

코팅 및 표면 처리된 강의 고하중 영역에서의 마모 마찰 특성

임동필[†] · 심동섭 · 김상범

두산인프라코어 기술원

Friction and Wear Behavior of Coating and Surface Treated Steel for Low Velocity High Pressure Application

DongPhill Lim[†], DongSeob Shim and SangBeom Kim

Institute of Technology Doosan Infracore

(Received October 20, 2008; Revised November 15, 2008; Accepted November 24, 2008)

Abstract – Friction and wear behavior of hard coated and surface treated steel with candidate processing methods for low velocity high pressure application investigated. Wear tests were carried out under specific region considering the operation condition of construction equipments under lubricated and unlubricated condition. Different tribological behavior analyzed with comparing the wear rate of counter part, morphology and topography of worn surface and the worn volume of samples and counter parts.

Key words – pin, bush, wear, coating, surface treating, tribology

1. 서 론

굴삭기를 비롯한 건설 장비의 작업기는 핀과 부시를 기본단위로 한 다수의 관절부로 이루어져 있으며, 이러한 관절부는 피스톤의 왕복 운동을 요동운동으로 전환시키는 역할을 한다. 작업기의 수명을 좌우하는 주요 부품은 직접 접촉하여 마모가 일어나는 핀과 부시로서, 통상의 작업기의 사용 목적과 환경을 고려한 작업 조건은 정하중시 면압 2~5 kgf/cm², 작동간에는 이것의 3배 이상의 면압이 작용하기도 하며, 속도는 2~6 cm/sec의 매우 낮은 속도영역인 것이 알려져 있다[1]. 이러한 조건은 높은 점도의 그리스에 있어서도 상시적으로 윤활막을 유지하기 어려운 혼합 혹은 경계 윤활 조건에 해당한다[2]. 더욱이 기구학적 특성상 부위별로 일정 구간 내에서만 요동하는 특성을 나타내므로 윤활 효과는 더욱 제한되며 제한된 영역의 주요 하중 부위 위주로 마모가 가속된다[3].

현재까지 이러한 저속 고하중 조건에서 장시간에 걸쳐 신뢰성 있게 사용 가능한 금속 외 재질은 보고되어 있지 않다. 금속-금속간 저속 고하중하 마모 마찰 거동에 있어서는 자기 윤활성이 큰 조합에 있어서도 윤활막이 파괴되어 금속간 접촉이 일어나기 시작하면 마모가 급격히 가속화되는 특징이 있다[4,5]. 따라서 윤활 유지가 매우 중요하나 전술한 바와 같이 통상 고점도의 그리스 이외에는 윤활막을 유지하기 어려운 조건이며 사용 환경과 관리 조건의 다양성에 의해 일정 수준의 윤활이 이루어지지 않을 수 있어 최소한의 윤활 조건에서도 자기윤활성을 유지할 수 있어야 한다.

이러한 작동 조건, 사용 환경, 윤활 조건 등의 특이성으로 인해 핀-부시를 기반으로 하는 여타의 베어링들과는 차별화된 내 하중성, 내구성, 내마모성 그리고 자기 윤활성이 요구된다. 특히 상대 부품과 직접 접촉하는 표면은 이와 같은 열악한 환경에서도 가속 마모를 최대한 억제할 수 있도록 설계되어야만 내구성을 보장할 수 있어 다양한 재질 및 형태의 부시에 대한 윤활 및 표면 처리 방법이 연구되어 응용되어 왔다[6-10]. 하

[†]주저자 · 책임저자 : dongpil.lim@doosan.com

지만 핀에 있어서는 Cr plating으로 대표되는 경질 코팅법과 고전적 열처리 방법에 국한되어 시도되어 왔으며 이에 따라 성능이 제한되어 왔다.

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 대표적인 핀 표면처리법인 고주파 경화법과 경질 Cr 코팅을 비롯, 향후 적용이 유망한 6종의 코팅 및 표면처리법들에 대해 작업기 사용 조건을 고려한 마모시험을 통하여 윤활 및 건조 분위기에서의 한계 면압과 마모 마찰 특성을 비교해보고자 하였다.

2. 실험

2-1. 실험 장치 및 실험 방법

마모시험은 범용 마모시험기(Pin-67)를 이용하여 pin-on-disc 형태로 하였다. 시험기는 단일방향 회전 속도를 10~3000 rpm까지 조절이 가능하고 800 N까지 수직하중을 인가할 수 있으며, 마모시험간 마찰계수는 물론 상대재의 변위를 변위 센서를 이용하여 실시간 측정 가능하다.

윤활 분위기 마모시험에 사용된 윤활제는 건설 기계용 상용 그리스(GS EP-2)를 사용하였다. 면압은 통상의 작업 면압의 2배 이상까지, 속도는 가장 빠른 부위의 평균 속도 수준으로 하기 위해 track 반경을 2 cm, 회전 속도 30 rpm으로 선정하여 선속도를 0.063 m/sec로 고정하고 하중을 최소 50 N에서 650 N까지 50 N 단위로 하중을 인가하면서 시험하는 이른바 step-loading 방식으로 하였다. 위 하중 조건으로 상대재 직경을 2 mm로 제한 함으로써 1.6 kgf/mm²~21.1 kgf/mm² 범위의 면압을 구현하였으며 이전 step에서의 마모에 의한 영향을 최소화하기 위해 각 step의 유지시간은 10분, 승압 시간은 1분으로 최소화 하였다. 모든 시험은 상기 동일 조건으로 마모 시험 진행 후 마모량과

마찰 계수 변화를 비교하였다. 매 시험 진행 전 접촉면에 균일한 면압 인가 및 일정한 속도 유지를 위하여 상대재를 장착 후 연마재를 이용하여 초기화하였다. 이때 초기화된 상대재의 표면 조도는 Ra 0.8 μm 수준으로 하였다.

마모 시험 후 시편 및 상대재의 마모 형태를 광학현미경, confocal microscope, 그리고 조도계를 사용하여 분석 및 측정 하였다.

2-2. 시편

실험 시편은 직경 75 mm disc 형태로, Ra 0.8 μm로 균일하게 연마된 경도 HRC 23~25(HV 250)로 조질 처리된 SCM440 재질 위에 코팅 혹은 표면 처리된 8개종 시편을 대상으로 하였다. 코팅으로는 PVD 법으로 500 nm 두께의 Cr bond 층 위에 증착시킨 DLC, WC/C, CrN, TiAlN과 경질 Cr 도금 층 5종, 표면 처리로는 고주파, 연질화 그리고QPQ 총 3종으로 하였다. 이 때, 고주파 열처리 및 산질화를 제외한 코

Table 1. Notation and specifications of the samples

Notation	Coating (treating) process	Layer Thickness (μm)	Surface Roughness (Ra, μm)	Surface Hardness (HV)
IH	Induction Hardened Steel	1000	0.5	900
DLC	DLC PVD coating	2~3	0.9	2500
WC/C	WC/C PVD coating	3	0.4	1500
CrN	CrN PVD coating	3	0.6	1750
TiAlN	TiAlN PVD coating	4	1.1	3300
Cr	Cr plating	10	0.5	1230
NC	Nitro-carburizing	3	1.1	1000
QPQ	Quench Polishing Quench (Complex Nitro-carburizing)	10	0.6	1200
Counter part	Carburizing	800	0.8	760

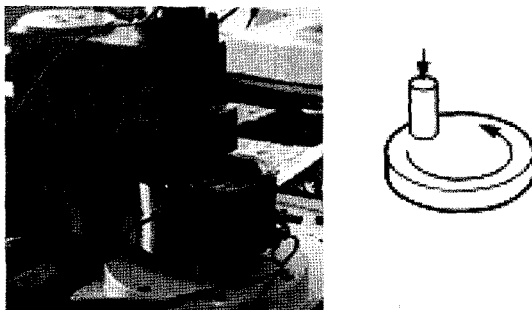


Fig. 1. Photograph and schematic diagram of pin-on-disc wear test.

팅 및 표면 처리 층의 두께는 2~4 mm로 균일하게 하였다. PVD 코팅의 두께와 증착 조건 등은 공정의 특이성을 고려하여 양산 가능한 코팅 재질 별 최적 기준 두께로 선정 하였으며, 표면 처리 역시 최적 처리 조건 및 공정으로 제작 된 두께를 기준으로 하였다 [11]. 표면 조도에 의한 영향을 최소화하기 위하여 코팅 및 표면처리 방법에 상관 없이 모든 시편의 표면 조도는 Ra 0.4~1.1 μm 범위 내로 제작하였다. 시편의 명명법과 주요 사양을 Table 1에 나타냈다.

작업기의 작동 조건과 일반적인 재질을 고려하여 직경 2mm 원기둥 형태로 가공된 SCM415를 칩탄 처리한 시편을 상대재로 사용하였다. 이 때, 칩탄 깊이를 0.8mm 이상으로 하여 마모가 진행하더라도 심부에 칩탄 조직이 유지될 수 있도록 하였다.

3. 실험 결과

3-1. 마찰 계수

윤활 및 건조분위기에서의 압력에 따른 마찰계수 변화를 Fig. 2과 Fig. 3에 각각 나타냈다. 윤활 분위기에서 TiAlN, 고주파, CrN, 연질화 시편의 경우 마찰계수가 0.1 이상으로 급격히 증가하는 하중 영역이 존재했다. 건조분위기에서는 DLC, WC/C, 산질화 시편의 경우 낮은 하중에서 낮은 마찰계수를 나타내다 증가하는 형태를 나타내며, 나머지 시편들의 경우는 반대 경향을 나타냈다.

3-2. Specific wear rate

변위센서를 통해 측정된 변위로부터 환산된 부피를

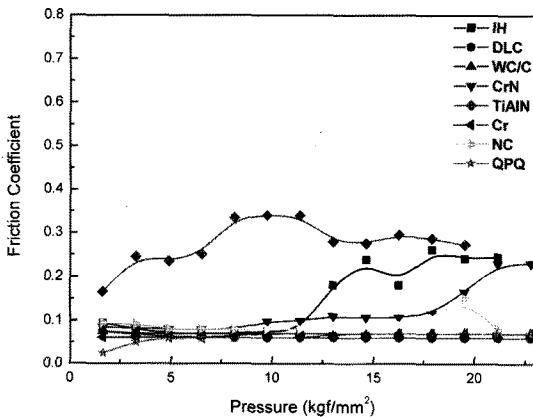


Fig. 2. Variation of friction coefficient with applied pressure under lubricated condition.

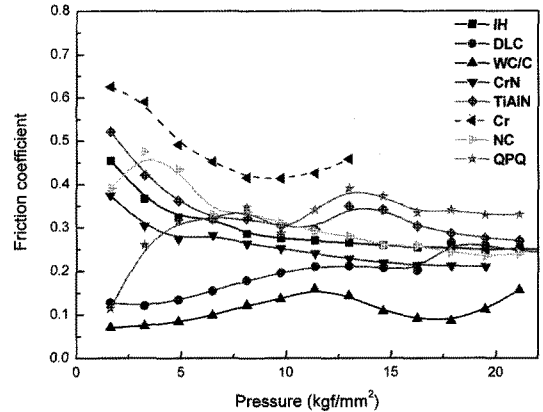


Fig. 3. Variation of friction coefficient with applied pressure under unlubricated condition.

토대로 상대재 마모율의 하중에 따른 변화를 Fig 4 및 Fig. 5에 나타냈다.

윤활 분위기에서 TiAlN, CrN, NC를 제외한 모든 경우에서 50 N 이후 전반적으로 하중에 따라 점차 감소하여 모두 $1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 이하 값을 나타냈다. 반면, TiAlN의 경우 초기부터 높은 마모를 나타냈으며, CrN 코팅 상대재의 경우 550 N에서 급격히 커지는 거동을 나타냈다.

건조 분위기 역시 TiAlN, CrN은 낮은 하중부터 10^{-4} order 이상의 큰 마모율을 나타냈으며, 이후로도 상대적으로 큰 마모율을 나타냈다. 연질화 및 DLC와 같이 급격히 증가하는 하중이 나타나는 것 외에는 전반적으로 유사한 경향을 나타냈다.

이와 같은 마모율의 차이 혹은 마모율의 급격한 변화는 마모 메커니즘의 차이 혹은 변화를 의미하므로,

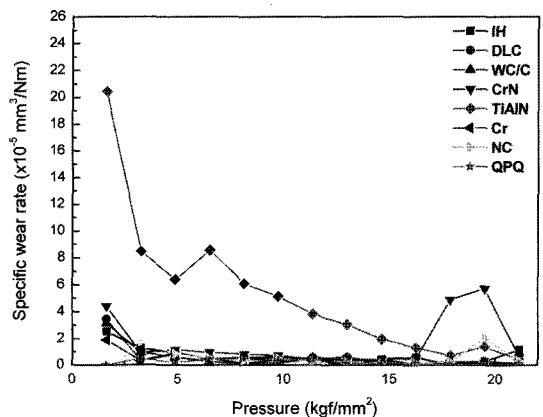


Fig. 4. Variation of specific wear rate with applied pressure under lubricated condition.

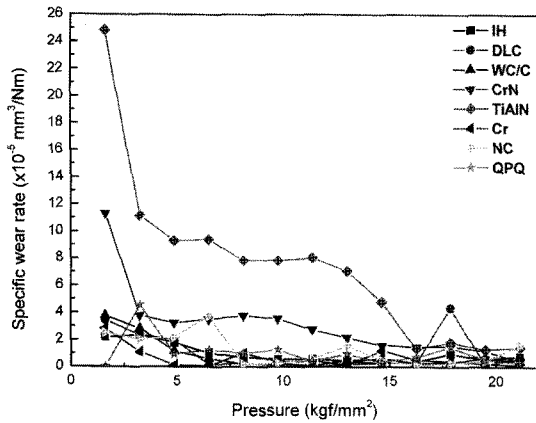


Fig. 5. Variation of specific wear rate with applied pressure under unlubricated condition.

TiAlN은 윤활 및 건조 분위기 모두 낮은 하중부터 다른 시편들과는 다른 마모 거동을 나타내며, CrN은 윤활 분위기 약 16 kgf/mm² 이상 압력에서 급격히 변화된 것으로 판단된다. 마찰계수 변화에서도 이러한 경향을 확인할 수 있다 (Figs. 2, 3). 그러나 윤활 분위기에서 IH의 경우와 같이 마찰계수에 있어 급격한 상승이 있음에도 마모율은 큰 변화 없는 경우도 확인되는데, 깊은 경화 깊이의 표면 처리 방식이 내마모 측면에서 유리함을 알 수 있다.

3-3. 마모 형태

윤활 및 건조분위기 마모시험 후 시편의 wear track 형태를 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타냈다.

윤활 분위기에서 고주파, TiAlN, NC시편의 경우 마찰 방향으로 뚜렷한 동심원 형태의 뚜렷한 이상 마모 형태를 나타냈으며, 코팅 및 표면처리층이 유실된 것이 확인된다. DLC와 WC/C의 경우 wear track을 확인할 수 없을 정도로 온전한 표면 상태로 확인되며, CrN과 QPQ 시편의 경우 국부적으로 이상 마모 형태가 관찰되나 대부분의 영역에서 원래 표면의 가공 흔적이 확인됨을 알 수 있다. 이러한 이상 마모 형태는 마찰을 수반하므로, 이상 마모가 나타난 시편들에 있어서는 모두 Fig. 2에서와 같이 0.1 이상의 마찰계수가 나타나는 부분이 관찰된다.

건조 분위기에서도 윤활 분위기에서 이상 마모가 일어났던 IH, TiAlN, 연질화의 경우 역시 유사한 형태의 마모형태를 나타냈으며, 이외 DLC의 경우도 IH의 경우와 유사하게 뚜렷한 wear track을 나타냈다. 마찰계수와 상대재의 specific wear rate이 약 18 kgf/mm²

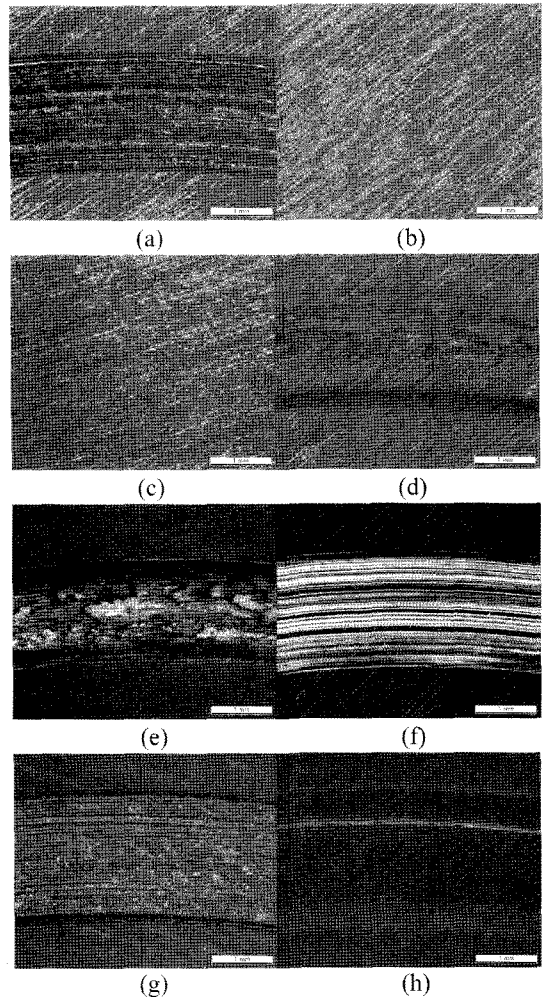


Fig. 6. Photographs of worn tracks after wear test under lubricated condition; (a) IH, (b) DLC, (c) WC/C, (d) CrN, (e) TiAlN, (f) Cr, (g) NC and (h) QPQ sample.

에서 급격히 증가함을 알 수 있는데, 해당 하중에서 코팅이 급격히 파손된 이후 고하중하 금속-금속간 마찰에 의해 급격히 마모되는 것으로 볼 수 있다.

WC/C, CrN, QPQ의 경우 track 영역이 확인되나 코팅 및 표면처리 층이 완전히 손실되지는 않아 track 부위에서도 기계가공에 의한 scratch가 남아있음을 알 수 있다. 그러나, 마찰계수에 있어서는 그 절대 값과 변화 양상에 있어 큰 차이를 나타냈다(Figs. 2, 3).

3-4. Wear volume

마모실험 후 시편과 상대재의 마모량은 마모실험 후

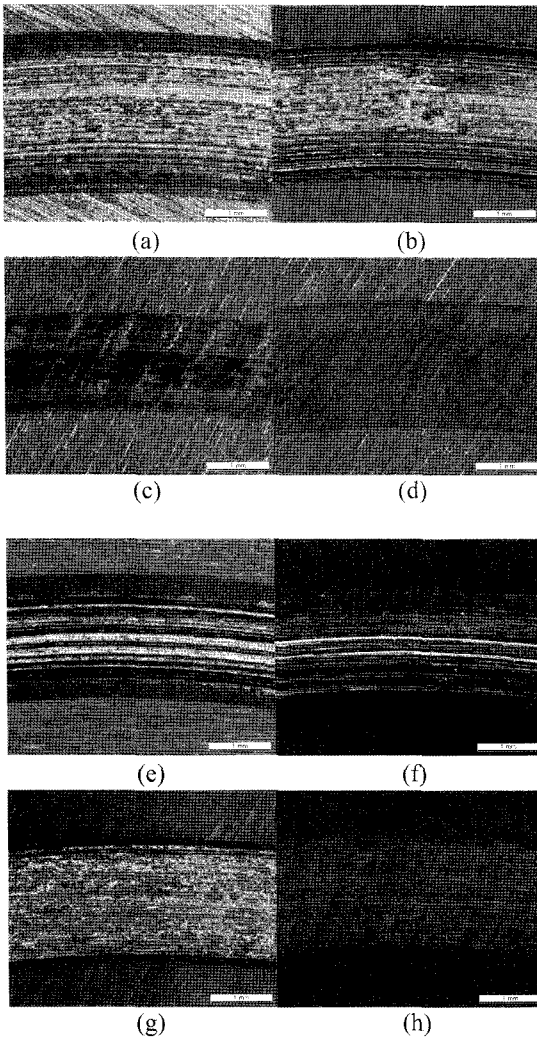


Fig. 7. Photographs of worn tracks after wear test under dry condition; (a) IH, (b) DLC, (c) WC/C, (d) CrN, (e) TiAlN, (f) Cr, (g) NC and (h) QPQ sample.

wear track 영역의 profile로부터 산출한 면적과 깊이, 그리고 변위 센서로 측정된 변위를 토대로 구하였다. Fig. 8과 Fig. 9에 윤활 및 건조 분위기 시편의 track 영역 표면 형상을, Fig. 10 과 Fig. 11에 윤활 및 건조 분위기 시편과 상대재 마모량의 총합을 각각 나타냈다.

윤활 분위기에서는 TiAlN, NC, IH를 제외한 모든 경우에서 시편의 마모량은 무시할 수 있을 정도 수준으로 작게 나타났으며, TiAlN 및 CrN 이외의 시편에서는 상대재의 마모량 역시 거의 나타나지 않았다.

TiAlN은 모든 윤활 조건에서 가장 높은 시편 및 상

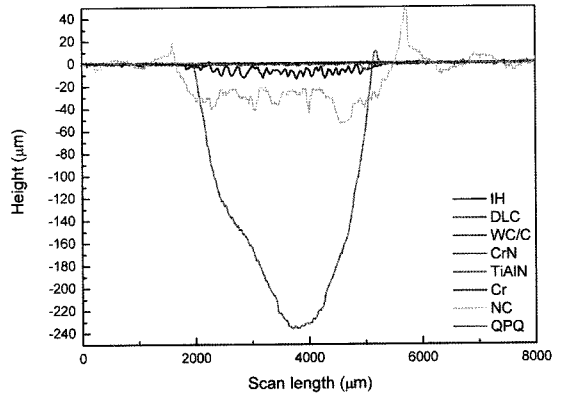


Fig. 8. Topography of the worn tracks under lubricated condition.

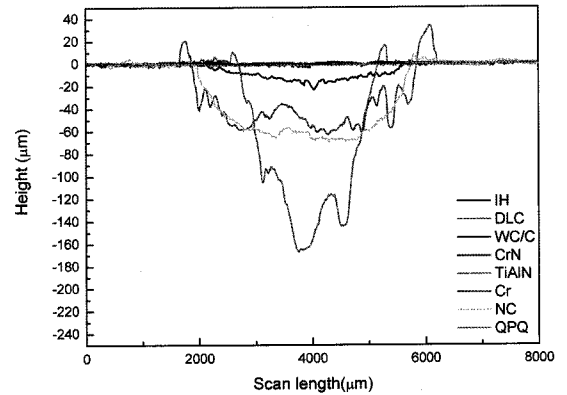


Fig. 9. Topography of the worn tracks under unlubricated condition.

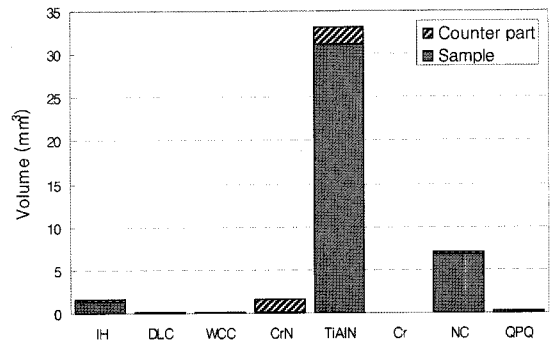


Fig. 10. Total wear volume after wear test under lubricated condition.

대재 마모량을 나타냈으며, 마모 형태 역시 모든 조건에서 극심한 마모 형태를 나타냈다. 취성과 경도가 높

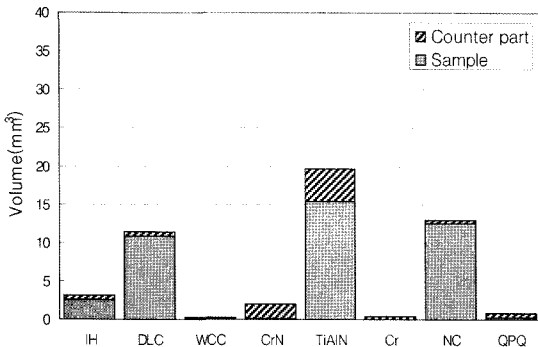


Fig. 11. Total wear volume after wear test under unlubricated condition.

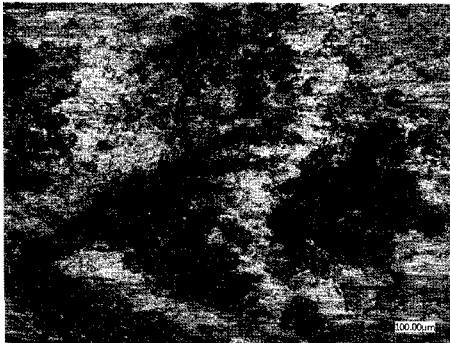


Fig. 12. Confocal microscopic image of the counter-part surface which is worn against TiAlN coated sample under lubricated condition.

은 코팅층이 조기에 파괴되어 상대재 표면에 박혀 이후 쟁기질 형태 마모가 가속되는 것으로 추정된다. Fig. 12에 마모시험 후 상대재 표면에 박힌 debris 형태를 나타냈다. 또한 다른 시편들과는 달리 마모량은 물론 wear track의 폭 및 깊이가 윤활 분위기에서 더 크게 나타났으며, 약 10 kg/mm² 이상에서는 마찰계수에 있어 윤활 상태에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다. 코팅의 조기 파손과 이에 의한 과량의 마모로 인하여 그리스가 마찰 면에서 조기에 사라지고, 발생된 다량의 마모로 인하여 상대재 주위에 부착되어 하중 작용 면적을 넓힘으로써 track 폭을 넓이기 때문으로 추정되며, 이는 근본적으로 코팅의 부착력이 충분하지 않고 코팅과 기판간 경도 편차가 과도하기 때문인 것으로 판단된다.

CrN의 경우 건조 및 윤활 분위기 모두에서 시편의 마모량은 무시할 수 있을 정도 수준이었으나, 비슷한 수준의 상대재 마모량을 나타냈다. 즉, 코팅 자체는 윤활 조건에 상관 없이 거의 마모되지 않지만 상대재 마

모량은 TiAlN을 제외한 타 시편 대비 크게 나타나 시편의 마모량이 상대적으로 큰 다른 시편들의 경우와 뚜렷이 구별된다.

자기 윤활성 코팅들 중 WC/C나 QPQ와 같이 일정한 마찰계수를 나타내며 시험 조건에서 극심한 마모 형태를 나타내지 않는 경우와 비교할 때, DLC와 NC는 마찰계수 및 마모율이 급격히 상승하는 압력이 존재하며, 제한된 두께의 코팅 혹은 표면처리층 손실 이후에는 급격하게 마모 되어 마모량이 컸다.

Cr 코팅의 경우 모든 윤활 조건에서 가장 낮은 시편 및 상대재 마모량을 나타냈으나, 건조분위기에서 0.4 이상의 가장 높은 마찰계수를 나타냈으며 약 13 kgf/mm² 이상의 압력에서는 마찰력이 과도하여 측정이 불가능 하였다.

위 결과들을 종합해 볼 때, 모든 윤활 조건에서 이상마모가 발생하지 않고 가장 낮은 시편 및 상대재 마모량과 마찰계수를 나타낸 시편은 WC/C로 나타났으나, 본 시험 결과는 제한된 시험 조건에서 코팅 혹은 표면처리에 따른 시편의 한계 면압과 마모 형태를 비교하기 위한 것이므로, 내구성능에 대한 추가적인 검증이 필요하다.

4. 결 론

8종의 코팅 및 표면처리법들에 대해 마모 마찰 특성을 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 이상 마모가 나타나지 않는 최대 면압인 한계 면압은 윤활 조건, 코팅 또는 표면처리 방법에 따라 상이하게 나타났다.
- 2) 제한된 두께의 코팅 혹은 표면처리 층이 손실되는 고경도 코팅의 경우 코팅층 손실 이후 급격하게 마모율과 마찰계수가 증가하였다.
- 3) 마찰계수가 증가하면 마모량 역시 증가하나 조합에 따라서는 마찰계수 증가에 따른 마모량 증가가 크지 않은 경우도 나타났다.
- 4) CrN 코팅의 경우 코팅층의 마모량 대비 상대재의 마모량이 높게 나타났으며, 이러한 경향과 상대량은 윤활 조건에 따라 큰 변화 없었다.
- 5) WC/C가 모든 윤활 조건에서 낮은 마찰계수와 마모량을 나타냈으며, Cr은 최소 마모량을 나타냈으나 건조 분위기에서 가장 높은 마찰계수를 나타냈다.

참고 문헌

1. Naofumi Hiraoka, "Wear Life Mechanism of Journal Bearing with Bonded MoS₂ Film Lubricants in Air and Vacuum", *Wear*, Vol. 249, pp. 1014-1020, 2002.
2. Massimo Del Din and Elisabet Kassfeldt, "Wear Characteristics with Mixed Lubrication Conditions in a Full Scale Journal Bearing", *Wear*, Vol. 232, pp. 192-198, 1999.
3. V.V. Kharlamov, V.L. Kolmogorov, and S.V. Pavlishko, "Friction and Wear Model of a Heavy Loaded Sliding Pair Part III. Application to a Lubricated Plane Bearing", *Wear*, Vol. 241, pp. 65-78, 2000.
4. Padelis G. Nikolakopoulos and Chris A. Papadopoulos, "A Study of Friction in Worn Misaligned Journal Bearings under Severe Hydrodynamic Lubrication", *Tribology International*, Vol. 41, pp. 461-472, 2008.
5. Jan Ukonsaari, "Wear and Friction of Synthetic Esters in a Boundary Lubricated Journal Bearing", *Tribology International*, Vol. 36, pp. 821-826, 2003.
6. N.M. Renevier, J. Hampshire, V.C. Fox, J. Witts, T. Allen, and D.G. Teer, "Advantages of Using Self-lubricating, Hard, Wear-resistant MoS₂ -based Coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 142-144, pp. 67-77, 2001.
7. Naofumi Hiraoka, "Wear Life Mechanism of Journal Bearings with Bonded MoS₂ Film Lubricants in Air and Vacuum", *Wear*, Vol. 249, pp. 1014-1020, 2002.
8. D. J. Hargreaves* and A. S. Elgezawy, "A New Model for Combined Couette and Poiseuille Flows in the Transverse Groove of a Plane Inclined Slider Bearing", *Tribology International*, Vol. 31, pp. 297-303, 1998.
9. Ertug ̇rul Durak and Fazlı Duran, "Tribological and Fatigue Failure Properties of Porous P/M Bearing", *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, pp. 745-755, 2008.
10. K. Gururajan and J. Prakash, "Roughness Effects in a Narrow Porous Journal Bearing with Arbitrary Porous Wall Thickness", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 1003-1016, 2002.
11. Y.H. Qiang, S.R. Ge, and Q.J. Xue, "Microstructure and tribological properties of complex nitrocarburized steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 101, pp. 180-185, 2000.