

HSS 공구와 PVD 코팅기술의 영향

김 종 성*

Impact of PVD Coating Technology on HSS Tool

Jong-Seong Gim*

ABSTRACT

The impact of PVD coatings can be summed up in practical terms: this technology historically complements the best designed tool substrates to enhance cutting performance. PVD coatings are now incorporated in 25% of all HSS tools. The functionality is to extend the machining speed range, improve wear resistance at the cutting edge, and reduce friction at chip/tool contact areas to allow easier chip evacuation. These translate to a larger safe zone, as discussed in the failure mode diagram, for better productivity and higher reliability in machining operations of the customer. PVD coatings therefore represent an enabling technology that extends the application range of cutting tools in response to modern industrial needs. PVD coatings prolong the product life cycle of HSS tools and help this "mature" material to hold its territory against the advent of the newer hardmetal and ceramic tool materials. There is a lot of competitive life left particularly in PVD coated HSS endmills, drills, threading/tapping tools. PM HSS technology further increases the possibilities.

Key Words PVD(물리증기증착), PM HSS (분말고속도강), Endmill (엔드밀), Drill (드릴)

1. 서론

최근의 절삭 공구 제조 경향을 보면, 즉 HSS 공구, 건식가공, 공구관리, 공급자 프로그램과 같은 주제들이 있다. 이러한 것들은 모두 고객의 요구에 부합하는 것이다. 최근의 PVD 공구 코팅은 목적이 다른 대부분의 공구 기술 제공자나 공급자와는 다르다는 것이다. 즉 공구 시장에 전달해 줄 수 있는 최근의 기술 개발로 고객의 생산성을 개선시키하고자 한다.

그러나 현대의 기술발달이 현존하는 상품 감소를 유발할 수 있는 점도 물론 있다. 다음에 잘 알려진 제품 수명 주기 선도가 재료에 따라 그

려져 있는데, 고속도강이 초경 및 세라믹 공구에 비해 시장성면에 있어서 상당히 성숙되어 있는 것을 알 수 있다. Figure 1에서 처럼 현재 HSS 공구의 성장률은 둔화되고 있다. 여기서 의문을 한 가지 한다면, 적어도 HSS 공구의 감소를 지연시킬 수 있는 획기적인 방안이 있는가? 라는 것이다.

본 논문에서는 공구 산업에 대한 코팅 기술의 영향에 대한 전망과, 특히 HSS 공구 제조업체, 사용자들에게 있어서 PVD 코팅기술은 공구 수명을 늘여주고, 생산성 향상을 높일 수 있다는 환경을 제시하고, 또한 우리가 해야 할 절삭공구 관련 코팅 기술을 제시하고자 한다.

* 발지스한국코팅(유) 대표이사

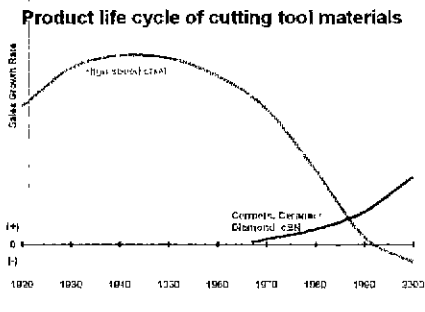


Figure 1. Product life cycle of cutting tool materials

2. 공구 발전의 원동력

새로운 절삭공구의 발달은 3 가지 요인에 의한 다. 생산성 증대, 난삭재 출현과 환경, 건강, 안전 문제의 관심 고조 등과 같은 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 절삭공구 및 장비의 혁신이 필요하다.

가공 생산성은 사용자의 전망으로부터 예측되어야 한다. 고객이 더 긴 공구 수명이 필요해서라기 보다 전체 가공 공정 시스템과 기계의 효율을 높이고, 가공 부품의 생산 처리량도 향상 시키는데 있다. 그러나 기계장치, 가격 및 2 차 요인은 중요성면에서 감소하고 있다. 가장 중요한 요인은 기계 공구와 절삭공구이지만 실제로 거의 대등한 요소로 작용하여, 개선된 절삭 공구 성능만이 동시대의 공구 및 장비 발전으로 인식될 수도 있다. 이 내용에 관하여 뒷장에서 자세히 언급 하도록 한다

더욱 강하고 더욱 가벼운 새로운 피삭재를 가공하기 위해서는 에너지 효율면에서 새로운 산업 기준을 만족할 시킬 필요가 있는데, 예를 들면 자동차의 연료소비 절감, 우수한 절삭 성능을 가진 앞선 공구소재 등이다.

환경, 건강 및 안전 문제는 정부 규제에 의해 강화되고 있고 유럽에서는 이것이 이미 보편화

된 추세이다. 예를들면, 윤활, 냉각제의 처리는 비용 및 건강 문제를 일으킬 수 있다. 바꾸어 말하면 이러한 것은 건식가공을 주도하거나 부분적인 연삭 공정을 대체하여 hard turning 을 부추긴다 관련되는 공구재질은 고내열성이 필요하며 건식가공이 가능하도록 마찰계수가 낮아야 하며 황삭이 가능하도록 소재 경도값을 계속 증가시킬 필요가 있다.

모든 이러한 기술 추세 속에서 경질 코팅은 절삭공구에 대하여 해결책을 제시하는 중요한 역할을 담당할 것이다. 특히 PVD 코팅은 HSS 공구 재질의 성능을 강화하는 것이 가장 중요하다

3. 최근의 공구 재종 사용 추이

공구재종의 생산측면에서 수명 주기는 초경이나 세라믹에서 HSS 재질로의 대체율은 매우 낮다. 그러한 경향이 뚜렷하다 할지라도 가장 오래된 HSS 재종의 상대적 사업 규모는 1940 년대 이후 절삭공구로의 대체는 느리게 되었다. 그리고 지난 20 년동안 세라믹, 다이아몬드, CBN 과 같은 새로운 재질이 현재 절삭 공구 시장의 새로운 개혁 활로 업체를 찾고 있다

반면 많은 사람들이 당연히 했던 HSS 공구 사용이 계속적으로 감소하였지만, 여전히 초경공구 시장과 비교할 만한 시장 규모를 여전히 지니고 있다. 오늘날 사용되고 있는 절삭공구의 현 조사과정은 표에서 처럼 세계적인 절삭 공구 소비 통계 현황과 예측 상황을 보여준다(1985~2005).

절삭공구의 소비현황은 대략 밀링, 터닝, 보링, 드릴링으로 나눌 수 있으며, 밀링이 제일 크고, 터닝, 보링, 드릴링 및 홀 가공 분야는 대체로 비슷하다 본 논문은 초경 인서트와 터닝/보링 시장을 지배하고 있다 특히 HSS 공구의 밀링 및 드릴링 점유율은 초경 공구에 비해 감소하고 있다

Global consumption of tool materials per application

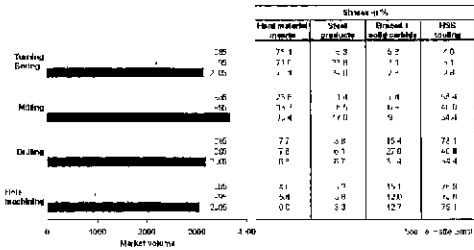


Figure 2. Global consumption of cutting materials per application (Source: Valerius, 1998).

그러나 홀 가공(타핑, 스레딩, 브로칭) 용 HSS 공구에 있어서는 공구시장을 계속 주도할 것으로 보인다. 이렇게 가공 방법면에 있어서 코팅된 HSS 공구의 장점은 최상의 내구성을 주기 위한 내충격성이 크며, 절삭공구의 우수한 경제성은 최신 코팅으로 평가될 수 있다. 예를 들면 기어절삭에서 PVD 코팅된 HSS 커터는 초경에 의해 HSS로 대체되는 추세이다.

4. 가공면에 있어서 기본 공구 재질 선정

코팅된 절삭공구 인선은 다음과 같은 효과를 발휘한다

- 공구가 받는 절삭 저항력이 감소된다.
- 칩형태가 변한다
- 절삭공구와 칩 사이의 열전달이 변한다.

Figure 3는 다양한 절삭조건 하에서 공구재종이 변함에 따라 그 한계성이 왜 있는지를 보여준다. 그리고 코팅의 일부 한계성을 어떻게 극복하는지도 보여준다. 공구 파손 형상 개략도는 두 가지 "shop floor" 변수에 따라 만들어 질 수 있다. 즉 절삭속도와 일반화된 이송률이 절삭공구 인선에 미치는 작용응력과 온도를 나타낸다.

강도나 파괴인성에 대한 공구 재종과 이송률의 열화학적 안정성과 관련된 절삭속도는 공구/피삭재의 고려로부터 알 수 있다. 절삭속도를 높이면 공구로부터 더 많은 열이 발생되며, 고온으로 인해 공구 재질의 용착, 마모, 크레이터에 의한 파손을 유발한다. 이송을 높이면 일부분에서 소성변형, 칩핑 또는 공구인선의 파손을 유발하여 높은 응력이 발생된다. 그러한 각각의 한계는 피삭재의 재질에 따라 변할 수 있다. 또한 공구 인선 형상의 변화는 공구 접촉 면적에 따라 응력 분포를 변화시켜 이러한 한계를 변화시킬 것이다.

Failure mode for different tool materials

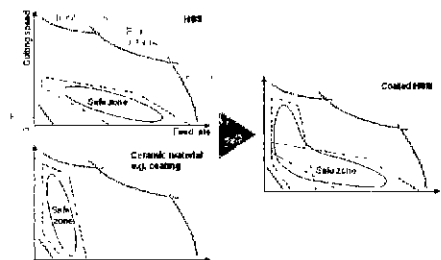


Figure 3. Failure mode diagrams for different tool materials

이 선도에 표시된 것은 예측 가능하며 신뢰성 있는 공구수명과 관련하여 점진적인 마모의 안전영역을 나타낸다. HSS 공구는 공구재종 중에서 인성이 가장 높기 때문에 코팅된 HSS 공구는 더욱 우수한 내마모, 내용착 및 고온 안정성을 지닌다. 이러한 PVD 코팅은 안전영역을 다음에 항목에 의해 그 적용 범위를 넓혀준다.

- 고속성 증대
- 구성인선 발생 방지
- 이송 증대

고속가공은 강성이 있고, 고성능 공작기계를 사용하여 초경 및 세라믹 공구로 실현될 수 있지만, 가공조건이 안정적이지 못하면 칩핑이 유발되어 그 신뢰성이 떨어진다 또한 이송률이 높을수록 충격파손이 증가한다. HSS 공구는 구멍가공과 저속 절삭 조건하에서 상당히 신뢰성 있는 것으로 추천될 수 있다.

5. 공작기계 성능에 따른 공구 코팅의 진화

Figure 4 에서 처럼 PVD 코팅 발달은 초기에 초경 공구에 CVD 코팅 적용 성공 후 약 10년을 이어갔다. 그러나 PVD 코팅의 발달은 고온 CVD 코팅이 오늘날 상업적으로 초경 공구를 여전히 장악하고 있음에도 불구하고 지난 10년 동안 CVD 코팅 보다 더 활발히 연구하고 있다

Coatings integration on carbide tools

1970	- CVD TiC
1975	- CVD TiC / TiCN / TiN
1980	- CVD TiC / Al ₂ O ₃ / TiN CVD TiC / TiCN / Al ₂ O ₃ / TiN
1985	- MTCVD TiCN
1990	- PVD TiN (BALINIT™)
1990	- PVD TiCN (BALINIT™ B)
	- PVD TiAlN
1996	- Diamond
today	- PVD TiN / TiAlN / TiN / TiAlN (HARTECT™)
	- PVD TiN / TiCN / MoS ₂
	- PVD TiAlN / WC-C (BALINIT™ HARDLUBE)

Figure 4. History of hard coating development

1980년대 초반에 PVD TiN 코팅이 처음 소개된 후로 PVD 장비면, 즉 새로운 코팅 조성과 미세조직 설계를 가능하게 한 소스 설계가 발전을 이루게 하였다 열-평형성에 대한 CVD의 한계는 플라스틱 공정에 적합치 않기 때문에 더욱 새로운 코팅이 기존의 CVD 코팅이 얻을 수 없는 조성과 특성을 지니게 되었다 TiAlN 및 DLC 계열의 WC/C은 종래의 CVD 반응료에서는 불가능하다

반면 CVD에서 일반화된 다층 코팅 경향은 특수한 가공 적용면에서 그 특성을 최적화 시키기 위하여 PVD 코팅에 적용되었다.

초경 및 HSS 공구에 대한 PVD 기술의 시장성에 대한 것이 Figure 5, 6에 나타나 있다

What is the global coating market for carbide cutting tools?

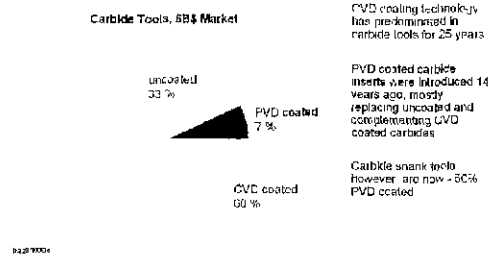


Figure 5 Current use of coated carbide tools

What is the global coating market for High Speed Steel tools?

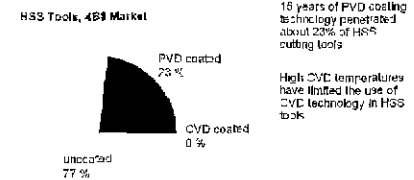


Figure 6. Current use of coated HSS tools

명백하게 고온 CVD는 초경에 잘 맞지만, PVD는 HSS 공구에 적합하여 코팅 기술의 시장 확보가 초경 10% (insert) 미만에 비해 약 25%에 달한다 HSS의 PVD 코팅으로 인한 성능향상은 비코팅재와 비교해서 월등하다. 왜냐하면 마모/인성면에서 초경과 유사한 재료로 인식되고 있다

질문으로 돌아가서 코팅 기술이 가공 기술의 발달에 어떠한 영향을 미치는가? Table 1에서 처럼 절삭공구의 성능을 개선시키기 위하여 PVD

코팅은 발저스와 타 코팅회사에 의해 공구시장에 소개되었다. 자동차 산업의 이송 라인에 많이 사용되는 기계는 가공조건을 고정시켜 놓고 있다. 따라서 절삭공구에 대한 코팅은 한 종류로 충분하다. CNC 장비를 갖고 있는 공장실이나 최적화된 절삭 파라미터를 갖고 있는 다축 스핀들 장비, 고속/고이송을 요구하는 곳 등에는 TiCN 및 TiAlN 코팅이 적합하다. 또한 최근에는 고속 및 건식가공 조건 요구가 커짐에 따라 Balinit X.TREME 및 Hardlube 으로 코팅된 절삭공구로 대체되고 있다. 후자에 대한 세부적인 사항은 아래에 기술하였다

Table 1. Parallel developments in machine and cutting tools

Generation of Machine Tool	User Needs in Metal cutting	PVD Coatings Used	Capability Considerations
Transfer lines	Few tool changes Lower downtime Longer tool life	TiN ferrous workpieces CrN/CrC: non-ferrous workpieces	Cutting conditions difficult to modify
CNC machines	Improve productivity - reduce machining time - optimize machine usage	TiCN	Increased speeds and feeds
Multipurpose machines	Broad-range application tools Flexibility	Balinit FUTURA	Various materials to be machined
Rigid, high-speed machines	Reliability of tool material - increase productivity - optimize labor cost - reduce batch cycle time	Balinit X.TREME Balinit Diamond Balinit C	Abrasive, new workpiece materials
Prototype environmental machine tools	Minimize lubrication - environmental benefits - economic benefits - improve working conditions	Balinit HARDLUBE	Dry or near-dry machining

6. PVD 코팅은 HSS 공구의 성능 향상

상업적으로 TiN, TiCN 및 TiAlN PVD 코팅의 특성 비교가 Figure 7 에 나타내었다. 가공 재질에 따라 코팅 선택 범위를 Figure 8 에 기술하였다. 강도/인성과 같은 피삭재의 기계적 특성 범위는 더 높거나 낮은 절삭력이 작용하는지, 아니면 긴 칩 또는 짧은 칩이 발생하는지를 연관시켜 놓았다.

Properties of BALINIT®-coatings

	BALINIT® A	BALINIT® B	BALINIT® C	BALINIT® X.TREME	BALINIT® FUTURA	BALINIT® HARDLUBE
Coating material	TiN	TiCN	VDZ ¹⁾	TiAlN	TiAlN	TiCN + TiAlN
Microhardness (HV 0.05)	2300	2900	1000	3200	2900	2500
Coefficient of friction against steel (dry)	0.4	0.4	0.2	0.4	0.1	0.2
Compressive Stress (GPa)	-2.5	-3.5	-1.7	-5.8	-1.5	-2.3
Thermal shock temperature (°C)	600	450	300	800	200	650
Coating colour	gold-yellow	blue-grey	dark grey	red-grey	coated grey	dark grey

Figure 7. Properties of modern PVD coatings

코팅 특성은 칩 형성 조건과 연관된다. 이러한 그래프는 다양한 피삭재를 가공하기 위하여 가장 적절한 코팅을 선택하는 기준이다

Workpiece machinability can be matched with the proper tool coating

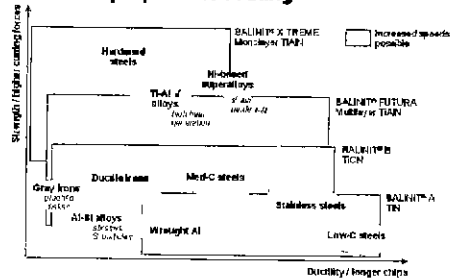


Figure 8. Application guideline for modern PVD coatings

이러한 기준은 실제 절삭 조건의 고려에 의해 조정 되어야 함을 알 수 있게 해준다. TiN 보다 TiAlN 의 장점은 절삭속도가 더 높을 때 확실하게 나타난다

7. PVD 코팅의 혁신

PVD 기술이 산업 전반에 걸쳐 널리 활용되고 있기 때문에 사용자에게 이익이 되는 복합 적용성은 그리 놀라운 것이 아니다. 전자 또는 광학 부품에 사용되는 DLC 와 같은 저마찰 카본 코

팅은 자동차 엔진과 같은 고하중 베어링 슬라이딩 부품에 성공적으로 적용되었다. 예를 들면 연료 분사 플런저 및 슬라이딩 베어링은 PVD 의 WC/C 코팅 즉, 초미세 WC 분말로 안정화된 DLC 코팅이 되고 있다

최근 절삭공구에 경질 코팅막 위에 윤활코팅을 접목시켜 건식 또는 최소 윤활로 금속 절삭을 하고자 하는 현재의 요구를 충족시켜 주는데 도움을 주고 있다 그러한 Hardlube 코팅의 예가 Figure 9 에서 볼 수 있다.

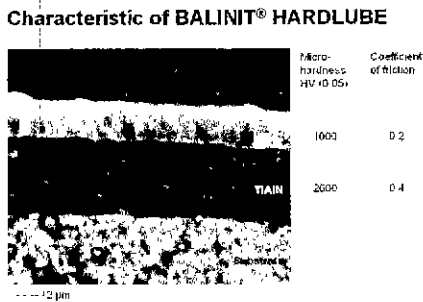


Figure 9. HARDLUBE coating cross section

MoS₂ 및 WC/C 의 PVD 저마찰 코팅은 경질 코팅막과 함께 다층 설계 구조로 조합되어 있다 먼저 이러한 코팅 구조는 칩과 절삭공구와의 접촉 뿐만아니라 절삭 인선에서 작용하는 모든 마모 기구를 설명해준다 예를들면 드릴에서 칩을 형성하는 절삭인선이 기능성 있는 경질 코팅막으로 보호된다. 반면, 플루트 표면은 더욱 용이한 칩 배출성 때문에 더욱 효과적인 윤활이 가능하다 최근 Hardlube 의 현장 적용은 긍정적으로 평가되었으며 근래에 건식 무윤활 가공을 가능하게 할 것으로 기대된다 놀랍게도 이 코팅은 저속 조건의 HSS 공구가 윤활 조건에서 사용되는 경우에도 굉장히 효과적이다. 왜냐하면 상대적으로 상층의 거친구조를 가진 WC/C 층이 상당히 좋은 윤활제

역활을 한다. Balinit Hardlube 는 HSS 드릴링 및 태핑에 상당히 효과적이다. 마찰력이 낮다는 것은 트라이볼로지 측면에서 일반적인 요구 조건이기 때문에 Hardlube 는 포밍 공구 및 정밀 부품에도 폭넓은 적용성을 가지게 될 차세대 코팅으로 주목 받고 있다.

8. 결론

PVD 코팅의 영향은 실제 용어면에서 정리 될 수 있다. 즉 역사적으로 이러한 보완 기술은 절삭 성능을 개선하기 위하여 공구의 모체가 최상으로 설계 되도록 한다. 현재 PVD 코팅은 모든 HSS 공구의 약 25% 이내에서 이루어 진다. 그 기능은 가공 속도 범위를 넓이거나, 절삭 인선의 내마모성 개선 및 용이한 칩 배출성으로 인한 칩/공구 접촉면에서의 마찰 감소 효과이다 이들은 더 나은 생산성과 신뢰성을 위하여 파손 모드 그래프에서 알 수 있듯이 고객의 가공 조건에서 더욱 넓은 안전영역으로 해석된다.

그러므로 PVD 코팅은 현대 산업 요구에 맞춰 절삭 공구의 응용 범위를 넓혀주는 것이 가능한 기술로 나타난다. PVD 코팅은 HSS 공구수명을 늘여주고 초경 및 세라믹 공구 재종의 도래에 대응하여 그 영역을 유지하기 위한 "성숙한" 재종으로 되도록 도와준다. PVD 코팅된 특히 HSS 엔드밀, 드릴, 태핑 공구에서 경쟁이 될만한 수명을 가지고 있다

어떤 사람은 공구 재질에 대한 다음과 같은 예측에 동의할지도 모른다 즉 "HSS 는 그 시장 부피면에서 증가할 것으로 예상되지만, 전체 공구 시장 점유율은 최근의 점유율과 거의 일치할 것이다"