1290 大韓機械學會論文集 第 12 卷 第 6 號, pp. 1290~1295, 1988.

〈論 文〉

고속가공을 위한 절삭공구의 최적화

양 민 양*

(1988년 6월 4일 접수)

Optimization of Cutting Tool for High Speed Machining

Min Yang Yang

Key Words : High Speed Machining(高速加工), Abrasive Wear(硏削磨滅), Solution Wear(溶解磨滅), Tool Material(工具材), Ceramics(세라믹)

Abstract

Theoretical considerations in the development of new cutting tool materials for high speed machining is presented. The progressive wear of cutting tools is assumed to consist of the abrasive and solution components as major modes. Theoretical calculations of relative wear rates between various tool materials based on the two modes are possible using their hardness and solubility data. Assuming cementite as the major hard particles in machining steels, relative wear rates of possible tool materials were calculated. The results indicate that Al_2O_3 in oxides, HfN in nitrides and HfC in carbides are the optimal tool materials from the view point of mechanical and thermochemical wear resistance. And several methods for improving the fracture toughness of the above tool materials are suggested.

1. 서 론

최근들어 세계적인 무역경쟁으로 인하여 생산성 향상 및 원가절감이 산업체의 주된 목표로 등장됨에 따라 금속가공 분야에서도 다각도의 노력이 경주되고 있는바 그 중 한 방법으로서 고속절삭 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 고속가공이란 즉 가공속도를 높여 실 가공시간을 단축하자는 것으로서 특별히 전체 생산공정에서 절삭가공이 차지하는 비율이 크면 클수록 중요한 의미를 차지한다고 하겠다. 더우기 무인화공장을 목표로 하고 있는 생산시스템의 자동화 분야에서도 신뢰할 만한 성능으로 고속 가공을 할 수 있는 방법의 출현을 고대하고 있으므로 고속가공이란 경제적인 관점에서 뿐만 아니라 기술적인 측면에서도 시도할 만한 가치가 충분히 있다고 할 수 있다.

그런데 실험에 의해서 밝혀진 바로는 절삭가공시 공구와 공작물 간의 마찰로 인하여 온도상승이 심각하며, 특히 절삭속도에 민감하여 가공속도를 증가시키면 시킬수록 온도가 상승하여 결국에는 피삭재의 용융점에 접근하게 된다[2]. 그러므로 고속가공을 가능케하기 위해서는 이런 극한조건에서도 견디어낼 수 있는 공구재의 개발이 필수적이라 할 수 있다.

역사적으로 볼 때 금속의 절삭가공에 있어서 가공속도를 크게 향상시킬 수 있었던 것은 초경공구(cemented carbide)의 개발로 이루어졌다 할 수 있으며 그로 인한 금속가공분야의 생산성 향상은 매우 혁신적이었다고 할 수 있다. 그런데 이런 초경공구보다 더 빠른 속도로 가공을 할 수 있는 새로운 공구재의 개발에 대한 요구가 시급한데 그것

*정회원, 한국과학기술원 생산공학과

은 초경의 원료로 쓰이는 탄화물(carbide) 자체가 산화물(oxide)이나 질화물(nitride)보다 화학적 안정성이 낮을 뿐만 아니라 초경의 주요성분인 텅스텐(W)과 코발트(Co) 등이 공급이 원활치 않은 전략적인 물질이라는데 근거를 두고 있다.

종래의 절삭공구의 개발에 관하여 살펴보면 대부분이 경험과 직관에 의해서 이루어졌음을 알게 되는데 이는 공구의 마멸이라든지 또는 다른 파손양상에 대한 근본적인 이해가 부족하였다는 데 기인한다고 할 수 있으며 그 동안 이 방면에 대한 연구가 착실히 진척되어 이제는 절삭공구의 마멸에 대한 근본적인 이해와 더불어 이를 바탕으로 새로운 공구재의 개발에 대한 방향제시가 가능케 되었다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 공구마멸에 대한 정량적인 해석을 바탕으로 현대 산업사회의 주요소재인 강(steel)에 대한 최적 공구재를 선정하는 방법을 제시하므로서 앞으로의 공구재 개발에 대한 이론적인 접근을 시도하였다.

2. 공구의 마멸

절삭공구의 파손양상을 크게 세 가지로 분류하면 절삭가공중 공구와 피삭재와의 심한 마찰에 의하여 공구가 점진적으로 마멸되어 결국 공구가 무디어져 사용치 못하게 되는 경우, 공구에 갑자기 과도한 힘이 걸림으로 균열이 발생되어 공구의 일부가 파손되는 경우, 마지막으로 절삭가공시 발생된 열로 인하여 공구의 강성이 감소되고 소성변형이 일어나 공구의 기하학적 형태가 변하는 경우 등을 들 수 있다. 이들 중 급작스런 파손과 고온소성변형의 경우는 공구 및 절삭조건 등을 적절히 선정해 어느 정도 방지할 수 있는 것들인데 반해 점진적인 공구마멸의 경우는 정상적인 절삭상태에서 피할 수 없이 일어나는 현상이므로 더 큰 관심의 대상이 된다고 하겠다.

절삭가공중 발생되는 공구마멸은 여러가지 복합적인 현상의 결과이지만 이중 가장 큰 역할을 하는 것으로 연삭마멸(abrasive wear)과 용해마멸(solution wear)을 들 수 있다. 연삭마멸이란 한 물체가 상대적으로 경도가 낮은 물체의 표면을 연삭하여 마멸이 발생되는 것으로 경도의 차이가 나는 두 면이 접촉하여 마멸이 일어나는 이체연삭(two-body abrasion)과 두 물체 사이에 경한 입자가 침투해 마멸을 일으키는 삼체연삭(three-body abrasion)의 두 경우가 있게 된다. 이때 발생되는 마멸율(wear rate) $\dot{W}a$는 다음과 같이 표시될 수 있는데[3]

$$\dot{W}a = K\frac{P_n}{H_w}V \tag{1}$$

여기서 P_n은 물체간의 수직작용력이며, H_w는 마멸되는 물체의 경도, V는 두 물체의 상대속도이다. 그런데 삼체연삭의 경우 비례상수 K는 경한 입자의 기하학적 형태 뿐만 아니라 상대경도비에 의해서 크게 좌우된다. 실험에 의하면 K는 세 영역으로 구분되는데, H_a를 경입자의 경도라고 할 때 만일 $H_w < 0.8H_a$이면 K는 일정하고, $H_w > 1.25H_a$일 때는 K가 H_w^{-6}에 비례하여 그 중간 영역에서는 K가 $H_w^{-2.5}$에 비례하는 것으로 알려졌다[4].

그런데 우리가 공업재료로 사용하고 있는 금속내에는 여러 가지 이물질들이 들어있는 수가 있는데 이 중에는 금속의 강도를 높이기 위하여 인위적으로 만들어 넣는 경우도 있겠으나 제련과정에서 우연히 침투되는 경우도 있겠다. 그런데 절삭가공에서 문제가 되는 것은 이들 중 공구재의 경도와 견줄만한 경한 입자들로서 이들이 공구마멸을 일으키게 되며 이때의 마멸은 삼체연삭마멸의 형태를 취한다고 할 수 있다[5]. 이렇게 발생된 공구마멸의 양은 경입자의 크기, 모양, 숫자 등에 따라 영향을 받겠으나 주어진 피삭재에 대하여 그들의 분포상황이 비슷하다고 가정하면 중요한 것은 경입자와 공구재의 경도비(hardness ratio)라 할 수 있다. 일반적으로 재료의 경도는 온도가 상승할수록 감소하므로 바람직한 공구재로서는 절삭가공시 발생되는 열로 인하여 온도가 상승하여도 피삭재와의 상대경도비가 위험수준을 넘지 않는다면 연삭마멸은 크게 줄일 수 있을 것이다.

절삭공구의 마멸에는 연삭마멸과 같이 재료의 기계적 거동에 의하여 발생되는 마멸이 있는가 하면 가공 중 발생되는 많은 열로 인하여 재료의 열화학적 거동에 의해서도 마멸이 발생된다. 특히 공구의 경사면에 칩(chip)이 융착(seizure)현상을 일으키게 되면 높은 속도의 심한 변형에 의하여 많은 열이 발생하게 되고, 이 열로 인하여 융착된 칩 부분과 직접 접촉하고 있는 공구재의 원자들이 융착된 칩에 용해(solution)되어 칩과 함께 쓸려나가는 현상이 반복되므로 마멸이 발생하게 된다[6]. 이때 마멸은 열의 발생정도에 따라 심해지게 되며, 재료의 열화학적 안정성과 관련되어질 수 있다. 이런 관점

에서는 산화물이나 질화물이 탄화물보다 화학적으로 더 안정하므로 공구재로서 더 적합하다고 할 수 있으나 각종 피삭재에 대한 공구재의 화학적 안정성은 서로 간의 용해도를 검토해 보아야 알 수 있다. 각종 공구재의 용해도는 열화학적 평형상태로 가정하여 이론적으로 계산할 수 있는데 평형상태에서

$$\Delta G_{ij}=\Delta\bar{G}_i^M+\Delta\bar{G}_j^M \quad (2)$$

여기서 ΔG_{ij}는 공구재의 형성자유에너지(free energy of formation), $\Delta\bar{G}_i^M$는 성분 i의 상대부분몰을 용해자유에너지(relative partial molar free energy of solution)이며

$$\Delta\bar{G}_i^M=\Delta\bar{G}_i^{XS}+RTlnC_i \quad (3)$$

여기서 C_i는 성분 i의 농도, $\Delta\bar{G}_i^{XS}$는 성분 i의 상대부분몰 과다용해자유에너지(relative partial molar excess free energy of solution)이므로 일단 $\Delta\bar{G}_i^{XS}$의 값을 알 수 있다면 용해도를 계산할 수 있다. 그러므로 특정 피삭재에 대한 공구재 A_xB_y의 용해도는 다음과 같이 표시될 수 있다[6].

$$C_{AxBy}=\mathrm{Exp}\left\{-\frac{1}{x}\left\{\frac{\Delta G_{AxBy}-x\Delta\bar{G}_A^{XS}-y\Delta\bar{G}_B^{XS}-YRT\ ln\frac{y}{x}}{(x+y)RT}\right\}\right\} \quad (4)$$

여기서 C_{AxBy}는 피삭재에 대한 공구재의 화학적 용해도이며 R는 기체상수, T는 절대온도이다.

3. 탄소강의 절삭시 공구재의 최적화

피삭재가 탄소강인 경우 연삭형마멸을 일으킬 가능성이 큰 경입자는 세멘타이트(cementite)일 것으로 예측된다. 그러므로 세멘타이트와 각종 공구재의 온도에 따른 경도에 대한 자료가 있다면(부록 참조) 식 (1)을 이용하여 연삭형 공구마멸에 대한 공구재간의 상대마멸율을 계산할 수 있으며 Table 1은 TiC를 기준 공구로 정하여 얻어진 상대마멸율이다.

화학적 용해에 의한 공구 마멸의 경우도 공구재의 용해도가 식 (4)에 의해 예측될 수 있으므로, 이 계산에 필요한 공구재 성분의 페라이트에 대한 과다용해자유에너지의 자료가 있다면(부록 참조) 각종 공구재간의 상대마멸율은 다음 식 (5)를 사용하여 계산할 수 있을 것이다.

$$\frac{\dot{W}_{s_1}}{\dot{W}_{s_2}}=\frac{M_1C_1}{M_2C_2} \quad (5)$$

여기서 $\dot{W}_{s_i}$, M_i, C_i는 각각 화학적 용해에 의한 공구재 i의 마멸율, 몰체적(molar volume) 및 용

Table 1 Predicted abrasive wear rates relative to TiC at various temperatures

Tool materials	Temperature (K)		
	800	1000	1200
HfN	1.1	0.28	0.073
Al_2O_3	3.5	2.4	1.7
TiO_2	12	2.2	2.0
HfC	0.55	0.34	0.20
TiO	3.2	2.8	4.2
TiN	4.8	2.9	1.8
HfB_2	1.7	1.6	1.5
ZrC	1.0	0.79	0.61
TaC	1.2	1.0	1.3
TiC	1.0	1.0	1.0
NbC	3.3	2.2	1.4
TiB_2	0.82	0.89	0.97
Si_3N_4	0.22	0.03	0.009
WC	0.063	0.008	0.001
Mo_2C	79	110	55
SiC	0.014	0.004	0.004

Table 2 Predicted chemical solution wear rates relative to TiC at various temperatures

Tool materials	Temperature (K)		
	800	1000	1200
HfN	0.00004	0.0009	0.0000
Al_2O_3	0.00000	0.0000	0.0000
TiO_2	0.00000	0.0000	0.0000
HfC	0.015	0.035	0.056
TiO	0.00000	0.0000	0.0003
TiN	0.0018	0.0018	0.074
HfB_2	0.25	0.32	0.33
ZrC	0.24	0.36	0.38
TaC	1.2	1.1	0.89
TiC	1.0	1.0	1.0
NbC	2.5	1.9	1.4
TiB_2	8.5	5.3	3.5
Si_3N_4	300	250	200
WC	54000	5200	980
Mo_2C	170000	12000	1900
SiC	350000	24000	3700

해도이다. 다음 Table 2는 기준 공구재 TiC에 대한 상대마멸율을 나타낸 것이다.

이 결과들을 검토해 보면 연삭형 마멸의 관점에서 SiC, WC, Si_3N_4 등이 가장 우수한 것으로 나타났지만 탄소강의 가공시 화학적 불안정성이 대단히 큰 것으로 예측되었다. 화학적 안정성의 관점에서는 산화물계열이 매우 우수한 것으로 나타났으며 Al_2O_3의 경우 연삭형 마멸의 관점에서도 우수하여 좋은 공구재로 여겨진다. 탄화물계에서는 HfC, ZrC 등이 기계적, 화학적 안정성이 높아 내마멸성이 좋을 것으로 생각되며, 질화물계에서는 HfN, TiN 등이 TiC보다 화학적인 면에서 더 안정하지만 연삭형 마멸에 있어서 약간 열세임을 알 수 있다.

Table 3 Ratio of abrasive and solution wear for machining SM40 with TiC

Temperature (K)	800	1000	1200
Abrasive wear	0.962	0.083	0.026
Solution wear	0.038	0.917	0.974

이렇게 각 마멸의 형태에 있어서 기준공구재에 대한 상대마멸율을 알게 되면 다음과 같은 방법으로 연삭형 마멸과 용해형 마멸의 합인 전체마멸의 공구간 상대마멸율을 알 수 있다.

$$\frac{\dot{W}_1}{W_2}=K_a\left(\frac{\dot{W}_{1a}}{W_{2a}}\right)+K_s\left(\frac{\dot{W}_{1s}}{W_{2s}}\right) \tag{6}$$

$$K_a=\left(\frac{\dot{W}_{2a}}{W_2}\right),\quad K_s=\left(\frac{\dot{W}_{2s}}{W_2}\right)$$

여기서 K_a, K_s는 기준 공구의 전체마멸에 있어서 각 마멸형태가 차지하는 비율로서 기준 공구재가 TiC인 경우 각 절삭온도에 있어서 다음 Table 3과 같은 값을 갖는 것으로 알려져 있다[7]. 따라서 식 (4)를 이용하여 절삭온도에 있어서 전체상대마멸율을 예측할 수 있으며 Table 4에 그에 대한 결과가 나타나 있다.

전체마멸율의 관점에서 볼 때 고속가공시 발생되는 많은 열로 인하여 공구온도가 높은 경우에는 산화물계열에서 Al_2O_3가 질화물계열에서는 HfN, 탄화물계열에서는 HfC가 내마멸성이 가장 우수할 것으로 예측되었다.

그런데 여기서 한 가지 주목해야 할 것은 이들

Table 4 Predicted total wear rates relative to TiC at various temperatures with test results

Tool materials	Temperature (K)			Text results(μm/min)
	800	1000	1200	
HfN	1.0582	0.0242	0.0077	0.12
Al_2O_3	3.3670	0.2	0.0442	0.28
TiO_2	11.5440	0.1833	0.052	
HfC	0.5297	0.0604	0.0597	
TiO	3.0784	0.2333	0.1095	
TiN	4.6177	0.2582	0.1189	0.32
HfB_2	1.6449	0.4267	0.36	
ZrC	0.9711	0.3958	0.386	
TaC	1.2	1.0992	0.900	
TiC	1.0	1.0	1.0	0.87
NbC	3.2696	1.9250	1.4	
TiB_2	1.1118	4.9250	3.4342	
Si_3N_4	11.6	229	195	
WC	2052	4766	955	18.63
Mo_2C	6536	11009	1852	
SiC	13300	22000	3604	

Text conditions: Cutting speed : 180m/min
Feed : 0.2m/rev
Depth of cut : 1.0mm

세라믹 공구재들의 취성(brittlness)이라 할 수 있다. 이것은 세라믹계 대부분의 물질들이 갖고 있는 특성으로서 공구재로 사용하기 위해서는 이런 단점이 보완되어야 하겠다. 세라믹의 취성을 보완할 수 있는 몇 가지 방법을 소개하면 첫째로 인성(toughness)이 좋은 공구재 예를 들면 고속도공구강이나 초경공구 또는 서어멧(cermet) 공구등에 세라믹을 피복시켜 모재로부터는 인성을 피복층으로부터는 내마멸성의 장점을 취하여 상호보완하는 방법으로서 현재 몇 가지가 실용화되어 있다. 그래서 본 연구에서는 현재 상품화되어 있는 피복초경공구를 사용하여 SM40 기계구조용 탄소강재를 절삭실험하였다. 이때 발생된 공구의 경사면 마멸을 표면거칠기 측정기로 측정하였으며 그 결과가 Table 4의 우측에 나타나 있다. 예측된 결과와 실험결과가 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 두번째 방법으로는 세라믹의 취성이 세라믹 자체의 고유한 특성이기도 하지만 세라믹의 소결공정중 발생되는 기공(pore)으로 인하여 가중되므로 이 기공의 결함을 제거하기 위하여 열간등방성가압법(hot isostatic pressing)과 같은 공정을 이용하여 기공을 없애므로서 인성을 증대시키는 방법도 있다[8]. 셋째로는 복합재를 만들어 균열의 급작스런 성장을 저지시킴으로 파괴인성을 향상시키는 방법도 있는데 이 경우 세라믹/세라믹 복합재 또는 세라믹/금속 복합재의 조합이 가능하다. 세라믹/세라믹 복합재의 경우는 고온경도면에서는 우수하겠으나 인성면에서 충분한 효과를 거두기는 힘들 것으로 예상되며[9], 세라믹/금속 복합재의 경우는 초경공구에서와 같이 금속결합제에 의하여 세라믹 입자들이 미세하게 분포되어 있는 미시구조가 인성면에서 효과적이며, 이때 금속결합제는 세라믹입자와 충분한 결합이 이루어져야 한다[10]

4. 결 론

질삭공구의 마멸거동에서 가장 큰 역할을 하는 연삭형 마멸와 용해형 마멸이론을 근간으로 한 최적 공구재의 선정에 대한 방법이 제시되었으며 실례로서 피삭재가 탄소강인 경우 공구재료서 산화물계에서는 Al_2O_3, 질화물계에서는 HfN, 탄화물계에서는 HfC가 최적일 것으로 예측되었다. 이들의 경우 고온경도면에서도 우수하지만 탄소강에 대한 화학적 안정성의 면에서도 타 공구재보다 월등 안정한 것으로 나타나, 고속가공시 발생되는 많은 열로 인한 높은 공구온도에서 내마모성이 우수할 것으로 판정되었다. 세라믹계인 이들의 취성을 보완하기 위하여 몇 가지 방법이 제시되었으며 이런 방법으로 피삭재의 종류별 절삭형태에 따른 다양한 공구개발이 가능할 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

(1) R. Komanduri, T.A. Schroeder, B.F. Von Turkovich and D.G. Flow, 1982, "On the Catastrophic Shear Instability in the High Speed Machining of an AISI 4340 Steel", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 104, pp. 121~131.

(2) J.F. Huet and B.M. Kramer, 1982, "The Wear of Ceramic Tools", Proc. of 10th NAMRC, pp. 297~304.

(3) F.A. McClintock and A.S. Argon, 1966, "Mechanical Behavior of Materials", Addison Wesley.

(4) E. Rabinowicz, 1977, "Abrasive Wear Resistance As a Material Test", Lubrication Eng., Vol. 33, pp. 378~381.

(5) S. Ramalingam, 1981, "Abrasive Wear in Machining Experiments with Materials of Controlled Microstructure", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 103, pp. 151~156.

(6) B.M. Kramer and N.P. Suh, 1980, "Tool Wear by Solution, A Quantitative Understanding", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 102, pp. 303~309.

(7) B.M. Kramer, 1980, "A Comprehensive Tool Wear Model", Annals of CIRP, Vol. 35, pp. 67~70.

(8) E. Ladner, 1975, "Isostatic Hot Pressing applied to Cemented carbides", Powder Metallurgy, Vol. 18, pp. 277~283.

(9) R.P. Wahi and B. Ilschner, 1980, Fracture Behavior of Composites based on Al_2O_3-TiC", J. of Mat. Sci. Vol. 15, pp. 875~885.

(10) M.Y. Yang and B.M. Kramer, 1988, "Toughening of Ceramics through the Development of Alumina-Based Cemented Oxide", Advanced Ceramic Materials, Vol. 3, pp. 341~344.

(11) R.D. Koester and D.P. Moak, 1967, "Hot Hardness of Selected Borides, Oxides, and Carbides to 1900°C", J. of American Ceramic Society, Vol. 50, p. 290.

(12) A.G. Atkins and D. Tabor, 1966, "Hardness and Deformation Properties of Solids at Very High Temperatures", Proc. of the Royal Society of London, Vol. 292, p. 441.

(13) Y. Kumashiro et al., 1977, "The Micro-Vickers Hardness of TiC Single Crystals to 1500°C", J. of Mat. Sci. Vol. 12, p. 595.
(14) M. Lee, 1983, "High Temperature Hardness of Tungsten Carbide", Met. Trans. Vol. 14A, p. 1625.
(15) J. Lankford, 1983, "Comparative Study of the Temperature Dependence of Hardness and Compressive Strength in Ceramics", J. of Mat. Sci. Vol. 18, p. 1666.
(16) J.J. Oakes, 1983, "A Comparative Evaluation of HfN, Al_2O_3, TiN and TiC Coatings on Cemented Carbide Tools", Thin Solid Films, Vol. 107, p. 159, 1983.
(17) J.J. Gilman, 1970, "Hardness of Carbides and Other Refractory Hard Metals", J. of Applied Physics, Vol. 41, p. 1664.
(18) W.A. Sanders and H.B. Probst, 1966, "Hardness of Five Borides at 1625°C", J. of the American Ceramics Society, Vol. 49, p. 231.
(19) L. Bsenko and T. Lundstrom, 1974, "The High Temperature Hardness of ZrB_2 and HfB_2", J. of the Less Common Metals, Vol. 34, p. 273.

부 록

1. Hot Hardness Data (kg/mm^2)[11-19]

Tool materials	Temperature (K)		
	800	1000	1200
HfN	1240	1070	900
Al_2O_3	1030	760	560
TiO_2	910	790	520
HfC	1420	1030	770
TiO	1090	750	470
TiN	980	740	550
HfB_2	1170	820	570
ZrC	1260	910	660
TaC	1200	870	590
TiC	1260	870	610
NbC	1070	790	580
TiB_2	1290	890	630
Si_3N_4	1620	1500	1380
WC	1940	1810	1680
Mo_2C	670	430	280
SiC	2380	1940	1590
Fe_3C	510	370	260

2. Excess Free Energies of Solution of Tool Constituents in Ferrite[6]

Tool constituent	Excess free energy (Cal/mole)
Ti	−6900
Zr	−5000
Hf	−2100
Nb	−100
Ta	−200
Mo	−5000
W	−7100
Si	−16700
Al	−10700
B	−2100
C	+7600
N	+5700
O	−12600