

WC/C 박막 코팅의 환경 변화에 따른 트라이볼로지적 특성

이은성, 김석삼* 김종국**

경북대학교 기계공학과 대학원, *경북대학교 기계공학부, **한국기계연구원

Tribological characteristics of WC/C multilayer films with various environments

Eun-Sung Lee, Seock-Sam Kim*, Jong-Kook Kim**

Graduate School, Department of Mechanical Engineering,
Kyungpook National University, Taegu, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu, Korea

**Korea Institute of Machinery & Materials, Changwon, Korea

Abstract - The friction and wear behaviors of WC/C multilayer coating were investigated by using a pin on disk type tester. The experiment was conducted by using silicon nitride (Si_3N_4) as a pin material and WC/C multilayer coating on bearing steel (STB2) as a disk material, under various environments that are atmospheric conditions of high vacuum ($1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$), medium vacuum ($1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$), ambient air (10^5Pa)(3types) and relative humidity(2~98%) conditions. The results showed that WC/C coating fracture was suddenly increased with increasing degree of vacuum, because of high adhesion. So, WC/C coating could not be displayed their ability as solid lubricant. WC/C coating could be displayed better ability as solid lubricant with increasing relative humidity, because of oxide film, size and shape of wear debris. The friction coefficient and specific wear rate became better about RH 50%.

Key words - WC/C multilayer coating, Si_3N_4 , tribosystem, Vacuum, Relative humidity, Specific wear rate, Friction coefficient, Debris

1. 서 론

현대 기계 공학의 새로운 경향은 기계 요소의 보다 절박한 요구조건에 의해 이끌어 왔다. 예를 들면, 자동차 효율의 증가를 위한 마찰의 감소, 기어와 롤러 베어링의 신뢰성 증대, 적정위치에 주입되지 못하고 누수되거나 그 부품들을 더럽히게 하여 버려지는 소모성 윤활유들의 감소 등이 기계류를 설계하는데 주 관심사이다. 이러한 경향은 더 높은 하중, 더 낮은 허용오차, 혹은 윤활유의 감소로 야기되어지는 표면

의 응착 마멸 때문에 기계 요소들에 더 많은 트라이볼로지적 문제를 만들어 낼 수 있다. 이와 같은 경향을 극복할 수 있는 최선의 방법 중 한가지는 저마찰·고마멸 저항의 얇은 고체막을 기계 요소 위에 적용함으로써 표면 특성을 향상시키는 것이다[1]. 특히 극도의 청결을 유지해야 하거나 유체 윤활제를 제대로 계속 공급해 주기 어려운 위치에 있는 부품들, 윤활유가 누수 되었을 때 엄청난 문제를 야기하는 부품들에서는 고체 윤활제 없이 유체 윤활

제만을 사용한다는 것은 큰 어려움을 가져온다[2-4].

본 실험에서 사용한 WC/C 코팅은 부드러운 비결정질의 조직내에 경질의 텅스텐 카바이드 입자들로 구성되어 있다. 마찰계수가 낮다는 특징을 가지고 있어서 마모 및 용착의 문제가 있는 고응력 정밀부품에 있어서 매우 이상적이다. Fuel injection, system 부품, 기어 및 기어 드라이브, 엔진 부품, 유압펌프 및 컴프레셔 등에 주로 적용된다.

본 논문에서는 저마찰 특성과 더 좋은 마멸저항력을 보이는 WC/C coating을 실제 베어링에 사용되는 고탄소 크롬 베어링강(STB2)에 WC target과 sputtering gas로는 argon gas를 이용하여 DC magnetron sputtering법으로 증착시킨 다음, 주위 환경(진공, 대기, 습한 환경)에 따른 WC/C 박막의 마찰·마멸 특성을 알아보고, 그 환경의 변화에 따른 마찰·마멸특성을 고찰하고자 한다. 특히 마찰에 많은 영향을 미치는 debris의 크기와 모양에 따른 마찰계수의 변화를 알아보고 그 마찰거동에 따른 마멸 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편

디스크 시험편의 모재는 고탄소 크롬 베어링강(STB2)을 사용하였다. 특히 베어링강은 고체윤활제를 적용하기 위한 모재로 널리 쓰이고 있다. 디스크는 직경 24mm, 두께 4.5mm로 절단하였고, 디스크 시험편의 평균거칠기를 코팅전 0.2 μmRa 와 코팅후 0.3 μmRa 로 준비하였다.

상대 시험편인 핀 시험편은 고하중, 고온, 고속의 가혹한 조건에서 이용이 가능하며, 낮은 열팽창계수 및 영률과 고강도, 고경도,

내열충격성, 전기절연성이 우수한 세라믹재료 중 하나인 질화규소(Si_3N_4)를 사용하였다. 직경 5mm, 길이 20mm로 가공하였으며 접촉부는 반지름 2.5mm인 반구(hemispherical)형상으로 가공하였다.

디스크의 박막 형성은 정밀 베어링이나 기어와 기어 드라이브, 연료 분사 시스템 부품, 엔진 부품, 유압펌프 및 컴프레셔 등에 새로이 각광받고 있는 고체윤활제인 WC/C를 마그네트론 스퍼터링법으로 박막을 형성하였다[5].

2.2 실험장치

본 실험에 사용된 진공 마찰·마멸 실험기를 Fig. 1에 나타내었다[6].

실험기의 진공챔버(vacuum chamber)는 로터리 펌프(rotary pump)와 확산 펌프(diffusion pump)를 모두 작동시켰을 경우 $1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ (10^{-6}Torr)의 진공도가 가능하도록 하였다. 미끄럼 속도는 14~250mm/s범위에서 속도 조절이 가능하다.

Fig. 2에는 습도환경 실험에서 사용한 고온·고속 마찰·마멸 실험기이다. 시편 가열장치, 냉동기 장치, 공조장치, 가습 장치, 그리고 제어박스로 구성되어 있다. 온도와 습도 제어범위는

시험온도제어	시료실온도제어	시료실습도제어
상온~150℃±2℃	20~50℃±2℃	2~95%±3%

이다. 미끄럼 속도는 710mm/s 까지 속도 조절이 가능하며, 하중은 pin을 고정시키는 지지대 위에 필요한 하중에 맞는 mass를 장착시킴으로써 수직하중을 부과할 수 있게 했다.

두 실험기의 챔버내 시험편 마찰부분은 Pin on Disk type으로 모터에 의해 Disk를 회전시켜 고정된 Pin과 상대 운동할 수 있도록

하였다. 그리고 핀은 회전 중심에서 7mm 편심시켜 디스크 접촉면에 직경 14mm의 마모 트랙(wear track)이 발생하도록 하였다.

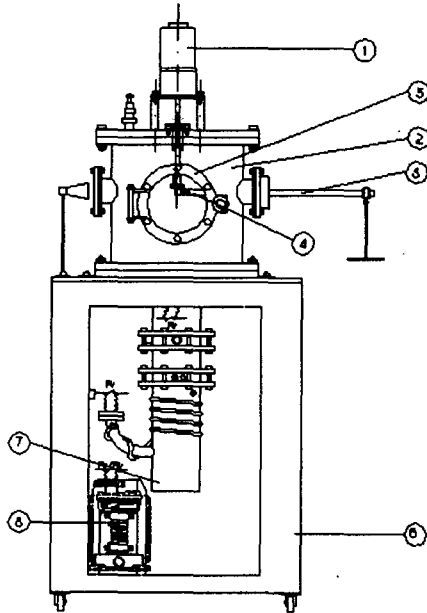


Fig. 1 Schematic diagram of testing apparatus[11]

- ①motor ②vacuum chamber
- ③dead weight unit ④loadcell unit ⑤door
- ⑥frame ⑦diffusion pump ⑧rotary pump

2.3 실험방법

본 실험에서는 Pin on Disk 형식으로 회전하는 디스크 하부에 핀을 접촉시켜 마찰·마멸 실험을 수행하였다. 실험순서는 시험편의 초음파 세척→건조→마찰·마멸 실험→마찰계수 측정·마멸 입자 미시적 관찰→AES 분석→초음파 세척→건조→마멸면 거칠기 측정→마멸량 측정·미시적 관찰 순으로 수행하였다. 각각의 실험 조건을 Table 1에 자세히 나타내었다. 실험실의 온도는 24~26℃로 일정하게 유지하여 실험을 하였다. 본 실험은 다음과 같이 마찰·마멸측정을 하였다. 마찰력 측정은 본 실험기의 로드

셀의 전압변화를 아날로그/디지털 변환기를 이용하여 컴퓨터에 데이터의 형태로 저장되도록 하였다. 마멸량의 계산 및 마멸면의 형상을 알기 위해 표면 거칠기 측정기 (SURFTEST-500, MITUTOYO)를 사용하고, 이러한 마멸면의 단면곡선을 면적계 (Super PLANIX α, TAMAYA)를 이용하여 마멸면적을 구하고 마멸부피를 계산하였다

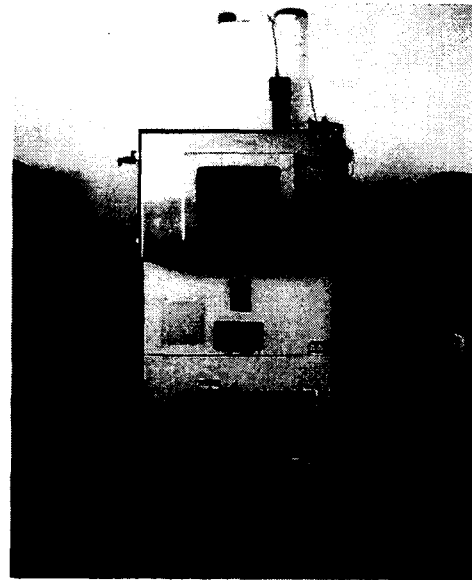


Fig. 2 Testing apparatus (Temperature · humidity tester)

Table 1 Experimental conditions

WC/C coating		Roughness : 0.3 μmRa Hardness : 1000kgf/mm ²	
Vacuum degree	High. ($1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$)	Relative humidity	2%
	Medium. ($1.3 \times 10^{-1}\text{Pa}$)		20%
	air (10^5Pa)		50%
			98%

3. 실험결과 및 고찰

3.1 WC/C 박막의 마찰 특성

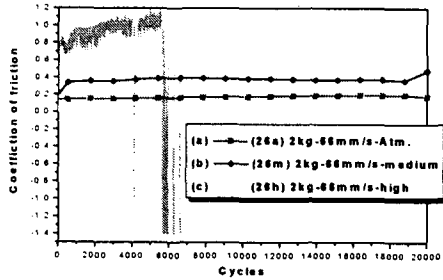


Fig. 3 Variation of the coefficient as a function of the sliding cycles under WC/C coating on disk specimen, load 19.6N, sliding velocity 66mm/s (a)in air, (b)in medium vacuum, (c)in high vacuum

Fig. 3은 WC/C 박막 disk 시편에 수직하중과 미끄럼 속도를 고정 한 후, 대기(10^5 Pa-atm.), 중진공(1.3×10^1 Pa-medium.) 및 고진공(1.3×10^{-1} Pa-high.)에서의 미끄럼 cycle 증가에 따른 마찰계수 변화를 나타내었다. 그 결과 대기→중진공→고진공 순으로 마찰계수는 높아졌다. 대기 중에서는 고체 윤활제의 기준치($\mu < 0.2$)[7-8]를 벗어나지 않는 데 반해 진공 환경에서는 마찰계수의 기준치를 초반부터 넘는 것을 볼 수 있다. 중진공에서는 어느 정도의 높은 마찰계수($\mu = 0.2$)를 보였고, 고진공으로 갈수록 그 마찰계수의 값은 엄청난 수치로 나타났다. 고진공에서는 실험기의 과도한 진동으로 더 이상의 실험이 곤란했다.

Fig. 4는 대기 중에서 수직 하중과 미끄럼 속도를 고정시킨 후, WC/C 박막의 마찰·마멸 실험에 상대습도의 변화를 주어 미끄럼 cycle 증가에 따른 마찰계수 변화를 나타내었다. 상대습도는 저습(2%), 중습(20%, 50%), 고습(98%)으로 변화 시켜 실험

했었다. 그 결과는 습도가 2%→20%→50%→98% 순서로 습도가 높아질수록 마찰계수가 낮게 나타났다.

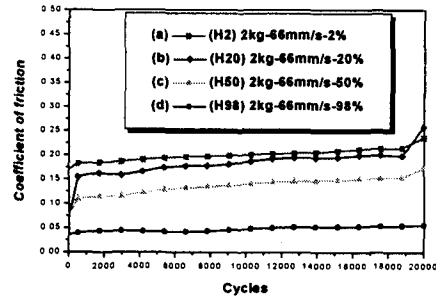


Fig. 4 Variation of the coefficient as a function of the sliding cycles under WC/C coating on disk specimen, load 19.6N, in air (a)Relative humidity 2%, (b)Relative humidity 20%, (c)Relative humidity 50% (d) Relative humidity 98%

3.2 WC/C 박막의 debris에 의한 마찰 거동 관찰

WC/C 박막 코팅을 마찰·마멸 실험 후 마멸면에 대한 미시적 관찰로 마멸 입자를 세척하지 않은 상태에서 실험 중 마멸 입자가 마찰에 어떤 영향을 알아보기 위한 미시적 관찰을 했다. Fig. 5의 SEM 사진은 수직하중(19.6N)과 미끄럼 속도(66mm/s)를 같게 한 후, 대기의 분위기를 달리하여 실험한 것이다. 고진공으로 갈수록 마멸 입자의 모양이 구형상과 멀어지고 여러 가지의 다른 형상들이 나타나며 실타래와 같은 말린 마멸 입자도 보이게 됨을 알 수 있다[9]. 또한 진공에서 나타나는 강한 응착(adhesion)에 의해 마멸 초기부터 마찰계수는 크게 나타나고 마멸 입자 또한 응착에 의해 떨어져 나간 덩어리나 박판 형태로 나타난다. 게다가 대기 중에서는 발견할 수 없는 실타래 같은 말린 마멸 입자

도 발견된다. 중진공에서 실험한 Fig. 5(a),(b)는 마멸트랙이 코팅층이 약간 남아 있으나 거의 다 벗겨진 모습으로 드러나 모재가 가지는 거칠기는 찾아 볼 수 없다. 고진공에서 실험한 Fig. 5(c)는 그 경향이 더욱 심해 마멸면의 소성변형이 보이고 핀 또한 마멸면의 코팅과 모재가 응착되어 소성변형을 한 모습을 볼 수 있다. 이런 현상으로 앞에서 보았던 구름 현상은 전혀 일어나지 않을 것이며 응착에 의한 더 높은 운동에너지가 필요했을 것이다. 이는 마찰력을 증대시키고 더불어 마찰계수를 높여주는 작용을 했을 것이다.

Fig. 6은 수직하중, 미끄럼 속도를 일정하게 하고 대기 중에서 상대습도를 달리하여 실험한 것으로 실험 후 마멸 입자를 세척하지 않은 디스크와 핀의 SEM 사진이다. Fig. 6(a)은 수직하중 19.6N과 미끄럼 속도 66mm/s로 고정시키고, 상대습도 2%에서 실험한 것으로 대체적으로 마멸 입자들이 크고 여러 가지 모서리를 가진 모양으로 나타난다. 구형과 완전히 다른 모양의 마멸 입자들은 구름 효과를 발생하기 힘들고 그 자체가 접촉 미끄럼 운동을 방해할 수 있다. 그리하여 상대 습도가 다른 실험들보다 마찰계수가 높다고 할 수 있다. 일반적인 대기의 습도 상태에서 한 실험보다 더 높은 마찰계수를 보이는 것도 그런 이유 때문이다. Fig. 6(b)는 상대 습도 98%에서 실험한 것으로 마멸 입자들은 다른 상대 습도에서 실험한 마멸 입자들보다 크기가 훨씬 작고 구형의 형상을 나타내고 있다. 구형의 마멸 입자들이 마멸 과정에서 접촉 운동에 작용을 한 후 물방울들의 응집력 때문에 밖으로 떨어져 나가지 못하고 디스크의 마멸 트랙과 핀의 마멸부분 주위에 모인 후 물방울이 건조되어 마멸

입자들이 하나의 덩어리로 된 것을 볼 수 있다. 물방울이 건조되기 전에는 구형의 작은 마멸 입자들이 마찰하는 과정에 구름 효과를 일으켜 마찰력을 낮추는데 도움을 주었을 것이고 그리하여 다른 조건의 실험 마찰계수보다는 훨씬 더 낮은 마찰계수 값을 보이는 것이다.

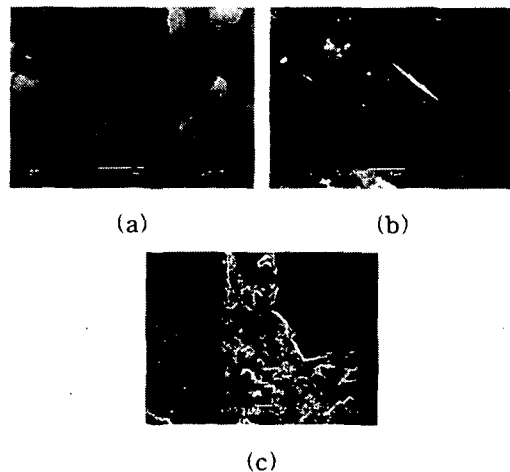


Fig. 5 SEM photographs of debris on worn surface for WC/C film(normal load: 19.6N, sliding velocity: 66mm/s, vacuum condition) (a) medium. (b) medium. (c) high.

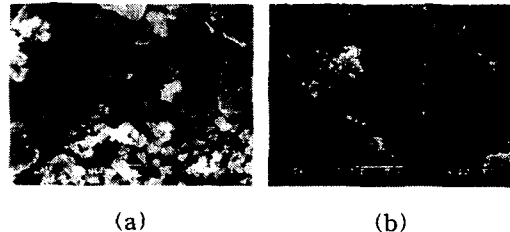


Fig. 6 SEM photographs of debris on worn surface for WC/C film(normal load: 19.6N, sliding velocity: 66mm/s, air) (a) RH 2% (b) RH 98%

3.3 WC/C 박막의 마멸 특성

Fig. 7은 수직 하중, 미끄럼 속도를 일정하게 유지하고, 대기의 진공도를 변화시켜 실험한 디스크의 마멸량으로 비마멸률을 구한 그래프이다. 마찰계수의 결과와 비슷한 결과로 비마멸률의 순서는 대기(10^5 Pa)→중진공

($1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$) → 고진공($1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$) 순으로 나타났다. 대기 중에서 실험한 것과 진공 중에서 실험한 것은 비마멸률의 급격한 차이를 보이고 있다. 그 이유는 진공 중에서는 대기 중에서보다 더 높은 응착(adherent) 특성이 나타나게 되고 그러한 특성으로 인해 코팅층이 실험 초기부터 덩어리형태로 떨어져 나오는 된다. 떨어져 나온 코팅덩어리가 접촉하는 두 표면 사이에서 거동을 하게 되고, 그 마멸 입자에 의해 연삭 마멸(abrasive wear)이 생기게 된다. 또한 높은 응착 특성은 디스크 표면에 적층되는 마멸 입자들과 새롭게 드러나는 코팅층을 계속해서 파손시키게 된다. 그러한 동작을 작동하다 보니 실험 중에는 마멸 실험기에서 높은 진동이 수반되었다. 그러나 대기 중에서는 산화막(WO_3)이 응착을 어느 정도 막아주는 역할을 하게 된다. 그래서, 대기 중에서는 마멸 입자가 생성되더라도 그 입자가 다시 적층되고, 새로운 코팅층이 드러나더라도 올바른 윤활 효과를 나타낼 수 있다. 그러한 이유로, 대기 중에서도 마멸이 일어나기는 하지만, 마멸 저항(antiwear)제로서의 고체 윤활제의 역할을 제대로 하게 되고 비마멸률 또한 진공 환경에 비해 낮게 나오는 결과를 가지고 오게 된다.

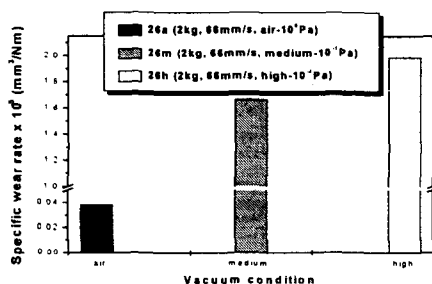


Fig. 7 Specific wear rate of WC/C coating specimen after 20,000 cycles

Fig. 8은 수직 하중과 미끄럼 속도를 일정하

게 고정된 후, 대기 중에서 상대 습도를 변화시켜 실험한 것으로 비마멸률을 나타낸 것이다. 상대 습도 20%와 50%에서 실험할 때 그 상대 습도가 계속 유지된 것은 아니며 $\pm 10\%$ 정도의 변화가 일어났다. 상대 습도를 변화시켜 구한 비마멸률은 상대 습도 2% → 20% → 50% → 98% 순으로 크게 나타났다. 그 결과의 차이도 상대 습도 2%와 20%의 차이와 50%와 98%의 차이가 비슷하게 나타났고 20%와 50% 간의 차이는 다른 것보다 크게 났다. 그것은 산화막(WO_3)에 의한 영향이라고 사료된다. 상대 습도 60% 전후로 산화막의 두께가 급속히 커진다[10]. 상대 습도 50% 가까이 갈수록 산화막의 생성은 쉬워지고, 그 생성된 산화막은 마멸을 일으키는 정도를 낮게 해 주는 보호막의 기능을 하게 된다. 산화막과 마멸 입자의 형상에 의해 비마멸률은 상대 습도가 높아질수록 낮아지는 결과를 보이게 된다.

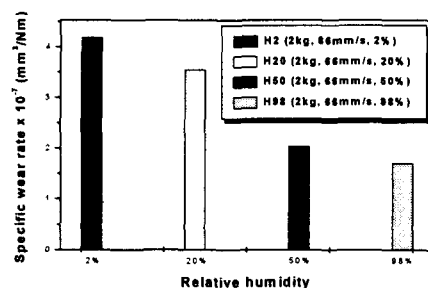
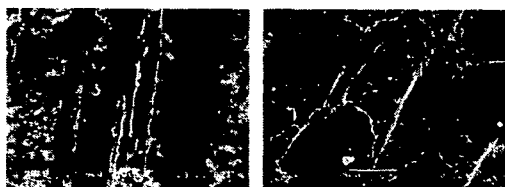


Fig. 8 Specific wear rate of WC/C coating specimen after 20,000 cycles

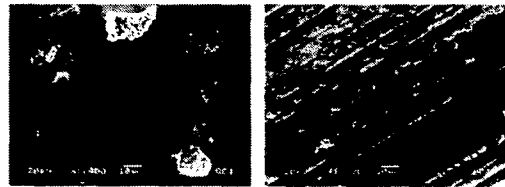
3.2 WC/C 박막의 마멸면 미시적 관찰

WC/C 박막 코팅을 마찰·마멸 실험한 후 마멸면에 대한 미시적 관찰로 표면간의 접촉 상대운동 중 어떤 마멸 기구에 의해 주로 마멸이 이루어 졌는지를 알아보기 위한 미시적 관찰을 했다. Fig. 9는 진공 중

에서 실험한 것으로 수직 하중은 19.6N으로 고정하고 미끄럼 속도 또한 66mm/s로 일정하게 했다. 모두 모재의 거칠기는 보이지 않으며, 중진공에서 실험한 시편에서는 코팅면의 많은 균열을 확인할 수 있다. 그리고 크랙에 의해 생긴 틈 사이로 더 이상의 새로운 코팅면이 없는 것을 볼 수 있다. 이것은 다층구조의 코팅이라도 모든 코팅면이 다 파손되고 모재 표면엔 마멸 입자에 의해 적층된 코팅막만 존재하며 이것 또한 많은 균열에 의해 파손되고 있음을 알 수 있다. 고진공 환경인 Fig. 9(b)는 더 이상의 코팅막은 발견할 수 없고 모재가 드러난 모습이다. 모재 또한 상대 시편인 편에 의해 굵힌 자국이 드러난다. 이것은 진공 환경에 드러나는 강한 응착력 때문이며 모든 코팅이 미끄럼 운동 중에 떨어져 나가게 되고 그 떨어져 나간 마멸 입자가 다른 코팅막을 형성하긴 하나 미흡하다고 할 수 있고, 그로 인해 새로운 코팅면이 계속 드러나 떨어져 나갔다고 볼 수 있다. 이것은 다른 대기에서 실험한 경우보다 훨씬 빠른 마멸을 진행시키고 그로 인해 중진공 환경에서는 더 이상의 새로운 코팅면은 보이지 않고 많은 균열만을 보이게 되고, 고진공 환경에서는 실험을 다 하지도 못했는데도 코팅이 다 파손되어 떨어져나가 버리고 코팅 자체가 관찰되지 않는 것이다.



(a) (b)
Fig. 9 SEM photographs of worn surface for WC/C film (normal load: 19.6N, sliding velocity: 66mm/s, vacuum condition)
(a) medium. (b) high.



(a) (b)
Fig. 10 SEM photographs of worn surface for WC/C film (normal load: 19.6N, sliding velocity: 66mm/s, air)
(a) RH 2% (b) RH 98%

Fig. 10은 수직 하중을 19.6N, 미끄럼 속도를 66mm/s로 일정하게 하고, 상대 습도를 달리하여 실험한 결과의 디스크 표면이다. Fig. 10(a)은 상대 습도 2%에서 실험한 것으로 모재의 거칠기는 관찰되지 않을 정도로 마멸 입자에 의한 충전과 적층이 잘 일어났다. 이것은 보다 많은 마멸에 의해 마멸 입자가 그만큼 많이 나왔다는 것을 보여주며 또한 마멸량이 많았음을 추정하게 해 준다. Fig. 10(b)는 상대 습도 98%에서 실험한 것으로 실험 조건을 만들 때 표면에는 물방울이 생겼었다. 그런 물방울의 응집력과 수분에 의해 산화막은 다른 어떤 조건들 보다 많이 생겼을 것이고 이것은 마멸 저항성을 더 높여 주었을 것이다. 모재의 거칠기가 다른 어떤 조건에서 실험한 것보다 많이 남아 있고, 코팅막이 떨어져 나간 흔적도 거의 없다. 마멸 트랙 주위에 나타나는 흰색의 부분은 산화에 의한 마멸 입자의 변화 결과라고 사료된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 AES에 의한 마멸 입자와 마멸면을 분석한 것이다. Fig. 11은 마멸 입자에 대한 분석으로 산소(O)량은 상대 습도 98%일 때가 가장 많다. 그것은 상대 습도 98%일 때가 가장 많은 산화막을 형성하였다는 것을 알 수 있다. 또한 탄소(C)의 양도 가장 작다. 그런 반면 마멸면을 분석한 Fig. 11을 보면 상대 습도 98%가 탄소의 양

이 가장 많다. 이것은 다른 조건의 실험보다는 더 많은 탄소가 마멸면에 남아서 두 표면간 접촉의 윤활 거동을 돕고 있다고 볼 수 있다.

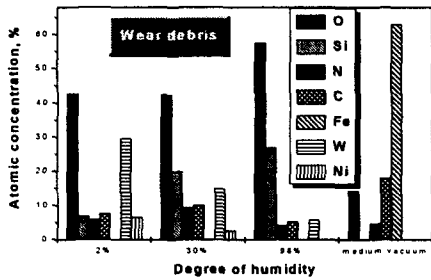


Fig. 11 AES analysis of debris worn surface for WC/C film

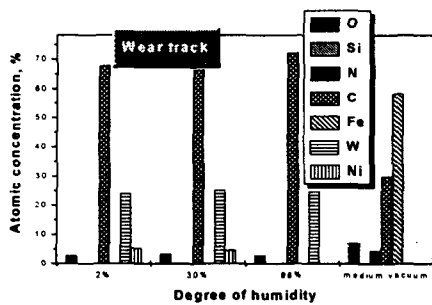


Fig. 12 AES analysis of worn surface for WC/C film

상대 습도 2%에서의 텅스텐이 가장 높게 나온다. 이것은 상대 습도 2%에서 마멸 입자가 많이 생성되었다는 것을 말하며 그만큼 많은 마멸이 일어났다는 것을 증명해 준다. 텅스텐은 WC/C 코팅에서 하중지지능력을 높여주기 위한 성분이므로 텅스텐이 많이 검출된다는 것은 윤활 성능이 낮아졌음을 알 수 있다. 진공 환경에서 실험한 결과의 분석을 보면 텅스텐(W)은 존재하지 않는다. 이는 마멸 입자가 떨어질 때 강한 응축에 의해 덩어리로 파손되고 그 마멸 입자들이 다시 코팅막을 거의 만들어 내지 못했

다는 것을 말해 준다. 또한 마멸면의 분석을 보면 약간의 탄소만이 존재하는 것으로 봐서 마멸 입자가 만든 탄소만의 코팅막이 마멸을 막아주지는 못하고 다중막(multilayer) 코팅이 다 파손되어 존재하지 않는다는 것을 보여준다. 또한 철(Fe) 성분은 모재의 성분이므로 이 성분이 검출되는 것으로 봐서 모재가 드러났을 정도의 심한 마멸이 일어났다는 것을 알 수 있다.

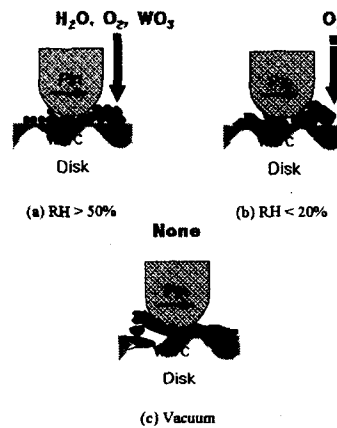
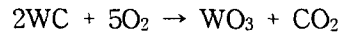


Fig. 13 Mechanism of friction and wear (a) Over RH. 50% (b) Below RH. 20% (c) In vacuum condition

Fig. 13은 마찰과 마멸이 일어나는 기구를 보여주는 것이다. 상대 습도 50% 이후에는 급격한 산화막의 생성과 수분에 의해 비마멸률은 낮아지게 되고 또한 마멸 입자들의 크기는 작고 형상은 구형에 가까워 마찰계수 또한 낮게 나온다. 산화막(WO₃)은 다음의 식과 같이 생성된다[10-12].



그러나, 상대 습도 20% 이전에서는 산화막과 수분은 존재 하지만 그 양이 적고, 또한 마멸 입자의 크기가 크고 모양도 모서리를 가진 모양이다. 그 결과, 비마멸률도 높고 마찰계수도 높게 나온다. 진공 환경 속에서는 코팅층이 박판형태로 떨어지게 되고 마멸 입자 또한 크고 많은 모서리를 가지고 있다. 산화막은 거의 존재하지 않기 때문에

마찰계수와 비마멸률이 아주 높게 나오는 결과를 보인다. 또한, 판상의 마멸 입자와 편 사이에 끼인 작은 마멸 입자들은 그 사이에서 상대 운동에 의해 길게 말린 실타래 모양의 마멸 입자로 변형되게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 진공도, 상대 습도 변화에 따른 WC/C multiayer의 마찰·마멸 특성을 고찰하고 각 조건에 따른 WC/C 박막의 마찰 및 파괴기구를 분석하고, WC/C 박막의 트라이볼로지적 특성을 규명하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. WC/C 박막은 진공도가 높아질수록 응착(adhesion)에 의한 코팅막의 파손이 급격하게 일어난다. 즉, 고체 윤활제로서의 제 기능을 발휘하지 못한다.
2. WC/C 박막은 대기 조건에서 상대 습도가 높아질수록 산화막, 마멸 입자의 크기와 형상 등에 의해 아주 좋은 고체 윤활제의 성능을 발휘한다. 이는 상대 습도 50% 전후로 마찰계수와 비마멸률이 좋아진다.
3. WC/C 박막의 마찰·마멸에 영향을 미치는 주요인자는 진공도, 상대 습도, 수직 하중, 미끄럼 속도 순서로 나타났다.

참 고 문 헌

1. N. J. M. Carvalho, "Microstructure investigation of magnetron sputtered WC/C coatings deposited on steel substrates", *Thin Solid Films*, Vol. 388, pp. 150-159, 2001.
2. N. M. Renevier, V. C. Fox, D. G. Teer and J. Hampshire, "Coating characteristics and tribological properties of sputter-deposited MoS₂/metal composite coatings deposited by closed field unbalanced magnetron sputter ion plating", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 127, pp. 24-37, 2000.
3. N. M. Renevier, N. Lobiondo, V. C. Fox, D. G. Teer and J. Hampshire, "Performance MoS₂/metal composite coatings used for dry machining and other industrial applications", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 123, pp. 84-91, 2000.
4. C. Donnet, "Advanced solid lubricant coatings for high vacuum environments", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 80, pp. 151-156, 1996.
5. F. P. Bowden and D. Tabor, "The friction and lubrication of solids", Clarendon Press, Oxford, 1986.
6. 김석삼, 권오원, "고진공하에서 소재의 마찰 및 마멸 실험장치", 대한민국특허출원, 출원번호, 10-1999-33223호, 1999.
7. R. L. Fusaro, "Lubrication of Space Systems", *J. of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol. 51, No. 3, pp. 182-194, 1995.
8. A. Z. Szeri, "Tribology : friction, lubrication and wear", McGraw-Hill, 1980.
9. 양승호, 공호성, 이광렬, 박세준, 김대은, "실리콘이 첨가된 다이아몬드상 카본 필름의 트라이볼로지적 특성에 미치는 환경 변화의 영향", *한국윤활학회지*, Vol. 16, No. 3, pp. 188-193, 2000.
10. Anna Warren, Anders Nylund and

- Ingemar Olefjord, "Oxidation of Tungsten and Tungsten Carbide in Dry and Humid Atmospheres", *Int. J. Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 14, pp. 345-353, 1996.
11. J. Brillo, H. Kuhlenbeck and H. J. Freund, "Interaction of O₂ with WC(0001)", *Surface Science*, Vol. 409, pp. 199-206, 1998.
 12. Z. G. Ban and L. L. Shaw, "On the reaction sequence of WC-Co formation using an integrated mechanical and thermal activation process", *Acta mater*, Vol. 49, pp. 2933-2939, 2001.