

음향방출을 이용한 버 유형 분류

김필재*, 이성환**

Burr Classification Using Acoustic Emission

Pil Jae Kim*, Seoung Hwan Lee**

ABSTRACT

A number of experimental studies on burr formation in face milling operations have been pursued. They usually focus on machining parameters such as depth of cut, feed rate, spindle speed and in-plane exit angle. But it is difficult to set the correlation between burrs and the parameters on burr when such parameters are considered at the same time. Therefore, in this paper, acoustic emission (AE) is considered as an alternate way to predict burr types regardless of machining conditions. AE signals during face milling were sampled and processed, then fed into an artificial neural network to classify burr types "on-line".

Key Words : Burr formation (버 발생), Acoustic Emission (음향방출), Face Milling (정면 밀링), Artificial Neural Network (인공 신경망)

1. 서론

절삭 가공 중에 발생하는 버는 제거 되어 할 대상으로 가공 정도를 저해하고 부품의 조립에 방해되는 인자이다. 특히 버의 발생은 해석적인 방법에 의한 예측이 난해하므로 실험적 방법에 의한 연구가 많이 수행되고 있다.⁽¹⁾ Gillespie, Ko, Oliver^(1,2,3,4,5,6) 등은 밀링 공정에서 이송량, 주축 회전속도, 절삭깊이, 가공면 끝부분과 절삭날의 진행 방향이 이루는 각 (In-plane eXit Angle, IXA, Fig. 1) 등의 가공 파라미터가 버의 발생에 미치는 영향을 중심으로 연구를 수행하였다. 주지하는 바와 같이 가공 파라미터가 바뀔 경우 버의 높이 및 두께를 포함하여 전체적인 버 형상이 달라진다. 특히 IXA 는 버 형성에 영향을 미치는 주요 인자로 알려져 왔다. Chern⁽⁴⁾은 밀링 작업에서 IXA 의 영향에 의

해 발생하는 버를 4 가지-Curl-type, Wave-type, Knife edge type, secondary burr-로 분류하였다.

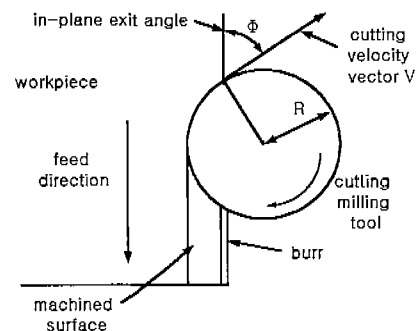


Fig. 1 Machining Parameters

Narayanaswami⁽⁷⁾는 가공물의 형상과 IXA 와의 관계를 기하학적으로 모델링하여 버의 높이에 관

2001년 2월 15일 접수
* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
** 한양대학교 기계공학과

한 대략적인 추정을 하였다. 그러나 대부분의 연구가 버의 생성과 그에 관련된 파라미터들과의 개략적 연관성을 밝히는데 국한되었고 가공 모니터링 및 제어를 통한 버의 발생 억제 등에 연관되는 연구는 미미하였다. 본 논문에서는 음향 방출(acoustic emission, AE)센서를 사용하여 밀링 가공 중 버 발생시 발생하는 민감한 신호를 검출한 후, 이 신호를 인공 신경망을 이용하여 분석하여 버의 분류에 사용하였다. 본 연구 결과는 버의 온라인 제어등에 있어 중요한 기초 자료로 사용될 것으로 기대된다.

2. 버 발생 및 분류

2.1 버 발생

절삭날이 가공 시편의 모서리부 근처에 도달하게 되는 순간 절삭력을 지탱하던 시편 하단부의 재료가 절삭력으로 인한 전단력을 받아 절삭날의 이동 방향으로 변형이 생기면서 버가 발생하기 시작된다. 이때 이전의 칩의 형성으로 소산되던 절삭 에너지가 재료의 변형에 사용된다. 변형이 시작된 재료는 전단응력에 기인하는 것이므로 이에 따른 전단 영역이 발생하게 된다. 이 전단 영역은 칩의 형성에 관여하는 주전단부(primary shear zone)에 대해 절삭면을 기준으로 아래 면에 존재하는데 이를 음전단부(negative shear zone)이라 부른다. 이와 같은 칩의 형성에서 버의 발생 초기의 전환은 Iwata에 밝혀진바 있다.⁽⁸⁾

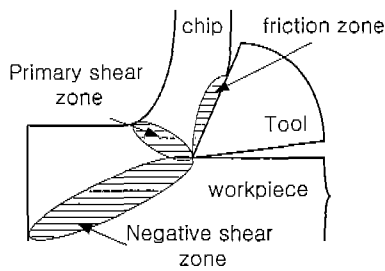


Fig. 2 Shear zones

절삭날이 좀 더 절삭 방향으로 진행하게 되면 가공 시편의 끝면과 음전단부의 연장선이 만나는 점을 지지점으로 하여 가공재료가 회전하게 된다. 이 점은 버의 생성시 더 이상 움직이지 않고 마치 소성 현저처럼 작용한다. 재료는 계속해서 전단력

을 받으면서 회전을 하게 되는데 절삭날이 시편에서 빠져나가면(tool exit) 그 때까지 회전에 의해 이동된 물질이 시편의 가공면으로부터 일정거리 이상으로 돌출하게 되는 결과를 가져 온다. 이것이 버이다. 정상상태의 절삭과정과 달리 버 생성시 절삭력에 의한 일은 버 발생으로 이어지고 에너지가 주전단부 및 음전단부에서 소산되게 된다. 이때 발생하는 AE 신호를 분석하면 일반 절삭과 구별하여, 버의 생성과 관련된 정보를 얻을 수 있다.⁽²⁾

2.2 버의 분류

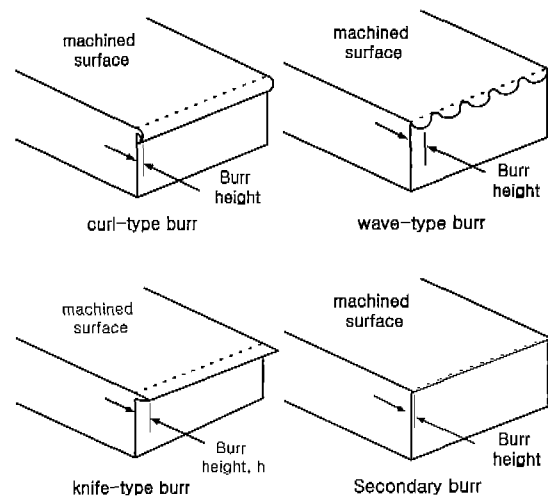


Fig. 3 Burr Classification by Chern

Chern⁽³⁾의 분류에 따르면, Curl-type 버는 IXA 값 30° ~ 60° 사이에서 발생하며 끝 부분이 아래 방향으로 약간 말려 있는 형태를 가진다. Wave-type 버는 IXA 값 60° ~ 120° 사이에서 발생하고 버의 크기가 커짐에 따라 버가 위 아래로 늘어나면서 물결 형상을 띄고 있다. Knife-edge 버는 IXA 값 120° ~ 150° 사이에서 발생하는 버로 여타의 버처럼 심한 변형 없이 고르게 생긴 것으로 버가 늘어선 모양이 칼날처럼 생겨서 붙여진 이름이다. 앞의 세 가지 형태와 상이한 Secondary 버는 버의 하단부에서 전단 변형이 발생하여 잘려져 나간 결과로 높 이와 두께가 작아지는 경우이다. Kishimoto⁽⁹⁾등은 버를 Primary 버와 Secondary burr로 구분하였는데, Chern의 분류상 Curl-type, Wave-type, Knife edge type가 Primary 버에 해당된다. 그 외에 앞서 언급

한 음전단부에서 최대 전단 변형률이 파단 전단 변형률을 초과하게 되면 더 이상 재료가 밀려나가지 않고 버가 발생하는 대신 모서리 부분이 연성 파단에 이르게 된다. 이 경우를 Edge-Breakout 이라고 부른다⁽¹⁾. 상기의 분류는 가공 후 발생한 버를 관찰하여 분류한 경우이나 본 연구는 가공시 발생 신호를 근거로 하여, 버 발생과 동시에 버를 분류하는 것을 목표로 한다.

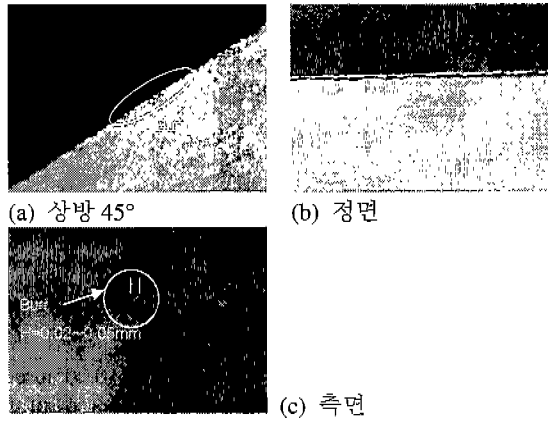


Fig. 4 Burr Type 1

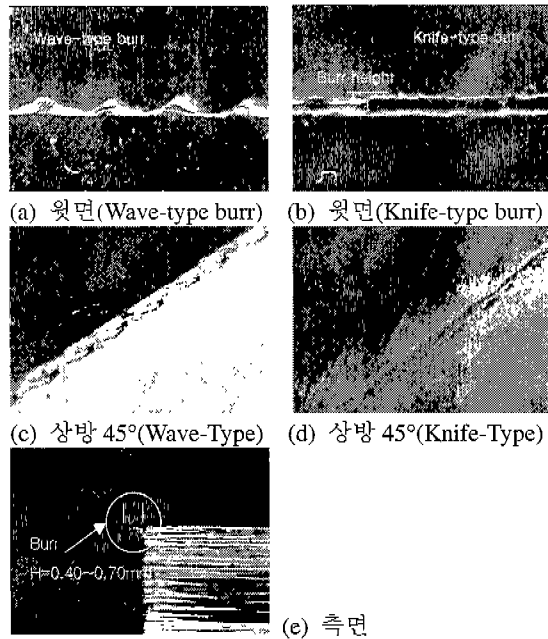


Fig. 5 Burr Type 2

Table 1 Classification of Burr (Al6061-T6)

	Type 1	Type 2
Burr height	약 0.5mm	약 0.40~0.50m
Burr width	약 0.1mm	약 0.20~0.50m
	Secondary burr Edge breakout	Curly-type burr Wave-type burr Knife-type burr

버는 Type 1 및 Type 2 의 두가지로 분류하였는데, Type 1 (Fig. 4)은 상대적으로 버의 치수가 작은 Secondary 버와 Edge-breakout 이 발생하는 경우를 말한다. Type 2 (Fig. 5)는 Curly-type 버, Wave-type 버, Knife type 버가 발생하는 경우이다. Table 1 은 Al6061-T6 가공 실험시 발생한 Type 1 및 Type 2 의 특징을 정리한 것이다.

2.3 AE 신호

AE 신호는 재료의 전단, 마찰, 파단 등의 변형으로 발생하는 매우 민감한 응력파이며, 음파의 형태를 가진다. 특히, 버 발생시 음전단부등의 발생으로 정상상태와 상이한 응력파가 방출되게 되며 이 신호가 AE 센서에 의해 검출되어, 버의 분류 및 모니터링등에 사용되어 진다.

3. 실험 및 AE 신호의 검출

3.1 실험 장치

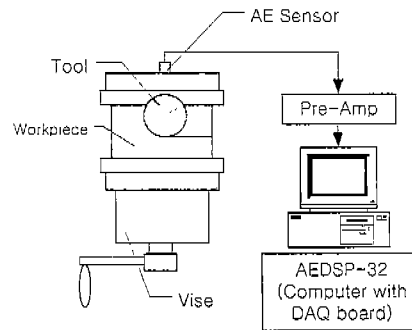


Fig. 6 Experimental Setup

밀링 작업을 수행하기 위해 범용 밀링 머신을 사용하였다. AE 신호를 검출하기 위해 PAC-R15 센서를 사용하였으며, 얻어진 신호를 PAC-1220 Pre-Amp 를 이용하여 40dB 로 증폭하였고, 기계적인 노이즈가 많은 100kHz 이내의 주파수 대역은 100kHz High-pass filter 를 사용하여 필터링을 한

후 PAC-AEDSP-32 Board 를 사용하여 필터링된 신호를 분석하였다. 실험에 사용된 시편의 물성치는 아래 표와 같다. 데이터 Sampling rate 은 1MHz 로 하였다.

Table 2 Material Properties

Material	Al6061-T6
Tensile strength	310MPa
Yield stress	275Mpa
Fracture strain	0.50

3.2 실험 방법

실험은 아래와 같은 가공 조건에 따라 이루어 졌으며, 각각의 실험조건을 모두 고려하여 full factorial 실험 (5×5×3×5=375 경우)을 행하였다. 버의 높이, 폭 그리고 형상을 측정하였으며 아울러 AE 신호를 검출하여 측정된 버의 유형과 대조하 고자 하였다.

Table 3 Machining Conditions

Spindle speed[rpm]	800, 1100, 1250, 1600, 1800
Feed[mm/min]	127, 187, 267, 342, 507
Depth of cut[mm]	0.3, 0.5, 0.7
In-plane eXit angle(IXA)[°]	30, 60, 90, 120, 150

3.3 신호 처리

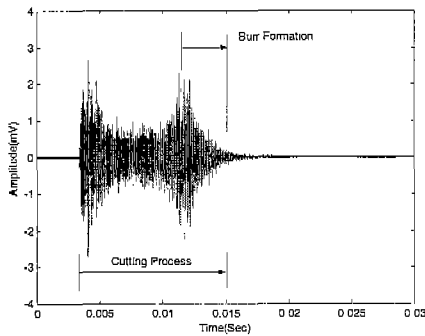


Fig. 7 Typical AE Signal during Cutting

Fig. 7 은 절삭날이 시편에 들어가서 절삭을 수행하고 시편의 끝부분으로 빠져 나오는 실험 과정에서 검출된 AE 신호의 한 예를 보여 주는 것이

다. 그림에서 보는 바와 같이 비절삭 시와 실제 절삭 시 신호는 확연한 차이를 보여 주고 있다. Fig.7 의 절삭 과정 중 절삭공구가 시편의 끝부분으로 빠져 나오는 부분(exit)에서 AE 신호의 peak 부분이 관찰되었는데, 이 peak 을 전후로 버가 생성되었다. 이 peak 은 가공 조건이 달라져도 거의 비슷한 형상으로 항상 검출되었으며, 앞 절에서 설명한 음전단부의 형성과 관련 있을 것으로 보인다. 검출된 신호는 다음과 같은 4 가지의 파라미터- RMS, Count Rate, Peak 주파수, RMS 주파수, -를 이용하여 분석하였다. RMS 는 식 (1)와 같고 AE 신호의 에너지량을 나타낸다.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V(t)^2 dt} \tag{1}$$

where, V(t) : AE signal, ΔT : Time constant

또, Count rate 는 단위시간당 Threshold 값 이상의 값을 가지는 신호의 수를 말한다. 가공 실험 시 0.1mV threshold 값을 사용하였으며 ΔT 는 0.005msec 로 하였다. 일반적으로 AE RMS 는 절삭량과 비례 하고⁽¹⁰⁾ Count rate 는 공구 파괴 현상등을 관찰하는 데 널리 쓰여 왔으므로⁽¹¹⁾ 본 연구와 관련하여 각 각 버 발생시의 절삭량 변화 및 Secondary burr 생성시의 재료 파괴거동과 연관된 신호발생이 예측 된다. Peak 주파수는 FFT 후의 얻은 주파수 영역에서 가장 큰 진폭을 보이는 주파수를 말하며, RMS 주파수는 식 (2)과 같이 표현되고 가공 중 주파수 특성을 나타내는 (평균)대표 주파수이다. 일반적으로 민감한 AE 신호를 분석하는데 있어 시간영역의 신호뿐만 아니라 주파수영역에서의 신호특성에 관한 연구도 병행되고 있다⁽¹¹⁾. peak 주파수는 가공 시 주에너지가 집중되는 주파수대이고 평균 주파수는 전체 가공공정 중 해당공정이 속하는 주파수 영역 -저주파운동 (크랙 발생 등) 과 고주파운동 (소성 흐름 등) -의 경계값이 된다⁽¹²⁾. 주파수 영역의 신호특성은 정상절삭 (steady state cutting) 및 버 발생시의 운동특성 (음전단부 형성 등)을 나타낼 것으로 사료된다.

$$RMS \text{ frequency} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} f^2 P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) df}} \tag{2}$$

where, P(f) : Power spectrum

3.4 실험 결과

Fig. 8 과 Fig. 9 는 Type 1 과 Type 2 형태의 버 발생시 검출된 AE 신호를 상기한 4 가지 파라미터와 연관 지어 예시한 것이다. Type 1 (Fig. 8)과 Type 2 (Fig. 9) 버 생성시의 신호를 비교하면 상대적으로 Type1 의 경우가 높은 평균 주파수(150kHz 근방, Type 2 100k~110kHz 부근)를 가지며 버 발생 시작 신호(peak)부분에서 신호 값의 변화가 크다. Type 1 은 버 생성 초기에 전단력이 커서 파단 현상이 발생하거나(Edge-breakout), 가공 단계 작용하는 전단력이 급히보다 커서 이미 생성된 버가 잘려 나가는 현상이 발생하는 것으로 생각되며 (Secondary 버) 따라서 버의 생성 초기의 신호가 매우 강하고 이와 같은 급격한 신호의 변화 및 상태의 변화가 Type 2 에 비해 고주파의 Peak 주파수를 갖게 하는 원인이 된다. Type 2 는 버 생성과정에서 Type 1 에 비해 완만한 신호 감소를 보인다. 이는 버가 성장도중 잘려나가는 일이 없이 가공면 끝부분의 물질 전체가 버로 전환이 되는 데 기인하는 것으로 생각된다.

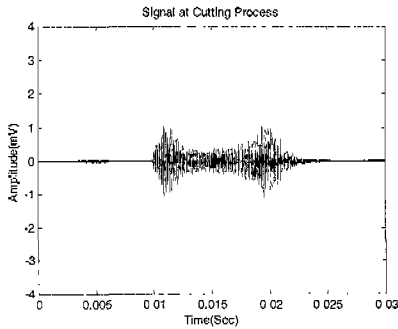


Fig. 8(a) AE Signal at Cutting Process (800rpm, IXA=30°, Type 1)

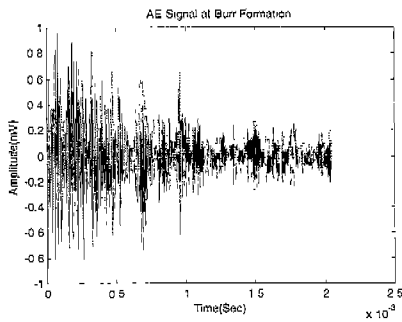


Fig. 8(b) Raw Signal at Burr Formation(800rpm, IXA=30°, Type 1)

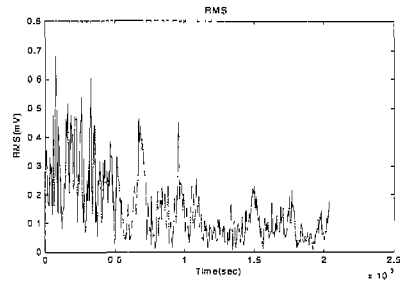


Fig. 8(c) RMS Signal at Burr Formation (800rpm, IXA=30°, Type1)

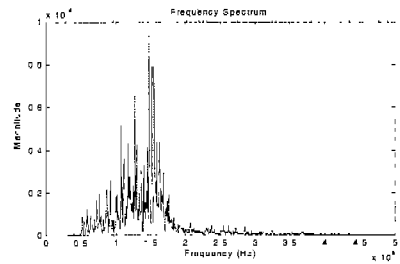


Fig. 8(d) Normalized Spectrum at Burr Formation(800rpm, IXA=30°, Type1)

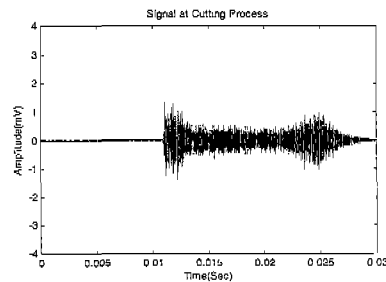


Fig. 9(a) Signal at Cutting Process (800rpm, IXA=150°, Type 2)

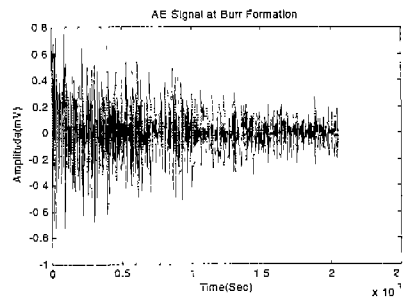


Fig. 9(b) Raw Signal at Burr Formation(800rpm, IXA=150°, Type 2)

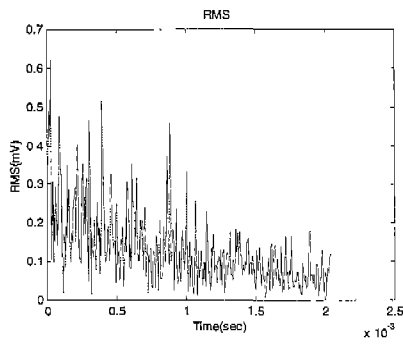


Fig. 9(c) RMS Signal at Burr Formation(800rpm, IXA=150°,Type 2)

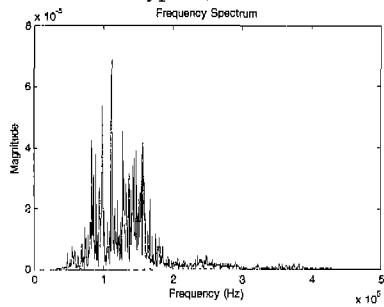


Fig. 9(d) Normalized Spectrum at Burr Formation (800rpm, IXA=150°,Type2)

4. 인공 신경망

4.1 학습

인공 신경망은 Back Propagation 을 사용하였으며, 학습 방법으로는 델타학습방법을 사용하였다. 입력 노드는 4 개이고 은닉층은 1 층이고 은닉노드는 6 개, 출력 노드는 2 개로 하였다. 밀링 가공 파라미터 중 회전속도는 버 형성에 직접적 영향을 미치는 인자이며, 특히 가공 시 안정성을 결정짓는 변수로 알려져 왔다⁽¹³⁾. 또 주파수대별 운동특성과도 연관성이 있으므로 버 발생시의 신호특성을 규명 하기 위하여, 가공실험 data 를 회전속도별로 정리하여, 인공신경망의 입력 값으로 하였다. Table 4 는 버 발생실험 시 샘플링한 AE data 를 회전 속도별로 분류한 후 각 단계에서의 발생 버의 유형을 관찰하여(Type 1, Type 2) 그때 발생한 AE 신호 파라미터들의 평균값을 구한 것이다. 이 데이터를 인공 신경망의 학습데이터로 사용하였으며 학습은 총 10000 여 회 수행하여 노드간의 연결강도 값을 얻었다.

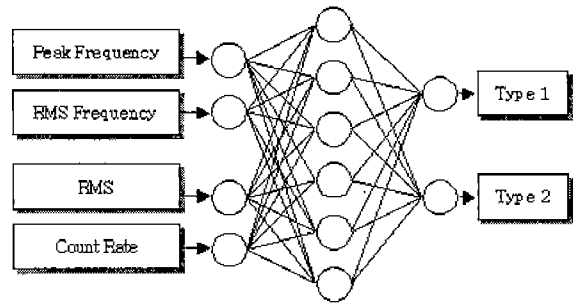


Fig. 10 Architecture of the Neural Network

Table 4 Data for the Learning Process

Input Parameters					Desired Outputs	
Spindle speed (rpm)	Peak (kHz)	RMS 주파수 (kHz)	RMS 주파수 (mV)	Count Rate (횟수/s)	Type 1	Type 2
800	151	171	0.49	122	1	0
	122	157	0.43	113	0	1
1100	140	181	0.76	133	1	0
	129	170	0.67	124	0	1
1250	152	177	0.87	135	1	0
	132	172	1.03	133	0	1
1600	153	177	0.72	129	1	0
	122	175	0.91	128	0	1
1800	157	181	1.21	142	1	0
	153	181	1.52	140	0	1

위표에서와 같이 입력 노드의 각 파라미터는 Peak 주파수, RMS 주파수, RMS, Count Rate 의 4 가지를 사용하였다. 출력 노드는 Type 1, Type 2 의 2 가지를 사용하였다.

4.2 적용결과

Table 5 는 인공 신경망에 실험에서 얻어진 데이터를 적용한 결과이다. 인공 신경망을 통한 총 79 개의 데이터 중 63 개의 데이터(약 80%)가 실측된 버의 분류와 일치하는 것으로 나타났다. 신경망에 의한 예측에 오차가 발생하는 이유는 첫째로 정상적인 절삭과정에서 벗어난 절삭 공정을 들 수 있다. 예를 들면, 칩이 절삭날에 갇혀서 절삭을 수행하는 경우나 절삭날 파손의 경우 이로 인해 얻어지는 신호는 일반적인 버가 발생할 때의 신호와 다른 양상을 띄게 된다. 둘째로 네 가지 파라미터값의 불완전성이다. 학습에 쓰인 데이터는 주

축의 회전 속도별로 평균한 값이며 다른 가공 파라미터와의 복합적 영향 및 데이터수의 부족 등으로 인하여 실제와 다른 결과를 보이는 경우가 발생할 수 있는데, 이는 체계적인 실험을 통해 안정적인 대표값을 구하면 해결이 가능하리라 본다.

Table 5 Implementation Results Utilizing the Neural Networks

No.	Input Parameters				Outputs		Real Type
	Peak (Hz)	RMS (Hz)	RMS (mV)	Count Rate (Counts)	Type 1	Type 2	
Br01a	152	172	0.49	125	0.985	0.014	Type1(O)
Br01b	148	164	0.44	112	0.982	0.017	Type1(O)
Br01c	148	177	0.75	140	0.922	0.076	Type1(O)
Br02a	149	165	0.48	119	0.982	0.017	Type1(O)
Br02b	159	173	0.43	123	0.993	0.007	Type1(O)
Br19a	146	191	0.96	133	0.481	0.517	Type1(X)
Br20a	160	179	1.08	141	0.951	0.047	Type1(O)
Br20b	163	178	0.95	130	0.980	0.017	Type1(O)
Br20c	152	177	0.94	134	0.898	0.100	Type1(O)
Br26a	132	177	1.24	133	0.012	0.988	Type2(O)
Br27a	145	171	0.96	133	0.678	0.320	Type2(X)
.....							
Br67a	114	176	0.84	125	0.004	0.996	Type2(O)
Br71a	116	175	0.95	130	0.004	0.996	Type2(O)
Br71c	144	174	0.90	132	0.673	0.324	Type2(X)
Br72a	127	169	1.32	132	0.005	0.995	Type2(O)
Br73a	161	170	0.91	125	0.981	0.018	Type1(O)
Br73b	150	173	0.71	127	0.955	0.044	Type2(X)
Br74a	145	174	0.89	133	0.739	0.258	Type2(X)
Br74b	126	172	0.99	134	0.018	0.983	Type2(O)
Br74c	126	176	0.85	132	0.031	0.970	Type2(O)
Br75c	129	169	1.14	128	0.015	0.985	Type2(O)

5. 결론

페이스 밀링시 발생하는 버 유형 분류를 위하여 가공 실험 및 실험중 발생하는 AE 신호를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 버를 상대적 크기에 따라 Type 1 과 Type 2 로 분류하였고, Type 1 및 Type 2 의 버 발생시 검출된 AE 신호의 특성을 네 가지 파라미터로 분류하여 고찰하였다.

(2) 이 네 가지 신호 파라미터를 입력값으로 인공 신경망을 사용하여 분석한 결과, 약 80% 정도의 확률로 버 유형 예측에 성공하였고 이는 이 연구결과가 향후 버의 실시간 모니터링 및 제어등에 사용 가능함을 보여준다.

참고 문헌

1. 양균의, 고성림, "Clay 가공에 있어서 Burr 생성기구에 관한 연구," 정밀공학회지, 7(4). pp. 73~84, 1990.
2. 고대철, 김병민, 고성림, "2 차원 절삭에서 공구이탈시 발생하는 버에 관한 강소성 유한요소해석," 정밀공학회지, 15(4), pp. 125~133, 1998.
3. Gillespie, K.L., and Blotter, P.T., "The Formation and Properties of Machining Burr," ASME J. Eng. for Industry, Vol. 98, No. 1, pp. 66~74, 1976.
4. Ko, S. L., and Dornfeld, D. A., "A Study on Burr Formation Mechanism," ASME J. Eng. Materials Technology, Vol. 113, pp. 75~87, 1991.
5. Chern, G. L., "Analysis of Burr Formation and Breakout in Metal Cutting," PhD thesis, U. C. Berkeley, 1993.
6. Olvera, O. & Barrow, G., "An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling," Int. J. Mach. Tools Mf., 36(9), pp. 1005~1020, 1996.
7. Narayanaswami, R., Dornfeld, D., " Burr Minimization in Face Milling : A Geometric Approach," ASME. J. of Manuf. Sci. and Eng., Vol. 119, No. 2, May, pp. 170~177, 1997.
8. Iwata, K., et al., "Study of Mechanism of Burrs Formation in Cutting Based on Direct SEM Observation," J. Soc. Prec. Eng., Vol. 48-4, pp. 510~515, 1982.
9. Kishimoto, W., Miyake, T., et al., "Study of Burr Formation in Face Milling." Bull. Jap. Soc. Prec. Engng, 15(1), pp. 51~52, 1981.
10. Kannatey-Asibu, E. & Dornfeld, D., Quantitative relationships for AE from orthogonal metal cutting, ASME, J. of Engi. Ind., Vol. 103, 3, pp. 330-340, 1981.
11. Liu, J. J., Monitoring the Precision Machining Process: Sensors, Signal Processing and Information Analysis, Ph. D dissertation, U. C. Berkeley, 1991.
12. Rangwala, S. and Dornfeld, D. A., A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting-1 Energy Analysis, Int. J. Mech. Sci., Vol. 33, p. 471, 1991.
13. Altintas, A., "Manufacturing automation," Cambridge university press, 2000.