

극저온 절삭에서 절삭특성 예측을 위한 신경회로망의 적용 (Neural network for Prediction of the Cutting Characteristics in Cryogenic Cutting)

김 칠 수*, 오 석 영**, 임 영 호***

* 중경전문대 기계설계학과

** 수자원공사 수자원연구소

*** 숭실대학교 기계공학과

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. In cooled condition(CC) surface roughness of workpiece was better than normal condition(NC). In addition, we investigated the possibility that surface roughness of workpiece and shear angle can be predicted analyzing cutting conditions by the trained neural network.

1. 서 론

난삭재의 가공은 재료에 따라 그 최적조건이나 가공방법이 다르므로 일률적으로 해석하여 정립할수는 없으므로 각 재료에 따른 절삭성을 파악하는 것은 중요한 과제라 할 수 있다.

현재까지 난삭재의 절삭가공에 대한 연구가^[1,2] 많이 발표된다 있으나, 이와같은 연구들은 거의 대부분 난삭재의 절삭성을 향상시키기 위하여, 세라믹 공구 등을 이용한 방법으로서 절삭 공구의 마찰특성이나 침의형상, 그리고 공구의 형상변화등에 관한 보고이며, 이와같은 연구에서도 역시 절삭온도에 대한 문제를 제기되고 있는 실정이다.

또한 일부 연구결과^[3,4]에서 난삭재를 절삭할 경우 공구손상의 주원인은 절삭시 발생되는 열에 의한 용착, 화산, 화학반응등에 의한 마모에 기인한 것으로 제시되고 있는데 이와같은 문제점을 해결하기 위한 저온전사 방법으로, 가공물을 저온으로 냉각시키는 방법^[4]과 전사공구를 저온으로 냉각시키는 방법^[5,6]등이 있다.

따라서 본 연구에서는 액체질소를 이용하여 가공물을 -195 °C로 냉각시킨 후 절삭 부분에 액체질소를 뿌려주는 방법을 시도하였으며, 가공물을 상온절삭에서 난삭재로 알려진 SCM440재, STS304재를 선정하였다. 이때 절삭 공구는 조경합금 공구(KTP10)를 사용하였으며, 가공물의 극저온 냉각 효과에 따른 절삭 저항과 동특성, 표면거칠기, 절삭온도의 겨동, 그리고 공구마멸의 변화관계를 Normal condition과 Cooled condition에서 실험적으로 고찰하고, 신경회로망을 적용함으로써 절삭가공중에 가공물의 표면거칠기와 전단각을 예측할 수 있는 가능성에 대하여 연구하였다.

2. 실험 및 데이터 처리방법

2-1. 가공물 극저온냉각 절삭 장치의 구성

본 연구에서는 가공물의 극저온 냉각을 위해서 액체질소(77K)를 사용하였으며, 이를위한 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 가공물을 단열된 액체질소 용기 속에 넣으면 약 5분 후에 온도 평형을 이루어 -195°C로 냉각이 되므로 이것을 신속하게 선반의 연동축에 고정시킨다. 그리고 절삭실험 중에 온도 상승을 최대한 억제 시키기 위해 절삭부분에 액체질소를 연속적으로 공급시켰다.

액체질소의 원활한 공급을 위하여, 액체질소 용기에 액체질소

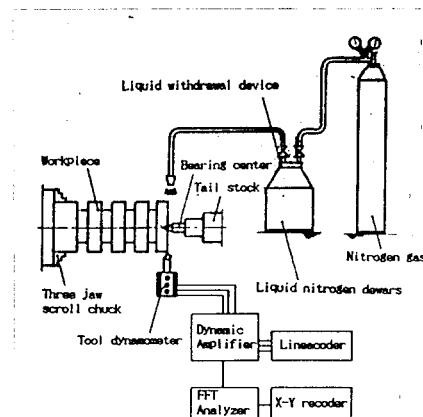


Fig.1 Schematic view of experimental set up

배출을 위한 liquid withdrawal device 장치를 설계, 제작해서 설치하였고, 0.25 Kg/cm²로 감압된 질소가스를 device를 통하여 액체 질소 용기에 유도시키면 용기내의 압력이 상승되어, 용기내의 액체질소는 배출 pipe를 통하여 액체 상태로 절삭 위치에 공급된다.

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 0.55 mm의 구멍을 뚫고 열전대를 삽입하여 온도측정장치를 설치하였다. 이때 사용한 열전대는 -270°C ~ 1370°C의 범위까지 측정할 수 있는 K-type을 사용하였으며 열전대의 직경은 0.5mm의 크롬멜(chromel)과 알루미늄(alumel)로 되어있고 바깥부분은 단열재로 빙복되어 있으므로 주변의 온도 영향으로 인한 측정 오차를 최소한으로 방지할 수 있었다.

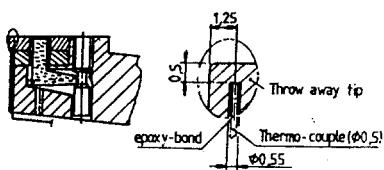


Fig.2 Throw away tip for cutting temperature measurement

열전대는 throw away tip의 절삭온도 측정점으로부터 연결되어 있고, 또한 기준 온도 설정부를 통해서 그 출력이 디지털 멀티메타에 연결되어 mV로 표시되며 이것을 다시 증폭기로 증폭시킨 후 A/D 변환기에서 아나로그신호로 변환된후에 컴퓨터에 입력된다. 또한, 측정된 절삭온도는 hard disk driver에 data로 자동 저장되어, printer 또는 plotter에 온도 측정 결과를 자동으로 기록도록 하였다.

2-3. 실험방법

Table1과 같이 절삭실험은 각각 상온과 저온으로 나누어서 실시 하였으며, cutting tool은 초경합금재의 square throw away tip을 선정하였다.

Table1. Experimental conditions

Engine	380 WL(100×380, 2.2Kw)
Cutting tool	Tool holder: PSBNR 2020 K12 insert: ① SNMA 120408(P10) Overhang length: 30mm SCM440, STS304 $D \times L = \varnothing 50 \times 180$
Workpiece	Chuck length: 30mm 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
Cutting conditions	

이때 절삭실험을 실시할 때마다 가공물의 편심을 제거하기 위하여 절삭깊이 0.2mm로 finish가공을 실시하였으며, 공구의 돌출길이는 30mm로 일정하게 하고 공구마멸에 따른 실험값의 오차를 줄이기 위하여 매 절삭 실험마다 공구인선을 교환하였다.

절삭 저항 측정은 AST식 공구 동력계로 검출한 신호를 증폭기를 통하여 lineacorder에서 graph로 나타나도록 하였으며 power spectrum은 주분력 성분만을 주파수 분석기로 분석하여 X-Y recorder에서 graph로 나타내었다. 절삭 실험이 끝난 가공물을 성形현상이 제거된 후에 surface roughness tester에서 표면거칠기값 (Rmax, Ra)을 측정하였다. 그리고 냉각된 가공물의 온도거동과 절삭실험 중의 절삭온도의 거동을 확인하기 위하여 각각의 온도측정을 병행하였다.

2-4. 역전달 방식의 신경회로망

신경회로망은 Fig.3과 같이 입력층, 중간층, 출력층으로 구성되어 있는 다중신경회로망이 패턴분류를 위하여 사용된다. 입력층에는 절삭속도, 이송량, 침투께, 절삭력의 power spectrum을 입력패턴요소로 사용하였고, 중간층과 출력층은 처리소자와 연결강도를 지니고 있으며, 노드(node)마다의 처리소자는 강도를 높인 각각의 입력값에 마이어스 값을 더하여 시그모이드함수를 통하여 출력력을 만들어낸다. 입력층을 제외한 각 노드에 대한 총입력은 그 전층의 모든 노드의 출력값에 강도를 높인 값이다. 즉, k층의 j노드에 대한 총입력은 식(1)과 같다.

$$net_j^k = \sum_{i=1}^N W_{ij}^k o_i^{k-1} \quad \dots \dots (1)$$

여기서, N : (k-1)번째층의 노드의 수

W_{ij}^k : (k-1)번째층의 i번째 노드에서 k번째층의

j번 노드사이의 연결강도

o_i^{k-1} : (k-1)번째층의 i번째 노드의 출력값

따라서, k층에서의 j노드에서의 출력은 식(2)와 같다.

$$o_j^k = \frac{1}{1 + e^{-(net_j^k + \theta_j)}} \quad \dots \dots (2)$$

식(2)는 Bias θ_j 를 지닌 시그모이드(sigmoid)함수를 나타낸다.

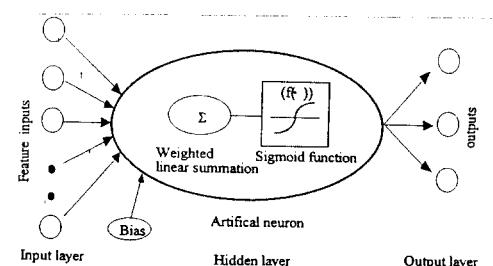


Fig.3 Back-propagation neural network with one hidden layer.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 가공물의 극저온냉각에 따른 절삭온도의 거동

Fig.4는 극저온 상태로 냉각시킨 가공물의 시간의 경과에 따른 온도변화를 측정하여 그 결과를 나타낸 도면이다. 단일된 액체질소 용기 속에 가공물을 넣으면 처음에는 액체 질소가 기화하여 끓기증으로 날아간다. 시간이 경과할 수록 기화현상은 점점 사라지고 약 5분이 경과하면 액체질소의 표면이 잔잔하게 되면서 기화현상이 멈추게 된다. 이때의 온도가 -195°C이며, 가공물을 액체질소 밖으로 꺼내서 온도를 측정한 결과 -190°C정도의 온도를 유지하고 있었으며 이와같은 온도는 약 2분이 경과할 때까지 지속됨을 확인할 수 있었다.

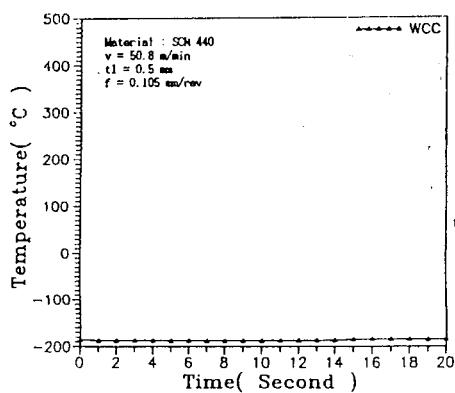


Fig.4 Variation of temperature for the frozen workpiece

Fig.5는 초경합금 공구 KTP10으로 SCM440재를 절삭속도 51.8m/min, 이송량 0.105mm/rev, 절삭깊이 0.5mm의 절삭조건으로 dry cutting을 할 때에, 상온절삭과 극저온 절삭의 절삭온도를 측정하여 그 결과를 비교한 도면이다. 절삭온도의 거동을 분석해 보면, 상온절삭에서는 절삭 직후에는 절삭온도가 약 50°C이었으나, 약 2초까지는 급속하게 상승하고, 약 6초까지는 완만

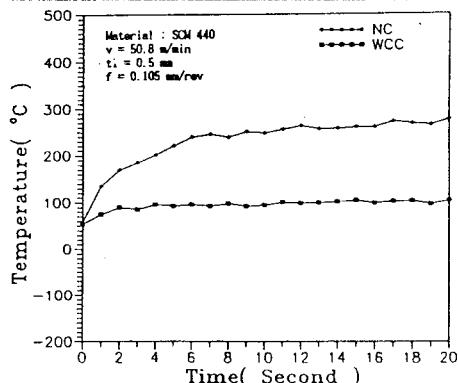


Fig.5 Variation of cutting temperature under normal and cooled cutting condition

하게 상승하다가, 그 이후에는 약 270°C 평형상태를 유지하고 있다. 반면에 가공물 냉각에 의한 극저온절삭에서는 절삭 직후에는 절삭온도가 약 50°C 이었으나, 약 2초까지는 급속하게 상승하고 그 이후에는, 약 100°C정도의 평형상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 절삭온도는 가공물 냉각에 의한 극저온절삭이 상온절삭에 비하여 약 170°C 정도 낮은 온도를 유지하고 있음을 알 수 있다.

3-2. 가공물의 극저온 냉각영향에 따른 절삭특성

Fig.6, Fig.7은 절삭속도와 이송량의 변화에 따른 절삭저항의 주분력의 변화관계를 나타낸 것으로서 이송량이 증가함에 따라

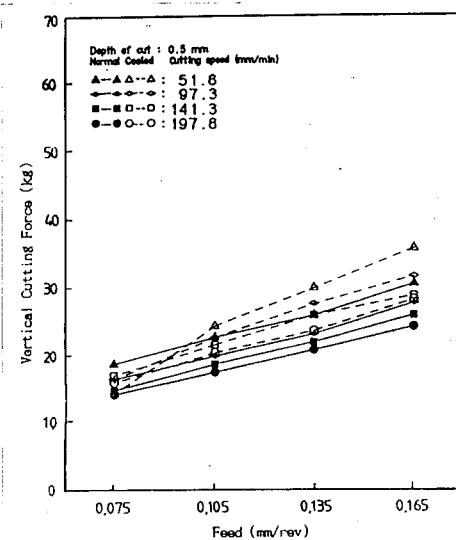


Fig.6 Vertical cutting force vs feed for various cutting speeds(SCM440, KPT10)

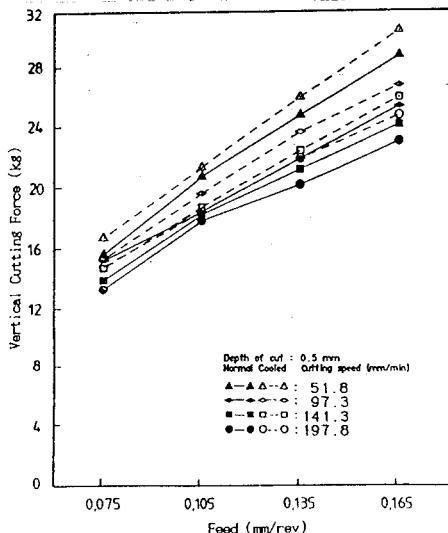


Fig.7 Vertical cutting force vs feed for various cutting speeds(STS304, KTP10)

서 절삭저항은 증가되는 경향이지만, 절삭속도의 증가에 따라서는 오히려 감소되는 경향을 나타내고 있다. 또한 극저온절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 다소 크게 형성되고 있다. 이와 같은 현상은, 일반적으로 금속은 저온 상태가 될수록 강도와 취성이 증가하게 되므로, 이로 인한 소성변형 응력 또는 항복응력이 증가되는데 기인되는 현상으로 생각할 수 있다.

Fig.8은 극저온절삭과 상온절삭에서의 칩의 두께를 비교 검토한 도면이다. 칩의 두께에는 절삭속도의 증가에 따라 감소되고 있으며, 저온절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 약 30% 감소되는 경향을 보이고 있다.

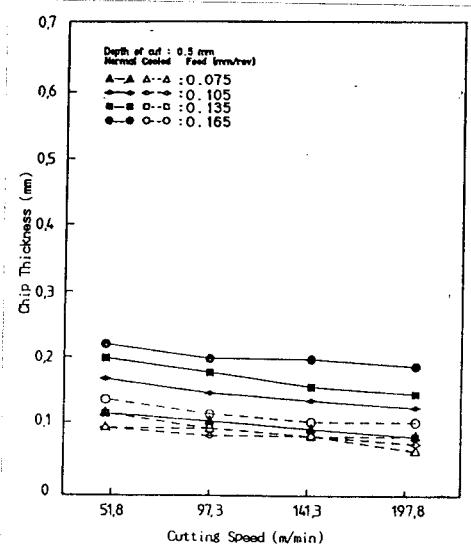


Fig.8 Chip thickness vs feed for various cutting speeds(STS304, KTP10)

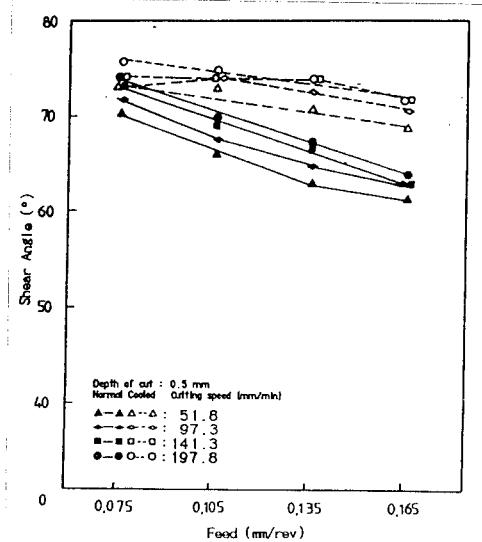


Fig.9 Shear angle vs feed for various cutting speeds (STS304, KTP10)

이 영향은 전단각의 변화를 일으키는 요인이 된다. 일반적으로는 절삭 방향과 전단면이 이루는 전단각이 커지면 칩은 얇고 길게 되며, 전단각이 작아지면 칩은 두껍고 짧게 된다. 그러므로 2차원 절삭으로 가정한다면, 본 실험에서 사용된 insert의 공구 경사각은 -6° 이므로 (3),(4)식에 의해서 전단각이 구해진다.

$$\gamma_c = tc/t \cdot \sin\phi/\cos(\phi - \alpha) \quad \dots \dots \quad (3)$$

$$\tan\phi = \gamma_c \cos\alpha / (1 - \gamma_c \sin\alpha) \quad \dots \dots \quad (4)$$

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

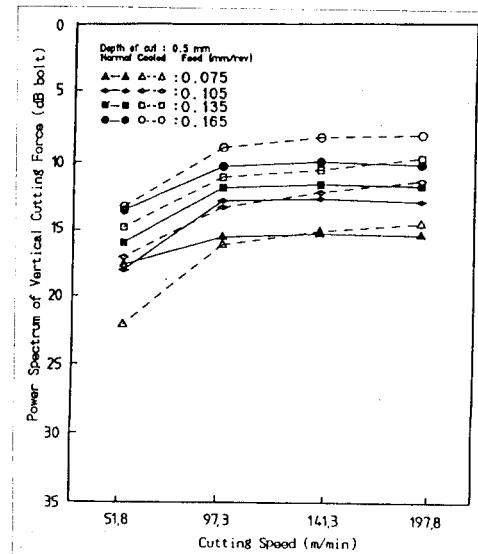


Fig.10 Power spectrum of vertical cutting force vs cutting speeds for various feeds(SCM440, KTP10)

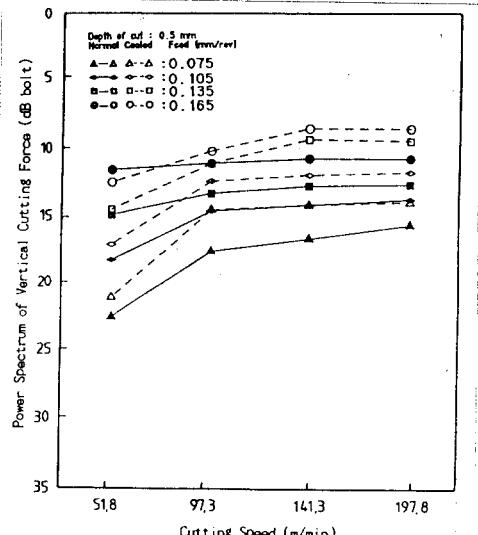


Fig.11 Power spectrum of vertical cutting force vs cutting speeds for various feeds(STS304, KTP10)

Fig.9는 극저온절삭과 상온절삭실험에서 형성된 전단각을 비교 검토한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 절삭속도를 증가 시키므로 전단각은 크게되는 경향을 보이고 있으며, 이송량을 증가시켰을 때는 전단각은 오히려 작아지는 경향이다. 이와 같은 현상에서 가공물의 냉각효과가 직접 전단각 형성에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig.10, Fig.11은 절삭속도와 이송량의 변화에 따른 주분석의 power spectrum을 나타내고 있다.

이때 사용된 FFT analyzer (Model:CP-400)는 진동체의 실제진폭을 나타내는 진동해석과 power spectrum의 주파수 성분을 display 하여 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.

3-3. 표면거칠기에 미치는 가공물의 극저온 냉각영향

Fig.12, Fig.13은 STS304재와 SCM440재에 대한 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화관계를 각각 도시한 그림이다. 가공면의 표면거칠기 값은 절삭속도의 증가에 따라서 감소하며, STS304재에서는 극저온절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 다소 양호한 거칠기를 형성하고 있는데, 이와같은 현상은 절삭 속도 150m/min 이상에서 뚜렷하게 나타나고 있다. 이와같은 현상은 상온절삭에서는 구성인선이 발생되며 쉬운데 반하여 극저온 상태에서는 구성인선의 발생이 작고 또, 마찰 저항의 감소에서 오는 영향으로 생각할 수 있다. 그리고 SCM440재에서는 극저온절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 다소 불량한 거칠기로 나타났다.

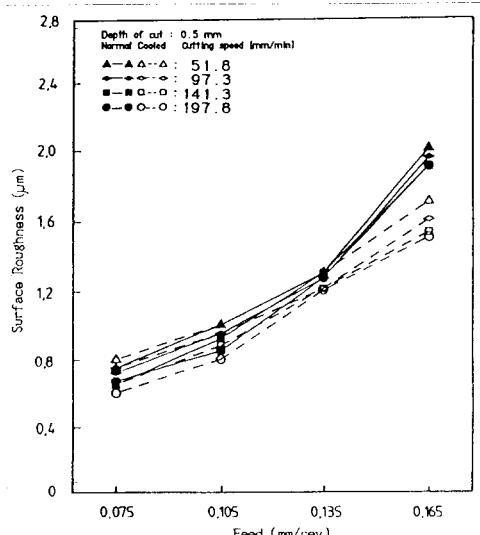


Fig.12 Surface roughness vs feed various cutting speeds (STS304, KTP10)

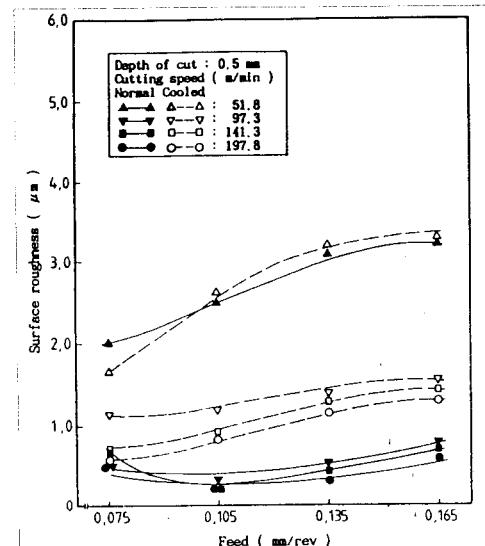


Fig.13 Surface roughness vs feed various cutting speeds (SCM440, KTP10)

3-4. 신경회로망을 이용한 예측결과

사용된 신경회로망의 구조와 입력조건을 Table2에 나타내었다. 신경회로망은 실험시의 절삭조건인 절삭속도 및 이송과 절삭후에 얻을 수 있는 절삭력의 power spectrum과 침두께를 표본 데이터로 하여 학습을 시켰다.

Table2 Structure of neural networks for training

classification	cooled condition	normal condition
number of input units	4	4
number of hidden units	9	9
number of output units	2	2
number of hidden layers	1	1
No. of learning patterns	16	16
learning rate(α)	0.7	0.7
momentum rate(γ)	0.9	0.9

학습은 Total error을 0.0001수준으로 학습시켰으며, 학습결과를 이용한 공작물의 표면거칠기와 전단각을 예측한 실험결과 및 학습된 신경회로망의 test result를 Table3과 Table4에 나타내었다.

신경회로망을 이용하여 절삭조건 및 결과를 이용하여 가공물의 가공상태를 나타내는 표면거칠기 및 전단각은 대체적으로 양호하게 예측되었다.

Table3과 Table4에 나타낸 극저온 냉각에서의 표면거칠기 및 전단각을 예측한 결과, SCM440의 경우 16개의 test pattern중에서 12개 정도의 표면거칠기가 $0.1\mu\text{m}$ 이내의 오차 범위내에 있으 있으며, 전단각은 16개 모두가 1° 의 오차범위내에 있음을 알 수 있다. 또한, STS304의 경우에는 16개의 test pattern중에서 13개 정도가 $0.1\mu\text{m}$ 오차 이내의 표면거칠기를 보였으며, 전단각은 14개가 1° 이내의 오차범위에 있음을 알 수 있다. 이와같은 방법을 적용하면 극저온절삭후에 가공물의 표면거칠기와 전단각을 정확히 예측할 수 있으리라 생각된다.

Table3 Test result of neural network and experimental result in cooled condition(material : SCM440)

cutting condition and result				experimental result		test result of neural network	
cutting speed (mm/min)	feed (mm/rev)	chip thickness (mm)	power spectrum (dB Volt)	surface roughness (μm)	shear angle ($^{\circ}$)	surface roughness (μm)	shear angle ($^{\circ}$)
51.8	0.075	0.25	19.6	1.70	58.71	1.74	57.98
51.8	0.105	0.29	16.2	2.65	55.46	2.61	55.23
51.8	0.135	0.36	13.8	3.20	50.34	3.23	51.26
51.8	0.165	0.35	12.0	3.30	51.04	3.27	50.13
97.3	0.075	0.23	13.5	1.20	60.42	1.06	61.17
97.3	0.105	0.25	10.2	1.15	58.71	1.22	59.26
97.3	0.135	0.26	8.0	1.38	57.87	1.35	58.13
97.3	0.165	0.27	7.0	1.50	57.05	1.49	57.36
141.3	0.075	0.17	11.9	0.70	65.92	0.69	66.42
141.3	0.105	0.17	9.4	0.90	65.92	0.92	65.29
141.3	0.135	0.18	7.5	1.30	61.97	1.22	64.07
141.3	0.165	0.19	6.6	1.42	61.03	1.42	63.16
197.8	0.075	0.11	10.7	0.55	71.93	0.56	71.08
197.8	0.105	0.12	9.0	0.85	70.89	0.83	70.54
197.8	0.135	0.14	7.6	1.15	68.86	1.12	69.78
197.8	0.165	0.15	7.0	1.30	67.87	1.32	69.25

Table4 Test result of neural network and experimental result in cooled condition(material : STS304)

cutting condition and result				experimental result		test result of neural network	
cutting speed (mm/min)	feed (mm/rev)	chip thickness (mm)	power spectrum (dB Volt)	surface roughness (μm)	shear angle ($^{\circ}$)	surface roughness (μm)	shear angle ($^{\circ}$)
51.8	0.075	0.10	21.0	0.80	72.98	0.77	72.56
51.8	0.105	0.10	16.9	1.00	72.98	1.01	71.90
51.8	0.135	0.12	14.3	1.30	70.99	1.32	70.98
51.8	0.165	0.14	12.3	1.70	68.86	1.67	69.91
97.3	0.075	0.10	14.3	0.75	72.98	0.75	73.26
97.3	0.105	0.09	12.2	0.95	74.04	0.96	72.87
97.3	0.135	0.10	10.9	1.21	72.98	1.23	72.27
97.3	0.165	0.12	10.0	1.60	70.89	1.54	71.51
141.3	0.075	0.09	13.7	0.65	74.04	0.64	73.99
141.3	0.105	0.09	11.7	0.88	74.04	0.87	73.65
141.3	0.135	0.09	9.1	1.21	74.04	1.22	73.22
141.3	0.165	0.11	8.3	1.53	71.93	1.54	72.65
197.8	0.075	0.07	13.7	0.60	76.18	0.57	74.66
197.8	0.105	0.08	11.5	0.80	75.11	0.81	74.42
197.8	0.135	0.09	9.2	1.20	74.04	1.17	74.11
197.8	0.165	0.11	8.0	1.50	71.93	1.51	73.73

4. 결 론

SCM440재, STS304재를 상온절삭과 극저온절삭을 실시할 때 극저온절삭이 가공재의 절삭성에 미치는 영향을 분석하고, 신경회로망을 적용하여 가공면의 표면거칠기와 전단각을 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구와 같은 조건에서, 가공물은 액체질소내에서 -195°C의 저온상태로 냉각시켰을 때는 상온에 노출시켜도 약 2분 정도 극저온 상태가 유지됨을 확인할 수 있었다. 또한 절삭온도는 가공물 냉각에 의한 극저온절삭이 상온절삭에 비하여 약 170°C정도 낮게 유지된다. 침의 두께는 극저온절삭이 상온절삭에 비하여 약 30% 감소되며, 전단각을 약 10% 증대시키는 결과를 가져오게 된다.

(2) STS304재의 경우는 극저온절삭을 시도하였을 때 상온절삭에 비하여 구성인선의 감소 효과가 있으며, Ra값이 약 5% 감소된 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있는 효과가 있다.

(3) 주분력에 대한 power spectrum은 이송량의 증가에 따라 증가는 경향을 보여주고 있으며 대체로 절삭속도 100m/min 이상에서는 매우 완만히 증가하고 있다. 그리고 극저온절삭의 경우가 상온절삭에 비하여 약간 높은 값으로 나타나고 있다.

(4) 신경회로망은 극저온절삭에서의 절삭특성을 예측하는데 유용하게 이용될 수 있으며, 본 연구에서 제안한 역전단방식의 신경회로망에 의하면 표면거칠기 값은 0.1 μm 정도의 오차(6.5%), 그리고 전단각은 1°이내 정도의 오차범위(1.6%)까지 정확한 예측이 가능하였다.

REFERENCES

- (1) 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)