



Oxygen 함량에 따른 Cr-O-N 코팅막의 미세구조 및 기계적 특성에 관한 연구

윤준서^a, 권세훈^b, 박인욱^c, 이정두^a, 김광호^{a,b*}

^a부산대학교 재료공학부, ^b부산대학교 하이브리드소재 솔루션 국가핵심연구센터
^c콜로라도 광업대학교 차세대 코팅 및 표면처리 연구실

Effect of Oxygen on the Microstructure and Mechanical Properties of Cr-O-N Coatings

Jun Seo Yun^a, Se Hun Kwon^b, In-Wook Park^c, Jeong Du Lee^a, Kwang Ho Kim^{a,b*}

^aSchool of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

^bNational Core Research Center for Hybrid Materials Solution, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

^cAdvanced Coatings and Surface Engineering Laboratory (ACSEL), Colorado School of Mines, Golden, Colorado 80401, USA

(Received September 9, 2009 ; revised October 5, 2009 ; accepted October 30, 2009)

Abstract

Cr-O-N coatings having different oxygen contents were deposited on Si wafer and SUS 304 substrates by an arc ion plating technique using Cr target in Ar/O₂/N₂ gaseous atmosphere. As increasing oxygen content in the coating, the microstructure of Cr-O-N coating changed from polycrystalline having NaCl structure to amorphous structure. Further increase of oxygen content resulted in phase transformation from amorphous to rhombohedral structure. From the variations of *d* value and average grain size, it was revealed that the maximum solubility of oxygen in Cr-O-N coating was about 21 at.%. And the maximum micro-hardness of 2751HK was obtained in this composition. The lowest friction coefficient was measured in the coating having 34.8 at.% of oxygen. However, more narrow width of wear track was found in the coating having 30.1 at.% of oxygen.

Keywords: Cr-O-N, Arc ion plating, Solid-solution, Hardness, Wear

1. 서 론

최근 우수한 기계적 특성뿐 아니라 높은 내산화 특성 및 고온 안정성을 가지는 경질 코팅막을 적용함으로써, 절삭공구와 기계 부품의 성능을 향상시키거나, 수명을 연장하기 위한 노력이 활발히 진행되고 있다¹⁻⁵. 높은 경도, 좋은 내마모성 및 화학적 안정성을 가진다고 알려진 TiN 경질 코팅막은 산업 전반에 걸쳐 다양하게 활용되어 왔는데, 약 500°C

이상의 온도에서는 그 본래의 기계적 특성을 잃는다는 단점으로 인해 고온 환경에 노출되는 제품으로의 적용을 할 수 없었다^{6,7}. CrN 경질 코팅막은 비록 TiN 보다 상대적으로 낮은 경도를 가지지만, 다양한 이원계 질화물들 중에서도 상대적으로 높은 경도와 내마모성을 보유한다고 알려져 있다. 특히, CrN 경질 코팅막은 약 800°C까지의 우수한 내산화 특성을 가지고 있기 때문에 그간 제한되었던 고속 가공용 기계부품으로의 적용을 가능하게 하였다. 한편, Al, Si, Mo 등의 원소를 첨가함으로써, CrN 코팅막 고유의 내산화특성을 보유함과 동시에 더욱 향

*Corresponding author. E-mail : kwhokim@pusan.ac.kr

상된 내식성, 경도, 그리고 내마모성을 가지는 경질 코팅막에 대한 연구도 지속적으로 진행되어 오고 있다⁸⁻¹⁰.

CrN 코팅막과 같은 경질 코팅막은 일반적으로 진공시스템을 활용하는 건식 증착법에 의해 제조하나 진공 챔버 내로 스며드는 미소량의 산소 및 챔버 내부에 잔류하는 산소의 영향을 받기 쉽기 때문에, 산소를 함유하지 않는 순수한 이원계 코팅막을 제조하기 힘든 문제점을 가지고 있다¹¹. 이러한 산소의 영향을 최소화하기 위해서는 진공시스템의 더 높은 초기 진공도가 필요한데, 이는 곧 경질코팅막 제조 비용의 증가를 의미하므로 산업적 적용 측면에서는 바람직하지 않다. 한편, 최근 발표된 연구에 따르면 산소를 일정량 포함한 Cr-O-N 코팅막 또한 CrN 코팅막과 같이 우수한 기계적 특성과 내산화 특성을 가진다고 보고된 바 있으며, 산업적 측면에서는 Cr-O-N 코팅막의 제조가 CrN 코팅막보다 더 용이할 수 있다¹¹⁻¹⁵. 그러나, 아직까지 Cr-O-N 코팅막에 대한 연구가 많이 이루어지지 않아 이에 대한 체계적인 연구를 진행할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 높은 이온화율과 전류밀도를 바탕으로 코팅막에 우수한 접착력 및 높은 증착률을 부여할 수 있는, 즉, 산업적 적용 측면에서 장점을 가지는 아크이온플레이팅법(AIP; arc ion plating) 법으로^{16,17} Cr-O-N 코팅막을 합성하고, 코팅막의 산소 함량에 따른 미세구조, 기계특성에 대해 집중적으로 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 Cr-O-N 코팅막의 제조

본 연구에서는 AIP를 사용하여 Cr-O-N 코팅막을 Si(200) 웨이퍼와 SUS 304 기판 위에 증착하였다. 본 연구에 사용된 장치의 개략도는 지난 연구들에서 이미 자세히 묘사되어 있다¹⁷. Cr-O-N 코팅막 증착을 위하여 Cr(99.99%) 타겟은 우측 arc cathode gun에 설치되었으며, 타겟으로부터 30 cm 거리에 회전이 가능한 수직 시편 지지대(holder)를 위치시켰다. 증착은 300°C의 온도에서 진행되었으며, Ar(99.999%) 가스 주입량을 일정하게 유지하는 반면 반응성 가스인 N₂와 O₂의 혼합비를 변화시킴으로 다양한 산소함량을 포함하는 Cr-O-N 코팅막을 제조하였다. 증착 전, 기판 세척을 위하여 Si 웨이퍼 기판을 아세톤 및 알코올을 사용하여 각각 20 분간 초음파 세척하였다. 본 연구에서 사용된 증착 조건은 표 1에 상세화되어 있다.

Table 1. Typical deposition conditions of Cr-O-N coatings by an arc ion plating technique

Base pressure	3.5×10^{-5} Torr
Working pressure	2.0×10^{-3} Torr
Deposition temperature	300°C
Arc material	Cr (99.999%)
Arc current	50 A
(N ₂ +O ₂) : Ar gas ratio	7 : 4
Substrate rotation speed	25 rpm
Typical coatings thickness	2.0±0.1 μm

2.2 Cr-O-N 코팅막의 물성 측정

Cr-O-N 코팅막 내의 Cr, O, N의 조성비는 전자탐침 미량 분석기(electron probe micro-analyzer, Shimadzu, EPMA 1600)로 측정하였다. 코팅막 내의 결정성은 Cu-Kα (25 kV, 10 mA)선을 이용한 X선 회절 분석법(X-ray diffraction: XRD, D8 ADVANCE)으로 분석하였고, Bragg 법칙과 Scherrer 공식을 사용하여 면간거리와 평균 결정립의 크기를 계산하였다. 코팅막 내부 결정상에 대한 세부 정보는 400 kV의 전계 방출형 투과 전자현미경(field emission-transmission electron micro-scope: FE-TEM, JEOL-400FX)을 이용한 전자 회절 패턴(selected area diffraction pattern: SADP)으로부터 확인하였다. 코팅막의 미세경도값은 25 g의 Knoop indenter (Matsuzawa, MMT-7)를 사용하여 측정하였다. 코팅막의 마찰과 마모측정은 마모시험기(Ball-on-disk type)를 사용하여 평가하였다. 마모시험은 온도 25~28°C, 습도 35~40%의 환경에서, 그리고 평균강도가 22 GPa이고 직경이 5.95 mm의 SiC 볼을 사용하여 행하여졌다. O 침가량의 변화에 따른 코팅막의 마모거동을 보기 위하여 이동거리 377 m, 선속도 0.1 m/s, 수직하중을 3 N으로 고정하였다. 시험 후 마모트랙의 폭은 주사전자현미경(field emission secondary electron microscopy: SEM, Hitachi S-4200)을 사용하여, 마모트랙의 조성분석은 에너지 분산 분광기(Energy distribution spectroscopy: EDS, Horiba EMAX)를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Cr-O-N 코팅막의 미세구조

Cr 아크 타겟에 가하는 전류를 50A로 고정하고 챔버 내로 주입되는 Ar 가스의 양을 일정하게 고정된 상태에서, 반응성 가스의 혼합비(O₂/(N₂+O₂; O_{rel})를 변화시키면서 Cr-O-N 코팅막을 증착하였으

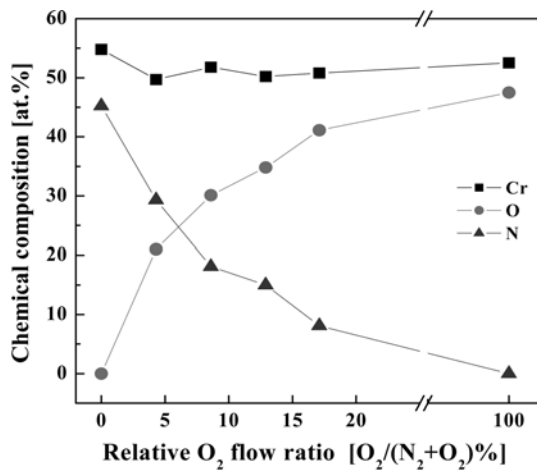


Fig. 1. Chemical composition of Cr-O-N coatings as a function of reactive gas flow ratio [$O_2/(O_2+N_2)$; O_{rel} %].

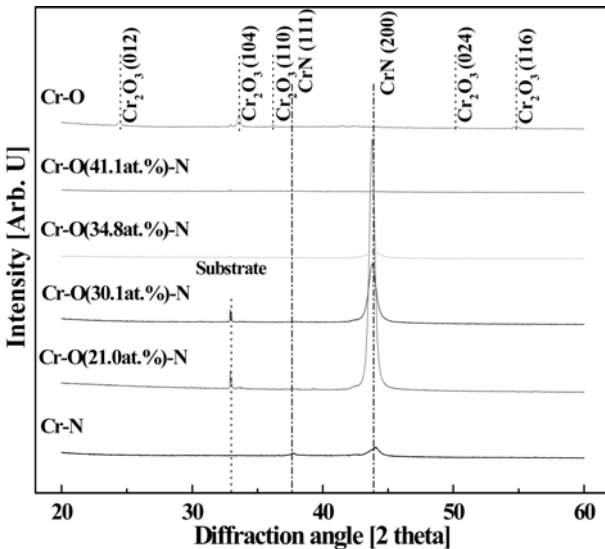


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of Cr-O-N coatings with various O contents.

며, 화학적 조성은 그림 1에 나타난 바와 같다. O_{rel} (O의 상대 유동속도)을 증가시키에 따라 Cr-O-N 코팅막 내의 O의 함량은 증가하는 반면, N의 함량은 지속적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 그러나, Cr의 함량은 O_{rel} 에 상관없이 거의 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었다.

O 함량 변화에 따른 Cr-O-N 코팅막의 결정성을 확인하여 위하여, X선 회절분석을 행하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이, Cr-N 코팅막은 (111)과 (200) 면을 가지는 NaCl 구조의 다배향성상을 함을 확인할 수 있었다. 코팅막 내의 O의 함량을 21 at.%까지 증가시키에 따라, 회절 피크가 미세하게나마 저각으로 이동하는 현상을 확인할 수 있었는데, 이는 CrN 결정상 내 존재하는 비어있는 N 자리를 O원자가 채우는 현상과 O 원자에 의한 N 원자와의 치

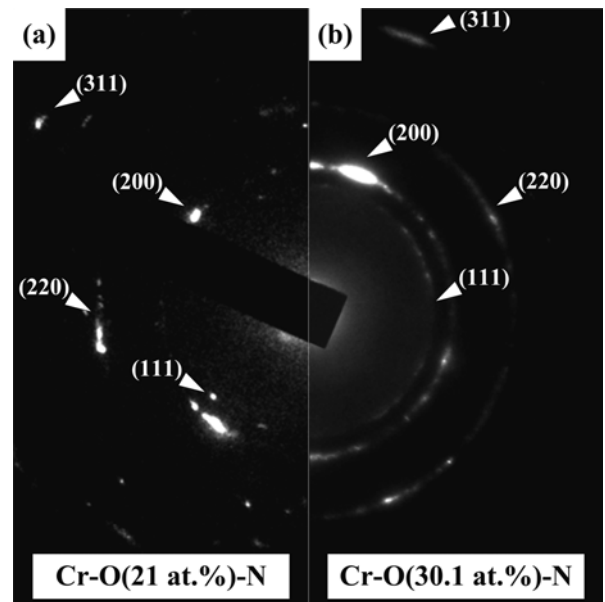


Fig. 3. Selected Area Diffraction Patterns (SADP) of (a) Cr-O(21 at.%) -N and (b) Cr-O(30.1 at.%) -N coatings.

환 고용 현상에 의한 것으로 생각된다. 또한, O 함량이 더욱 증가함에 따라, 회절 피크의 강도가 감소하고 피크가 퍼지는 현상 또한 관찰할 수 있었으며, O 함량이 41.1 at.%에서는 결정질의 회절 피크가 전혀 발견되지 않았다. 이러한 현상은 Cr-O-N 코팅막의 미세구조가 비정질화 되었음을 의미한다¹⁸⁾. 반면, 반응성가스를 오직 산소로만 챔버 내로 주입한 경우, 회절 피크로부터 Rhombohedral 구조의 Cr₂O₃ 결정질 구조를 가짐을 확인할 수 있었다. 한편, Cr-O-N 코팅막의 X선 회절 분석에서는 NaCl 구조의 CrN과 Rhombohedral 구조의 Cr₂O₃ 상이 함께 존재하는 X선 회절 패턴은 관찰되지 않았다. 코팅막 내 이들 외의 결정상이 존재할 가능성은 희박한 것으로 판단된다. 하지만, X선 회절 분석에서는 아주 미세한 결정상을 검출하지 못하는 경우도 있으므로, 전계 방출형 투과 전자현미경(FE-TEM)을 이용한 전자회절분석(SADP; Selected Area Diffraction Pattern)을 통해 Cr-O-N 코팅막의 보다 상세한 미세한 구조를 확인해보았다. 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 Cr-O(21 at.%) -N 코팅막의 SADP 패턴은 중심으로부터 일정 거리만큼 떨어져 있는 점들로 구성되어 있다. 이로부터 본 코팅막은 (111), (200)의 우선 배향성의 결정상과 함께, X선 회절 분석에서 발견하지 못한 (220)의 결정상을 지닌 다결정의 FCC 구조를 가짐을 확인하였다. 그러나, 산소가 더 많이 함유된 Cr-O(30.1 at.%) -N 코팅막에서는 Cr-O(21 at.%) -N 코팅막에 비해 흩뿌려진 원 형태의 SADP 패턴이 관찰되었는데, 이로부터 산소 함량

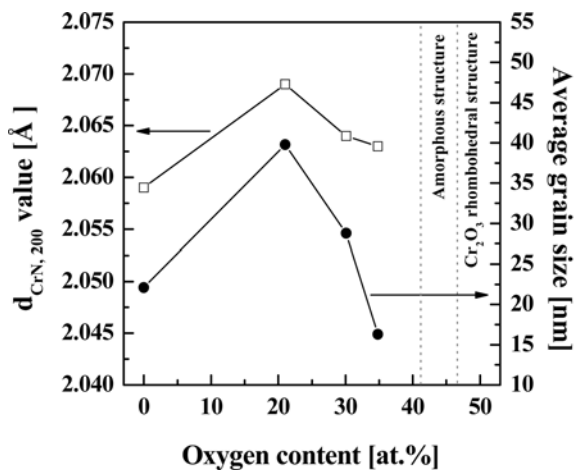


Fig. 4. Inter-planar distance ($d_{CrN,200}$) and average grain size of Cr-O-N coatings with various O contents.

증가 시 결정립이 미세화되고 점차 비정질화 되고 있음을 재확인 할 수 있다¹⁹⁾. 한편, 본 분석에서는 Cr_2O_3 와 같은 새로운 결정상을 의미하는 점 또는 원 형태로 구성된 SADP 패턴은 관찰되지 않았기 때문에, O 함량 증가에 따라 비정질상의 형성이 가속화되어 결정립이 미세화 되었다고 예상할 수 있다.

그림 4는 그림 2의 X선 회절패턴의 CrN(200) 회절 피크로부터 계산한 Cr-O-N 코팅막의 결정 면간 거리와 평균 결정립 크기를 나타낸다. 21 at.%의 O 함량을 포함한 코팅막에서 20.69 nm의 가장 높은 결정 면간 거리가 확인되었다. 그러나 O 함량을 21 at.% 이상으로 증가시킨 경우, CrN(200) 결정 면간 거리는 점차 감소하는 경향을 보였다. 한편, 결정 면간 거리의 거동과 거의 동일하였다. 코팅막 내 O 함량이 21 at.%일 때, 39.8 nm의 최대 결정립 크기가 측정되었으며, O 함량이 더욱 증가할수록 결정립 크기는 감소하였다. 일반적인 고용체 현상에 따르면, 고용한 이상으로 용질 원자가 용매 물질에 첨가될 경우, 결정입계의 변형에너지를 감소시키기 위해 용질 원자들은 결정입계로 이동하여 새로운 상을 형성하게 된다. XRD 및 SADP 분석을 통해 Cr-O-N 코팅막에서는 이 새로운 상들이 비정질임을 확인하였는데, 이러한 비정질상의 형성량이 O 함량 증가에 따라 증가하여, 결정립 성장을 방해하고 결정립 크기의 감소에 영향을 미쳤다고 예상된다. 또한, 결정립의 크기가 감소할수록 내부에 고용된 원자의 확산거리는 증가하게 되므로²⁰⁾, 코팅막 내 O 함량 34.5 at.% 이상에서 비정질화가 더욱 가속화된 것으로 사료된다. 한편, 41.1 at.%의 O 함량을 포함한 Cr-O-N 코팅막에서는 그림 2의 X선 회절패턴에서 어떠한 결정피크도 관찰할 수 없었으므로, 면간거리 및 평균결정립 크기를 그림 4에 나타내지 않았다.

3.2 Cr-O-N 코팅막의 기계적 성질

그림 5은 Cr-O-N 코팅막의 O 함량에 따른 미소경도의 변화를 보여준다. CrN 코팅막의 경도는 1817HK로 다른 연구에서 밝혀진 수치와 거의 동일하였다^{21,22)}. Cr-O-N 코팅막 내 O 함량을 최대 고용한계인 21 at.%까지 증가시켰을 때, 2751HK의 최대 경도를 가짐을 확인할 수 있었다. 원자 반경이 다른 용질 원자가 용매 원자들로 이루어진 격자 내에 고용될 경우, 내부 격자 결함 및 변형을 촉진되어 전위의 이동이 보다 힘들어진다^{23,24)}. 따라서 21 at.%의 O 함량을 포함한 Cr-O-N 코팅막의 경도 증가는 고용체 강화(solid solution hardening)에 의한 영향이 크게 작용했다고 생각된다. 하지만 코팅막 내 O 함량을 21 at.% 이상으로 증가시킨 경우 경도값이 점차 감소함을 확인할 수 있었고, O 함량이 41.1 at.%일 때 1809HK의 최소 경도를 확인할 수 있었다. 이러한 경도의 감소는 앞서 설명한 바와 같이, 결정립 내 고용된 O 함량의 감소와, O 함량 증가에 따른 Cr-O-N 코팅막의 비정질화가 영향을 미친 것으로 생각된다. 즉, 결정립 내 O의 고용량 감소는 코팅막의 고용강화 효과를 감소시킬 수 있고^{23,24)}, 불규칙적이고 짧은 원자 배열(short range order)을 지닌 비정질상은 가벼운 하중에도 내부 결합원자가 끊어지는 등 쉽게 변형될 수 있다^{25,26)}. Cr-O 코팅막에서는 Cr-O(41.1 at.%)N 코팅막에 비해 다소 높은 1921HK의 경도값이 측정되었으며, 이는 Cr-O의 rhombohedral 결정상의 형성이 이러한 경도의 증가에 영향을 미쳤을 것이라 생각된다²⁷⁾. Cr-O 코팅막은 치밀한 주상정의 미세조직을 가짐으로 높은 경도를 보유한다고 알려져 있다. 한편, 본 연구에서 증착된 Cr-O 코팅막은 타 연구에서 보고된 경도값보다 상대적으로 낮은데, 그림 1에서 나타난 바

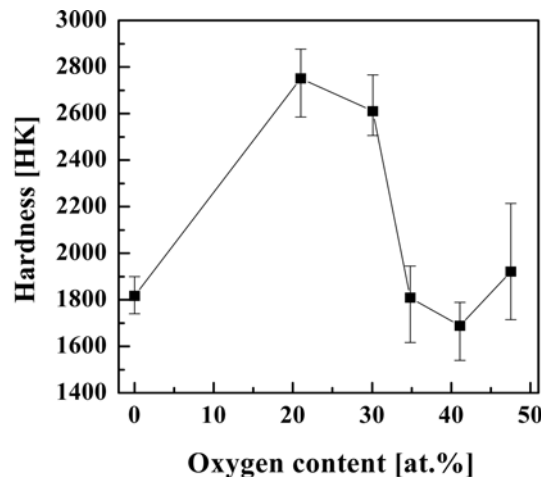


Fig. 5. Micro-hardness of Cr-O-N coatings with various O contents.

와 같이 Cr과 O가 2:3이 아닌 1:1 비율로, 주로 준안정한 결정상으로 코팅막이 구성되었기 때문으로 생각된다.

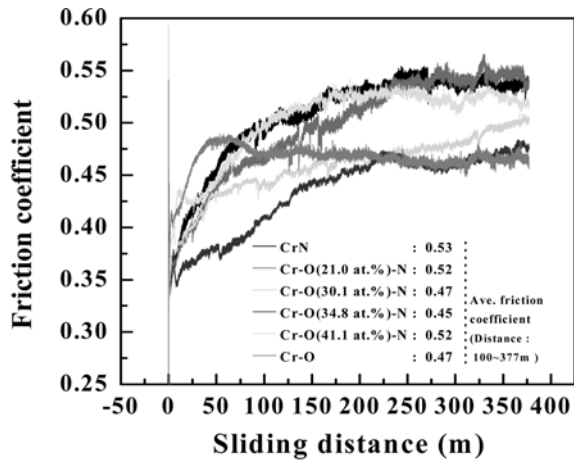


Fig. 6. Friction coefficients of Cr-O-N coatings layers against SiC ball.

그림 6에서는 Cr-O-N 코팅막의 마찰계수를 나타내고 있다. 모든 코팅막은 마모 시험 초반 약 100 m 까지 불규칙한 거동을 보였는데, 이것은 표면 거칠기에 의한 영향으로 예상된다. 코팅막의 마찰계수는 이러한 불규칙 거동을 제외한 나머지 부분을 평균화하여 비교되었다. CrN 코팅막은 약 0.53의 가장 높은 마찰계수를 나타내었고, 코팅막 내 O 함량이 증가함에 따라 점차 감소하여 Cr-O(34.8 at.%) N 코팅막에서는 약 0.46의 가장 낮은 수치가 관찰되었다. 하지만 그 이상의 O 첨가는 마찰계수의 재상승을 야기시켰다. 결정구조가 전혀 다른 Cr-O 코팅막에서는 Cr-O(34.8 at.%) N의 마찰계수와 거의 동일한 수치가 관찰되었다.

일반적으로 마찰계수와 마모량은 비례한다고 알려져 있지만, 마찰기구에 따라 달라질 수 있다²⁸⁾. 따라서 그림 7에서는 이러한 마모 거동 및 마모량을 확인하기 위하여 코팅막 표면의 마모트랙과 성

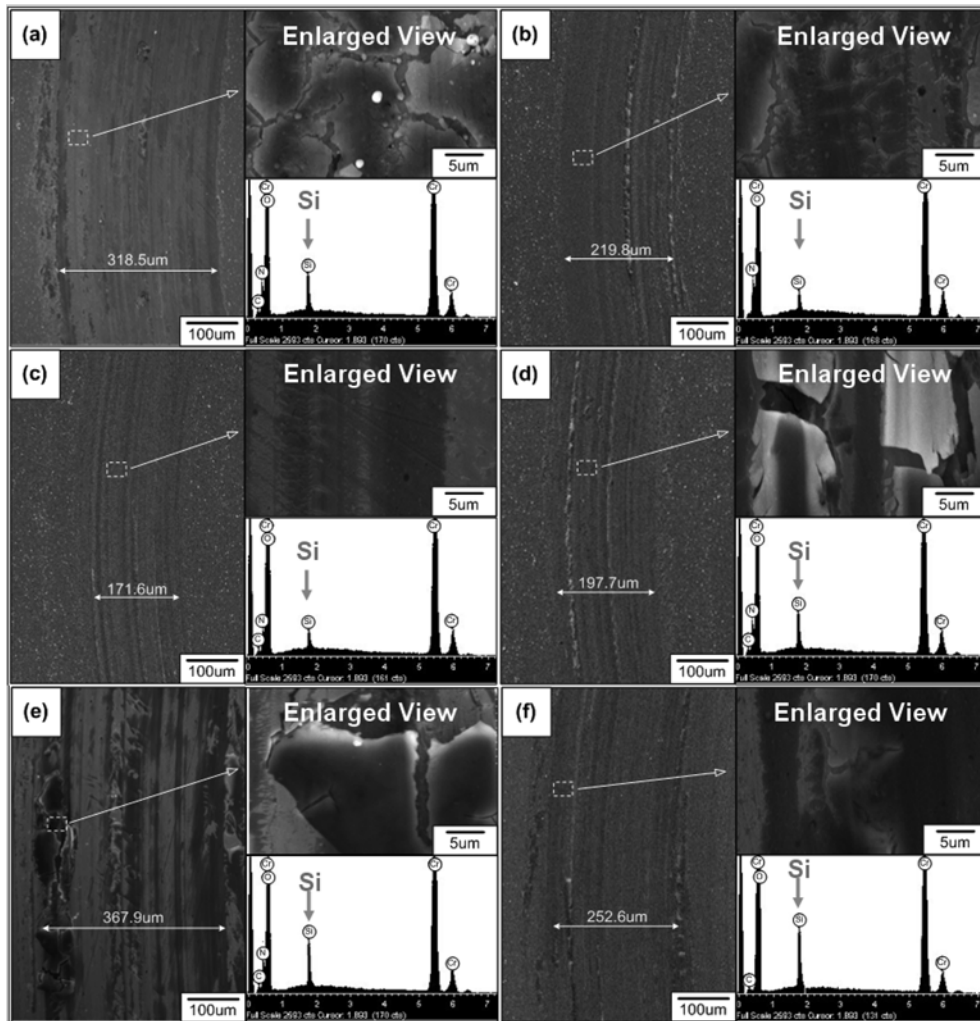


Fig. 7. Surface Morphology of (a) Cr-N, (b) Cr-O(21 at.%) N, (c) Cr-O(30.1 at.%) N, (d) Cr-O(34.8 at.%) N, (e) Cr-O(41.1 at.%) N, and (f) Cr-O coatings after wear test using SiC ball as a counterpart. For each coating, the enlarged view and EDS results of wear track were also included.

분분석을 SEM 및 EDS 방법을 사용하여 분석하였다. 상대적으로 높은 마찰계수를 지닌 CrN 샘플에서는 두꺼운 마모 넓이와 미세한 갈라짐 현상이 관찰되었다. 하지만 Cr-O(21 at.%)⁻N에서는, 마찰계수가 Cr-N보다 미소하게 작음에도 불구하고 마찰트랙 폭의 감소가 확연하게 관찰되었다. 여기서는 Cr-O-N의 고용상 형성으로 인한 경도의 상승이 연삭 마모에 대한 저항성을 증가시킨 것으로 예상된다.²⁹⁾ Cr-O(30.1 at.%)⁻N 코팅막에서는 표면이 매끄럽고 균일한 형상의 가장 좁은 마모트랙이 관찰되었다. 본 코팅막에서는 내부 고용상들이 일정수준의 경도를 유지시킴과 동시에, 주로 끊어진 결합(dangling bond)을 하고 있는 주변의 비정질상들이 수산화물 등의 자기유희막 형성을 촉진하여 마찰특성을 향상시킨 것으로 예상된다.²⁶⁾ 가장 낮은 마찰계수를 지닌 Cr-O(34.8 at.%)⁻N 코팅막에서는 마모트랙의 폭 증가와 심한 갈라짐 현상이 관찰되었다. 그림 2에서 설명한 바와 동일하게, 본 코팅막은 주로 비정질상들로 구성되어 있음으로 표면의 자기유희막 형성이 가장 원활이 이루어졌고, 이로 인해 가장 낮은 마찰계수를 가지는 것으로 예상된다. 하지만 낮은 경도를 지닌 코팅막에서는 응착 및 피로마모가 일어나기 쉽기 때문에²⁸⁾, 비교적 넓은 폭의 마모트랙이 형성되었다고 예상할 수 있다. 또한, 비정질화로 인하여 더욱 낮은 경도를 지닌 Cr-O(41.1 at.%)⁻N 코팅막에서 응착 및 피로마모가 더욱 가속화되어 가장 넓은 폭의 마모트랙이 형성되었다고 판단된다. Cr-O 코팅막은 다른 코팅막보다 상대적으로 수산화물 등의 자기유희막을 형성하기 쉽기 때문에 낮은 마찰계수를 나타낸 것으로 예상되는 반면, 상대적으로 넓은 마모트랙 폭이 관찰되었다. Cr₂O₃ 결정상은 취성이 강하여 부스럼(chipping) 현상이 쉽게 발생하게 되며, 때문에 코팅막의 표면에서 발생하는 부스럼 입자들에 의한 영향을 받게 된다. 본 코팅막에서는 이러한 높은 경도를 지닌 부스럼 입자들의 발생이 표면 마모트랙 폭 증가에 기여했다고 판단된다. 한편, 모든 코팅막의 마모트랙에서는 깊은 골 및 스크래치가 발견되었는데, 이것은 경도, 마찰, 부식 등의 특성에 악영향을 미치는 매크로 입자의 영향으로 예상된다.³⁰⁾

EDS 분석결과에 따르면, 마모트랙 외곽 부분은 주로 Cr, Si, O, N으로 구성되어 있었다. 마모시험 전과 후를 비교했을 때, 코팅막 내 O 함량이 증가함에 따라 마모트랙 내 N 함량의 감소와 O 함량의 증가가 관찰되었다. 이를 바탕으로 마모시험 중, 모든 코팅막에서 Cr-O의 새로운 결합상 및 자기유희막의 형성이 촉진되었을 것이라 예상된다. 한편,

마모트랙 내 Si 함량은 상대재료인 SiC 볼의 마모량을 나타내는 척도로 사용될 수 있는데, 코팅막 내 O 함량이 30.1 at.%까지 증가함에 따라 마모트랙 내 Si 함량은 0.83 at.%까지 감소하였다. 이로부터 고용상 형성으로 인한 경도 상승 이외에도, 자기유희막의 형성이 SiC 볼의 마모량 감소에 영향을 미쳤다고 판단할 수 있다. 그러나, 그 이상의 O 함량을 지닌 코팅막의 마모트랙에서는 Si 함량이 점차 증가하여 Cr-O 코팅막에서 4.55 at.%의 최대치를 나타내었다. 이들 코팅막에서는 자기유희막에 의한 효과보다 응착 및 피로마모 현상이 더욱 촉진되었고, 그리고 Cr₂O₃의 부스럼 입자들에 의해 볼의 마모가 증가되었을 것이라 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 AIP법을 이용하여 3성분계 Cr-O-N 코팅막을 Si wafer와 SUS 304 기판 위에 제조하였다. 코팅막 내 O 함량을 증가시킴에 따라 격자 내에서 O에 의한 N의 치환고용으로 판단되는 현상이 발견되었다. Cr-O(21 at.%)⁻N 코팅막에서 275 1HK의 최대경도가 측정되었으며, 이 때 고용강화가 최대로 일어났을 것이라 예상된다. 그 이상으로 산소함량을 증가시킨 코팅막에서는 경도의 감소가 확인되었으며, 동시에 비정질화가 진행되어, 결국 Cr-O(41.1 at.%)⁻N 코팅막에서는 NaCl 구조에서 완전한 비정질 구조로의 전이가 확인되었다. Cr-O 코팅막은 주로 Cr₂O₃의 다결정상으로 구성되어 있고, 1921HK의 경도를 나타내었다. 마모시험 결과에 따르면, Cr-O(34.8 at.%)⁻N 코팅막에서 가장 낮은 마찰계수가 측정되었다. 하지만, Cr-O(30.1 at.%)⁻N 코팅막에서 가장 좁은 마모트랙이 관찰되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-01002-0) 지원과 지식경제부 소재원천기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. G. S. Kim, S. Y. Lee, J. H. Hahn, Surf. Coat. Technol., 193 (2005) 213.
2. J. Creus, H. Indriss, H. Mazille, F. Sanchette, P. Jacquot, Surf. Coat. Technol., 107 (1998) 183.
3. G. T. Liu, J. G. Duh, K. H. Chung, J. H. Wang, Surf. Coat. Technol., 200 (2005) 2100.

4. C. Rebholz, H. Ziegele, A. Leyland, A. Mattew, Surf. Coat. Technol., 115 (1999) 222.
5. J. Bujak, J. Walcovicz, J. Kusi ski, Surf. Coat. Technol., 180-181 (2004) 150.
6. K. H. Kim, D. S. Han, S. K. Kim, Surf. Coat. Technol., 163-164 (2003) 605
7. S. Boelens, H. Veltrop, Surf. Coat. Technol., 33 (1987) 63
8. P. Hones, R. Sanjines, F. Levy, Thin Solid Films, 332 (1998) 240.
9. K. H. Lee, C. H. Park, T. S. Yoon, J. J. Lee, Thin Solid Films, 385 (2001) 167.
10. E. Martinez, R. Sanjines, O. Banakh, F. Levy, Thin Solid Films, 447-448 (2004) 332.
11. T. Suzuki, J. Inoue, H. Saito, M. Hirai, H. Suematsu, W. Jiang, K. Yatsui, Thin Solid Films, 515 (2006) 2161.
12. S. Collard, H. Kupfer, G. Hecht, W. Hoyer, H. Moussaoui, Surf. Coat. Technol., 112 (1999) 181.
13. T. Suzuki, J. Inoue, H. Saito, M. Hirai, H. Suematsu, W. Jiang, K. Yatsui, Thin Solid Films, 515m (2006) 2161.
14. L. Castaldi, D. Kurapov, A. Reiter, V. Shklover, P. Schwaller, J. Patscheider, Surf. Coat. Technol., 203 (2008) 545.
15. C. Gautier, J. Machet, Surf. Coat. Technol., 94-95 (1997) 422.
16. K. H. Kim, D. S. Han, S. K. Kim, Surf. Coat. Technol., 163-164 (2003) 605.
17. S. Y. Yoon, S. R. Choi, M. H. Lee, W. H. Kim, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 36 (2003) 2.
18. J. H. Park, W. S. Chung, Y. R. Cho, K. H. Kim, Surf. Coat. Technol., 188-189 (2004) 425.
19. Y. S. Hong, S. H. Kwon, K. H. Kim, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 42 (2009) 73.
20. D. Gryaznov, J. Fleig, J. Maier, Solid State Ionics, 177 (2006) 1538.
21. H. C. Barshilia, N. Selvakumar, B. Deepthi, K. S. Rajam, Surf. Coat. Technol., 201 (2006) 2193.
22. B. Navinsek, P. Panjan, A. Cvelbar, Surf. Coat. Technol., 74-75 (1995) 155.
23. W. Xiaozhi, W. Shzofeng, Z. Hull, Cent. Eur. J. Phys., 6 (2008) 440.
24. P. Kratochvil, P. lukac, B. Sprusil, Czech. J. Physics, B23 (1973) 621.
25. W. O. Milligan, D. F. Mullica, H. O. Perkins, C. K. C. Lok, Acta Cryst., A40 (1984) 264.
26. M. Kalin, B. Hockey, S. Jahanmir, J. Mater. Res., 18 (2003) 27.
27. D. Y. Wang, M. C. Chiu, Surf. Coat. Technol., 137 (2001) 164.
28. A. Matthews, S. Franklin, Holmberg, J. Phys. D: Appl. Phys., 40 (2007) 5463.
29. H.-H. Jin, J. W. Kim, K. H. Kim, S.-Y. Yoon, J. Kor. Phys. Soc., 42 (2005) 88.
30. Q. Wang, I. W. Park, K. H. Kim, J. Vac. Sci. Technol., A26 (2008) 5.