

## 초경엔드밀 적용 표면처리 조성별 마모특성 영향 평가

### The Evaluation of Wear Characteristics Depending on Components of Surface Treatment for Cemented Carbide Endmill

윤일채<sup>1</sup>, 김동배<sup>1</sup>, 윤국태<sup>1</sup>, 윤인준<sup>2</sup>, 이지형<sup>2</sup>, 고태조<sup>3</sup>✉  
Il Chae Yoon<sup>1</sup>, Dong Bae Kim<sup>1</sup>, Guk Tae Youn<sup>1</sup>, In Jun Yoon<sup>2</sup>, Ji Hyung Lee<sup>2</sup>, and Tae Jo Ko<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup> 대구기계부품연구원 뿌리산업혁신본부 (Division of manufacturing industry innovation, Daegu Mechatronics & Materials Institute)

<sup>2</sup> 한국 OSG 기술연구소 (Department of Research & Development, OSG Korea Corporation)

<sup>3</sup> 영남대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Yeung Nam University)

✉ Corresponding author: tjko@yu.ac.kr, Tel: +82-53-810-3837

Manuscript received: 2014.3.14 / Revised: 2014.5.12 / Accepted: 2014.5.12

*For depth machining in die and mold, Electrical Discharge Machining (EDM) is used generally. To make deep hole and deep shape efficiently, cemented carbide endmill for depth machining is necessary. For this purpose, cemented carbide endmill was designed using design of experiment (DOE). To improve cutting performance, endmill was coated with multilayer surface treatment, TiAlCrSiN and TiAlCrN, for higher wear resistance. In order to evaluate the endmill, Transverse Rupture Strength (TRS) test was tried for investigating the relationship between surface treatment and strength in endmill body. Scratch test was also used for measuring adhesion force of each surface treatment. To evaluate hardness of surface treatment, Atomic Force Microscope (AFM) analysis was carried out. Wear test was executed for characteristics of each surface treatment in high temperature. Consequently, TiAlCrSiN was superior to the TiAlCrN coating in case of high temperature environment such as cutting.*

Key Words: Depth Machining (심조가공), Cemented Carbide Endmill (초경엔드밀), Surface Treatment (표면처리), High-Temperature Oxidation (고온산화), Wear Characteristic (마모특성)

#### 1. 서론

최근 형상이 복잡한 제품을 생산하기 위한 금형을 제작하는데 있어 100 mm 이상의 깊은 구멍이나 홈 가공시 절삭방법을 요구하는 경향이 두드러진다. 심조가공용 엔드밀로 100 mm 이상의 홈이나 구멍을 가공하는 경우는 기존의 방전가공에 비교하여 가공비용, 가공시간에 있어 효율적이다. 이 경우 원활한 칩 배출과 더불어 미려한 가공면 확보가 요구되고 있다. 이러한 관점에서 심조가공용 특수 엔드밀 개발의 필요성이 대두되고 있다. 엔드밀을 장시간 가공하고 좋은 표면거칠기를 얻기

위해서는 엔드밀 원소재의 내마모성과 인성을 위한 결정립 미세화와 함께 표면의 고경도, 저마찰 표면처리의 적용은 필수적이다. 심조가공 특성상 엔드밀은 깊은 구멍이나 형상 가공에 사용되므로 제품의 길이가 길어질 수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서 설계된 심조가공용 초경엔드밀의 길이는 150mm 이다. 이처럼 엔드밀의 길이가 길어지면 피삭재의 측면 가공 시 전단하중에 의해 응력이 누적되고 이로 인해 엔드밀이 파단 될 수 있다. 이를 방지하기 위해 엔드밀의 강도를 높여주면 취성이 높아지는 문제를 야기할 수 있다. 이를 보완하기 위해 초경 소재에 Co 함유량을 증가시켜 취

성을 낮추려면 피삭재 가공시 엔드밀 진동에 의한 피삭재 가공면에 물결무늬와 같은 가공흔적이 생기는 chattering 현상이 일어 날 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 실험계획법 및 호감도함수 분석을 통해 심조가공용 초경엔드밀의 형상설계를 하였으며, 엔드밀 강도 및 가공성 향상에 특화된<sup>1-4,11</sup> TiAlCrN의 4원계 표면처리와 Si성분을 첨가함으로써 고온에서의 내산화성 향상 및 경도향상에 효과가 있는<sup>5-7,9-11</sup> TiAlCrSiN의 5원계 표면처리를 각각 초경소재 시편에 적용하였다. 4원계 및 5원계 표면처리는 아크 이온플레이팅(Arc Ion Plating, AIP) 장치를 이용하였으며, 복합 조성을 얻기 위해 기관부는 자전 및 공전 운동을 적용하고, 초기 진공도는  $3.0 \times 10^{-5}$  Torr, 온도는 480℃로 유지하였다. 먼저 Glow discharge cleaning 및 Metal etching을  $2.5 \times 10^{-2}$  Torr의 작업 진공도, 450~460℃ 온도, Ar(5N) 분위기에서 실시한 후, 최종적으로 N<sub>2</sub>(5N) 공정 가스를 이용하여 목표 코팅층을 생성시켰다.

표면처리 화학조성에 따른 강도 및 마모특성 영향에 대한 평가를 위해 심조가공시 엔드밀에 발생하는 최대온도를 시뮬레이션을 통해 예측하였으며, 이를 바탕으로 고온마모시험의 온도구간을 설정하였다. 고온마모시험 후 마찰계수를 비교평가하였으며 시편 표면에 발생한 마모트랙 압흔을 관찰하여 온도에 따른 마모특성 변화를 분석하였다. 표면처리 화학조성이 엔드밀 굽힘강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 항절력 시험이 진행되었으며, 표면처리 화학조성별 밀착력 평가와 코팅층 표면강도 평가를 위해 Scratch 테스트와 AFM (Atomic Force Microscopy) 시험이 각각 적용되었다.

2. 엔드밀 형상 설계 및 절삭온도 예측

2.1 실험계획법을 이용한 설계인자 최적화

형상을 위한 설계변수는 홈경사각, 스파이럴 경사각, 바닥2번각, 바닥여유각을 주요인자로 하여 4인자 3수준으로 Table 1과 같이 설정하였으며, 실험계획법의 반응표면분석을 통하여 27번 실시하였다. 실험계획법을 이용하여 도출된 최소 절삭력은 433.kgf, 피삭재 표면의 최소 표면거칠기(Ra)값은 1.2257 μm 이었다. 이 값을 활용하여 Fig. 1과 같이 반응표면분석 및 호감도함수 접근법을 이용하여 도출된 최적 설계인자 값은 홈경사각 -25°도, 스파이럴 경사각 -14°, 바닥2번각 17°, 바닥 여유각 4°

Table 1 The design parameter and constants

Factor(°)	Level		
	-1	0	1
Home Rake Angle	-24	-22	-20
Spiral Rake Angle	-8	-10	-12
Clearance Angle	3	5	7
2 <sup>nd</sup> Clearance Angle	11	13	15

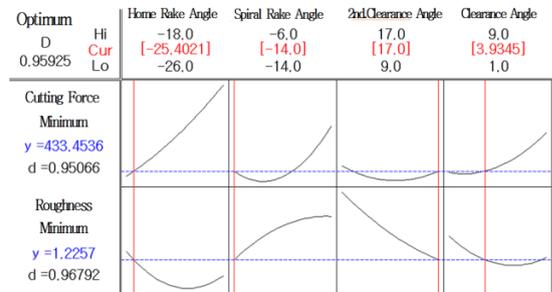


Fig. 1 The optimized results by Response Surface Design and Desirability Function Approach

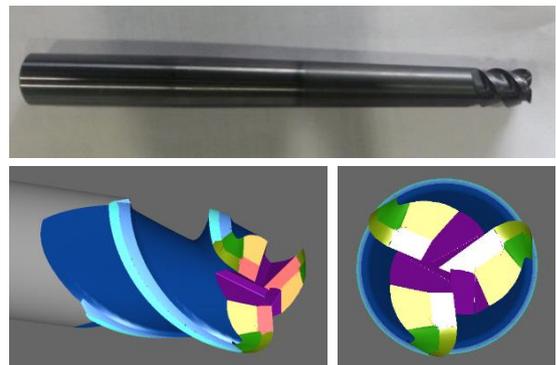


Fig. 2 The picture of endmill and 3D figure of edge

로 확인 되었으며, 이때의 호감도 함수 만족도는 절삭력 0.95, 표면거칠기 0.96, 복합만족도 0.95로 각각 확인되었다. Fig. 2는 최종 설계된 심조가공용 초경엔드밀 제품 형상 및 날부의 3차원 형상이다.

2.2 시뮬레이션을 통한 최대 절삭온도 예측

심조가공용 초경엔드밀의 절삭시험시 발생하는 최대온도예측을 위해 Fig. 3과 같이 절삭시뮬레이션을 실시하였으며, 스피드 1,500RPM, Feedrate 900 mm/min, 절입깊이 0.3 mm/2 mm(길이,반경)으로 설정하였으며, 시뮬레이션 결과 엔드밀 표면에서 최대 약 540℃의 온도가 발생됨을 확인하였다.

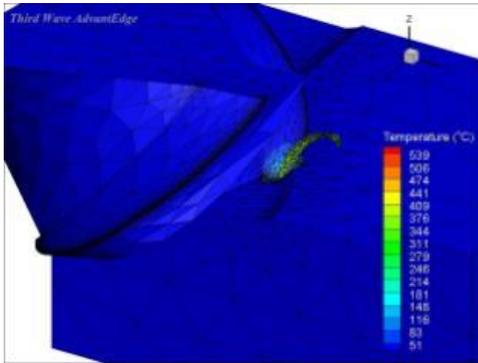


Fig. 3 Machining simulation for prediction maximum temperature on the endmill surface

### 3. 표면처리층 특성평가

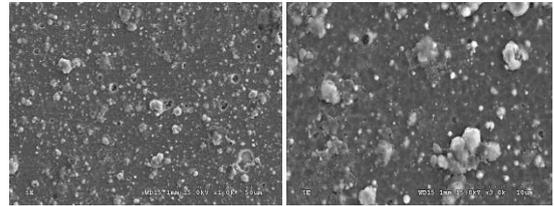
#### 3.1 표면처리층 및 수직단면 관찰

600℃ 이상 고온에서 내산화성 향상 및 고온 경도 특성 평가를 위해 Si이 포함된 TiAlCrSiN과 기존의 강도 향상 및 가공성 향상을 위해 다수의 선행연구가 이루어진 TiAlCrN 표면처리를 각각 초경시편에 적용하여 Fig. 4와 같이 코팅층 표면을 관찰하였다. TiAlCrN는 Arc Ion Plating 공정에서 나타나는 일반적 현상인 약 1 μm 전후의 droplet들이 관찰되었으며 TiAlCrSiN의 경우 상대적으로 균일한 표면형상을 보여주고 있다.

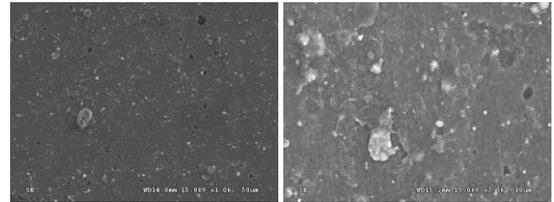
표면처리층 단면 관찰 결과 Fig. 5와 같이 TiAlCrN의 경우 코팅층 수직단면이 거칠게 분포하고 있었으며, 모재와 표면처리층의 접촉면도 거칠게 분포되어 있었다. 모재와 표면처리층에서 미세 돌기형상의 입자들이 발견되었으며, 성분분석 결과 모재 소재와 표면처리층 소재인 Co, Ti가 각각 검출되었다. 이는 TiAlCrN이 형성되면서 모재와 반응하여 형성된 화합물로 추측되나 이는 추가적인 분석을 통한 검토가 필요하다. TiAlCrSiN는 상대적으로 균일한 표면처리층 수직단면을 형성하고 있으며 표면처리층의 기공이나 미세 크랙도 발견되지 않았다. 모재와 표면처리층의 접촉면에서도 상대적으로 균일한 형상을 보였다. 표면처리층의 두께는 TiAlCrN, TiAlCrSiN 각각 4.3 μm, 3 μm 전후로 형성되었다.

#### 3.2 표면처리층 밀착력 평가

표면처리된 도막의 밀착력 강도 및 표면처리층 박리 패턴분석을 위해 Scratch Test가 실시되었으며,

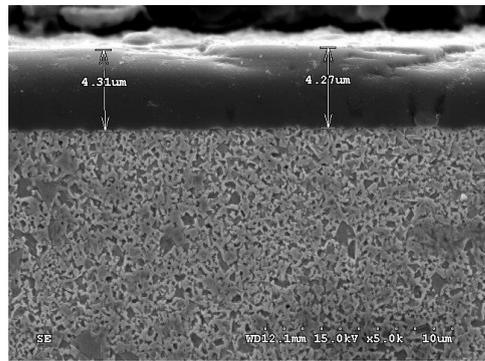


(a) TiAlCrN (×1,000, ×3,000)

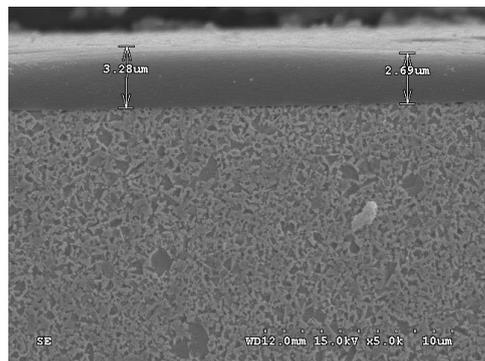


(b) TiAlCrSiN (×1,000, ×3,000)

Fig. 4 SEM image of coated surface



(a) TiAlCrN(×5,000)



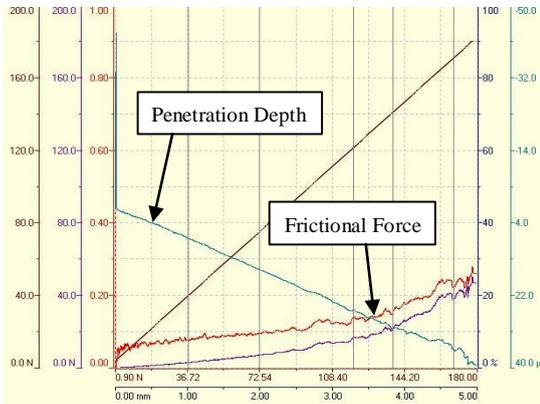
(b) TiAlCrSiN(×5,000)

Fig. 5 SEM image of Cross sectional coated surface

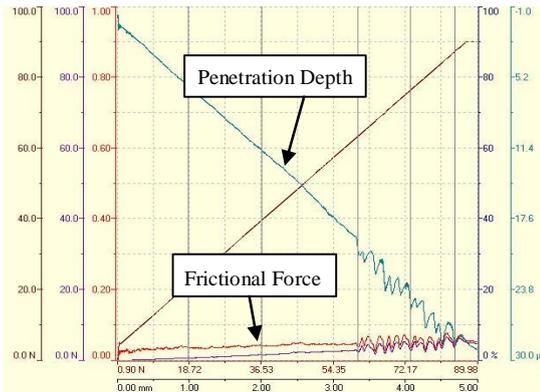
실험조건은 Table 2와 같다. Si성분이 포함된 5원계 표면처리층의 경우 상대적으로 낮은 표면강도로 인하여 종료하중을 90N으로 설정하여 표면처리층의 박리패턴 분석 및 최대 박리하중을 각각 분석

Table 2 The conditions of scratch test

Conditions	TiAlCrN	TiAlCrSiN
Begin Load(N)	0	
End Load(N)	180	90
Loading Rate(N/min)	71.28	
speed(mm/min)	2	
length(mm)	5	
Indenter material	Diamond	
Indenter Radius( $\mu\text{m}$ )	200	



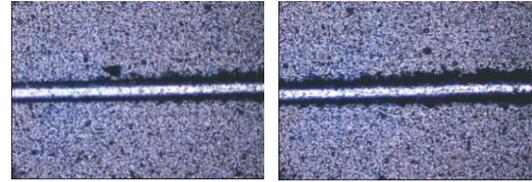
(a) TiAlCrN



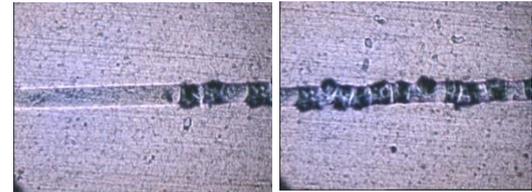
(b) TiAlCrSiN

Fig. 6 Test results of Scratch test

하였다. 시험결과 Fig. 6과 같이 TiAlCrN의 경우 마찰하중이 점진적으로 증가하는 거동을 보였으며, TiAlCrSiN은 낮은 마찰하중 증가율을 보이다가 일정 시점에서 마찰하중이 급격히 증가하며 불안정한 마찰하중 그래프 선도를 보였다. 표면처리층 박리시점에서의 부과하중은 각각 TiAlCrN - 116N, TiAlCrSiN- 33N 이었으며, 시험 시 발생한 최대 마찰하중은 TiAlCrN - 55N, TiAlCrSiN- 7N으로 확인되었다. 박리가 일어난 시점에서의 압입자의 침투깊



(a) TiAlCrN



(b) TiAlCrSiN

Fig. 7 The picture of indentation of adhesion test

이(penetration depth)는 TiAlCrN - 24  $\mu\text{m}$ , TiAlCrSiN- 18  $\mu\text{m}$ 로 나타났다.

Fig. 7은 각각의 표면처리층의 박리시점에서의 박리 형상을 광학현미경을 활용하여 50배 배율로 관찰한 사진이다. 표면처리층의 박리시점은 TiAlCrN의 경우 특정시점에서 표면처리층 파손이 일어나기 보다는 하중이 증가함에 따라 표면처리층이 압착되며 압흔의 폭이 점차 넓어지는 형태를 보였다. TiAlCrSiN은 마찰하중 값이 급격히 증가하며 불안정해지기 시작하는 시점에서 표면처리층의 박리가 시작되었으며,<sup>8</sup> 그 후 시험이 진행될수록 표면처리층이 미세조각으로 파단되어 떨어져 나가며 층이 파손되는 현상을 나타내었다.

Si 성분이 포함된 TiAlCrSiN 표면처리층이 밀착력 강도는 TiAlCrN 보다 83N 낮았으며, 6  $\mu\text{m}$  얇은 침투깊이에서 표면처리층 박리가 시작되었다.

### 3.3 표면처리층 표면경도 평가

AFM(Atomic Force Microscopy) 장비를 활용하여 표면처리층 표면 강도를 비교하였다. 측정하중은 41  $\mu\text{N}$ 이며 표면처리된 시편의 표면을 미세폴리싱하여 각 3회씩 측정하였다. Fig. 8은 각각의 표면처리층을 광학식 3차원 관찰을 통해 형상을 나타내고 있으며 Table 3은 각각의 표면처리층의 표면 경도 값을 보여주고 있다. 측정결과 TiAlCrN이 TiAlCrSiN 대비 평균 9GPa 높은 경도값을 보였다.

### 3.4 표면처리 시편의 굽힘강도 평가

표면처리 화학적 조성에 따른 초경엔드밀 소재의 굽힘강도 평가를 위해 항절력(Transverse Rupture

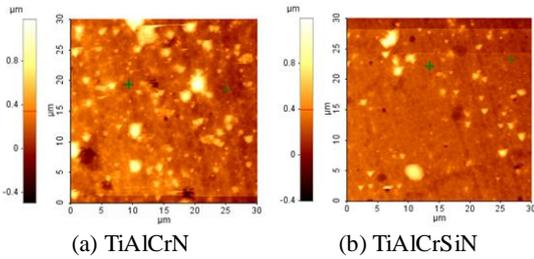


Fig. 8 The picture of surface treatment by 3D observation

Table 3 The results of surface hardness test

Hardness(GPa)	1st	2nd	3rd	ave.
TiAlCrN	57.0	55.5	52.5	55.0
TiAlCrSiN	49.2	41.9	48.4	46.5

Table 4 Maximum load of the TRS test

Max. Load (MPa)	1st	2nd	3rd	ave.
TiAlCrN	623	694	656	658
TiAlCrSiN	576	617	632	608
Non-coated	562	568	579	570

Table 5 The results of TRS test

TRS(Mpa)	1st	2nd	3rd	ave.
TiAlCrN	1,430	1,594	1,506	1,510
TiAlCrSiN	1,323	1,417	1,451	1,397
Non-coated	1,290	1,304	1,329	1,308

Strength) 시험을 진행하였다. TiAlCrN, TiAlCrSiN 표면처리 시편으로 3회 반복시험을 진행하였고 시편의 크기는 24x8x4mm이다. 항절력 시험은 초경소재의 굽힘강도 평가에 주로 사용되는 시험이며 3point bending 시험방식으로 이루어진다. 시편 지지점 사이의 거리(span length)는 20mm 이며, 지지점 가운데 부분을 선접촉하여 시편 파단시까지 1mm/min속도로 수직하중 축을 이동시켜 파단 시점에서의 하중을 측정하였다. 본 연구에서는 TiAlCrN, TiAlCrSiN 표면처리가 초경소재의 굽힘강도에 미치는 영향 평가를 위해 시편 하중 부과면 반대편에 표면처리면이 위치하게 하여 표면처리면에 인장하중이 작용하도록 설정하였다.

Table 4는 시편 파단시 최대하중, Table 5는 항절력 시험값을 나타내고 있다. 시험결과 TiAlCrN, TiAlCrSiN, 비코팅 순으로 항절력값이 높게 나타났으며, TiAlCrN 표면처리가 TiAlCrSiN 표면처리 대비 7.5%, 비코팅대비 13.6%의 항절력 향상 효과가 있음을 확인하였다.

Table 6 The Conditions of Pin On Disk wear test

Speed(RPM)	30	Turning Radius(mm)	12
Load(kgf)	6	Pin Diameter(mm)	5
Time(s)	60	Disk Diameter(mm)	30

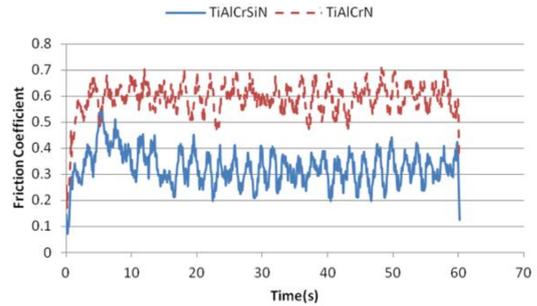


Fig. 9 Friction Coefficient of the Pin On Disk test

### 3.5 Pin On Disk 고온마모시험 및 압흔분석

표면처리층에 Si 성분을 첨가함으로 인해 고온에서의 경도유지 및 고온마찰계수 감소효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 이와 같은 마모특성 평가를 위해 상온 및 고온에서의 Pin On Disk 마모시험을 실시하였고, 시험 후 마찰계수 및 마모트랙 압흔을 분석하였다. 심조가공용 초경엔드밀 절삭 시뮬레이션 결과를 바탕으로 시험 온도구간을 상온, 300℃, 600℃로 설정하였으며, Pin 재질은 SKD11을 사용하였다. 일반적으로 표면처리층의 마모 특성평가를 위해 1kgf 이하 저하중에서 600초 이상 마모시험을 진행하지만<sup>11</sup> 본 연구에서는 경질박막 표면처리층의 마모 상황에서의 파손 형상 분석을 위해 6kgf의 고하중으로 60s 동안 시험을 진행하였다. 세부 시험조건은 Table 6과 같다.

Pin On Disk 마모시험 결과, 상온 및 300℃에서 도출된 마찰계수가 시험장비의 허용 오차범위 내의 위치하여 의미 있는 Data를 얻지 못하였다. 그러나 600℃에서는 Disk의 torque값이 상승하여 안정적인 마찰계수 data를 확보할 수 있었고, TiAlCrN, TiAlCrSiN 표면처리 시편에서 각각 0.594, 0.315의 마찰계수 값이 도출되었다. Fig. 9는 600℃에서의 마찰계수 그래프이며 TiAlCrSiN 표면처리가 상대적으로 낮은 마찰계수 거동을 유지하고 있다.

시편 표면온도 상승에 따른 표면처리층의 박리 및 마모패턴 분석을 위해 시험 후 발생한 마모 Track을 광학현미경으로 관찰하였다. TiAlCrN 표면처리의 경우, 상온에서는 Disk에 용착되는 SKD11의 PIN소재의 양이 미미하였으나 시험온도가 높아

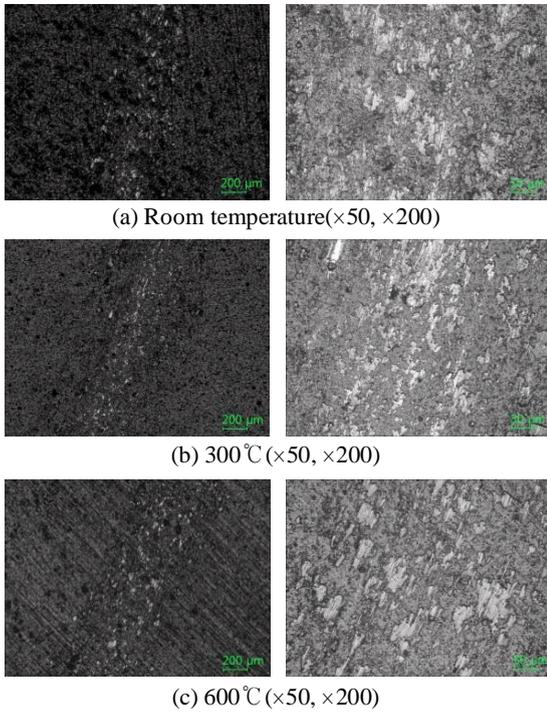


Fig. 10 The Picture of Wear track –TiAlCrN

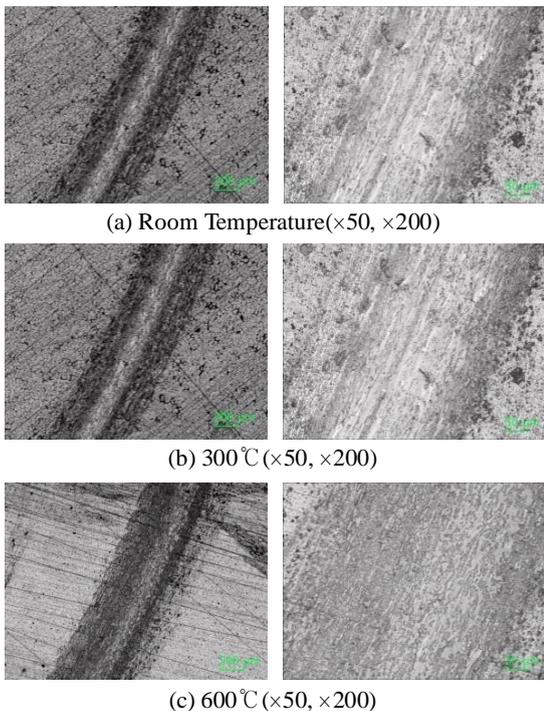


Fig. 11 The Picture of Wear track –TiAlCrSiN

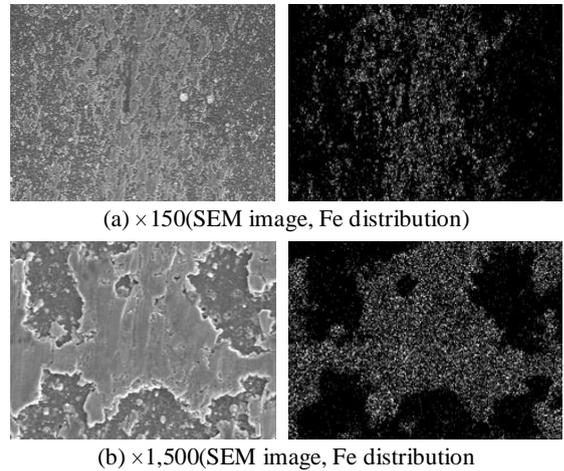


Fig. 12 SEM image of wear track and FE distribution of TiAlCrN at 600°C

질수록 용착량이 증가하였으며, 마모 Track의 표면이 점진적으로 거칠어짐을 확인하였다. TiAlCrSiN 표면처리는 모든 온도의 시험에서 마모Track 압흔이 유사한 패턴으로 생성되었으며 온도에 영향을 받지 않는 거동을 보인다.

TiAlCrN 표면처리의 경우 표면처리층의 박리가 일어나지 않고 회전방향으로 Pin재질(SKD11)이 용착되는 패턴으로 형성되었다. 반면, TiAlCrSiN 표면처리는 Pin에 의해 표면처리층이 회전방향으로 압착되며 마모Track면이 Pin회전방향으로 균일하게 분포되는 형상을 나타내었으며 모든 온도구간에서 유사한 패턴을 보여주고 있다.

Fig. 10, 11은 TiAlCrN, TiAlCrSiN 표면처리층의 온도구간별 마모시험 후 마모 Track을 관찰한 모습이다. Fig. 12는 TiAlCrN 표면처리층의 마모시험 후 Pin의 회전방향에 따라 용착된 재질의 성분분석을 실시하였으며, SEM 장비를 활용한 mapping 결과 Fe성분이 검출됨을 확인하였고, 이는 SKD11의 Pin 소재가 용착되었음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 실험계획법을 이용한 최적설계를 바탕으로 심조가공용 초경엔드밀을 설계하였다. 또한 엔드밀의 강도 및 고온성능 향상을 위해 TiAlCrN, TiAlCrSiN 표면처리를 각각 적용하여 표면처리 화학 조성 중 Si 성분의 유무에 따른 초경소재의 기계적 특성평가 및 고온에서의 마모 특성

을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험계획법을 이용한 최적설계시 주요인자로 홈경사각, 스파이럴 경사각, 바닥 2번각, 바닥 여유각 으로 설정하였으며 표면반응법 및 호감도 합수를 활용하여 최적형상 설계를 진행하였다.

2. Scratch test 결과, 표면처리층의 박리패턴 및 박리시점에서의 최대하중(박리하중)을 평가한 결과, TiAlCrN 표면처리층이 상대적으로 높고, 안정적인 마찰하중 거동을 보였다.

3. AFM 시험을 통해 표면처리층의 표면경도를 비교 평가 하였으며 TiAlCrN 표면처리층이 상대적으로 높은 경도값이 도출되었다.

4. TiAlCrN, TiAlCrSiN, 비코팅 시편순으로 항절력값이 높음을 확인하였으며 표면처리 층의 유무 및 화학적 조성에 따라 초경소재의 항절력에 영향을 미침을 확인하였다.

5. Pin On Disk 고온마모시험 결과, TiAlCrSiN 표면처리가 고온(600℃)에서 상대적으로 낮은 마찰계수 값을 보였다. 마모시험 후 마모Track 관찰결과 TiAlCrSiN 표면처리층이 상대적으로 온도의 영향을 덜 받는 것으로 확인되었고, TiAlCrN 표면처리 는 온도가 증가할수록 마모Track 압흔에 Pin 소재 융착이 증가함을 알 수 있었다.

6. Si이 포함된 표면처리층은 상온에서 경도, 항절력 등 기계적특성은 상대적으로 떨어지나, 고온에서의 마찰계수 및 마모특성은 비교적 우수한 것으로 확인되었다. 이에 따라 600℃ 이상의 표면온도가 발생하는 심조가공용 초경엔드밀에는 TiAlCrSiN 표면처리의 적용이 적합하다고 판단된다.

## REFERENCES

1. Fox-Rabinovich, G., Yamamoto, K., Kovalev, A., Veldhuis, S., Ning, L., and et al., "Wear Behavior of Adaptive Nano-multilayered TiAlCrN/NbN Coatings under Dry High Performance Machining Conditions," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 10, pp. 2015-2022, 2008.
2. Fox-Rabinovich, G., Kovalev, A., Aguirre, M., Beake, B., Yamamoto, K., and et al., "Design and Performance of ALTiN and TiAlCrN PVD Coatings for Machining of Hard to Cut Materials," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, No. 4, pp. 489-496, 2009.
3. Santana, A. E., Karimi, A., Derflinger, V. H., and Schutze, A., "Micro Structure and Mechanical Behavior of TiAlCrN Multilayer Thin Films," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 177-178, pp. 334-340, 2004.
4. Ning, L., Veldhuis, S. C., and Yamamoto, K., "Investigation of Wear Behavior and Chip Formation for Cutting Tools with Nano-multilayered TiAlCrN/NbN PVD Coating," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, No. 6, pp. 656-665, 2008.
5. Wang, S. Q., Chen, K. H., Chen, L., Zhu, C. J., Li P., and et al., "Effect of Al and Si Additions on Microstructure and Mechanical Properties of TiN Coatings," *J. Cent. South Univ. Technol.*, Vol. 18, pp. 310-313, 2011.
6. Jiang, N., Shen, Y., Zhang, H., Bao, S., and Hou, X., "Superhard Nanocomposite Ti-Al-Si-N Films Deposited by Reactive Unbalanced Magnetron Sputtering," *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 135, No. 1, pp. 1-9, 2006.
7. Martinho, R., Andrade, M., Silva, F., Alexandre, R., and Baptista, A., "Micro-abrasion Wear Behaviour of TiAlCrSiN Nanostructured Coatings," *Wear*, Vol. 267, No. 5, pp. 1160-1165, 2009.
8. Kovalev, A. I., Wainstein, D. L., Rashkovskiy, Y., "Impact of Al and Cr Alloying in TiN-based PVD Coatings on Cutting Performance during Machining of Hard to Cut Materials," *Vacuum*, Vol. 84, No. 1, pp. 184-187, 2009.
9. Feng, C., Li, M., Xin, L., Zhu, S., Shao, Z., and et al., "Oxidation Behavior of the Compound Ti-Al-Si-N/1Cr11Ni2W2MoV at 800℃ for 1000h in Air," *Surface & Coating Technology*, Vol. 232, pp. 88-95, 2013.
10. Wang, M., Toihara, T., Sakurai, M., Kurosaka, W., and Miyake, S., "Surface Morphology and Tribological Properties of DC Sputtered Nanoscale Multilayered TiAlN/CNx Coatings," *Tribology International*, Vol. 73, pp. 36-46, 2014.
11. Fox-Rabinovich, G., Yamamoto, K., Veldhuis, S., Kovalev, A., and Dosbaeva, G., "Tribological Adaptability of TiAlCrN PVD Coatings under High Performance Dry Machining Conditions," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, No. 5, pp. 1804-1813, 2005.