

난삭재의 극저온절삭에서의 절삭 특성에 관한 연구

김 칠 수*, 오 선 세**, 임 영 호***

A Study on the Cutting Characteristics of SCM440, SNCM21, STS 304 in Cryogenic Cutting(1st Report)

Chill-Su Kim*, Sun-Sae Oh**, Young-Ho Lim***

ABSTRACT

We experimented on cutting characteristics-cutting force, behavior of cutting temperature, surface roughness, behavior of chips-under low temperature, which generated by liquid nitrogen (77K). The workpieces were freezed to -195°C and liquid nitrogen was also sprinkled on cutting area in order to increase the efficiency of machining in low temperature. The workpiece was became to -195°C in 5 minutes, and cutting temperature in CC was lower about 170°C than NC. The cutting force trended to increase slightly in cooled cutting, but chip thickness was decreased, shear angle was however increased. The form of chips was in good conditions of long or short tubular chips in CC. In CC surface roughness of workpiece was better than NC. In NC surface hardness of chips trended to increase according to increasing of cutting speed, but in CC it trended to decrease. The power spectrum of vertical cutting force trended to increase according to increasing of feed, and in CC it was higher than NC.

Key Words : NC(Normal condition), CC(Cooled concition)

1. 서 론

최근 자동차 및 선박산업, 항공기산업, 원자력산업등 여러분야에서 성능 및 품질이 우수한 부품이 절실하게 요구되며 또한 고강도, 고장력, 내열, 내식, 내마모등의 특성을 가지는 고성능 부품을 사용하는 추세가 급진되고 있는 실정에 있다. 그러나 이러한 소재들은 대부분이 난삭재로서, 절삭가공에서 발생하는 절삭온도에 의

해 가공경화현상이 발생되며 공구의 마멸이나 수명단축을 초래하는 요인이 되고 있다. 난삭재의 가공은 재료에 따라 그 최적조건이나 가공방법이 다르므로 일률적으로 해석하여 정립할 수는 없지만 각 재료에 따른 절삭성을 파악하는 것은 중요한 과제라 할 수 있다.

현재까지 난삭재의 절삭가공에 대한 연구가(1-8) 많이 발표된 바 있으나, 이와같은 연구들은 거의 대부분 난삭재의 절삭성을 향상시키기 위하여, 세라믹 공구등을

* 중경공업전문대학 기계설계과

** 대전기능대학 CAD/CAM과

*** 숭실대학교 기계공학과

이용한 방법으로서 절삭공구의 마멸특성이나 칩의형상, 그리고 공구의 형상변화등에 관한 보고이며, 이와같은 연구에서도 역시 절삭온도에 대한 문제가 제기되고 있는 실정이다.

또한 일부 연구결과(5-8)에서 난삭재를 절삭한 경우 공구손상의 주원인은 절삭시 발생되는 열에 의한 용착, 확산, 화학반응등에 의한 마모에 기인한 것으로 제시되고 있는데 이와같은 문제점을 해결하기 위한 새로운 절삭법의 하나가 저온절삭이라 하겠다.

이 방법은 상온 이하의 냉각제를 사용하여 절삭성 향상을 도모하는 방법으로서 미국, 일본등 선진국에서 연구되고 있으며, 공구면의 온도를 낮추기 위한 목적으로 가공물을 저온으로 냉각시키는 방법(9-12)과 절삭공구를 저온으로 냉각시키는 방법(13-18)등이 있다. 그러나 이와같은 방법의 시도에는 아직 정량적으로 극저온을 형성하기 위한 개발과 절삭저항, 칩의 형태, 공구마멸 및 표면거칠기등의 해석과 개선책에 관해서는 아직도 많은 문제점을 가지고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 액체질소를 이용하여 가공물을 -195°C로 냉각시킨 후 절삭 부분에 액체질소를 뿌려주는 방법을 시도하였으며, 가공물은 상온절삭에서 난삭재로 알려진 SCM440재, SNCM21재, 그리고 STS304 재를 선정하였다. 이때 절삭 공구는 초경합금 공구(KTP10)와 세라믹공구(ST100)을 사용하였으며, 가공물의 극저온 냉각 효과에 따른 절삭 저항과 동특성, 칩의 거동, 표면거칠기, 절삭온도의 거동, 그리고 공구마멸의 변화관계를 Normal condition과 Cooled condition에서 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험장치

2-1. 가공물 극저온 냉각 절삭 장치의 구성

본 연구를 위하여 가공물의 극저온 냉각을 위한 매체 수단으로 액체질소(77K)를 사용하였으며, 이를위한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 가공물을 단열된 액체질소 용기 속에 넣으면 약 5분 후에 온도 평형을 이루어 -195°C로 냉각이 되므로 이것을 신속하게 선반의 연동축에 고정시킨다. 그리고 절삭시험 중에 온도 상승을 최대한 억제 시키기 위하여, 액체질소 용기에 액체질소 배출을 위한 liquid withdrawal device장치를 설계, 제작해서 설치 하였고, 0.25Kg/cm²로 감압된 질소

가스를 device를 통하여 액체질소 용기에 유도시키면 용기내의 압력이 상승되어, 용기내의 액체질소는 배출 pipe를 통하여 액체 상태로 절삭 위치에 공급된다.

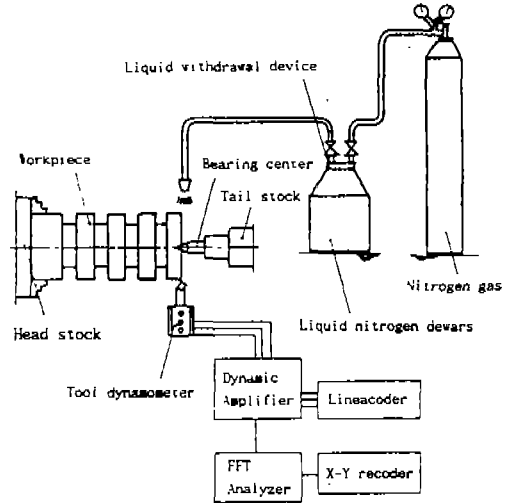


Fig.1 Schematic view of experimental set up

2-2. 절삭온도의 측정

Fig. 2는 절삭 실험중의 throw away tip의 날끝 부분의 절삭온도를 측정하기 위하여 제작한, tool과 tool holder를 나타내고 있다. throw away tip의 날끝 부분에서 1.25mm 떨어진 위치에 Super drill E. D. M (electric discharge machining)으로 직경 0.55mm의 구멍을 뚫고 thermocouple을 삽입하여 온도측정장치를 설치 하였다. 이때 사용한 thermocouple은 -270°C~137°C의 범위까지 측정할 수 있는 K-type을 사용하였으며 thermocouple의 직경은 0.5mm의 크롬멜(chromel)과 알르멜(alumel)로 되어 있고 바깥 부분은 단열재로 피복되어 있으므로 주변의 온도 영향으로 인한 측정 오차를 최소한으로 방지할 수 있었다.

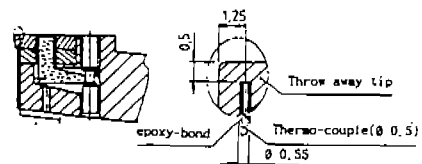


Fig.2 Throw away tip for cutting temperature measurement

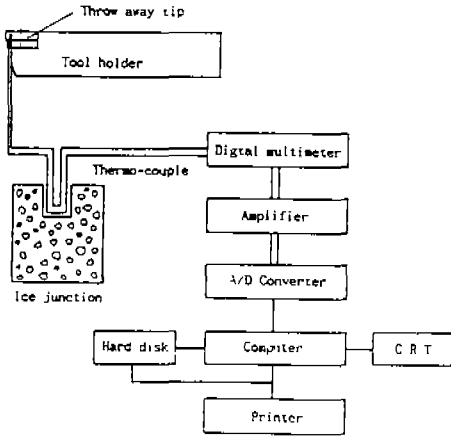


Fig. 3 Schematic diagram of the data acquisition system for cutting temperature

Fig. 3은 절삭온도를 측정하기 위한 data acquisition system에 대한 개략도를 표시하고 있다.

thermocouple은 throw away tip의 절삭온도 측정 점으로부터 연결되어 있고, 또한 기준 온도 설정부(reference junction thermocouple box)를 통해서 그

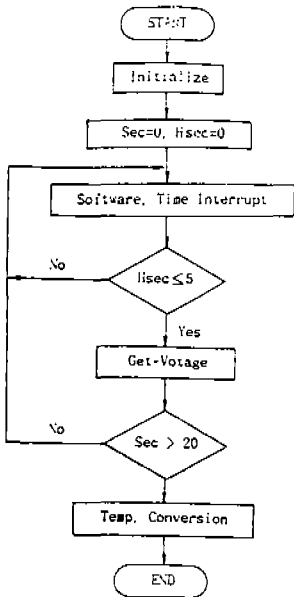


Fig. 4 Flow chart of cutting temperature measurement

출력이 DMM(digital multimeter)에 연결되어 mV로 표시되며 이것을 다시 amplifier에서 증폭시킨 후 A/D converter에서 analogue신호로 변환되어 최종 결과가 컴퓨터에 입력된다. 이때 절삭온도를 시간적으로 제어될 수 있도록 절삭온도의 변화량을 1초 간격으로 20초 가지 측정 가능하게 하였다. 그리고 측정된 절삭온도는 hard disk driver에 data에 저장되고, PIZZA program을 사용하여 printer 또는 plotter에 온도 측정 결과를 기록케 하였다.

Fig. 4는 본 실험의 절삭온도 측정용으로 개발한 software의 data가 수행되는 program의 flow chart를 나타낸 것이다.

3. 실험방법

절삭 실험은 Table 1과 같은 조건에서 각각 상온과 저온 분위기로 구분하여 실시 하였으며, 이때 사용한 가공물의 화학적 조성 성분비는 Table 2와 같다. cutting tool은 초경합금재와 세라믹재의 두 종류의 square throw away tip을 선정하였다. 이때 절삭실험을 실시할 때 마다 가공물의 편심을 제거하기 위하여 절삭깊이 0.2mm로 finish가공을 실시하였으며, 공구의 돌출길이는 30mm로 일정하게 하고 공구마멸에 따른 실험값의 오차를 줄이기 위하여 매 절삭 실험마다 공구 인선을 교환하였다. 절삭 저항 측정은 AST식 공구 동

표 1 Experimental conditions

| | |
|--------------------|--|
| Engine | 380 WL(1000×380, 2.2Kw) |
| Cutting tool | Tool holder : PSBNR 2020 K12 insert : ① SNMA 120408(P10) ② SNGA 120408(Ceramic) Overhang length : 30mm |
| Workpice | SCM440, SNCM21, SNCM304 D×L=φ50×180 Chucking length : 30mm |
| Cutting Conditions | Cutting speed : 52, 97, 141, 198m/min Feed rate : 0.075, 0.105, 0.135, 0.165mm/rev Depth of cut : 0.5mm Cutting temperature : Normal condition Cooled condition |

표 2 Chemical compositions of testing materials

| Materials | Compositions (%) | | |
|-----------|------------------|--------|--------|
| | SCM440 | SNCM21 | STS304 |
| C | 0.40 | 0.20 | 0.07 |
| Si | 0.22 | 0.33 | 0.95 |
| Mn | 0.68 | 0.76 | 1.85 |
| P | 0.18 | 0.009 | 0.035 |
| S | 0.17 | 0.010 | 0.03 |
| Cr | 0.97 | 0.610 | 18.50 |
| Mo | 0.16 | 0.170 | |
| Ni | | 0.42 | 10.00 |

력계로 검출한 신호를 증폭기를 통하여 lineacorder에서 graph로 나타내도록 하였으며 power spectrum은 증폭기를 통해서 주분력 성분만을 주파수 분석기(FFT analyzer)를 분석하여 X-Y recorder에서 graph로 나타내었다. 절삭 실험이 끝난 가공물은 성애현상이 제거된 후에 surface roughness tester에서 표면거칠기 값(Rmax, Ra)을 측정하였다. 또한 매 절삭조건으로 절삭 실험을 실시 할 때마다 칩을 수거하여 그 거동을 관찰하고 칩두께는 공구 현미경(X40)에 의한 사진촬영으로 측정하였다. 그리고 냉각된 가공물의 온도 거동과 절삭실험 중의 절삭온도의 거동을 확인하기 위하여 각각의 온도 측정을 병행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 가공물의 극저온 냉각에 따른 절삭온도의 가공

Fig. 5는 극저온 상태로 냉각시킨 가공물의 시간의 경과에 따른 온도변화를 측정하여 그 결과를 나타낸 도면이다.

단열된 액체질소 용기 속에 가공물을 넣으면 처음에는 액체질소가 기화하여 공기중으로 날아간다. 시간이 경과할 수록 기화현상은 점점 사라지고 약 5분이 경과하면 액체질소의 표면이 잔잔하게 되면서 기화현상이 멈추게 된다. 이때의 온도가 -195°C로 형성되므로 가공물을 액체질소 밖으로 꺼내서 냉각된 온도를 측정할 결과 -190°C정도의 온도를 유지하고 있었으며 이와 같은 온도는 약 2분이 경과할 때까지 지속됨을 확인할 수 있었다.

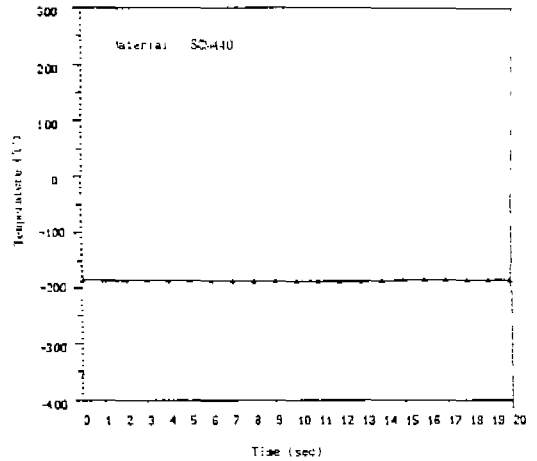


Fig. 5 Variation of temperature for the frozen workpiece

Fig. 6은 초경합금 공구 KTP10 으로 SCM440재를 절삭속도 51.8m/min, 이송량 0.105mm/rev, 절삭깊이 0.5mm의 절삭조건으로 dry cutting 하였을때 상온절삭과, 가공물을 극저온상태로 냉각 시킨 경우의 극저온 절삭의 절삭온도를 측정하여 그 결과를 비교한 도면이다.

절삭온도의 거동을 분석해 보면, 상온절삭에서는 절삭 직후에는 약 50°C이었으나, 약 2초까지는 급속하게 상승하고, 약 6초까지는 완만하게 상승하다가, 그 이후에는 약 270°C 평형상태를 유지하고 있다.

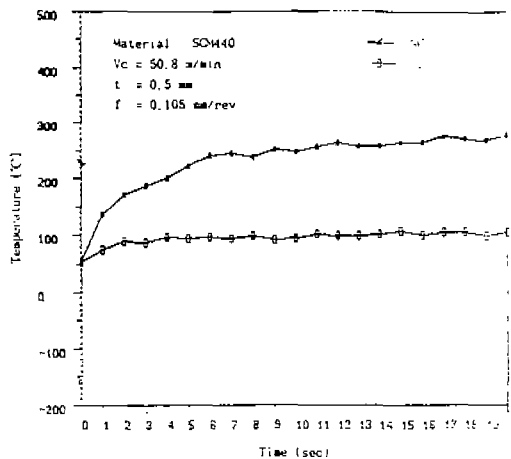


Fig. 6 Variation of cutting temperature under normal and cooled cutting condition

반면에 가공물 냉각에 의한 극저온절삭에서는 절삭 직후에는 절삭온도가 약 50°C 이었으나, 약 2초까지는 급속하게 상승하고 그 이후에는, 약 100°C 정도의 평형상

태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 절삭온도는 가공물 냉각에 의한 극저온절삭이 상온절삭에 비하여 약 170°C 정도 낮은 온도를 유지하고 있음을 알 수 있다.

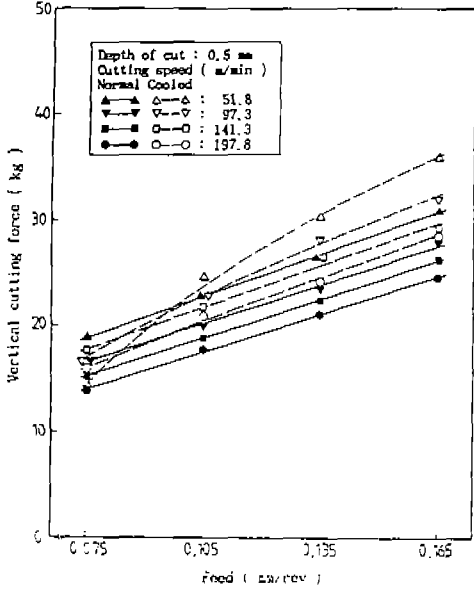


Fig. 7 Vertical cutting force vs feed for various cutting speeds(SCM440, KPT10)

4-2. 가공물의 극저온 냉각영향에 따른 절삭저항

Fig. 7, Fig. 8은 절삭속도와 이송량의 변화에 따른 절삭저항의 주분력의 변화관계를 나타낸 것으로서 이송량이 증가함에 따라서 절삭저항은 증가되는 경향이지만 절삭속도의 증가에 따라서는 오히려 감소되는 경향을 나타내고 있다. 또한 극저온절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 다소 크게 형성되고 있다. 이와같은 현상은, 일반적으로 금속은 저온 상태가 될 수록 강도와 취성이 증가하게 되므로, 이로 인한 소성변형 응력 또는 항복 응력이 증가되는데 기인되는 현상으로 생각할 수 있다.

Fig. 9, Fig. 10은 극저온절삭과 상온절삭에서의 칩의 두께를 비교 검토한 도면이다. 칩의 두께는 KTP10공구와 세라믹 공구 모두 절삭속도의 증가에 따라 감소되고 있으며, 저온절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 약 30% 감소되는 경향을 보이고 있다.

이 영향은 전단각의 변화를 일으키는 요인이 된다. 일반적으로 절삭 방향과 전단면이 이루는 전단각이 커지

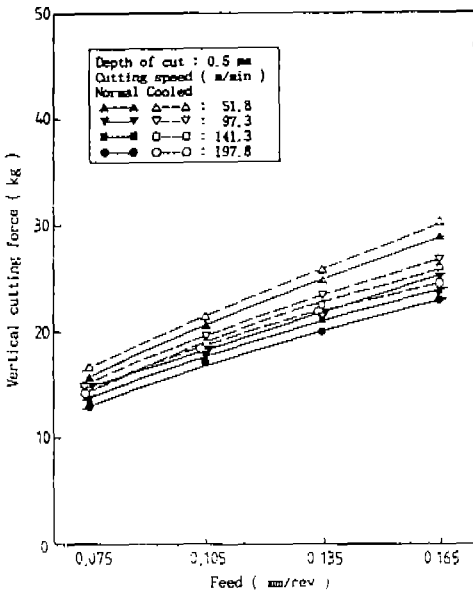


Fig. 8 Vertical cutting force vs feed for various cutting speeds(SCM304, KTP10)

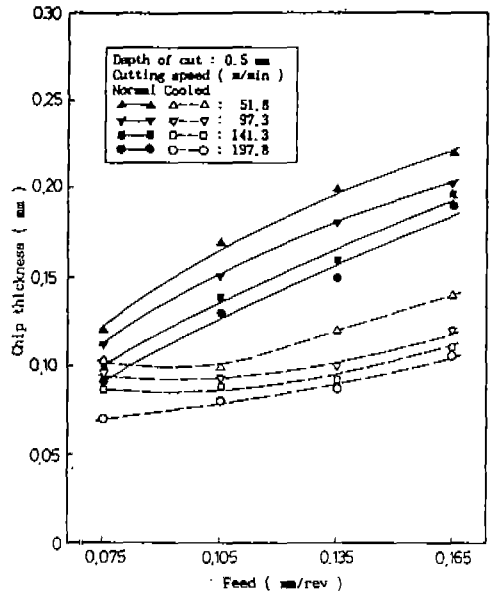


Fig. 9 Chip thickness vs feed for various cutting speeds(STS304, KTP10)

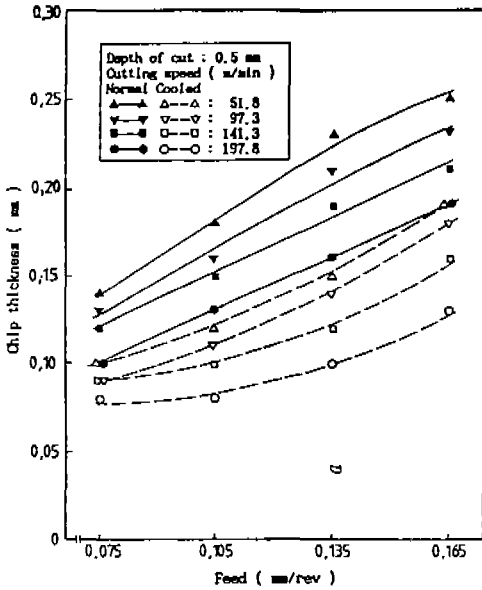


Fig. 10 Chip thickness vs feed for various cutting speeds(STS304, Ceramic tool)

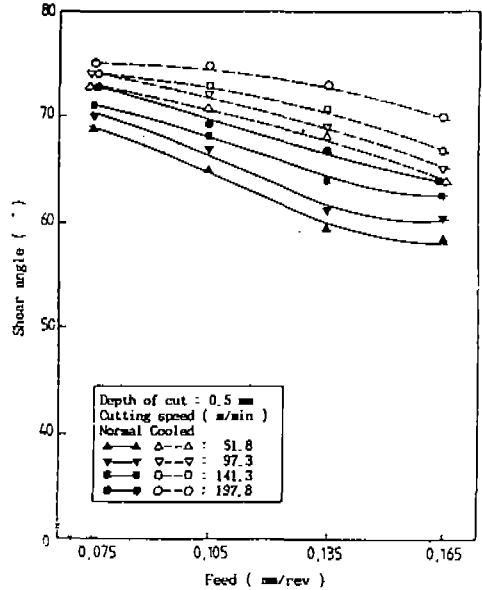


Fig. 12 Shear angle vs feed for various cutting speeds(STS304, Ceramic tool)

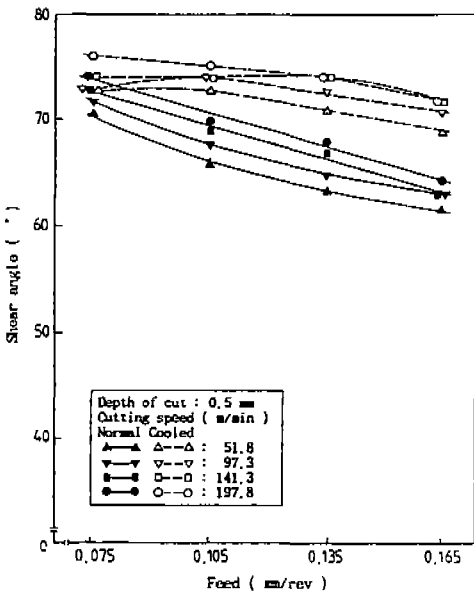


Fig. 11 Shear angle vs feed for various cutting speeds(STS304, KTP10)

면 칩은 얇고 길게 되며, 전단각이 작아지면 칩은 두껍고 짧게 된다. 그러므로 2차원 절삭으로 가정하고, 본 실험에서 사용된 insert의 공구경사각은 -6°C이므로 다음

식에 의해서 전단각이 구해진다.

$$\tau_c = tc/t = \sin\phi / \cos(\phi - \alpha) \quad (1)$$

$$\tan\phi = \tau_c \cos\alpha / (1 - \tau_c \sin\alpha) \quad (2)$$

여기에서 tc : 칩의 평균두께, t : 절삭깊이, α : 공구경사각 ϕ : 전단각

Fig. 11, Fig. 12은 극저온절삭과 상온절삭실험에서 형성된 전단각을 비교 검토한 그림이다. 초경합금 공구와 세라믹 공구 모두 절삭속도를 증가시키므로서 전단각은 크게되는 경향을 보이고 있으며, 이송량을 증가시켰을 때는 전단각은 오히려 작아지는 경향이다. 이와같은 현상에서, 가공물의 냉각효과가 직접 전단각 형성에 밀접한 관계가 있음을 알 수가 있다.

4-3. 칩형상에 미치는 가공물의 극저온 냉각영향

Fig. 13은 SCM440재, SNCM21재, 그리고 STS304 재를 선정된 절삭조건으로 절삭실험을 실시하였을때 생성된 칩의 형상을 표시한 도면이다. 고강력강 SCM440 재를 절삭하였을때 상온 절삭과 극저온의 경우 모두 저속절삭에서는 long tubular chips 또는 short tubular chip으로 생성되는데 이것은 절삭속도를 30m/min이내의 저속에서의 저온특성에 의한 연구보고와 일치되는 점이다.

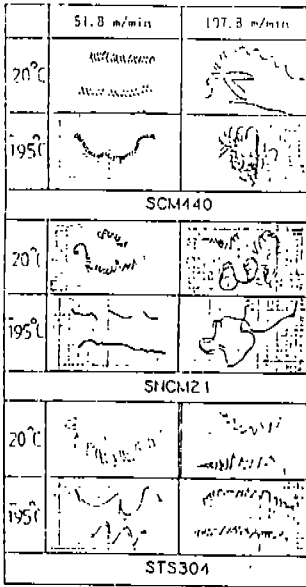


Fig.13 Vibration of chip formation between cutting speed and cutting temperature (feed : 0.105mm/rev depth of cut : 0.5mm)

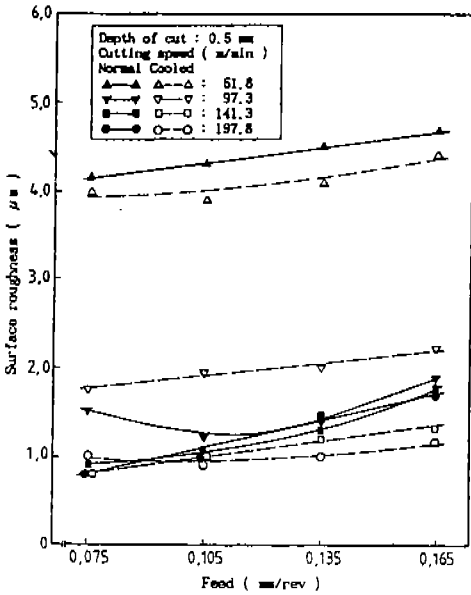


Fig.14 Shear roughness vs feed various cutting speeds(SNCM21, KTP10)

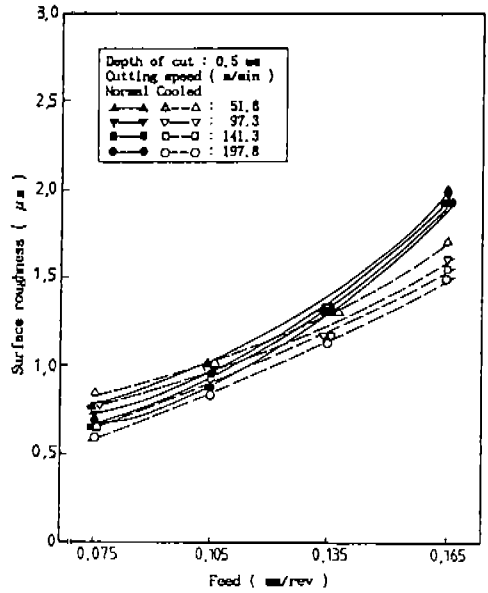


Fig.15 Surface roughness vs feed various cutting speeds(SNCM21, KTP10)

4-4. 표면거칠기에 미치는 가공물의 극저온 냉각영향

Fig. 14는 SNCM 21제에 대한 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화관계를 도시한 그림이다. 가공면의 표면거칠기 값은 절삭속도의 증가에 따라서 감소하며, 절삭속도 100m/min이상에서 매우 양호한 가공면을 얻을 수 있다. 또한 극저온절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 다소 양호한 거칠기를 형성하고 있는데, 이와같은 현상은 절삭속도 150m/min이상에서 뚜렷하게 나타나고 있다. 이와같은 현상은 상온절삭에서는 구성인선이 발생되기 쉬운데 반하여 극저온 상태에서는 구성인선의 발생이 작고 또, 마찰 저항의 감소에서 오는 영향으로 생각할 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 15의 STS304제에서도 알 수가 있다.

4-5. 칩의 표면경도에 미치는 극저온 냉각영향

Fig. 16은 STS304재를 이송속도 0.015mm/rev, 절삭깊이 0.5mm로 하고 절삭속도를 51.8m/min, 97.3m/min, 141.3m/min, 197.8m/min으로 선정하여 절삭실험을 실시할 때 채취된 칩의 표면경도를 비커스 경도값으로 측정된 결과를 나타내고 있다. 상온절삭실험에서 유출된 칩은 절삭속도가 증가되면 칩의 표면경도는 증가

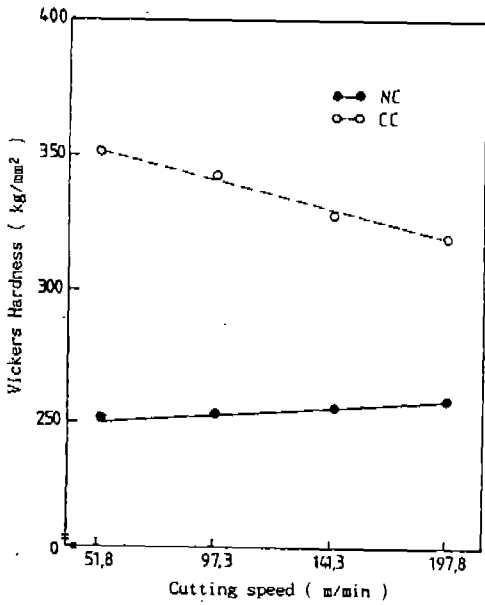


Fig. 16 Vickers hardness for cutting temperature vs cutting speeds(STS3040)

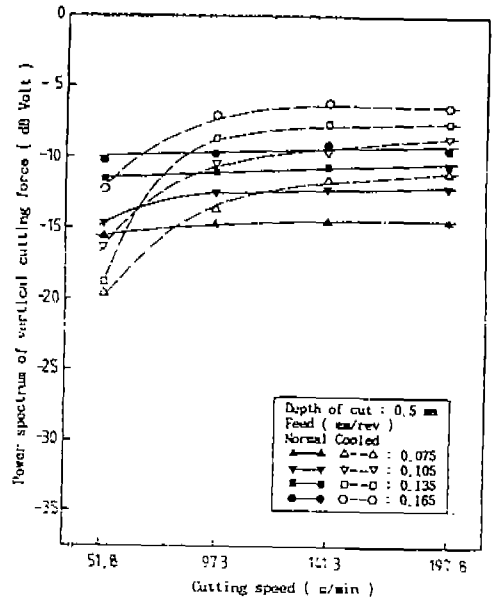


Fig. 17 Power spectrum of vertical cutting force vs cutting speeds for various feeds (SCM440, KTP10)

하는 경향을 나타내고 있으며, 반면에 극저온절삭에서는 상온절삭에서 보다 칩의 표면경도값은 높으나 칩경도의 변화 경향은 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 이유는 상온절삭에서 절삭속도가 증가하면 마찰열에 의한 온도상승이 공구마모를 촉진시키고, 칩에 유입하는 에너지가 증가되어 열변형층이 발생되므로 칩 표면의 경도가 증가하기 때문이다. 또한 저온절삭에서는 재료 냉각으로 인하여 칩표면의 가공경화를 억제시키는 효과에서 기인되는 것으로 생각되며, 이러한 사실은 다른 보고와도 일치하고 있다.

4-6. 가공물의 극저온 냉각에 따른 FFT의 동특성

Fig. 17, Fig. 18은 절삭속도와 이송량의 변화에 따른 주분력의 power spectrum을 나타내고 있다. 이때 사용된 FFT analyzer (Model : CP-400)는 진동체의 실제 진폭을 나타내는 진동해석과 power spectrum의 주파수 성분을 display하여 여러가지 진동 성분에 포함된 energy를 나타내주고 있다. 그림에서와 같이 power spectrum은, 이송량의 증가에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있으며 절삭속도 100m/min 이상에서는 대체로 완만하게 증가하고 있다.

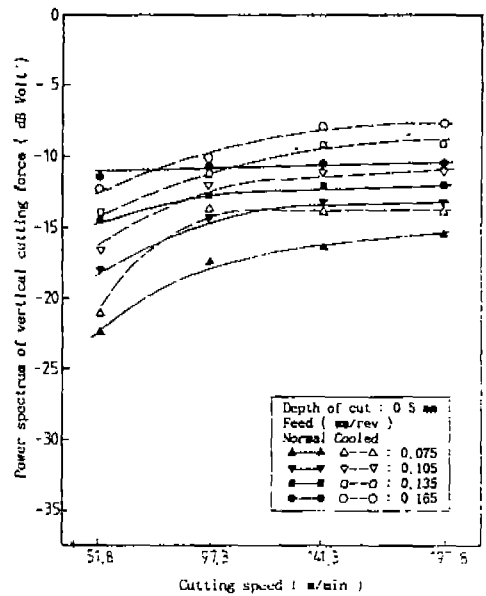


Fig. 18 Power spectrum of vertical cutting force vs cutting speeds for various feeds (STS304, KTP10)

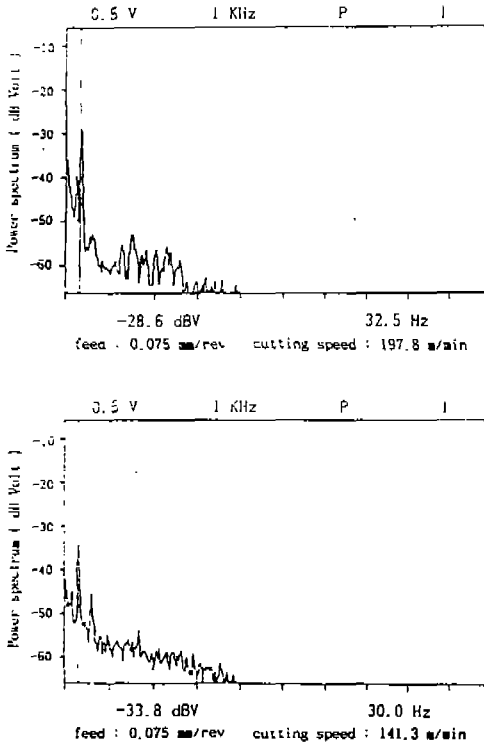


Fig. 19 Power spectrum of vertical cutting force vs cuttfrequency (STS304, Ceramic tool)

또한 극저온절삭의 경우는, 상온절삭에 비하여 다소 높은 값을 형성하고 있다. Fig. 19는 STS304를 세라믹 공구에 의하여 상온 절삭하였을때, 진동수의 변화에 따른 power spectrum의 변화관계의 한 예를 표시하고 있으며, 본 실험과 같은 조건에서는 일반적으로 주파수 400Hz이내에서 존재하고 있다.

5. 결 론

SCM440재, SNCM21재, STS304재를 상온절삭과 극저온절삭을 실시할 때 극저온절삭이 가공재의 절삭성에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구와 같은 조건에서, 가공물은 액체질소내에서 -195℃의 저온상태로 냉각시켰을 때는 상온에 노출시켜도 약 2분 정도 극저온 상태가 유지됨을 확인할 수 있었다. 또한 절삭온도는 가공물 냉각에 의

한 극저온절삭이 상온절삭에 비하여 약 170℃정도 낮게 유지된다. 칩의 두께는 극저온절삭이 상온절삭에 비하여 약 30% 감소되며, 전단각을 약 10% 증대시키는 결과를 가져오게 된다.

- (2) 고장력강 SCM440재 SNCM21재를 저속절삭속도로 극저온절삭을 하면 칩형상은 long or short tubular chips으로 형성된다.
- (3) 본 실험에서 사용된 가공재의 경우는, 극저온절삭을 시도하였을 때 상온절삭에 비하여 구성인선의 감소 효과가 있으며, Ra값이 약 5% 감소된 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있는 효과가 있다.
- (4) 칩의 표면경도는, 상온절삭에 비하여 극저온 절삭일 때 높게 나타났으며, 절삭속도의 증가에 따른 칩표면의 경도는, 상온절삭일 때는 증가하는 경향이지만, 반면에 극저온절삭에서는 감소하는 경향을 보인다.
- (5) 주분력에 대한 power spectrum은 이송량의 증가에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있으며 대체로 절삭속도 100m/min 이상에서는 매우 완만히 증가하고 있다. 그리고 극저온절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 약간 높은 값으로 나타나고 있다.

참고문헌

1. Ryoichi Ichmiya, "A Study of Hot Machining", JSME, Vol. 30~217, pp.44~54 (1991)
2. C. C. Cheong, S. H. Oh, J. T. Kim, N. S. Seo, "A Study on the Flank Wear of Carbide Tool in Machining SUS304, "KSPE, Vol. 8~3, pp. 44~54 (1991)
3. K. Nakayama, "Machining Characteristics of Hard Materials", CIRP, Vol. 37~1, pp.89~92 (1988)
4. Bigneau, "Influence of the Microstructure of the Composite Ceramic Tools on Their Composite Ceramic Tools on Their Performance when Machining Nickel Alloys", CIRP, Vol. 36~1, pp.13~16 (1987)
5. Toshiaki Ohtani and Hiroshi Yokogawa, "The Effects of Workpiece Hardness on Tool Wear

- Characteristiccs-Machining of Cold Work Tool Steel with CBN, Ceramic and Carbide Tools -" JSPE. Vol. 22~3, pp.229~231(1988)
6. J. Vigeneau, J. J. Boulanger/F. Le Maitre (3), "Behaviour of Ceramic Tools during the Machining of Nickel Base Alloys", CIRP, Vol. 31~1, pp.35~40(1982)
 7. P. D. Hartung, B. M. Kramer/B. F. Von Turkovich (3), "Tool Wear in Titanium Machining", CIRP, Vol. 31~1, pp.75~80 (1982)
 8. W. Koenig, R. Komanduri, H. K. Toenshoff, "Machining of Hard Materials", CIRP, Vol. 31~1, pp.417~428(1984)
 9. G. Pahitzsch, "Low Temperature, Cooling, a Means of Increasing Cutting Tool Life", Microtechnic, Vol. 9~2, pp.65~69(1955)
 10. Kunio Uehara, shinji Kumagai, "Machanism of Tool Wear in the Cryogenic Machining", JSPE, Vol. 35~9, pp.593~599(1969)
 11. 김철수, 도철진, 김진길, "극저온에서 STS304 Austenite Steel의 저온절삭에 관한 연구(제1보)", 중경공업전문대학, Vol. 18, pp.145~156(1989)
 12. 도철진, "선삭에서 저온절삭 조건에 따른 절삭성 및 표면거칠기에 관한 연구", 숭실대학교 석사학위 논문, pp.30~48(1989)
 13. A. Iwabuchi, T. Honda and J. Tami, "Tribological Properties Temperature of 293.77 and 4K in Fretting", Cryogenics, Vol. 29~2, pp.124~131(1989)
 14. K. Okushima, Y. Kawashima, "Study on machining with Internally Cooled Tool", JSPE, Vol. 34~2, pp.97~104(1968)
 15. S. Okamoto, M. Doi, "On Cutting with Internally Cooled Cutting Tool(1st Report)", JSPE, Vol. 38~5, pp.443~448(1972)
 16. S. Okamoto, M. Doi, "On Cutting with Internally Cooled Cutting Tool(2nd Report)", JSPE, Vol. 41~5, pp.431~435(1975)
 17. 김정두, "난삭재의 저온냉각절삭에 관한 연구 (제1보)", KSME, 88년도 추계 학술대회 논문초록집, pp.457~460(1988)
 18. S. Mekaru, I. Fukomoto and K. Nakayama, "Improvement of Tool Life on Cutting Stainless Steel with the Internal Cooling Method", JSME, Vol. 53~496, pp.2688~2691 (1987)