

## PECVD에 의해 형성된 TiCN 박막의 형상 및 밀착성

허 정 · 남태운\*

동우열처리공업(주)

\*한양대학교 금속재료공학과

### The Morphology and Adhesion of TiCN Film formed by PECVD

J.H uh and T.W.Nam\*

Dongwoo Heat Treating Co, Shiheung

\*Dept. of Materials Sci. & Eng. Hanyang University, Ansan

**Abstract** TiCN thin films were deposited on tool steels at 510°C by PECVD from a  $TiCl_4+N_2+CH_4+H_2+Ar$  gaseous mixture. The microstructures and preferred orientation were investigated. The micro-scratch tests were performed using a system equipped with an acoustic emission sensor. Critical loads were determined to evaluate the adhesion of TiCN to substrate. The influences of the microstructures of substrates, double layered coatings, and coatings after nitriding(duplex coating) were investigated. The experimental results showed that the microstructures of substrates and double layered coating did not affect the critical loads considerably. By the duplex coating, critical loads were not always increased. In some cases, duplex coatings decreased critical loads significantly despite of absence of black layer. In this study, we tried to relate the results of scratch test to the residual stress analysis. Nitriding before the coating reduces the tensile residual stress in the film, which gives rise to low critical load in scratch test.

(Received January 29, 2002)

**Key words** : TiCN, scratch test, microstructure, double layered, duplex coating, residual stress

### 1. 서 론

경질 박막에는 광범위한 물질이 포함될 수 있으나 경도, 화학적 안정성 측면에서 친이 금속의 질화물이나 탄화물, 다이아몬드, DLC 등이 주목 받고 있으며 최근에는 5~50 nm정도의 층을 주기적으로 증착시키는 다층 박막 코팅, 화학적 물리적 특성을 점진적으로 변화시키는 경사코팅 등도 행해지고 있다[1, 2]. TiN과 TiCN은 비교적 우수한 내마모 특성과 공업적 편이성 등으로 인해 경질 박막재료로 오래 전부터 사용되어 왔고 최근에도 그 적용 범위는 점차 확대되고 있다. 증착 방식으로는 arc ion plating, sputtering과 같은 PVD방식이 대중을 이루어 왔으나 최근에는 PECVD에 의한 증착 방식도 활발히 연구되고 있다.

보통 경질 박막의 파괴는 점진적인 마모에 의한 것이 아니고 박막과 모재 간의 cohesive failure이거나 adhesive failure이다. 박막의 밀착성은 모재와의 원자결합력과 계면 구조에 의존한다. 밀착성을 평가하는 방법으로 scratch test, pressure-sensitive tape test, shock wave test, tensile and shear test, laser

technique, acoustic imaging, indentation test 등이 있다. 가장 일반적인 방법인 scratch test는 hard indenter가 수직 하중을 점차 증가시키면서 코팅면을 긁고 지나갈 때 검출되는 음향 방출이나 마찰계수의 급격한 변화 등이 박막의 박리를 의미하는 것으로 보고 이 때의 임계하중을 통해 밀착성을 평가하는 방법으로 본 연구에서는 이를 채택하였다.

밀착성을 향상시키는 방법으로써 모재의 미세 구조 최적화에 의한 lattice mismatch 최소화[2], multi-layer coating에 의한 응력 완화[3], duplex coating(nitriding + coating)에 의한 경도 및 응력 구배 완화[4, 5] 등이 제안되어 여러 가지 연구 결과들이 보고되고 있다. 그러나 이들은 대부분 PVD 방식에 의한 TiN에 관한 것으로 최근에 적용이 확대되고 있는 PECVD방식에 의한 TiCN에 대한 연구결과는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 PECVD에 의해 형성된 TiCN 박막의 미세구조를 관찰하였고 밀착성에 대하여 모재의 미세조직이 미치는 영향을 재질 및 열처리 조건을 달리하여 조사하였다. 또한 TiN/TiCN 복층 코팅의 영향을 검토하였으며 코팅 전의 질화처리가 밀착성에 미치는 영향을

Table 1. Chemical compositions of the samples(wt.%)

	Element								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co	Fe
STD11	1.45	0.18	0.34	11.30	0.94	-	0.38	-	Bal.
STD61	0.37	0.84	0.41	5.12	1.47	-	1.47	-	Bal.
SKH51	0.88	0.35	0.32	4.32	5.30	6.55	2.05	-	Bal.
ASP30	1.27	0.52	0.33	4.45	5.32	6.40	3.20	8.50	Bal.

XRD에 의한 잔류응력 분석치와 연관지어 해석하였다.

## 2. 실험 및 분석 방법

### 2.1. 시료

금형용 재료로 많이 쓰이는 STD11, STD61, SKH51, ASP30 등 4 종류의 소재를 직경 15 mm, 두께 10 mm의 원반 형태로 가공하여 시료로 하였다. Table 1에 원자 흡수 분광법으로 분석한 각 소재의 화학 성분을 나타냈다. TiCN 박막 코팅 전의 열처리는 진공로에서 실시하였고 냉각은 질소가스 가압 방식을 이용하였다. STD11, STD61, ASP30 등에 대해서는 각각 한 가지의 cycle에 의해 열처리하였고, SKH51은 미세조직의 차를 두기 위해 세 가지의 cycle로 열처리하였다. Table 2에 시편의 종류 및 열처리 조건, 경도 등을 정리하였다. 열처리 후에는 연마지(#1500)와 알루미늄 분말(0.3 μm)로 연마 및 폴리싱을 하였고 트리클로로에틸렌으로 초음파 세척을 한 후, 아세톤으로 최종 세척하였다.

Table 2. Heat treatment conditions of the samples

NO	Material	Heat treatment	Hardness (H <sub>R</sub> C)
1	STD11	1030°C(Q)×1h, 520°C(T)×2h×2times	60
2	SKH51	1170°C(Q)×1h, 600°C(T)×2h×2times	60
		1100°C(Q)×1h, 580°C(T)×2h×2times	60
		1170°C(Q)×1h, 550°C(T)×2h×2times	65
3	ASP30	1170°C(Q)×1h, 600°C(T)×2h×2times	65
4	STD61	1030°C(Q)×1h, 580°C(T)×2h×2times	51

### 2.2. 실험 장치

TiCN 코팅 설비로는 Austria RÜBIC 사에서 제작된 PECVD장치(Model NO. PC60/900)를 사용하였다. 본 장치는 크게 진공챔버, 플라즈마 발생 전원, 가스 공급 장치의 세 부분으로 구성되어 있고 그 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 가스는 H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, CH<sub>4</sub>이며 각 유량은 MFC(Mass Flow Controller)에 의해 조절된다. Ti 공급원인 TiCl<sub>4</sub>는 액상이므로 H<sub>2</sub>가스로 bubbling 하여 증기 상태로 챔버내에 투입되고 이때의 유량은 TiCl<sub>4</sub> 증기 펌프와 TiCl<sub>4</sub>탱크로 유입되는 수소량을 동시에 제어함으로써 조절된다. 반응 후 발생하는 Cl기는 H와 결합, HCl을 형성시켜 플라즈마 필터와 NaOH 중화조를 거쳐 배출된다. 시편의 승온은 벽면의 칸탈히터에 의한 가열과 sputtering에 의한 가열을 통해 이루어지며 열전대를 시편의 표면에 직접 접촉시켜 온도를 제어하였다.

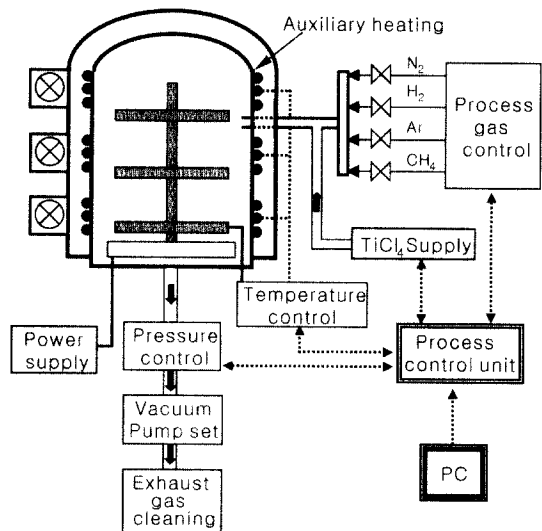


Fig. 1. Schematic diagram of PECVD coating system

**Table 3.** TiCN Coating conditions

Temp.	510	
Pressure	2.0mbar	
Time	6hour	
Bias Voltage	470V	
Power	2000W	
Flow Rate (l/h)	H <sub>2</sub>	240
	Ar	5
	TiCl <sub>4</sub>	2
	N <sub>2</sub>	5-20
	CH <sub>4</sub>	6

### 2.3. 실험 방법

준비된 각 시편에 대해 일부는 그대로 TiCN 코팅을 실시하였고 일부는 질화처리를 520°C에서 2시간, 4시간, 8시간 실시한 후 TiCN 코팅을 실시하였다. 이 때 화학물 층의 영향을 배제하기 위해 질화처리 후 shot blasting에 의해 화학물 층을 제거한 후 코팅을 실시하였다. 또한 복층 코팅에 따른 영향을 보기 위해 일부의 시편은 질화처리 후 TiN과 TiCN을 순차적으로 증착시켰다. 코팅은 510°C에서 6시간 실시하여 층 두께를 3 μm 정도로 하였으며 가스 유량, 작업 압력, 바이어스 전압 및 power 등을 일정하게 하여 공정 변수의 영향이 최대한 배제되도록 하였다. Table 3에 코팅 조건을 정리하였다.

주사 전자 현미경을 통해 박막의 표면 및 파단면을 관찰하였고 X선 회절 시험에 의해 박막의 결정성과 우선 성장 방위를 분석하였다.

밀착력의 평가는 스크래치 시험을 기본으로 하였고 비교를 위해 로크웰 C 압흔시험을 병행하였다. 본 연구에서는 CSEM사에서 제작된 스크래치 시험기(REVETEST)를 사용하였는데 다이아몬드 Indentor를 9.7 mm/min의 속도로 접촉 이동시키면서 100N/min의 속도로 하중을 증가시켜 코팅층 박리시 발생하는 음향 신호를 통해 임계하중을 결정하였다. 또한 임계하중 결정의 정확성을 기하기 위해 스크래치 트랙을 관찰하였다.

박막의 잔류응력 측정 방법은 cantilever bending, tube slitting과 같은 mechanical deflection 방식과 X선 회절에 의한 방식으로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는  $\sin^2 \psi$  method로 잘 알려진 X선 회절 방식에 의해 잔류 응력을 측정하였는데 이는 X선 회절 피크로부터 특정 회절면을 선택하고 그 회절면을 여러 가

**Table 4.** XRD analysis conditions

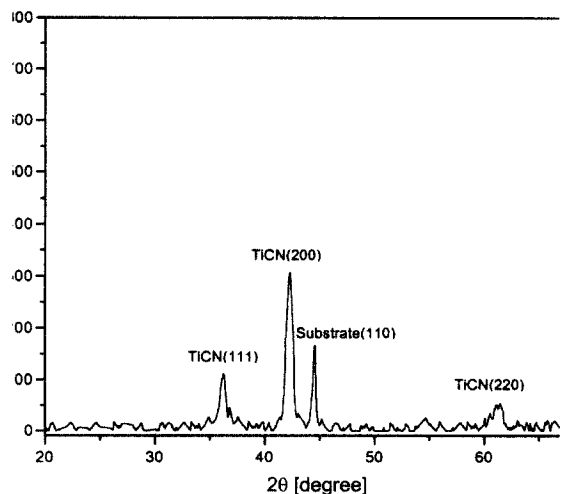
XRD factors	Target	Cu K α
	Tube power	40Kv, 40mA
Scan speed	2°/min	
Scan step	0.005°	
$\psi$ tilting	0, 9, 12, 15°	
Peak search	Center of gravity method	
Material factors	Analysis plane	200(film) 110(substrate)
	Lattice constant, a	4.28457Å(film) 2.8664Å(substrate)
	Poisson's ratio, $\nu$	0.3(film, substrate)
	Standard Bragg angle $\theta_0$	42.14641°(film), 44.67211°(substrate)
	Young's modulus, E	530GPa(film), 205GPa(substrate)
	Stress constant, K	-9.23307(film), -3.36488(substrate)

지  $\psi$  각도로 기울여 나타나는 면간 거리의 변화로부터 응력을 측정하는 방식이다[6, 7]. Table 4에 XRD에 의한 잔류응력 측정조건 및 재료인자를 정리하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. TiCN 박막의 미세구조

SKH 51종의 모재 위에 TiCN 박막을 3 μm 증착시킨 시편에 대한 X선 회절 분석 결과를 Fig. 2에 나타

**Fig. 2.** X-Ray diffraction spectra of TiCN coated sample(SKH51)

**Fig. 3.** SEM micrographs of TiCN film

**Fig. 4.** Microstructures of substrates with different heat treatments

내었다. TiCN (111), (200), (220)의 회절 peak을 확인하였으며 우선 성장 방위는 (200)이었다. 일반적으로

TiN 박막의 경우 PVD에서는 우선 성장 방위가 (111)인 반면 PECVD에서는 (200)인 것으로 보고되고 있다

[8]. 이는 우선 성장 방향이 표면에너지와 스트레인 에너지로 이루어진 박막 전체의 에너지를 최소화하는 면에 의해 결정되기 때문인 것으로 알려져 있다[9]. PECVD에 의한 TiN박막의 경우에는 표면에너지가 가장 낮은(200) 면의 성장이 우선하는데 본 연구 결과는 TiCN의 경우도 동일함을 나타내었다.

Fig. 3에 동일 시편에 대한 TiCN 박막의 표면 및 파단면 형상을 나타내었다. Fig. 3a에서 보는 바와 같이 표면 결정립의 크기는 0.5~1 μm이며, Fig. 3b에서와 같이 성장 단면은 주상정 형태로 구조구역모델 (Structure Zone Model)에서의 zone 2구조에 가까운 것으로 나타났다[10]. 구조 구역모델에 의하면 통상 zone 1에서 zone 2로의 천이는 순 금속에서는 0.3T<sub>m</sub> (Melting Temperature)이상의 온도에서 일어난다[10]. 그러나 Hibbs 등[11]에 의하면 TiN에서는

0.15T<sub>m</sub>에서 천이가 일어날 수 있다. TiCN의 T<sub>m</sub>은 3000°C 부근이고, 본 실험의 증착온도는 510°C로 0.17T<sub>m</sub> 정도에 해당되어 zone 2로의 천이가 일어났음을 보여 주고 있다.

### 3.2. TiCN 박막의 밀착성

#### 3.2.1 모재의 영향

박막의 밀착력은 증착 물질과 유사한 구조의 모재를 사용함으로써 향상된다고 알려져 있다[17]. Helmersson 등은[12] 고속도공구강 모재에 스퍼터링 방식으로 증착된 TiN 코팅층의 밀착력을 스크래치 실험에 의해 평가하여 모재의 VC 탄화물의 밀도가 증가함에 따라 임계하중이 증가함을 보였고 이는 TiN과 VC가 같은 구조 (NaCl구조)를 갖기 때문인 것으로 설명하였다. 본 연구에서는 열처리 조건에 따른 미세조직의 차이가 밀착력

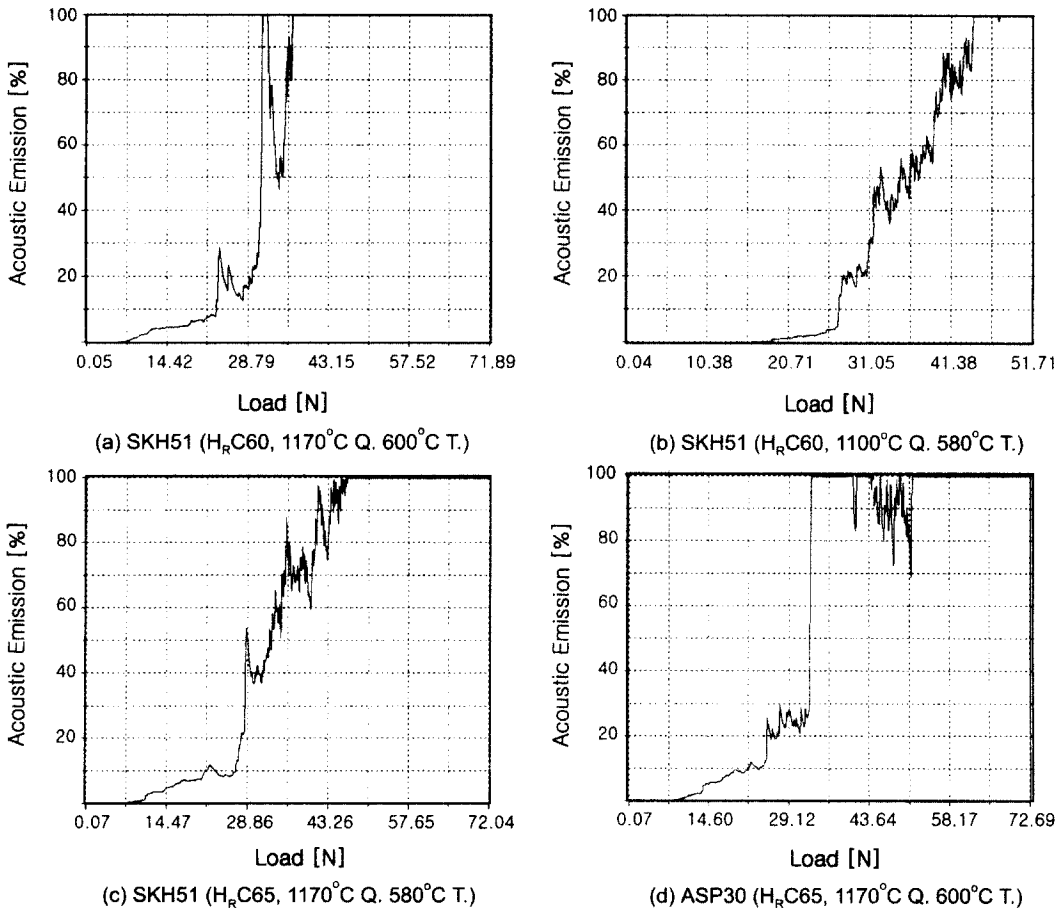


Fig. 5. Scratch adhesion test results with different substrates

에 미치는 영향을 고찰하기 위해 SKH51종을 세 가지의 cycle에 의해 열처리한 후 동일한 조건에서 코팅하여 스크래치 시험을 실시하였고 탄화물의 양 및 분포에 따른 영향을 비교하기 위해 탄화물이 다량 분포된 분말 소결 고속도강(ASP30)을 열처리한 후 스크래치 시험을 실시하였다. Fig. 4에 각 소재의 미세조직을 나타냈다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 열처리 조건, 특히 오스테나이트화 온도에 따라 탄화물의 분포와 크기가 달라진다. 또한 분말소결강에서는 상대적으로 미세한 탄화물이 분포하고 있다. Helmersson 등은 용제강(SKH51)과 분말소결 고속도강(ASP30) 사이의 MC탄화물의 양의 차가 임계하중을 크게 변화(50%이상)시키는 것으로 보고한 바 있다[12]. 그러나 본 실험에서는 Fig 5의 스크래치 시험 결과와 Fig. 6의 압흔시험 결과에서 보는 바와 같이 모재의 탄화물의 양에 따른 큰 차는 발견되지 않았다. 이는 박막의 우선 성장면과 관계되는 것으로 생각된다. 즉, PVD에 의해 증착된 TiN 박막은 우선 배향면이 (111)이나 본 실험에서의 TiCN 박막의 우선

배향면은 (200)으로 탄화물의 (111) 배향면과는 상대적으로 misfit이 크다. 따라서 탄화물과 박막간의 결정 misfit 완화에 의한 밀착력 향상 효과가 크게 나타나지 않은 것으로 생각되나 이에 대해서는 보다 심도 있는 분석과 해석이 필요할 것이다.

### 3.2.2 질화처리의 영향

경질 박막 코팅에 있어서 코팅 전 모재에 대한 질화 처리는 밀착력을 향상시키는 주된 수단으로 알려져 있고 duplex coating 등의 이름으로 공업적으로도 많이 이용되고 있다[5]. 밀착력 향상의 요인으로써 모재 강화에 의한 소성변형의 억제, 증착 면적 증가에 의한 결합력의 강화, 응력 구배의 완화 등이 제안되고 있다. 본 연구에서는 질화처리에 따른 밀착력의 변화를 관찰하고 이를 잔류응력의 변화와 연관지어 고찰하였다. 각 시편에 대한 밀착력은 스크래치 시험에서의 음향 신호에 의한 임계하중으로 비교하였고 잔류응력은 XRD에 의해 측정하였다. 스크래치 시험 결과에 의한 임계하중과 잔

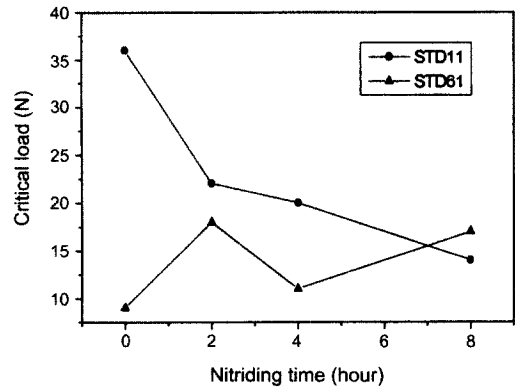
Fig. 6. Indentation test results with different substrates

**Table 5.** Critical loads and residual stresses of coated samples

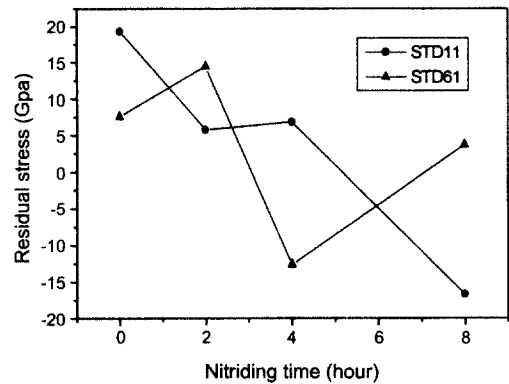
Material	Hardness ( $H_{RC}$ )	TiCN thickness ( $\mu\text{m}$ )	Nitriding time (hour)	Critical load (N)	Residual stress (GPa)
STD11	60	3.0	0	36	+19.34
		3.5	2	22	+5.74
		3.5	4	20	+6.82
		3.0	8	14	-16.74
STD61	51	3.5	0	9	+7.56
		3.0	2	18	+14.44
		3.0	4	11	-12.66
		2.5	8	17	+3.61

류응력을 Table 5에 정리하였다.

STD11의 경우 질화처리에 따른 밀착성 향상 효과는 나타나지 않고 오히려 질화 시간의 증가에 따라 밀착력이 감소하고 있는데 이는 지금까지의 대부분의 연구 결과에 반하는 것이다. 또한 STD61의 경우에도 질화를 2시간 실시했을 경우에는 밀착력이 다소 증가하나 그 이상의 질화시간에서는 밀착력이 다시 감소하고 있다. 따라서 본 실험 결과에 의하면 질화처리에 의한 밀착력 향상 효과는 없는 것으로 나타났다. 지금까지의 연구 결과에 의하면 질화처리에 의해 형성된 Fe-N계 화합물 층이 코팅과정에서  $\alpha$ -Fe(black layer)로 변화하였을 경우에만 밀착력이 떨어지는 것으로 보고되고 있다[13]. 그러나 본 실험에서는 질화 후 표면 화합물 층을 blasting에 의해 제거하였으므로 black layer형성에 의한 것은 아니라고 볼 수 있다. 따라서 다음 두가지 측면에서 해석이 가능할 것으로 생각한다. 첫 번째는 임계 하중의 크기에 따른 파괴 양상의 차이이다. Indentor하중이 작은 영역에서는 모재의 영향보다는 박막 자체의 특성, 즉 미세구조, 경도 등이 밀착력에 영향을 주어 박리를 주도한다. 본 실험에서는 30N 이하의 비교적 낮은 하중에서 코팅층의 박리가 일어나고 있다. 따라서 질화에 의한 모재의 소성변형 억제에 따른 밀착성 강화 효과가 크게 작용하지 못한 것으로 생각된다. 두 번째는 박막에 내재하는 잔류응력이 임계하중에 미치는 영향이다. 박막의 잔류응력은 박막과 열팽창계수의 차이에서 오는 extrinsic stress와 박막자체의 미세구조와 연관된 intrinsic stress로 구성된다[14]. 통상 CVD와 같은 고온 증착의 경우에는 extrinsic stress가, PVD와 같은 저온 증착의 경우에는 intrinsic stress가 잔류응력을 주도하는 것으로 알려져 있다. 여러 연구



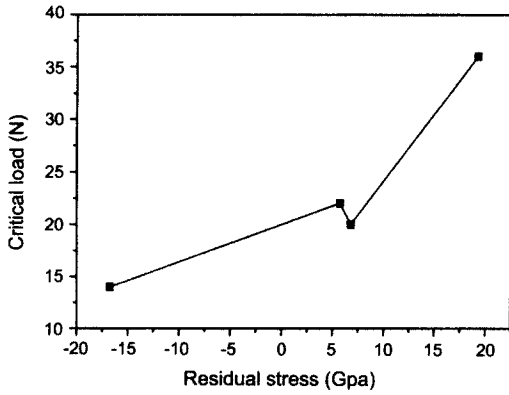
(a) Critical loads



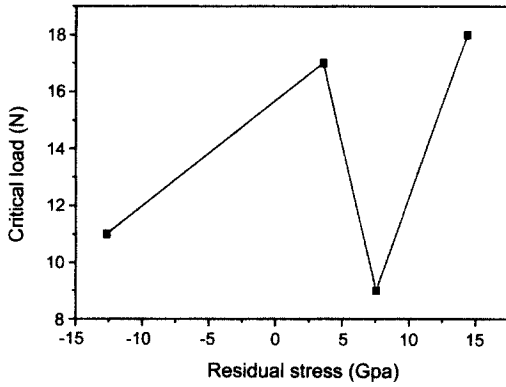
(b) Residual stresses

**Fig. 7.** Variations of critical loads and residual stresses with nitriding time

결과에 의하면 PVD에 의해 형성된 TiN 박막은 압축 응력 상태에 있는 것으로 보고되고 있다[15, 16]. 그러나 본 연구에서 PECVD에 의해 형성된 TiCN 박막은 Table 5에서 보는 바와 같이 대체로 인장 잔류응력을 나타내고 있으며 질화된 시편에서는 그 양이 대체로 감소하고 압축응력으로의 반전이 일어나기도 한다. 질화에 따른 임계하중과 잔류응력의 변화를 Fig. 7에 나타냈다. 스크래치 시험 중에는 Indentor에 의해 박막에 압축응력이 부과된다[17]. 이 때 박막에 존재하는 인장응력은 부과되는 압축응력을 완화시키는 역할을 함으로써 박리시의 임계하중을 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 8에 잔류응력과 임계하중의 관계를 나타냈다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 STD11의 경우에는 인장응력의 증가에 따른 임계하중의 증가 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다. 따라서 질화된 시편에서의 인장응력의 감소는



(a) STD11



(b) STD61

Fig. 8. Variations of critical loads with residual stresses

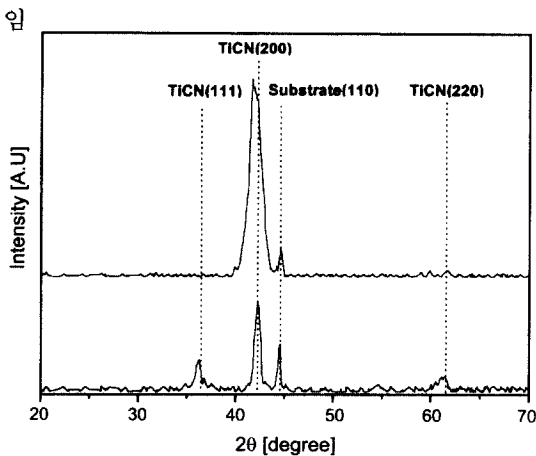


Fig. 9. Variation of XRD peak with pre-nitriding

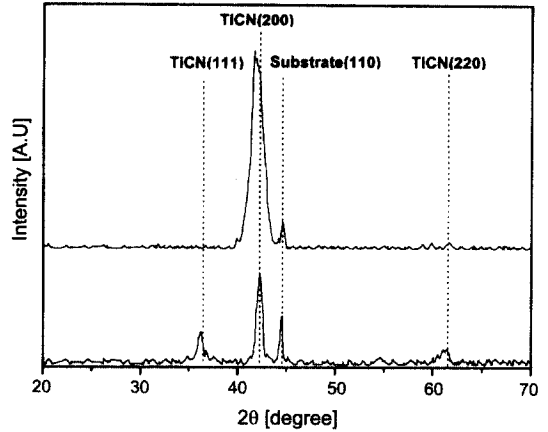
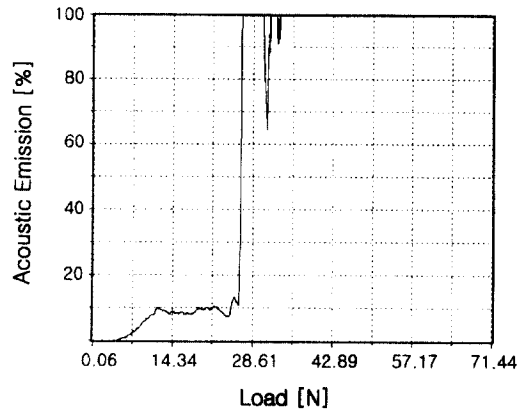
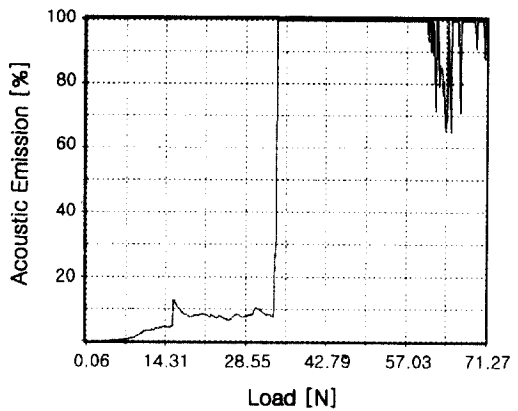


Fig. 9. Variation of XRD peak with pre-nitriding



(a) Coated on STD11



(b) Coated SKH51

Fig. 10. Scratch adhesion test results of double layered coating(TiN + TiCN)

계하중의 감소, 즉 밀착성의 약화를 초래할 수 있다. 질화된 시편에서의 인장응력 감소는 결정성의 향상과도

관계 있는 것으로 생각되며 질화에 따른 XRD peak의



변화를 Fig. 9에 나타냈다. 질화가 잔류응력과 밀착성에 미치는 영향에 대해서는 여러 가지 조건에서 보다 많은 실험과 분석이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

### 3.2.3 복층 코팅의 영향

일반적으로 복층코팅은 모재와의 화학적, 구조적 친화력 향상과 박막성장 응력의 완화 등을 통한 밀착성 향상을 목적으로 행해진다[18]. 본 연구에서는 각 소재에 대해 4시간 질화처리후 TiN과 TiCN을 각각 1.5  $\mu\text{m}$ 씩 증착시켜 스크래치 시험을 하였고 그 결과를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 복층 코팅에 의해 임계하중의 증가는 나타나지 않았으나 음향 신호의 변화가 두 번에 걸쳐 나타나는 2중 박리 양상을 띠는 것을 알 수 있었다. 이는 초기에는 TiN과 TiCN의 계면에서, 나중에는 TiN과 모재의 계면에서 박리가 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

PECVD에 의해 510°C에서 증착된 TiCN 박막의 미세구조를 조사하고 스크래치 시험을 통해 밀착력을 측정할 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 박막의 우선성장면은 (200)이고 단면은 주상정의 zone2구조를 나타낸다.

2) 모재의 종류 및 탄화물 분포와 양에 따른 밀착력의 차이는 나타나지 않았다.

3) 코팅 전 질화처리에 의해 밀착력은 향상되지 않았는데 이에 대한 원인을 다음과 같이 제안하였다.

① 스크래치 실험에서 코팅층 박리가 상대적으로 작은 하중(30N미만)에서 일어날 때는 질화에 의한 모재의 강화 효과 즉, 소성 변형억제 효과가 밀착성에 크게 기여하지 않는다.

② TiCN 박막에는 주로 인장응력이 잔류하고 있는데 이는 어느 범위내에서는 스크래치 시험에서 Indentor선

단에 부과되는 압축응력을 완화시켜 임계하중을 높이는 역할을 한다. 따라서 질화된 시편의 상대적으로 낮은 인장응력이 임계하중을 낮춘다.

4) TiN과 TiCN의 복층코팅에 따라 밀착력은 향상되지 않았고 이중 박리 현상이 나타났다.

## 참고문헌

- Holleck, H., Kuhl, C., and Schultz, H. : J. Vac. Sci. Technol. A, 3 (1985) 2345
- Holleck, H., and Schultz, H. : Thin Solid Films, 153 (1987) 11.
- Hultman, L., Hentzell, H., T. G., Sundgren, J. E., and Helmersson, U. : Thin Solid Films, 124 (1985) 170.
- Sun, Y., and Bell, T. : Wear, 166 (1993) 119.
- Dingremount, N., Pianelli, A., and Bergmann, E. : Surf. Coat. Technol., 61 (1993) 187.
- D. S. Rickerby, A. M. Jones, and B. A. Bellamy : Surf. Coat. Technol., 37 (1989) 111
- J. M. Schneider, A. Voevodin, C. Rebolz, A. Matthews, J. H. C. Hogg, and D. B. Lewis : Surf. Coat. Technol., 74-75 (1995) 312.
- J. E. Sundgren : Thin Solid Films., 128 (1985) 21.
- J. A. Sue, and H. H. Trowse : Metallurgical coating, Elsevier applied science, Loden, Vol.4 (1987) 169.
- J. A. Throton : Annu. Rev. Mater. Sci., 7 (1977) 239.
- M. K. Hibbs, Sundgren, J. E., and Helmersson, U. : Thin Solid Films, 122 (1984) 115.
- Helmersson, U., Johansson, B. O., and Sundgren, J. E., : J. Vac. Sci. Technol. A,3 (1985) 308.
- Sun, Y., and Bell, T. : Mater. Sci. Eng., A,140 (1991) 419.
- R. W. Hoffman. : Physics. of Thin Films, vol. 3 (1966) 211.
- A. J. Perry : Surf. Coat. Technol., 41 (1990) 49.
- V. Valvoda : Thin Solid Films. 193/194 (1990) 302.
- Y. Xie, and H. M. Hawthorne : Surf. Coat. Technol., 141 (2001) 15.
- Shinn, M., Hultman, L., Barnett, S. A. : J. Mater. Res., 7 : 901 (1992)