

마이크로드릴 가공 시 버 크기의 예측

이성환#, 권성용*

Prediction of Burr Size in Micro-drilling

Seoung Hwan Lee[#], Sung Yong Kwon^{*}

ABSTRACT

The exit burrs in the micro-drilling of precision miniature holes are of interest, especially for ductile materials. As burrs from this process can be difficult to remove, it is important to acquire the way of predicting burr types as well as optimal cutting conditions which minimize the burrs. In this paper, an artificial neural network was used for the prediction of burr formation in micro-drilling. First, the influence of cutting conditions including cutting speed, feed and drill diameter on the exit burr characteristics, such as burr size and type, were observed and analyzed. Then, the burr types were classified by using the influential experimental data as input parameters to the neural nets.

Key Words : Micro-drilling (마이크로드릴링), exit burr (출구 버), deburring (버 제거), burr type (버 형태), cutting condition (절삭 조건), artificial neural network (인공지능신경망)

1. 서론

기계가공 후 공작물의 소성변형에 기인하여 가공면의 모서리에 생기는 버(burr)는 생산성을 저하시키고, 생산 조립공정을 자동화 시키는데 있어 큰 장애요소로 대두 되고 있다. 이러한 버를 제거하는 기술은 기계 가공 전반에 걸쳐 초정밀화와 자동화를 구현하기 위한 핵심 기반 기술이므로, 이 기술의 효율적 적용을 통하여 생산자동화 시 병목현상을 방지하며, 고정밀도를 실현시켜 고부가가치 부품가공 및 생산성 증대에 기여 할 수 있다. 최근 들어 기계 및 전자 부품 등이 전반적으로 소형화되는 추세이며, 그에 따라 마이크로 머시닝이 부각되고 있다. 마이크로 머시닝은 손목시

계의 부속제조부터 자동차용 인젝션 노즐이나 전자부품 및 반도체, 생화학 분야에서 이르기까지 폭 넓은 분야에 다양하게 적용되고 있으며, 이 중 에서 마이크로 드릴링(micro-drilling)은 금속 및 모 든 물체에 직경이 0.5mm 이하인 구멍을 뚫는 공 정¹을 지칭한다. 마이크로 드릴 가공기술은 시장 규모로 보아 국내시장 년 1200 억원, 세계시장 년 1000 억 달러에 달하는 유망한 분야이다.²

마이크로 드릴링 중 발생하는 마이크로 버 (micro-burr)는 일반 버가 갖는 문제점인 부품 조립 불능, 형상 및 치수 정밀도나 표면 거칠기의 악화 등의 가능성을 항상 내포하고 있으며, 동시에 관찰, 측정 및 제거가 용이하지 않는 특성을 가지고 있다. 따라서, 정밀 가공 시 생산자동화의 측면에

* 접수일: 2003 년 5 월 12 일; 게재승인일: 2003 년 8 월 14 일
한양대학교 대학원 정밀기계공학과
교신저자: 한양대학교 기계공학과
E-mail: sunglee@hanyang.ac.kr, Tel: (031) 400-5288

서 가공 중에 발생하는 버 형성과 파단 현상을 정량적으로 예측할 필요성이 대두되고 있다.³

지금까지의 마이크로 드릴 가공 시 버 형성에 관한 연구를 살펴보면, Park 등은 직경이 0.6-1mm 인 드릴을 사용하여 알루미늄 합금의 미세드릴 가공 시 출구 버의 발생과정 및 절삭 조건의 영향에 의한 버의 형태와 크기를 실험적으로 규명하였고^{4, 5} Stim 등은 직경 0.1mm, 0.5mm 직경의 드릴을 가지고 Al 6061-T6 과 25MoCrS4 강에 대해서 기존의 범용 드릴 가공과 비교하여 마이크로 버 형성에 관한 실험을 하였으며⁶ Lee 등은 직경 0.1mm 의 드릴과 0.25mm, 0.5mm 의 엔드밀을 가지고 각각 Al 2124 와 Al 6061 에 대하여 절삭 조건의 영향에 의한 버 형성을 관찰하였다.⁷ 대체적으로 상기한 연구사례에서는 제한된 절삭조건과 공작물의 재질에 따른 버 발생 경향이나 FEM 모델 등을 이용한 해석만을 보여주고 있으나, 실제 가공 시 절삭조건이나 재질에 따라 버의 발생 경향이 서로 상충되는 부분이 나타남으로써, 마이크로 드릴 가공 시 버 발생에 관한 좀더 체계적인 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 황동(brass)과 순동(copper)을 마이크로 드릴로 가공한 후 출구 버(exit burr)의 높이를 측정하고, 버 형태를 분류하였다. 일반적으로 측정이 어려운 마이크로 버의 특성을 감안하여 고해상도 측정 시스템 및 윤곽해석 프로그램을 사용하였으며, 분석한 데이터를 기반으로 절삭조건에 따른 마이크로 버 생성을 예측하고자 하였다.

2. 버 관련 이론

2.1 버 생성과정

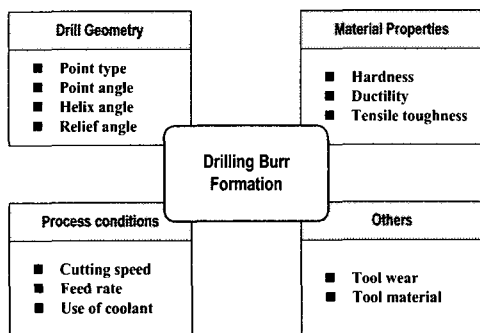


Fig. 1 Parameters affecting drilling burr formation

Fig. 1 은 드릴 가공 시 버의 생성과 관련 있는 변수들을 보여주고 있다. 절삭조건에서 버의 형상과 높이에 가장 영향을 미치는 인자는 이송속도(feed rate)와 주축의 회전속도(spindle speed)이다. 일반적으로 이송속도가 커질수록 버의 높이가 커지고, 절삭속도가 클수록 버의 크기가 커지는 경향을 가진다.⁸ 그 밖의 드릴의 형상, 피삭재의 물성치, 공구 마멸 등이 드릴 가공 시 버 형상과 관련 있는 가공 변수들이다.

Fig. 2⁹ 는 드릴 버 형성의 원리를 보여주고 있는데, 드릴 가공 시 드릴이 출구부를 빠져 나오는 단계에서의 피삭재의 변형 거동에 따라 버 형성을 분류할 수 있다. Type A 는 드릴 선단부의 위치가 구멍의 출구부에 접근하면서 소성변형이 발생하는 부위에서 크랙이 발생하는 경우이다. 이 경우 버 높이가 원주를 따라 균일하며(uniform burr) 캡(cap)이 생기는 경우도 있다. Type B 의 경우는 드릴 중심부에서의 크랙이 빨리 진전되어 캡(cap)이 파열됨으로써 버의 크기¹⁰ 가 커지고 불규칙한 형상이 나타난다(crown or petal burr).

Steady-state	Initiation	Development	Initial Fracture	Burr formation	Example
Type A	Plastic deformation at the center(thin)	Plastic zone expands with little cutting	Fracture at the edge of the drill	Burr and cap formation	Uniform burr
Steady-state	Initiation	Development	Initial fracture	Burr formation	Example
Type B	Thick plastic deformation layer	Limited expansion of plastic zone	Fracture at the center of the drill	Burr formation	Crown burr

Fig. 2 Drilling burr formation mechanism⁹

Table 1 Burr classifications¹⁰

	Type A	Type B
Burr shape	Uniform burr	Crown burr
Burr height	~1.1(d/2) mm	(1.1~1.5)(d/2) mm

2.2 버 분류

드릴 버는 가공방법, 가공조건, 재료특성에 따라 여러 가지 형태를 가지는데, 드릴 가공에서 Kim¹⁰ 은 스테인리스강(AISI 304L) 모재에 관해서 이송속도와 절삭속도를 가지고 드릴 버의 종류를 2 가지(uniform burr, crown burr)로 분류하였고, Min¹¹

은 탄소강(AISI 4118)에 대해서 버의 종류를 4 가지(uniform burr, uniform burr with cap, Irregular burr, crown burr)로 분류하였다.

드릴 절삭 가공 시에 발생하는 대부분의 버는 Fig. 3 에서 보여지듯이 공구 진행 방향의 피삭재의 이탈지점에 발생하는 출구 버(exit burr)이다.

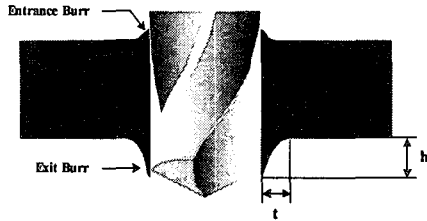


Fig. 3 Entrance burr and exit burr (h=height, t=thickness)

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

실험에 사용된 피삭재는 전기용, 건축용, 화학공업용, 가스켓, 기물, 자동차용부품, 기계 부품에 널리 사용되는 순동(copper)과 자동차용 라지에이터, 카메라, 보온병, 배선금구, 스위치 단자 등에 쓰이는 황동(brass)을 택하였으며, 화학적인 성분과 조성은 Table 2 와 같다. Table 3 은 피삭재 들의 기계적 성질을 나타내고 있다.¹²

Table 2 Chemical composition (wt: %) of workpieces

Material	Composition (wt: %)			
	Cu	Zn	Pb	Fe
Brass	64.2	35.5	0.07	0.05
Copper	99.96	-	-	-

Table 3 Mechanical properties of workpieces

Material	Tensile strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Hardness (Hv)
Brass	317	103	100
Copper	250	115	77

실험은 수직형 머시닝센터(현대정공 AJV-18)를 사용하여 수행하였다. Fig. 4 와 Table 4 는 각각 실험에 사용된 드릴의 형상 및 사양을 나타낸다.

3.2 실험방법

실험에 사용된 시편형상은 30× 30× 0.3mm 의

크기를 가지는 직사각형 형태이다. Table 5 는 실험에 사용된 절삭조건을 나타낸다.

버 형상의 관찰을 위해 Fig. 6 과 같이 광학현미경의 윗 부분에 카메라를 장착하여 형상 이미지

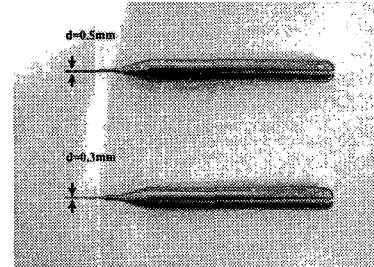


Fig. 4 Micro-drill (top: d=0.5mm, bottom: d=0.3mm)

Table 4 Micro-drill specifications

Items	Specifications
Model	Micro-drill (M.A. FORD)
Point angle	130°
Helix angle	24°
Material	C-3 tungsten carbide
Diameter	0.3mm, 0.5mm

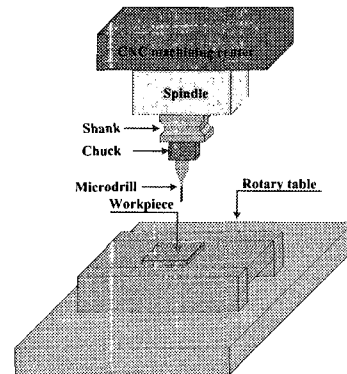


Fig. 5 Experimental setup

Table 5 Cutting conditions

Items	Conditions
Materials	Brass, Copper
Drill diameter (mm)	0.3, 0.5
Spindle speed (rpm)	6000, 7000, 8000, 9000, 10000
Feed (mm/rev)	0.001, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02
Exit length (mm)	0.1
Cutting fluid	dry

데이터를 획득하였다. 마이크로드릴 버 높이 측정 은 Fig. 7 에서 보여지는 고정도 형상 측정기 Contracer CV-624 를 사용하였다. CV-624 는 Z 축 검출기에 고정도 레이저 스케일을 탑재한 측정기로 50mm 의 검출 범위 영역에서 0.05 μ m 의 분해능이 가능하다. 윤곽 해석 프로그램인 FORMPAK-1000 을 사용하여 측정 결과 데이터를 정리하였다.

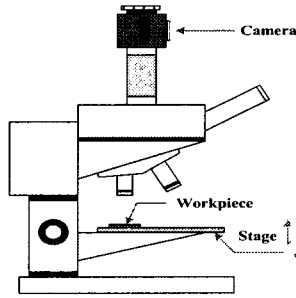


Fig. 6 Burr observation using microscope

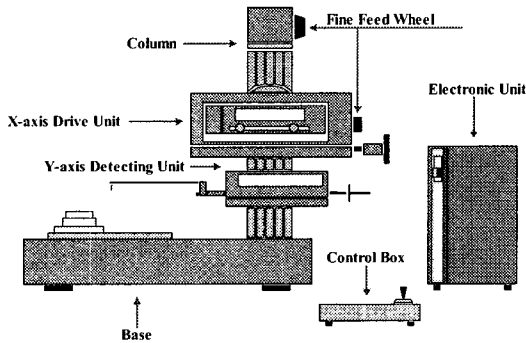


Fig. 7 Contracer CV-624

4. 실험결과

4.1 발생 버 형태

광학현미경으로 관찰한 결과 버의 형태가 3 가지로 나타났다(Table 6). 첫째, Type I 은 이송속도가 작을 때 발생하는 상대적으로 크기가 작은 버이며, 원주를 따라서 드릴 진행 방향으로 일정 높이를 가진다. 둘째, Type II 는 출구 모서리에 캡(cap)이 옆에 붙어있는 형태로 이 경우도 이송속도가 작을 때 많이 생성되었다. 본 논문에서는 Type I 와 Type II 를 합쳐 Type A 라 정의하였다. 셋째, Type III 는 버가 출구 주위에 찢어진 형태로 남아있는 경우로 본 실험에서는 이송속도 0.01mm/rev 을 기점으로

이송속도가 증가할수록 많이 발생하였다. 황동의 경우에 있어서 낮은 이송속도(0.001mm/rev)에서 주축 회전속도와 상관없이 드릴 직경이 0.3mm 일 때는 Type I 에 해당하는 버가 많이 발생하였고, 직경이 0.5mm 일 때는 Type II 에 해당하는 버가 주로 관찰되었다. 이는 드릴 직경이 클 때 피삭재를 관통하기 직전의 추력이 '캡'을 완전히 제거하지 못하기 때문이라 생각된다. 순동의 경우에 있어서는 드릴 직경에 상관없이 이송속도가 0.005mm/rev 이하일 때 Type I 이 주로 관찰되었다.

Table 6 Classification of burr formation in micro-drilling

Materials	Type	Type A		Type B
		Type I (uniform burr)	Type II (uniform burr with cap)	Type III (petal burr)
Brass	d=0.3mm			
	d=0.5mm			
Copper	d=0.3mm			
	d=0.5mm			

Table 7 Classification of burr formation in brass (drill diameter=0.3mm)

Feed	0.001	0.005	0.01	0.015	0.02
Speed	mm/rev	mm/rev	mm/rev	mm/rev	mm/rev
6000rpm	Type I	Type I	Type I	Type III	Type III
7000rpm	Type I	Type II	Type III	Type III	Type III
8000rpm	Type I	Type II	Type I	Type III	Type III
9000rpm	Type I	Type II	Type III	Type III	Type III
10000rpm	Type I	Type II	Type II	Type III	Type III

Table 8 Classification of burr formation in brass (drill diameter=0.5mm)

Feed	0.001	0.005	0.01	0.015	0.02
Speed	mm/rev	mm/rev	mm/rev	mm/rev	mm/rev
6000rpm	Type II	Type I	Type III	Type III	Type III
7000rpm	Type II	Type II	Type III	Type III	Type III
8000rpm	Type II	Type I	Type III	Type III	Type III
9000rpm	Type II	Type I	Type III	Type III	Type III
10000rpm	Type II	Type II	Type III	Type III	Type III

Table 9 Classification of burr formation in copper (drill diameter=0.3mm)

Feed \ Speed	0.001 mm/rev	0.005 mm/rev	0.01 mm/rev	0.015 mm/rev	0.02 mm/rev
6000rpm	Type II	Type I	Type III	Type III	Type III
7000rpm	Type I	Type I	Type III	Type III	Type III
8000rpm	Type I	Type I	Type III	Type III	Type III
9000rpm	Type I	Type II	Type III	Type III	Type III
10000rpm	Type II	Type I	Type III	Type III	Type III

Table 10 Classification of burr formation in copper (drill diameter=0.5mm)

Feed \ Speed	0.001 mm/rev	0.005 mm/rev	0.01 mm/rev	0.015 mm/rev	0.02 mm/rev
6000rpm	Type I	Type II	Type III	Type III	Type III
7000rpm	Type I	Type I	Type III	Type III	Type III
8000rpm	Type II	Type I	Type III	Type III	Type III
9000rpm	Type I	Type I	Type III	Type III	Type III
10000rpm	Type I	Type I	Type I	Type III	Type III

Table 7~10 은 실험결과 발생하는 버의 형태를 정리한 결과이다.

4.2 실험조건에 의한 버 크기

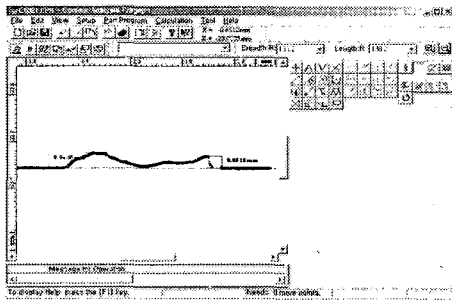


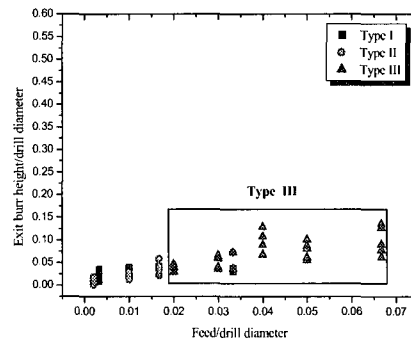
Fig. 8 Burr height profile

Table 11 Burr types and burr height

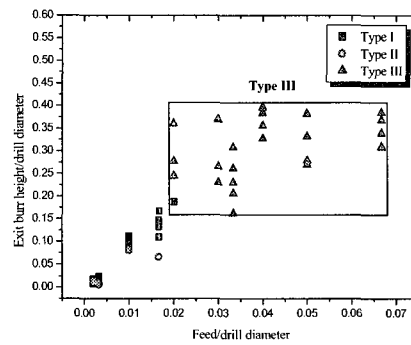
Burr type	Brass		Copper	
	Type A	Type B	Type A	Type B
Burr height (d=0.3mm)	H<0.022	H>0.010	H<0.05	H>0.048
Burr height (d=0.5mm)	H<0.02	H>0.014	H<0.094	H>0.0114

Fig. 8 은 윤곽 형상 측정기 전용 프로그램인 FORMPAK-1000 을 이용하여 출구 버의 높이를 측정 한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 두 지점의 높이를 지정하여 비교한 다음 가장 높은 지점을 버의 높이로 선택하였다. Type II 와 같이 캡(cap)이 있는 버의 경우에 있어서는 캡(cap)을 제외한 높이를 측정하였다.

4.2.1 시편 재질 및 드릴 직경에 의한 영향



(a) brass

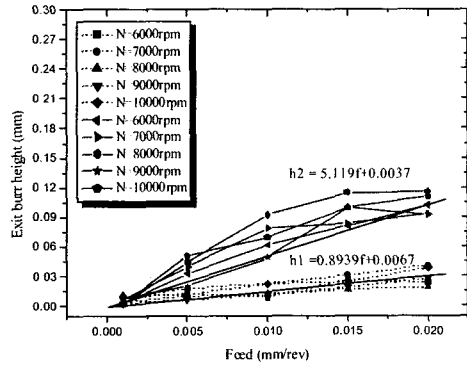


(b) copper

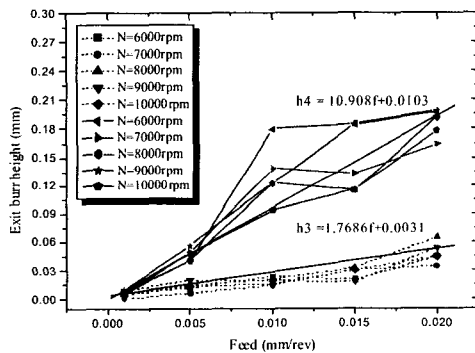
Fig. 9 Exit burr height distribution

Fig. 9 는 이송속도 변화에 따른 황동과 순동의 발생 버를 드릴 직경으로 무차원화 하여 나타낸 것이다. 버 형태와 상관 없이 이송속도의 증가에 따라 버 높이가 증가하였으며, 특히 type III 버에 있어서, 상대적으로 낮은 경도값을 가지는 순동의 경우 이송속도의 변화에 따른 버 높이의 증가율(직선기울기)이 높았다. 따라서 연성이 높은 물질일수록 버 크기의 변화가 이송속도의 변화에 매우 민감함을 알 수 있다. 또, Fig. 10 은 드릴 직경이 각각 0.3mm 와 0.5mm 일 때 주축의 회전속도 별

로 이송속도의 변화에 따른 이송속도와 버 높이의 관계를 보여주고 있다. 앞의 결과와 같이, 이송속도가 증가함에 따라 출구 버의 높이가 선형적으로 증가하였다.



(a) Drill diameter=0.3mm



(b) Drill diameter=0.5mm

Fig. 10 Feed vs. exit burr height (dot line: brass, solid line: copper)

드릴 직경의 변화에 따른 영향으로 시편이 순동인 경우에는 직경이 0.5mm 일 때가 드릴 직경 0.3mm 일 때보다 버의 높이가 훨씬 크게 나타났는데 황동인 경우에는 드릴 직경에 의한 최고값 및 기울기 변화가 크지 않았다. 또, 서로 같은 직경을 가진 경우의 버 발생 경향을 비교하여도 직경 0.3mm 일 때의 기울기 값(h2/h1)보다 직경 0.5mm 일 때 기울기 값(h4/h3)이 큰 값을 보여서, 시편 재질에 따른 버 발생 특성을 보였다. 그 이유는 재질의 연성이 커질수록 버 크기에 대한 드릴 팁(tip)의 영향이 커지며 특히 드릴 직경이 크면 웨브(Web) 부분이 추력을 증가시켜 버 크기를 증가시

키기 때문이다. 즉, 드릴 직경이 0.3mm 인 경우에는 재질에 따른 버 높이의 차가 크지 않았지만, 드릴 직경이 0.5mm 인 경우에 있어서는 이송속도가 커질수록 순동일 때의 버 높이가 황동일 때 보다 훨씬 커지는 경향을 보였다.

지금까지 살펴본 바와 같이 마이크로 버의 크기는 시편 재질에 따른 영향을 많이 받고, 절삭속도 보다는 이송속도에 의한 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 그러나 가공변수에 따른 버 발생의 변화를 생산 자동화 공정에 적용하기 위해서는, 가공 시 수집 가능한 데이터를 효율적으로 사용하여 버의 발생상태를 실시간으로 파악할 수 있는 좀더 구체적인 기준 및 시스템의 구축이 필요하다.

4.2.2 버 타입 분류 및 버 콘트를 차트

Fig. 11 은 드릴 버 발생에 가장 큰 영향을 미치는 두 변수(F_n, S)에 따른 순동과 황동의 버 형태의 분포 (버 콘트룰 차트)를 보여주고 있다.¹⁰ 여기서, F_n 은 이송에 관한 무차원 변수이고, S 는 절삭속도에 관한 변수이다. K 는 두 변수(F_n, S)의 차수를 일치시켜주기 위해 사용된 변수이다.

$$F_n = \frac{f}{d}, \quad S = K \cdot d \cdot N$$

F_n : Non-dimensional feed parameter

f : Feed (mm/rev)

d : Drill diameter (mm)

S : Cutting speed parameter

N : Spindle speed (rpm)

K : Constant which makes the order of two parameters equal (10^5)

차트 상의 실험 데이터 분포를 살펴보면 유사한 발생 메카니즘을 가지는 Type I 및 Type II (Type A)와 petal 버의 형태를 가지는 Type III (Type B)가 분명하게 구분되어 나타남을 알 수 있다. Type A와 Type B의 경계선을 fitting 한 결과, 먼저 황동의 경우(주어진 드릴 직경에 대해) 드릴의 이송속도와 주축의 회전속도가 커지면 Type B 형태의 버가 주로 발생하고, 반대의 경우 Type A 버가 발생하는 경향을 보였다. 반면에 순동의 경우, 드릴 직경과 주축의 회전속도에 상관없이 일정 F_n 값을 넘으면 즉, 이송속도가 증가하면 Type B 형태의 버가 발생하는 경향을 보여 연성이 큰 경우 버 발

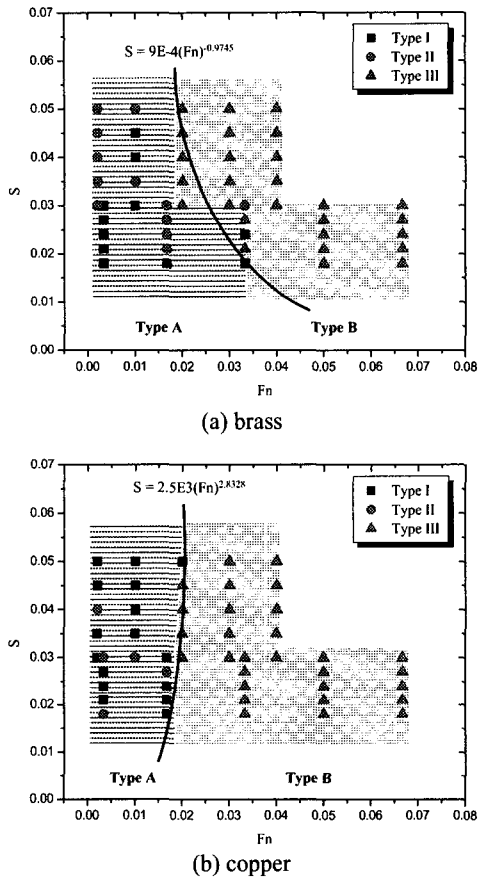


Fig. 11 Drilling burr control chart

생 형태가 이송속도에 민감하다는 앞 절의 결과와 일치함을 보였다. 버 컨트롤 차트를 이용하면, 향후 주어진 가공조건에 따른 버 형태의 예측이 가능하다.

5. 인공지능신경망을 이용한 버의 예측

앞절에서 사용한 버 컨트롤 차트는 많은 실험 데이터를 요구하며, 분석에도 상당한 시간이 필요하므로, 특히 계측 등에 어려움이 있는 마이크로 버의 경우, 가공시 실시간으로 버의 크기를 모니터링하고 예측하는 방법이 필요하다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 인공지능신경망(artificial neural network) 을 도입하였으며, 학습방법으로는 출력층의 오차 신호를 은닉층에 역전파하여 입력층과 은닉층과의 연결강도를 변경하는 구조를 갖는 BP (back propagation) 알고리즘을 사용하였다. 입력노

드는 5 개, 은닉층은 1 층, 은닉노드는 8 개, 출력노드는 1 개로 한다. 입력노드의 각 변수들은 절삭속도, 이송, 드릴 직경, 경도비, 인장강도이며, 1 개의 출력노드를 사용해서 버 형태를 분류하였다. 결과값이 0 인 경우는 Type A (uniform burr, uniform with cap)에 해당하며, 1 인 경우는 Type B (petal burr)에 해당한다.

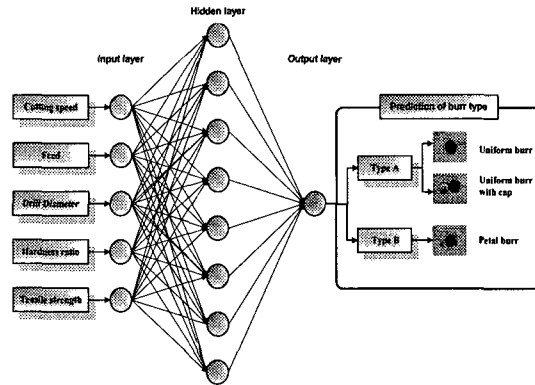


Fig. 12 Architecture of neural network

학습으로부터 얻은 노드간의 연결강도를 바탕으로 신경망을 구성하였다. 입력값은 실험에서 얻은 데이터 중에서 연결강도를 구하는데 사용한 데이터를 제외한 나머지 데이터를 사용하였다. Table 12 은 뉴럴 네트워크를 사용하여 얻은 결과를 보여주고 있다.

Table 12 Neural network process

Input parameters						Output	Type
Material	Cutting speed [mm/min]	Feed [mm/rev]	Drill diam. [mm]	Hardness ratio [Hv]	Tensile strength [GPa]	Burr type [Type A=0, Type B=1]	
Brass	5.6549	0.001	0.3	1.3	0.317	0.0186	0
	5.6549	0.005	0.3	1.3	0.317	0.0235	0
	5.6549	0.01	0.3	1.3	0.317	0.291	0
	5.6549	0.015	0.3	1.3	0.317	0.9565	1
	5.6549	0.02	0.3	1.3	0.317	0.9736	1
Cu	5.6549	0.001	0.3	1	0.25	0.0195	0
	5.6549	0.005	0.3	1	0.25	0.037	0
	5.6549	0.01	0.3	1	0.25	0.7508	1
	5.6549	0.015	0.3	1	0.25	0.969	1
	5.6549	0.02	0.3	1	0.25	0.9741	1
Brass	9.4248	0.001	0.5	1.3	0.317	0.0185	0
	9.4248	0.005	0.5	1.3	0.317	0.023	0
	9.4248	0.01	0.5	1.3	0.317	0.2585	0
	9.4248	0.015	0.5	1.3	0.317	0.9545	1
	9.4248	0.02	0.5	1.3	0.317	0.9735	1
Cu	9.4248	0.001	0.5	1	0.25	0.0194	0
	9.4248	0.005	0.5	1	0.25	0.035	0
	9.4248	0.01	0.5	1	0.25	0.721	1
	9.4248	0.015	0.5	1	0.25	0.9685	1

Fig. 13 은 Table 12 에서 구해진 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 실제 실험에서 얻은 버 형상 데이터와 절삭조건을 바탕으로 뉴럴 네트워크를 이용한 학습결과를 비교해본 결과 80%의 예측성 공율을 보였다. 오차를 줄이기 위해서는 버 형상과 직접적 관련이 있는 다양한 변수들을 도입할 필요가 있으며, 근본적으로 다양한 실험을 통한 실험적인 버 데이터베이스의 구축이 필요하다.

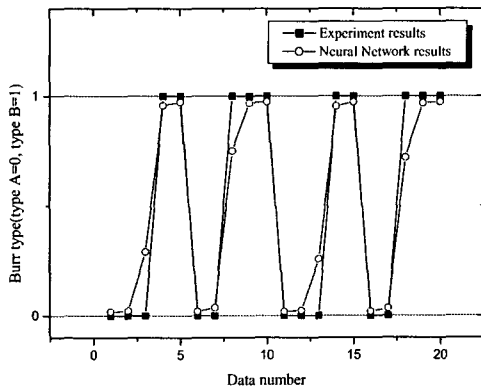


Fig. 13 Prediction results of burr type using neural network

6. 결론

마이크로 드릴 가공 시 발생하는 마이크로 버는 측정 및 제거가 용이하지 않으며, 그 발생 특성이 체계적으로 연구되지 못하였다. 본 연구에서는 절삭조건에 따른 마이크로 버의 높이와 형상을 윤곽 형상 측정기와 광학현미경을 가지고 계측하여 그 발생 특성을 정밀 분석/분류 하였으며, 또한 마이크로 버의 형상을 예측하고 실시간 모니터링하는데 있어 필요한 기초 연구를 수행하였다. 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] 순동과 황동의 재료에서 마이크로드릴 가공 시 나타나는 버로, 구멍 주위로 일정 높이를 가지는 uniform burr, 캡(cap) 형상이 피삭재에 붙어 있는 uniform burr, 찢어진 형태를 갖는 petal burr 가 관찰되었다.

[2] 이송속도가 가장 중요한 가공 파라미터이며, 일정 이송속도를 기점으로 그 이하일 때는 주로 uniform burr 혹은 uniform burr with cap 의 형태가 관찰되었고, 이상일 때는 petal burr 가 관찰되었

다.

[3] 재료의 특성에 의한 경우로 상대적으로 연성이 강한 순동이 황동보다 버 크기의 이송속도, 드릴직경에 대한 민감도가 높았다.

[4] 뉴럴 네트워크를 이용한 버 형상 예측 결과와 실제 측정에서 얻은 버 형상을 비교해 보았을 때 높은 신뢰성이 나타남을 보였다.

참고문헌

1. <http://www.mech.nwu.edu/MFG/AML>
2. <http://www.hainsys.com>
3. Ko, S. L. and Dornfeld, D. A., "Analysis and Modeling of Burr Formation and Breakout in Metal," Proc., of ASME Winter Annual Meeting, pp. 79-92, Dec. 1989.
4. Park, D. and Choi, J., "Study on Minimization of Burr in Micro Drilling," Workshop on Precision Surface Finishing and Deburring Technology (BEST-K), pp. 89-99, 1998.
5. Park, D., Choi, J. and Kwon, S., "Effect of Cutting Conditions on Burr Formation in Micro Drilling of A606," J. of the KSPE, Vol. 16, No. 3, pp. 47-52, 1999.
6. Stirn, B., "Study of Burr Formation in Micro-Drilling," LMA Research Report, University of California at Berkeley, 2000.
7. Lee, K., Stirn, B. and Essel, I., "Burr Formation in Micro-Machining," LMA Research Report, 2000.
8. Stein, J. M., "Burr Formation in Precision Drilling of Stainless Steel," Ph. D. Dissertation, University of California at Berkeley, 1995.
9. Min, S., Three-Dimensional Finite Element Modeling of Drilling Burr Formation, Part II: Burr Formation Mechanism, LMA Research Report, 2000.
10. Kim, J. and Dornfeld, D. A., "Development of a Drilling Burr Control Chart for Stainless Steel," Submitted to NAMRC XXVIII, 1999.
11. Min, S., "Control Chart of Drilling Exit Burr in Low Carbon Steel (AISI4118)," LMA Research Report, 1999.
12. <http://www.matweb.com>.