금속표면처리
Journal of the Metal Finishing Society of Korea
Vol. 20. No. 1. May 1987
〈기술해설〉

耐 마모 코우팅 생산을 위한 CVD와 PVD 기술*

吳 承 鐸
한양대학교 재료공학과

〈요 지〉

超硬合金과 高速度鋼에 TiC, TiN 그리고 Al_2O_3의 耐 마모 코우팅시에 사용되는 CVD와 PVD 기술을 M E Sjöstrand와 A G Thelin등이 본 논문에서 논의하였다. 또한 CVD와 PVD의 특별한 장점과 응용영역에 대하여도 토의하였다.

수년동안 CVD 기술은 금속질화물, 금속탄화물 그리고 금속산화물 등의 耐 마모 코우팅을 생산하는데 성공적으로 사용되어 왔다. Münster와 Ruppert에서는 1950년대 초기에 TiC와 TiN의 CVD 공정을 연구했는데 이런 코우팅 재료의 높은 화학적 안정성과 더불어 高硬度라는 독특한 성질로 인해 그 주요 영역이 명백해졌다. 1968년에 처음으로 CVD법에 의한 보호막 코우팅의 대규모 응용이 이루어졌는데 그것은 超硬合金 절삭공구의 코우팅이었다. (그림 1 참고) 이것은 硬금속산업에 있어서 가장 중요한 발전단계였다. TiC, TiN 그리고 Al_2O_3로 코우팅된 공구의 생산은 1970년대에 빠른 성장을 보였으며 오늘날 사용되는 절삭날의 50% 이상을 점유하고 있다. (그림 2 참고) TiC와 TiN은 현재 이용되고 있는 모든 耐 마모 코우팅 중에서 독보적인 위치를 차지하고 있다. 그 이유는 생산과정이 비교적 단순하기 때문이다.

지난 5년동안 절삭공구와 總形바이트의 코우팅에 대한 PVD 기술의 응용이 폭발적으로 증가했다. 증착기술인 이들 CVD와 PVD 각각은 자체의 독특한 장점이 있으므로 그 응용영역은 증착조건, 즉 기지금속의 접착성과 증착온도 그리고 증착속도등에 따라 매우 다를 것이다. PVD 공정으로 인해 고속도 공구강이 급속도로 발전되었고 더우기 PVD공정은 500℃ 이하의 증착온도에서 brazed carbide 공구의 코우팅을 가능하게 하였다. 따라서 두 증착기술은 서로 상반적이라기 보다는 상호보완적인 것이라고 생각하는 편이 더 좋다.

1. CVD기술

耐 마모 TiC 또는 TiN코우팅을 위한 증착공정을 하는데는 일정한 기준적 방법을 모색할 수 있다. Ti-donor를 제공하기 위해 쉽게 휘발되는 $TiCl_4$ 화합물을 사용하며, TiC에서 탄소의 원료로는 메탄을 사용하고 TiN에서 질소의 원료로는 질소를 직접 사용한다. 탄소나 질소 원료를 얻는데는 여러가지 다른 방법들도 있지만 이들 대부분은 심각한 기술적 한계에 부딪힌다. 달리 시도해온 탄화수소물에는 프로판, 부탄, 벤젠, 아세틸렌등이 있다. 이러한 탄화수소를 사용하면, 일반적으로 증착속도는 증가하며 증착온도 역시 낮아질 수 있다. 예를 들면 메탄 대신 프로판을 사용함으로써 증착온도는 50

*Metal Powder Report, 1986年 12月号에서 翻譯

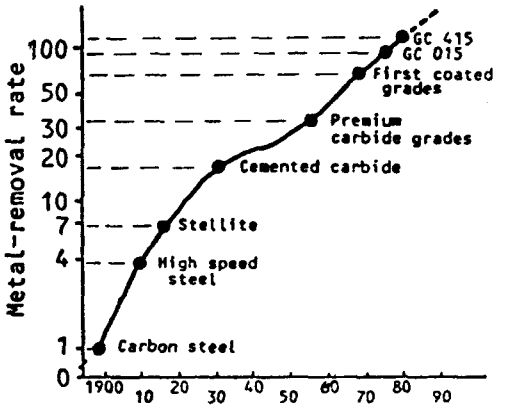

그림 1. 被削率에 대한 새로운 공구재료의 영향

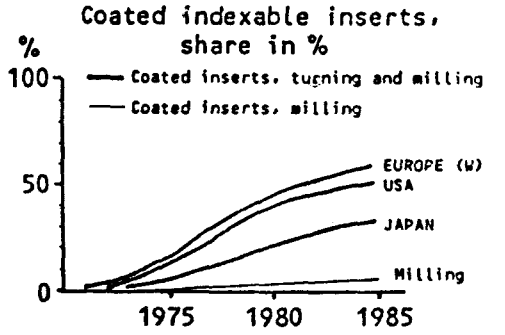

그림 2. 터닝과 밀링에서 코우팅된 인서트의 시장 점유율

~70℃ 정도까지 낮출 수 있고 증착속도도 5배정도 증가시킬 수 있다. 부탄을 사용해도 증착속도를 15배 정도 증가시킬 수 있다.

CVD에서 탄소질화물 耐마모 코우팅을 위해서는 탄소와 질소를 함께 함유하는 유기화합물도 사용해 왔다. 이러한 유기화합물에는 amines, hydrazines 그리고 nitriles 등이 있다. hydrazines와 nitriles를 사용하면 증착온도를 600~700℃ 정도로 낮출수 있으며 아울러 성장속도도 증가한다.

메탄이나 혹은 탄소와 질소를 함께 함유한 유기화합물 이외의 탄화수소를 사용한 코우팅의 미세구조는 때로 현저한 柱狀으로 나타나고, PVD에 의한 탄화물 혹은 질화물 코우팅과 유사하다. 이 공정의 매우 흥미있는 특징은 기지금속이 不活性(inertness)이라는 것이다. 코우팅 성장속도에 대한 기지금속의 영향은 거의 없으며, 또한 超硬合金의 脫炭도 나타나지 않았다. 「메탄이나 질소이외의 다른 탄소 및 질소원료의 사용은 대부분 실험적인 흥미거리로만 남아있는데 그 주된 원인은 속도조절이 어렵기 때문이다. 그결과 반응물이 매우 빠르게 감소되어 대부분의 코우팅이 반응로의 입구에서만 이루어진다. 따라서 이러한 공정을 대규모로 산업화하는데는 많은 어려움이 있다.

내마모 코우팅의 생산을 위한 PACVD (Plasma Assisted CVD)의 이용에 대한 연구는 비교적 적었다. Ar 플라즈마와 $TiCl_4/CH_4/N_2/H_2$를 함께 이용한 TiC와 TiN의 PACVD공정은 Archer에 의해 연구되었다. 일반적인 CVD와 비교하여 PACVD는 명백한 잇점이 있는데 예를 들면 낮은 증착온도 그리고 높은 증착속도 등이다. 즉, 400~500℃ 정도로 낮아진 증착온도는 高速度工具鋼의 코우팅을 가능하게 한다. 그러나 耐마모 코우팅을 생산하는데는 PACVD의 사용이 아직 상업화되지 않았다.

CVD 반응로는 매우 다른 여러형태가 있다. 절삭공구를 제조하기 위한 耐마모 코우팅에서의 반응로는 대개 전자재료를 생산하기 위하여 사용되는 반응로와 매우 상이하다. 냉각벽을 갖는 반응로안에서는 기지금속표면의 온도구배가 매우 클 가능성이 있으므로 자연대류가 공정에 있어서 매우 중요한 역할을 하게 된다. 반면에 일반적으로 사용되는 고온벽을 갖는 반응로에서는 벽과 기지금속 batch사이의 온도차가 매우 작아 자연대류의 영향이 대개 무시된다. 그러나 기체가 들어오는 입구에서는 온도구배가 존재한다. 전형적인 수직반응로에서 기체입구는 맨위, 맨아래 혹은 중간에 위치할 수 있다. 그 각 경우의 장점은 전체반응로 시스템의 설계에 따른다.

확산, 화학적표면 그리고 기체상 반응과 함께 기체유동은 전체 기지금속 batch에서의 증착속도와 코우팅의 균일성을 결정하기 때문에 반응로 내에서의 기체유동형태에 대한 지식이 매우 중요하다. 크기와 모양이 다른 여러 시편을 한 batch에서 증착시

키면 종종 각 시편들 뿐만 아니라 한 시편 안에서도 불균일한 코우팅두께가 나타날 수 있다. 그러나 超硬切削인서트의 전형적인 CVD batch에서는 특수한 지지대 위에 시편을 대칭적으로 쌓을수 있으므로 코우팅두께의 변화는 단지 반응로 내에서의 수직방향으로만 나타난다.

2. TiN, TiC 그리고 Al_2O_3의 증착

다음은 맨위로 기체가 들어가는 CVD 수직반응로에서의 실험결과에 대한 논의이다. 이러한 형태의 반응로는 다른 문헌에도 기술되어 있다. 그림 3에서는 일정유동속도하에서의 각기 다른 두개의 반응로 압력에서 반응로내 맨위, 중간, 맨아래 위치의 TiN코우팅 두께를 나타내었다. 여기서 맨위와 맨아래 위치의 거리는 약 25cm이다. 기지금속은 TiC 코우팅된 超硬合金이다. 코우팅두께의 균일성은 1기압일때 보다 선형기체속도가 15배정도 더 큰, 낮은 압력에서 개선됨을 알 수 있다.

그림 4는 동일압력하의 서로 다른 두 유동속도에서 TiN의 코우팅 두께를 보여준다. 즉, 들어가는 총기체는 전체의 성장속도에 영향을 주며 두께의 균일성은 큰 유동속도에서 약간 좋아짐을 보여준다. 또한 기체입구가 맨위에 있는 반응로에서 최고성장속도는 그림 5에서처럼 반응기체에 HCl을 첨가함으로 감소된다. 3% HCl의 첨가는 반응로 전장에 걸쳐 코우팅두께를 균일하게 해준다. 위의 전 실험에는 온도보정을 행했다.

위의 실험결과는 TiN의 증착에 있어서 반응기구의 정확한 설명을 해주지는 못하나, 정성적인 논의는 가능하다. multispecimen batch를 통과하는 유동형태는 여러 수직통로를 통과하는 강제대류로 나타낼 수 있는데 이때 반응분자는 시간 t_{diff} 내에 모든 표면을 코우팅하기 위해 수평으로 거리 l_{diff} 만큼확산한다. (그림 7) 길이 1res의 반응로 내에서 기체의 잔류시간 t_{res} 는 압력에 비례하고 기체 유동속도에 반비례한다. 정상 코우팅조건 아래에서 코우팅속도를 제어하는 확산 step의 양이 얼마인가

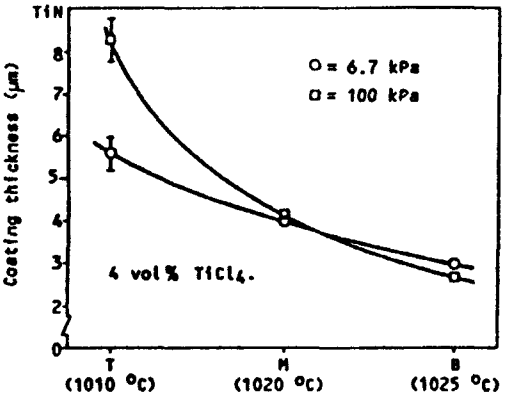

그림 3. 반응로내 위치에 따른 TiN코우팅 두께의 변화

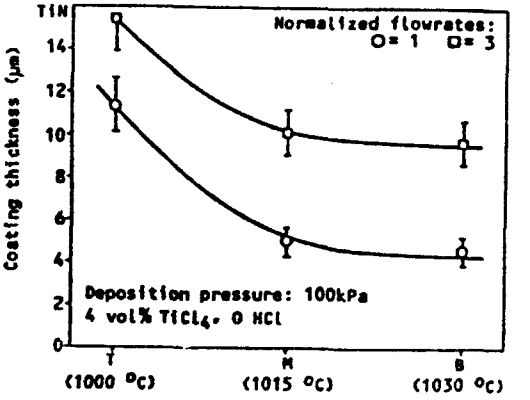

그림 4. 반응로내 위치에 따른 TiN코우팅 두께의 변화 ,

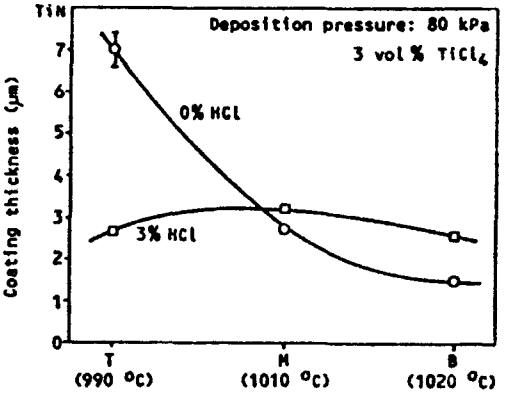

그림 5. 반응로내 위치에 따른 TiN과 TiC 코우팅 두께의 변화

를 평가하기 위해서는 t_{diff} 와 t_{res} 를 비교하여야 한다.

t_{diff} 를 계산하기 위하여는 기체혼합물 $TiCl_4/H_2/N_2$의 확산계수를 알아야 한다. 계산상 t_{res} 가 t_{diff} 보다 약 200배 정도로 더 큼을 알 수 있다. 만약 limiting step이 단지 확산뿐이라면 증착은 반응로의 맨위층에서만 가능할 것이다. $t_{res} = t_{diff}$ 을 만들기 위해서는 유동속도를 100배 정도 증가시켜야 하며 그때에는 전 반응로에 걸쳐 편평한 코우팅두께 profile을 나타낸다. 적당하게 균일한 코우팅두께를 정상 유동속도에서 얻을 수 있다는 사실은, TiN의 성장속도를 제어하는데 있어 확산이 그리 중요한 것이 아니고 표면제어기구가 중요한 역할을 한다는 것을 나타낸다. 그러므로 증착은 혼합제어 조건에서 발생한다고 볼 수 있다.

그림3에서 보여주는 두께 profile의 차는 여러 반응에 대한 구동력이 동시에 낮아진(혹은, 낮아진 분압의)결과로 설명할 수 있다. 이것은 증가된 선형기체속도가 반응물이 고갈되기전에 그것을 반응로의 더욱 아래로 옮길 수 있기 때문이다. 그림5에서 보여주는 결과는 표면제어반응 모델로 설명할 수 있다. 유입기체에 직접 염산을 첨가하면 증착공정이 정체현상을 일으킨다. 염산이 쉽게 표면에 흡착되는 표면제어 모델에서, 질소는 적당한 흡착위치를 찾으려 염산과 경쟁을 하게 될 것이다. 질소와 염소의 농도를 비교해보면 질소보다 염산이 증착속도에 더 강한 영향을 미친다는 것이 명백해진다. 그러나 이러한 모델은 유입혼합기체에 첨가된 염산이 반응로의 수직 방향으로의 성장속도에 영향을 주지 못하는 현상을 설명하지 못한다.

그림6에서는 超硬合金에 증착된 TiC코우팅의 두께변화를 보여준다. 이 실험에서는 매우 심한 온도 profile을 적용했다. 그 결과 코우팅두께가 반응로내의 기체입구 위치나 총 유동속도에 거의 의존하지 않았다. 超硬合金기지에 TiC를 증착하는데 있어서는 표면반응속도가 limiting step일 것이다. 이것은 부분적으로 기지금속에서 나와서 반응에 참여하는 탄소의 기여로 볼 수 있다.

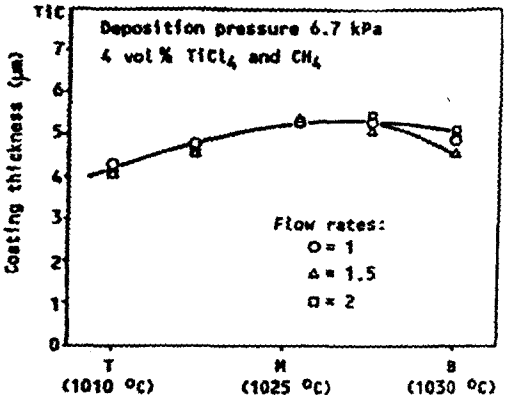

그림 6. 반응로내 위치에 따른 TiN과 TiC 코우팅 두께의 변화

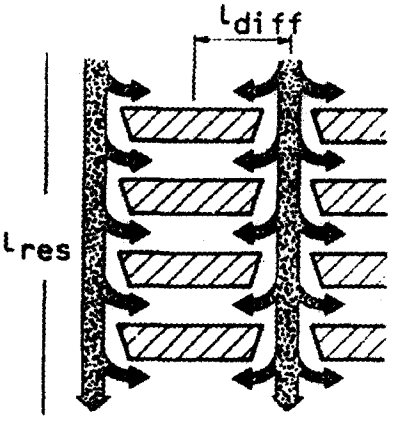

그림 7. Multispecimen batch를 통과하는 기체유동의 모형도

TiN과 TiC의 증착공정에서의 속도제어기구에 대한 이상의 논의에서는 물질수송(확산)과 표면반응에 촛점을 맞추었다. 그러나 당연히 균질기상 반응과 같은 다른 속도제어기구들도 있으며 그 반응에서는 반응물의 분압에 대한 중요성이 커진다.

TiC와 TiN 이외에 두번째로 가장 중요한 耐마모 코우팅이 Al_2O_3이다. Al_2O_3공정에서 Al-donor를 운반하는 할로겐화합물은 $AlCl_3$이다. $AlCl_3$는 常溫에서 분말형태로 존재하며 吸濕性을 갖는다. $H_2/CO_2/AlCl_3$기체 혼합물을 사용해서 Al_2O_3 코우팅을 하는 산업 코우팅시스템에서는 분리된 $AlCl_3$ 발생

장치를 반응로에 직렬로 연결하여 사용한다. $AlCl_3$는 가스발생기안에서 Al금속의 염소화를 통하여 형성된다. 원료로써 水化$AlCl_3$ 분말을 사용하지 않는 이유는 $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$ 반응에 의한 반응로내의 수증기의 생성이 Al_2O_3막의 성장에 대한 속도 limiting step이라는 확실한 실험적 증거가 있기 때문이다. 균질한 "수증기 이동반응"은 극히 느리며, 또한 기지금속표면위에 Al_2O_3를 만드는 가수분해반응($2AlCl_3 + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6HCl$)이 동반된다. 느린 수분형성 속도는 production-size반응로 내에서 코우팅두께의 균일성을 가져온다.

종합해보면, 비록 TiN과 TiC 그리고 Al_2O_3 증착에서의 성장속도를 제어하는 기구는 모두 다르더라도 생산영역에서 같은 형태의 반응로와 동일한 기지금속 고정기술을 사용함으로써 세과정 모두 행할 수 있다.

3. PVD 기술

앞서 언급한 두가지중 먼저 소개된 CVD 과정은 메탄이나 질소 대신에 다른 탄화수소나 유기화합물을 사용하는 것으로서 증착온도를 낮출 수 있기 때문에 흥미를 끌고 있다. 그러나 오늘날까지 아직 임계온도 550℃까지는 내리지 못했다. 그러므로 이러한 공정은 공구의 후속 경화처리 없이는 高速度工具鋼을 코우팅하는데 사용할 수 없다. 단순한 모양의 切削 인서트는 그들의 耐性을 잃지않고 열처리될 수 있으며, 대개의 코우팅은 경화싸이클에 영향을 받지 않는다. 드릴이나 앤드밀, 홉(hob) 등과 같은 복잡한 모양이나 가늘고 긴 공구들은 耐性에 아무 영향없이 재경화시킬 수는 없다.
이런 종류의 공구를 코우팅하기 위해서는 CVD보다 PVD가 더 적당하다.

상업적으로 이용되는 PVD공정에는 reactive magnetron sputtering , ion plating, cathodic arc deposition등이 있다. 2개의 음극으로 구성된 reactive magnetron sputtering은 그림 8과 같이 공정을 적절히 제어하면 낮은 증착온도, 높은 코우팅속

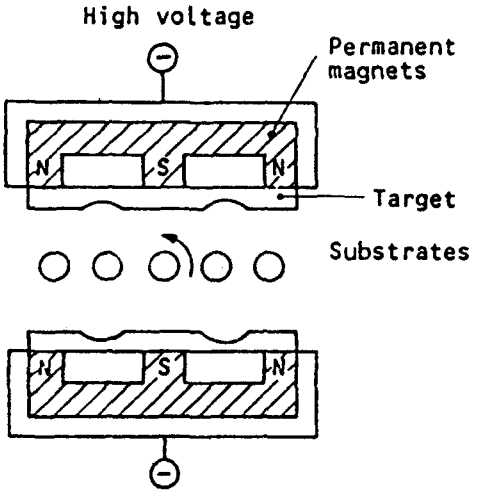

그림 8. 이중 magnetron 배열

도, 균일 전착성 그리고 높은 재생성을 준다. 또한 음극이 쌍으로 배열된 구조이므로 높은 생산력을 갖는 in-line 시스템을 쉽게 설계할 수 있다. in-line설계를 하면 코우팅室내에 잔류불순기체를 매우 낮은 수준으로 유지할 수 있다.

PVD계에서의 기지금속 고정장치는 기지금속이 동시에 전극도 되기 때문에 CVD계에서보다 훨씬 더 발전된 것이다. 매우 작고 복잡한 모양의 공구를 고정시키는 장치의 생산단가는 매우 클 수도 있지만 드릴이나 앤드밀과 같은 단순한 모양의 공구에 대해서는 고정장치가 별 문제가 되지 않는다.

超硬合金 切削인서트는 PVD법에 의해서는 대규모로 코우팅하지 않는다. 비록 PVD로 코우팅된 밀링인서트가 CVD로 코우팅된 것과 비교해서 상업적으로 상당한 경쟁 가능성이 있다 하더라도 아직까지는 耐 마모 코우팅공구를 만드는 증착법에서는 CVD가 가장 우수한 코우팅기술이다.

4. TiN의 reactive magnetron sputtering

Reactive sputtering 공정에서 높은 코우팅 재 생산성을 얻기 위해 당연히 요구되는 것은 안정한 상

태하에서의 증착이다. Ar분위기에서 순수 금속타겟으로부터의 sputtering은 대개 매우 안정한 과정이다. 그렇지만 예를 들어 전류조절 mode로 magnetron를 조작할때 sputtering 특성은 반응기체의 흐름이 어떤 임계치를 상회할때에는 불안정한 것으로 나타날 것이다. 이 불안정성은 반응기체 즉, 질소(f_{N_2})가 전 타겟을 질화하여 타겟에 손상이 올 정도로 큰 유동을 할때 발생한다.

화합물 타겟은 다른 sputter를 발생시키고 순수금속타겟과는 다른 2차 전자 방출계수를 갖는다. 일단 타겟이 완전히 질화되면 Ucath-f_{N_2} 특성에 그리고 증착속도와 sputtering 압력(P)에 급격한 변화가 생긴다. 화합물의 sputter발생이 순수금속보다 용이하고, 더 적은 질소가 소모되어 sputtering 압력이 증가하기 때문에 증착속도는 감소한다.

질소의 유동을 줄일때, 질화되지 않은 타겟으로 되돌아가는 이동은 다른 P-f_{N_2} 경로로 이루어질수 있으며 履歷曲線은 그림 9와 같이 나타난다. 이러한 현상은 대부분의 sputtering 시스템에서 나타난다. 최적의 코우팅성질들은 B점에서 혹은 B와C 사이에서 작동할때 얻을 수 있다. 그렇지만 이때에는 mass spectrometric methods 혹은 optical emission spectroscopy로 질소부분압을 완전히 탐지·조절하여야 한다.

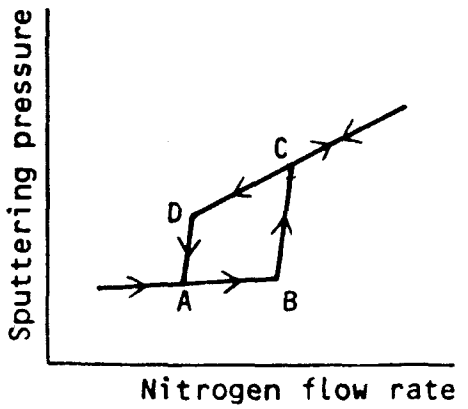

그림 9. 질소유동속도에 따른 sputtering 압력도표

타겟의 질화와 관련있는 돌연한 변화는 일정시간 동안에 가공되는 원료의 양 혹은 sputtering 기체를 증가시키거나 기본압을 낮추고 더 높은 sputtering power를 사용함으로써 피할 수 있다. 본 실험에서는 그림 8에서와 같이 두쌍의 d. c. magnetron을 갖는 sputtering시스템을 사용했다. 용량 2,000ℓ/sec의 turbomolecular 펌프와 mechanical 펌프로 차폐밸브를 통하여 150ℓ의 진공실을 직접 배기한다. 냉각되는 Ti타겟의 크기는 6×130×210㎜이다. magnetron들은 전류조절 mode로 작동시키는데 이때 전류는 전력밀도 9～15W/㎠에 해당하는 6～10 Amps/cathode 사이 내에서 변화시킨다.

기지금속 holder는 기지금속이 magnetron들 사이의 공간에서 쉽게 들어가고 나올 수 있는 互換性의 아암위에 장치한다. 음극으로 biased되어 있는 기지금속들은 코우팅싸이클동안 회전한다. 그림10은 두가지 다른 기본압 3, 10 μbar와 3가지 다른 Ar유동속도 10, 50, 100 sccm에서 질소 유동 속도에 대한 sputtering 압력변화를 나타낸다. 낮은 기본압에서 sputtering 특성은 단지 일정시간 동안 사용되는 Ar양이 가장 적을때 履歷을 보인반면 높은 기본압에서는 최대 Ar양일때만 履歷이 없었다.

유사한 결과가 N_2/Ar내에서 실리콘타겟으로부터 sputtering시킬때도 관찰되었다. 최고의 일정시간 동안 사용되는 Ar양의 상태하인 그림10의 100sccm 곡선에 따르면 임의의 질소유동에서 안정 작동점이 존재하고 TiN의 코우팅은 높은 재생력을 가지며 정확한 화학양론적 조절을 할 수 있다. 「코우팅전에 기지금속을 sputter etching으로 깨끗이 해야 한다. 즉, 공구 그 자체를 glow discharge의 타겟으로 만드는 것이다. 이러한 공정단계는 매우 중요한데, 왜냐하면 etching이 적당히 행해지지 못하면 일반적으로 코우팅의 접착성이 저하되기 때문이다. etching효율은 여러가지 요소들에 의해 좌우된다. 즉, 기지금속표면에서 멀리 sputtering된 물질들은 後方散亂될 수 있고 만약 기체분자의 평균자유 행로가 매우 짧다면 같은 기지금속이나 그것의 이웃에 있는 기지금속위에 증착된다. 또 multispecimen batch

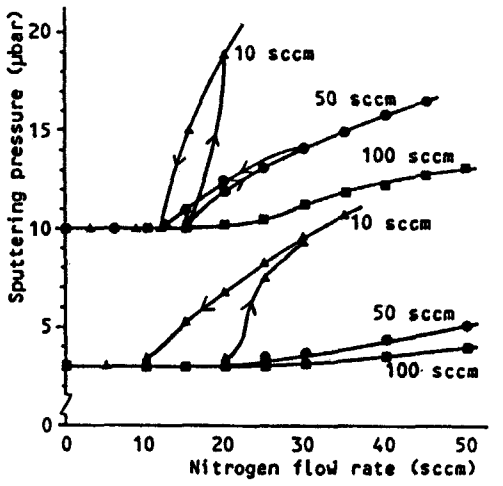

그림10. 질소유동속도에 따른 sputtering 압력의 변화

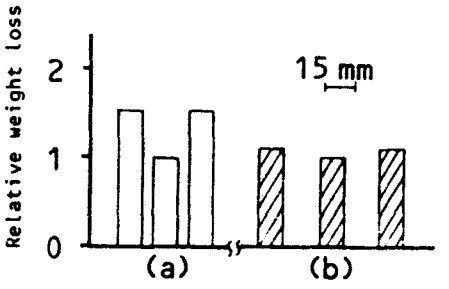

그림11. 60μbar에서의 sputter etching중 3개의 둥거리 엔드밀의 상대적인 무게손실

에서의 충진밀도는 상대적인 net etch 속도에 영향이 있다.

그림11은 60μbar의 압력 아래에서 장시간 sputter etching된 3개 둥거리 기지금속(엔드밀)의 상대적인 무게손실을 나타내고 있다. 조밀하게 배열되어 있는 3개의 기지금속에서 (a) 안쪽것과 양쪽 바깥것 사이의 상대 무게 손실에 현저한 차이가 있다. 그러나 이러한 차이가 성글게 배열되어 있는 기지금속에서는 감소된다. (b) 압력을 낮춤으로써 sputter 가스의 평균 자유행로를 연장하는 것은 sputter etching 단계동안 glow discharge의 유지를 어렵게 한다. 낮은 압력에서 glow discharge을 유지하기 위한 프라즈마의 여온화증진은 다른 방법에 의해 가능하다. magnetron 시스템내에서 magnetron자체는 적은 동력으로 작동시킬때 프라즈마의 이온화를 증가시키는데 이용할 수 있다. 다른 방법으로는 기지금속들 근처에 놓여있는 독립적인 전극에 positive bias를 걸어주는 것이다. 그러한 보조양극은 음극으로 bias된 기지금속보다 프라즈마 전위를 높혀준다. 이것을 그림12에서 3개의 기지금속들과 기둥모양의 양극들에 대해 실험적으로 나타내었다. 양극이 +300V로 biased되어 있고, 기지표면에서 동일한 전력손실을 갖도록 50μbar에서의 정상작동점을 10μbar로 옮기면 압력에 대한 etching power의 곡선은 낮은 압력쪽으로 치우친다.

본 논의에서는 TiN의 reactive magnetron sputtering에 대하여 두가지 중요한 면만을 설명했다. 즉, sputtering 기체의 높은 throughput에 대한 중요성과 sputter etching 단계 동안의 이온화 조장에 대한 기술이다. 물론 코우팅과정에서 동일한 중요성을 갖는 다른면들, 기지금속들의 예열과 코우팅의 미세구조 조절 그리고 공구의 날카로운 끝부근에서의 재 sputtering 등이 있지만 여기서는 논의되지 않았다.

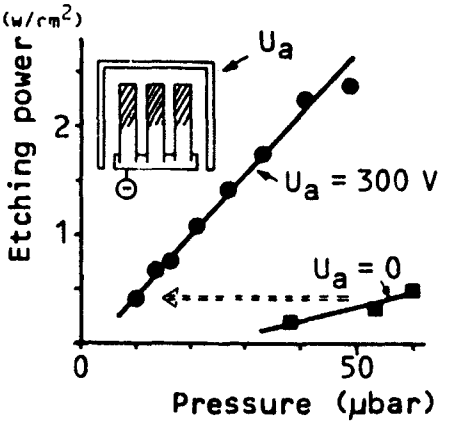

그림12. +300V의 보조양극이 있을때와 없을때의 압력에 따른 sputter etching power의 변화

5. 코우팅된 금속 切削工具

과거에는 코우팅된 공구들은 터닝가공에 사용되었다. 그러나 현재 切削工具는 드릴가공 뿐만 아니라 밀링용에서도 사용하기 위해 코우팅된다. 보통 코우팅은 터닝공구에 대해서는 5～10㎛ 정도 두께로 매우 얇게 행한다. 밀링과 드릴링에 대해서, 혹은 인성거동과 기지금속의 접착성이 크게 요구되는 응용에서 코우팅은 대개 2～4㎛ 정도로 더 얇다.

기지금속과 다른 코우팅재료 사이의 결합은 1～3층 또는 다층구조로 많은 코우팅생성물을 만들어서 개선할 수 있다. 코우팅된 공구의 切削 성능의 개선은 다음과 같은 코우팅물질의 몇가지성질에 기인한다. 즉,

① 용해와 확산 그리고 산화마모의 감소로 인한 높은 불활성
② 연삭마멸의 감소로 인한 높은 경도
③ 절삭력을 감소시켜 절삭날에서의 인성요구치를 낮추는 "build up edge"를 형성하려는 경향을 감소시키는 강과의 친화력이 낮음.

그러므로 코우팅은 耐 마모성을 증가시킬 뿐만 아니라 절삭력을 조절하고 발생하는 열을 감소시킨다. 절삭공구의 기하학적 형태를 포함해서 완전한 절삭시스템을 고려해 보면, 상당한 성능개선을 그림13에 나타낸 것과 같이 얻을 수 있다. 삼각형의 형태를 갖는 드릴과 twist드릴을 동일조건으로 PVD에 의해 TiN코우팅을 행해보면 삼각형태를 갖는 드릴의 공구수명이 더 연장되고 또한 드릴한후 hole의 탁월한 surface finish를 얻을 수 있다. 그러나 코우팅하지 않았을때는 삼각형태를 갖는 드릴은 큰 절삭력을 발생시켜 코우팅하지 않은 twist드릴보다 상당히 짧은 공구수명을 나타낸다. 또한 절삭공구 재료의 조건은 被削體의 조성과 기계 가공상태등의 다른 인자에도 의존한다. 더구나 절삭날의 여러부분은 다른 여러형태의 마모를 받게 된다. 측면에서는 연삭마멸이 지배적이다. 또한 경사면에서의 crater wear은 주로 열화학적 작용의 결과이

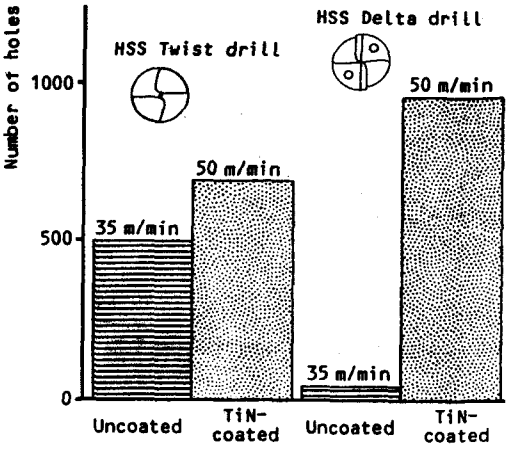

그림13. (i) 전통적인 twist 드릴형태와 (ii) 삼각형 형태에서의 TiN 코우팅된 고속도강 드릴의 성능개선

고 notch wear은 산화와 결부된 복합적인 마모의 결과이다. 따라서 광범위한 금속절삭 응용에 맞추려면 다양한 코우팅조성과 그들의 복합이 필요하다.

6. TiC와 TiN 그리고 Al_2O_3로 코우팅된 超硬合金工具

코우팅물질 TiC, TiN 그리고 Al_2O_3등은 상품화된 공구에 단층 또는 다층 결합상태로써 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그들의 耐 마모성 서열은 여러 마모기구들에서 각기 다르다. 아래 실험은 이러한 거동을 설명해 준다.

공구재료 : ISO 범위 P15에 대한 SPUN 120308형의 超硬合金 인서트가 기지금속으로 사용되었다. 3가지 코우팅복합물이 연구되었다. (Table 1)

그 결과를 그림 14에 나타내었다. 담금질과 뜨임을 행한 강에서 제일 위층에 TiN을 코우팅한 공구가 연장된 공구수명을 보이는 반면, 풀림된 볼베어링 강에서는 맨 위층에 Al_2O_3를 코우팅한 공구가 가장 좋은 공구수명을 보여 주었다. 마모된 절삭날을 분석해 보면 TiC코우팅이 가장 뛰어난 측면 耐 마모성을 나타낸다. TiN과 Al_2O_3를 위에 코우팅한 경우는 측면에서의 top 코우팅이 수분만에 완전히

Coating type	Baselayer (5 μm)	Top coating (3.5 μm)
TiC	TiC	–
TiN	TiC	TiN
Al_2O_3	TiC	Al_2O_3

TABLE. 1

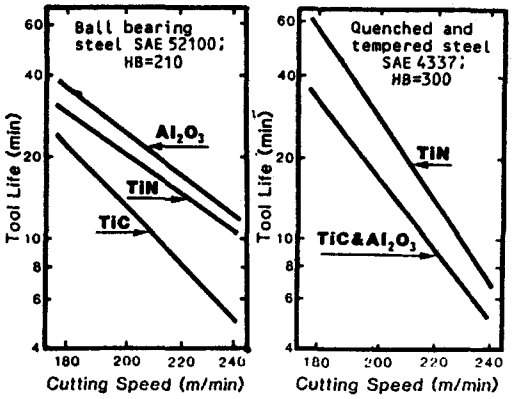

그림14. 절삭속도에 따른 공구수명의 변화

마모되었다. 측면에서의 낮은 온도가 마모의 주 요인으로 작용할 것이라 믿어지는데 이러한 온도에서 가장 강한 코우팅 물질은 TiC이다. 담금질과 뜨임을 한 강의 기계가공시 TiN코우팅이 TiC나 Al_2O_3코우팅에서 보다 더 광범위한 耐 cratering을 가진다. 결국 TiN코우팅된 공구의 수명은 공구날의 소성변형 여부에 따르게 된다.

다른 응용에서는 notch 마모가 가장 중대한 마모형태이어서 코우팅성능의 상대적 서열이 달라진다. 따라서 어느 특정의 코우팅물질 복합물이 일반적으로 더 뛰어나다고 말할수는 없다. 반면에 광범위한 응용영역에 걸쳐서 최적의 성능에 도달하기 위해서는 많은 복합물들이 필요하다.

터닝주철에서는 보통 TiC와 Al_2O_3층의 복합물코우팅이 가장 효과가 크다. 그림 15는 TiC와 Al_2O_3층의 다른 두께를 가진 인서트 또는 TiC나 TiCN

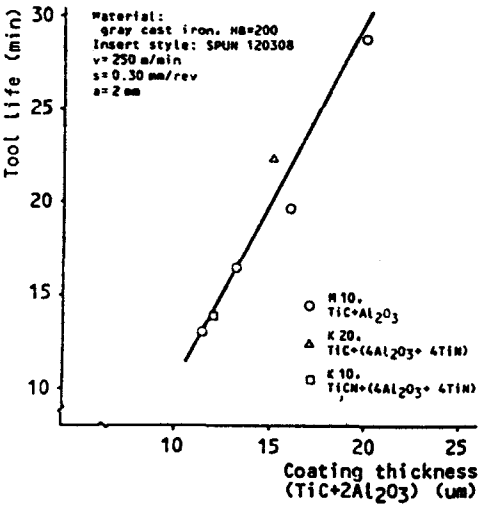

그림15. 회주철의 기계가공시 코우팅 두께에 따른 공구수명의 변화

기본층위에 여러층의 4 X (Al_2O_3 + TiN) 세라믹 코우팅을 한 인서트로 실험을 한 회주철의 터닝작업의 결과를 보여주고 있다. 기지금속들은 K20이나 M10 초경합금이다. 기초 TiC(TiCN)층 두께에 Al_2O_3나 다층 세라믹코우팅의 두께의 2배를 더한 값에 따라 공구수명을 도시하면 직선관계가 얻어진다. 이 결과는 공구수명이 중간층의 갯수보다는 총 두께의 함수이라는 사실과 Al_2O_3는 이러한 응용에서 TiC의 약 2배의 효과가 있다는 사실을 말해준다.

7. PVD 코우팅된 공구

TiN코우팅된 고속도강 삼각드릴의 성능에 관해서는 이미 논의했다. 또한 개선된 절삭성능이 TiN코우팅된 고속도강 엔드밀과 gear hobs등에서 나타났다. 코우팅된 고속도공구강은 고속급송장치 등에서 사용될 수 있으며 이런 예는 기어나 기어박스의 제조에서 볼 수 있다. modul 6, 20°압력각을 갖는 기어들은 HB = 205의 17CrNiMo6 물질로 만든다. magnetron sputtering에 의해 TiN코우팅된 고속도강 hobs는 Pfauter 기어 절삭기계에서 사용된다.

표2. 커터종류에 따른 작업비용

Tool Grade	Hob m 6 Non-coated	20° TiN-coated
Cutting data		
Speed (rev/min)	127	184
Cutting Speed (m/min)	52	75
Feed (mm/rev)	1.40	2.00
Cost Calculation		
Price (SEK)	5.915	11.830
No. of units/regrind	6	18
No. of regrinds/tool	70	70
Tool cost/unit (SEK)	13.88	9.39
Machining time (min/unit)	35.17	15.30
Machining cost (SEK/min)	5.00	5.00
Machining cost/unit (SEK)	175.85	76.50
Total cost (SEK)	189.73	85.89

TiN 코우팅을 함으로써 hobs의 기계가공시간이 35.17분에서 15.30분으로 감소됐다. 被削率이 증가됨에 따라 TiN 코우팅된 컷터가 기어 생산량을 3배로 증가시켰다. 비용면에서는 전체비용을 대략 45% 감소할 수 있었다. (Table. 2)

그림16은 2개 엔드밀을 마모시험한 결과를 보여주는데 그중 하나는 2 μm TiN 코우팅을 했다. 被削體는 300HB까지 경화되어 있어 간헐적 절삭에서는 보통 가공이 어렵다고 생각된다. 코우팅은 측면마모와 galling의 경향을 급격히 감소시키므로 코우팅한 엔드밀의 공구수명을 상당히 연장시킬 수 있다.

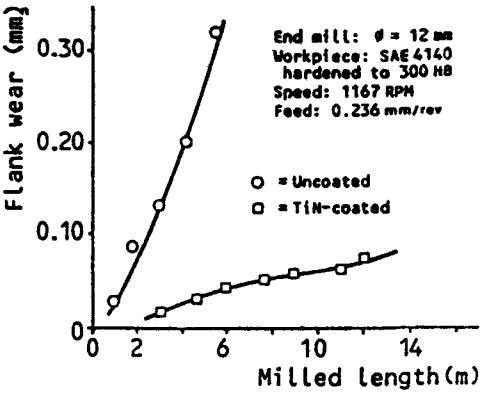

그림16. 코우팅된 것과 코우팅되지 않은 것에서 엔드밀의 측면마모