

HSS엔드밀의 PVD코팅 및 성능평가 The Evaluation of PVD Coated HSS Endmill

이상석¹
Sang-Seog Lee¹

<Abstract>

To enhance the cutting performance of high speed steel(HSS) endmill, single and multilayer coating is applied on the substrated of the HSS endmill. Coating material reduces cutting force and enhances resistance against abrasive wear. This paper presents the physical vapour deposition(PVD) coating technology and evaluate the PVD coated HSS endmill. The performance of coated HSS endmills are fifteen times better than uncoated HSS endmill on proposed cutting conditions. The TiAlN monolayer coated endmills(futura nano coating) are better than those of multilayer coated endmills(futura coating) on machined surface and tool wear.

Keywords : CVD, PVD, HSS End Mill, Coating Tool

1. 서 론

현재의 금속 가공공정은 고정밀화, 고능률화로 진행되고 있으며 이 가공공정의 생산성 향상을 위해서 현장에서는 인성이 좋은 고속도강(HSS)엔드밀을 이용한 금속가공이 주류를 이루고 있다. 이 엔드밀은 가늘고 긴 세장형 회전공구로서 머시닝센터의 발달과 함께 외곽형상의 자유로운 가공과 부품내의 작은 공간의 가공을 위하여 매우 다양하게 사용됨으로써 자동차 및 금형산업의 가공의 대부분을 차지하는 중요한 가공공정 중의 하나이다.

공구 재종의 발달에 따라 엔드밀도 HSS공구로부터 출발하여 현재에는 초경합금이나 서멧트와 같은 경질 재종의 공구가 보편화 되어가고 있으나 이들 경질 재료가 갖는 취성으로 인하여 측면하중에 의한 변형으로 인한 파손이

심하여 아직도 인성이 좋은 HSS 엔드밀이 많은 시장을 점유하고 있는 실정이다. 이러한 인성이 좋은 HSS엔드밀이지만 내마모성은 다른 재종의 절삭공구에 비하여 열악하여 엔드밀에 코팅을 하여 일반적으로 사용하고 있다.

절삭공구의 코팅방법은 일반적으로 화학증착법(CVD)과 물리증착법(PVD)으로 나누어진다. CVD법은 코팅과 모재 사이에 밀착력은 크게 하지만 작업온도가 높은 단점과 환경오염등으로 인하여 환경친화적이고 공정온도가 비교적 저온이어서 경제성이 우수한 PVD 코팅으로 대체되어 가고있다.

PVD 코팅으로 얻어진 TiN 코팅은 절삭공구의 내마모성을 향상시켜준다. TiCN 코팅의 경우에는 내마모성과 아울러 우수한 경도를 가짐으로써 공구의 수명을 향상시키고, 이외에 TiAlN 코팅의 경우에는 가공시 발생하는 피삭재와 절삭공구간의 마찰계수를 낮추어 절삭유

¹정회원, 교신저자, 대구미래대학교 자동차과 교수, 理博
E-Mail : ds5rzu@hanmail.net

¹Corresponding author, Dept. of Automobile Engineer, Daegu Future College, Prof., Ph. D.

를 사용하지 않고도 작업이 가능하도록 공구의 성능을 향상시켜 준다. 뿐만 아니라 가공시 발생하는 열을 가공칩과 함께 제거하여 열 전도성이 낮고 열적으로 안정하며 고온내식성이 우수한 특성을 가진다.

최근에는 이러한 TiAlN 코팅을 단층코팅이 아닌 다층코팅으로 처리하여 작업 중 발생한 코팅층 표면의 크랙 성장에 대한 저항을 크게 향상시켜 공구의 수명과 성능을 향상시키고 있는 추세이다.

따라서 본 연구에서는 HSS엔드밀의 PVD 코팅법에 의한 TiAlN 단층코팅(futura nano) 및 다층코팅(futura) 코팅을 접목하여 이 코팅공구의 절삭속도 및 가공조건의 변화에 따른 절삭 성능을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 PVD코팅 기술

TiAlN과 같은 합금 코팅은 Arc-type sputtering 장비를 이용하여 코팅을 실시하는 것이 바람직하다. Fig.1은 Arc-type sputtering 방식의 BAI1200 PVD 코팅장비로 비교적 저진공에서 TiN과 TiCN 코팅은 물론 TiAlN과 같은 합금 코팅도 가능하다. 코팅 공정은 Heating - Etching - Coating - Cooling의 4단계로 구분되며, TiAlN 합금코팅을 위한 전체 코팅공정의 소요시간은 약 9~10시간 정도이다.

PVD 코팅 메커니즘을 살펴보면, 우선 타겟 물질에서 목적하는 금속이 증기화되어 이동하며 플라즈마와 같은 코팅 보조기구에 의해 증기가 이온상태로 전이된 후에 피도금체에 걸리는 바이어스 전압에 의해 표면에 증착되게 된다. 이러한 이온 플레이팅의 형태로 증착이 진행되면서 모재와 코팅층간의 밀착력은 증가되며 코팅층의 기공도는 상당히 감소될 수 있다. 일반적으로, PVD 코팅의 두께는 코팅의 시간에 의해 결정되며, 코팅시 바이어스 전압이나 코팅공정의 온도에 의해 코팅층의 성장이 다르게 진행되므로, 코팅층의 기계적 물리적 성질은 이러한 변수에 의해 조절할 수 있다.

PVD코팅공정에서 진공증착된 박막은 기본적으로 Fig.2에서 보는 바와 같이 3가지 상(phase)으로 존재한다. 즉 1) 물리적 증발원리에 의한 코팅물질을 가스상태로 변환 2) 증발원

과 기관사이의 가스 분위기(플라즈마)상태를 통한 증기의 전이 3) 기관 표면에 박막형태로 응축된다.

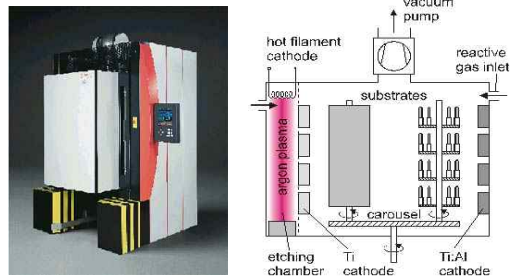


Fig. 1. Balzers BAT1200 coating system and PVD coating mechanism.

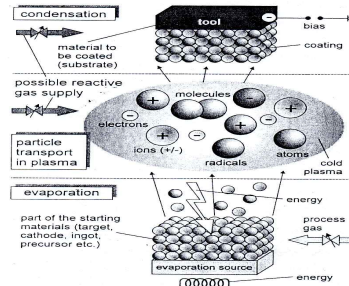


Fig. 2. The three phases of coating formation.

2.2 TiAlN의 구조

TiAlN 코팅은 아래와 같은 FCC 구조를 가진다. TiAlN의 면심입방 구조에서 육면체의 꼭지점에는 티타늄 원자가 위치하고 면의 중앙에 알루미늄 원자가 위치한다. 그리고 반응한 질소는 티타늄 원자와 알루미늄 원자의 빈틈에 침입하여 위치하고 있는 형태이다.



이때 하나의 결정구조에 티타늄원자가 1개 알루미늄 원자가 3개 질소원자가 2개 포함되어 있음을 알 수 있다. 이러한 비율이 정확하게 조

합되었을 때 완전한 TiAlN 코팅의 색상을 가질 수 있다.

3. 절삭실험

엔드밀의 절삭성능 실험에 사용된 공작기계는 (주)대우중공업 머시닝센터(ACE-V400)이며 피삭재는 합금강인 SCM4를 사용하였다. 엔드밀은 절삭날이 4날인 $\phi 10\text{mm}$ 의 HSS 엔드밀에 TiAlN 단층 및 다층 코팅하여 그 성능을 평가하였다.

피삭재를 바이스에 고정된 후 일정한 간격으로 절삭하였으며 공구동력계(Kistler 9257BA)를 이용하여 엔드밀의 마멸에 따른 절삭력의 변화를 A/D변환기(DT3001)를 이용하여 획득하여 분석하였다.

절삭실험중 공구셋팅에 따라서 발생하는 오차를 최대한 줄이고자 새 절삭날을 셋팅 후 연속적으로 반경방향 절삭깊이를 변화시켜가면서 절삭력을 측정하였다. 엔드밀을 공구에 장착할 때 돌출길이에 따라 공구의 수명과 표면조도에 상당한 영향을 미치게 되므로 본 실험에서는 돌출길이를 30mm로 고정하여 엔드밀 돌출길이의 변화에 따른 오차를 최소화한 줄여 실험을 실시하였다. 공구의 마모는 공구현미경(Mitutoyo TM)을 사용하여 측정하였으며 여유면 마모는 절삭날 선단부에서 5mm되는 부분에서 일정하게 VBmax를 측정하였으며 부절인부의 선단마모량 VC를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 절삭속도 변화에 따른 성능평가

HSS 엔드밀의 절삭속도에 따른 성능평가에 있어서 시험 엔드밀의 제작사의 추천절삭조건에 의거하여 날 당 이송량과 절입깊이를 일정하게 하고 절삭속도만 변화시켜 각 절삭속도에서 코팅공구의 마모와 표면조도를 조사하였다.

절삭가공에 있어서 절삭공구의 마멸현상은 여러 가지 변수에 따라 그 양상이 다양하게 나타나며 특히 선삭가공과 비교하여 밀링가공은 단속적인 절삭가공이 이루어지므로 인하여 특성의 분석이 난해하다. 그러나 절삭공구의 마멸은 절삭속도의 변화에 가장 지배적인 영향을

받게 된다.

코팅을 하지 않은 HSS 엔드밀은 인성이 크므로 인하여 주어진 가공조건하에서 가공길이의 변화에 따라서 절삭공구의 주절인부의 여유면에서 점진적인 마멸이 지배적으로 나타내고 있지만 코팅공구에 있어서는 점진적인 여유면 마멸보다는 균열에 의한 공구손상이 지배적으로 나타난다.

Fig.3에서 보는 바와 같이 절삭속도가 37m/min 정도까지는 여유면 마멸의 한계치를 VBmax=0.2mm로 볼 때 가공길이 4.0m까지 가공을 할 수 있었으나 더 이상 절삭속도가 높아짐에 따라서 코팅하지 않은 HSS 엔드밀은 공구마멸이 심하므로 그 성능이 떨어진다.

그러나 이러한 HSS공구에 PVD코팅을 함으로 가공속도를 향상시킬 수 있고 또한 공구의 성능도 현저히 증가하게 된다.

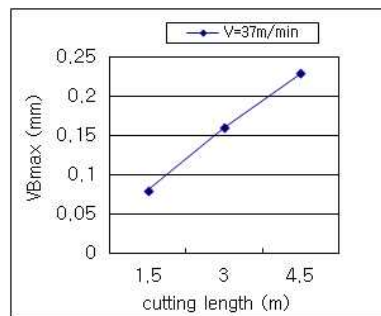
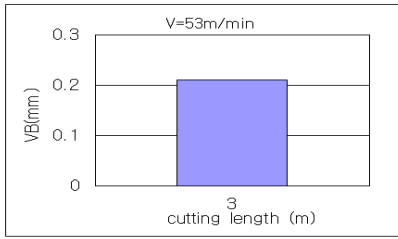


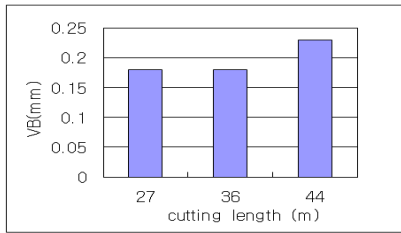
Fig. 3 V=37m/min에서 여유면 마모량(uncoating).

Fig.4에서 절삭속도(V)가 53m/min 인 경우 코팅을 하지 않은 HSS엔드밀은 가공길이 3m 정도만을 가공하여도 주절인부의 여유면 마멸이 0.2mm를 넘어서고 있다. 그러나 PVD코팅을 한 엔드밀에서는 45m 이상을 가공할 수 있으므로 PVD코팅으로 코팅을 하지 않은 공구보다 약15배의 성능차이를 나타내고 있다.

이는 경제적인 측면에 있어서도 코팅을 하지 않은 일반 HSS엔드밀($\phi 10$)이 약 5,000원 정도이며 코팅을 할 경우 약11,000원 정도 가격을 볼 때 공구단가는 코팅을 함으로 2배정도 증가하게 되나 실제 공구사용은 약15배정도 증가하므로 코팅으로 인한 경제적인 효과는 크다고 할 수 있다.



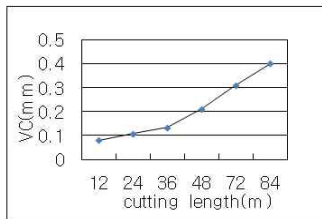
(a) uncoating tool



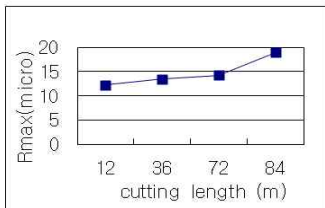
(b) coating tool

Fig.4. V=53m/min에서 여유면 마모량.

PVD코팅 엔드밀을 고속가공 상태인 절삭속도 100m/min로 변화시켜 시험을 해본 결과 Fig.5, Fig.6에서 알 수 있는 바와 같이 단층코팅인 futura nano 코팅에서는 가공길이 84m 정도에서 엔드밀의 선단마멸(VC)이 0.4mm 정도 발생했으나 다층코팅인 futura 코팅 엔드밀에서는 가공길이 15m 정도에서 선단 마멸량이 0.4mm를 넘어서고 있다.

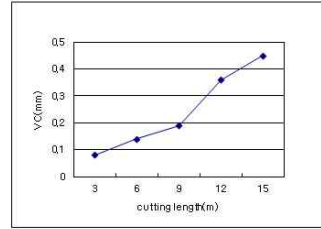


(a) 여유면마모량

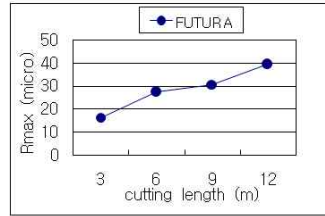


(b) 표면조도

Fig.5. V=100m/min에서 여유면 마모량 및 표면조도(futura nano coating).



(a) 여유면마모량



(b) 표면조도

Fig. 6. V=100m/min에서 여유면 마모량 및 표면조도 (futura coating).

표면조도 또한 동일한 절삭길이에서 예를 들면 12m를 가공했을 경우 futura nano 코팅 엔드밀의 경우에는 Rmax값이 12.2 μ m를 나타내고 있으나 futura 코팅 엔드밀의 경우에는 39.2 μ m를 나타내고 있다.

결론적으로 절삭속도 변화에 따른 엔드밀의 성능평가에 있어서 코팅을 하지 않은 공구보다 PVD코팅을 함으로 상당한 생산성 향상을 기할 수 있고 PVD코팅에 있어서도 고속가공인 절삭속도 100m/min에서 futura nano 코팅이 futura 코팅보다 공구마모나 표면조도에 있어서도 우수함을 나타내고 있다.

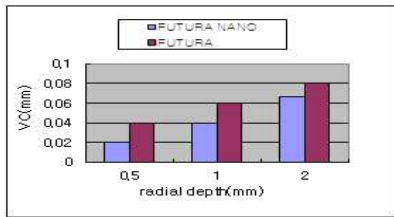
4.2 반경방향 절삭깊이(Rd)의 변화에 따른 성능평가

Fig.7은 절삭속도 100m/min, 주축속도 3183 rpm, 이송속도 636mm/min에서 축방향의 절삭깊이(Ad)를 10mm로 하고 반경방향 절삭깊이 Rd를 0.5mm, 1mm, 2mm로 변화시켜 절삭길이를 3m 가공하고 난 후 코팅 엔드밀의 선단마모(VC)의 변화와 표면조도의 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 가공조건하에서 반경방향 절삭깊이가 증가함에 따라서 코팅공구의 선단마모(VC)도 증가되어 가며 futura nano 코팅 엔드밀이 futura 코팅 엔드밀

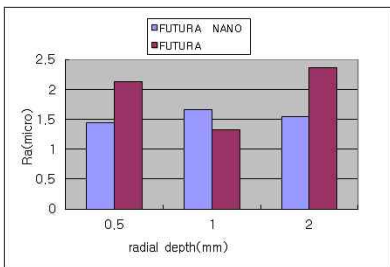
보다 마멸이 적게 나타나고 있다.

표면조도에 있어서는 반경방향의 절삭깊이를 점점 증가한다고 하여 표면조도가 증가한다던가 감소한다는 일반적인 경향은 나타나지 않으며 비교적 절입깊이가 크면 표면조도 값이 크므로 가공물의 거칠기가 좋지 못하게 된다.

코팅의 변화에 따른 가공물의 표면조도에 있어서는 비교적 futura nano 코팅공구의 표면조도가 우수함을 알 수 있다. 이는 반경방향 절삭깊이의 변화에 따라 선단마모의 길이 변화에서도 알 수 있는 바와 같이 futura 코팅 공구보다 futura nano 코팅공구가 마멸이 적게 됨에 기인하여 표면조도 또한 향상된다.



(a) 여유면마모량



(b) 표면조도

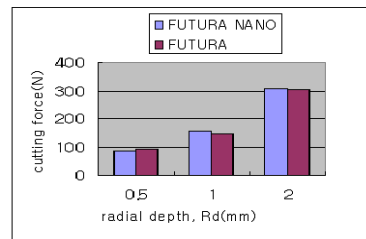
Fig.7. 반경방향 절삭깊이변화에 따른 여유면마모량 및 표면조도의 변화 (가공길이=3m, V=100m/min).

엔드밀을 이용한 고속가공에서 반경방향의 절삭 깊이의 변화에 따라서 futura 코팅보다 futura nano 코팅이 선단마모가 적게 발생되며 표면조도 측면에서도 우수한 특성을 나타내고 있다.

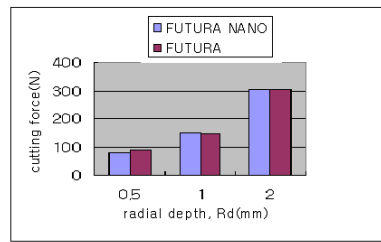
4.3 코팅에 따른 절삭력의 변화

Fig.8은 절삭속도 100m/min, 이송속도 626mm/min 건식절삭(dry cutting) 상태에서 반경방향 절삭력 Rd를 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm

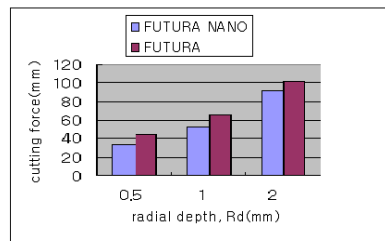
로 변화 시켜보았을 때 X, Y, Z방향 절삭력의 평균값을 나타내었다. 실제적으로 반경방향 절삭깊이가 증가할수록 절삭력은 증가되며 본 실험의 조건하에서 X, Y방향의 절삭력은 대체로 비슷하게 작용되고 있으나 Z방향은 이 두 절삭방향의 절삭력에 비하여 적게 작용되고 있다. 한편 X, Y 방향의 절삭력에서는 futura nano와 futura 코팅 엔드밀의 절삭부하의 차이는 일정하지 않으나 Z방향에서 futura nano 코팅을 한 엔드밀이 futura 코팅한 경우보다 절삭깊이 변화에 따라서 절삭부하가 적게 걸리게 됨을 알 수 있다.



(a) X-direction



(b) Y-direction



(c) Z-direction

Fig. 8. 반경방향 절삭깊이 따른 절삭부하의 영향.

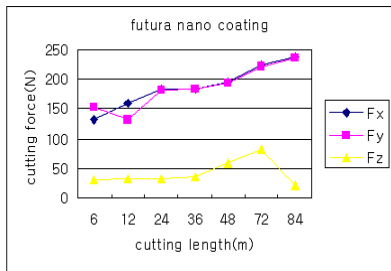
Table 1.은 Z방향으로 futura nano 코팅과 futura 코팅에서 반경방향 절입깊이의 변화에 따른 절삭부하의 성분변화를 양적으로 나타내었다. 여기서 Rd 값이 작을수록 futura nano

코팅의 절삭부하 성능이 우수함을 알 수 있고 이 Z방향은 엔드밀의 축방향으로 작용되는 절삭력의 변동성분으로 가공물의 표면조도에 큰 영향을 미친다.

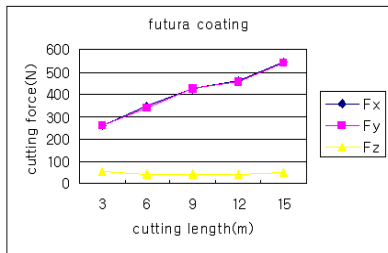
Table 1. 코팅에 따른 Z방향 절삭부하의 성능.

coating \ Rd	0.5mm	1mm	2mm
futura nano	34N	53N	92N
futura	44N	66N	102N
performance(%)	22%	19%	9%

따라서 절삭속도 100m/min의 고속가공에서 HSS 엔드밀을 단층코팅(futura nano)하여 반경방향 절삭 깊이를 적게 할수록 절삭부하의 성능면에서 우수함을 제시한다. Fig.9는 futura nano 코팅과 futura coating 공구의 절삭속도 100m/min에서 X, Y, Z방향의 절삭력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 X Y 방향의 절삭력은 가공길이가 증가할수록 크게 증가하지만 Z방향은 가공길이 변화에는 다소 변화가 미미하다.



(a) futura nano coating



(b) futura coating

Fig. 9. 가공길이에 따른 3축 방향의 절삭력.

5. 결론

본 연구에서는 인성이 우수하며 가격이 저렴한 HSS 엔드밀의 PVD코팅 기법을 제시하고 이 PVD 코팅에 의한 코팅 엔드밀의 각 절삭조건의 변화에 따른 성능을 시험하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 제시하고자 한다.

1) HSS공구에 PVD코팅을 함으로 가공속도를 향상시킬 수 있고 또한 공구의 성능도 현저히 증가하게 된다. 본 실험조건에서 PVD코팅을 한 엔드밀에서는 PVD코팅을 하지 않은 공구보다 단가는 2배정도 차이가 있지만 성능면에서는 약15배의 성능차이를 나타내고 있어 코팅으로 인한 경제적인 효과는 크다.

2) 가공물의 표면조도에 있어서는 futura nano 코팅이 futura 코팅보다 양호한 결과를 제시하고 있다.

3) 가공조건의 변화에 따른 코팅공구의 성능평가에 있어서는 동일한 가공조건하에서 반경방향 절삭깊이가 증가함에 따라서 코팅공구의 선단마모(VC)도 증가되어 가며 또한 futura nano 코팅 엔드밀이 futura 코팅 엔드밀보다 마멸이 적게 나타나고 있다.

4) 코팅공구에 작용되는 절삭부하는 실제로 반경방향 절삭깊이가 증가할수록 절삭력은 증가되며 futura nano코팅 엔드밀이 futura 코팅한 경우보다 절삭깊이 변화에 따라서 절삭부하가 적게 걸린다.

참 고 문 헌

- 1) W. Konig, R.Fritsch, D. Kammermeier, "New Approaches to Characterizing the Performance of Coated cutting Tools", Annal. of the CIRP, Vol.41, (1992).
- 2) H. K. Tonshoff, A. Mohlfeld, "Surface Treatment of cutting Tool Substrates", Pergman, p.469-476, (1998).
- 3) Vancoille, E., Celis, J.P., Roos, J.R., "Tribology and Structural Characterization of a Physical Vapour Deposited TiC/TiN multilayer", Tribology Int. 26, pp115-119, (1990)

- 4) 고태조, “고속 가공용 불.평 엔드밀 공구개발”, 산업기반기술개발사업보고서, (2001).
- 5) 주종남 외4, “코팅공구의 마모 및 절삭특성”, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp3-8, (1996).
- 6) 정하승, “표면처리가 피복 엔드밀의 마멸에 미치는 영향”, 영남대학교 석사학위 논문, (2001).
-
- (접수:2012.10.04, 수정:2012.11.08, 게재 확정:2012.11.22)