

극저온 절삭공구에 의한 가공특성의 규명과 예측

오석영*, 정우섭*, 김철수**, 이소영***

Searching and Prediction of Cutting Characteristics Using Cryogenic Tool

Sueg-Young Oh*, Woo-Seop Chung*, Chill-Su Kim**, So-Young Lee***

ABSTRACT

We experimented turning SCM440, called difficult-to-cut materials in general, using tungsten carbon tool(P10) in order to elevate machinability by a new cutting method. The cutting tool designed and made to study was cooled to -170℃ in about 1 minute by liquid nitrogen. Then, we operated cryogenic cutting by cooling tool with liquid nitrogen and studied the effect about cutting force, chip thickness, surface roughness, behavior of tool wear and cutting temperature. In addition, we investigated the possibility that surface roughness of workpiece can be predicted analyzing cutting characteristics.

Key Words : Cryogenic Tool(극저온절삭공구), Cooled Condition(저온절삭조건), Normal Condition(상온절삭조건), Cutting Parameters(절삭인자), Fuzzy Neural Network(퍼지신경회로망)

1. 서론

난삭재의 가공은 재료에 따라 그 최적조건이나 가공방법이 다르므로 일률적으로 해석하기는 곤란하고 각 재료에 따라 적절한 가공방법 및 절삭성을 파악하는 것이 필요하다. 현재까지 난삭재의 절삭가공에 대한 많은 연구가⁽¹⁻³⁾ 있었지만 이와 같은 연구들은 거의 대부분 난삭재의 절삭성을 향상시키기 위하여 세라믹공구 등을 사용하여 절삭공구의 마멸특성이나 칩의형상, 공구의 형상변화 등에 관한 보고가 대부분이며, 이와 같은 연구에서도 역시 절삭온도에 대한 문제가 제기되고 있는 실정이다. 일부 연구결과^(2,3)에서 난삭재를 가공할 경우 공구손상은 절삭시 발생하는 열에 의한 용착, 확산, 화학반응 등에 의한 마모에

기인한 것으로 판명되고 있는데 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 가공물을 냉각시켜 가공하는 방법⁽⁴⁾⁽⁵⁾과 공구를 냉각시켜 가공하는 방법^(6,7)을 고려할 수 있다.

본 연구에서는 액체질소를 이용하여 -195℃로 냉각시킬 수 있는 공구 내부냉각시스템을 설계 제작하여 절삭공구에 적용하였고, 가공물은 상온절삭에서 난삭재로 알려진 SCM440재를 대상으로 하였다. 그리하여 극저온절삭조건(cooled condition)에 있어서 절삭저항의 변화관계, 표면거칠기, 절삭온도의 거동, 공구마멸의 변화관계를 상온절삭조건(Normal condition)의 경우와 비교하면서 극저온절삭의 효과를 고찰하였고 아울러 극저온절삭에 의해 생성된 가공물의 표면 거칠기를 예측하는 기법에 대하여 연구하였다.

* 한국수자원공사 수자원연구소 상하수도연구부
** 중경공업전문대학 기계설계과
*** 대전산업대학교 기계공학과

2. 실험 및 데이터 처리방법

2.1 실험방법

본 연구를 위해 공구 내부냉각장치에 의한 극저온절삭의 실험장치를 Fig.1처럼 구성하였고 냉각장치를 이용한 극저온절삭공구를 Fig.2와 같이 설계 제작하였다. Fig.2와 같이 제작한 공구홀더에 인서트를 고정한 후 이를 공구동력계에 설치하였으며, 실험값의 오차를 줄이기 위하여 돌출길이는 30mm로 일정하게 조정하였다. 절삭실험은 상온절삭과 공구 내부냉각에 의한 극저온 절삭으로 구분하여 실시하였으며, 공구 내부냉각에 의한 극저온 절삭 실험을 실시할 때는 절삭공구에 액체질소를 일정하게 공급시키기 위하여 질소가스 용기의 압력조절 밸브와 액체용기 공급장치(Device)의 압력조절 밸브를 조절하여 액체질소의 배출 압력을 0.25kg/cm²로 일정하게 하였다.

본 실험장치에 의해 Table 1의 절삭조건으로 실험을 하면서 각각의 절삭저항을 측정하였고 절삭조건을 변경하였을 때마다 칩의 거동을 관찰하기 위하여 유출되는 칩을 수거하여 칩의 평균두께를 측정하였다. 절삭실험을 실시한 가공물은 표면거칠기 측정기를 사용하여 가공면의 거

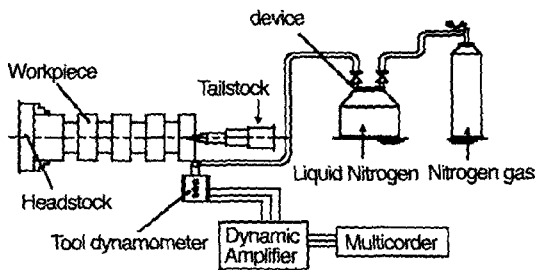


Fig. 1 Schematic view of experimental set-up

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	Material : SCM 440 Size : $\varnothing 50 \times L150, \varnothing 60 \times L360$ Chuckling length : 30 mm
Cutting conditions	cutting speed : 51.8, 97.3, 141.8, 197.8 m/min Feed : 0.075, 0.105, 0.135, 0.165 mm/rev Depth of cut : 0.5 mm Cutting temperature : Normal and Cooled
Material of insert	Tungsten carbide tool(p10)

Table 2 Chemical compositions of workpiece

Composition (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Material							
SCM 440	0.40	0.22	0.68	0.18	0.17	0.03	0.16

Table 3 Mechanical properties of workpiece

property	Tensile stress (Kg/mm ²)	Yielding stress (Kg/mm ²)	Vickers hardness (Kg/mm ²)	Elongation (%)
Materials				
SCM 440	97	69	232.0	16.0

칠기값을 측정하였으며 공구의 마멸실험은 공구 내부냉각에 의한 극저온절삭과 상온절삭으로 구분하여 실시하였다. 공구 마멸실험에 사용된 시험편의 치수는 직경 60mm 길이 360mm(고정부위 60mm)이었으며, 재질은 크롬몰리브덴강 SCM440계를 사용하였고, 그 화학적 조성 성분비 및 기계적 성질은 Table 2, Table 3과 같다.

2.2 극저온 공구냉각장치의 구성

본 실험을 위하여 선삭가공에서 많이 사용되고 있는 Lever type tool holder (PSBN R 2020K12)의 아래 부분에 텅가공을 한 후 8mm파이용 황동엘보우(Elbow)로 조립하여 Fig.2와 같은 공구내부 냉각장치를 설계하였고 액체질소의 일정한 공급을 위하여 액체질소 용기에 배출장치(Device)를 설치하였다. 질소가스용기로부터 0.25kg/cm²로 감압된 질소가스를 액체질소용기에 유도시키면 용기내의 액체질소는 8mm flexible stainless pipe를 통하여 공구홀더의 인서트 아래부분에 기화(Spray)상태로 공급된다. 이때 공구홀더에 공급된 액체

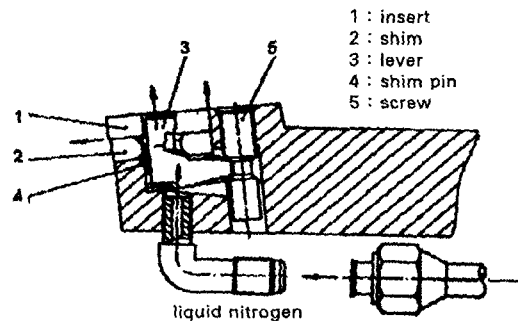


Fig. 2 Internally cooled cutting tool

절소는 인서트를 이번부터 냉각시키고 기화하여 공기중으로 날아가도록 설계하였다.

2.3 절삭온도의 측정

공구 내부냉각에 의한 극저온 절삭실험중 절인부분의 온도측정을 위해 Fig.3과 같이 공구홀더 및 인서트를 가공하였다. Fig.4는 절삭온도를 측정하기 위한 데이터 수집 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 열전대(K-type)는 인서트의 절삭온도 측정점으로부터 연결되고 기준온도 설정부(Reference junction thermo couple box)를 통해서 그 출력이 디지털 멀티메타에 연결된 후 Fig.5와 같은 절삭온도 측정알고리즘에 의해 계측된다.

2.4 퍼지신경회로망을 이용한 예측기법

퍼지신경회로망은 퍼지추론의 제어성능과 신경회로망의 학습기능을 겸비한 알고리즘으로 제어, 예측부분에서 우수한 성능을 나타낸다. 본 연구에서는 식(1)과 같이 표

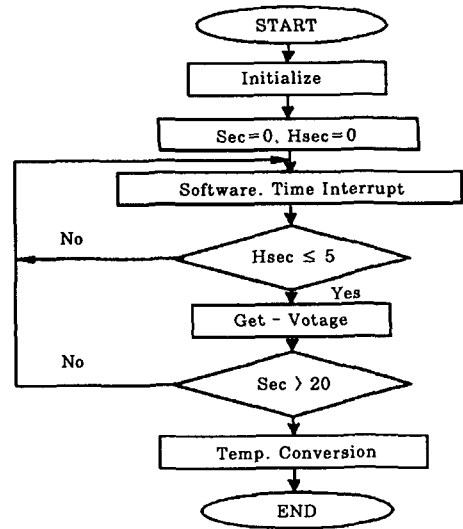


Fig. 5 Flow chart of cutting temperature measurement

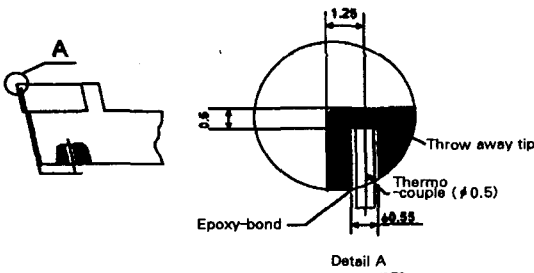


Fig. 3 Throw away tip for cutting temperature measurement

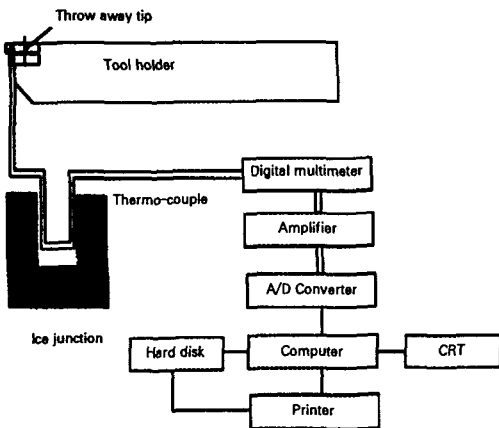


Fig. 4 Cutting temperature measurement system

현되는 간략화된 퍼지추론법을 이용하였고 전건부 멤버쉽함수에 삼각형 형태를 사용하였다.

$$\text{Rule } h: \text{IF } x_1 \text{ is } A_{h1} \text{ and } \dots x_m \text{ is } A_{hm} \text{ THEN } y \text{ is } W_h \quad (1)$$

절삭인자중 절삭속도, 이송량, 칩두께 및 주분력을 입력요소로 사용하고 가공후 표면거칠기를 출력으로 취하는 퍼지신경회로망의 구조를 Fig.6에 나타내었다.

Fig.6은 4입력 1출력의 간략화된 퍼지추론과정을 오차역전파 알고리즘의 신경회로망으로 표현한 것으로, 전방향으로 1 cycle이 완료되면 간략화된 퍼지추론이 이루어지며 다시 후방향으로 내려오면서 식(2)-식(4)에 의해

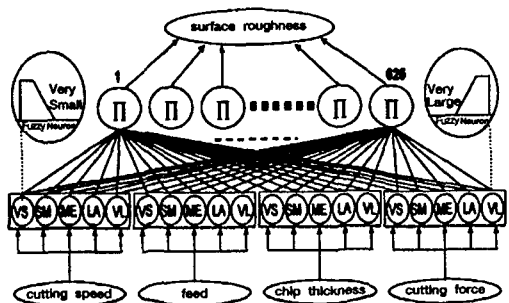


Fig. 6 Prediction of surface roughness

퍼지멤버십함수의 파라미터에 대한 가차학습이 이루어지게 된다.

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (y^p - y^*)^2$$

$$E = \sum_{p=1}^m E_p$$

(n : 출력변수의 갯수, m : 데이터쌍의 갯수) (2)

$$\frac{\partial E_p}{\partial a_{ki}} = -(y^p - y^*)(w_h - y^*) \frac{\mu_h}{\sum_{h=1}^H \mu_h} \frac{1}{A_{hi}(x_i)}$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial b_{ki}} = -(y^p - y^*)(w_h - y^*) \frac{\mu_h}{\sum_{h=1}^H \mu_h} \frac{1}{A_{hi}(x_i)} x_i$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{hj}} = -(y^p - y^*) \frac{\mu_h}{\sum_{h=1}^H \mu_h} \quad (3)$$

$$a_{ki}(s+1) = a_{ki}(s) - K_{ac} \cdot \frac{\partial E_p}{\partial a_{ki}}$$

$$b_{ki}(s+1) = b_{ki}(s) - K_{ac} \cdot \frac{\partial E_p}{\partial b_{ki}} \quad (4)$$

$$w_h(s+1) = w_h(s) - K_w \cdot \frac{\partial E_p}{\partial w_h}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 극저온 공구냉각에 따른 절삭온도의 거동

Fig.7은 Fig.2와 같이 설계 제작한 절삭공구를 극저온 상태로 냉각시킨 후 온도를 측정하여 나타낸 그래프이다. 액체질소를 공급하기 시작하여 약 1분 후부터 절삭공구

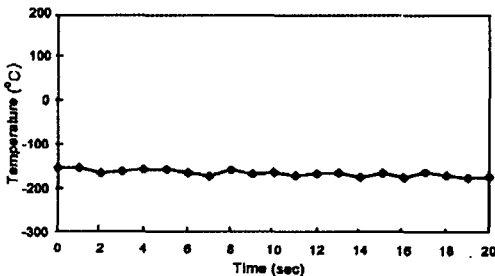


Fig. 7 Temperature for the frozen tool

의 온도를 측정하였다. 액체질소를 공급하게 되면 처음에는 급속한 기화현상이 발생되어 분무 형태로 공급되다가 약 1분 후에는 액체질소의 비점온도와 온도 평형을 이루면서 인서트부분이 젖게 되는 현상을 볼 수 있다. 즉 약 1분 후에는 공구의 냉각온도가 액체질소의 비점 (-195°C) 가까이 접근함을 예측할 수 있다.

Fig.7은 인서트 부분이 젖게 되는 1분후부터 20초 동안의 온도측정결과를 나타낸 것으로 절삭공구의 온도가 -160°C~-170°C의 범위 내에 존재하고 있음을 알 수 있다. 그리고 절삭공구의 온도가 일정하지 못하고 다소의 변화현상이 발생하는 이유는 액체질소가 공급되는 동안에 인서트가 서서히 젖어지는 현상과 증발하여 마르게 되는 현상이 반복되기 때문으로 생각된다.

Fig.8은 초경합금공구 KTP10으로 SCM440재를 절삭속도 51.8m/min, 이송량 0.105mm/rev, 절삭깊이 0.5mm의 절삭조건으로 실험하였을 때 상온절삭과 극저온절삭에서의 절삭온도를 측정하여 비교한 그래프이다. 절삭온도의 거동은 상온절삭에서 절삭 직후 약 50°C에서 출발하여 안정상태에 도달하면 약 270°C정도의 절삭온도로 평형상태를 유지하고 있다. 그러나 공구 내부냉각에 의한 극저온절삭에서는 절삭 직후 -160°C정도의 온도로부터 약 4초 후에는 약 30°C까지 급속하게 상승하다가 그 이후에는 약 30°C정도의 평형상태를 유지하고 있다. 본 실험에 있어서 절삭온도는 상온절삭에 비하여 공구 내부냉각에 의한 극저온절삭에서 약 240°C정도 낮은 온도를 유지하고 있음을 알 수 있다

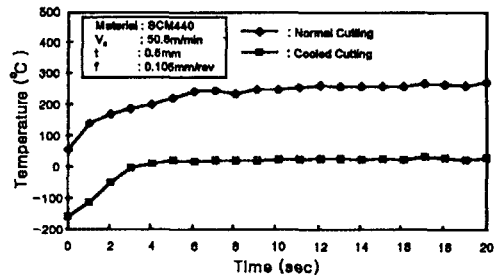


Fig. 8 Variation of cutting temperature

3.2 극저온 공구냉각에 따른 절삭특성

Fig.9는 이송량과 절삭속도의 변화에 따른 주분력의 변화관계를 나타낸 것으로서, 절삭속도의 증가에 따라서 절삭저항은 감소되는 경향이지만, 이송량을 증가시켰을 때

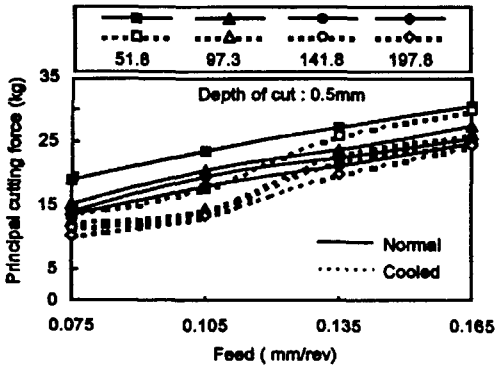


Fig. 9 Principal cutting force vs. feed for various cutting speeds

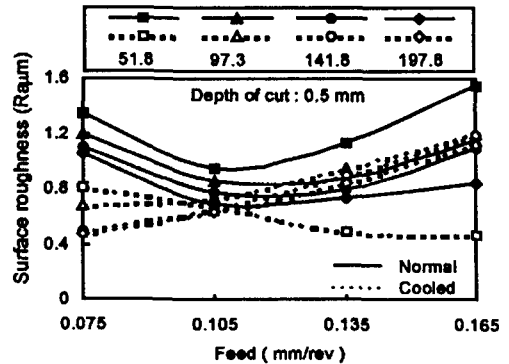


Fig. 11 Surface roughness vs. feed for various cutting speeds

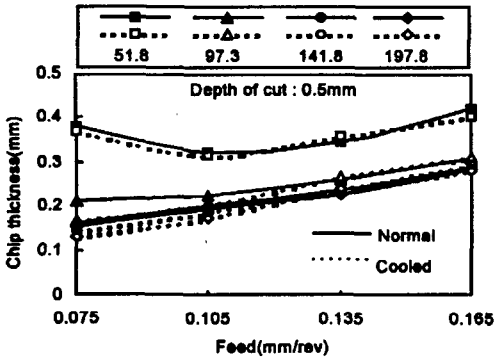


Fig. 10 Chip thickness vs. feed for various cutting speeds

는 절삭저항이 증가되는 경향을 보여주고 있다. 또한 공구 내부냉각에 의한 극저온절삭에서의 절삭저항의 크기는 상온절삭에 비하여 약 12%의 감소효과를 나타내고 있다.

그 원인은 일반적으로 재료의 저온효과로서 온도가 내려감에 따라 경도와 인장강도, 피로저항이 증가되며, 금속의 결정격자(Crystal lattice)가 저온으로 갈수록 구조재의 변형을 야기시키기 때문이다^(8,9). 그리고 크롬-몰리브덴강(SCM440)재의 경우에는 온도가 내려감에 따라 경도의 증가량이 미소하게 나타났으며 또한 Ni, Cr, Mo, V의 합금원소를 갖는 고장력 합금강의 상온절삭은 구성인선의 생성이 용이한 반면, 냉각절삭에서는 구성인선이 억제되어 비교적 안정된 칩표면상태를 유지하기 때문으로⁽¹⁰⁾ 생각된다.

Fig.10은 절삭속도와 이송량에 변화시켰을 때 칩평균 두께의 변화 관계를 나타낸 것으로서, 칩의 평균두께는

이송량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 절삭속도의 증가에 따라서는 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 원인은 절삭속도가 증가하면 칩의 길이가 길게 되어 절삭비($\gamma_c = t/t_c$, t : 절삭깊이, t_c : 칩두께)가 크게 되기 때문으로 생각된다. SCM440재에서는 칩두께의 변화관계가 극저온절삭과 상온절삭의 경우에 각각 비슷한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.3 극저온 공구냉각에 의한 표면거칠기의 경향

Fig.11은 극저온절삭과 상온절삭 실험에 있어서 시험편의 표면거칠기를 측정하여 도시한 그래프이다. 표면거칠기는 이송량이 증가함에 따라 대체로 불량해지는 경향을 보여주고 있으며 상온절삭에 비하여 극저온 절삭에서의 표면거칠기 Ra값이 약 13%정도 감소된 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

전체적으로 극저온절삭이 상온절삭에 비하여 양호한 표면거칠기를 나타내지만 일반적인 사항이라고는 단언할 수 없고 가공재의 종류, 절삭 및 냉각조건별로 많은 실험이 요구되는 부분이며, 이러한 실험이 이루어지면 각 인자의 변화에 따라 표면거칠기의 경향을 파악할 수 있을 것이다. 한편 저이송영역 및 고속절삭에서 양호한 표면거칠기를 나타내는 극저온절삭을 다듬질가공에 이용한다면 각 가공인자에 따라 표면거칠기를 예측할 수 있는 기법을 구성하는 것도 효과적일 것으로 판단된다.

3.4 극저온 공구냉각에 따른 공구마멸

Fig.12와 Fig.13은 초경합금 공구(KTP10)로 SCM440재 시험편(60×L360)을 절삭속도 51.8m/min, 절삭깊이 0.5mm, 이송량 0.135mm/rev, 절삭시

간 10min, 20min, 30min, 그리고 40min으로 선정하여 절삭실험을 실시한 후 공구의 크레이터(Crater)마멸과 프랭크(Flank)마멸상태를 나타낸 사진이다. Fig.12는 상온절삭을 실시하였을 때의 공구마멸상태의 사진이며, Fig.13은 공구내부냉각에 의한 극저온절삭을 실시하였을 때의 공구마멸상태의 사진이다.

Fig.14는 절삭공구의 크레이터 마멸깊이와 형상을 보다 정확하게 알아보기 위하여 Vertical방향으로 1000배, 그리고 Horizontal방향으로 50배로 확대하여 표시한 도면이다. 사진에서 확인할 수 있듯이 초경합금 공구 KTP10으로 상온절삭 실험을 실시하였을 때는 구성인선으로

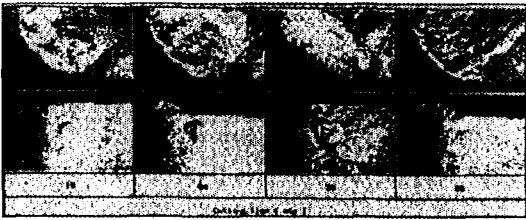


Fig. 12 Rake face and flank face VS. Cutting time(Normal cutting)

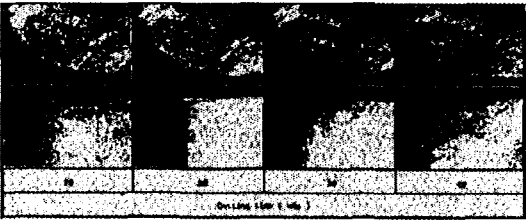


Fig. 13 Rake face and flank face VS. Cutting time(Cooled cutting)

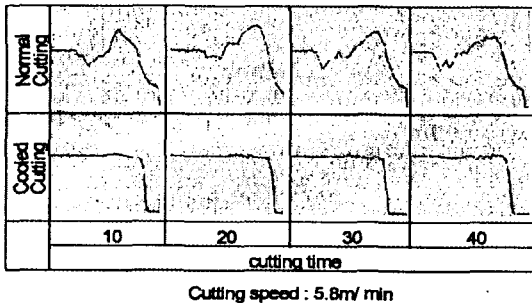


Fig. 14 Waviness of rake face VS. cutting time

인해 크레이터 마멸이 현저히 발생되어 극저온절삭에 비하여 크레이터 깊이 KT값이 약 5~6배로 크다. 극저온절삭에서는 구성인선의 생성을 거의 발견할 수가 없고 절삭시간 40분까지는 크레이터 마멸현상도 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

따라서 초경합금공구(KTP10)를 사용했을 경우, 공구내부냉각에 의한 극저온절삭시 크레이터 마멸깊이 KT값은 상온절삭에 비해 1/5~1/6정도에 불과하며 최대 경계마모값 VN도 약 1/2 정도로 형성되어 공구 수명 연장에 커다란 성과를 기대할 수 있다.

3-5 퍼지신경회로망을 이용한 표면거칠기의 예측결과 지이송, 고속절삭에서 양호한 표면거칠기를 나타내는 극저온절삭가공은 다듬질가공에도 적합할 것으로 판단되어 이절에서는 극저온가공시 각 절삭인자에 따른 표면거칠기 예측기법을 검토하였다. 학습에 이용된 데이터는 실험중에 얻어진 절삭인자들을 사용하였고 표면거칠기의 예측에 사용된 퍼지신경회로망의 구조와 데이터를 Table 4에 나타내었다.

본 연구에서 오차수렴특성을 파악하기 위해 식(5)와 같은 성능지수를 사용하였다.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100(\%) \quad (5)$$

Fig.15는 Table 4의 조건으로 학습하였을 때의 오차수렴곡선을 나타낸 것으로 짧은 학습기간내에 오차가 설

Table 4 Data of Fuzzy Neural Network

input units	cutting speed
	feed
	chip thickness
	cutting force
linguistic variable	Very Small
	SMall
	MEdium
	LArge
	Very Large
output unit	surface roughness
# of learning patterns	16
learing rate	$K_a=0.005$
	$K_b=0.005$
	$K_w=0.7$
error limits	$10E-10$

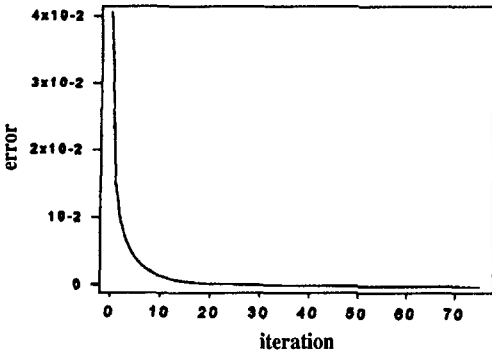


Fig. 15 Error curve

Table 5 Prediction result of surface roughness in cooled condition

cutting speed (m/min)	feed (mm/rev)	chip thickness (mm)	principal cutting force (kg)	real surface roughness (μm)	
51.8	0.075	0.370	13.4	0.81	0.9397
51.8	0.105	0.318	17.8	0.90	0.9600
51.8	0.135	0.360	26.0	1.05	0.9493
51.8	0.165	0.405	30.0	1.40	0.9386
97.3	0.075	0.167	12.5	0.68	0.9797
97.3	0.105	0.204	14.4	0.74	0.9389
97.3	0.135	0.270	23.1	0.95	0.9574
97.3	0.165	0.313	26.3	1.21	0.9785
141.3	0.075	0.143	11.6	0.50	0.9697
141.3	0.105	0.187	14.1	0.66	0.9589
141.3	0.135	0.243	21.0	0.90	0.9589
141.3	0.165	0.296	25.0	1.20	0.9700
197.8	0.075	0.130	10.3	0.48	0.9774
197.8	0.105	0.174	13.4	0.64	0.9707
197.8	0.135	0.240	20.0	0.85	0.9502
197.8	0.165	0.284	24.4	1.12	0.9713

정치에 수렴함을 보이고 있다.

이상의 내용으로부터 극저온절삭가공시의 표면거칠기를 Table 5와 같이 정확하게 예측할 수 있으며, 실험을 통해서 가공데이터가 더욱 축적되면 극저온절삭시의 여러 가지 가공인자에 대한 예측도 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 초경합금 공구(KTP10)의 내부냉각에 의한 SCM440재의 극저온절삭시 각종 절삭인자들의 영향을 상온절삭시의 경우와 비교하면서 고찰하였고 아울러 퍼지신경회로망을 적용하여 가공면의 표면거칠기를

예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구를 위하여 설계 제작한 액체 질소의 정압공급 시스템을 적용하면 약 1분후 절삭공구를 -170°C 로 급냉시킬 수가 있으며, 공구 내부냉각에 의한 극저온절삭시 절삭온도는 상온절삭에 비하여 약 240°C 정도 낮게 유지할 수 있다.

(2) 공구 내부냉각에 의한 극저온절삭에서의 절삭저항은 상온절삭에 비하여 약 12%정도 감소되었고, 가공면의 거칠기는 약 13%정도 감소되어 다소 양호한 가공면 생성이 가능하였다.

(3) 공구 내부냉각에 의한 극저온절삭에서 초경합금 공구(KTP10)는 상온절삭에 비하여 크레이터 깊이 KT값은 약 1/5~1/6 정도, 프랭크 마모 VN값은 약 1/2 정도로 공구의 마멸 성장속도가 둔화되어 공구수명 연장에 큰 성과를 얻을 수 있었다.

(4) 극저온절삭은 다듬질가공에도 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단되며, 극저온절삭가공시의 표면거칠기를 예측하기 위해 퍼지신경회로망을 적용하여 그 가능성을 검토하였다.

참 고 문 헌

- 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.
- Toshiaki Ohtani and Hiroshi Yokogawa, "The Effects of Workpiece Hardness on Tool Wear Characteristics Machining of Cold Work Tool Steel with CBN, Ceramic and Carbide Tools", JSPE, Vol. 22-3, PP. 229~231, 1988.
- J. Vigneau, 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.
- G.Pahitzsch, "Low Temperature, Cooling, a Means of Increasing Cutting Tool Life", Microtechnic, Vol.9-2, PP.65~69, 1955.
- 김철수, 오석영, 임영호, "극저온절삭에서 절삭특

- 성예측을 위한 신경회로망의 적용”, 한국정밀공학회 '95년도 추계 학술대회 논문집 pp.32~37, 1995.
6. 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.
 7. K.Okushima, Y.Kawashima, "Study on Machining with Internally Cooled Tool", *JSPE*, Vol.34-2, PP.97~104, 1968.
 8. 방건용 외 7, "구조용 재료의 극저온절삭에서의 기계적 성질 연구", 한국표준연구소, pp.27~67, 1987.
 9. 최응수, "저온에서의 재료 및 마찰 특성 고찰 (상)", *Lubrication Management*, Vol.17-4, pp.18~25, 1990.
 10. 최응수, "저온에서의 재료 및 마찰 특성 고찰 (하)", *Lubrication Management*, Vol.17-5, pp.16~25, 1990.