

퍼지 클러스터링을 이용한 금형강에 미세 그루브 가공시 가공상태 모니터링

이은상[#], 곽철훈^{*}, 김남훈^{**}

Machining condition monitoring for micro-grooving on mold steel using fuzzy clustering method

Eun-Sang Lee[#], Chul-Hoon Kwak^{*} and Nam-Hun Kim^{**}

ABSTRACT

Research during the past several years has established the effectiveness of acoustic emission (AE)-based sensing methodologies for machine condition analysis and process. AE has been proposed and evaluated for a variety of sensing tasks as well as for use as a technique for quantitative studies of manufacturing process. STD11 has been known as difficult-to-cut materials. The micro-grooving machine was developed for this study and the experiments were performed using CBN blade for machining STD11. Evaluating the machining conditions, frequency spectrum analysis of acoustic emission (AE) signals according to each conditions were applied. Fuzzy clustering method for associating the preprocessor outputs with the appropriate decisions was followed by frequency spectrum analysis. FFT is used to decompose AE signal into different frequency bands in time domain, the root mean square (RMS) values extracted from the decomposed signal of each frequency band were used as features.

Key Words : Micro-grooving (미세 그루브 가공), AE (Acoustic Emission, 음향방출), Fuzzy clustering (퍼지 클러스터링), FCM (Fuzzy c-means, 퍼지 c-means)

1. 서론

음향방출(AE)기법은 재료의 특성평가 방법으로서 재료의 변형이나 파괴시에 발생하는 AE 신호를 분석하여 결함검출 및 파괴기구 규명과 같은 재료의 물성평가 뿐만 아니라 비파괴 평가수단으로써 구조물의 현상태를 진단하고 안정성을 평가하는데 주로 이용되고 있다.¹

현재의 미세 그루브 가공 기술의 대부분은 뛰어난 치수 정밀도를 제공하는 화학적인 에칭방법에 기초를 두고 있으나, 몇가지 단점을 가지고 있다. 예를 들어, 포토리소그래피 공정이나 LIGA 공정은 많은 투자비와 공정시간을 요구하고 있다. 미세 그루브 가공의 또 다른 방법으로 단결정 다이아몬드 가공의 경우 단결정 바이트는 내충격성이 약하므로 경취성 재료 가공에는 부적합하다.²

¹ 접수일: 2002 년 12 월 4 일; 게재승인일: 2003 년 8 월 14 일
[#] 교신저자, 인하대학교 기계공학과
E-mail: leees@inha.ac.kr, Tel: (032) 860-7308
^{*} 인하대학교 대학원 기계공학과
^{**} 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

본 연구에서는, 금형강(STD11)에 블레이드로 미세 그루브 가공시 각각의 가공조건에 해당하는 AE 신호를 분석하여 가공조건들을 평가하고자 한다. STD11 은 냉간 공구강의 주류를 차지하며 광범위하게 사용되고 있는 범용강이라고 할 수 있다. 또한, 탄소와 크롬의 함유량이 많아 경도가 높고 내마멸성이 우수하지만, 피삭성은 좋지 않다.

Dornfeld³ 등은 연삭공정의 제어를 위하여 AE 센서의 사용을 제안하였으며, AE 신호가 공작물 제거량, 연삭 슷들의 드레싱, 마멸상태, 직경 감소량과 같은 연삭 파라미터들과 밀접한 연관이 있다고 밝혔다. 미세 그루브 가공은 연삭과 유사한 메커니즘을 가지고 있으므로, 본 연구에서도 미세 그루브 가공시의 가공조건들을 평가하기 위한 방법으로 AE 기법을 적용하였다.

공구로는 CBN (Cubic Boron Nitride) 블레이드가 사용되었으며 블레이드의 회전속도와 이송속도, 가공깊이에 따른 AE 신호를 검출하여 주파수 분석을 통하여 얻은 결과와, 가공된 공작물을 현미경으로 표면의 형상을 관찰하여 얻은 결과를 비교함으로써 미세 그루브 가공 공정의 안정성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

미세 그루브의 가공을 위하여 개발된 미세 가공 시스템의 사진을 Fig.1 에 나타내었다.

본 실험을 위하여 3 축 제어 미세 그루브 가공 장치를 개발하였다. 가공기의 구조는 가공 공작물의 대형화와 진동문제를 고려하여 테이블을 고정하고 공구를 이송하는 방법을 적용하였으며, x, y, z 방향의 3 축은 초정밀 LM 가이드를 채용하여 정밀 래핑 가공된 석정반 위에 고정하였다.

그루브 가공에 쓰인 공구는 미세지립의 CBN 블레이드이고, 고속 에어스핀들에 장착하여 최대 60,000 rpm 으로 회전이 가능하다.

공작물의 재료는 일반적으로 난삭재로 알려져 있는 STD11 이고, 각각의 가공조건에 따른 AE 신호를 검출하기 위하여 공작물의 측면에 넓은 주파수 범위에서도 균일한 감도를 가지고 있는 광대역 AE 센서를 부착하였다.

신호의 증폭과 필터링을 위하여 프리앰프(1220A(PAC))와 메인앰프(AE1A(PAC))를 사용하여

52dB 의 증폭과 100~1200kHz 의 band-pass 필터링을 실시하였고, 12 비트의 분해능을 갖는 A/D 변환기(Gagescope CS1012)를 사용하여 AE 센서(Physical Acoustics Co., 공칭주파수: 100 - 10,000kHz)에서 얻어지는 신호를 5MHz 의 샘플링 속도로 디지털화하였다.

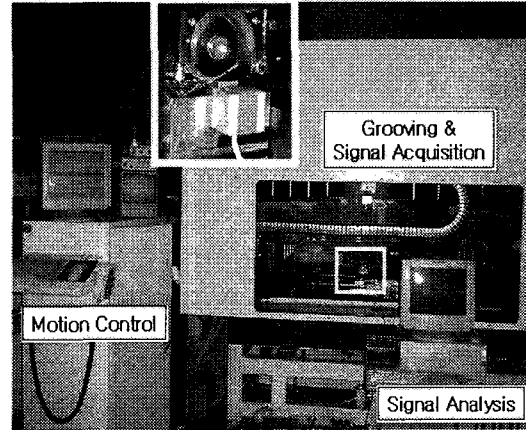


Fig. 1 Photograph of micro-grooving system and experimental setup.

2.2 실험방법

미세 그루브 가공실험을 위한 실험조건을 Table.1 에 나타내었다. 가공 시스템에 장착된 에어스핀들은 최대 60,000 rpm 까지 회전이 가능하지만 블레이드로 STD11 에 그루브 가공시 스피들의 진동특성 및 런아웃을 고려하여 25,000~40,000 rpm 으로 회전시켰다.

Table 1 Experimental conditions

Machining parameters	
Workpiece Hardness	STD11 (HRC 58)
Cutting Tool	φ 52 CBN blade
Spindle revolution speed	25,000~40,000 rpm
Operation	Down cutting
Tool feed rate	0.5~0.7 mm/s
Depth of groove	100~200 μm
Amplification of signal	52dB
Sampling rate (A/D)	5MHz

공구의 이송속도는 약 0.6mm/s 로 가공하였을 때 공구의 파손이나 큰 절삭저항없이 가공이 가능하므로 0.5 ~ 0.7mm/s 로 변수를 선택하였고, 그루브의 깊이는 100 ~ 200 μm 로서 각각의 가공조건으로 가공하였을 때 나타나는 가공정도 및 버의 발생을 관찰하고 AE 신호를 검출하여 급형강에 미세 그루브 가공시 가공특성을 평가하였다.

3. 실험결과

3.1 가공정도 및 버의 현미경 관찰

CBN 은 다이아몬드 공구와 함께 초고압성 공구 또는 초고압 합성 경질재료이다. CBN 은 다이아몬드 다음으로 고경도이고, 세라믹스보다 훨씬 높은 항절력(인성)이 있다. 고온경도나 고온화학안정성의 면에서도 다른 절삭공구에 비하여 매우 우수하여 주로 철계의 고경도 재료 또는 철계의 소결합금의 절삭에 적합한 재료이다. Fig. 2 는 CBN 블레이드로 가공했을 때의 결과를 나타낸 것이다.

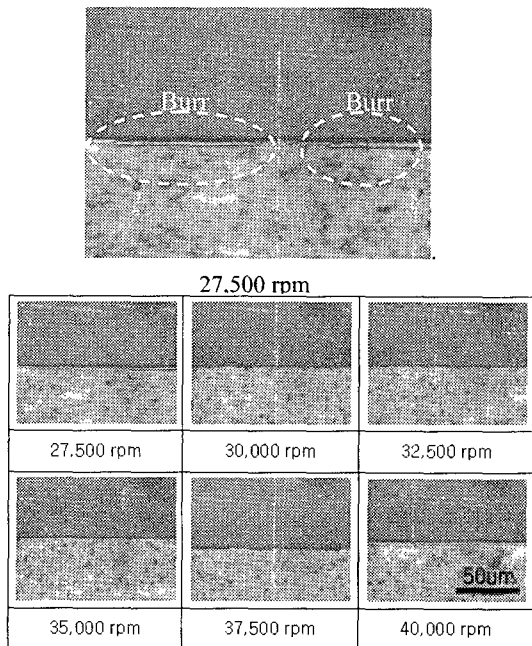


Fig. 2 Micrographs of Groove. (Tool : CBN blade, feed rate : 0.6mm/s, Depth of groove : 150 μm)

각각의 가공조건에 따라 실험한 결과, CBN 블레이드로 가공하였을 때, 30,000 rpm ~ 35,000 rpm 의 스피들 회전속도, 0.5 ~ 0.6 mm/s 의 공구 이송속도, 200 μm 이하의 가공깊이에서 양호한 결과가 도출

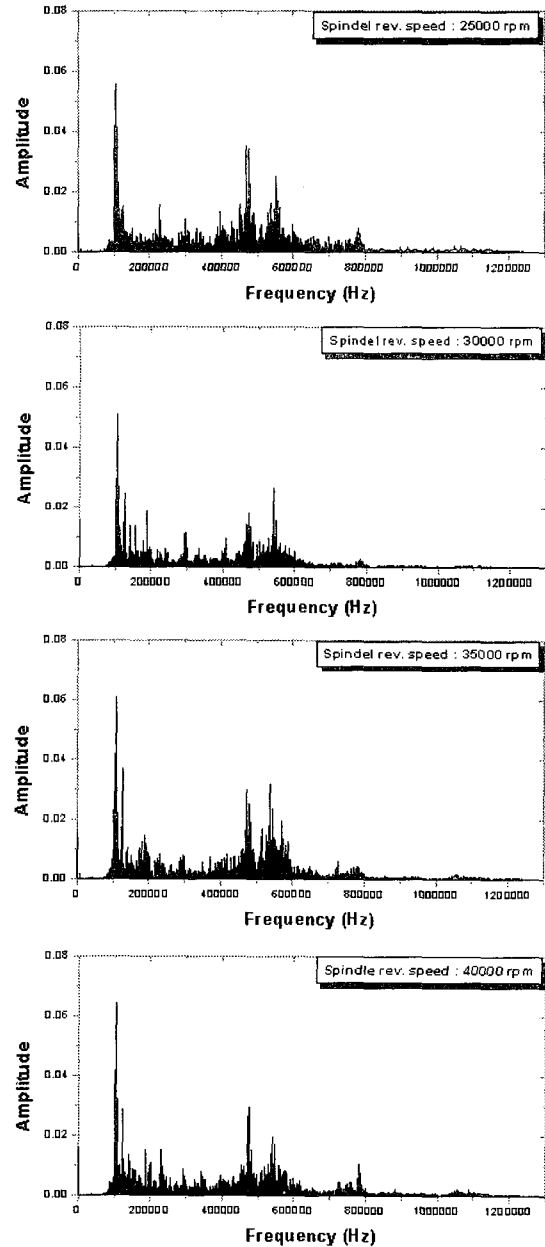


Fig. 3 Frequency spectrum of AE signals according to the spindle revolution speed. (Tool : CBN blade, Feed rate : 0.6mm/s, Depth of groove : 150 μm)

되었다. 27,500 rpm 에서는 가공 경계면에 버(burr)가 발생하는 현상이 나타났으며, 40,000 rpm 이상의 초고속 절삭에서는 에어스핀들에 가해지는 부하로 인하여 시스템이 불안정하게 됨으로써 실험 적용에 한계가 있어서, 본 실험에서는 나타내지 않았다.

3.2 AE 신호의 주파수 분석을 통한 가공특성 평가

각각의 가공조건에 따른 AE 신호를 위에서 언급한 것과 같은 조건으로 디지털화하여 주파수 특성을 살펴보았다. Fig. 3 은 CBN 으로 가공하였을 때 스피ndl의 회전속도에 따른 주파수 영역의 특성을 나타낸 것이다.

정상적으로 그루브 가공이 진행되고 있을 때, 스피ndl의 회전속도에 관계없이 100 kHz 안팎과 400 ~ 600kHz 사이의 주파수 대역에서 높은 진폭을 가지고 있다. 높은 진폭을 가지고 있는 두 주파수 대역중, 400 ~ 600kHz 사이의 신호는 가공중, 절삭수의 공급에 의한 신호임이 판명되었다. 절삭수의 공급을 실시하지 않았을 때의 전형적인 주파수 특성을 Fig. 4 에 나타내었다.

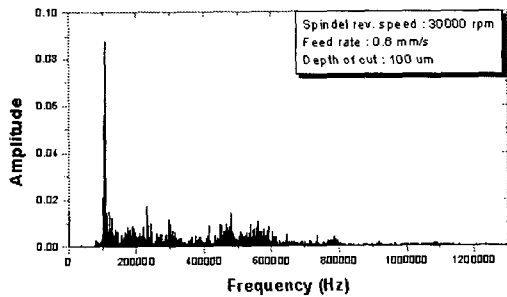


Fig. 4 Frequency spectrum of AE signals without coolant (Tool : CBN blade, Spindle rev. speed : 30,000 rpm, Feed rate : 0.6mm/s, Depth of groove : 100 μ m)

Fig. 3 과 Fig. 4 를 비교하였을 때, 약 400 ~ 600kHz 의 주파수 대역은 100 kHz 안팎의 주파수 대역에 비하여 매우 낮은 크기를 가지고 있음을 알 수 있다. 이로써, 400 ~ 600kHz 사이의 신호는 절삭수의 공급 때문에 발생하였다는 것을 알 수 있다. 본 연구에 행한 실험에서, 공구인 CBN 블레이드는 고속으로 회전하게 되므로, 절삭수는 그루

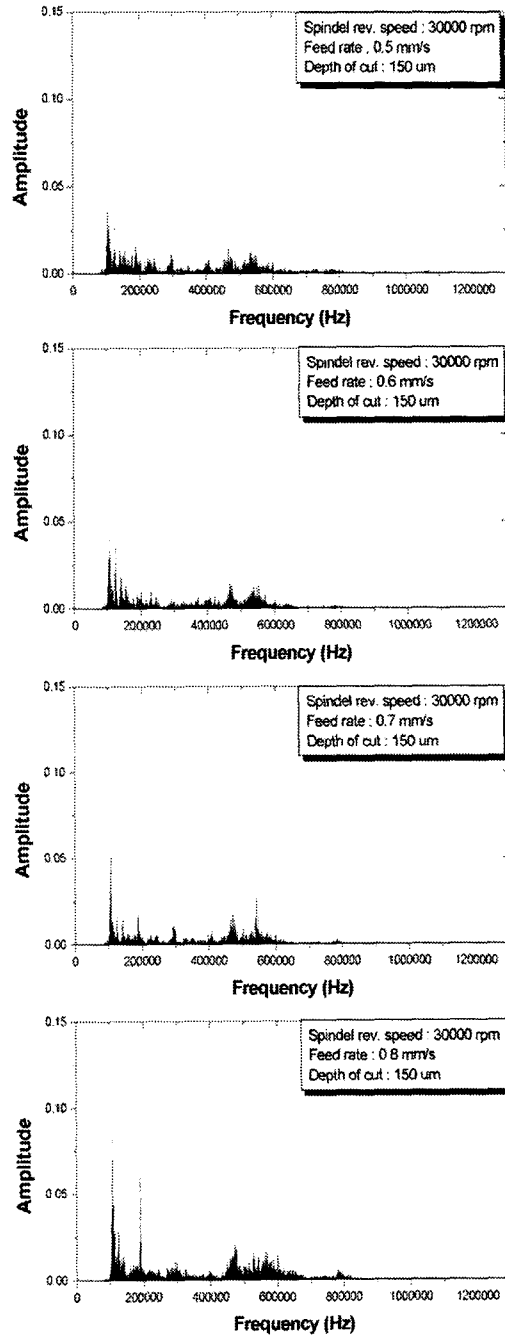


Fig. 5 Frequency spectrum of AE signals according to the feed rate. (Tool : CBN blade, Spindle rev. speed : 30,000 rpm, Feed rate : 0.6mm/s, Depth of groove : 100 μ m)

브 가공시 매우 중요한 역할을 하게 된다. 절삭수의 공급이 없으면 금형강에 정상적인 그루브 가공이 불가능하기 때문에, AE 신호에서 절삭수에 의한 영향을 배제하기 위하여 절삭수의 공급을 중단할 수는 없었다.

Fig. 5 는 공구의 이송속도에 따른 AE 신호의 주파수특성을 나타내었다. 이송속도가 증가할수록 더 많은 절삭에너지가 필요하므로, 신호의 크기는 더 커지는 현상을 나타내고 있다.

또한, 이송속도가 0.5 ~0.7mm/s 의 범위에 있을 때에는 가공조건에 관계없이 유사한 형태의 주파수 특성을 가지고 있으나, 0.8mm/s 의 조건에서는 비정상적인 가공이 진행됨에 따라 약 200kHz 주파수 대역의 신호가 큰 진폭을 가지는 현상을

알 수 있었다.

Fig. 6 은 비정상적인 가공이 진행되고 있을때, 전형적인 AE 신호의 주파수 특성과 그루브 가공 형상을 나타내었다. 비정상적인 가공이라 함은, 버의 과도발생 및 과도한 가공부하, 블레이드의 마멸, 파손등으로 인하여 직선모양의 그루브 형상이 불규칙적인 형태로 파손되는 상태를 말한다.

그루브 가공이 비정상적으로 진행되고 있을 때에는, 정상적인 가공이 진행되고 있을때와 비교하였을 때, 약 200kHz 안팎의 주파수 대역에서 신호의 진폭이 증가하는 경향이 있다. 따라서, AE 신호의 주파수 특성으로 그루브 가공이 비정상적으로 진행되고 있는지의 여부를 확인할 수 있다.

3.3 AE 신호의 RMS 값을 통한 가공특성 평가

Fig. 7 은 가공깊이에 따른 RMS (Root Mean Square) 값을 나타낸 것이다. 가공깊이가 증가함에 따라 RMS 값이 상승하는 현상을 보였다.

AE RMS 신호가 미세 그루브 가공시의 정상적인 특징을 잘 반영하고 있으며, 블레이드를 이용한 미세 그루브 가공이 일반적인 연삭가공의 메커니즘을 반영하고 있다는 것을 알 수 있다.⁴

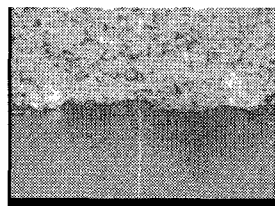
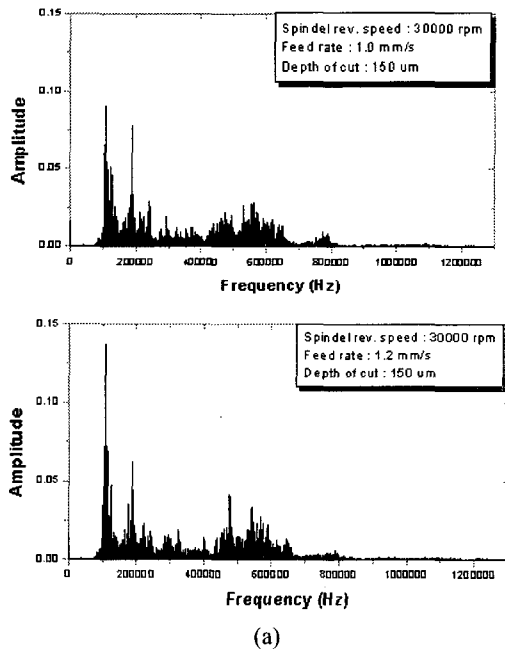


Fig. 6 (a) Frequency spectrum of AE signals on abnormal processing. (b) Micrographs of groove shape on abnormal processing.

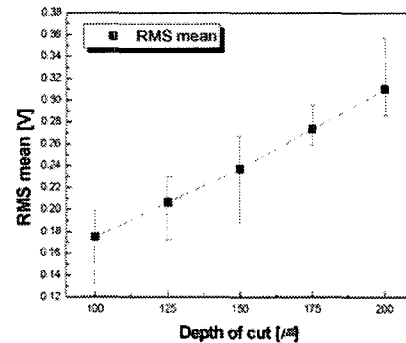


Fig. 7 AE RMS values according to depth of cut. (Spindle rev. speed : 27,500 ~ 40,000 rpm, Feed rate : 0.6 mm/s)

4. 퍼지 클러스터링

일반적으로, 공구의 상태감시를 위한 두개의 퍼지 클러스터링 기법이 있다. 그 중 하나는 데이터의 패턴에 대하여 퍼지관계에 근간을 둔 방법이고, 다른 하나는 퍼지 c-means 알고리즘이다.⁵ 클러스터링 기법의 목적은 주어진 자료 집합을 유사

한 클러스터로 나누는 것이다. 여기서 유사하다는 것은 그들간의 특징에 대한 벡터 공간 상에서 같은 그룹내 모든 점들이 서로 근접하고 다른 그룹의 점들과 멀리 떨어져 있다는 것을 의미한다.⁶

본 연구에서는 퍼지 c-means 알고리즘으로 그루브 가공시의 AE 파라미터 중에 신호의 주파수 특성과 RMS 값을 채택하여 특징을 추출한 다음, 가공이 안정적으로 진행되고 있는지의 여부를 판별하였다.

4.1 퍼지 c-means 알고리즘

n 개의 자료들 x_1, x_2, \dots, x_n 이 있다고 하고 이 데이터들의 집합을 X 라 한다.

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x_j \in R^d \quad (1)$$

이것을 c 개의 클러스터 ($2 \leq c \leq n$)로 분할하는 경우, x_j 가 k 번째 클러스터에 속하는 정도를 u_{kj} 로 한다.

U 는 각 데이터에 대해 각 클러스터로 분할하는 행렬로서, u_{kj} 를 요소로 하는 $c \times n$ 행렬이고 이를 구하는 방법 중 하나가 퍼지 c-means 알고리즘이다. 한편, R^d 는 특징공간이고 $x_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kd})$ 는 특징벡터이다. C-means 알고리즘으로 최적의 U 를 구하기 위하여 아래와 같은 함수를 목적함수로 한다.

$$J_m(U, v) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^c (u_{kj})^m \|x_j - v_k\|^2, 1 \leq m \leq \infty \quad (2)$$

여기서 v_k 는 k 번째의 클러스터의 중심으로서 d 차원이고 통상적으로 $m=2$ 이다. 위의 제곱 오차를 최소화 하는 u_{kj} 와 v_k 는 $m > 1$ 에 대하여 다음 조건을 만족한다.

$$u_{kj} = \frac{1}{\sum_{g=1}^c \left(\frac{\|x_j - v_k\|}{\|x_j - v_g\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \forall j, k \quad (3)$$

$$v_k = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{kj})^m \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n (u_{kj})^m}, \forall k \quad (4)$$

경우에 따라 c 값이 모호할 수 있으나, 어떤 값이 물리적인 의미를 가지고 있는 것인지를 정하여야 한다. 또한, U 의 초기설정이 변하면 최종치도 변하게 되므로 좋은 결과를 위한 초기치의 선택도 중요하다.

위와 같은 방법은 드릴링 공정에서 공구의 마멸을 감시하는데 적용한 실례가 있고, 그 결과, 퍼지 c-means 알고리즘이 기존의 클러스터링 알고리즘에 비하여 보다 직접적이고 쉽게 물리적인 과정을 나타낸다는 것이 증명되었다.⁷

4.2 AE 신호의 특징 추출 (feature extraction)

실험결과에서 살펴본 바와 같이 정상적인 가공상태와 비정상적인 가공상태의 주파수 특성은 서로 다른 형태를 보이고 있으며, RMS 값은 절삭에 필요한 에너지를 잘 반영하고 있다. 따라서, AE 신호의 주파수 특성과 RMS 를 특징으로 채택하고 추출하여 아래와 같은 데이터 집합을 획득하였다.

그루브 가공의 상태를 판별하기 위한 AE 신호에서 추출된 특징은 아래에 열거한 바와 같다.

- n_1 : 신호의 RMS
- n_2 : 80~100kHz 주파수 대역 신호의 RMS
- n_3 : 100~120kHz 주파수 대역 신호의 RMS (중략)
- n_{12} : 280~300kHz 주파수 대역 신호의 RMS
- n_{13} : 80~100kHz 주파수 대역 신호의 최대진폭
- n_{14} : 100~120kHz 주파수 대역 신호의 최대진폭 (중략)
- n_{23} : 280~300kHz 주파수 대역 신호의 최대진폭

위에서 열거한 특징들중에 가공상태를 가장 잘 나타내주는 특징은 다음과 같다.

- n_1 : 신호의 RMS
- n_3 : 100~120kHz 주파수 대역 신호의 RMS $\div n_1$
- n_7 : 180~200kHz 주파수 대역 신호의 RMS $\div n_1$
- n_8 : 200~220kHz 주파수 대역 신호의 RMS $\div n_1$

- n_{14} : 100~120kHz 주파수 대역 신호의 최대진폭 $\div n_1$
- n_{18} : 180~200kHz 주파수 대역 신호의 최대진폭 $\div n_1$
- n_{19} : 200~220kHz 주파수 대역 신호의 최대진폭 $\div n_1$

위에서 열거한 $n_1, n_3, n_7, n_8, n_{14}, n_{18}, n_{19}$ 을 $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7$ 이라 정의하고, 특징 집합 ($q_1 \sim q_7$) 에서 클러스터 센터를 식(3)과 식(4)를 이용하여 계산하였다. ($m=2$)

4.3 가공상태 판별

c 값은 필요에 따라 물리적 메커니즘을 반영할 수 있도록 정하여야 하므로, 본 연구에서는 정상적인 그루브 가공이 진행되고 있는 경우와, 그렇지 않은 경우의 두가지로 분류하였다. 실험시, 센서는 공작물에 부착되었고 실험도중에 심각한 공구의 마멸이나 파손등이 발생하지 않았으나, 가공조건등에 따라, Fig. 2 의 가공결과를 나타내는 정상적인 가공이 진행되고 있을때와 Fig. 6(b)의 가공결과를 나타내는 비정상적인 가공이 진행되고 있을 때로 가공결과가 다르게 도출되었다. 따라서, 정상적인 가공상태와 비정상적인 가공상태의 두가지 상태로 분류하는 것은 타당하다. 이 때 정상적인 가공상태를 A, 비정상적인 가공상태를 B 라고 정의한다.

총 171 개의 데이터들을 서로 다른 가공조건하에서 선택하였으며, 계산된 클러스터 센터는 Table. 2 에 나타낸 것과 같다.

Table 2 Cluster centers of training features.

구 분	A	B
q_1	0.2541	0.5014
q_2	4.356e-4	4.541e-4
q_3	1.404e-4	2.088e-4
q_4	8.194e-5	9.423e-5
q_5	0.0037	0.0036
q_6	0.0012	0.0018
q_7	6.243e-4	6.290e-4

Table 2 와 같이 가공상태의 판별을 위한 데이터들의 클러스터 센터를 계산하고, 정상적인 가공

상태를 나타내는 클러스터 A 에 속하는 정도를 가공조건에 따라 각각의 데이터에 대하여 살펴보면, CBN 블레이드로 STD11 에 미세 그루브 가공시 적합한 가공조건을 찾을 수 있다.

Fig. 8 은 가공조건에 따른 각 데이터들의 클러스터 A 에 속하는 정도를 그림으로 표현한 것이다.

Fig. 8 을 살펴보면 30,000~35,000 rpm 의 주축 회전속도와 0.5~0.6 mm/s 의 이송속도와 200 μ m 이하의 가공깊이에서 정상적인 가공상태를 나타내고 있다. 35,000 rpm 이상의 회전속도에서도 정상적인 가공상태를 나타내고 있지만, 35,000 rpm 이상의 회전속도에서는 가공 시스템의 스피들에 과도한 부하가 걸려, 그에 따른 소음과 시스템이 불안정한 경우가 발생할 가능성이 있다.

따라서, 실험결과에서 살펴본 AE 신호의 주파수 특성과 RMS 로 가공상태의 판별이 가능하였다.

5. 결론

본 연구에서는 난삭재로 알려져 있는 금형강인 STD11 을 두께 약 50 μ m인 블레이드로 미세 그루브를 가공함에 있어서, 각 가공조건에 따른 AE 신호를 검출하여 주파수 분석과 가공결과와의 현미경 관찰을 통하여 가공특성을 평가하였다.

CBN 블레이드로 30,000~35,000 rpm 의 스피들 회전속도와 200 μ m이하의 가공깊이, 0.6mm/s 이하의 공구 이송속도의 가공조건일 때가, 버의 크기 및 공작물의 크랙 발생여부를 현미경으로 관찰함으로써, 적합한 가공조건임을 입증할 수 있었다.

또, 각 가공조건에서 AE 신호를 검출하여 주파수 분석을 한 결과, 정상적인 그루브 가공이 진행되고 있을 때에는 가공조건과 관계없이 모두 100kHz 안팎과 400 ~ 600kHz 의 주파수 대역에서 큰 진폭을 가지는 특성을 나타내었지만, 공구나 공작물의 파손 및 크랙의 발생시에는 정상적으로 가공이 진행되었을 때와 다르게 200kHz 안팎의 주파수 대역에서 큰 진폭을 가지는 주파수 특성을 나타내었다.

신호의 주파수 특성에서 가공상태와 직접적인 관련이 있는 특징을 추출하고, 데이터의 패턴인식 알고리즘의 한 방법인 퍼지 c-means 알고리즘으로 각 가공조건에 대한 가공상태를 판별하였다.

따라서 AE 신호로 미세 그루브 가공시에 나타나는 버의 과도발생, 공구의 마멸이나 파손으로

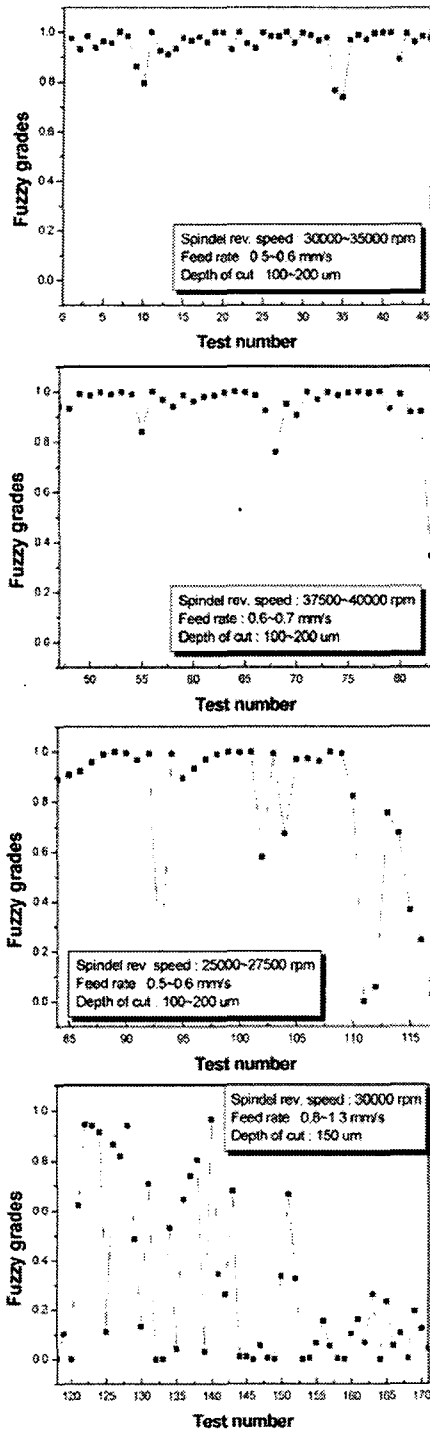


Fig. 8 Grades of membership for different machining state.

인한 공작물의 파손 등을 감지할 수 있다.

참고문헌

1. Li, Xiaoli, "A brief review : acoustic emission method for tool wear monitoring during turning," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp. 157-165, 2002.
2. Lim, H.S., Ahn, J.H., "A study on the cutting conditions of self-induced chattering in micro shaping with diamond tool," Journal of the KSPE, Vol. 15, No. 3, pp. 141-149, 1998.
3. Dornfeld, D., Cai, H.G., "An investigation of grinding of wheel loading using acoustic emission," Trans. ASME, Vol.106, pp. 28-33, 1984.
4. Malkin, S., " Grinding Mechanisms," Grinding Technology, pp. 107-142, 1988.
5. Li, Xiaoli, Yuan, Zhejun, "Tool wear monitoring with wavelet packet transform-fuzz clustering method," WEAR, pp. 145-154, 1998.
6. Lee, K.H., Oh, K.L., "Fuzzy theory and application II," Hong-reung, pp. 7-19 - 7-23, 1992.
7. Li, P.G., Wu, S.M., "Monitoring drill wear states using a fuzzy pattern recognition technique," Trans. ASME, J. Eng. Ind. 110 (2), pp. 297-300, 1988.