

# C-means 알고리즘을 이용한 마이크로 엔드밀의 상태 감시

권동희\*, 정연식+, 강익수\*\*, 김전하\*\*\*, 김정석\*\*\*\*

## Condition Monitoring of Micro Endmill using C-means Algorithm

Dong-Hee Kwon\*, Yun-Shick Jeong+, Ik-Soo Kang\*\*, Jeon-Ha Kim\*\*\*, Jeong-Suk Kim\*\*\*\*

### Abstract

Recently, the advanced industries using micro parts are rapidly growing. Micro endmilling is one of the prominent technology that has wide spectrum of application field ranging from macro to micro parts. Also, the method of micro-grooving using micro endmilling is used widely owing to many merit, but has problems of precision and quality of products due to tool wear and tool fracture. This study deals with condition monitoring using acoustic emission(AE) signal in the micro-grooving. First, 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 using the fuzzy C-means algorithm, which is one of the methods to recognize data patterns. These result is effective monitoring method of micro endmill state by the AE sensing techniques which can be expected to be applicable to micro machining processes in the future.

**Key Words :** Condition Monitoring(상태 감시), Micro-Grooving(미세 홈 가공), Fracture(파손), Adhesion(응착), AE Signal(음향방출 신호), Micro Endmill(마이크로 엔드밀)

## 1. 서론

최근 센서 및 마이크로 머신으로 대표되는 초소형 정밀기계분야, 광통신 및 멀티미디어로 대표되는 광 응용 가전분야, 에너지 공급 및 의료용 분석기로 대표되는 마이크로 열유체 시스템 분야 등에서의 기술발전이 눈부시다<sup>(1-2)</sup>. 첨단 산업 제품들에는 초소형 또는 미세 형상 구조물을 가진 기능성 마이크로 부품들이 필수적으로 사용되며, 그 용도가 급속하게 증가하고 있다. 이러한 미세 형상부품 중 고세장비의 다중 미세 구조물 제품, 복잡 형상의 마이크로 채널, 도파로, PZT(Piezo-electric Transducer)센서, 필터, PDP(Plasma Display Panel)등은 그 구조가 격벽 구조로 되어 있다.

일반적으로 PDP 격벽의 수치오더는 기계적인 절삭가공

으로도 충분히 가공이 가능하며, 따라서 최근에는 미세부품의 가공에 적용 가능한 기계적 절삭 가공법의 개발 및 미세공구에 초점이 모아지고 있는 추세이다<sup>(3-4)</sup>. 고정밀도 이송기구의 출현 및 제어 시스템의 발전은 서브 밀리미터(1mm~100μm) 규모의 부품가공을 기계적인 방법으로 가능하게 하고 있다. 이러한 기계적 가공방법은 화학적, 또는 전기적 특수가공 기술 분야의 단점을 극복하는 대안으로 연구가 시도되고 있다.

기계적 절삭가공에 의한 방법은 우수한 면조도, 짧은 가공시간과 가공의 용이성 등 많은 장점을 가지고 있으나, 미세공구의 마모 또는 파손에 따른 가공물의 정밀도 및 품질의 저하를 초래하기도 한다. 그러므로 양호한 표면상태를 얻기 위해서 공구의 마멸, 응착 및 파손과 같은 이상상태 감

\* 주저자, 부산대학교 정밀기계공학과 정밀공학연구소 (dhkwon@pusan.ac.kr)  
주소: 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산30번지  
+ 대우정밀(주)  
++ 부산대 정밀기계공학과 정밀공학연구소  
+++ 부산대 정밀정형 및 금형가공 연구소  
++++ 부산대 기계공학부

시가 필요하다<sup>(5-6)</sup>.

일반적으로 공구의 상태감시 방법에는 직접적인 측정법과 간접적인 측정법으로 구분할 수 있는데, 직접적인 측정법은 측정인자의 미세화로 인해 온라인 상으로 측정하기가 어려운 문제점이 있다. 따라서 대부분의 감시 방법은 공구의 이상상태 검출뿐만 아니라 공작물의 변화와 절삭공구의 형상, 절삭 조건 등의 다양한 공정 파라미터들을 간접적으로 검출하는 방법을 사용하고 있다. 미세가공에서 마이크로 공구의 이상상태를 실시간으로 진단하는 것은 가공 공정의 자동화와 신뢰성을 증가시키는데 중요한 역할을 수행한다. 이를 위해 본 연구에서는 마이크로 엔드밀을 사용하여 STD11과 Al6061의 가공시 가공조건에 따른 AE의 여러 가지 파라미터를 사용하여 특성을 평가하였고, 마이크로 엔드밀의 미소 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 알고리즘을 활용하였다.

## 2. 이론적 배경

패턴 인식은 “데이터 내 구조에 대한 탐색”으로 정의되며, 다양한 분야에서 사용되고 있다. 퍼지 이론을 이용한 패턴 인식에는 주어진 대상을 그와 유사한 대상물들의 클래스로 분할하는 방법과 주어진 자료의 집합을 비슷한 덩어리인 클러스터들로 분할하는 패턴 클러스터링이 있다. 첫 번째 방식은 주로 명백한 단일 대상을 다루는 것으로서 단일 대상을 그 대상물이 속하는 클래스로 판정하는 방법이며, 두 번째 방식은 여러 개의 대상물들이 섞여 있는 상태에서 서로 유사한 성질을 가지고 있는 것끼리 분해하여 유사한 정보들의 집합인 클러스터들로 분할하는 것이다. 여기서 유사하다는 것은 대상물들의 특징에 대한 벡터 공간 상에서 같은 그룹 내 모든 점들이 서로 근접하고 다른 그룹의 점들과 멀리 떨어져 있다는 것을 의미한다. 클러스터링 알고리즘은 이러한 패턴 부류를 만들거나 관련된 정보를 유지하면서 자료 집합의 크기를 줄이기 위해 사용된다. 대표적인 클러스터링 방법으로는 C-means 알고리즘이 가장 보편화 되어있다.

C-means 알고리즘은 데이터의 집합을 균질한 요소들로 단 순히 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  $U$  구하기 위해 식 (1)과 같은 제곱오차의 합을 목적함수로 취한다.

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

여기서,  $x_k$ 는 측정 데이터,  $\nu_i$ 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  $\nu_i$ 는 식 (2)와 (3)의 조건식을 만족해야 한다.

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

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

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  $\nu_i$ 를 계산한다.
- ④  $u_{ik}$ 를 계산하고,  $U$ 에서  $U^*$ 로 갱신한다.
- ⑤ 적당한 역치  $\epsilon$ 를 정의하여,  $\{u_{ik}^* - u_{ik}\} \leq \epsilon$ 이 될 때까지의 앞의 순서를 반복한다<sup>(7)</sup>.

## 3. AE 특징 추출

### 3.1 이상상태에서의 AE 특징

미세홈 가공실험은 고속가공기(MAKINO V55)에서  $\emptyset$  0.2mm 초경 평 엔드밀을 사용하였고, Fig. 1은 실험에 사용된 마이크로 엔드밀의 형상을 나타내었다<sup>(8)</sup>.

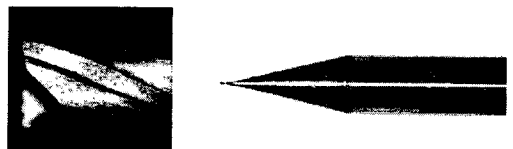


Fig. 1 Tungsten carbide micro flat endmill

응착 및 공구 파손과 같은 이상상태를 감지하기 위하여 회전수 20,000rpm, 절삭깊이 30 $\mu$ m, 이송속도 5mm/sec로 가공을 수행하였다.

Fig. 2는 Al6061 가공시 안정된 상태에서 획득한 AE 신호이다.

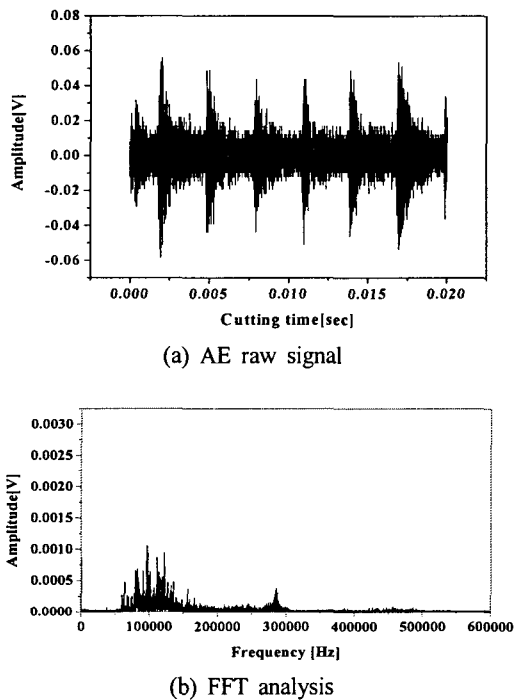


Fig. 2 AE raw signal and frequency characteristics in stable state

AE 주파수 분석은 가공시 발생하는 결함의 특징을 파악하기 위함으로, 특정 주파수 영역에서의 가장 높은 값을 기준으로 이상상태와 비교함으로써 AE 주파수 특성을 검토하고자 하였다.

Fig. 2(a)의 AE 원신호에서 엔드밀의 날당 진폭을 볼 수 있으며, (b)의 주파수 분석에서는 가공시 70~130kHz 대역에서 높은 피크 값을 보이고 있다.

마이크로 엔드밀에 응착이 발생하였을 때의 획득한 AE 신호를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3(a)는 AE 원신호에서 응착 발생시 진폭이 급속히 증가함을 볼 수 있으며, (b)의 주파수 분석에서는 90~100kHz 영역에서 안정된 상태에서의 주파수와는 확연히 다르게 진폭이 증가함을 볼 수 있다.

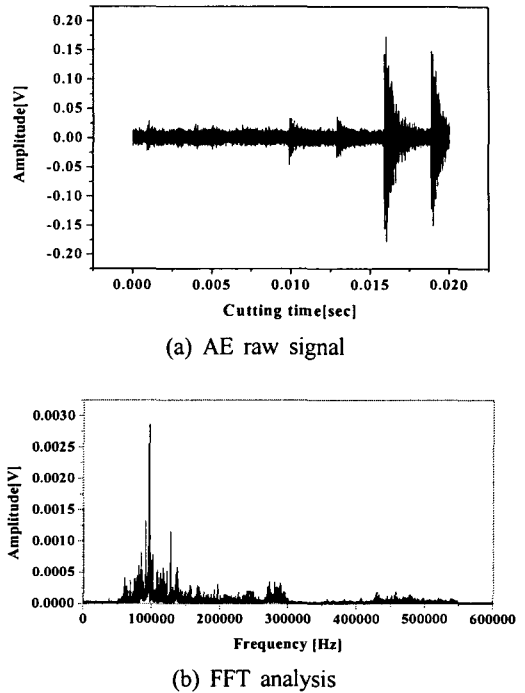
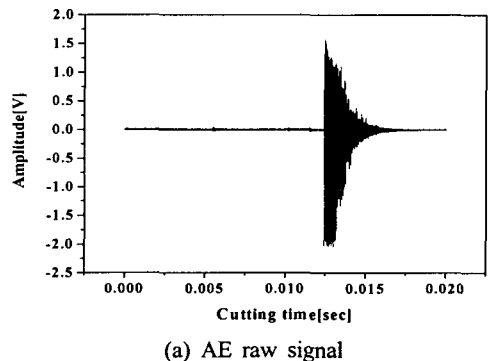
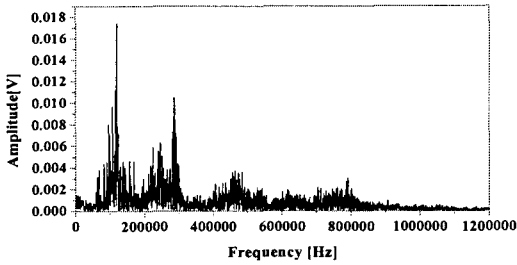


Fig. 3 AE raw signal and frequency characteristics in adhesion state

Fig. 4는 마이크로 엔드밀의 완전 파손이 일어났을 때 획득한 AE 신호이다. 이때 안정된 상태에서 AE 원신호의 고진폭 레벨은 약 0.05~0.06V 정도이며, 공구의 완전 파손이 발생하였을 때의 진폭 레벨은 Fig. 4(a)의 AE 원신호에서 보는 바와 같이 고진폭 레벨이 약 2V로 안정된 상태에 비해 36배 이상 증가하였다. 또한, Fig. 4(b)의 주파수 분석에서 보면 80~130kHz의 진폭의 증가와 800kHz 영역까지의 고주파수가 발생함을 볼 수 있다.





(b) FFT analysis

Fig. 4 AE raw signal and frequency characteristics in tool fracture state

주파수 분석에서 고주파수 영역의 신호가 발생한 것은 Al6061의 미세홈 가공시 공구에 응착발생 및 칩 배출의 불안정성 때문에 공구의 완전 파손으로 인해 발생한 것으로 사료된다.

### 3.2 유효 AE 파라미터 추출

Fig. 5는 패턴 인식의 과정을 나타낸 것으로, 데이터의 수집, 인식을 위한 전 처리, 특징 추출, 패턴 분류의 과정을 거쳐 패턴 인식을 하게 된다.

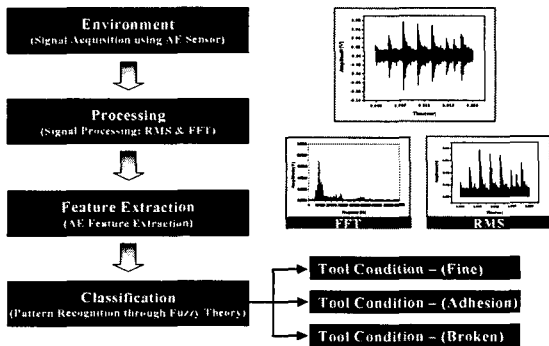


Fig. 5 Block diagram of pattern recognition

Fig. 6, 7은 패턴 인식을 위해 사용된 안정 및 이상상태에서 획득한 마이크로 엔드밀의 CCD사진과 AE 원신호의 예를 나타내었으며, 정상적인 엔드밀 상태에서의 신호와 응착 및 파손과 같은 이상상태가 발생하였을 때의 신호를 각각 15개씩 샘플링 하였다. 특징 추출을 위한 전 처리 과정으로 각각의 AE 신호를 RMS와 주파수 분석을 실시하였으며, 분석된 결과를 토대로 엔드밀의 상태 특성을 잘 나타내는 데이터를 추출하였다. 추출된 특징 데이터는 퍼지 C-means 알고리

즘을 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 감지에 퍼지 패턴 인식의 활용 가능성을 검토하였다.

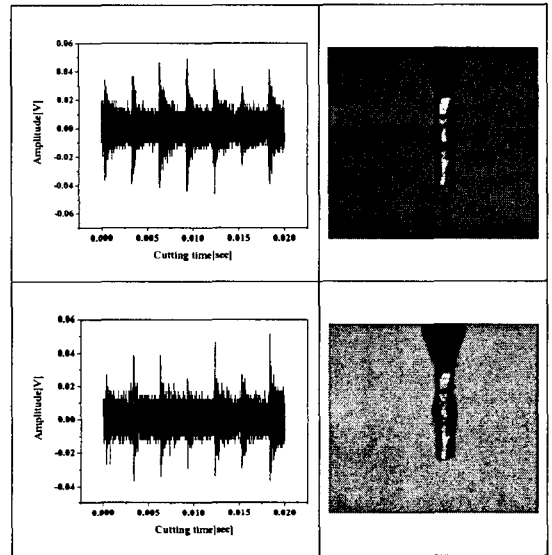


Fig. 6 AE raw signal and photograph of micro endmill in stable state

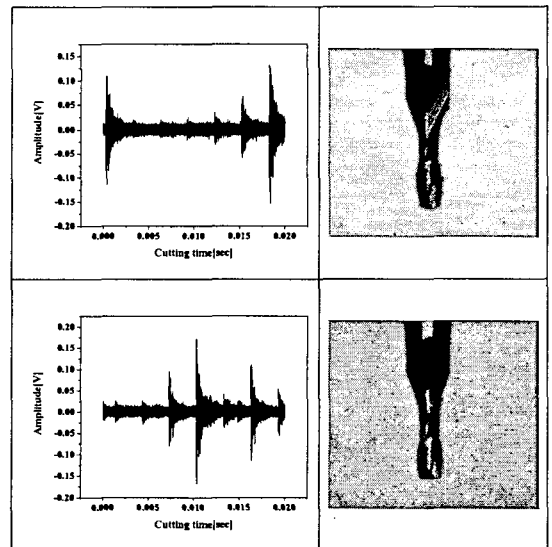


Fig. 7 AE raw signal and photograph of micro endmill in unstable state

본 연구에서는 AE 신호의 분석 결과를 이용한 마이크로 엔드밀의 상태 감시를 위해 다음과 같은 특징 데이터들이 선정되었다.

- 1)  $n_1$  : AE 신호의 RMS
- 2)  $n_2$  : 60~80kHz 주파수 대역 신호의 RMS
- 3)  $n_3$  : 80~100kHz 주파수 대역 신호의 RMS
- 4)  $n_4$  : 100~120kHz 주파수 대역 신호의 RMS
- 5)  $n_5$  : 120~140kHz 주파수 대역 신호의 RMS
- :
- 중략
- :
- 38)  $n_{38}$  : 780~800kHz 주파수 대역 신호의 RMS
- 39)  $n_{39}$  : 800~820kHz 주파수 대역 신호의 RMS
- 40)  $n_{40}$  : 60~80kHz 주파수 대역 신호의 최대 진폭크기
- 41)  $n_{41}$  : 80~100kHz 주파수 대역 신호의 최대 진폭크기
- :
- 중략
- :
- 76)  $n_{76}$  : 780~800kHz 주파수 대역 신호의 최대 진폭크기
- 77)  $n_{77}$  : 800~820kHz 주파수 대역 신호의 최대 진폭크기

세분화된 특징 중에서 AE 신호의 RMS와 주파수 분석을 통하여, 공구상태를 잘 나타내는 25개의 구간을 특징 추출을 위해 위에서 열거한  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_6, n_7, n_9, n_{12}, n_{13}, n_{14}, n_{22}, n_{23}, n_{38}, n_{40}, n_{41}, n_{42}, n_{44}, n_{45}, n_{47}, n_{50}, n_{51}, n_{52}, n_{60}, n_{61}, n_{76}$ 를  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_{23}, k_{24}, k_{25}$ 로 다시 정의하고, 특징 집합으로부터 클러스터 센터를 식 (2)와 (3)을 이용하여 계산하였다.

#### 4. 상태 감시 결과 및 고찰

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

Fig. 8은 특징 추출된 데이터  $k_1$ 과  $k_{10}$  데이터를 이용하여 30개의 AE 신호에 대한 패턴 분류를 실시한 예를 그래프로 나타내었다.

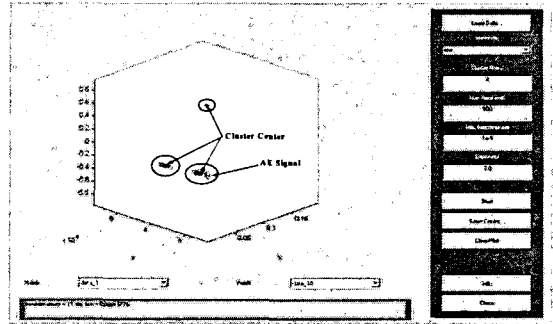


Fig. 8 Pattern classification using fuzzy C-means algorithm

그래프에서 중심의 원으로 표시된 것은 퍼지 C-means 알고리즘을 사용하여 계산된 3개의 클러스터를 대표하는 센터 값을 의미하는 것으로, 각각의 데이터가 센터 값과의 거리가 가까울수록 해당 클러스터에 속하는 정도가 높은 것이다. 그리고, 중심의 원으로 표시된 것은 패턴 분류를 위해 선정된 30개의 데이터를 나타내는 것이며, 분류된 결과로부터 3가지 부류의 평가 데이터들은 신뢰성 있게 분류가 되었음을 확인할 수 있다. Table 1은 계산된 클러스터 센터를 나타낸 것으로, 패턴 분류된 클러스터의 센터 값은 공구의 상태를 나타내는 값으로 고려할 수 있으므로, 도출된 센터 값을 활용하면 공구의 상태에 대한 인-프로세서(In-Process) 감시를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 1 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 유추할 수 있다.

본 연구에서 퍼지 분류의 목적은 추출된 특징을 이용하여 마이크로 엔드밀의 상태를 퍼지 등급으로 구분하는 것이다.

Fig. 9는 퍼지 C-means 알고리즘을 이용하여 계산된 각각의 신호에 대한 퍼지 등급의 결과를 나타낸 것이다.

## 참고 문헌

- (1) E. G. Johnson, 2003, "Micromachining technology for micro-optics and nano-optics", *Proceedings of SPIE*, Vol. 4984.
- (2) M. Madou, 1997, *Fundamentals of micro fabrication*, CRC Press.
- (3) Jemielniak, K., 2000, "Some aspects of AE application in tool condition monitoring", *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 604~608.
- (4) Prickett, P. W., 1999, "An overview of approaches to end milling tool monitoring", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 105~122.
- (5) H. K. Tönshoff, J. P. Wulfsberg, 1988, "Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Process", *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 2, pp. 611~622.
- (6) Takata, S. and Nakajima, T., 1987, "Tool Breakage Monitoring by means of Fluctuations in Spindle Rotation Speed", *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 49~52.
- (7) A. Kandel, 1982, "Fuzzy Techniques in Pattern Recognition", *John Wiley & Sons*, pp. 91~129.
- (8) 정연식, 강익수, 김전하, 강명창, 김정석, 안중환, 2004, "마이크로 엔드밀링에서 음향방출 신호를 이용한 상태감시", *한국공작기계학회 2004 추계 학술대회 논문집*, pp. 334~339.

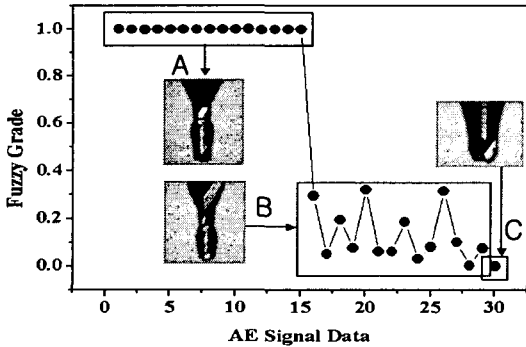


Fig. 9 Comparison of fuzzy grade in according to tool condition

A 부분은 가공중 정상적인 공구 상태에서 획득된 신호들의 퍼지 등급으로 모든 데이터들이 상 퍼지 등급에 속하며, B와 C부분은 공구의 응착 및 파손 상태에서 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.

그러므로, AE RMS와 주파수 분석을 이용한 퍼지 C-means 알고리즘의 패턴 분류 및 퍼지 등급은 공구상태를 잘 평가함을 알 수 있으며, 이를 이용한 이상상태의 감시가 가능할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구 이전 실험에서 마이크로 엔드밀을 이용한 미세 홈 가공시 AE 센서를 적용하여 가공조건에 따른 AE 신호와의 상관관계가 규명되었고, 응착과 파손과 같은 이상상태의 발생시 AE 원신호와 주파수 특정 영역에서 정상상태와 다른 패턴이 존재함이 확인되었다. 이러한 이전 실험 결과를 토대로 이상상태를 분류하기 위한 패턴 인식법을 이용한 감시연구가 수행되었다. 결과적으로, AE RMS와 주파수 특성치들로부터 유효한 특정 파라미터들이 추출되었고, 퍼지 C-means 알고리즘을 이용한 패턴 인식법을 적용함으로써 마이크로 엔드밀의 상태분류가 가능하였다.