

공구내부냉각에 의한 고장력합금강의 피삭성에 관한 연구

김 정 두*

한국과학기술대학 생산기계공학과

A Study on the Machinability of High Strength Steel with Internally Cooled Cutting Tool

Jeong-Du Kim

Dept. of Mechanical & Production Engineering, Korea Institute of Technology

Abstract— High strength steel is similar to carbon steel in its composition. This material is developed originally for special uses such as aerospace and automobile due to its high strength and shock-free property in spite of lightness.

But the chemical attraction of high strength steel is serious, which includes comminution of formation, metalization and strengthening. Machining results in built-up edge between this material and the tool. Especially the work hardening behavior results in tool life shortening, which was caused by temperature generation during machining.

In this study, cooling system was made in which liquid nitrogen is supplied to circulate in order to make up for these weaknesses. Machining of high strength steels, which is recognized as difficult to machine materials, was conducted after tool is cooled at -195°C . Experimental results showed that the tool was cooled down rapidly below -195°C in about 200 seconds. The tool temperature of machining with cooling system was lowered by $60 \sim 95^{\circ}\text{C}$ than that of machining in room temperature. The hardness of the surface of chip is decreased by machining with cooling system. And the machining using the cooling system made it possible to increase shear angle, to retain smooth surface on chip without built-up-edge and to get a better roughness.

1. 서 론

고장력합금강은 일반 탄소강과 유사한 조성성분의 강이나, 고강도의 재료로 내충격성이 요구되는 보다 가벼운 재료로서, 우주항공, 자동차 및 특수용도로 개발된 재료이며 그 수요는 점점 증대될 것으로 예상되고 있다. 그러나 고장력합금강은 조직의 미세화, 석출경화 및 고용강화[1] 등 화학적 친화성이 높고, 절삭가공 중에는 공구와의 구성인선이 형성되며, 특히 절삭온도에 의한 가공경화가 심하여 공구수명에 나쁜 영향을 미치고 있다. 현재까지 고장력강에 대한 몇몇의 절삭가공 연구결과[2]가 발표된 바 있으나, 이상의 연구들은 고장력합금강의 피삭성을 향상시키기 위하여 세라믹 공구 등을 이용한 방법이라고 볼 수 있으며, 여기에서도 공구면에 미치는 절삭열에 대한 문제가 제기되고 있는 실

정이다. 절삭시에 발생하는 칩과 공구의 마찰은 공구인선의 온도를 상승케하고 이것이 공구의 수명에 큰 영향을 미치고 있다[3]고 보고 있으며 따라서 공구면의 절삭온도를 낮추기 위한 목적으로 피삭재를 저온으로 냉각시키는 방법[4-7]과 공구를 저온으로 냉각[8-16]시키는 방법으로서 절삭유제 및 절삭공구를 통하여 절삭열을 억제시키고 인선온도를 낮추어 공구수명의 연장을 기대하고 있다. 그러나 이 분야는 아직 정성적인 극저온 공구냉각 시스템의 개발과 칩형태, 절삭온도의 거동, 공구마멸 등에 따른 연구의 여지가 많은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 공구의 내부냉각법으로 공구 내부에 액체질소를 순환 공급할 수 있는 냉각 시스템을 제작하고, 공구를 -195°C 이하로 냉각시킨 후, 난삭재인 고장력합금강을 절삭하여 절삭온도, 칩형태 및 공구수명에 따른 저온 냉각의 효과를 실험적으로 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 냉각실험장치의 구성과 절삭온도 측정

공구의 서온 냉각을 얻기 위한 매체수단으로 액화질소를 사용하였으며, 실험용으로 제작한 냉각절삭장치는 Fig. 1과 같다. 액화질소의 공급을 위하여 용기에 배출장치(discharger)를 설치하고, 감압된 질소가스를 3.0 psi로 액화질소 용기에 유도시키면 용기내의 압력을 상승시키게 되고, 순환 파이프를 통하여 액체상태로 인선에 공급시킨다.

액화질소는 공구샤프 내부를 순환하도록 제작하였으며 여기에 고정된 Throw-away tip을 이면부터 냉각시키도록 하였다. 액화질소를 $\phi 6\text{mm}$ 파이프를 통하여 공구에 순환시키면 공구는 냉각되고 5분 후에 절삭을 시작하였다. Fig. 2는 절삭온도 측정용으로 2개의 인서트에 하나는 Hole A로 $\phi 0.6\text{mm}$ 를, 다른 하나는 Hole B로 $\phi 1.6\text{mm}$ 를 각각 방전가공으로 $\phi 1.0\text{mm}$ 의 구멍을 뚫고 열전대를 삽입하여 설치하는 것을 보였다. 열전대는 $-270\sim 1370^\circ\text{C}$ 의 범위까지 측정할 수 있는 k-type를 사용하였으며, 열전대는 직경이 $\phi 0.1$

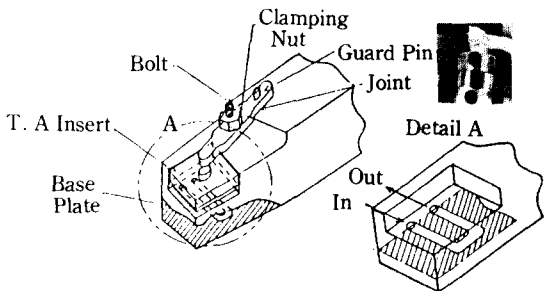


Fig. 1. Internally cooled cutting tool.

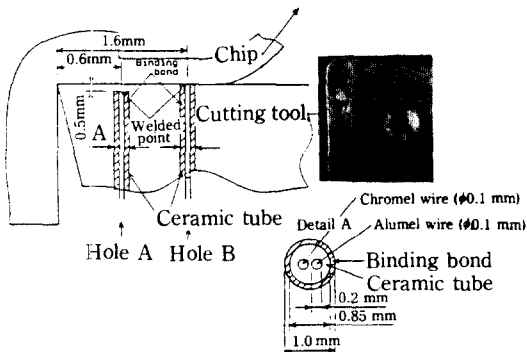


Fig. 2. Set-up for measuring temperature distribution on tool face and EDM machining hole in tungsten carbide cutting tool.

mm의 크롬멜(chromel)과 알루미멜(alumel)을 사용하였다.

두 와이어 및 공구와의 절연을 위하여 $\phi 0.85\text{mm}$ 세라믹 튜브를 사용하였으며 에폭시 접착제를 사용하여 공구와 접착시켰다. 열전대는 절삭공구의 온도측정점으로부터 연결되고, 또한 기준온도 설정부(reference junction thermo couple box)에 연결시키며, 그 출력이 스캐너(scanner)에 의하여 디지털 전압메타(digital voltmeter)에 연결되고 최종결과는 HP 컴퓨터에 입력되고 시간적으로 측정된다. HP 컴퓨터에서는 2개의 구간으로 곡선회기(curve fitting)된 열전대 측정자료에 의하여 온도로 환산되고 디스크 드라이버에 데이터가 저장되고, 프린터 및 플로터에 온도측정 결과가 출력된다.

2-2. 절삭실험장치

절삭실험은 공구의 인선을 냉각시킨 경우와 상온상태의 절삭실험한 경우로 구분하여 실시하였다. 피삭재는 직경 $\phi 71\text{mm}$, 길이 300mm (고정부위 50mm)의 고장력강을 사용하였고, 그의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 본 실험에 사용된 선반은 형식 TIPL로 주축동력 7.5kW 이고, 주축회전수는 $75\sim 1800\text{rpm}$ 의 범위이다. 피삭재는 연동척에 매 시편마다 토오코메타로 재료의 고정력을 200kg.f/jaw 크기로 일정하게 하였으며, 설치중의 편심을 제거하기 위하여 1mm 의 제거 절삭가공을 하였다. 공구는 드로우 어웨이팁(throw-away tip) P20(CNMG형, 0, 0, 5, 5, 15, 15, 0, 8)을 사용하였고, 공구의 돌출길이는 30mm 로 일정하게 하였다. 절삭저항 측정(주분력 및 배분력)은 AST식 절삭공구 동력계로서, 여기에서 검출된 신호는 증폭기를 통하여 오실로 그래프로 나타나도록 하였다.

절삭방식은 선삭으로 매 절삭회수마다 공구현미경(Carl Zeiss제 Tool Microscope)에 의하여 플랭크 마멸을, 칩표면의 관찰은 SEM(Scanning Electron Microscope, Jeol JSM 840A)에 의하여 관찰하였고, 가공면의 조도와 크레이터 마멸상태는 이동식 측정 표면거칠기(Hommel-P5Z)에 의하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 공구의 냉각효과와 칩의 형태

Fig. 3은 시간 경과에 따른 냉각절삭용 공구의 냉각 시험 결과를 나타낸 것으로 화이트의 Hole A에서 측정된 결과이다. 액화질소를 공급하기 시작하여 공구는

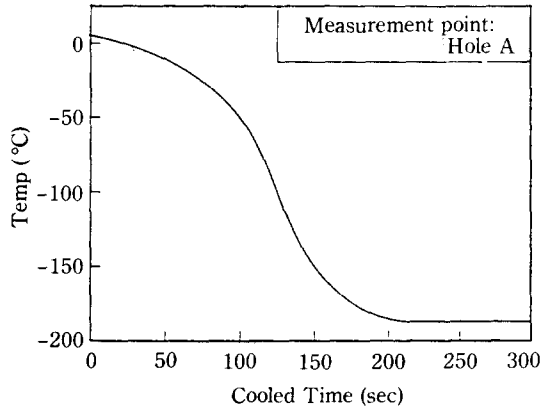


Fig. 3. Measured temperature at the internally cutting tool.

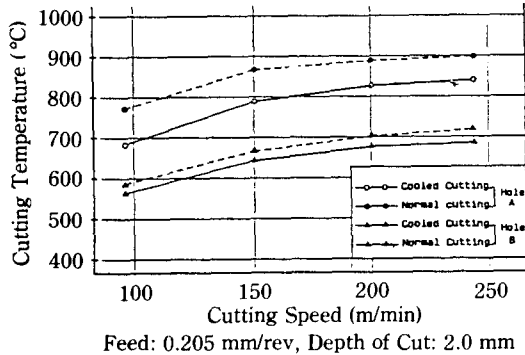
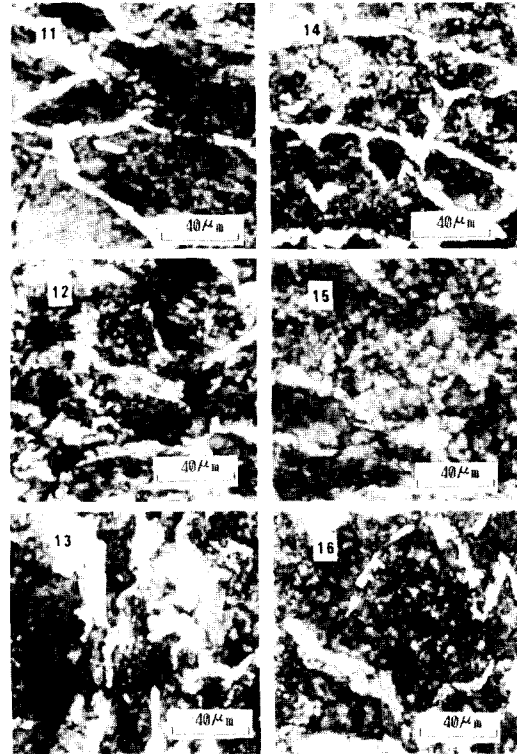


Fig. 4. Measured cutting temperature at various cutting speed.

도의 측정기준점 7.64°C에서부터 측정된 것으로 경과 시간 100sec 에서는 -40.70°C, 200sec 에서는 -195.24°C, 300sec 에서는 -195.80°C에 도달됨으로서 실험의 실내온도가 22°C에 대한 영향과 관계없이 공구의 냉각은 액체질소의 불점(77k) 가까이까지 접근함을 알 수 있고, 냉각형태는 냉각시간 100sec에서 급격히 냉각되며, 냉각시간 200sec에 달하면 냉각시간과 관계없이 평형상태가 유지되고 있다. Fig. 4는 초경공구재료 P20으로 고장력강을 이송속도 0.2mm/rev의 조건으로 절삭할 때의 정상공구와 냉각공구를 측정지점 Hole A와 Hole B에서 비교 검토한 것이다.

절삭온도의 측정거리가 인선으로부터 0.6mm인 Hole A 점은 크레이터 발생점이고 칩의 마찰계수



11: N.T 400rpm 12: N. T 700rpm 13: N.T 1100rpm 14: C.T 420rpm 15: C. T. 700rpm 16: C.T 1100rpm

N.T: Normal Temperature, C.T: Cooled Temperature
Fig. 5. Microstructures of the chip surface.

(friction coefficient) μ 가 가장 큰 부분[17]으로 이 부분의 온도가 최대점이며 냉각공구의 측정온도는 상온공구의 측정온도보다 60-95°C의 낮은 온도분포를 보이고 있다. 또한 절삭온도의 측정거리가 인선으로부터 1.6mm 떨어진 Hole B점의 온도는 30°C 정도의 온도차이를 보이고 있다. Fig. 5는 절삭조건에 따른 절삭칩의 표면을 500배로 확대하여 나타난 금속조직 사진이다. 여기에서 희게 보이는 부분은 Ferrite 조직이고, 검게 보이는 부분은 Perlite로서 절삭온도 조건에 따라 grain size 크기의 변화를 알 수 있으며, 90% Ni-Cr 계 고장력강의 금속조직은 -320°C의 극저온 온도에 대하여 상온에서의 크기보다 1/10 정도로 변화한다고 보고되고 있다[18].

Table 1. Chemical composition

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	B	Ti	Fe
0.24	1.30	0.20	0.01	0.007	0.03	0.07	0.45	0.037	0.001	0.022	rest

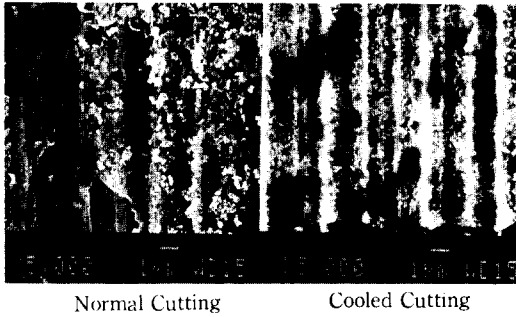


Fig. 6. SEM photographs of the cutting chip surface

3-2. 표면거칠기에 미치는 영향

Fig. 6은 저온절삭과 상온절삭 조건에서의 절삭칩의 표면을 SEM 으로 나타낸 것으로서 절삭속도 V 150/m/min 의 조건에서 관찰된 것이다. 고장력합금강은 탄소의 함유량이 0.25% 이하이나 Ni, Cr, Mo, V 의 합금원소는 가공성이 극히 불량한 것으로 알려져 있다. 여기에서 냉각에 의한 절삭은 상온절삭에 비하여 비교적 안정된 칩의 표면상태를 나타내고 있다. Fig. 7과 8은 피삭재의 가공표면 조도를 절삭속도의 변화에 따라 도표로 나타낸 것으로서 측정식 표면거칠기에 의하여 측정된 것이다. 절삭속도 V 80m/min 에서 절삭속도 V 250m/min 까지의 범위에서 측정된 가공면의 표면거칠기에 의하면 냉각절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 전반적으로 양호한 표면거칠기를 나타내고 있으므로

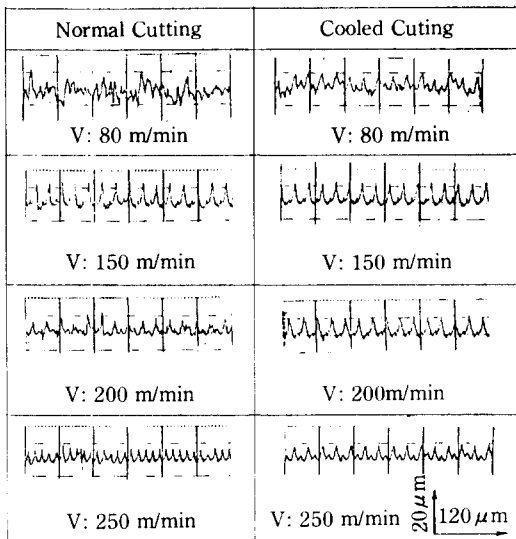


Fig. 7. Surface roughness of cutting condition on the Normal and cooled cutting.

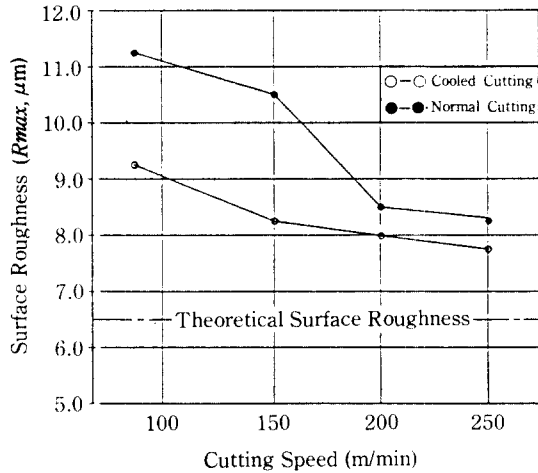


Fig. 8. Surface roughness on the cooled condition and cutting speed.

서 극저온 냉각절삭은 고장력합금강의 양호한 표면거칠기를 얻는데 효과가 있음을 알 수 있다.

3-3. 공구의 냉각효과와 공구마멸의 형태

Fig. 9는 절삭속도가 150m/min에서의 공구의 크레이터 및 플랭크 마멸상태의 일례를 나타낸 것이다. 실선은 상온절삭의 마멸과정이고, 점선은 냉각절삭의 마멸과정을 절삭시간별로 측정하여 나타낸 것으로 플랭크 마멸은 0.6mm 에 도달될 때까지 나타낸 것이다.

측정된 마멸을 기준으로 볼 때 공구의 냉각에 의한 절삭은 상온절삭에 비하여 마멸의 성장속도가 둔화되어 있으며, 마멸의 형태에 있어서도 Fig. 10에서 나타내는 바와 같이 현저한 차이점을 발견할 수가 있다. 상온절삭에서는 절삭시간 10분경에 이르면 인선부의 마멸폭에 비하여 평행부의 마멸폭이 서서히 증가하고 있으며, 절삭시간 15분경에 이르면 급격한 공구마멸의 증가현상을 나타내고 있다. 이것은 고장력합금강의 피삭특성으로 경계마멸폭이 둔화되고 있는 현상은 피삭재 SM45C 의 절삭[14]에서 나타나는 공구의 경계마멸형태를 나타낸 반면, 고장력합금강의 절삭에서는 선단마멸의 현상이 두드러지게 나타나고 있다.

반면에 공구의 냉각에 의한 절삭의 공구마멸형태는 절삭시간 10분 및 15분 절삭에 나타나고 있는 바와 같이 선단마멸의 억제와 더불어 평행부의 마멸폭이 상온 절삭에 비하여 억제되고 있는 현상을 볼 수 있다. Fig. 11은 플랭크마멸의 진행상황의 일례로 공구의 냉각절삭과 상온절삭을 비교한 것이다. 공구는 절삭초기

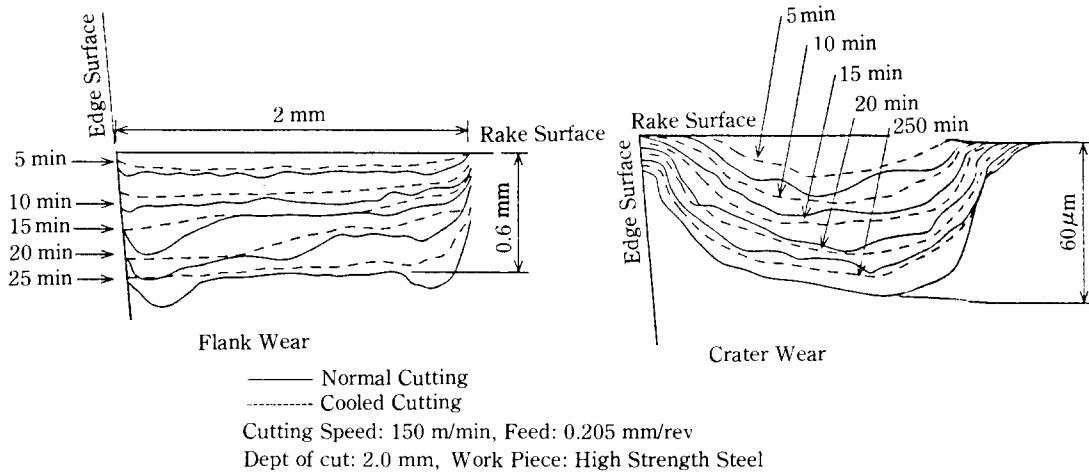


Fig. 9. Growth of tool wear

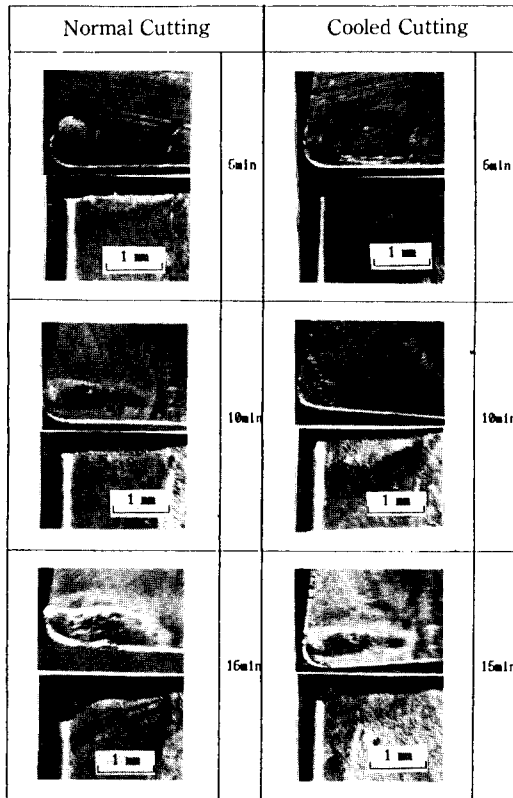


Fig. 10. Phenomena of tool wear

마멸로서 $V_b = V_{b0} + \alpha t$ (V_b : 플랭크마멸, V_{b0} : 초기마멸)에 의한 영향으로 5분 이내의 고속절삭속도 범위에서 이미 급격한 마멸현상을 보이고 있으며, 공구의 냉각절삭은 상온절삭에 비하여 공구의 마멸량이 억제되

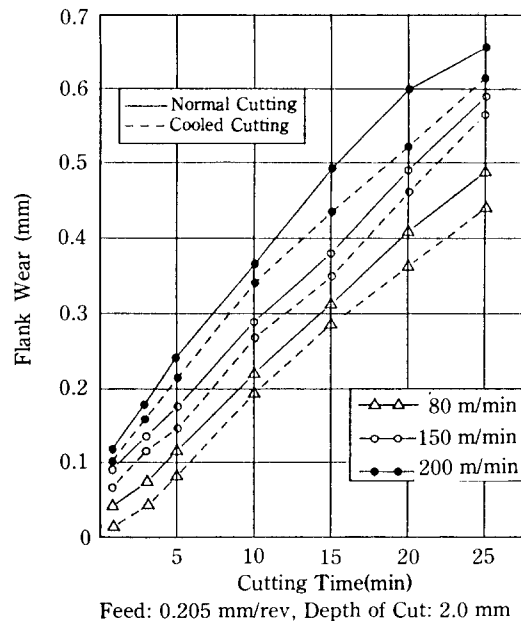


Fig. 11. Relation of flank wear and cutting time

어 있다.

3-4. 공구의 냉각효과와 절삭저항

Fig. 12는 절삭저항의 주분력 크기를 나타낸 것으로서 절삭속도의 증가에 따라서 절삭저항은 감소하고 있으며, 또한 공구냉각의 절삭저항은 상온절삭에 비하여 적게 나타나고 그 경향은 특히 80m/min의 절삭속도에서 현저하게 나타나고 있다.

Fig. 13은 냉각절삭조건에서의 칩 두께와, 상온 절삭 조건에서의 칩 두께를 비교 검토한 것으로서 4단계의

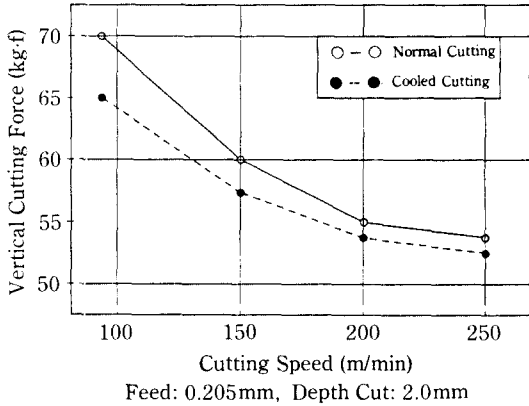


Fig. 12. Vertical cutting force.

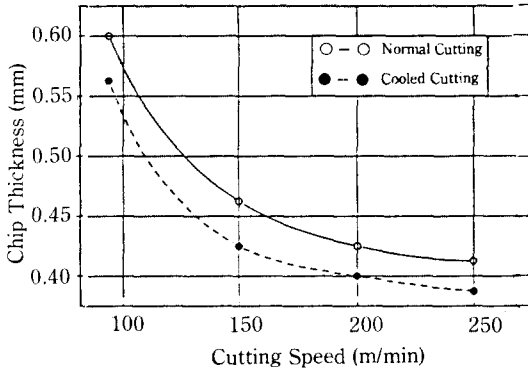


Fig. 13. Chip thickness comparisons between normal and cooled cutting.

절삭속도를 변화시켜 측정된 것이다. 칩의 두께는 냉각 절삭에서 감소하고 있으며, 이 영향은 전단각의 변화를 가져오지 하며 공구의 상면경사각을 α , 칩의 두께를 t_c , 이송속도를 t_o 라 할 때 절삭비 r 은 t_o/t_c 가 되며 따라서 전단각 $\tan=r \cos \alpha / 1-r \sin \alpha$ 가 되어 Fig. 14는 도표에서 나타내는 바와 같이 공구의 냉각은 전단각과 밀접한 관계가 유지된다고 볼 때, 공구의 냉각효과는 공구 경사면상의 마찰상태의 변화와 더불어 전단각을 증대시키는 것으로 사료된다.

4. 결 론

난삭재로 일컬어지는 고장력합금강을 상온절삭과 냉각절삭을 행하여 공구냉각의 효과가 피삭성에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액화질소의 순환회로에 의한 공구의 냉각온도는 약 200초 경과하면 -195°C 이하로 급냉시킬 수 있는

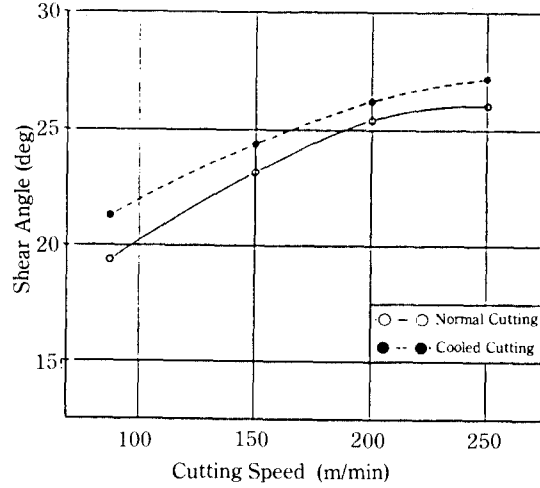


Fig. 14. Shear angle comparisons between normal and cooled cutting.

며, 절삭중에도 냉각시킨 공구의 온도는 상온가공에 비하여 $60-95^{\circ}\text{C}$ 의 낮은 온도차이를 유지하고 있다.

2. 냉각절삭으로 유출된 칩은 절삭속도가 증가하면 칩 표면의 경도는 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 가공경화 현상의 정도는 절삭 칩의 부위에 따라서 경도 크기의 차이를 보이고 있다.

3. 고장력합금강은 상온절삭에 의한 공구마멸형태는 선단마멸의 현상이 크게 나타나고 있는 반면, 냉각절삭에서는 선단마멸의 억제와 더불어 플랭크 마멸이 둔화되는 현상을 나타내고 있다.

4. 공구의 냉각절삭에 의한 칩의 두께는 상온절삭에 비하여 얇게 나타나며, 따라서 마찰상태의 변화와 더불어 전단각을 증대시키고 있다.

REFERENCES

1. P. Abelson and M. Dorfman, Advanced Technology, American Association for the Advancement of Science, 1980.
2. R. Schaumann, Zerspanbarkeit der Werkstoffe, VDI, 1985, pp. 1-6.
3. H. Takeyama and R. Murata, Temperature Dependence of Tool Wear, JSPE, Vol. 27, No. 1, 1961, pp. 33-38.
4. K. Th. Preger, Kühl-Zerspannung, Werkstatt und Betrieb, Vol. 93, Jahrg No. 8, 1960, pp. 479-482.
5. G. Pahlitzsch, Low Temperature, Cooling, A Means of Increasing Cutting Too Life, Microtechnic, Vol. 9, No. 2 1955, pp. 65-69.

6. N. N., Developments in the Ce De Cut Technique, Machinery (E) Vol. 84, No. 14, pp.1034.
7. K. Chandramani, Refrigeration in Machining, Int. Jul. Prod. Res, No. 14, 1961.
8. K. Okushima and Y. Kawashima, Study on Machining with Internally-Cooled Tool (On Tool Life), Journal of the JSPE, Vol. 34, No. 2, 1968, pp. 13-20.
9. S. Okamoto and M. Doi, On Cutting with Internally Cooled Cutting Tool (1st Report, Tool Life and Cutting Temperature), Journal of the JSPE. Vol. 38, No. 5, 1972, pp. 19-24.
10. S. Okamoto and M. Doi, On Cutting with Internally Cooled Cutting Tool (2nd Report, Cooling Effect on Cutting Mechanism), Journal of the JSPE, Vol. 27, No. 32, 1975, pp. 27-32.
11. T. Akasawa, H. Takeshita and K. Uehara, Hot Machining with Cooled Cutting Tools, Annals of CIRP, Vol. 36, No. 1, 1987, pp. 37-40.
12. A. Filippi and R. Ippolito, Face Milling at -180°C , Annals of the CIRP, Vol. 19, No. 2, 1971, pp. 399-406.
13. J. Bigneau, Influence of the Microstructure of the Composite Ceramic Tools on their Performance when Machining Nickel Alloys, Annals of CIRP, 36-1, 1987, pp. 13-16.
14. K. Uehara and S. Kunagai, Characteristics of Tool Wear in Cryogenic Machining, Annals of CIRP, Vol. 18, No. 2, 1970, pp. 273-277.
15. L. Wiggins, S. Malkin, Cryogenic Enhancement of Machinability of Bone, ASME, Winter Annu Meet, Proc. Pap, NY, Nov. 17-21, 1974, pp. 169-170.
16. N. Filonenko and T. Slobodynik, Chip Deformation and Surface Finish when Turning Intractable Materials at Low Temperatures, Machines, Vol. 46, No. 2, 1975, pp. 42-44.
17. E. Usui, T. Shirakashi and T. Kitagawa, Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process (Part 3 Cutting Temperature and Crater Wear of Carbide Tool), Journal of Engineering for Industry, ASME, Vol. 100, No. 2, 1978, pp. 236-243.
18. F. Homer, Grain-Refining Heat Treatment to Improve Gryogenic Toughness of High Strength Steels, NASA Tech. Memo. 85816, 1984, p. 49.