

난삭재 가공기술 및 연구동향



오석형

군산대학교 공과대학
기계공학부 교수

1. 서론

최근 우주항공, 원자력 및 해양산업 분야의 발전과 더불어 항공기, 미사일, 해상 구조물 등의 재료로 耐熱性, 耐蝕性, 耐磨耗性이 우수한 신소재의 사용이 급증하고 있다. 이들 재료의 대부분이 기존의 가공법으로서는 가공의 정밀도 및 절삭성(공구수명)이 나쁘게 되어 가공에 어려움이 있다. 그러나 수요자의 필요에 의하여 신소재가 끊임없이 개발되고, 개발된 신소재를 가공하기 위한 공작기계 및 공구의 개발을 비롯한 기술의 필요성이 동반되기 때문에 신소재가 계속 개발되는 한 난삭재는 있기 마련이다.

이러한 재료의 일반적인 가공 특성은 물리적 화학적 특징 때문에 가공 생산에 어려움이 동반된다. 또한 난삭재의 종류도 매우 다양하여 그의 가공에 대한 학문적인 체계화가 매우 어렵고 복잡하다. 그러나 이러한 신소재의 가공 및 공작기계(공구포함)에 대한 연구는 산업의 발전과 함께 끊임없이 요구되고 있는 중요한 연구분야가 되고 있다.

한가지 예를 들면 우리가 일반적으로 사용하고 있는 알

루미늄 합금의 경우 사용하고자 하는 목적에 따라 난삭재가 될 수도 있고 그렇지 않을 경우도 있다. 일반적인 가공의 경우 재료의 특성이(기계적인 강도나 경도 및 열전도도 등) 잘 알려져 있어서 가공하기 쉬운 재료로 알려져 있다. 그러나 이 재료를 가공표면의 조도측면에서 볼 때 정밀가공하기에는 매우 어려운 소재이다(VCR의 head-drum 가공). 이와 같이 난삭재의 정의 또한 다양하게 구분해야 하는 것이 현실이다.

그리하여 신소재의 물리적 성질과 기계적 성질에서 야기되는 절삭성을 파악하여 기계가공의 목적에 필요한 정보를 제공하기 위하여 부단한 연구가 요구된다. 이에 따른 연구는 우리나라의 공작기계 및 기계가공 발달을 위해서 필수적인 과제라고 볼 수 있다.

이에 대한 연구동향을 살펴보면, R. F. Recht¹⁾는 티타늄과 같은 소재를 절삭할 경우 급격한 소성변형이 일어나며 불안정한 상태가 되어 단열전단이 발생하는데 이것은 피삭재의 열확산률(약 강의 1/6)이 낮아 국부적인 온도상승으로 단열전단이 발생하기 때문이라 하였다. Nakayam^{2,3)}

는 알루미늄이나 스테인레스강 또는 티타늄 같은 연성 재료를 경사각이 작은 공구로 절삭할 경우 피삭재가 취화되어 취성파괴가 발생되며 피삭재가 취화되면 절삭력이 감소되며 가공표면의 조도가 매우 개선된다고 보고하고 있다. 또한 G. Carro Cao⁴⁾는 난삭재 가공시 기계적인 성질 및 절삭계의 강성에 의해 진동이 발생하며 이로 인한 정밀 가공에 문제점을 주장하고 있으며, Komanduri 등^{5,6,7)}은 티타늄 합금, SUS-304 등의 절삭에서 공구마모 및 피삭재의 금속학적인 특성에 관한 연구를 수행하여 왔다. N. Zlatin 등⁸⁾은 티타늄 합금의 절삭할 경우 공구와 칩의 접촉면적(강의 1/3~1/2)이 작고, 절삭온도가 매우 높고 공구마모가 급격히 진행되어 극히 낮은 절삭속도를 제외하고는 절삭에 어려움이 있다고 보고하고 있다. M. C. Shaw 등^{9,10)}은 제 1전단영역에서 발생된 열이 전단 band에 집중되며 열전도도의 불량 및 열 확산에 그 원인이 있다고 지적하고 있다.

2. 난삭재의 종류 및 기계 가공 특성

난삭재는 생산제품의 사용목적, 피삭재의 기계적, 화학적 성질 및 가공방법, 가공에 사용되는 공구 및 공작기계 등에 의해 결정된다고 본다. 가공치수의 정밀성을 고려할 때, 일반적으로 연한 금속(황동, 구리, 알루미늄 및 알루미늄 합금)을 가공할 때 절삭성(표면조도)이 매우 좋지 않다. 이는 가공시 필요한 에너지는 적은 반면에 가공 후의 표면 및 정도에 많은 어려움이 있는 난삭재이다.

요즘 산업설비에 주로 많이 사용되고 있는 스테인레스강의 경우 종류 또한 다양하며 가공에 어려움이 많은 재료로 잘 알려져 있다. 스테인레스강이란 철에 상당량의 크롬(Cr, 보통 12% 이상)을 넣어서 녹이 잘 슬지 않도록 만들어진 강으로 여기에 필요에 따라 탄소(C), 니켈(Ni), 규소(Si), 몰리브덴(Mo) 등을 소량씩 포함하고 있는 복잡한 성분을 가지고 있는 합금강이다. 이 강의 특징은 가공 표면이 미려하고 내식성이 우수하며(일반 강의 수백~수천 배 이상) 내마모성이 좋으며 기계적인 강도가 크며 저온 특성이 우수하며 내화성, 내열성 및 내산화성이 크기 때문

에 산업설비에 많이 사용되는 가공재료 이지만 가공에 어려움이 수반되는 것이 단점이다. 이의 가공 및 이에 적절한 공구재료 및 공구(기하학)의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

또한 21세기의 신비의 금속이라 일컫는 티타늄 및 그 합금은 내열성, 내식성, 내마모성이 우수하고 열전도도와 전기전도도가 다른 금속에 비하여 낮아 우주왕복선, 항공기, 미사일, 해상구조물, 원자로 및 열교환기 등에 널리 사용되는 재료이다. 특히 티타늄합금의 경우 난삭재가공의 연구에서 대부분을 차지하고 있을 정도이다. 이 가공재료 또한 기계적인 성질 및 화학적인 성질이 가공하기에 매우 어렵고 재료의 화학적인 성분에 의해 공구와의 화학반응에 의한 마모를 고려해야하기 때문에 이의 가공에 대한 연구의 대상이 되고 있다.

3. 난삭재의 절삭기구 해석

절삭기구에 관한 연구는 절삭역학을 기본으로 다양한 해석방법이 동원되고 있다. 해석에 필요한 신기술의 개발됨에 따라 기존의 역학 적인 해석뿐만 아니라 첨단 장비를 동

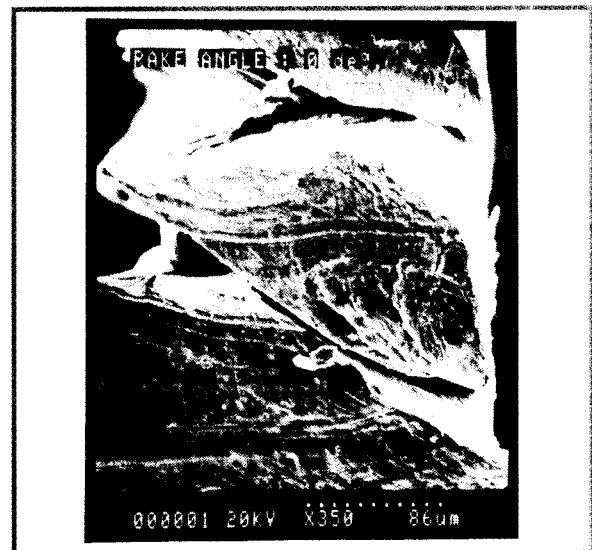


그림 1. Chip section

원하여 절삭기구해석을 행하고 있다. SEM을 이용한 마이크로 가공 해석, 초고속 카메라를 이용한 segment 생성 과정을 분석하여 절삭에 관련된 많은 정보를 얻고 있다. 여기에 티타늄 합금의 절삭과정을 SEM을 이용한 연구의 한 예를 보인다.

티타늄 합금등의 금속을 절삭할 때 그림 1과 같은 칩이 발생하게 되는데 이 발생과정을 모델화한 것으로서 형성되고 있는 segment와 이미 형성된 기존의 segment 사이에서 압착(upsetting)으로 인하여 국부적인 심한 전단이 이루어지며, 이것은 주로 제 1전단영역(primary shear zone)에서 전단 band가 점진적으로 형성되기 때문인 것으로 보인다. 칩의 형성과정을 다음과 같이 크게 5단계로 분류할 수 있다.

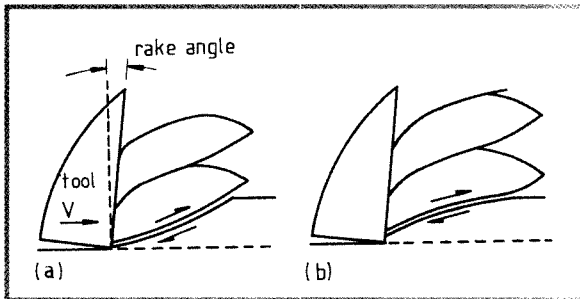


그림 2. (a-b)

1 단계 : 그림 2(a)에서 공구가 진행함에 따라 공구 전방의 제 1전단영역에서 응력의 축적은 형성되고 있는 segment와 이전의 segment와의 상호 압착작용으로 이루어지고, 이때 발생한 응력 때문에 절삭저항은 서서히 증가하게 되고 가공물에 전단 band가 유발되며, 힘의 상호 작용으로 인하여 band가 형성(초기 segment)된다. 이것이 자유표면까지 전파되고, band의 생성에 의한 발생 열이 전단면을 통하여 유동하게 된다. 이 경우 전단영역에는 소성적인 불안정이 뒤따른다. 그리고 전단 band가 가공표면에 이를 때까지 아래쪽으로 오목한 곡선모양을 나타낸다.

2 단계 : 그림 2(b)에서 계속된 공구진행으로 말미암아

형성된 전단 band는 점점 변화되고, 이때 발생되고 있는 칩의 band에 작은 변형을 주게 된다. 또한 전에 생성된 segment에 영향을 주어 미끄럼이 발생하고, 형성되고 있는 segment와 이전 segment사이에서 힘의 평형관계로 인하여 자유표면에 ramp가 형성되기 시작한다. 이때 공구의 날끝(tip)에 인접한 전단 band에서 열의 유동이 있게되는데 피삭재의 열전도도가 불량하기 때문에 열의 대부분은 공구에 전도된다.

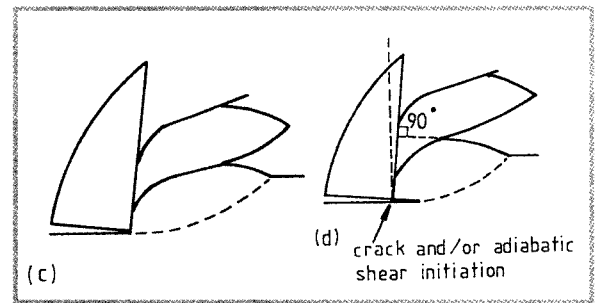


그림 2. (c-d)

3 단계 : 그림 2(c)에서 ramp가 형성됨에 따라 segment는 공구면을 따라 유동하며 이때 제 2전단영역(secondary shear zone)에서 칩과 공구 사이의 심한 마찰로 인하여 발생한 대부분의 마찰열은 칩으로 빠져나가거나 일부는 공구로 전도되어 공구면에 열의 축적이 있게 되고, 계속된 공구 진행으로 말미암아 비로소 전단면이 이루어지며 완전한 ramp가 형성되고 공구와 칩의 접촉길이는 점점 증가되며 절삭저항은 계속 증가하게 된다.

4 단계 : 그림 2(d)에서 계속된 공구진행과 더불어 공구면을 칩이 흘러감에 따라 공구와 칩 사이의 압착이 점점 증가되며 공구면에 접한 segment 부분이 평편(flattening)해지며 말기 segment가 형성되고 칩 segment의 ramp부분의 점진적인 부풀음(bulging)이 있게 되어 ramp의 형성이 완료되고, 이미 형성된 segment사이의

성호 밀림에 의해 미끄럼이 이루어지고 절삭저항은 빠른 속도로 감소하게 된다.

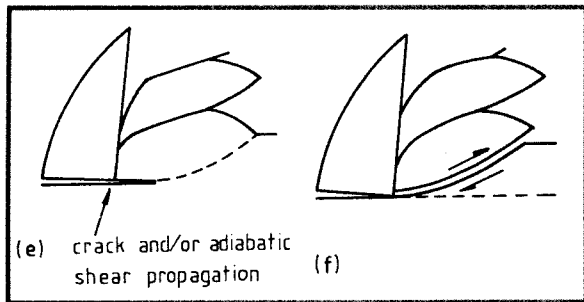


그림 2. (e-f)

5 단계 : 그림 2(e)에서 새로운 segment가 환성되기 이전에 제 1전단영역과 공구-칩의 접촉면 사이에 약간의 변형을 주고 segment와 segment사이의 미끄럼을 멈추게 된다. 이때 절삭저항은 최소가 되며 다음 새로운 segment를 형성하며 그림 2(f)에서와 같이 위의 과정을 반복하게 된다.

또한 급정지장치를 이용하여 ramp의 형성과정과 칩의 발생과정을 그림 3의 SEM사진을 통하여 분석하였는데 이

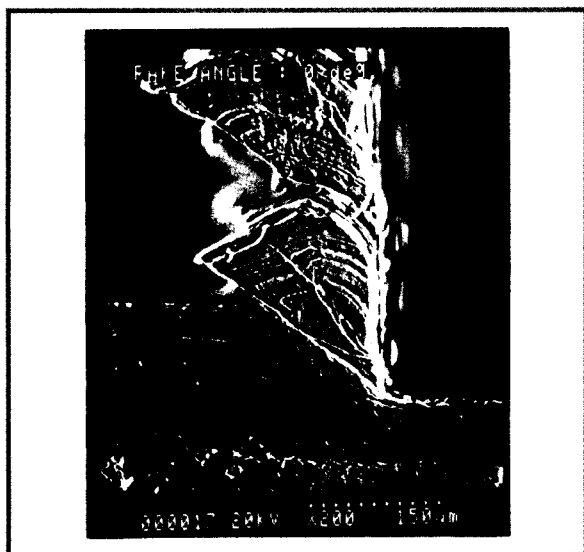


그림 3. SEM micrograph of workpiece cut in a quick-stop device

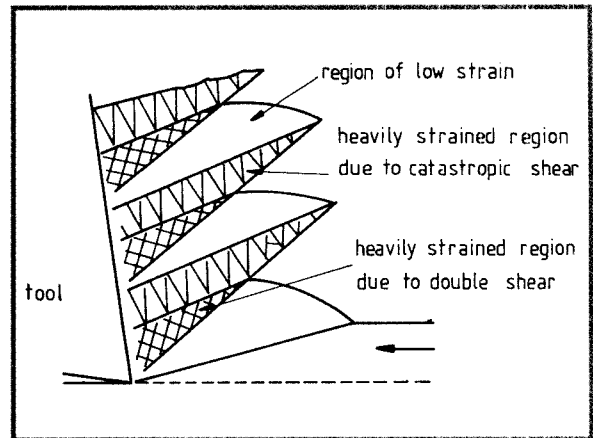


그림 4. Schematic representation of the deformation pattern in the chip

과정은 연속형 칩의 발생과정과는 판이한 것으로서 칩의 형성과정을 보이고 있다.

그림 4는 SEM사진이 관찰로부터 segment 각 부위의 변형정도를 도식적으로 나타낸 것이며 제 1전단영역에서의 전단에 의한 심함 전단변형과, 칩 segment의 부풀음(bulging)과정 동안에 다시 심한 변형이 일어난다.

이와 같이 가공시 칩의 형성기구 및 발생기구를 해석하여 절삭력이나 절삭력 변동에 따른 진동, 가공시 발생하는 열의 유동특성 등을 고려하여 절삭성을 개선시킬 수 있는 방법을 모색하는 연구가 진행되고 있다.

4. 난삭재의 가공특성

① 절삭 조건의 영향

그림 5는 6061-T6 알루미늄 합금을 선반 가공 할때 절삭조건인 세장비(slenderness ratio; t/f)의 변화에 따른 표면조도의 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림에서는 세장비가 증가함에 따라 표면 조도가 개선됨을 알 수 있다. 이는 같은 단면적을 가공할 경우(가공시간은 동일함) 세장비를 크게 하는 것이 알루미늄 합금과 같은 연성의 난삭재 가공에 유리한 것을 알 수 있다. 이는 세장비가 증가(이송의 감소)함에 따라 표면조도가 감소하는 경향을 보이고 있다.

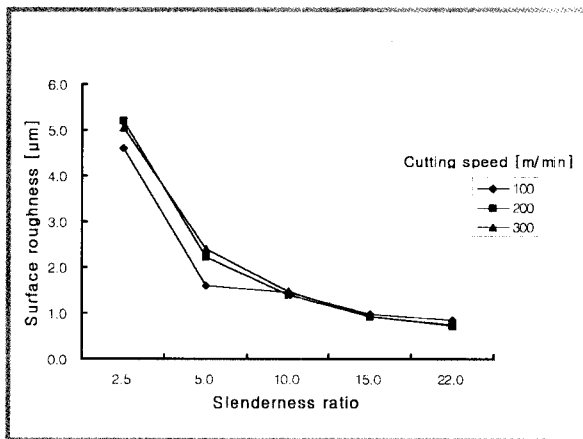


그림 5. Surface roughness vs slenderness ratio

② 공구 기하학의 영향

일반적인 쾌삭강의 가공에서 발생하는 칩의 형태는 연속형이며, 전단각(share angle)이 큰 경우가 절삭성(절삭저항 및 표면조도)이 좋은 것으로 판정한다. R. Komanduri 등은 난삭재 가공시 칩의 발생기구 및 발생열의 특성을 고려하여 공구기하학의 변화가 공구수명 등에 큰 영향을 미칠 것이라고 보고한바 있다. Table 1은 공구기하학의 변화에 대하여 절삭기구의 변화를 나타낸 것이다. 칩 segment의 형성주기는 발생하는 칩의 형태와 관련이 있다. 경사각이 -10° 에서 여유각의 변화에 따른 segment의 형성주파수는 여유각이 6° 에서 10° 로 변할 때 약 20%, 경사각이 -17° 인 경우에 여유각이 6° 에서 17° 로 변할 때 약 10%로 작아지고 공구경사면에 대한 마찰각도 감소하여 절삭저항 및 절삭기구의 관점에서 절삭성이 개선됨을 볼 수 있다. 배분력이 주절삭력보다 크며 절삭저항의 변동이 심한 것으로 미루어 진동절삭의 타당성을 추정할 수 있다. 이렇게 함으로써 절삭력 변동에 따른 진동의 영향을 감소시킬 수 있는 방법을 모색하고 이에 대응하는 적절한 제어기구를 설계하여 가공의 문제점을 해결하는 연구가 행하여지고 있다. 또한 절삭력 관점에서 전단각이 증가함에 따라 절삭력이 감소하고

③ 공구 재료 및 가공법의 영향

최근 난삭재 가공 및 공구수명을 크게 하기 위한 공구재

Table 1. Variation of cutting mechanism with tool geometry(workpiece : Ti-6Al-4V; cutting speed : 0.342 m/min; depth of cut : 0.1mm;)

경사각	-10	-10	-17	-17
여유각	6	10	6	17
segment (Hz)	100	80	75	68
Fc (Kg/mm ²)	356	343	452	365
전단각(°)	25	31	14	18
마찰각(°)	27.1	26.3	26.2	21.9
RMS-Fc (Kg)	4.2	5.0	4.2	6.0
RMS-Ft (Kg)	1.8	3.9	2.2	4.0

료 분야에서는 공구의 성능을 향상시키기 위해 나노분말(nano-powder)을 이용하며 경사기능합금(FGM)기술의 응용이 확대되고 있다.

코팅기술분야에서는 신소재를 이용한 박막의 물성 및 공구수명 향상이 요구되고 있으며 PVD 코팅제품 및 diamond, DLC 코팅의 응용분야가 확대되고 있다. 공구형상분야에서는 칩브레이크의 경우 3차원 저저항형에 의한 절미 중심의 인선, 생산성 향상에 따른 고이송화를 위한 방향으로 발전해 나갈 것으로 기대된다. 특히 절삭공구의 제품분야에서는 기능의 다양화에 의한 복합가공, 클램핑방식의 스크류언 타입 확대, 내구성 향상 및 fool-proof화, 설 계구조화로 이어질 것으로 예상된다. 이와 같이 과거에 생산된 공구를 이용하여 가공하면 난삭재로 인식된 재료가 새로운 가공법이나 재료로 만든 공구를 사용하면 가공이 쉬운 경우도 발생한다. 이는 일반적인 난삭재 가공의 해법으로 비용측면에서 비효율적이며 많은 시간이 요하는 것이 단점이다.

스테인레스강은 금속 조직학적으로 austenite 계와 martensite계, 그리고 ferrite가 있으나, 이중 austenite 계열에 속하는 300 여종의 금속을 일반적으로 난삭재라고 하며 다음과 같은 가공의 특징이 있다. 재료의 기계적인 성질로 인하여 가공경화가 매우 크며, burr의 발생이 쉽기 때문에 경계마모나 chipping이 발생되기 쉽다. 또한 티타늄과 마찬가지로 열전도율이 좋지 않아 공구의 인선 온도가 높기 때문에 공구마모가 가공이 시작하여 짧은 시간 안에 마모되어 정밀가공에 문제점이 발생하고 열에 의한 용착이 쉽기 때문에 인선에 미소 chipping이 잘 발생하여

가공면의 조도가 현저히 나쁘게 된다. 이러한 스테인레스강의 절삭에서 내치핑성 및 내용착성 향상을 위한 PVD 코팅을 적용하고 내산화성이 우수한 TiAlN 박막 적용으로 건식가공에서도 우수한 성능을 발휘하는 새로운 공구가 개발되고 있으며 특히 신소재와 신박막의 결합을 통한 탁월한 성능을 나타내는 공구도 개발하고 있다. 특히 스테인레스강은 수요가 많기 때문에 새로운 공구재료 및 공구 제조법이 활발히 연구되고 있다.

④ 공구마모 및 발생열의 영향

그림 6은 SUS 304의 선삭에서 crater 마모와 groove 마모가 성장되고 있는 과정을 profile projector를 사용하여 합성하여 나타낸 것이다. 등고선도에서 확인할 수 있는 바와 같이 groove마모가 급격하게 성장하면서 마모의 진행방향이 절삭인선 쪽으로 진행하기 때문에 가공물과 접촉하면서 플랭크면의 주절인부를 점점 감소시키게 된다. 그리고 스테인레스강 가공시 칩의 발생기구를 보면 비틀림이 생김과 동시에 칩이 높은 열과 절삭력에 의해 가공 경화되어 경도가 증가하고 공구 인선부의 절입경계부 상당부분이 마모(groove wear)가 발생하고 칩은 강인하기 때문에 구부러지기 어렵다. 따라서 칩의 처리가 어렵게 되어 칩의 경계부를 따라 chipping이 발생하기가 쉽다. 또한 절삭력이 크고 절삭력의 변동이 크기 때문에, 절삭동력이 증대하여 절인에 집중력이 결려 공구손상을 촉진시킨다. 따라서 절

삭인 부위를 약화시키기 때문에 플랭크면이 좁아지게 되고, 높은 절삭열 및 절삭저항에 대한 강도의 약화로 인하여 플랭크마모가 심화되거나 파손으로 진전된다. 따라서 groove마모가 수명한계에 도달하기 전에 다른 종류의 마모(주로 crater마모)에 영향을 준다. 특히 절삭깊이가 작은 경우 마찰마모가 발생하여 공구수명을 저하시키므로 절입 깊이를 조절하는 것이 공구수명에 효과적이다.

일반적으로 절삭시 제 1전단영역에서 발생하는 절삭열은 70%이상 칩으로 배출된다. 그러나 티타늄합금이나 스테인레스강의 경우처럼 열전도율이 낮은 경우에는 칩의 전단면을 따라 공구 인선쪽으로 열이 전도되어 유동하게 된다. 또한 절삭력 증대와 더불어 인선온도를 상승시켜 공구를 소성 변형시키고 마모에 이르게 된다.

그림 7은 스테인레스강의 선삭에서 경사면 온도 측정값을 기준으로 FEM 해석을 이용하여 isotherm pattern으로 나타낸 그림이다. 경사면 상의 온도분포를 검토해 보면, 절인 부위의 온도는 923℃로 나타남을 볼 수 있다. 이는 일반적인 피삭재의 절삭과정에서는 절인에서 어느 정도 떨어진 부근에서 최고온도가 나타나는 경우와는 차이가 있는 것으로 절인 부근에서 온도가 최고점에 이르는 것을 알 수 있다. 이는 앞의 마모의 등고선도 경향이 유사한 것으로, 이 사실로부터 절삭온도가 공구의 고온 경도를 약화시킬 정도까지 이르게 되면 절삭인 부근에서 공구마모가 진전된다는 것을 알 수 있다.

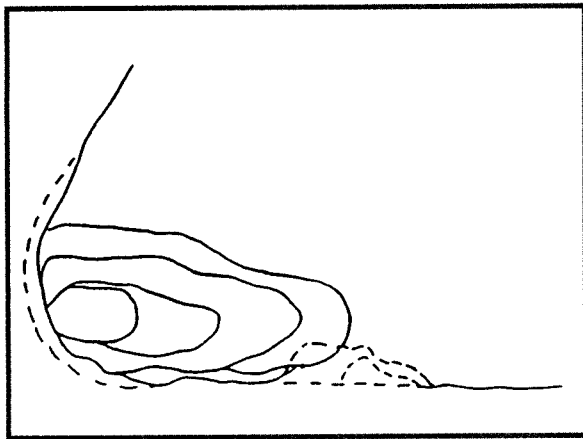


그림 6. Contour map of crater($\alpha=6^\circ$, $V=120\text{m/min}$, $d=0.7\text{mm}$, $f=0.09\text{mm/rev}$)

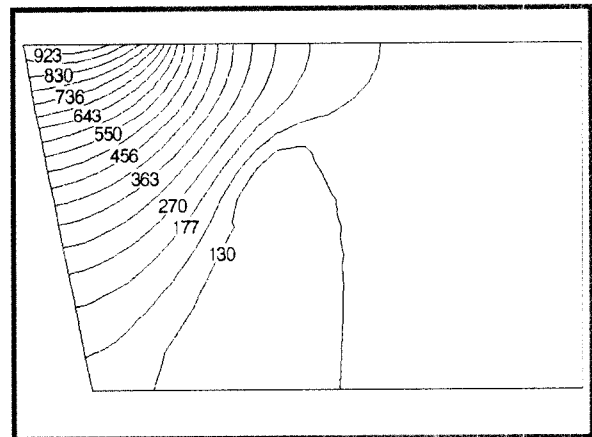


그림 7. Isotherm patterns in tool by FEM analysis($\alpha=6^\circ$, $V=165\text{m/min}$, $d=0.7\text{mm}$, $f=0.25\text{mm/rev}$)

또 티타늄합금의 경우는 스테인레스강 보다도 인선에 더 근접한 지점에서 최고온도 분포를 나타내는 경향을 보인다. 이는 가공재료의 열전도도와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.

N. Zlatin 및 Rose-Spick의 이론에 의하면 난삭재를 가공할 때는 칩의 생성기구학 적으로 공구면에서의 마찰은 상대적으로 작으며 급정지장치에서 채취한 칩의 관찰해 보면 공구와 칩의 접촉길이가 작기 때문에 공구 경사면의 인선부에 응력이 집중하며 이로 인해 발생된 소성변형시 발생하는 열이 인선부근에서 가장 높다는 것을 알 수 있다.

⑤ 기타

새로운 기술의 발전과 더불어 공작기계 및 가공분야에도 이를 이용한 난삭재 가공법에 관한 연구가 진행되고 있다. 이에 대한 최근의 연구는 고속절삭(high speed machining)법이다. 고속절삭에 필요한 공작기계의 정밀성 및 강성은 가공시 발생하는 진동이나 열변형을 충분히 극복할 수 있기에 가능하다. 또, 저온절삭법이다. 이는 난삭재 가공시 발생하는 열의 문제점 및 가공재의 열적인 특성을 고려하여 이에 상응하는 가공조건(저온상태)에서 가공을 수행함으로 난삭재를 가공할 수 있게 하였다. 그 외에 화학적인 가공법이다. 이는 기계가공으로는 극복하기 힘든 경우에 소재의 화학적인 반응특성을 이용하여 가공하는 방법을 의미한다. 이는 성형이나 코팅과 같이 발상의 전환으로 제조방법의 바꿈으로서 소성가공법이 아닌 또 다른 가공법에 의하는 경우도 있다.

4. G. Carro Cao, "Cutting Phenomena Interpretation in Machine-workpiece-Tool System", Ann, CIRP, 1, 20, p. 25 (1971)
5. R. Komanduri and W. R. Reed, Jr, "Evaluation of carbide grades and a new cutting geometry for machining titanium alloys", p. 113~123 Wear 92 (1983).
6. P. D. Hartung, B. M. Kramer and B. F. Von Turkovich, "Tool wear in titanium machining" vol 31, p. 75~80 (1971)
7. Ueda, "Influence of Saw-toothed Chip Formation on Tool Wear", p.512~517 (1980)
8. Zlatin N., "Productivity Aspects of Aerospace Products with Regard to Machinability", ASTME, (1967).
9. M. C. Shaw, S. O. Dirke, P. A. Smith, N. H. Cook, E. G. Loewen and C. T. YANG, "Machining titanium", MIT Rep. (1954).
10. B. F. Von Turkovich, "On a class of thermo-mechanical process during rapid plastic deformation" Ann, CIRP, 21, 15, (1972)
11. Y. K. Kwon, "Characteristics of Tool Wear and Cutting Temperature in Machining of SUS 304", KSPE, Vol. 11-1, pp. 71-79, (1994).
12. 서남섭, 금속절삭이론, (1988).

참고 문헌

1. R. F. Recht, "Catastrophic Thermoplastic Shear" J. Apple, Mech., ASME, 2, 31, p.189(1964)
2. Kazuo Nakayama, "The formation of SAW-TOOTHED CHIP in metal cutting". p.572~577, 43 (1988)
3. Kazuo Nakayama, "Machining Characteristics of Hard Materials", Ann, CIRP, 37, 1, p. 89~92(1988)