

순동선삭가공에서 AE 신호를 이용한 칩 형상 제어

오정규^a, 김평호^b, 구준영^c, 김덕환^d, 김정석^{e*}

Chip Shape Control using AE Signal in Pure Copper Turning

Jeong Kyu Oh^a, Pyeong Ho Kim^b, Joon Young Koo^c, Duck Whan Kim^d, Jeong Suk Kim^{e*}^a School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ., Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Republic of Korea^b Daegu Mechatronics & Materials Institute, 32, Seongseogongdan-ro 11-gil, Dalseo-gu, Daegu, 704-240, Republic of Korea^c School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ., Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Republic of Korea^d Automotive Parts Institute Center, 35, Maegoksaneop-ro, Buk-gu, Ulsan, 683-420, Republic of Korea^e School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National Univ., Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 April 2014

Revised 27 May 2014

Accepted 24 June 2014

Keywords:

Continuous chip

Acoustic emission

Discrete wavelet transformed signal

Chip control

Fuzzy pattern

ABSTRACT

The continuous chip generated in cutting process deteriorates workpiece, tool, and machine tool system. It is necessary to treat this continuous chip in ductile material machining condition for stable cutting. This paper deals with the chip control method using acoustic emission(AE) signal in pure copper turning operation. AE raw signals, root mean square(RMS) signals and wavelet transformed signals measured in turning process are introduced to analysis for chip patterns. With analysis of AE signals, it is obtained that the produced chip patterns are correlated with the specified AE signals which are transformed by fuzzy pattern algorithm. By this experimental investigation, the chip patterns can be classified at significant level in pure copper machining process and controlled from continuous chips to reduced-length stable chips

1. 서론

다품종 소량생산 시스템을 효율적으로 운용하기 위해서는 공작 기계를 유기적으로 결합하고, 이를 위하여 생산공정이 자동화와 유연화(Flexible manufacturing system) 되어야 한다. 이를 달성하기 위해서는 공작기계 가공 중 발생하는 이상상태를 실시간으로 감지하고 문제를 판단 할 수 있어야 하나, 소재의 기계적 특성이나 절삭 조건과 같은 다양한 인자들의 영향으로 칩 형상을 예측하는 것이 쉽지 않을 뿐만 아니라 예측을 하더라도 공구의 마멸 상태에 따라 칩의 상태가 달라지기 때문에 정확한 예측은 불가능하다고 볼 수 있다¹⁻³⁾.

특히 전기 취급 부품 소재의 주류를 이끄는 순동의 경우 기계적 특성이 과도한 연성을 띄고 있고, 연속형 칩이 발생하는 가공영역이 매우 넓기 때문에 가공시 과도한 연속형 칩이 발생한다. 또한, 이때 생성되는 고열의 연속형 칩은 작업자의 안전을 위협하고 표면 정밀도 저하는 물론 가공 중 트러블의 발생으로 피삭재, 공구 등 기계시스템 전반에 손상을 줄 수 있을 뿐만 아니라 생산스케줄에 장애가 발생되어 생산능률 저하 등의 어려움이 발생할 수 있다. 이와 같이 절삭가공 중 칩 처리는 능률 향상을 위한 필수 요소로서 적절한 크기로 제어하는 것이 중요하다⁴⁻⁵⁾.

많은 연구자들에 의해 칩 형상 예측에 관한 연구가 이루어져 기본적인 메커니즘과 가공환경 및 절삭특성에 따른 인과율이 상당부

* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-3079

Fax: +82-51-518-7207

E-mail address: juskim@pusan.ac.kr (Jeong Suk Kim).

분 규명되었고, 이 결과를 토대로 칩 브레이커 형상을 갖는 공구가 개발되어 활용되고 있으나, 다양한 절삭공정에 적용하여 효율적인 활용은 미진한 상태이고 가공공정에 적용되는 예는 제한적이다. 또한, 피삭재와 공구의 기계적 특성이나 절삭 조건에 따라 칩의 유출 상태가 달라지고 특히 연성이 높은 순동의 경우 칩 브레이커의 역할도 미미하여 본 가공공정에는 효과가 없는 실정이다⁶⁾.

이러한 문제를 해결하기 위하여 칩의 형태를 감지하는 연구가 선행 연구자들에 의하여 수행되어 왔고 그 중에서도 특히 측정이 용이하고 민감도가 뛰어나 기계장치의 감시와 절삭상태 감시 등 다양한 분야에서 AE(Acoustic emission) 측정법이 활용되고 있다. 또한, Inasaki와 Dornfeld 등 여러 연구자들에 의하여 AE 신호를 이용한 칩 형태 감지 연구가 활발히 진행되고 있는 것으로 보아 절삭가공시 소성변형을 비롯한 절삭특성을 타나내는데 유용하게 적용 할 수 있음을 알 수 있다⁷⁻¹¹⁾.

그러나 가공공정 중 효과적으로 대처하는 시스템적인 제어기술은 아직 체계적으로 확립되어 있지 않아 그에 대한 관심이 날로 증가하고 있는 실정으로, 기존연구에 제어방법 중 하나인 퍼지제어(Fuzzy control)기법을 추가하여 본 연구에서는 절삭가공시 발생하는 AE 주파수 신호 분석을 통해 연속형과 돌발형 신호의 특성을 파악하고 서보모터를 이용한 오버라이드 시스템을 개발하여 칩의 상태를 자동으로 제어하는 이송제어장치를 개발하는 것을 목표로 하였다.

2. AE 신호획득 및 처리

2.1 AE 센서의 적용

AE 신호는 절삭이 진행될 때 소재내부의 에너지가 급속히 해방되어 발생하는 탄성파(Elastic wave)로서 전단면의 절삭특성을 나타내고 매질을 통하여 AE 센서로 측정 할 수 있다. 측정된 신호는 AE 센서 특성에 따라 연속형 신호와 돌발형 신호로 구분되어 칩 분절시는 크랙 성장에 의한 탄성파 방출로 돌발형 신호가

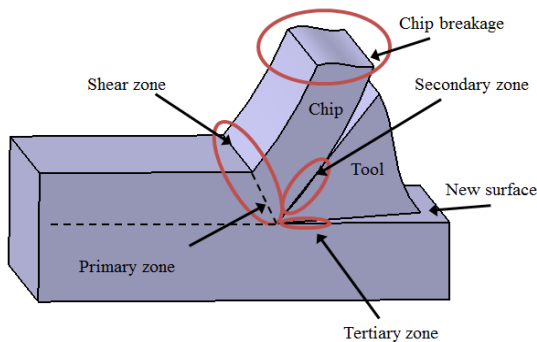


Fig. 1 Sources of acoustic emission signals

발생하고 이 발생원인의 차이를 이용하여 측정 신호의 분석을 통해 칩 형상을 분류 하였다. Fig. 1은 절삭공정시 AE 신호의 발생 원으로 Primary, Secondary, Tertiary zone 순으로 영역을 나타내고 있다.

또한, 가청역 주파수 범위에 비해 AE 주파수 범위는 소재의 기계적 특성이나 변형, 결합에 따라 수십 Hz에서 수십 MHz까지 이르고 소재의 변형과정에 따라 신호 주파수의 특징이 다르게 나타나기 때문에 상태 변화에 따른 진단이 가능하다.

2.2 신호처리

공작기계의 작동시 발생하는 소음과 같은 외란 요인 등은 데이터 분석에 큰 영향을 미치므로 신호처리를 이용한 분석을 통해 데이터를 해석하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 AE 신호를 RMS 연산 후 이동평균(Moving average) 필터링한 신호와 이산 웨이블릿 변환(Discrete wavelet transform)한 신호를 이용하여 AE 신호를 처리하였다.

먼저, RMS 연산은 AE 신호함수 $f(t)$ 로 다음과 같이 자승평균하여 구할 수 있으며, 칩 분절시 충격으로 인하여 여러개의 피크신호가 발생할 수 있으므로 RMS 연산된 신호를 필터링 하기 위해 이동평균법을 적용하였다.

$$RMS = \left(\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} f(t)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서: $f(t)$ 는 신호 함수,

ΔT 는 주기 함수를 나타낸다.

또한, AE 신호 특성상 외란에 민감한 영향을 받으므로 이를 적절히 분석할 수 있는 처리 방법이 필요하다. 이산 웨이블릿은 높은 분해능과 다양한 주파수 대역의 신호를 처리할 수 있는 다중해상도 시스템으로, 에너지가 집중되어 있는 파형이나 비정형 신호 분석에 사용되며 이산 웨이블릿 변환은 근사치 계수 $W_\phi[j_0, k]$ 와 상세 계수 $W_\psi[j, k]$ 에 기반을 두어 다음과 같이 나타낼 수 있다¹²⁻¹³⁾.

$$W_\phi[j_0, k] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n x[n] \phi_{j_0, k}[n]$$

$$W_\psi[j, k] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n x[n] \psi_{j, k}[n] \quad j \geq j_0 \quad (2)$$

여기서: $x[n]$ 은 AE 입력 신호

j 는 레벨

M 은 변환된 샘플 수를 나타낸다.

또한 $\phi_{j, k}[n]$ 과 $\psi_{j, k}[n]$ 은 기저 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

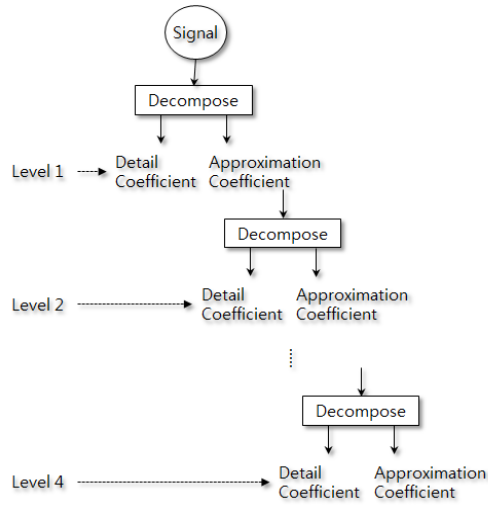


Fig. 2 Discrete wavelet transform chart

$$\phi_{j,k}[n] = 2^{j/2} \phi[2^j n - k] \quad (3)$$

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{j/2} \psi[2^j n - k] \quad (4)$$

여기서: $\phi[n]$ 은 스케일링 함수

$\psi[n]$ 은 웨이블릿 함수를 나타낸다.

Fig. 2는 신호분해 과정을 도식화 한 것으로, 다중해상도 분석을 통하여 본 논문에서는 레벨 4 웨이블릿 변환을 사용하였다. 분해과정에 있어서 로우패스 필터(Lowpass filter)는 저주파 경향의 신호를 남기므로 계수를 Approximation, 하이패스 필터(Highpass filter)는 고주파 성분만 통과 시키므로 계수를 Detail로 나타내었다.

3. 실험방법 및 분석

3.1 실험방법

본 절삭가공에서 사용된 피삭재는 전기전도성이 크고 안정적인 특성을 갖는 순동(99.93%)금속으로 전기소자 부품 소재의 주류를 이루고 있으며, 높은 연성으로 인하여 절삭가공시 연속형 칩이 발생하는 특성이 있다. 또한, 절삭공정에 있어 일반적으로 동과 같은 연성 재료는 높은 이송과 낮은 절삭속도에서 칩 분절이 발생한다. 절입량이나 공구 형상과 같은 다양한 요인들에 의해 칩 유동형상이 달라질 수 있으나, 무리한 절삭 조건에 따른 공구 마멸 등으로 효율적이지 못하다.

특히, 공구 마멸에 영향을 미치는 미끄럼 속도(Sliding velocity)는 이송량의 증가에는 영향이 적은 반면 절삭속도에는 비례적으로 증가하므로, 이송 증가에 비해 공구 수명을 급격히 단축시킨다. 따

Table 1 Turning conditions

Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/rev)	Cutting speed (m/min)			
		125	132	139	145
1 (Radial)	0.05	1	1	1	1
	0.10	1	1	1	1
	0.15	1	1	1	1
	0.20	1	1	1	1
	0.25	1	1	1	1
	0.30	1	1	1	1
	0.35	1	1	1	1
	0.40	1	1	1	1
	0.45	0	1	1	1
	0.50	0	1	1	1
	0.55	0	0	0	1
	0.60	0	0	0	1

라서 공구 마멸을 최소화하기 위해 현장 가공조건을 고려하여 절입량은 반경방향 1mm로 고정하고 회전 속도당 이송량을 달리하여 단계 별로 적용하는 방법으로 Table 1과 같은 가공 실험 조건을 구성하였다.

3.2 실험장치

가공실험은 범용선반(광주남선)에서 인선반경 0.8R 절입각 90°를 가지는 코로이의 공구(DCGT11T308AK)를 이용하여 절삭실험을 수행하였다. AE 센서는 MISTRAS사의 Pico타입으로 주파수 범위는 200~750 kHz이다. 절삭가공시 발생하는 탄성과 에너지를 AE 센서로 측정하여 DAQ장치로 데이터를 획득하였으며, 프리앰프(Preamplifier)와 파워앰프(Power amplifier)를 거쳐 오실로스코프(Oscilloscope)에서 분석된 신호를 컴퓨터를 이용하여

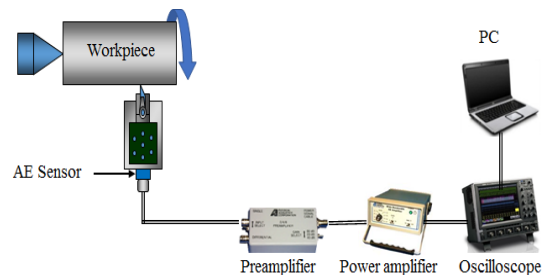


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

Table 2 Specification of equipments

AE Sensor	Pico type (200~750 MHz)
Preamplifier	20/40/60 dB gain
Power amplifier	3 steps, 41 dB gain
Oscilloscope	LeCroy 44XI-A (400 MHz)

처리하였다. Fig. 3는 실험장치 개략도이며, Table 2에서 실험에 사용된 장치의 규격을 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험결과

실험결과에 따르면 실험 조건에 따른 칩 형상은 이송에 따라 다르게 나타나며 Fig. 4와 같은 모양 특성을 보인다. 생성되는 칩 컬링에 따라 다소 차이가 있으나 이송이 낮은 영역에서는 칩 두께가 얇아 칩의 선단이 공작물이나 공구의 여유면과 닿아도 분절되지 않는 연속형 칩이 생성되고, 이송이 높아질수록 칩 면적이 두꺼워져 곡률반경도 증가함에 따라 여유면에 닿았을 때 칩 선단의 반력 증가로 분절형 칩이 생성된다.

칩의 분류는 공구와 소재 등 다양한 관점에 따라 분류할 수 있지만, 자동화 관점에서 고려해볼 때 영킴으로 인한 문제와 효과적인 칩 제거를 고려하여 길이에 따라 분류하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다²⁾. Fig. 5는 칩의 3가지 분류에 대한 상태를 나타낸 것으로, 본 연구에서는 이송에 따른 칩 형태를 다음과 같은 방법으로 분류

하였다.

이송에 따라 0.05~0.15 mm/rev에서는 불균일한 연속형 구간 (a) Continuous type, 0.20~0.35 mm/rev에서는 균일하고 일정한 구간 (b) Steady type, 마지막으로 0.40-0.60 mm/rev에서는 찢어지거나 타는 듯 불량한 칩 형태를 보이는 구간 (c) Unsteady type 등 실험 결과를 기준으로 3가지 형태로 분류하였으며, (b) Steady type 일 때 최적의 조건임을 알 수 있다.

4.2 신호의 특성 및 처리

Fig. 6은 가공시 발생하는 에너지를 AE 센서를 이용하여 측정된 신호를 보여준다. Fig. 6(a)는 Continuous type, Fig. 6(b)는 Steady type 칩 발생시의 신호를 나타낸 것으로 Fig. 6(a) 신호의 경우 칩 선단이 소재나 공구 여유면과 접촉시 발생하는 에너지도 돌발형 신호로 측정되어 칩 분절시 발생하는 돌발형 신호와 유사한 특성을 나타내고 있다. 이와 같이 AE 센서는 높은 감도와 주파수 대역 특성상 외란의 요소에 민감한 영향을 받으므로 이를 분석할 수 있는 적절한 신호처리 방법이 필요하게 된다.

따라서 외란의 감소와 정량적인 데이터 분석을 위하여 RMS 연

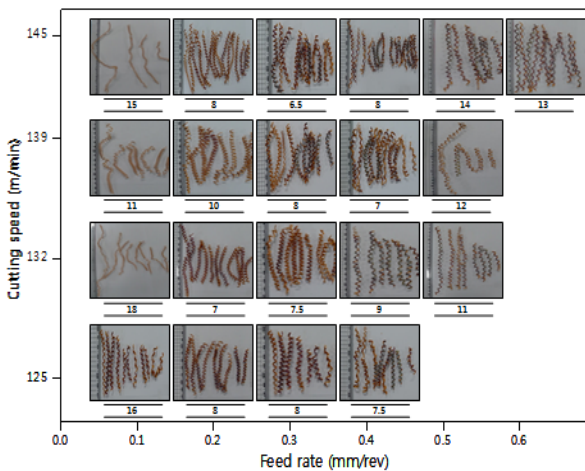


Fig. 4 Chip patterns depending on cutting condition

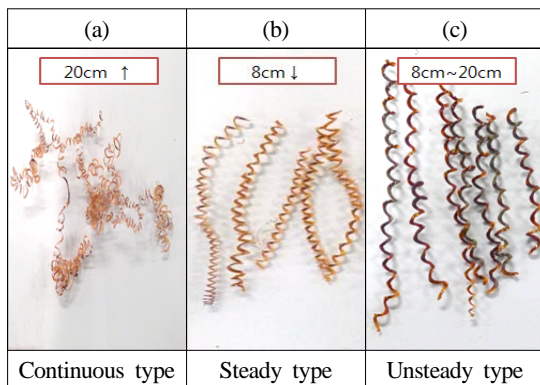
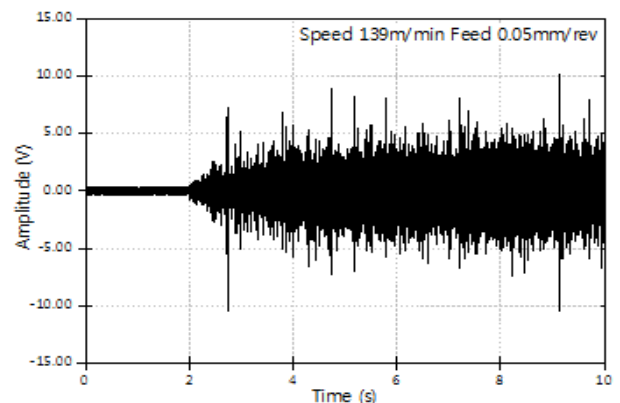
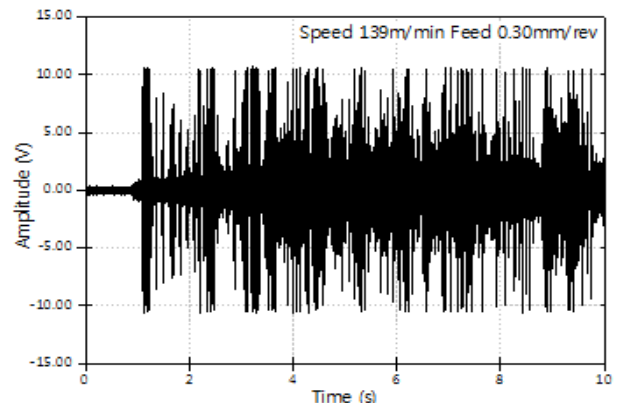


Fig. 5 Chip patterns



(a) continuous type chip signal



(b) Steady type chip signal

Fig. 6 AE raw signal

산과 잡음이 내포된 신호 및 급변하는 데이터 분석에 탁월한 이산 웨이블릿 변환법을 사용하여 가공시 칩이 발생하는 신호를 분석하였다. 칩은 측정 신호에 따라 Continuous type, Steady type, Unsteady type로 분류하였고 오차 범위를 줄이기 위해 두 개의 입력변수 중 최소값이 칩 형태의 주요 변수가 되도록 하였다.

Fig. 7는 AE RMS 연산과 이동평균 처리된 신호로 Fig. 7(a)는 Continuous type, Fig. 7(b)는 Steady type 칩 발생시의 신호를 나타내고 있다. 임계값 이상으로 측정되는 수치를 실시간 분석하여 칩 형상을 판별하는 변수로 사용된다.

Fig. 8은 이산 웨이블릿 변환 신호로 Fig. 8(a)는 Continuous type, Fig. 8(b)는 Steady type 칩 발생시의 신호를 나타내고 있다. AE 센서로 측정된 신호를 실시간 변환하여 임계값 이상에서 생성되는 피크 수에 따라 칩 형상을 판별하는 주요 변수로 사용되고 있다. AE 신호는 작은 외란에도 큰 변화를 보이므로 두 신호를 동시에 판별하여 확인하는 것이 칩 분류 방법으로 조금 더 효과적이었다. 또한, 칩 발생시의 AE 신호는 이송량 0.20~0.35(mm/rev)의 구간에서는 안정된 상태를 보였으며 0.40(mm/rev)이상에서는 증가하는 현상을 보였다.

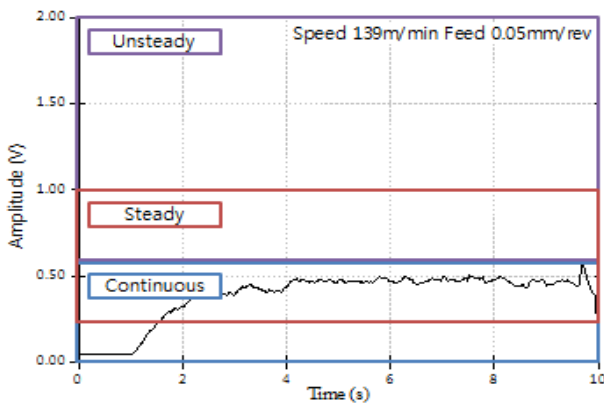
4.3 퍼지제어기 설계 및 PID제어 출력

퍼지 제어 시스템(Fuzzy control system)을 이용하여 감지 시스템을 제어하기 위해서는 적절한 파라미터 값이 필요하다. AE 센서를 이용하여 획득한 신호를 RMS 연산과 이산 웨이블릿(Wavelet) 신호로 변환하고 그 신호 값들에 대한 범위(Range)을 통해 두 입력 변수 AE_{RMS} 와 $AE_{Wavelet}$ 을 정의하였다. 또한, 센서를 통해 측정된 값들은 대부분 크리스프(Crisp)한 값을 가지기 때문에 입력변수로 사용하기 위해서는 퍼지 변수로 변환해야 한다.

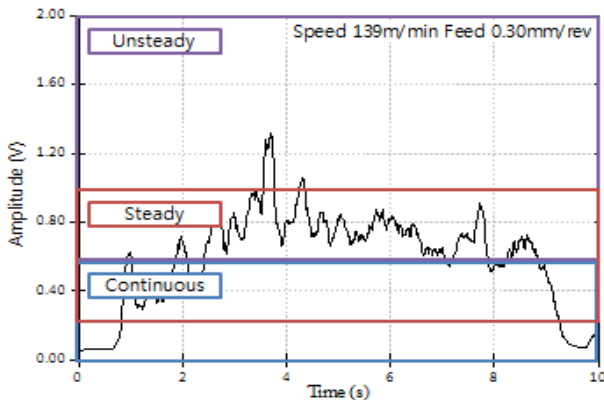
이를 위해 마다니(Mamdani) 추론법을 이용하여 두 개의 입력변수를 정의하였고 추론규칙은 'If-then' 형식을 사용하였다. 이를 활용하여 두 개의 입력변수와 하나의 출력변수를 갖는 시스템을 퍼지 규칙(Fuzzy rules)화 하여 언어적 형식으로 퍼지 시스템을 구성하면 다음과 같다.

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B, \text{ then } z \text{ is } C \quad (5)$$

여기서: A, B, C 퍼지 집합, x, y 전반부 변수, z 후반부 변수를 의미한다.

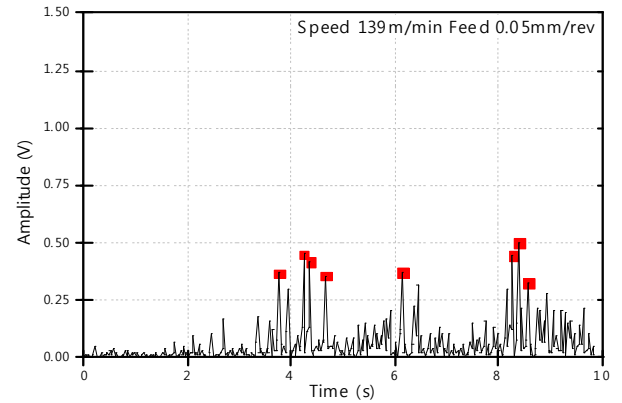


(a) continuous type chip signal

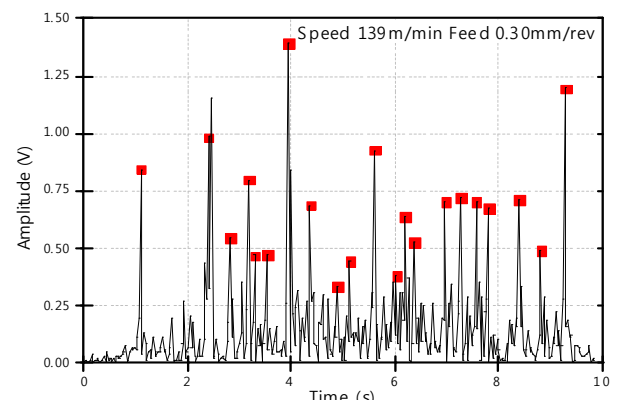


(b) Steady type chip signal

Fig. 7 AE RMS signal



(a) continuous type chip signal



(b) Steady type chip signal

Fig. 8 AE Wavelet transformed signal

두 입력변수 AE_{RMS} 와 $AE_{Wavelet}$ 는 전반부 입력 변수, z 는 칩 형태로 후반부 출력 변수를 나타낸다.

변수는 'and' 연산을 사용하여 두 개의 입력 변수 값 중 최소값을 선정하도록 규칙을 정의하였고, 이에 따른 값의 범위를 통하여 측정된 수치 중 최소값이 칩 형태를 나타내는 주요 변수가 되도록 하였다. 또한, 칩 형상은 비선형으로 명확한 예측이 어렵기 때문에 정확한 수치적 모델을 요구하지 않는 퍼지제어가 적합하다.

따라서, 두 입력변수 AE_{RMS} 와 $AE_{Wavelet}$ 을 기반으로 하는 소속함수(Membership function)를 이용하여 두 입력 신호값의 입력 범위에 따라 칩 길이를 Continuous, Steady, Unsteady로 정의하고 출력변수를 통하여 칩 분류 처리성에 따라 0-10사이의 값이 출력되도록 설계하였다.

Fig. 9는 AE RMS 연산과 이동평균된 입력 변수를 나타낸 것으로 칩이 분절될 시 RMS 연산값이 크게 나오는 것을 이용하여 소속함수를 작성한 것이다. 가공시 칩 배출이 Continuous type일 경우 0~0.55사이의 값이 발생하고, Steady type일 경우 0.25~1.0, Unsteady type일 경우 0.55~2까지 신호가 발생하는 것을 확인하여 정의하였다. 따라서 RMS값이 0.25~1.0 사이의 값이 출력되는 것을 목표로 하였다.

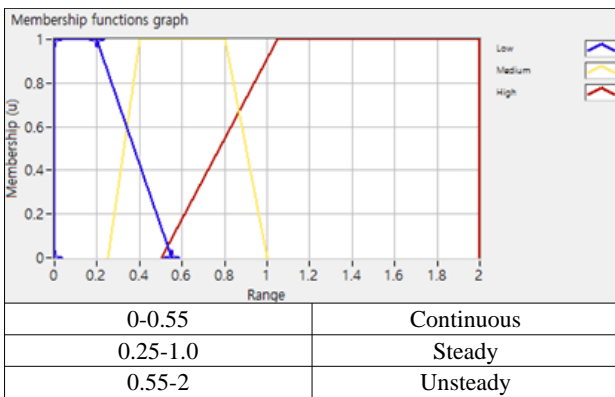


Fig. 9 Input AE RMS

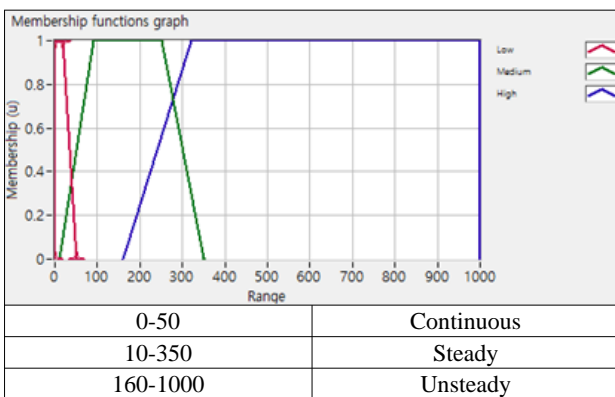


Fig. 10 Input AE Wavelet count

Fig. 10은 이산 웨이블릿 신호의 피크 카운터를 입력변수로 하는 소속함수를 나타낸 것으로, 가공시 실시간 순간적으로 발생하는 피크 수를 계산하여 칩 상태를 판별한다. 칩이 Continuous type일 경우 0~50개, Steady type일 경우 10~350개, 마지막으로 Unsteady type일 경우 160~1000개 사이의 피크가 발생하는 것을 확인하여 정의하였다. 이산 웨이블릿 신호의 피크 카운터 역시 10~350개 사이 값을 유지하여 Steady 상태를 목표로 하였고, RMS와 웨이블릿 피크 카운터 값이 다르게 나올 경우 두 신호의 입력 크기를 비교하여 최소값 이 입력변수로 적용되도록 하였다.

Fig. 11은 두 입력변수 AE_{RMS} 와 $AE_{Wavelet}$ 신호의 입력을 받는 출력에 대한 소속함수를 나타낸 것으로, 앞에서 언급한 퍼지 룰의 전건부, 후건부 규칙에 의하여 Continuous type일 경우 0-4, Steady일 경우 4-7, Unsteady일 경우 7-10 사이의 값이 출력되고 이들에 의해 칩 형상이 결정된다. 따라서, 이러한 과정의 결과로 출력값이 Continuous, Unsteady일 경우 PID 제어기의 파라미터를 자동 조절하도록 한다.

또한, Fig. 12은 퍼지적용 PID 오버라이드 알고리즘의 전체 구성도를 나타낸 것으로, 절삭가공시 발생하는 에너지를 AE 센서로 측정하고 후처리 과정을 통해 RMS 연산 후 이동평균 필터된 신호

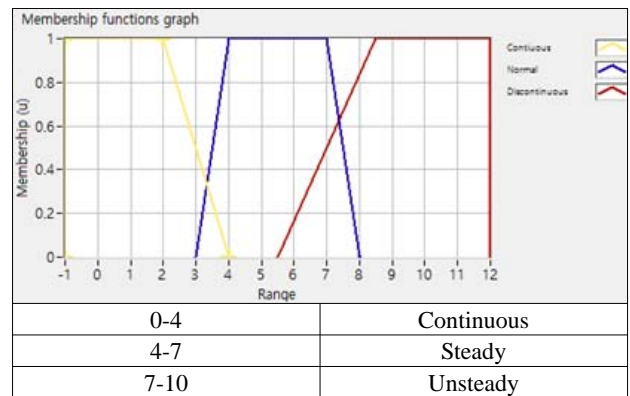


Fig. 11 Output chip type

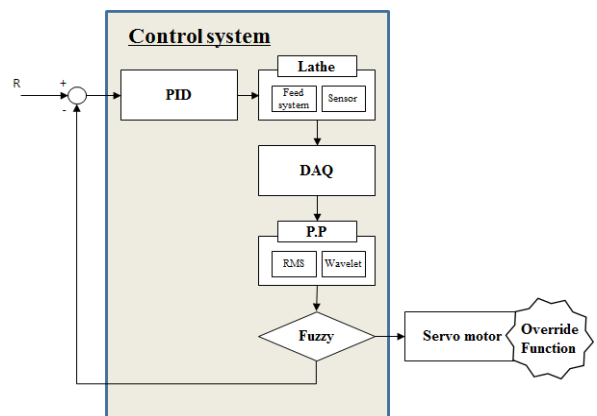


Fig. 12 Block diagram of fuzzy control system

와 이산 웨이블릿 변환된 신호를 퍼지제어 프로그램에 입력하여 제어된 출력된 신호에 의해 칩 형태를 판별하는 시스템을 나타낸 것이다.

이후, 퍼지제어기를 통하여 출력된 신호는 서보모터를 제어하는 PID제어기에 입력되어 퍼지 출력 신호에 따라 이송을 조절하여 절삭 상태에 따른 안정적인 가공을 위한 값으로 조절되는 실시간 자동이송제어 시스템으로 퍼지제어와 PID제어를 동시에 적용함으로써 넓은 영역에서 적용이 가능함을 기대할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 순동 소재의 절삭가공시 생성되는 칩 검출에 AE 신호를 이용하고 이를 제어하기 위한 방법으로 실험을 통해 축적된 결과를 퍼지 제어에 적용함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

절삭가공시 순동은 절삭속도보다 이송에 더 큰 영향을 보였고 이송 제어로 분절형 칩을 생성시킬 수 있었다. 절삭가공시 발생하는 AE신호를 분석하여 연속형 칩과 분절형 칩의 형태 판별이 가능함을 확인하였으나, AE신호의 원신호만으로는 급변하는 신호 처리에 어려움이 있어 이동평균 필터링한 RMS 신호와 이산 웨이블릿 변환된 신호를 퍼지화하여 절삭상태에 따른 AE신호로 칩 분류가 가능함을 확인하였다. 따라서, 추후 본 프로그램을 적용하여 제어 시스템을 구성한다면 실시간 이송제어 시스템이 가능할 것이다. 또한 본 연구에서 개발된 이송제어 프로그램에 향후 다양한 소재의 데이터를 구축한다면 공작기계의 무인화 시스템에도 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Chung, J. K., 1994, Prediction of Chip Formation Mechanism Using Acoustic Emission Signal in Lathe Turning, Hongik faculty journal 5 603-632.
- [2] Sim, G. J., 1995, A Study on the Prediction of the Chip Type by the Cutting Condition in Turning STS304, Master Thesis, Chonbuk National University, Republic of Korea.
- [3] Kim, H. G., Sim, J. H., 2007, Performance Evaluation of Chip Breaker Utilizing Neural Network, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers 16:3 64-74.
- [4] Lee, Y. M., Choi, W. S., 1999, Chip Breaking Prediction Using AE Signal, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers 8:4 61-67.
- [5] Noh, S. H., Lee, G. S., Park, U. H., Lim, Y. K., 2000, Cutting Force Control of a CNC Machine Using Fuzzy Theory, The Korean Society of Industrial Application 3:2 123-130.
- [6] Lee, S. J., Choi, M. S., Song, J. B., 1998, A study on the Prediction of the Form of Chip using Cutting Forces, Journal of the Korean Society for Precision Engineering 5:1 40-49.
- [7] Ichiro, I., 1998, Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes, Ultrasonics International 36:1-5 273-281.
- [8] Lee, D. E., Hwang, I., Valente, C. M. I., Oliveira, J. F. G., Dornfeld, D. A., 2006 Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission, International Journal of Machine Tools and Manufacture 46:2 176-188.
- [9] Dornfeld, D. A., Kannatey-Asibu, E., 1980, Acoustic emission during orthogonal metal cutting, International Journal of Mechanical Sciences 22:5 285-296.
- [10] Youn, J. W., Lee, S. W., Yang, M. Y., 1993, A Study on the Identification of Chip Form Using a Sensing Plate with AE Sensor, Journal of the Korean Society for Precision Engineering 5 300-304.
- [11] Jeong, T. G., 2012, Energy Distribution Characteristics of Nonstationary Acoustic Emission Burst Signal Using Time-Frequency Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 22:3 291-297.
- [12] Nasser, D., Kim, N. J., 2009, Digital Signal Processing System-Level Design Using LabVIEW, Hongriling Science Publishers, Republic of Korea.
- [13] Gwak, D. Y., 2011, LabVIEW Signal Processing and Biological Signals Measurement, Ohm Publication, Republic of Korea.