

절삭공구의 피복층이 공구마멸에 미치는 영향에 대한 연구

손태영*, 양민양**

*생산성 본부

**정회원, 한국과학기술원 생산공학과

Study on Effects of Coatings on Cutting Tool Wear

Taeyoung Sohn*, Minyang Yang**

*Productivity Center

**Department of Production Engineering, KAIST

초록—마찰학적인(Tribological) 관점에서 피복초경공구의 피복층이 공구마멸에 미치는 영향을 조사하기 위하여 공구표면의 피복층을 선택적으로 제거한 후 마멸시험, 급속정지 실험 및 절삭력 측정 실험을 수행하였다. 실험 결과 피복층은 공구와 피삭재 사이의 점착성을 낮추어 점착마멸을 억제시키는 것으로 나타났으며, 마찰저항을 감소시켜 절삭력을 낮추는 것으로 관찰되었다. 또한 경사면상의 피복층이 플랭크 마멸의 성장을 저지하는 효과가 있는 것으로 나타났으며, 피삭재가 탄소강인 경우 경계마멸까지 고려할 때 다중피복공구가 가장 바람직한 것으로 관찰되었다.

Abstract—In order to investigate tribological effects of coatings on different places on tool wear, commercial quality coated inserts were tested in production speed machining after the coatings on clearance or rake face of coated tools were selectively removed. The experimental results demonstrated that the primary role of coatings in tool wear was the reduction of the thermochemical adhesion between the tool material and workpiece. And the coating on rake face was observed to retard the progress of flank wear. In case of machining carbon steel, multicoated tools showed the most favorable results for considering the notch wear.

1. 서 론

기존 초경공구의 절삭속도 및 공구수명을 증가시켜 생산성을 향상시키자는 목적으로 개발된 피복 절삭공구가 상업적으로 첫 선을 보인 것은 1970년 초였다. 이후 화학적 증착법(Chemical Vapor Deposition)에 의하여 TiC, TiN 또는 Al₂O₃ 등이 피복된 여러 종류의 절삭공구들이 속속 개발되어 강재와 주철을 고속으로

가공하는데 사용되었으며, 이에 의하여 공구수명이 대폭 향상되었다는 보고가 있어 왔다(1). 이는 또한 최신 공작기계들의 성능을 유감없이 발휘하게 된 계기가 되었다고 할 수 있다.

이와 같은 피복 초경공구의 향상된 공구수명 및 절삭속도는 피복층의 내마모성과 초경모재의 인성 및 강성이 잘 조화된 결과로 알려져 있다. 그러나 절삭과정 중 초경을 감싸고 있는 얇은 피복층의 역할에 대해서는 아

직 확실히 밝혀져 있지 않다[2]. Suh는 그의 논문에서 피복층에 의해 마찰력이 감소되고, 이로 인하여 경계 온도(Interfacial Temperature)가 낮아져 열적 마멸(Thermally Activated Wear Process)이 억제될 것이라고 추측하였다[3]. 그러나 얼마 후 Dearnly는 피복공구와 비피복공구의 경사면에 발달된 온도분포 및 최대온도가 거의 비슷함을 실험적으로 증명하였다[4]. Sproul은 그 두께가 수 μm 밖에 되지 않는 피복층이 어떻게 그와 같이 많은 양의 공구수명의 증가를 가져올 수 있는가 라는 질문에 대하여, 피복공구의 향상된 내마모성은 피복층과 모재 사이의 확산에 의해 형성된 η 카바이드층이 피복층 밑에서 일종의 방벽 역할을 하고 있기 때문이라는 의견을 제시하였다. 그러나 이것도 서로 다른 양의 상(Phase)이 형성되어 있는 공구의 크레이타 마멸이 특별한 차이를 보이지 않는다는 Chubb의 실험 결과에 의하여 그 타당성이 부정되었다[5]. 또 다른 한편에서 Trent는 TiC, TiN 또는 알루미늄 피복층의 내마모성은 주로 그들의 확산 마멸(Diffusion Wear)에 대한 높은 저항성 때문이라고 주장하였다[6]. 그러나 확산 마멸 역시 제시된 마멸율을 뒷받침 할 만한 구체적인 자료가 아직 부족한 실정이라 그 정당성이 의심스럽다[7].

만일 피복층의 역할이 좀 더 확실히 알려진다면 이는 기존 피복공구의 성능향상 및 새로운 피복공구의 개

발 등에 활용할 수 있는 기초지식이 될 것이다. 그런데 대부분 산업현장의 작업조건에서 절삭공구의 상태는 높은 압축응력, 많은 양의 열발생과 공구와 접촉하고 있는 피삭재의 순수성 등으로 인하여 공구와 피삭재간에 원자결합(Atomic Bonding) 또는 맞물림(Interlocking) 등이 피할 수 없는 현상으로 나타난다[8]. 본 연구는 이와 같은 마찰학적(Tribological) 관점에서 피복층이 절삭공구의 마멸에 어떠한 역할을 하는지를 실험을 통하여 조사하고자 한다.

2. 실험

본 연구의 실험은 세부분으로 구성되어 있다. 첫번째 부분은 시판되는 초경공구를 사용하여 탄소강을 절삭시 실험하였다. 다음 Table 1에는 사용된 초경공구의 모재 성분과 피복층의 두께 등에 대한 데이터가 나와 있으며, Fig. 1에는 다중피복공구의 TiN, TiC 피복층과 η 카바이드 상의 형성과 관련된 것으로 보이는 확산층에 대한 사진이 나타나 있다. 실험에 사용된 인서트 타입은 SPGN 120304이다. 공구마멸에 있어서 피복층의 위치에 의한 영향을 조사하기 위하여 피복공구의 여유면 또는 경사면 상의 피복을 선택적으로 제거하였다. 피복층의 제거는 연마공정으로 행하여졌는데 점진적으로 고온 연마제가 사용되었으며, 연마는 피복층이 완전

Table 1. Specifications of the inserts used

ISO code	Type	Substrate material (wt. %)	Coating thickness (μm)
SPGN 120304	Uncoated tip	WC (84), TiC+TaC (8), Co (8)	5 - 6
	TiC coating		
	TiN coating		
	Multi-coating		5 - 8
	Rake face polished tip		TiC:Ti(CN):TiN = 4 : 2 : 2
	Flank face polished tip		
	Both face polished tip		

Table 2. Chemical composition of workpiece material (wt. %)

Material	Si	Mn	P	Cr	Cu	Ni	Al	C	S	Brinell hardness
SM45C	0.19	0.72	0.018	0.083	0.019	0.071	0.015	0.4	0.036	220

히 제거될 때까지 금속 현미경으로 확인을 하면서 수행되었다. 연마 후 날카로운 모서리는 초기 상태를 모두 같게 하기 위해서 저석(Honing Stone)으로 조심스럽게 호닝되었다. 피삭재는 SM 45C로서 직경 45mm의 원통 바이를 사용하였으며, 소재의 화학적 성분 및 평균 경도가 Table 2에 나와 있다. 절삭시험의 조건은

생산현장의 상황을 모사하기 위하여 절삭속도 200m/min, 피이드 0.188mm/rev, 절삭깊이 1mm로 정하였으며, 모든 절삭시험은 절삭유를 사용하지 않고 수행하였다. 플랭크 마멸은 공구 현미경을 사용하여 측정하였으며, 공구 선단 부분의 마멸을 제외한 여유면의 평균 마멸폭이 측정되었다. 크레이타 마멸은 일반적으로 측정식 표면조도계로 경사면 상의 마멸 깊이를 측정하나, 가공 중 경사면에 점착된 금속에 의하여 실제 마멸 깊이를 측정하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 마멸된 공구를 최대 마멸 깊이에서 절단한 뒤 무라카미 용액으로 에칭하여 점착된 금속을 제거한 후 금속 현미경으로 마멸 깊이를 측정하였다.

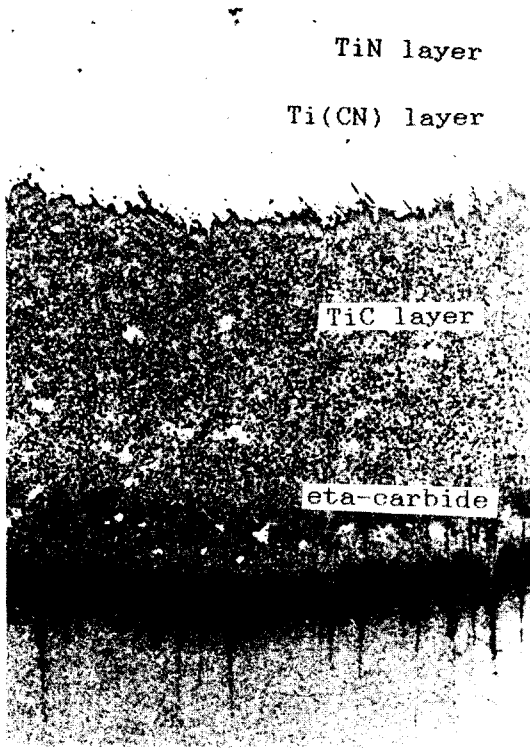


Fig. 1. Microstructure of multi-layer coated tool

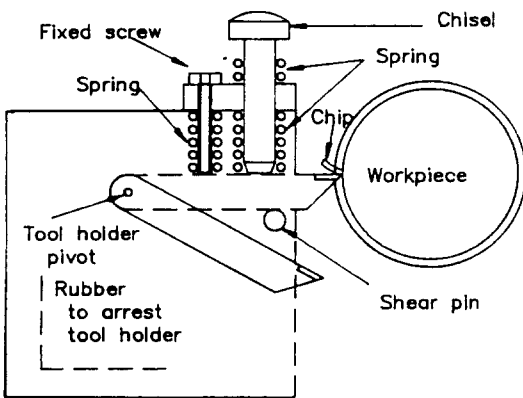


Fig. 2. Constructional detail of Quick-stop device

두번째 부분은 절삭 중 공구를 금속히 후퇴시켜 절삭상태를 동결시킴으로서 칩과 공구 사이의 결합 특성을 조사하는 것이다. 이를 위하여 다음 Fig. 2와 같은 금속정지기구(Quick Stop Device)가 설계 제작되었으며 [9], 금속정지된 칩/피삭재 시편과 공구가 금속학적인 방법에 의하여 조사되었다. 세번째 부분은 파복층에 의한 마찰력의 변화를 조사하기 위하여 스트레이니 게이지식의 공구 동력계를 사용하여 절삭력을 측정하였다.

3. 결 과

다음 Fig. 3에는 절삭시험된 공구의 시간에 따른 플랭크 마멸거동이 나타나 있다. 비피복 공구의 경우 매우 빠른 속도로 마멸이 일어나고 있으며, 0.3mm 플랭크 마멸 기준으로 볼 때 공구수명은 단지 약 5분 정도 밖에 되지 않았다. 그러나 다중피복 공구는 매우 느린 속도로 마멸 되었으며, 한 시간 정도 가공을 한 후에도 마멸량은 겨우 120 μ m 밖에 되지 않았다. 경사면 만을

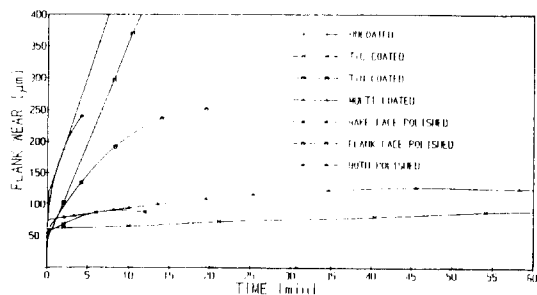


Fig. 3. Flank wear progress curves (SM45C steel; cutting speed : 200m/min, depth of cut : 1mm, feed : 0.188mm/rev, dry cutting)

연마한 공구의 경우는 피복 공구와 비슷한 프랭크 마멸 양상을 보였으나, 10여분 후 과대한 크레이타 마멸에 의하여 공구 선단 부근에 파손이 일어나 실험을 계속할 수 없었다. 그러나 여유면 만을 연마한 공구의 경우는 다른 마멸 양상을 보였다. 즉 초기에는 매우 빨리 마멸되었으나, 점차 그 마멸율이 감소하여 비피복 공구의 경우 보다 더 천천히 진행되었다. 그러나 플랭크 마멸양 250 μ m 정도에 이르러 심한 채터 현상이 발생되어 절삭시험을 계속할 수 없었다. TiN 피복공구의 플랭크 마멸은 TiC 또는 다중피복공구 보다 매우 빠르게 진행되었으나, 경계마멸(Notch Wear)은 TiC 피복공구가 TiN 또는 다중피복공구 보다 심하게 발생하였다.

다음 Fig. 4는 절삭시간 2분 후 각 공구의 여유면 마멸상태를 나타낸 사진이다. Fig. 5에는 실험에 사용된 다중피복 공구의 시간에 따른 단면 사진이 나와 있다. 이 사진은 여유면의 점진적 마멸에 의하여 TiN 피복층이 점차 제거되고 TiC 피복층이 노출되는 상태를

보여주고 있다.

크레이타 마멸에 대하여는 다음 Table 3에 그 마멸율이 나타나 있는데, 경사면에 피복층이 존재하는 경우 피복재에 구별없이 거의 비슷한 양상을 보였다. 경사면 만을 연마한 공구는 예상대로 비피복 공구와 비슷한 마멸 거동을 보여주고 있다. 다음 그림 6은 이 공구의 경사면을 보여주고 있는데, 다수의 미소크레이타와 금속 점착이 발견되었다. Fig. 7에는 실험에 사용된 다중피복공구 경사면의 시간에 따른 상태가 나타나 있다. 이 사진은 경사면 상에 피복재가 반복적으로 늘

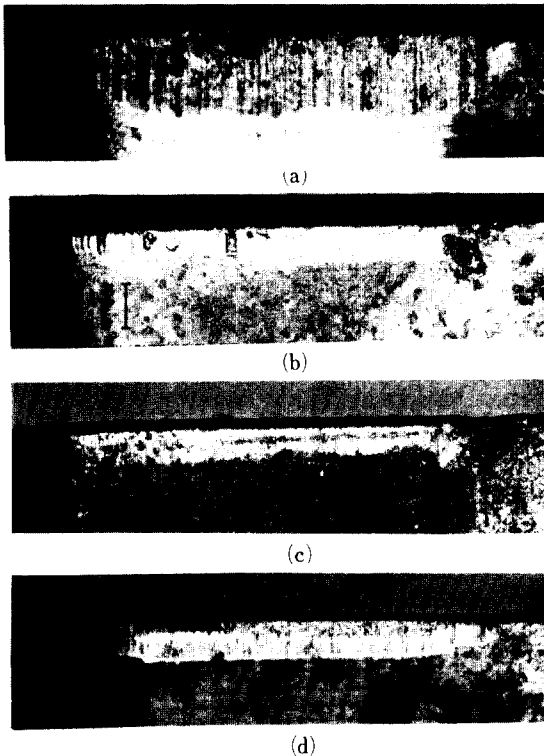


Fig. 4. Photographs of the flank face of inserts after cutting time 2min.
 (a)Uncoated insert (b)Multi-coated insert
 (c)Tic-coated insert (d)TiN-coated insert

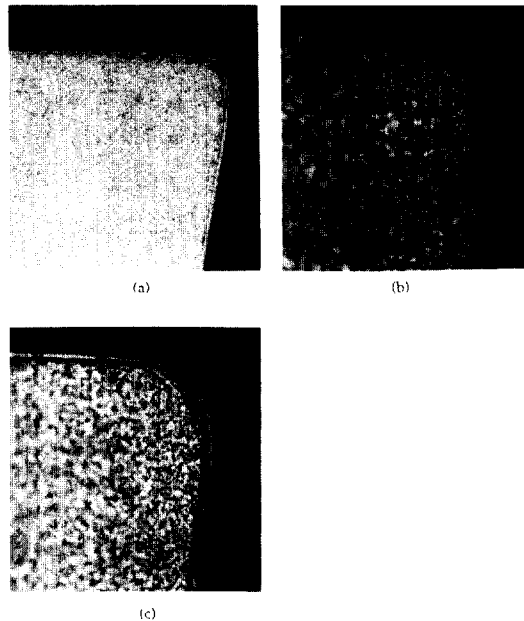


Fig. 5. Photographs showing a cross section of Multi-coated Inserts after a cutting time of (a) 2min, (b) 10min, (c) 30min.(x50)

Table 3. Rake-face wear rate of coated and uncoated cemented carbide tools used to cut SM 45C(Cutting conditions: v=200m/min, d=1mm, f=0.188mm/rev, dry cutting)

Tool Type	Approximate rake-face wear rate (μ m/min)
TiC single coating	<0.25
TiN single coating	<0.20
TiC-Ti(CN)-TiN coating	<0.22
Uncoating	30-40



Fig. 6. Photograph of the rake face of uncoated insert after cutting time 10 sec.

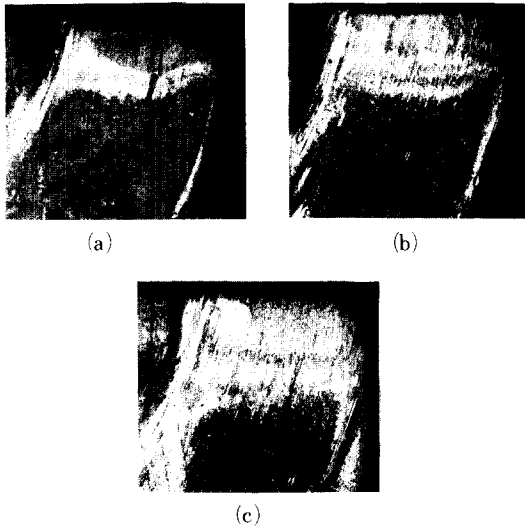


Fig. 7. Photographs of the rake face of multi-coated insert.(x50)
(a)10sec (b)2min (c)10min

러 붙었다 떨어짐에 의하여 첫번째 피복층이 마멸제거됨으로 인하여 두번째 피복층이 외부로 노출되는 것을 보여주는 것이다. 여유면 만을 연마한 공구의 크레이타 마멸 양상은 피복공구와 유사하였다.

금속정지실험에서 금속정지는 공구가 피삭재에 완전

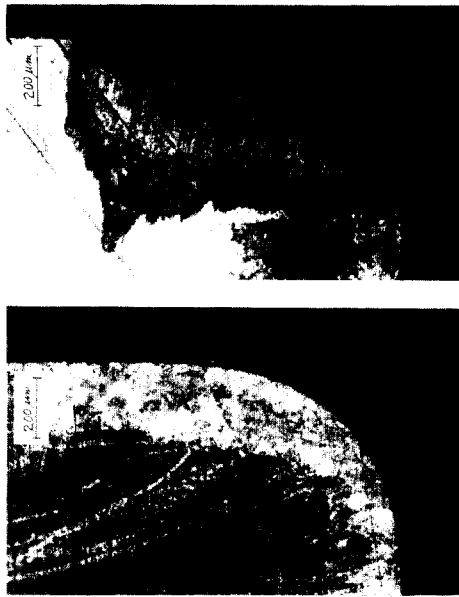
히 맞물린 직후 실시하였으며, 간혹 공구의 경사면 일부가 칩에 부착되어 떨어져 나가는 경우도 발생되었다. 피삭재와 칩의 금속정지 시편을 관찰하면 칩은 주전단 변형에 의해서 생성되고 경사면과의 경계지역에서 소위 Seizure라는 현상에 의하여 이차전단 변형이 발생됨을 알 수 있다[8]. 다음 Fig. 8은 금속정지 실험에서 얻어진 공구의 경사면에 대한 사진이다. 두 사진을 비교하면 비피복 공구가 피복공구 보다 더 많은 금속접착 현상을 보이고 있다. Fig. 9는 이때 발생된 칩의 뒷면 사진이다. 경사면에 많은 양의 금속접착을 일으킨 비피복공구는 표면이 매우 거친 칩을 발생시켰으며, 피복공구는 반대로 매끄러운 칩을 발생시켰다.

절삭력 측정에 대한 실험결과가 다음 Fig. 10에 나와 있다. 비피복공구와 경사면만을 연마한 공구와 같이 경사면에 피복층이 존재하지 않을 경우 세 절삭력 성분 모두에서 높은 절삭력이 측정되었으나, 경사면에 피복층이 있을 때는 상대적으로 낮은 절삭력이 측정되었다. 모든 경우 대부분 절삭력은 시간에 따라 점차 증가함을 볼 수 있었다.

4. 고 찰

절삭시험의 결과는 여유면만 연마된 공구를 제외하고는 예상될 수 있는 것으로서, 즉 피복층의 유무에 따라 플랭크 마멸과 크레이타 마멸의 양상이 큰 차이를 보였다. 그러나 여유면만이 연마된 공구의 경우는 이와 달리 피복층이 완전히 제거된 여유면에서 기대치보다도 천천히 마멸이 진행되었다. 이것은 플랭크 마멸이 공구 선단 부분에서 시작된다는 사실로 설명될 수 있다. 즉 이 공구의 경우 경사면에는 피복층이 존재하고 있으므로 플랭크 마멸이 성장하기 위해서는 먼저 경사면 피복의 선단부분이 마멸되어야 하기 때문이다. 하지만 일단 선단부가 마멸되면 모재가 나타나므로 플랭크 마멸은 급격히 진행될 것이다. 따라서 경사면 상의 피복층이 플랭크 마멸을 어느 정도 저지하게 된다.

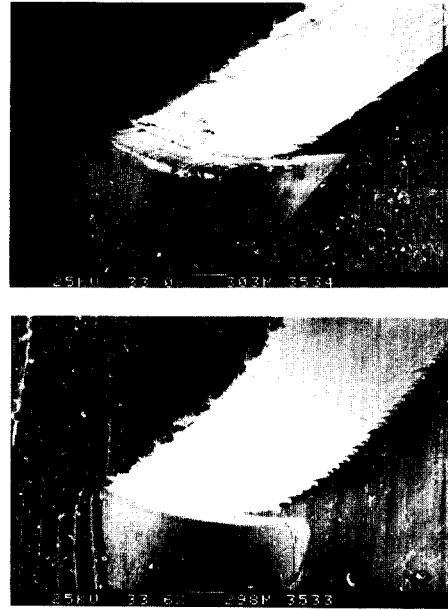
비피복공구의 여유면은 주로 피삭재와 인서트 사이의 심한 마찰에 기인된 점착현상에 의하여 마멸되는 것으로 보인다. 또한 점착된 금속이 공구재를 원자 단위로만 마멸시키는 것이 아니라 입자 단위로도 제거하는 것으로 나타났다. 다음 Fig. 11은 텅스텐 카바이드 입자가 여유면에 점착된 금속에 의하여 막 제거되려는 모습이다. 그러나 일단 여유면이 피복이 되면 점착 마멸은 크게 줄어드는 것으로 나타났다.



(a)

(b)

Fig. 8. Photographs showing the rake face of the tool after quick-stop.
(a)Uncoated insert (b)Multi-coated insert



(a)

(b)

Fig. 9. Scanning electron micrographs showing back surface of the chip from quick-stop device.
(a)Uncoated insert (b)Multi-coated insert

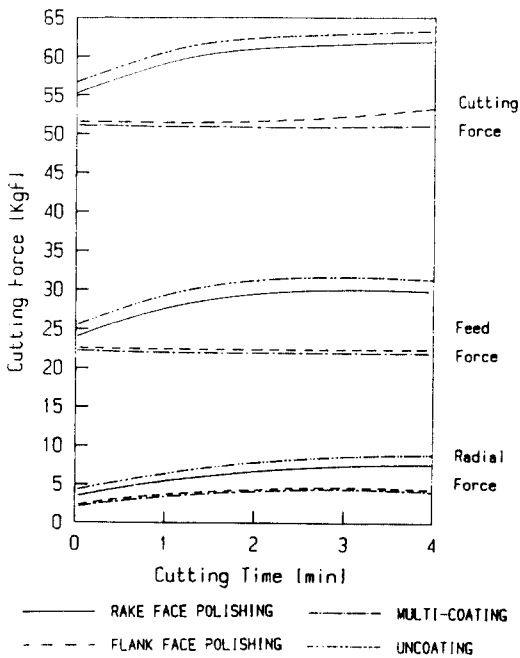


Fig. 10. Comparison of cutting forces showing the effect of existing coated layer

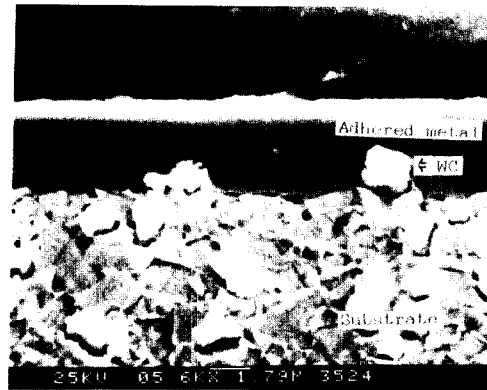


Fig. 11. Scanning electron micrograph of the cross section of flank face.

비피복공구의 크레이타 형성과정은 다음과 같이 설명될 수 있는데, 먼저 인서트의 경사면 위를 칩이 흘러가면서 그 위에 점착이 시작된다. 연이어 이렇게 경사면에 점착된 금속이 다시 그 위를 흘러가는 칩에 용착되어 결국 칩과 함께 제거된다. 이렇게 점착된 금속이

제거되면서 경사면 상의 공구재 원자 및 입자를 끌고 나간다. Fig. 6은 이와 같은 점착 금속과 공구재 입자가 제거되어 형성된 작은 크레이터를 보여주고 있다. 절삭이 계속됨에 따라 이같은 과정이 계속 반복되며, 공구재 입자가 제거됨에 따라 형성된 굴곡에 의하여 경사면은 더욱 거칠어진다. 피복공구의 경우는 절삭이 시작되면서 경사면에 금속점착이 발생되나 그 정도가 약하며 국부적인 것으로 보인다.

칩의 외곽 부분에 위치하기 때문에 높은 절삭온도에서 대기 중의 산소와 반응하여 화학적으로 마멸되는 것으로 알려진 경계마멸은 화학적 안전성이 상대적으로 낮은 TiC 피복층에 심하게 발생되었다[10]. 따라서 절삭공구가 경계마멸에 의해서도 파손될 수 있음을 감안할 때 피복공구 중 다중피복공구가 가장 바람직한 것으로 사료된다.

급속 정지된 비피복공구의 시편을 자세히 관찰해 보면 절삭 중 칩이 공구의 경사면에 매우 강하게 점착되어 급속정지에 의한 분리가 칩 내에서 발생되었음을 알 수 있다. 그러나 피복공구의 경우는 급속정지시 경사면 전체에 걸쳐 거의 깨끗한 상태로 칩과 공구가 분리되는 것을 볼 수 있다. 또한 피복공구로 가공된 칩의 뒷면은 비교적 매끈한 반면 비피복공구로 가공된 칩은 매우 거친 것도 점착성과 관련된 것이라 볼 수 있다. 따라서 이와 같은 사실들은 점착마멸의 가능성을 강하게 나타내는 것이라 볼 수 있으며, 공구의 표면 특성이 공구와 피삭재 간의 점착정도에 많은 영향을 끼친다고 할 수 있다.

같은 맥락에서 경사면이 피복된 인서트로 가공할 때 절삭력이 낮게 측정된 것은 피복된 표면의 점착성이 낮아 마찰력이 감소된 때문인 것으로 여겨지며, 경사면이 피복되지 않은 경우는 칩과 공구와의 점착성이 크므로 마찰력이 증가하여 큰 절삭력이 측정된 것으로 사료된다. 피복층의 이와 같은 작용은 전단각을 약간 증가시켜 주전단 지역에서 칩 형성에 드는 힘이 감소될 가능성도 있는데, 칩 두께의 측정에서 약간의 전단각 증가가 관찰되었다.

5. 결 론

위에서 조사된 결과들을 토대로 다음과 같은 결론을 맺을 수 있다.

첫째, 피복층의 역할은 공구와 피삭재 사이의 점착성을 낮추어 점착 마멸을 억제시키는 것으로 나타났다. 둘째, 피복층은 마찰저항을 감소시켜 절삭력을 낮추는

것으로 관찰되었다.

셋째, 경사면 상의 피복층은 플랭크 마멸이 공구 선단으로 부터 성장되므로 그것을 어느 정도 저지하는 효과가 있다.

넷째, 피삭재가 탄소강인 경우 경계마멸을 감안할 때 다중피복공구가 가장 바람직한 공구로 관찰되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. Kalish, H. S., 1983, "Status Report : Cutting Tool Materials", Metal Progress, pp.21-25.
2. Turkovich, B.F., 1983, "On The Metallurgical/Material Science Problems in Machining", Annals of CIRP, Vol.32/2, pp.609-611.
3. Suh, N.P. and Sanghui, 1971, "Friction Characteristics of Oxide-Treated and Untreated Tungsten-Carbide Tools", Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, Vol.93, pp.455-460.
4. Dearnley, P.A. and Trent, E.M., 1982, "Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools", Metals Technology, Vol.9, pp.60-75.
5. Chubb, J.P. and Billingham, J., 1980, "Coated Cutting Tools-A study of wear Mechanisms in high Speed Machining", Wear, Vol.61, pp.283-293.
6. Trent, E.M., 1984, Metal Cutting, Butterworths.
7. Dixon, G., Wright, R.N. and Lee, M., 1985, "Processes Involved in The Wear of Cemented Carbide Tools, Wear, Vol.104, pp.157-171.
8. Trent, E.M., 1988, "Metal Cutting and The Tribology of Seizure : I Seizure in Metal Cutting", Wear, Vol.128, PP.29-45.
9. Hasting, W.F., 1967, A New Quick-Stop Device and Grid Technique for Metal Cutting Research", Annals of CIRP, Vol.15, pp.109-116.
10. Tonshoff, H.K., Brinksmeier, E. and Bartsch, S., 1987, "Notch Wear and Chemically Induced Wear in Cutting with Al₂O₃-Tools", Annals of CIRP, Vol.6, pp.537-541.