

CAIP 법으로 증착된 CrN 박막의 N₂ 분압별 미세 조직 및 재료 특성에 관한 연구

정 병 호 · 김 회 재

군사과학대학원 재료과학과

A Study on the Microstructure and Materials Properties of CrN Films deposited by CAIP method under various N₂ Partial Pressure

Byung Ho Jung and Hee Jae Kim

Department of Material Science, Advanced Institute of Military Science and Technology,

P.O. Box 77-14, Gongneung-Dong, Nowon-Gu, Seoul, 139-799 Korea

Hard Coatings such as CrN have a superior oxidation/corrosion resistance, a low coefficient of friction against metallic materials, and greatly increased wear resistance as shown in previous studies for PVD coatings. In this study, the material properties of CrN were exploited to enhance the surface properties of ordnance materials which were subject to abrasive and/or corrosive environment. Thin films of CrN were deposited on the Cr-Mn-Mo alloy steel by a cathodic arc ion plating (CAIP) technique. As a result, with increasing the nitrogen partial pressure, the CrN films gave a dense granular morphology. It was found that the films exhibited a preferred (220) orientation under high nitrogen partial pressure during deposition. The wear resistance was dependent on the film structure, and showed a close correlation with the adherence and the hardness of the films. It was revealed that the dense CrN films had good adhesion, high hardness, and also had much better resistance of wear and corrosion than the substrate steel.

1. 서 론

군 장비의 교체 소요는 무기 체계 변화에 따른 신 장비로의 대체와 운영중 발생하는 파손 등으로 발생하게 된다. 그러나 운영중 발생하는 파손 소요는 인적 원인을 제외하면 가혹한 운용 환경에 대한 장비 성능저하 때문인데, 이러한 운용 소요는 소재의 성질 향상을 통하여 충분히 개선될 수 있다. 총신의 경우, 탄자의 고속 운동으로 총신 벽이 마손되는 총강 마모현상과 총신

내부의 고온 고압의 추진가스 및 대기에 노출된 환경으로 인한 총신 재료의 침식, 부식 및 산화 현상이 문제점으로 대두되고 있다.¹⁾ 이러한 마모와 부식에 의한 총신 재료의 손상은 기존 재질보다 내마모성과 내부식성이 우수한 신소재로 총신을 제작함으로써 내구성을 향상시켜 군의 전력 손실을 감소시킬 수 있다.

본 연구에서 적용한 표면 처리 기술은 다른 방법과 비교하여 상대적으로 공정 온도가 낮고 밀착력이 좋으며, 박막재료의 선택이 용이함은

Table 1. Material properties of various films

구분	색깔	경도(Hk)	내식성	내산화성	내마모성	내열성	용도
TiN	금색	2000~2400	○	○	○	○	절삭공구, 금형, 장식품
ZrN	밝은 금색	2000~2200	○	△	△	△	장식품
CrN	은백색	2000~2200	◎	○	○	◎	기계부품, 금형
TiCN	보라색~회색	3000~3500	△	△	◎	○	절삭공구, 금형
TiAlN	보라색~흑색	2300~2500	○	◎	○	○	절삭공구, 금형, 장식품
Al ₂ O ₃	투명~회색	2200~2400	○	◎	○	○	절연막, 기능막
DLC	회색~흑색	3000~5000	○	○	○	◎	절삭공구, 기능막, 금형

(◎ : 매우 우수, ○ : 우수, △ : 보통)

물론 습식 도금에서 발생하는 폐수 처리 문제로 인한 환경오염의 염려가 없는 방법으로 여러 분야에서 널리 이용되어지는 Cathodic Arc Ion Plating(CAIP) 법²⁻⁴⁾이다.

지금까지 연구된 표면 처리 기술은 주로 경도 및 내마모성을 증가시키기 위하여 TiN, TiC, TiAlN 등을 피복시켰다.^{5,6)} 그러나 Table 1과 같은 여러 가지 박막 재료 가운데 본 연구에서 고려하는 고속 탄자에 의한 마모와 고온 추진 가스에 의한 침식 및 부식 등 열악한 조건하에서 운영되는 병기의 경우에는 고경도를 유지하면서도 내마모 및 내부식성이 우수한 CrN 박막⁷⁾을 형성시키는 것이 효과적이라 생각되기 때문에, 본 연구에서는 질소 분압을 변수로 한 CAIP 기술로 여러 조건의 CrN 박막층을 형성하여 이들 박막층의 미세 조직과 재료 특성을 분석, 가장 우수한 특성이 나타나는 최적의 공정 조건을 제안하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 재료

본 실험에서 사용한 Cr-Mn-Mo 합금강은 국내에서 제작되어 실용화된 국산 병기 재료로서 미군의 MIL-S-46047에 규정한 조건으로 제작된 것이다. 준비된 시편의 열처리 공정은 875℃에서 2.5시간 동안 담금질을 실시한 후, 640℃에서 4시간 동안 뜨임 처리를 실시하였다. 재료의 내부 응력을 제거하기 위하여 냉간 성형 후, 기

Table 2. Chemical composition of as-received substrate material

Component	Cr	Mn	Mo	C	Si	V	P	S	Fe
wt.%	1.16	0.97	0.59	0.44	0.30	0.25	0.01	0.005	bal.

계 가공 전에 밀폐된 로에 수직으로 고정하여 549℃에서 15분간 가열하고, 149℃로 공냉하였다. Table 2는 본 실험에서 사용한 재료의 화학적 성분을 나타낸 표이다.

2.2 CrN Deposition Process

0.1 μ m의 알루미늄으로 연마 후 이온 세정을 거친 시편은 밀착력 향상을 위하여 bias 전압 -500V, arc 전류 40A에서 8분간 Cr 하지 코팅을 실시하였다. 하지 코팅은 모재와 박막층간의 결합력을 향상시킬 목적으로 실시하며 모재와의 강한 결합력을 형성하기 위하여 resputtering이 되지 않는 한도에서 가능한 한 높은 bias 전압을 걸어 주었다. 하지 코팅이 끝난 시편은 bias 전압 -200V에서 질소 분압별로 90분간 CrN 코팅을 실시하였다. Table 3은 본 실험에서 채택한 작업 공정 조건이다.

2.3 내마모 시험

모재와 CrN 박막층의 마모 특성 분석을 위하여 ball-on-disc type의 마모 시험기로 대기중 무윤활 상태에서 선속도 0.3m/s, 마찰 거리 2000m의 조건으로 하중을 0.1kgf과 0.4kgf로 변화하며 실험하였다. 이때 실험 온도는 21℃, 습도는 60%였으며, 마모 상대재는 직경 8mm,

Table 3. Deposition condition for CrN coating

Arc Current	40 A
Insert Gas	N ₂ (99.9%)
Base Pressure	3×10^{-5} torr
N ₂ Partial Pressure	9×10^{-4} torr 5×10^{-3} torr 1×10^{-2} torr 2×10^{-2} torr
Deposition Distance	30cm \pm 3cm
Deposition Temperature	$\approx 200^\circ\text{C}$
Bias Voltage	-700V:ion bombardment -500V:interlayer coating -200V:CrN coating
Duration Time	2min:ion bombardment 8min:interlayer coating 90min:CrN coating

경도 550Hk, 조도 3 μm 의 AISI 52100 steel ball 을 사용하였고, 동마찰계수는 load cell로 읽은 신호를 AD converter와 증폭기를 거쳐 컴퓨터에 입력시켰다.

2.4 부식 시험

부식 시험은 EG & G사의 Potentiostat/Galvanostat model 273A를 사용하여 분극 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 부식 용액으로는 비교적 부식성이 강한 3.5% NaCl 용액을 사용하였으며, 실험 60분 전부터 실험 종료 때까지 계속 질소 가스로 탈산소하여 용존가스를 제거하면서 실험을 진행하였다. 이때 scan rate는 5mV/s로 하였고, scan range는 -0.25V에서 1.6V사이이었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 XRD 분석

CrN 박막의 질소 분압 변수에 따른 결정 방위와 우선 성장 방위의 변화 경향을 관찰하기 위하여 XRD 분석을 실시하였다.

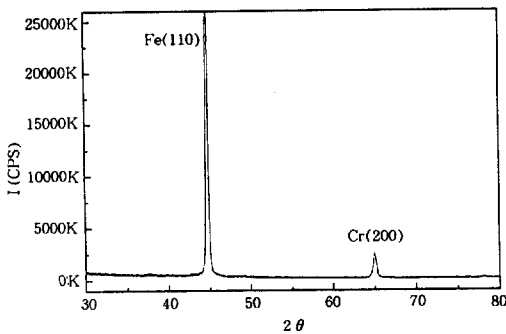
중구경 화기 재료인 Cr-Mn-Mo강을 모재로 하여 CAIP기법으로 coating한 CrN 복합물의 박

막과 모재를 XRD로 회절 시험한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에 나타난 것처럼 모재의 경우는 Fe와 Cr peak이 주로 나타나고 있으며, N₂ gas 분압이 9×10^{-4} torr에서 형성된 CrN 박막층은 Fig. 1(b)처럼 Cr(200)이 주 peak으로 관찰되었다. 이는 질소 분압이 낮아 CrN 형성이 잘 안되어 Cr이 풍부한 분위기에서 증착되었기 때문에 CrN보다 상대적으로 Cr이 많이 증착된 Cr 박막층으로 분석되었으며, 본 연구에서 형성하고자 하는 CrN 박막층으로 볼 수 없기에 더 이상의 분석을 실시하지 않았다.

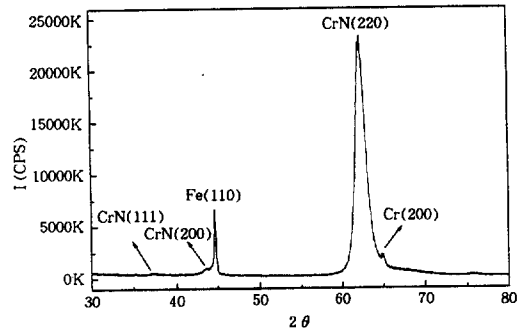
비록 N₂ gas 분압이 9×10^{-4} torr에서는 Cr 박막층이 형성되었지만, 그 이상의 분압 조건에서는 CrN 박막층이 형성되는 것을 Fig. 1(c)~(e)에서 볼 수 있었으며 N₂ gas 분압이 증가할수록 CrN 박막층은 Cr(200) peak이 줄어들면서 CrN peak이 주로 나타났다.

Fig. 1(c)의 경우, N₂ gas 분압이 5×10^{-3} torr에서 형성된 박막은 CrN(111)이 주 peak으로 나타나고 있는데, 질소 분압이 더욱 증가된 1×10^{-2} torr 박막에서는 Fig. 1(d)처럼 CrN(111)과 CrN(200) peak이 줄고 CrN(220)이 주 peak으로 관찰되었다. 이러한 관찰 결과는 200 $^\circ\text{C}$ 에서 형성된 CrN 조직은 CrN(220)으로 성장하며, 조직은 조밀해 진다고 제안한 Albert Sue 등의 연구 결과⁸⁾와 잘 일치하고 있다. N₂ gas 분압 2×10^{-2} torr에서는 Fig. 1(e)에 보이는 것처럼 1×10^{-2} torr에 비하여 CrN(220) peak이 감소하였는데, 이것은 Cr 이온이 상대적으로 많은 질소 입자와 충돌하여, 이온의 운동 에너지가 모재에 증착되기에는 약화된 상태로 감소되기 때문에 CrN(220) peak이 줄어든 것으로 생각된다.

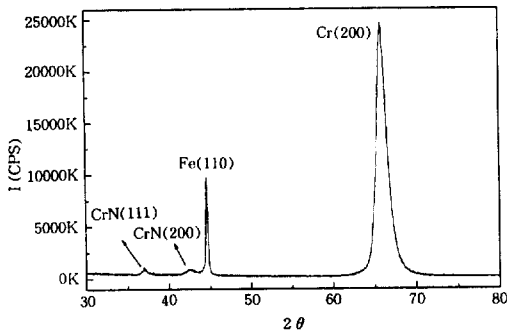
일반적으로 결정면간 거리는 면지수(hkl)의 크기가 클수록 짧다. 그러므로 B1 NaCl 구조인 CrN은 면간 거리가 (111)이나 (200)보다 (220)이 짧기 때문에 원자간 거리가 가장 가까운 (220)의 원자층이 가장 조밀하다. 그러므로 (220) peak이 가장 우세한 Fig. 1(d)가 재료 특



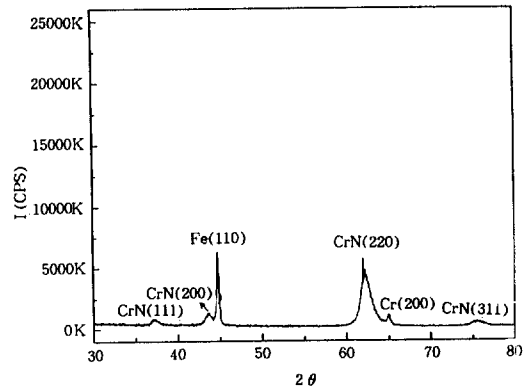
(a) Substrate



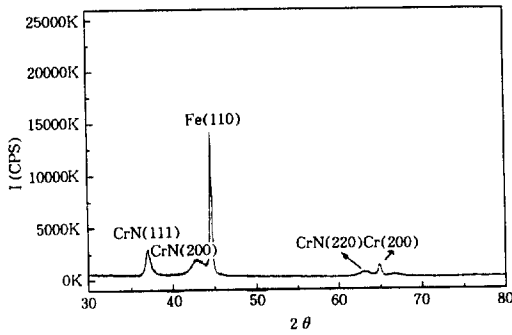
(d) CrN(P_{N₂} : 1 × 10⁻² torr)



(b) CrN(P_{N₂} : 9 × 10⁻⁴ torr)



(e) CrN(P_{N₂} : 2 × 10⁻² torr)



(c) CrN(P_{N₂} : 5 × 10⁻³ torr)

Fig. 1. XRD patterns of CrN films deposited at various N₂ partial pressures.

성이 가장 우수할 것으로 예상된다.

3.2 박막의 미세 조직 분석

일반적으로 ion plating 방법으로 형성된 박막층은 코팅 방법이나 작업 조건에 따라 여러 가지 형태의 조직으로 성장하며, 이러한 조직 형태에 따라 박막의 특성이 결정된다. Fig. 2는 본 실험의 작업 조건인 질소 분압을 변화하면서 형

성한 분압별 CrN 박막층의 표면을 SEM으로 관찰한 것이다. 이 관찰 결과를 보면 Fig. 2(b)와 같이 N₂ 분압 조건이 1 × 10⁻² torr인 진공도에서 형성한 박막층의 droplet 분포 면적이 Fig. 2(a)에서 형성한 5 × 10⁻³ torr의 박막층보다 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 이러한 현상이 나타나는 원인은 N₂의 압력이 높아짐에 따라 질소 입자가 풍부하여 CrN 형성이 쉽기 때문에 microdroplet 발생이 적어진 것으로 사료된다. Fig. 2(c)는 N₂ 분압 조건이 2 × 10⁻² torr인 진공도에서 형성한 CrN 박막층의 표면 사진인데 Cr 이온이 resputtering되어 표면이 떨어져 나간 것이 보이며, droplet도 Fig. 2(a)와(b)보다 비교적 큰 크기로 광범위하게 분포되어 있는 것을 알

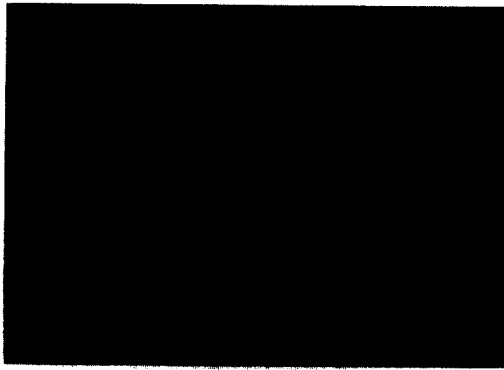
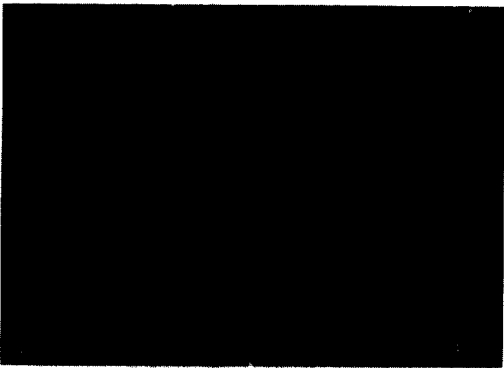
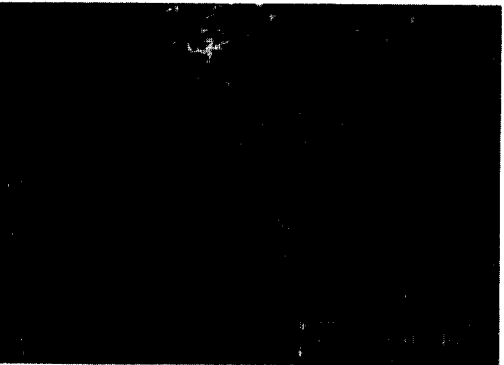
(a) CrN($P_{N_2}: 5 \times 10^{-3}$ torr)(b) CrN($P_{N_2}: 1 \times 10^{-2}$ torr)(c) CrN($P_{N_2}: 2 \times 10^{-2}$ torr)

Fig. 2. Surface morphology of CrN thin films.

수 있다. 이러한 결과로 볼때 질소 분압 조건에서는 이온의 증착 상태가 최적인 임계치가 존재하여 그 이상의 조건에서는 증착 상태가 불량해진다는 것을 알 수 있었으며, 본 실험에서의 최적 증착 질소 분압은 1×10^{-2} torr라고 판

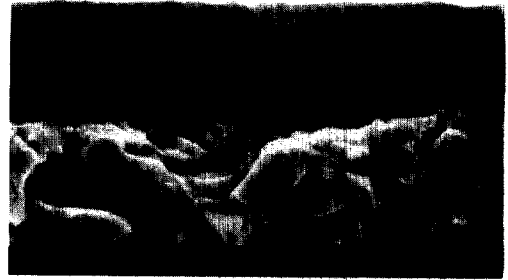


Fig. 3. A Micrograph of the fracture surface.

단된다.

Fig. 3은 형성된 박막층의 조직 형태를 분석하기 위하여 CrN 박막층의 단면을 SEM으로 관찰한 사진이다. 형성 조직을 보면 CrN 박막층은 조밀한 granular 조직을 나타내고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 주입 가스의 증가에 따라 충돌 가능 입자수와 충돌 횟수가 많아짐으로써 이온의 운동 에너지가 높아져 증착된 원자의 이동도와 원자간 결합 에너지를 증가시키기 때문에 핵형성이 활발하여져 결정 입자를 조밀하게 성장시킨 것으로 생각된다.

3.3 박막층의 경도

본 연구에서는 모재와 CrN이 형성된 박막층의 경도를 측정하기 위하여, micro-knoop hardness tester로 하중 50gf에서 경도 시험을 실시하였다. Fig. 4는 압입 하중이 50gf일 때의 CrN 박막의 N₂ 분압별 미세 경도값을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바처럼 질소 분압이 증가할수록 미세 경도치가 증가하다가 최대치에 도달 후 다시 감소하는 경향을 알 수 있다. 50gf의 하중에서 모재의 경도는 400Hv 정도이었으나, 박막층의 경도는 N₂ 분압 1×10^{-2} torr에서 최대 2172Hv(50gf)으로 모재와 비교하여 약 5배 이상 증가하였다.

이러한 경도치의 증가는 미세 조직 분석에서 나타난 바와 같이, 질소 분압이 증가할수록 보

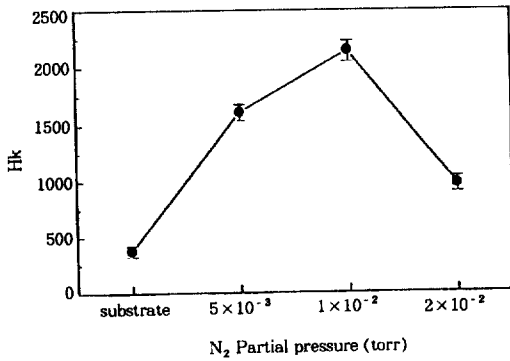


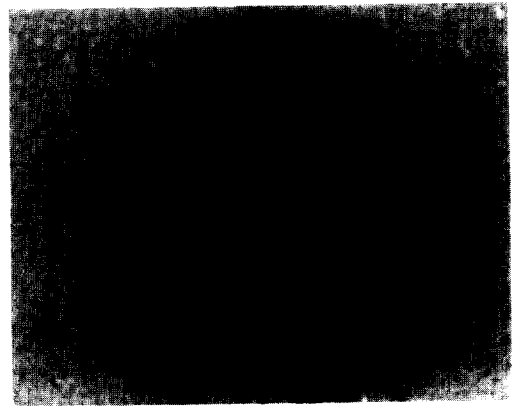
Fig. 4. Microhardness variations of CrN thin films.

다 미세한 결정 조직이 형성됨에 따라 결정립이 미세화되어 Hall-Petch 효과⁹⁾를 일으키기 때문으로 여겨진다.

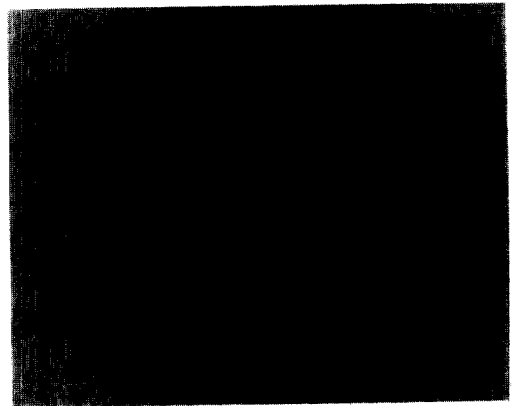
3.4 박막의 밀착력

본 실험에서는 압축 응력 형태로 존재하는 내부 응력이 밀착력을 저해시키는 문제점⁹⁾을 제거하여 모재와 CrN 박막층간의 밀착력을 향상시키기 위한 방법으로 모재와 박막층 사이에 Cr 하지 코팅을 실시하였다. Cr 하지 코팅이 박막의 밀착력을 향상시키는 이유는 Cr보다 인성이 우수한 Cr이 증착 이온의 충돌에 의한 외부 응력을 흡수하여 모재의 내부 응력을 감소시키고, 아울러 모재와 박막층 사이에 형성할 수 있는 모재 산화물의 생성을 억제 및 분해하기 때문으로 판단된다.

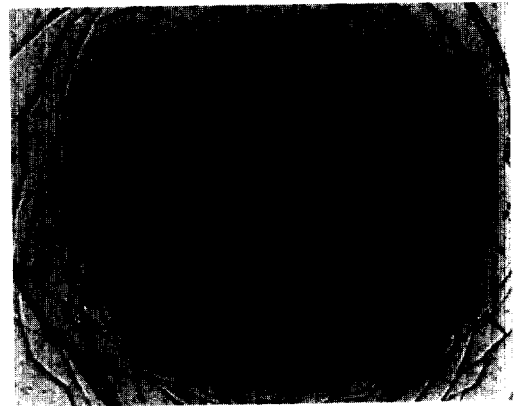
본 실험에서는 박막의 밀착력을 시험하기 위하여 Rockwell C scale로 150kgf의 하중에서 압입 시험을 실시하여 광학 현미경으로 관찰하였다. Fig. 5는 이러한 밀착력 시험을 실시한 후, 압입된 주위의 균열 상태를 관찰한 것이다. 이들 사진에서 나타난 것처럼, 박막층이 떨어져 나가는 박막층 박리 현상은 모든 경우에 나타나지 않았는데, 이 결과로 볼 때 CrN 박막의 밀착력은 비교적 좋은 것으로 판단된다. 그러나 압입된 주위의 변형장은 박막 형성시 송입한 질소 가스 분압별로 큰 차이를 나타내고 있다. Fig. 5



(a) CrN(P_{N_2} : 5×10^{-3} torr)



(b) CrN(P_{N_2} : 1×10^{-2} torr)



(c) CrN(P_{N_2} : 2×10^{-2} torr)

Fig. 5. Photographs of CrN films after adhesion test(load: 150kgf).

에 보이는 바처럼 박막의 밀착력 시험시 압입된 주위에 발생하는 균열의 범위를 비교하면, N₂

분압이 5×10^{-3} torr인 Fig. 5(a)에서 나타난 압입원 주위의 균열 크기는 N₂ 분압이 1×10^{-2} torr인 Fig. 5(b)보다는 크지만, N₂ 분압이 2×10^{-2} torr인 Fig. 9(c)보다는 작은 것을 알 수 있다.

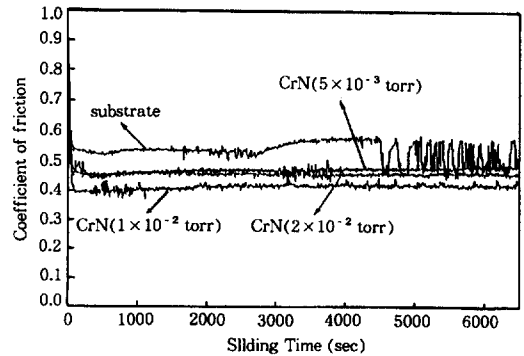
Fig. 5(c)에서는 압입원 주위에 방사형의 넓고 불균일한 형태의 균열이 관찰되었으며, 박막 형성 조건 중 가장 나쁜 밀착력 상태를 보이고 있다. 이러한 밀착력 실험 결과를 볼 때 N₂ 분압이 1×10^{-2} torr인 경우가 압입원 주위의 변형이 가장 적으며 밀착력이 가장 우수하기 때문에 내마모 특성 향상에도 큰 영향을 줄 것으로 기대된다.

3.5 내마모 특성

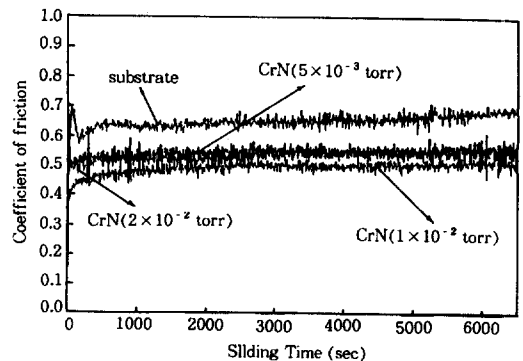
하중을 0.1kgf와 0.4kgf로 작용하는 조건에서 실시한 마모 실험 결과를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 모재의 경우 하중의 변화에 상관없이 박막층보다 높은 마찰 계수를 나타내고 있으며, 특히 저하중인 Fig. 6(a)에서는 임계 하중을 지나면서 마찰 계수가 심하게 변화하는 것을 볼 수 있는데 이러한 현상은 저하중에서 흔히 나타나는 stick slip 현상으로 판단된다. 저하중인 100kgf에서 Fig. 6(a)의 경우 박막층의 마찰 계수는 모재에 비하여 낮고, 일정한 형태를 보이며 하중이 4배나 증가한 400kgf에서 실시한 Fig. 6(b)도 Fig. 6(a)와 유사한 경향을 보이고 있다.

3.6 부식 특성

CAIP법으로 형성한 CrN 박막층의 부식 특성을 모재와 비교 측정하기 위하여 3.5% NaCl 용액에서 N₂ 가스로 용존 산소를 제거하면서 분극 실험을 한 결과, Fig. 7과 같은 분극 곡선들을 구하였다. Fig. 7에서 보이는 바처럼 모재의 경우 모든 측정 전위 범위내에서 부동태 피막이 형성되지 못하고 부식이 계속 진행되는 활성화 부식 거동을 나타내었다.



(a) load : 0.1kgf



(b) load : 0.4kgf

Fig. 6. Variation of dynamic friction coefficient.

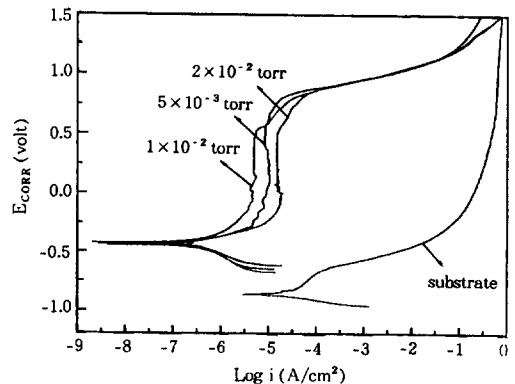


Fig. 7. Potentiodynamic polarization curves of substrate and CrN films (temp. : 23°C, solution : 3.5% NaCl).

그러나 CrN 박막층은 전위가 증가하여도 전류 밀도의 변화가 거의 없는 부동태 영역이 뚜

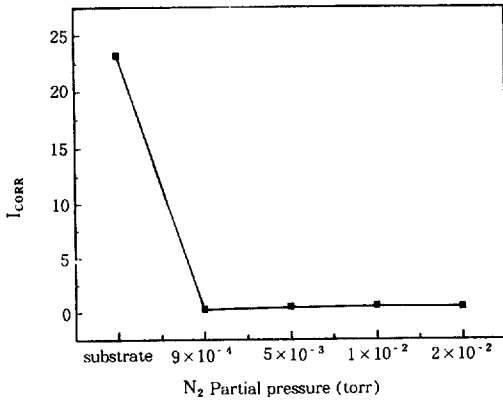


Fig. 8. Variation of corrosion current density.

릿하게 나타났으며, -400mV의 potential에서 부동태 피막을 형성하여 전류 밀도가 일정하게 유지되다가, 전위가 600mV를 넘으면서 결합 부위를 통한 부식 매체의 진행으로 부동태가 파괴되는 거동을 보였다. 이때 부동태 전류 밀도는 모재에 비하여 10^4 order 이상이나 낮게 나타났다. 이러한 실험 결과는 CrN 박막의 형성으로 모재에 비하여 pitting corrosion 저항 특성이 크게 향상된 것임을 보이고 있다. 박막의 내식성 증가는 박막 조직의 결정립들이 조밀한 granular 조직으로 성장하면서 인접 결정립들과 서로 교차되기 때문에 결정립간의 결합이 낮게 되어 부식의 진행을 억제한다. 또한 박막층에 포함된 Cr이 일단 부식되면 치밀한 산화 Cr막을 형성하여 부식의 진행을 억제하므로, 일단 형성된 pitting도 곧바로 생성된 산화 Cr막에 의하여 부식의 확대가 억제되는 것으로 여겨진다.

Fig. 8과 9는 분압별 박막의 부식 전류 밀도 (I_{corr})와 각각 부식 전위 (E_{corr})를 각각 보여주고 있다. Fig. 8에서 나타난 바처럼 모재에 비하여 CrN 박막층의 부식 전류 밀도는 크게 감소한 것을 알 수 있으며, 이는 전자의 감소로 인하여 부식의 진행이 억제된 것을 의미한다. 또한 Fig. 9의 부식 전위의 경우에는 CrN 박막층이 모재에 비하여 noble한 쪽으로 상승함을 보이고 있다. 이는 CrN 박막이 모재보다 음극적(cathod-

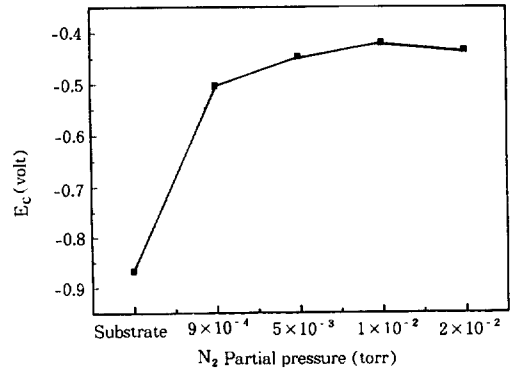


Fig. 9. Variation of corrosion potential.

ic)임을 의미하며, galvanic corrosion이 일어나는 경우에는 음극으로 작용할 확률이 높은 것을 뜻한다. Fig. 8과 9의 실험 결과를 볼 때, CrN 박막 코팅에 의하여 재료의 부식 특성이 크게 향상된 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 potentiodynamic polarization 실험 후, 부식 표면을 SEM으로 관찰한 것이다. 부식 표면 관찰에서 알 수 있듯이 Fig. 10(a)는 모재의 집중된 부식 진행으로 계속 부식 범위가 넓어지고 있지만, Fig. 10(b)~(d)의 경우와 같은 CrN 박막층의 부식 거동은 pin-hole 등의 결합 부위를 통하여 부식 용해물이 박막과 모재 입계간의 불균질한 부위로 선택 부식됨을 알 수 있다. CrN 박막층의 pitting 분포를 상대 비교하여 볼때, 질소 분압 5×10^{-3} torr에서 형성한 Fig. 10(b)보다 질소 분압 1×10^{-2} torr에서 형성한 Fig. 10(c)의 박막층의 pitting 분포가 감소하였으며, 질소 분압 2×10^{-2} torr에서 형성한 Fig. 10(d)가 가장 많은 pitting 분포를 나타내었다. 이로 미루어 볼때 질소 분압 1×10^{-2} torr에서 형성한 박막층의 내부식성이 가장 우수한 것으로 판단된다. 부식 표면 관찰 결과, 분압별 박막층의 pitting 분포가 질소 분압이 높을수록 적은 것을 볼 수 있는데, 이는 미세한 granular 조직으로 성장한 박막일수록 치밀하고 균질한 표면을 형성하므로 부식 저항이 증가한 것으로 판단된다.

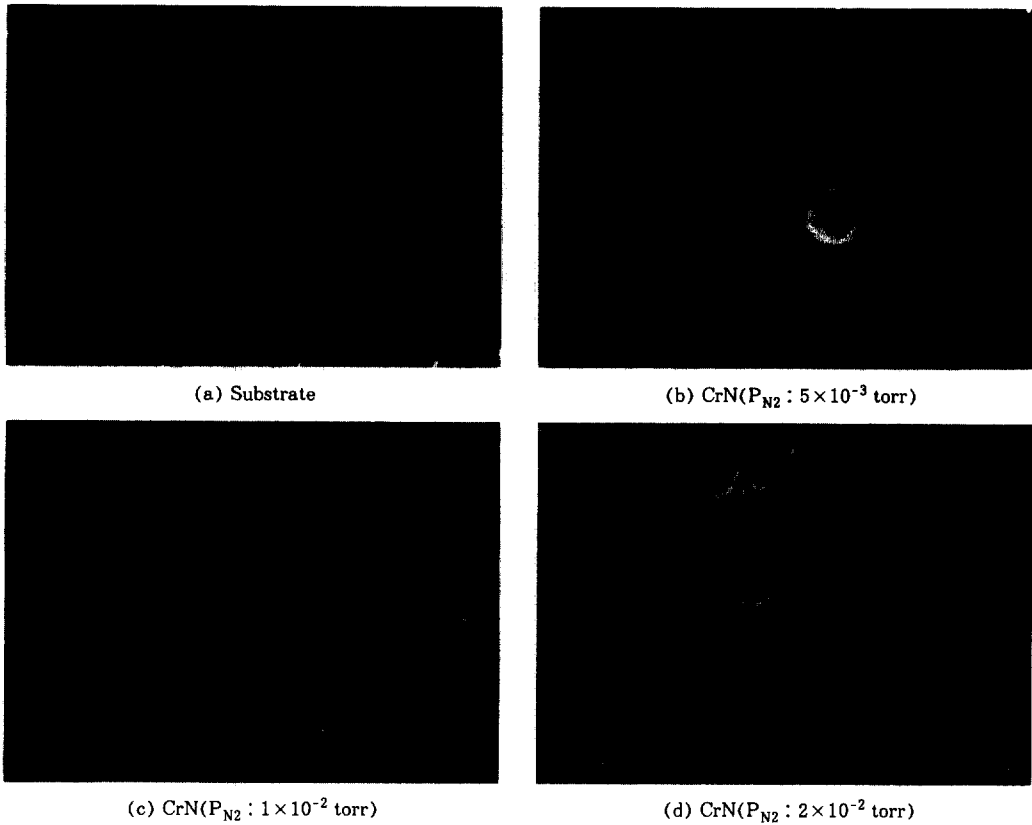


Fig. 10. Surface morphologies of corroded substrate and CrN thin films (temp. : 23°C, solution : 3.5% NaCl).

4. 결 론

총신 재료 표면에 음극 아크 이온 도금 (CAIP) 장치를 이용하여 N₂ 분압별 CrN 박막층을 형성하였으며, 박막 형성시 송입한 반응가스인 질소 가스의 분압별로 박막의 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) XRD 분석 결과, CrN 박막에서는 CrN(111), CrN(200), CrN(220) peak이 모두 관찰되었는데, 질소 분압 1×10^{-2} torr까지는 질소 분압이 증가함에 따라 CrN(111)과 CrN(200) peak의 강도는 감소되고, CrN(220) peak의 강도는 증가하는 경향을 나타내었으며, CrN(220) peak이 높을수록 재료의 특성은 우수하였다. N₂ 분압이 2×10^{-2} torr에서는 CrN(220) peak이 N₂

분압이 1×10^{-2} torr일 때보다 감소하였는데, 이는 증착 에너지의 감소 때문으로 판단된다. 아울러 형성된 CrN 박막은 전반적으로 granular 조직 형태를 나타내었다.

(2) Knoop micro-hardness tester에 의한 CrN 박막의 미세경도 측정 결과, 질소 분압 1×10^{-2} torr에서 최대 2172 ± 200 Hk(하중:50gf)로 모재의 경도보다 5배 이상 향상되었을 뿐만 아니라 밀착력 검사에서도 가장 양호한 밀착력을 보였다.

(3) CrN 박막층과 모재와의 마찰 계수를 상대 비교한 결과 박막층의 마찰 계수가 감소한 것으로 나타났다. 특히, N₂ 분압이 1×10^{-2} torr일 때 형성한 CrN 박막층의 마찰 계수가 가장 낮게 나타났다.

(4) 내부식 시험 결과, CrN 박막의 부식 전류 밀도가 모재보다 10^5 배 이상 감소하였으며, 부식 전위도 상승하여 nobility도 증가하였다. 아울러 CrN 박막은 모재의 활성화 부식 거동에 비하여, 부동태 영역이 확실히 구분되어 모재보다 내부식성이 우수하다는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 육군 사관학교 부설 화랑대 연구소의 1996년 국고 학술 연구비에 의해 지원 받았으며, 본 연구를 위하여 많은 도움을 주신 성균관 대학교 한전건 교수께 감사드립니다.

5. 참 고 문 헌

1. 이흥주, "총과 탄도학", 103-106, 청문각, 1996.
2. P. J. Martin, "Handbook of Thin Film Process Technology", A1.4:1-16, Academic Press, San Diego, U.S.A., 1995.
3. D. Wang and T. Oki, *Thin Solid Films*, **185**, 219-230 (1990).
4. H. Randhawa, "Coatings Technology Handbook", 229-236, Satas & Associates, 1990.
5. F. Arrando, M. C. Polo, P. Molera, *Surface and Coatings Technology*, **68/69**, 536-545 (1994).
6. H. W. Loffler, *Surface and Coatings Technology*, **68/69**, 729-740 (1994).
7. 한전건, "Harding Coating의 기술 개발 현황", 4-17, 성균관대학교, 1994.
8. J. Albert Sue, Anthony J. Perry and Jorg Vetter, *Surface and Coatings Technology*, **68/69**, 126-130 (1984).
9. V. Guilbaud-Massereau, A. Celerier, J. Machet, *Thin Solid Films*, **258**, 185-193 (1995).