

마이크로 엔드밀링에서 AE 신호를 이용한 공구상태 감시

강익수[#], 정연식^{*}, 권동희^{**}, 김전하^{***}, 김정석^{****}, 안중환^{*****}

Tool Condition Monitoring using AE Signal in Micro Endmilling

Ik Soo Kang[#], Yun Sik Jeong^{*}, Dong Hee Kwon^{**}, Jeon Ha Kim^{***},
Jeong Suk Kim^{****}, Jung Hwan Ahn^{*****}

ABSTRACT

Ultraprecision machining and MEMS technology have been taken more and more important position in machining of microparts. Micro endmilling is one of the prominent technology that has wide spectrum of application field ranging from macro parts to micro products. Also, the method of micro-grooving using micro endmill is used widely owing to many merit, but has problems of precision and quality of products due to tool wear and tool fracture. This investigation deals with state monitoring using acoustic emission(AE) signal in the micro-grooving. Characteristic evaluation of AE raw signal, AE hit and frequency analysis for condition monitoring is presented. Also, the feature extraction of AE signal directly related to machining process is executed. Then, the distinctive micro endmill state according to the each tool condition is classified by the fuzzy C-means algorithm.

Key Words : Micro Endmilling(마이크로 엔드밀링), Micro-Grooving(미세홈가공), Tool Wear(공구마멸), Tool Fracture(공구파손), Acoustic Emission(음향방출)

1. 서론

3차원적 미세형상을 자유롭게 가공할 수 있는 방법으로 종래부터 절삭가공 공정(Metal cutting process)이 광범위하게 이용되어 왔다. 그러나 절삭가공은 일반적으로 절삭력(Cutting force)이 커서 미세 구조물 가공에 적합하지 않다고 여겨져 1980년

이전에는 마이크로 구조물의 가공에 관한 연구가 많지 않았다. 이후 초정밀 절삭기술(Ultra-precision cutting technology)은 공작기계의 정밀운동제어, 초정밀가공 공구 및 계측 기술의 발전에 따라 서브미크론(Sub-micron) 치수의 가공이 용이한 수준에 도달했다. 따라서 최근에는 미세부품의 가공에 적용 가능한 기계적 절삭가공법의 개발 및 마이크로 공

접수일: 2005년 7월 22일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과

E-mail iskang@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3079

* 대우정밀(주)

** 부산대학교 정밀기계공학과

*** 부산대학교 ERC/NSDM

**** 부산대학교 기계공학과

구에 초점이 모아지고 있는 추세이다.^{1,3}

기계적 절삭가공에 의한 방법은 우수한 가공면 거칠기, 짧은 가공시간과 가공의 용이성 등 많은 장점을 가지고 있으나, 미세공구의 마멸 또는 파손에 따른 가공물의 정밀도 및 품질의 저하를 초래한다. 그러므로 양호한 표면상태를 얻기 위해서는 공구의 마멸, 응착 및 파손과 같은 이상상태 감시가 필요하다.^{4,5}

일반적으로 공구의 상태감시 방법에는 직접적인 측정법과 간접적인 측정법으로 구분할 수 있는데, 직접적인 측정법은 측정인자의 미세화로 인해 온라인상으로 측정하기가 어려운 문제점이 있다. 따라서 대부분의 감시 방법은 공구의 이상상태 검출뿐만 아니라 공작물의 변화와 절삭공구의 형상, 절삭조건 등의 다양한 공정 파라미터들을 간접적으로 검출하는 방법을 사용하고 있다.^{6,7} 미세가공에서 마이크로 공구의 이상상태를 실시간으로 진단하는 것은 가공공정의 자동화와 신뢰성을 증가시키는 데 중요한 역할을 수행한다. 이를 위해 본 연구에서는 마이크로 엔드밀로 STD11과 Al6061의 가공시 가공조건에 따른 AE의 여러 가지 파라미터를 사용하여 특성을 평가하였다. 또한 마이크로 엔드밀의 응착 및 파손과 같은 이상상태의 발생시 AE 원신호 및 주파수 분석을 통하여 특징을 추출하고, 이를 바탕으로 보다 효율적인 미세공구의 상태 감시를 위하여 퍼지 C-means 알고리즘⁸을 활용하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

AE 신호는 고주파 특성을 가지므로 신호획득을 위해서는 고분해능-대용량의 A/D보드가 필요하다. AE 센서는 잡음에 강인한 차동형으로 응답주파수 특성이 넓은 주파수 범위에서도 균일한 감도를 나타내는 광대역 센서를 사용하였으며, 전치증폭기(Pre-amplifier)는 100 ~ 1200 kHz의 대역통과필터를 사용하였다. 또한 마이크로 엔드밀의 이상상태 발생시 측정 신호와 비교하기 위하여 CCD 카메라와 전용지그를 가공기에 부착하였다.

실험에 사용된 장비와 사양을 Table 1에 나타내었으며, 전체적인 실험장치도의 구성은 Fig. 1과 같다.

2.2 실험방법

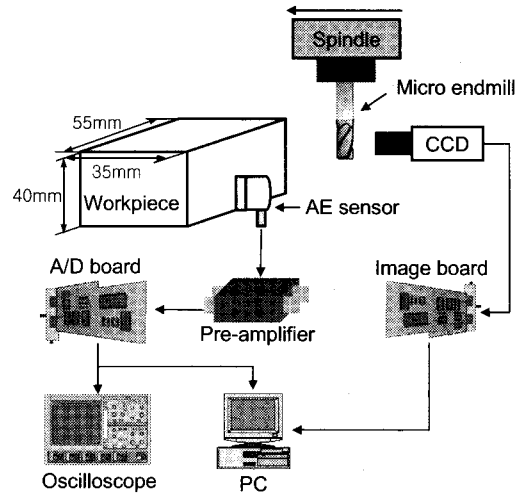


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Specification of experimental instruments

Instrument	Specification
Machining center	Makino V55
A/D board	12bit 20MHz (Gagescope CS1012)
Pre-amplifier	1220A(PAC) BPF : 100~1200kHz
AE sensor	Wide band type(PAC)
Digital oscilloscope	Lecroy 9330A(200MHz)
Tool	φ 0.2, 2-flute flat endmill
CCD camera	Neocom(×150)
Workpiece	Al6061, STD11(HrC25)

실험에 사용된 공작물은 미세홈 가공에서 가공조건에 따른 AE 특성을 관찰하기 위하여 절삭성 및 칩배출이 용이한 STD11을 사용하였고, 마이크로 엔드밀의 미소응착과 칩배출의 불안정성에 따른 공구파손 등 공구의 이상상태의 발생시 AE 특성을 파악하기 위하여 Al6061을 사용하였다.

미세홈 가공실험은 고속가공기에서 수행하였으며, 가공조건을 Table 2에 나타내었다. 주축회전수를 20,000rpm으로 일정하게 두고, 이송속도와 절삭깊이량을 변화시켜 AE 특성을 파악하였다.

STD11의 가공시 각각의 조건에 따른 AE 신호를 획득하여 AE RMS, AE hit, AE energy를 분석하였다. Al6061의 경우는 이상신호의 발생시 CCD를 통하여 공구상태를 비교하였으며, 획득된 원신호 및 주파수 해석을 통하여 공구상태와의 관계를 살

해보았다.

AE 주파수 분석은 공구의 이상상태의 발생시 결합의 특징을 파악하기 위해 특징 주파수를 추출하였고, 추출된 특징 데이터는 퍼지 C-means 알고리즘을 이용하여 패턴 분류를 실시하였으며, 계산된 퍼지 등급에 따라 공구상태와 비교하였다.

Table 2 Cutting condition

	Spindle revolution	20,000rpm
STD11	Feed rate(mm/sec)	0.2 ~ 0.8
	Depth of cut(μ m)	5 ~ 30
Al6061	Feed rate(mm/sec)	1 ~ 7
	Depth of cut(μ m)	30

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가공조건에 따른 AE 신호 특성

3.1.1 이송속도에 따른 AE 신호 특성

STD11의 미세홈 가공시 이송속도 변화와 AE RMS의 관계를 조사하기 위하여 20 μ m의 절삭깊이 fiddm로 공구파손이 일어날 때까지 반복 실험한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이송속도가 증가할수록 AE RMS가 증가함을 볼 수 있는데, 이것은 이송의 증가에 따른 엔드밀의 날당 절삭면적 증가로 절삭 에너지의 증가를 가져온다. 또한, 이송속도 0.8mm/sec에서 공구파손이 발생하였는데, 이는 절삭면적의 과도한 증가로 AE RMS의 값이 급속히 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 3은 이송속도 변화에 따른 AE hit와 AE energy의 평균값을 나타내고 있다. 이송속도가 증가함에 따라 AE hit는 거의 일정하지만, AE 에너지는 감소하는 경향을 보였다. 이는 이송속도의 증가에 따라 유사한 주파수가 발생하지만 공구와 소재와의 접촉되는 시간이 감소하여 나타나는 현상으로 사료된다. 공구파손시 AE hit는 급속히 증가하고, 에너지가 감소됨을 볼 수 있는데, 이것은 공구에 응력이 집중되고 이때의 응력 변화는 AE를 발생시키며, 주파수 성분이 다른 고주파수의 신호가 발생된다. 따라서 AE hit가 증가하고 공구파손은 순간적으로 일어나기 때문에 에너지는 오히려 낮게 나타났다.

3.1.2 절삭깊이량에 따른 AE 신호 특성

Fig. 4는 STD11의 미세홈 가공시 절삭깊이량에 따른 AE RMS의 변화를 보여주고 있다.

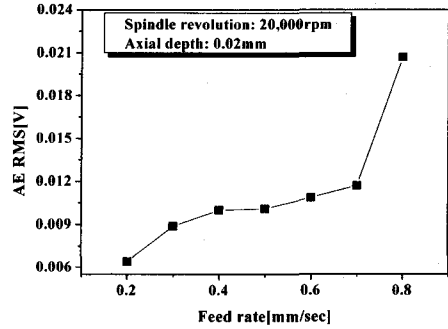


Fig. 2 AE RMS according to feed rate

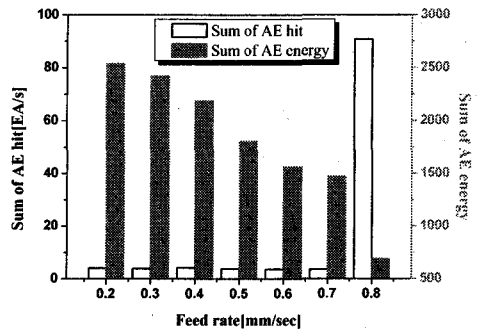


Fig. 3 AE hit and energy according to feed rate

절삭깊이량의 증가에 따라 AE RMS의 크기가 증가함을 볼 수 있는데, 이는 절삭속도의 증가에서와 마찬가지로 공구와 공작물 사이의 응력의 증가에 기인한 것으로 사료된다. 또한 절삭깊이량이 30 μ m일 때 공구파손이 발생하였으며, 이때 AE RMS의 값이 급속히 증가함을 볼 수 있다. 공구파손시 AE RMS의 크기는 정상적인 가공에서의 신호와 확연히 구분될 수 있을 정도로 크기 때문에 AE RMS를 이용하여 마이크로 엔드밀의 상태를 감시하기에 유효한 것으로 사료된다.

Fig. 5는 절삭깊이량의 변화에 따른 AE hit와 AE energy의 평균값을 나타내고 있다. 절삭깊이량의 증가에 따른 AE hit의 변화는 미소하지만 AE 에너지는 증가함을 볼 수 있다. 이는 절삭깊이량의

증가에 따라 공구와 공작물 사이의 접촉면적의 증가로 절삭부하가 증가하여 AE 신호의 진폭을 증가시켜 나타나는 현상으로 사료된다. 절삭깊이량이 30 μ m 일 때 공구파손이 발생했는데, 이때의 AE 신호 변화를 보면 앞선 이송속도 변화에서의 공구파손과 마찬가지로 공구에 응력이 집중되어 공구파손 직전의 고주파 신호와 낮은 에너지 발생으로 사료된다. 그리고 Fig. 3과 5에서 보는 바와 같이 AE hit는 가공 중 이상상태 감시에 유효한 파라미터임을 알 수 있다.

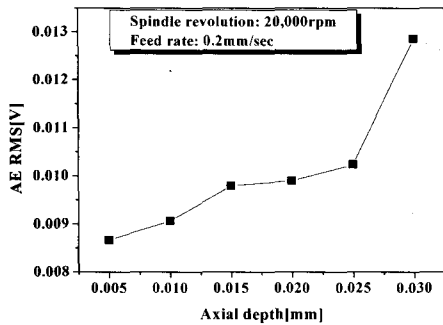


Fig. 4 AE RMS according to depth of cut

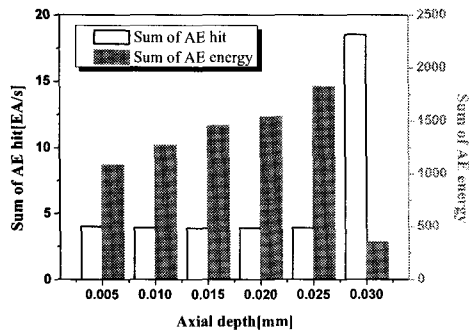


Fig. 5 AE hit and energy according to depth of cut

3.2 공구상태에 따른 AE 신호 특성

3.2.1 칩배출 영향에 따른 AE 신호 특성

Al6061과 같은 연질재료에서 미세홈 가공시 홈의 깊이량에 따른 칩배출이 엔드밀에 미치는 영향을 조사하기 위하여 회전수와 절삭깊이량을 고정하

고, 이송속도를 변화시켜 AE 신호를 획득하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

가공된 홈의 깊이가 깊을수록 AE RMS값이 증가함을 볼 수 있으며, 또한 가공된 홈의 깊이 0.06mm, 0.1mm에서 이송속도 2mm/sec일 때가 오히려 3mm/sec일 때보다 AE RMS값이 다소 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 가공된 홈의 깊이가 깊고 이송속도가 느릴수록 칩배출이 불안정하여 나타나는 것으로 볼 수 있을 것이다. 미세홈 가공시 잔재 칩으로 인하여 엔드밀에 칩 엉킴 및 가공소재와의 재절삭 현상이 발생한다. 또한 칩의 잦은 엉킴과 동시에 절삭시 온도의 상승으로 응착이 발생되고 이로 인하여 엔드밀의 날끝이 무더지고 절삭에너지의 증가를 가져온다. 이러한 영향은 마이크로 엔드밀의 파손 및 가공품의 표면에 상당한 영향을 미칠 것이다. 따라서 마이크로 엔드밀링의 가공조건은 보다 신중하게 고려되어야 할 것이다.

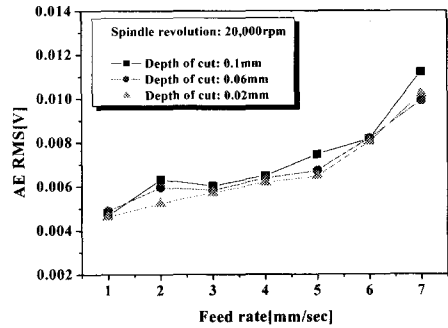


Fig. 6 AE RMS according to depth of cut

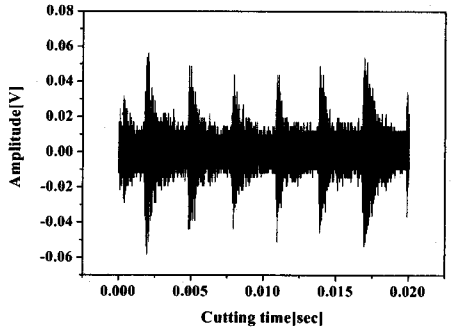
3.2.2 응착 및 파손에 따른 AE 신호 분석

Fig. 7은 알루미늄 가공시 안정상태에서 획득한 AE 신호이다. 주파수 분석은 가공시 발생하는 결함의 특성 파악을 위한 것으로 주파수 영역에서의 피크값을 기준으로 이상상태와 비교함으로써 AE 주파수 특성을 검토하고자 하였다.

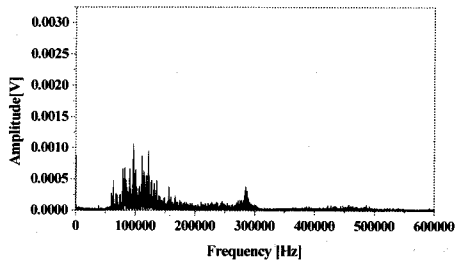
Fig. 7(a)의 AE 원신호에서 엔드밀의 날당 진폭을 볼 수 있으며, (b)의 주파수 분석에서는 가공시 70 ~ 130kHz 대역에서 높은 피크값을 보이고 있다.

Fig. 8은 마이크로 엔드밀에 응착이 발생하였을 때의 획득한 AE 신호이다. Fig. 8(a)의 AE 원신호에서 응착 발생시 진폭이 급속히 증가함을 볼 수 있

으며, (b)의 주파수 분석에서는 90 ~ 100kHz 영역에서 안정상태에서의 주파수와는 확연히 다르게 진폭이 증가함을 볼 수 있다.



(a) AE raw signal

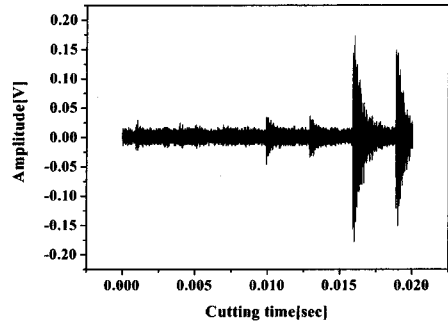


(b) FFT analysis

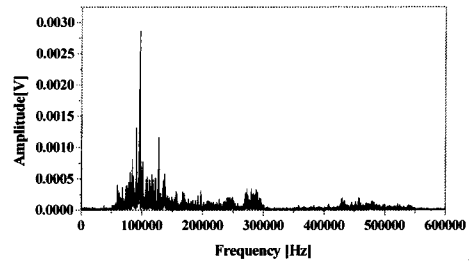
Fig. 7 AE raw signal and frequency characteristics in stable state

Fig. 9는 마이크로 엔드밀의 완전 파손이 일어났을 때 획득한 AE 신호이다. 안정상태에서 AE 원 신호의 진폭 레벨은 약 0.05 ~ 0.06V 정도이며, 공구파손시 진폭 레벨은 Fig. 9(a)의 AE 원신호에서 보는 바와 같이 약 2.0V 정도로 안정상태에 비해 33배 이상 증가하였다. 또한 Fig. 9(b)의 주파수 분석에서 보면 90 ~ 100kHz의 진폭의 증가와 800kHz 영역까지의 고주파수가 발생함을 볼 수 있다. 주파수 분석에서 고주파수 영역의 신호가 발생한 것은 Al6061의 미세홀 가공시 공구에 응착 발생 및 칩배출의 불안정성의 원인으로 공구의 파손이 발생한 것으로 사료되며, 이때 공구와 공작물 사이의 가공시 발생한 AE 신호가 아닌 공구 소재의 파손시 용

력변화에 의해 발생된 AE 신호인 것으로 사료된다.

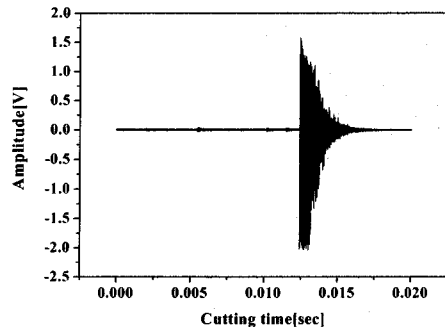


(a) AE raw signal

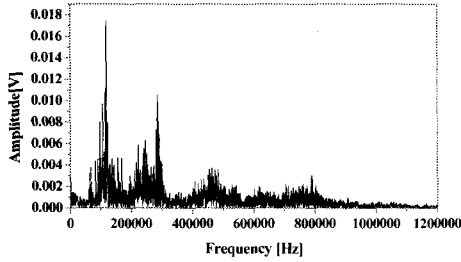


(b) FFT analysis

Fig. 8 AE raw signal and frequency characteristics in adhesion state



(a) AE raw signal



(b) FFT analysis

Fig. 9 AE raw signal and frequency characteristics in tool fracture

3.3 C-means 알고리즘을 이용한 공구상태 감시
3.3.1 C-means 알고리즘

패턴인식 알고리즘 중 하나인 C-means 알고리즘은 데이터의 집합을 균질한 요소들로 단순히 분할하는 것 뿐만 아니라 그 분할된 각 클러스터들을 잘 대표하는 원소를 찾기 원하는 경우 사용하는 알고리즘이다. 즉, U 라는 각 데이터를 각각의 클러스터로 분할하는 분할 행렬을 구하는 방법으로, 최적의 U 를 구하기 위해 식 (1)과 같은 제곱오차의 합을 목적함수로 취한다.

$$J(U, \nu) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^m PVER x_k - \nu_i PVER^2 \quad (1)$$

여기서, x_k 는 측정 데이터, ν_i 는 클러스터의 중심을 의미한다. 결국 노름 값은 측정 데이터와 클러스터 중심과의 유사성을 나타내는 것이며,

u_{ik} 는 i 번째 데이터가 k 번째 클러스터에 속하는 소속함수의 크기를 나타내는 것이다.

여기서 목적함수를 최소로 하는 x_k 와 ν_i 는 식 (2)와 (3)의 조건식을 만족해야 한다.

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{PVER x_k - \nu_j PVER}{PVER x_k - \nu_j PVER} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad \forall i, k \quad (2)$$

$$\nu_i = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^2 x_k}{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^2}, \quad \forall i \quad (3)$$

제곱 오차 합을 최소로 하는 u_{ik} 는 다음 알고리즘에 의해 구해진다.

- ① U 를 추측한다.
- ② m 과 클러스터 수 c 를 설정한다.
- ③ 클러스터 중심 ν_i 를 계산한다.
- ④ u_{ik} 를 계산하고, U 에서 U^* 로 갱신한다.
- ⑤ 적당한 역치 ϵ 를 정의하여,

$\{u_{ik}^* - u_{ik}\} \leq \epsilon$ 이 될 때까지의 앞의 순서를 반복한다.⁹

3.3.2 유효 AE 파라미터 추출

AE 신호의 RMS와 주파수분석을 통해서 마이크로 엔드밀의 상태감시에 유효한 파라미터들을 아래의 Table 3과 같이 추출하였다.

Table 3 Effective AE parameters

AE parameters	Number
n_1 : AE 신호의 RMS	39EA
$n_2 \sim n_{39}$: 60+20(n-2) ~ 60+20(n-1) kHz 주파수 대역의 RMS 신호	
$n_{40} \sim n_{77}$: 60+20(n-40) ~ 60+20(n-39) kHz 주파수 대역의 최대 진폭크기	38EA

세분화된 특징 중에서 AE 신호의 RMS와 주파수 분석을 통하여 공구상태를 잘 나타내는 25개의 구간을 특징 추출을 위해서 Table 3의 유효 파라미터들 중 $n_1, n_2, n_3, n_4, n_6, n_7, n_9, n_{12}, n_{13}, n_{14}, n_{22}, n_{23}, n_{38}, n_{40}, n_{41}, n_{42}, n_{44}, n_{45}, n_{47}, n_{50}, n_{51}, n_{52}, n_{60}$,

n_{61}, n_{76} 을 $k_1, k_2, k_3, \dots, k_{23}, k_{24}, k_{25}$ 로 다시 정의하고, 특징 집합으로부터 클러스터 센터를 식 (2)와 (3)을 이용하여 계산하였다.

3.3.3 패턴인식과 공구상태 감시

Fig. 10은 패턴 인식의 과정을 나타낸 것으로, 데이터의 수집, 인식을 위한 전처리, 특징 추출, 패턴 분류의 과정을 거쳐 패턴 인식을 하게 된다.

특징 추출을 위한 전처리 과정으로 각각의 AE 신호를 RMS와 주파수 분석을 실시하였으며, 분석된 결과를 토대로 엔드밀의 상태 특성을 잘 나타내는 데이터를 추출하였다. 추출된 특징 데이터는 퍼지 C-means 알고리즘을 이용하여 3개의 클러스터로 패턴 분류를 실시하였으며, 분류된 클러스터를 가장 잘 대표하는 클러스터 센터를 구하였다. 그리고 퍼지 C-means 알고리즘으로 계산된 퍼지 등급에 따라 엔드밀의 상태를 비교함으로써 이상상태의 감시에 퍼지 패턴인식의 활용 가능성을 검토하였다.

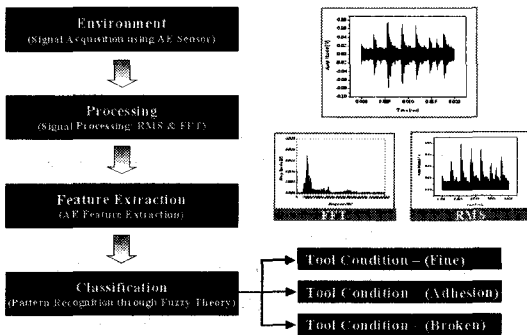


Fig. 10 Block diagram of pattern recognition

퍼지 C-means 알고리즘에서 C값은 필요에 따라 물리적 메커니즘을 가장 잘 반영할 수 있도록 정해야 하므로, 공구의 상태에 따라 상(Fine), 중(Adhesion), 하(Broken tool)의 3가지 클러스터로 설정하여 패턴 분류를 실시하였다.

Fig. 11은 특징 추출된 데이터 k_1 과 k_{10} 데이터를 이용하여 30개의 AE 신호에 대한 패턴 분류를 실시한 예를 그래프로 나타내었다. 그래프에서 중심의 원으로 표시된 것은 퍼지 C-means 알고리즘을 사용하여 계산된 3개의 클러스터를 대표하는 센터 값을 의미하는 것으로, 각각의 데이터가 센터값과의 거리가 가까울수록 해당 클러스터에 속하는

정도가 높은 것이다. 중심의 원으로 표시된 것은 패턴 분류를 위해 선정된 30개의 데이터를 나타내는 것이며, 분류된 결과로부터 3가지 상태의 평가 데이터들은 신뢰성 있게 분류가 되었음을 확인할 수 있다. Table 4는 계산된 클러스터 센터를 나타낸 것으로 패턴 분류된 클러스터의 센터값은 공구의 상태를 나타내는 값으로 고려할 수 있으므로, 도출된 센터값을 활용하면 공구의 상태에 대한 인프로세스(In-Process) 감시를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

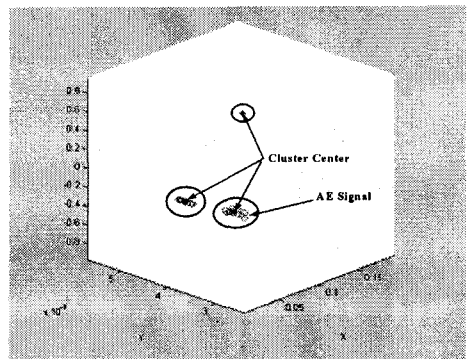


Fig. 11 Pattern classification using fuzzy C-means algorithm

Table 4 Cluster center of AE feature

	k_1	k_{10}
Cluster 1	0.0003	0.0011
Cluster 2	0.9997	0.9989
Cluster 3	0.0000	0.0000

동일한 방법으로 추출된 각각의 특징들에 대한 패턴 분류를 실시한 결과 마이크로 엔드밀의 상태를 가장 잘 나타내는 데이터는 AE RMS 신호 데이터 값인 k_1 과 주파수 분석 결과로부터 $k_3, k_4, k_6, k_7, k_9, k_{10}, k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15}, k_{25}$ 임을 실험을 통하여 확인하였으며, 또한 마이크로 엔드밀의 이상상태를 나타내는 주파수 대역임을 추정할 수 있다.

Fig. 12는 퍼지 C-means 알고리즘을 이용하여 계산된 각각의 신호에 대한 퍼지 등급의 결과를 나타낸 것으로 A 부분은 가공중 정상적인 공구의 상태에서 획득된 신호들의 퍼지 등급으로 모든 데이

터들이 '상' 퍼지 등급에 속하며, B와 C 부분은 공구의 응착 및 파손상태에서 획득된 신호들로 '중' 및 '하' 퍼지 등급에 속하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이상상태 알고리즘을 구성하여 퍼지 등급 0.3이하의 경우 가공정지나 알람을 통해 실시간 제어를 기대할 수 있다. 따라서 AE RMS와 주파수 분석을 이용한 퍼지 C-means 알고리즘의 패턴 분류 및 퍼지 등급을 이용하여 공구상태의 감시가 가능할 것으로 사료된다.

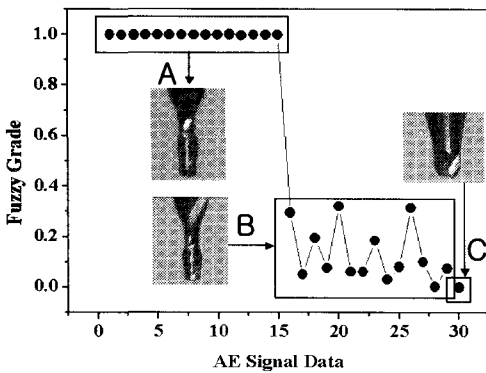


Fig. 12 Comparison of fuzzy grade in according to tool state

4. 결론

마이크로 엔드밀링시 AE 신호를 이용한 공구상태 감시 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) AE RMS는 이송속도 및 절삭깊이량이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었으며, AE hit는 안정된 상태에서 변화가 미미하지만 이상상태에서 변화가 급격히 크게 나타남으로 이상상태 감시에 유효한 파라미터이다.

2) AE 신호를 획득하여 주파수 분석의 결과 결합 발생시 90 ~ 100kHz 주파수 대역의 진폭이 증가함을 알 수 있었고, 공구파손시에는 90 ~ 100kHz 주파수 대역의 진폭 증가와 더불어 800kHz 대역의 고주파 신호가 발생한다.

3) AE RMS와 주파수 특성으로부터 유효 파라미터들이 추출되었고, 퍼지 C-means 알고리즘을 이용한 패턴 인식의 결과 클러스터 센터와 퍼지 등급은 마이크로 엔드밀의 정상, 응착, 파손상태를 잘 분류해냈다.

후 기

본 연구는 2005년도 산업자원부의 핵심연구개발사업의 일환으로 한국과학기술원의 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ikawa, N., Donaldson, R. R., Komanduri, R., König, W., Aachen, T. H., McKeown, P. A., Moriwaki, T. and Stowers, I. F., "Ultraprecision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 587-594, 1991.
2. Bao, W. Y., Tansel, I. N., "Modeling Micro-end-milling Operation. Part I: Analytical Cutting Force Model," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 40, pp. 2155-2173, 2000.
3. Tansel, I. N., Arkan, T. T., Mahendrakar, N., Shisler, B., Smith, D. and McCool, M., "Tool Wear Estimation in Micro-machining. Part I: Tool Usage-Cutting Force Relationship," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 40, pp. 599-608, 2000.
4. Tönshoff, H. K., Wulfsberg, J. P., "Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Process," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 2, pp. 611-622, 1988.
5. Takata, S. and Nakajima, T., "Tool Breakage Monitoring by means of Fluctuations in Spindle Rotation Speed," *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 49-52, 1987.
6. Dornfeld, D. A., "Neural Network Sensor for Tool Condition Monitoring," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 101-105, 1990.
7. Kim, S. R., Kim, H. Y., Ahn, J. H., "Development of Acoustic Emission Monitoring System for Fine Machining -Application to Cutting State Monitoring in a Fine Fixed-abrasive Machining-," *Journal of the KSPE*, Vol. 22, No. 6, pp. 109-117, 2005.
8. Bezdek, J. C., "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms," Plenum, 1981.
9. Kandel, A., "Fuzzy Techniques in Pattern Recognition," John Wiley & Sons, pp. 91-129, 1982.