자장 여과 아크 이온빔 식각 공정을 이용한 WC-Co 및 SCM415 금속 소재 표면 구조 제어 연구

이승훈, 윤성환, 김도근, 권정대, 김종국*

한국기계연구원 부설 재료연구소

Surface Modification of WC-Co and SCM415 by the Ion Bombardment Process of Filtered Vacuum Arc Plasma

Seunghun Lee, Sung-Hwan Yoon, Do-Geun Kim, Jung-Dae Kwon, Jong-Kuk Kim*

Korea Institute of Materials Science, Changwon 641-831, Korea

(Received April 9, 2010 ; revised April 22, 2010 ; accepted April 29, 2010)

Abstract

The surfaces of WC-Co and SCM415 were etched to form a micro size protrusion for oil based ultra low friction applications using an ion bombardment process in a filtered vacuum arc plasma. WC-Co species showed that a self-patterned surface was available by the ion bombarding process due to the difference of sputtering yield of WC and Co. And the increasing rate of roughness was 0.6 nm/min at -600 V substrate bias voltage. The increasing rate of roughness of SCM415 species was 1.5 nm/min at -800 V, but the self-patterning effect as shown in WC-Co was not appeared. When the SCM415 species pretreated by electrical discharge machining is etched, the increasing rate of roughness increased from 1.5 nm/min to 40 nm/min at -800 V substrate bias voltage and the uniform surface treatment was available.

Keywords: Ion bombardment, WC-Co, SCM415, Friction, Filtered Vacuum arc

1. 서 론

21세기에 들어 에너지 기술에 대한 관심과 필요성이 대두되면서 대체에너지 개발과 에너지 간 전환 효율 향상을 통한 에너지 사용 효율 극대화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들면 자동차 내연기관 연비 증가에 대한 연구, 베어링의 마찰계수 감소 연구 등을 통해 에너지 사용 효율을 높이고자 하고 있다. 특히 지구 온난화 방지를 위한 이산화탄소 배출량 감소 문제가 대두되면서 초저마찰 및 초윤활 특성 제어를 통한 자동차 연비 향상에 관한 연구가 산업계에서 활발히 진행되고 있다¹⁻³⁾. 최근 자연모사를 이용한 연구 및 설계를 통하여 모재 표면에 마이크로/나노 크기의 구조물

을 형성함으로써 초저마찰 특성을 이룰 수 있다는 것이 연구되고 있으며, 이러한 표면 형상 제어는 리소그라피, 레이저가공 및 플라즈마 처리의 방법을 통하여 시도되고 있다.

플라즈마 처리를 기반으로 한 표면구조 제어 연구는 RF 플라즈마, DC 플라즈마 및 아크 플라즈마 등의 다양한 플라즈마 소스를 통해 진행되어 왔으며, 특히 고밀도 플라즈마 발생을 통해 고속 처리가 가능한 아크 플라즈마 응용 연구가 활발히 진행되어왔다^{4,5)}. 하지만 아크 플라즈마의 경우 플라즈마 발생시 음극 표면에서 발생하는 거대입자에 의해 시편 표면 오염 및 거칠기 제어의 어려움이 있다. 그리하여 굽은 자장 구조를 형성하여 전하를 띤 이온 및 전자는 원하는 위치로 수송하고 전하를 띠지 않은 중성 거대 입자는 관성에 의해 제거하는 자장 여과 아크 플라즈마가 연구되어 왔으며 이를

*Corresponding author. E-mail : kjongk@kims.re.kr

이용한 증착 및 식각 연구들이 다수 발표되어 왔다^{6,7)}. 본 연구에서는 진공 자장 여과 아크 플라즈마 이온빔 식각 공정을 이용하여 WC-Co 및 SCM 415 금속 소재의 표면 처리에 따른 표면 형상 및 거칠기 변화를 분석하였다.

2. 실험 구성

본 연구에서 사용된 자장 여과 아크 플라즈마 장비의 구성도는 그림 1과 같다. 아크 플라즈마 발생을 위해 반지름 55 mm의 graphite 음극이 사용되었으며, 촉발 전극의 물리적 접촉을 통해 아크방전이 일어난다. 음극에서 발생된 플라즈마는 거대입자의 필터 역할을 하는 플라즈마 덕트를 통하여 공정 챔버로 이송되며, 플라즈마 덕트는 내경 120 mm T형으로 5개의 전자석을 이용하여 자장을 형성하고, 음극 증발부와 공정챔버와는 전기적으로 절연되어 있으며, 평균 중심 자장밀도는 250 Gauss이다. 일반적으로 자장에 구속되는 이온의 반경은 전자의 회전 반경 및 플라즈마 덕트의 내경보다 크지만, 플라즈마 내 이온-전자 간 상호 인력의 작용에 따른 Boltzman relation에 의해 이온이 전자를 따라 같이 수송된다⁸⁾. 플라즈마 덕트 내 이온 수송시 플라즈마 덕트 벽과 충돌해 손실되는 이온을 줄여 이온의 수송 효율을 증가시키기 위해 덕트에 10 V의 DC 양전압이 인가되었다. 아크 전류는 25~40 A, 운전 압력은 약 1 mTorr이며 방전 가스로는 Ar이 사용되었다. 운전압력이 1 mTorr인 경우, 아크 음극 물질인 graphite에서 생성된 탄소 이온들은 플라즈마 덕

Fig. 1. Schematics of filtered vacuum arc system (SM: source magnet, EM: emitting magnet, BM: Bending magnet, OM: output magnet, BBM: backside bending magnet).

Fig. 2. B-field geometry in the filtered vacuum arc system (code: FEMM, node #: 165193, elements #: 329455, Boundary condition: Neumann condition).

트 내 수송과정에서 중성 Ar 입자들과의 충돌에 의해 중성화되어 처리 기관까지 도달할 확률이 낮아 탄소 이온에 의한 증착효과는 무시할 수 있으며 이때 기관에 도달하는 플라즈마는 주로 Ar 플라즈마이다. 이온빔 식각에 사용된 금속 시편은 WC-Co 및 SCM415이며, 플라즈마 덕트 출구로부터 150 mm 떨어진 위치의 기관에 장착되었다. 기관에는 이온빔 가속을 통한 식각을 위해 -400 V, -600 V, -800 V의 비대칭 펄스(-85%, +15%)의 전압이 인가되었으며, 패러데이 컵으로 측정한 결과 -600 V 인가시 기관에 입사하는 평균 이온전류 밀도는 4.5 mA/cm²이다. 그림 2는 본 연구에서 사용된 자장 여과 아크 플라즈마 소스의 자장구조를 유한요소법을 이용하여 전산모사한 결과이다. 본 분석에 사용된 코드는 finite element method magnetic(FEMM)⁹⁾이며 전산모사 조건은 node 165193개, 요소 329455개, 경계조건은 Neumann 조건이다. 각 전자석 코일에 인가된 전류 값은 SM=2.5 A, EM=4 A, BM=6 A, OM=4 A, BBM=-2.5 A이며 이 조건은 플라즈마 덕트 내부와 수송되는 플라즈마 간의 충돌이 최소인 조건이다. 그림 2에 나타난 자장을 따라 아크 음극에서 발생된 플라즈마가 시편처리 기관까지 수송되며 기관 인가전압에 의해 가속된 이온들을 사용해 표면처리를 진행하였다. 식각된 금속 시편 표면은 전자주사현미경(MIRA, TESCAN사)을 통해 관찰하였으며, 금속 시편 표면의 거칠기(R_a) 값을 측정하기 위해 접촉식 표면 프로파일러(Surface profiler, Tencor)가 사용되었다. 스타일러스의 운전 조건은 측정 속도 50 μm/min, 측정 주파수 200 Hz, 측정 길이 2 mm이다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 이온빔 처리 전 WC-Co 시편 및 아크

Fig. 3. SEM images of WC-Co surface after -600 eV Ar ion beam etching process (etching time: (a) only polished, (b) 5 min, (c) 10 min, (d) 20 min, magnification: 50000).

전류 25 A, 기판 전압 -600 V 조건에서 5분, 10분 및 20분 처리한 WC-Co 표면의 전자주사현미경 사진이다. 일반적으로 두 물질 간의 sputtering yield(S)는 두 물질의 질량, 입사 입자 에너지 및 에너지 포텐셜에 관한 식으로 정리되며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$S \propto \left(\frac{m_i m_t}{(m_i + m_t)^2} \right) \frac{E_i}{U} \quad (1)$$

여기서 m_i 는 입사물질의 질량, m_t 는 대상물질의 질량, E_i 는 입사 입자 에너지, U 는 에너지 포텐셜이다. 600 eV Ar^+ 이온에 의해 sputtering될 경우 Co의 sputtering yield는 약 1.173 atoms/ion, W의 sputtering yield는 약 0.599 atoms/ion이며 WC의 경우 W보다 낮은 sputtering yield 값을 가진다고 알려져 있다⁽¹⁰⁻¹²⁾. 따라서 WC-Co의 Ar이온빔 식각 시 sputtering yield 차이에 의해 추가적인 마스크 처리 없이 거친 표면 구조 제어가 가능하며 처리 전면적이 고르게 표면제어가 됨을 확인하였다. 그림 4는 처리 시간에 따른 R_a 값 변화이다. R_a 값은 처리 전 약 7 nm에서부터 처리시간이 5분에서 10분, 20분까지 증가함에 따라 12 nm, 16 nm, 38 nm로 증가하였으며 거칠기 증가는 평균 약 1.5 nm/min이다. 처리시간이 증가함에 따라 거칠기 증가량이 상승하는

Fig. 4. Roughness variation of WC-Co as a function of etching time.

현상은 sputter대상 표면의 수직 방향과 입사하는 이온 사이의 각도가 θ 인 경우 sputtering yield가 $1/\cos\theta$ 에 비례하고⁽¹⁰⁾ 식각이 진행됨에 따라 경사진 면이 증가, 즉 θ 값이 큰 면이 증가하기 때문이다. 그림 5는 10분간 이온빔 식각 공정시 Ar^+ 이온빔 에너지가 400 eV에서 800 eV로 2배 증가함에 따라 R_a 값이 10 nm에서 20 nm로 2배 증가한 결과를 보여준다. 이는 Ar^+ 이온빔 에너지가 400 eV에서 800 eV로 증가할 경우 sputtering yield가 W의 경우 0.425

Fig. 5. Roughness variation of WC-Co as a function of ion energy.

에서 0.739로 Co의 경우 0.882에서 1.399로 증가하기 때문이다¹¹⁾.

그림 6(a)는 이온빔 처리 전 SCM 415 시편(R_a 값: 20 nm), 그림 6(b)는 아크 전류 40 A, 기판 전압 -800 V 조건에서 20분 처리한 SCM 415 시편 표면의 전자주사현미경사진이며 이때 이온빔 처리된 시편의 R_a 값은 약 250 nm를 가졌다. SCM 415의 경우 WC-Co와 달리 탄소가 미량 0.15% 함유된 Fe이기 때문에 WC-Co에서 나타난 구성 원소 간의 sputtering yield 차에 의한 표면 구조 식각은 나타

나지 않았다. 그러나 이온빔 처리 전 SCM 415시편 표면인 그림 6(c)에서 보면 SCM 415는 약 20 μm 크기의 ferrite와 pearlite 조직으로 구성되어 있음을 확인할 수 있다. SCM 415가 대부분 Fe로 구성되었음에도 불구하고 이온빔 식각 후 약 250 nm의 거칠기를 가지는 현상은 ferrite와 pearlite 조직 간의 sputtering yield 차이에 의한 현상으로 예상된다. 또한 그림 6(b)에서 보면 이온빔 식각에 의해 형성된 표면 돌기들이 약 20 μm 크기로 분포해 있음을 알 수 있으며 이는 ferrite 및 pearlite 조직들의 크기와 유사함을 알 수 있다. 따라서 SCM415 표면구조 제어 시 각 조직 크기보다 작은 돌기를 형성하려면 추가적인 공정이 필요하다.

그림 7은 SCM 415 시편의 표면 구조 제어 시 전기방전가공 표면 전처리에 따른 식각 형상이며 이온빔 식각공정 전에 표면 거칠기를 전기방전가공을 통해 형성하여 이온빔 식각 공정의 효과를 향상시킨 결과이다. 이온빔 처리 조건은 아크 전류 40 A, 기판 전압 -800 V, 처리시간 20분이다. 그림 7(a)는 전기방전가공 후 표면 사진이며 방전 가공시 아크 방전에 의해 고온 표면처리가 이루어지므로 SCM 415표면이 녹았다가 식는 과정에서 발생된 구형의 구조들을 확인할 수 있다. 전기방전가공 전처리를 통해 약 R_a 2.6 μm 의 표면 거칠기를 형성할 수 있었다. 그림 7(b)는 전기 방전 가공 전처리 시편을

Fig. 6. SEM images of SCM415 surface after -800 eV Ar ion beam etching process ((a) only polished, (b) etching time: 20 min, magnification: 2000), (c) optical microscope image of SCM415 before Ar ion beam etching process.

Fig. 7. Electrical discharge machined SCM415 species after -800 eV Ar ion beam etching process. Etching time: 30 min. (a) before ion beam etching, (b) magnification: 2000, (c) magnification: 50000, (d) magnification: 100000.

이온빔 식각 공정으로 20분 처리한 표면의 전자주사현미경 사진이며 본 공정을 통해 표면 거칠기는 R_a $2.7 \pm 0.59 \mu\text{m}$ 에서 R_a $4.3 \pm 0.25 \mu\text{m}$ 로 증가하였다. 이 경우 분당 거칠기 증가 속도는 약 40 nm/min 이며 이는 전처리 없이 이온빔 식각 공정을 통해 얻은 SCM 415 시편의 분당 거칠기 증가 속도인 1.5 nm/min 에 비해 약 26배의 값을 나타내었다. 이는 전기방전가공 전처리를 통해 형성된 다양한 각도의 표면에 이온이 전기장에 의해 수직으로 입사할 경우 굴곡 표면에 따른 입사각 차이에 의해 식각 효율 차이가 발생하여 표면 거칠기가 효율적으로 증가된 것으로 볼 수 있다. 그림 7(c) 및 그림 7(d)는 그림 7(b)를 50,000배 및 100,000배 확대하여 본 그림이다. 그림 7(c)에 나타난 마이크로 크기의 돌기는 약 $11.8 \mu\text{m}$ 의 크기를 가지며 그림 7(d)에 나타난 나노 돌기들은 약 300 nm 의 크기를 가진다. 이는 마이크로 크기의 돌기 내 나노 크기의 돌기가 구성되었음을 의미하며 나노/마이크로 돌기 크기 비율은 약 0.025이다.

4. 결 론

본 연구에서는 자장 여과 아크 플라즈마를 이용한 이온빔 식각 시 WC-Co 및 SCM 415의 표면 형상 제어 특성을 분석하였다. 자장여과 아크 플라즈

마를 통하여 효과적으로 시편의 표면형상을 제어할 수 있었으며, 특히 WC-Co와 같이 다원소로 구성된 금속 소재는 소재 간 sputtering yield 차이에 의해 전면적에 균일한 거칠기 형성이 가능하였다. 또한 SCM 415과 같이 다원소 물질이 아닌 경우 구성 조직 간의 sputtering yield 차이에 의한 거칠기 형성이 가능하였다. 빠른 속도의 표면 거칠기 형성을 위해서는 전기방전가공과 같은 전처리를 통해 입사 이온과 처리 표면의 각도가 임의로 분포하게 제어한 후 고에너지 이온빔 식각 처리하는 것이 효과적이었다. SCM 415 시편의 경우 전처리 공정 후 이온 식각 공정 시 표면 거칠기 증가도는 40 nm/min 이었으며 이는 전처리 공정 없이 이온 식각 공정 시 표면 거칠기 증가도인 1.5 nm/min 의 26배에 해당하는 값이다. 또한 전처리 공정 후 이온 식각 공정 시 마이크로 크기 돌기 내 나노 크기의 돌기들이 나노/마이크로 돌기 크기 비율 0.025로 분포함을 확인하였다. 본 표면 형상 제어 기술은 초저마찰 계면 및 초발수 특성이 요구되는 금속 표면처리에 응용 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 주관 소재원천기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. A. M. Korsunsky, A. R. Torosyan, K. M. Kim, Thin Solid Films, 516 (2008) 5690.
2. N. Wain, N. R. Thomas, S. Hickman, J. Wallbank, D. G. Teer, Surf. Coat. Technol. 200 (2005) 1885.
3. D. Yonekura, R. J. Chittenden, P. A. Dearnley, Wear, 259 (2005) 779.
4. J.-K. Kim, E.-S. Lee, D.-H. Kim, D.-G. Kim, Thin Solid Films, 447 (2004) 95.
5. D.-G. Kim, I. Svadkovski, S. H. Lee, J.-W. Choi, J.-K. Kim, Current Appl. Phys. 9 (2009) 179.
6. V. I. Gorokhovskiy, D. G. Bhat, R. Shivpuri, K. Kulkarni, R. Bhattacharya, Surf. Coat. Technol., 140 (2001) 215.
7. A. Anders, S. Anders, I. G. Brown, Plasma Sources Sci. Technol. 4 (1995) 1.
8. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharge and Materials Processing, 2nd edition, Wiley-Interscience (2005) 37.
9. D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.0.1 (03Dec2006 Build), <http://www.femm.info>
10. K. Wasa, M. Kitabatake, H. Adachi, Thin Film Materials Technology, Elsevier Science & Technology Books (2004).
11. <http://eaps4.iap.tuwien.ac.at/www/surface/script/sputteryield.html>
12. K. Fuchs, P. Rdhammer, E. Bertel, F. P. Netzer, E. Gornik, Thin Solid Films 151 (1987) 383.