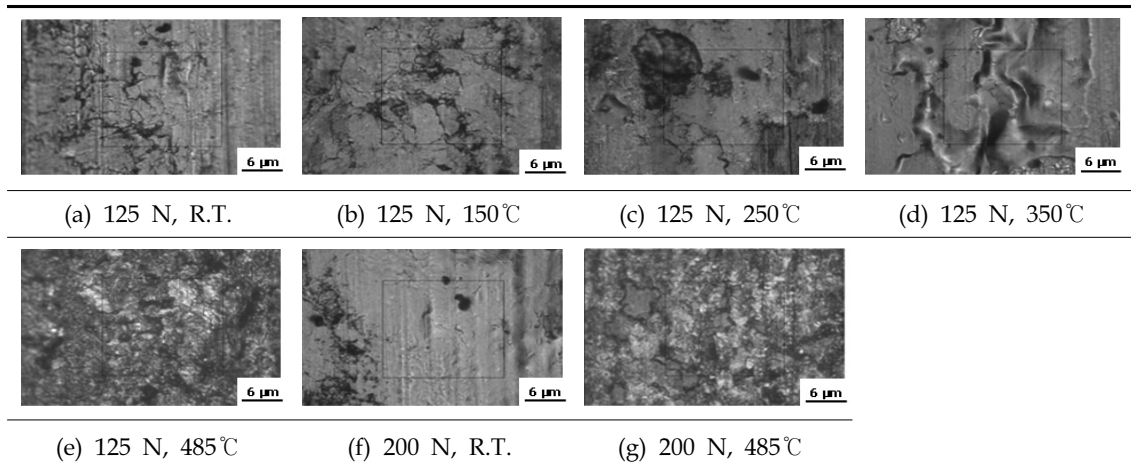
3.4 마모 표면의 관찰

광학 현미경을 사용하여 표면을 50배 촬영한 사진을 Table 4에 나타냈다. 상온 및 150, 250℃ 조건에서 크랙과 Groove가 상당히 많이 보이며, 높은 표면 조도 값과 부합된다. 150-250℃의 온도 영역은 그래파이트가 마모과정에서 피로에 의한 마모가 크게 발생하는 영역으로 알려져 있으며 연삭 마모와 응착 마모가 적절히 반복되면서 표면에 생성된 크랙이 피로에 의해 전파되고 박리되어 탈락 현상이 일어난다[9]. 상온 및 150, 250℃에서의 마모 메커니즘은 주로 연삭에 의한 마모 발생으로 표면에 크랙과 groove 형성이 많다. 이에 비해 350℃의 경우 표면에서 윤활 흔적의 관찰되며 마모 입자의 응착으로 형성된 윤활막 관찰이 가장 용이하고 이 결과 가장 낮은 마찰계수 및 비마모율 값을 얻었다. 485℃의 경우 그래파이트 표면에서 산화에 의한 경화가 진행됨이 확연하게 보이며, 크랙 형성은 크게 눈에

띄지 않고 응착에 의한 마모가 진행 된 것이 확인된다. 일반적으로 그래파이트의 산화온도는 400℃이상으로 알려져 있다[10]. 산화가 진행됨에 따라 표면경화가 일어나면서 마찰에 의한 그래파이트 표면의 전단이 350℃ 조건보다 용이하기 때문에 350℃조건보다 높은 비마모율을 나타낸다. 하중에 의한 마모 표면 변화를 관찰한 결과 그림 (a)와 비교하여 그림 (g)의 경우 200 N의 하중에서 크랙이 적게 나타나며 부분적으로 응착이 일어난 마모 흔적이 보인다. 따라서 마모 입자의 응착에 의한 윤활막 형성에는 적절한 하중이 필요한 것을 알 수 있다.

결론적으로, 마찰계수와 비마모율을 고려한 링 그래파이트의 최적 설계 조건은 윤활막을 형성하기 위한 적절한 하중과 온도조건에서 비마모율이 적게 일어나는 미끄럼 속도가 요구되며 본 연구 결과 5 Hz의 속도에서 350-400℃의 온도조건이 가장 마찰 계수가 적고 마모가 적게 발생하는 조건이며 접촉하중은 200 N이 적절한 것으로 나타났다. Fig. 9에 온도와 하중에 따른 비마모율의 결과를 나타냈으며 가장 낮게 나타나는 조건이 최적 설계 조건이다. 따라서, 실제 쉘링 그래파이트 구조물의 작동 환경을 500℃이하의 350-400℃ 범위의 온도로 낮춰 줄 수 있다면 소재의 작동 수명이 향상되며 효율이 증대될 것으로 예상된다.

Table 4. Optical microscope images of worn surface tested at 5 Hz (magnification : X50).



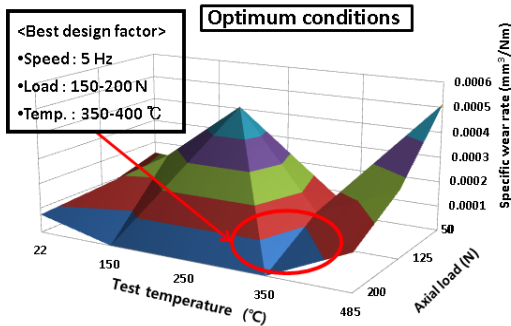


Fig. 9 The optimum design conditions.

4. 결 론

본 논문은 고온가스 조절 밸브 내에서 가스의 유입을 방지하는 씰링 그래파이트 소재 HK-6에 대하여 작동 환경을 고려한 온도, 미끄럼 속도, 접촉 하중을 변수로 하여 왕복동 마모 시험을 진행하고 마모 특성을 평가하였다. 씰링 그래파이트 소재의 고온 마모 거동 및 마모를 방지하는 최적을 조건에 관한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 마모 표면의 조도 측정 결과, 높은 표면 조도에서 마찰계수와 비마모율 역시 높은 값이 도출 됐다. 일정 마모 진행 후 마찰계수는 수렴하고 속도의 영향을 크지 않고 하중이 증가함에 따라 감소하는 경향이다. 상온보다 고온의 마찰계수가 40% 정도 낮으며 비마모율 측정 결과 속도와 하중이 증가함에 따라 감소한다.
- (2) 상온 및 150, 250°C에서 연삭에 의한 표면의 크랙이 자주 발견되며, 350, 485°C에서 마모 입자의 응착으로 인해 형성된 윤활막이 확인 된다. 마찰계수가 높으면 비마모율이 높게 나타나며 윤활막의 형성은 마찰계수 및 비마모율을 감소시킨다.
- (3) 마모 발생을 줄일 수 있는 최적 조건에 대해

여 적절한 하중과 온도 및 속도 범위를 제시하고 실제 구조물 적용하게 되었을 때 작동 수명이 향상될 것으로 예상된다.

후 기

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

References

1. Wang, L.L., Zhang, L.Q. and Tian, M., "Effect of expanded graphite(EG) dispersion on the mechanical and tribological properties of nitrile rubber/EG composites," *Wear*, Vol. 276-277, pp. 85-93, 2012.
2. Michael, N.G., "Crystal-structure-controlled tribological behavior of carbon-graphite seal materials in partial pressure of helium and hydrogen," *Tribology Letters*, Vol. 3, pp. 175-184, 1997.
3. Li, J.L. and Xiong, D.S., "Tribological behavior of graphite-containing nickel-based composite as function of temperature, load and conterface," *Wear*, Vol. 266, pp. 360-367, 2009.
4. Chen, B.M., Bi, Q.L., Yang, J., Xia, Y.Q. and Hao, J.C., "Tribological properties of solid lubricants(graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction composites," *Tribology International*, Vol. 41, pp. 1145-1152, 2008.
5. Senouci, A., Frene, J. and Zaidi, H., "Wear mechanism in graphite-copper electrical sliding contact," *Wear*, Vol. 225-229, Part 2, pp. 949-953, 1999.
6. Tokai Carbon Co. LTD (2013. March 26), "Tokai's Isotropic Graphite Data sheet," World Wide Web location, [http:// en](http://en).

- tokaicarbon.eu/wp-content/uploads/HK-6-2.pdf, 2013.
7. Todd, L.H., "Properties of Tungsten- rhenium and Tungsten-rhenium with Hafnium Carbide," *Journal of Materials*, Vol. 61, Issue. 7, pp. 68-71, 2009.
8. Juri, P., Mart, V. and Sergei, L., "Friction and Dry Sliding Wear Behaviour of cermets," *Wear*, Vol. 260, pp. 815-824, 2006.
9. Luo, X.W., Yu, S.Y., Sheng, X.Y. and He, S.Y., "Temperature Effect on IG-11 Graphite Wear performance," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, pp. 2261-2274, 2005.
10. Cho, K.Y., Kim, K.J., Lim, Y.S. and Chi, S.H., "Oxidation Behavior of Nuclear Graphite(IG110)with Surface Roughness," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 43, No. 10, pp. 613-618, 2006.