

# 하이브리드 코팅에 의한 고경도 소재용 Ti-Al-Si-N코팅 엔드밀의 절삭성능평가

김경중\*, 강명창+, 이득우+, 김정석+, 김광호\*\*

## Cutting Performance of Ti-Al-Si-N Coated Endmill for High-Hardened materials by Hybrid Coating System

Gyeng Joong Kim\*, Myung Chang Kang+, Deuk Woo Lee+, Jeong Suk Kim+, Kwang Ho Kim\*\*

### Abstract

Hard coatings are known to improve the performance of cutting tools in aggressive machining applications, such as high speed machining. New superhard Ti-Al-Si-N films, characterized by a nanocomposite nano-sized (Ti,Al,Si)N crystallites embedded in amorphous Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> matrix, could be successfully synthesized on WC-Co substrates by a hybrid coating system of arc ion plating(AIP) and sputtering method. The hardness of Ti-Al-Si-N film increased with incorporation of Si, and had the maximum value ~50 GPa at the Si content of 9 at.%, respectively. And the X-ray diffraction patterns of Ti-Al-Si-N films with various Si content is investigated. In this study, Ti-Al-Si-N coatings were applied to end-mill tools made of WC-Co material by a hybrid coating system. Cutting tests for the high-hardened material (STD11, H<sub>R</sub>C62) and their performances in high speed cutting conditions were studied. Also, the tool wear and tool life of Ti-Al-Si-N with various si(6, 9, 19) contents were measured.

**Key Words :** High speed machining( 고속가공 ), Hybird coating system( 하이브리드 코팅 시스템 ), Nanocompostie( 나노복합체 ), Difficult to cut material( 난삭재 ), Tool wear( 공구마멸 )

## 1. 서론

최근, 기계부품 및 금형산업 등의 제작에 있어서 고속가공기술이 적용되고, 절삭공구에 TiC, TiN, Ti-Al-N등과 같은 경질재료로 코팅을 함에 따라, 열처리한 금형강 STD1(H<sub>R</sub>C40이상)등과 같은 고경도 재료의 가공에서 공구에

끼치는 손상이 새로운 논쟁이 되고 있다<sup>(1)</sup>. 현재 Ti-Al-N 경질 박막은 800°C정도의 온도에서도 뛰어난 고온 안정성을 나타내어 최근 고속가공에 활발히 적용되고 있다. 이와 같이 Ti-Al-N 박막에서 내산화성 향상은 TiN 격자 내에 Al 원자가 고용되어진 미세구조로부터 설명되어진다<sup>(2)</sup>.

\* 주저자, 부산대학교 정밀기계공학과 (peve21c@pusan.ac.kr)  
주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30번지

+ 부산대 기계공학부

++ 부산대 재료공학부

이러한 미세구조로 인하여 고온에서 표면으로 확산된 Al 이온들이 표면에서 화학적으로 안정한 Al산화층을 형성하여 산소의 확산방지막 역할을 하는 것으로 알려져 있다<sup>(3)</sup>. 한편, 최근 Ti-Si-N박막은 40GPa이상의 초경도 특성을 나타내어 주목을 받고 있는데, 이러한 초경도 특성은 nc-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 나노복합체 미세구조에서 기인한다고 보고되어지고 있다<sup>(4)</sup>. 하지만 급속히 발전하는 산업 사회의 요구에 부응하는 차세대 기계코팅막의 개발의 필요성은 더욱 더 증대 되고 있으며 이는 선진국을 중심으로 새로운 4성분계 물질에 대한 연구 개발로 이어지고 있다. 현재 이러한 노력들의 하나로 Ti-Al-N과 Ti-Si-N의 장점을 모두 가지는 Ti-Al-Si-N, 4성분계 박막에 대한 연구가 진행되고 있다.

코팅공정에는 아크이온 플레이팅(AIP)방법이 높은 이온화율과 우수한 증착율등의 많은 장점을 가지기 때문에 Ti계 경질 코팅막을 합성하는데 있어 아주 유용한 방법으로 알려져 있다<sup>(5)</sup>. 하지만 비전도성을 가지며 취성을 나타내는 Si 타겟(Target)에 적용하기 어렵기 때문에 Ti-Si-N 박막의 합성에는 AIP방법이 부적합하다.

따라서, 본 연구에서는 4성분계 Ti-Al-Si-N박막을 아크이온플레이팅 방법과 스퍼터링(Sputtering) 방법을 혼합한 하이브리드 증착시스템(Hybrid deposition system)을 사용하여 코팅공구를 제작하였으며, 실리콘(Si) 첨가량에 따른 Ti-Al-Si-N 박막의 미세구조와 기계적 특성을 파악하고, 고경도소재의 고속가공에서 회전수 변화에 따른 공구마멸 및 공구수명을 통한 공구의 성능을 평가하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 증착(Deposition) 장치와 방법

Ti-Al-N박막에 실리콘(Si:0, 4, 6, 9, 19, 31%)함량에 따른 특성을 조사하기 위해 아크이온플레이팅 방법과 스퍼터링 방법을 혼합한 하이브리드 증착시스템을 사용하여 초경소재(WC-Co)시편 위에 증착 했다. 사용된 증착 장비에 관한 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

Ti-Al 합금 타겟을 장착한 arc cathode gun과 Si 타겟을 장착한 DC sputter gun은 챔버(chamber)의 양쪽 벽에 위치하고, 기판 지지대(holder)는 두 타겟 사이의 직선상에 위치하여 회전이 가능하게 설계되었다. 기판 지지대에서 아크 타겟 사이의 거리는 350mm 이고 스퍼터 타겟과의 거리는 250mm로 고정시켰다. Ar 가스(99.9999%), N<sub>2</sub> 가스(99.9999%)를 1:3의 비율로 넣어 공정압력을 일정하게 유

지하였다. 순도 99.999%의 Ti<sub>3</sub>Al 타겟과 순도 99.999%의 Si 타겟을 사용하였다. 시편을 아세톤과 알코올을 사용하여 초음파 세척을 하고, 다시 증착 전에 32Pa의 Ar 가스 내에서 600V의 bias voltage를 인가하여 12분간 이온 세정을 행하였다. 또한 챔버 내부의 저항 열히터(resistance heaters)를 사용해 기판을 가열했다.

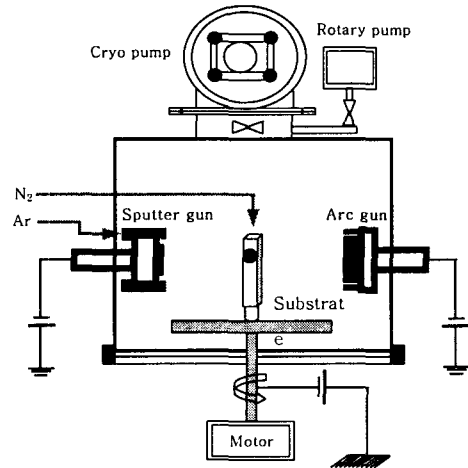


Fig. 1 Schematic diagram of a hybrid system using AIP and sputtering techniques for Ti-Al-Si-N coatings

하이브리드 증착시스템을 이용하여 Ti-Al-Si-N 박막을 얻기 위한 구체적인 증착 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Typical deposition conditions for Ti-Al-Si-N films by hybrid coating system

Base pressure	6.7×10 <sup>-3</sup> Pa	
Working pressure	6.7×10 <sup>-3</sup> Pa	
Working gas ratio	N <sub>2</sub> : Ar = 10 : 1	
Deposition source	Arc source	Sputter source
	Ti <sub>3</sub> Al(99.9%)	Si(99.99%)
Arc current	60A	
Sputter currents	0~6.0A	
Substrate temperature	300°C	
Rotational velocity of substrate	25 rpm	
Substrate bias voltage	-25 V	

그리고, 고경도소재의 고속가공에서 공구수명에 큰 영향을 주는 것이 고온경도에 의한 코팅층의 박리와 인선부의 칩핑인데 이는 박막의 미세구조와 경도에 의해 큰 영향을 받게된다. 따라서, 하이브리드 증착시스템으로 얻어진 Ti-Al-Si-N 코팅막의 실리콘 함량에 따른 내부 미세구조와 결정성을 조사하기 위해 CuK $\alpha$  선을 이용한 X선 회절분석법(X-ray diffraction, PHILIPS, X'Pert-MPD System)을 사용하였다. 그리고, Berkovich 다이아몬드 압흔이 장착된 컴퓨터 제어 가능한 나노인덴테이션(nanoindentation, MTS, Nanoindentation II)을 사용하여 연속압입방식(continuous stiffness method: CSM)으로 Ti-Al-Si-N 박막의 깊이에 따른 경도값을 측정하였다.

## 2.2 공구성능평가 장치 및 방법

Fig. 2는 XRD와 경도 실험결과를 바탕으로 실리콘의 함량에 따른 Ti-Al-Si-N 코팅공구의 고속가공에서 마멸특성과 공구수명을 비교평가하기 위한 장치도이고, Table 2는 가공 절삭조건을 나타내었다.

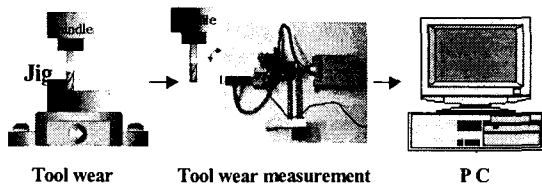


Fig. 2 Experimental set up for cutting performance of Ti-Al-Si-N coated tool

Table 2 Cutting conditions for cutting performance of Ti-Al-Si-N coated tool

Condition	Contents
Spindle revolution [rpm]	8,000, 12,000, 16000
Feed per tooth [mm/tooth]	0.05
Radial depth of cut [mm]	0.06
Axial depth of cut [mm]	10
Workpiece	STD11 (H <sub>R</sub> C 62)
Tool	Ti-Al-Si-N(Si:6,9,19%) coating
Cutting Fluid	None(Dry Cutting)

절삭시험은 고속머시닝센터(Makino V-55, Max 20,000rpm)로 건식에서 실험하였고, 고속에서 코팅공구의 고온경도와 마멸거동을 관찰하기 위해서 주축회전수를

8000, 12000, 16000rpm으로 변화시키고, 절입과 이송은 일정하게 유지하였다. 공구마멸측정은 여유면(flank face)에서 0.2mm(ISO 3002/1)를 기준으로 하여 축방향 절입깊이 내의 절삭날부 3지점을 측정하여 평균하였다. 공구마멸시편은 고경도 소재인 STD11(H<sub>R</sub>C 62)를 사용하였다. 그리고, 절삭길이에 따른 코팅층의 박리와 절삭공구의 마멸형태 등을 관찰하고, 주축에서 공구홀더를 분리할 때 발생할 수 있는 런아웃 등의 오차를 방지하고, 위치정밀도를 유지하기 위하여 CCD (PULNIX, ×200)카메라와 전용지그를 베드에 설치하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 Ti-Al-Si-N 박막의 미세구조 특성

Fig. 3은 Si 함량(0, 4, 6, 9, 19, 31)에 변화에 따른 Ti-Al-Si-N 박막의 결정성과 미세구조를 분석하기 위한 X선 회절패턴을 보여준다. 회절패턴은 TiN 결정이(111), (200), (220), (311), (222) 등의 다배향성으로 성장했음을 나타낸다. Ti-Al-N에 Si가 첨가될수록 피크 강도는 점차적으로 감소하고, Si 함량이 19%일 때 피크가 사라지기 시작해서 Si 함량이 19%이상에서 XRD 패턴이 비정질상의 형태로 변화였다. 게다가 박막내의 Si 함량이 증가할수록 피크의 퍼짐(broadening) 현상이 나타났다. 일반적으로 XRD 분석에서 피크 퍼짐현상은 입자크기의 감소 또는 결정격자 내부에서 발생하는 잔류응력 때문에 일어난다. 이러한 변화들은 다양한 증착 기술을 이용하여 합성된 nc-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합체에 관한 앞선 연구들에서 보고 되어진 결과와 일치한다<sup>(6)</sup>. 그러나 Ti-Al-N에 Si가 첨가됨에 따라 XRD 피크의 위치이동 현상이 관측되었다.

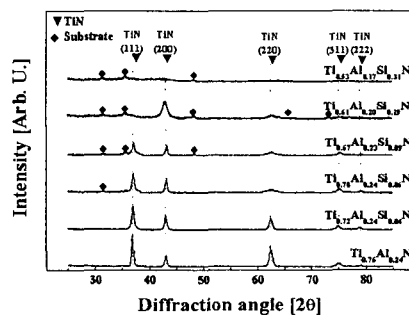


Fig. 3 X-ray diffraction patterns of Ti-Al-Si-N films with various si contents

### 3.2 Ti-Al-Si-N 박막의 Si 함량에 따른 경도

Fig. 4는 다양한 Si 함량을 가진 Ti-Al-Si-N 박막에 대한 경도값을 나타냈다. 경도값은 모재의 영향을 배제하기 위해 박막의 두께 10분의 1 정도 범위의 평균값으로부터 얻었다. 박막 내의 Si 함량이 증가할수록 Ti-Al-Si-N 박막의 경도는 급격히 증가하고, Si 함량이 9%일 때 거의 50 GPa의 최고 경도값을 가진다. 하지만 Si 함량이 더욱 증가하면 경도값은 다시 감소한다. Si 함량이 9%일 때 Ti-Al-Si-N 박막의 경도값(~50 GPa)은 Si 함량이 0%인 Ti-Al-N 박막의 경도값(~30 GPa)에 비해 크게 증가되었음을 알 수 있다. 이렇게 Ti-Al-N 박막내에 Si가 첨가됨에 따라 경도가 급격하게 증가하는 원인으로는 다배향성 나노크기의 (Ti,Al,Si)N 결정립들을 잘 정합시켜줄 수 있고 미세 구조적 유연성 (micro-structural flexibility)을 가지는 비정질 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>에 의한 강한 결합에너지(cohesive energy)와 결정질(Ti,Al,Si)N 상 사이로 비정질 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 침투에 의한 결정립 크기의 미세화에 따른 결정립계 강화(grainboundary hardening)로 설명될 수 있다. 또 다른 이유는 Ti-Al-N내에 Si 원자가 고용되면서 발생하는 고용강화 (solid-solution hardening)라 할 수 있다<sup>9)</sup>. 결정상이 나노 크기로 미세화되고, 비정질 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 기지(matrix)내의 균일하게 분포되어 있기 때문에 Si 함량이 9%일 때 최고경도값이 나타난다. Si의 함량이 더욱 더 증가함으로써 최대경도 후에 나타나는 경도 감소의 이유는 Si 함량이 증가함에 따라 비정질상의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>층이 두꺼워지기 때문이라 생각된다. 비정질 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>가 두꺼워지게 되면 나노결정상과 비정질상의 이상적인 상호작용은 사라지고, 경도는 비정질상의 성질에 크게 영향을 받게 된다.

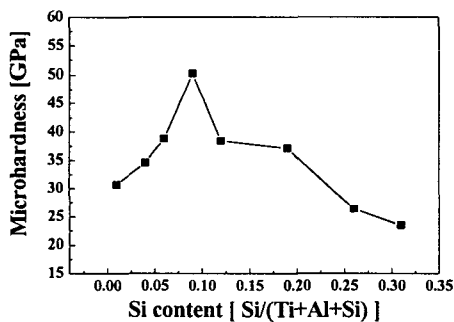


Fig 4. Microhardness values of Ti-Al-Si-N film according to Si content

### 3.3 Ti-Al-Si-N코팅공구의 마멸 특성

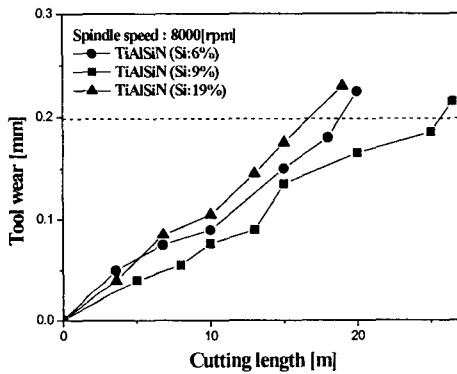
XRD분석과 경도실험을 바탕으로 고속가공에서 가공특성을 알아보기 위해 Si 함량이 6%인 Ti-Al-Si-N(39GPa)과 최고경도값을 가진 9%(~50GPa), 그리고, 비정질상이 발생하기 시작한 Si 함량이 19%(~37GPa)인 Ti-Al-Si-N 코팅공구를 하이브리드 증착시스템에 의해 제작하였다.

Fig. 5는 Si 함량에 따른 Ti-Al-Si-N 코팅공구의 절삭길이에 따른 공구마멸 패턴을 보여주고 있다. Si 함량이 9%인 Ti-Al-Si-N코팅공구는 주축회전수 변화에 따라 다른 두 공구보다 안정된 공구마멸 곡선 형태를 보이고 있다. 이것은 Ti-Al-Si-N(Si:9%)코팅공구가 다른 두 공구에 비해서 큰경도와 내마멸성이 우수하여 고속으로 인한 절삭열에 보다 안정적으로 반응하였기 때문이다. 그리고, 우수한 고온경도로 과도한 절삭열과 절삭부하로 인한 코팅층의 박리와 인선부의 칩핑에 대한 저항이 큰 것으로 나타난 결과이다.

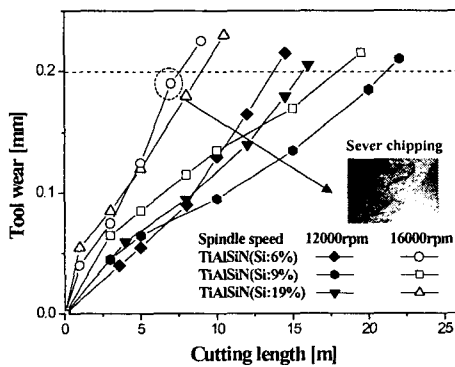
그리고, (a)와같이 주축회전수 8000rpm에서, Si 함량이 6%인 Ti-Al-Si-N 코팅공구는 Ti-Al-Si-N(Si:19%)코팅공구에 비해 약간 안정적인 마멸형태를 나타냈다. 하지만 (b)에서와 같이 Si 함량이 6%인 Ti-Al-Si-N(~37GPa)코팅공구는 마멸초기에는 Si 함량이 19%인 Ti-Al-Si-N(~39GPa)코팅공구와 유사한 마멸형태를 보이나 주축회전수 12000rpm에서는 절삭거리 8m 이후부터, 주축회전수 16000rpm에서는 절삭거리 5m 이후에서부터 Ti-Al-Si-N(Si:19%)보다 급격한 마멸곡선을 나타냈다. 이것은 Ti-Al-Si-N(Si:19%) 코팅공구가 Ti-Al-Si-N(Si:6%)보다 경도가 낮지만, XRD 분석에서처럼 Si함량이 19%일때 코팅층이 비정질상을 나타내면서 Si 함량의 증가에 따른 SiO<sub>2</sub>와 Si(OH)<sub>2</sub> 같은 자기윤활막(Self-lubricating layer)의 생성량이 증가하게 되어 마찰력이 감소하고 마모량이 Si 함량 6%의 코팅공구에 비해 상대적으로 작아졌기 때문에 생긴 결과라고 사료된다. 그리고, Si 함량 6%가 19%에 비해 고속에서 과도한 절삭열로 인해 코팅층의 박리현상으로 과다 칩핑에 쉽게 반응하여 발생한 것으로 사료된다. (b)의 사진은 주축회전수 16000rpm, 절삭거리 7m에서 Si 함량이 6%인 Ti-Al-Si-N 코팅공구인선부의 과다칩핑 형상이다. 그리고, Fig. 5에서 Si 함량이 9%인 코팅공구는 절삭속도가 8000rpm에서 16000rpm으로 두배 증가하였으나 공구마멸은 25%증가하였다. 하지만 Si함량이 6%와 19% 코팅공구는 공구마멸이 45~55%로 크게 악화되었다.

Fig. 6은 Si 함량에 따른 Ti-Al-Si-N 코팅공구의 공구수명을 나타냈다. 주축회전수의 증가에 따라 공구수명이 25~55% 감소하였다. Si함량이 9%인 Ti-Al-Si-N코팅공구

는 다른 두공구에 비해 주축회전수에 따라 약 30~50%이상의 높은 공구수명을 나타냈다. 이것은 Si함량이 9%인 코팅공구는 박막의 결정상이 비정질 상의  $\text{Si}_3\text{N}_4$  matrix속에 나노크기의 (TiAlSi)N 결정상이 박혀 있는 나노복합체로 인해 초고경도특성을 나타내어 고속에서 고온경도가 우수하고 박리로부터 보다 안정적이기 때문에 공구수명이 다른 두 코팅공구보다 크게 향상된 결과이다. 그리고, Si 함량이 6%인 Ti-Al-Si-N코팅공구의 수명은 8000rpm을 제외한 나머지 주축회전수에서 Ti-Al-Si-N(Si:19%) 코팅공구보다 10~15% 낮은 공구수명이 나타났는데, 이는 Si 함량이



(a) 8000rpm



(b) 12000 and 16000rpm

Fig 5. Tool wear according to cutting length at three different spindle speed for three kind of si contents

19%인 공구의 코팅층이 비정질상으로 인해 경도는 높지만 Si 함량의 증가에 따른  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Si}(\text{OH})_2$  같은 자기윤활막을 형성하여 마찰에 대한 영향을 감소시켜서 생긴결과로 사료 된다.

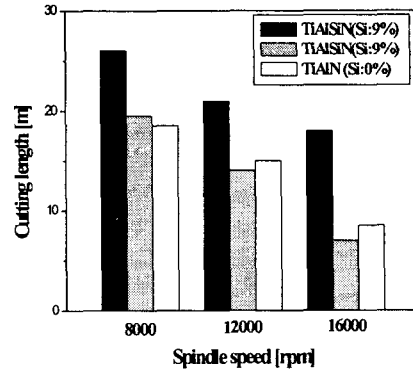


Fig. 6 The comparison of tool life according to Si contents at three different spindle speeds

#### 4. 결론

본 연구에서는 하이브리드 증착시스템을 이용하여 초경 소재에 Ti-Al-Si-N코팅막을 증착시켰고 고경도 소재의 고속 가공에서 성능평가를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) Si 함량에 따른 Ti-Al-Si-N 코팅층의 경도측정 결과 9%까지는 경도가 급격히 증가하여 약 50GPa로 나타났고 이후 비정질상인  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 영향을 크게 받게 되어 경도값은 다시 감소하였다.
- 2) 초고경도특성을 가진 Ti-Al-Si-N(Si:9%)코팅공구는 주축회전수에 따라 다른 두 공구에 비해 크게 안정된 마멸형태를 나타냈다.
- 3) Si 함량이 9%인 Ti-Al-Si-N코팅공구의 마멸은 주축회전수 변화에 따라 다른 두 공구에 비해서 약 25% ~ 55% 정도 긴 공구수명이 나타났고, 주축회전수가 8000rpm에서 16000rpm로 두배 증가시 공구수명은 25%만 감소하였지만, 다른 두 공구는 45~55%로 공구수명이 크게 감소하였다.
- 4) 12000rpm과 16000rpm에서 Si 함량이 19%인 Ti-Al-Si-N 코팅공구는 Ti-Al-Si-N(Si:6%)코팅공구보다 낮은 경도를 가졌지만 비정질상으로 인해 보다 높은 공구수명을 나타냈다.

## 후 기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공연구소(ERC)와 부분적으로 국가지정연구소(NRL) 지원으로 수행되었다.

## 참 고 문 헌

- (1) H. Schut, 1995, "High Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology", *CIRP*, Vol. 44, pp. 35~38.
- (2) S. Pal Dey and S. C. Deevi, 2003, "Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review", *Mat. Sci. Engin. A*, Vol. 342, pp. 58~79.
- (3) Peter Panjan, Boris Navinsek, Miha Cekada, and Anton Zalar, 1999, "Oxidation behaviour of TiAlN coatings sputtered at low temperature", *Vaccum*, Vol. 53, pp. 127~131.
- (4) F. Vaz, L. Rebouta, P. Goudeau, J. Pacaus, H. Garem, J.P. Riviere, A. Cavaleiro, and E. Alves, 2001, "Structural transitions in hard Si-based TiN coatings: the effect of bias voltage and temperature", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 146-147, pp. 274~279.
- (5) P. C. Johnson, in: M.H. Francombe, J. L. Vossen(Eds.), (Academic Press, London, 1989), *Contemporary Preparative Techniques*, p.129.
- (6) Kwang Ho Kim, Sung-Ryong Choi, and Soon Young, 2002, "Superhard Ti - Si - N coatings by a hybrid system of arc ion plating and sputtering techniques", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 161, pp. 243~248.
- (7) J. Musil and H. Hruby, 2000, "Superhard nanocomposite  $Ti_{1-x}Al_xN$  films prepared by magnetron sputtering", *Thin Solid Films*, Vol. 365, pp. 104~109.
- (8) Soo Hyun Kim, Jong Kuk Kim, and Kwang Ho Kim, 2002, "Influence of deposition conditions on the microstructure and mechanical properties of Ti - Si - N films by DC reactive magnetron sputtering", *Thin Solid Films*, Vol. 420-421, pp. 360~365.
- (9) Y. Tanaka, N. Ichimiya, Y. Onishi, and Y. Yamada, 2001, "Structure and properties of Al - Ti - Si - N coatings prepared by the cathodic arc ion plating method for high speed cutting applications", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 146-147, pp. 215~221.