

# 알루미늄 선삭공정에서 발생하는 음향 신호 특성

## An Investigation of Acoustic Signal Characteristics in Turning of Aluminum

김 용 연\* · 이 창 희\*

Yong Yun Kim and Chang Hee Lee

(2007년 3월 16일 접수 ; 2007년 5월 7일 심사완료)

Key Words : Acoustic Signal(음향신호), Vibration(진동), Turning Process(선삭공정), Root Mean Square(실효 값), Frequency Spectrum(주파수 스펙트럼), Fast Fourier Transform(푸리에 변환), Bite Chattering(바이트 채터링)

### ABSTRACT

This paper reports on the research which investigates acoustic signals acquired in turning with rough and finish simultaneously. The material is aluminum thin pipe. Two acousto-ultrasonic sensors were set on the finish and the rough bite of the CNC machine. It was first evaluated that one source was affected by the other. It was found that two signals were little affected each other, and that the acoustic signal from the finish bite was more related to the surface defects. Signals from the finish bite only were then analyzed in order to observe several types of surface defects. Second the fundamental experiments were accomplished to study the effects of machine vibration and material state. The signal characteristics due to surface defects were studied from the collected acoustic signals. The analysis was based on real time data, root mean squared average and frequency spectrum by fast fourier transform. As a result, the acoustic signals were made effects by machine condition, material structure. The acoustic signal from the finish bite was closely correlated with surface quality. Two types surface micro defects were then evaluated by the signal characteristics.

### 1. 서 론

최근 생산체제는 소품종 대량생산으로부터 다품종 소량생산으로 바뀌고 있는 추세이다. 과거의 대량생산 체제에서는 불량을 감소시키려는 노력보다는 빠른 생산시스템을 요구했던 반면 현재의 소량생산 체제에서는 제품의 완성도를 향상시키기 위한 시스템 구성에 관심을 가지게 되었다. 정밀 제품의 경우 가

공 치수의 정밀도가 일차적으로 요구되지만 광학제품의 경우 가공의 정밀도는 물론 표면결함의 유무도 품질에 큰 영향을 미친다. 대부분의 광학제품은 표면이 경면(鏡面)으로 이루어져 있어 가공표면의 결함은 제품의 기능을 좌우하게 된다. 레이저 프린터나 복사기 등에 사용되는 원통형 광전도체(organic photo conductor)는 원통표면에 레이저 빔을 조사하여 상을 형성하고 탄소입자를 부착하여 종이에 인쇄하는 광학부품이다. 광전도체의 표면 결함은 인쇄 품질을 떨어뜨리는 물론 더 높은 해상도를 구현하는데 어려움을 가져온다. 그러나 현재 생산현장에서의 표면결함은 가공 후 육안(肉眼) 검사 방법을 주로 채택하고 있다. 이 방법은 검사자의 주관적 판단에

\* 교신저자; 정희원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : yykim@cbnu.ac.kr

Tel : (043) 261-3353, Fax : (043) 263-2448

\* 충북대학교 대학원 정밀기계공학과

의존하게 되고 정형화된 품질관리 표준을 채택하기에 어려움이 있다.

최근 가공기계의 공구상태나 피삭재의 표면 상태를 검출하기 위해 음향신호 분석법이 많이 적용되고 있다. Lee와 Kim은 절삭력 신호를 이용한 경면생성 예측에 관한 연구를 통해 절삭력을 이용한 표면조도를 예측하였고<sup>(1,2)</sup>, Kwak과 Song은 음향신호를 이용하여 표면조도를 예측을 하였다<sup>(3)</sup>. 미세한 진동신호를 감지하기에 음향센서가 유리함을 이용하여 Kim은 압전소자를 이용한 음향센서를 제작하여 연마공정 감시 장치를 개발했다<sup>(4)</sup>. 또한 Kim은 엔드밀가공에서 절삭력과 음향신호의 관련성을 규명하였고<sup>(5)</sup>, Ertekin은 밀링가공에서 재료별로 가공환경의 변화에 따른 음향신호를 측정하였다<sup>(6)</sup>. Axinte은 음향신호를 통해 브로칭 가공의 가공표면 예측을 시도하였고<sup>(7)</sup>, Ganesan은 폴리싱 가공에 음향신호를 가공표면 측정에 이용함으로써 연삭가공을 비롯한 밀링가공, 브로칭가공, 정밀한 폴리싱 가공에도 음향신호를 적용할 수 있음을 제시하였다<sup>(8)</sup>. Kwak과 Ha는 음향신호 처리를 위한 신경회로망(neural network)이론을 도입하여 표면가공 상태를 진단하는 시도를 통해 새로운 신호처리 방법을 제시하였고<sup>(9,10)</sup>, Godin은 복합재료의 인장시험에서 음향방출 신호를 취득해 가공방법 뿐 아니라 재료의 특성에 따라서도 상태 예측이 가능함을 제시하였다<sup>(11)</sup>. Lee는 기어의 충격음에 대해 시간-주파수 분석을 통하여 기어의 이상을 진단하였다<sup>(12)</sup>.

이 논문에서는 광진도체의 원소재인 알루미늄 박막원통의 표면을 가공하는 선삭공정에서 발생하는 음향신호를 수집하여 분석하고 표면결함에 의한 결

함신호의 특성을 고찰하였다. 알루미늄 박막원통의 표면 결함은 결과적으로 인쇄에서 원치 않는 잔상을 발생시키거나 인쇄되어야 할 부분에 결손을 일으킬 수 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 선삭 표면 가공 장치

Fig. 1과 같이 박막원통은 알루미늄 관을 인발하여 박막원통을 성형하고 일정 길이로 절단하여 선삭공정을 통해 표면을 가공한다. 이후 표면 코팅 및 구동장치를 결합함으로써 광진도체를 완성한다. 표면결함이 발생하는 선삭공정은 Fig. 2에서와 같이 알

Table 1 Specification of sensor and oscilloscope

Acoustic sensor	Model	Digital wave B1025
	Freq. Range	1 kHz ~ 1.5 MHz
Digital oscilloscope	Model	Lecroy WaveSurfer424
	Sampling rate	5 ks/sec (each channel)
	Voltage range	±80 mV

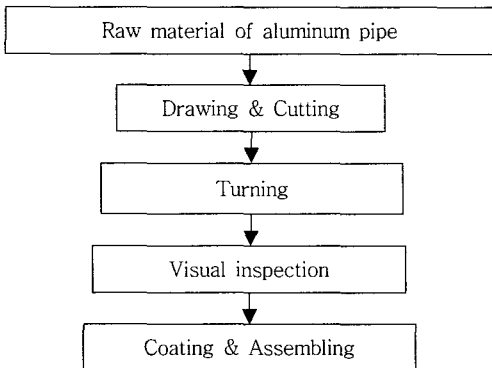
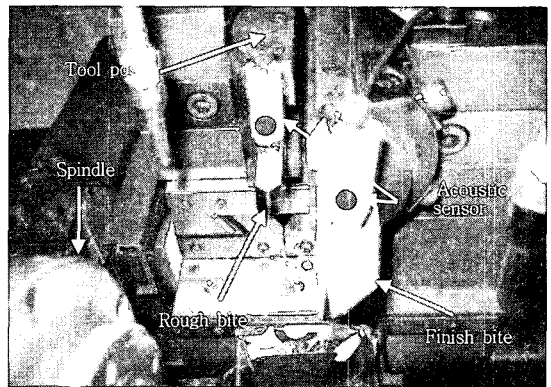
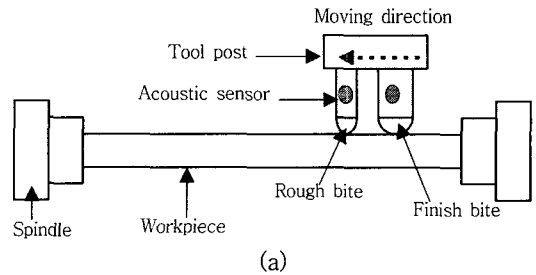


Fig. 1 Manufacturing process of OPC drum

Fig. 2 (a) simple diagram, (b) picture of acoustic signal collecting system

루미늄 박판원통을 스피들(spindle)에 부착된 내경 콜릿척(collet-chuck)으로 고정시켜 회전하고 황삭 바이트(rough bite)와 정삭바이트(finish bite)를 이송하여 원통표면을 경면 가공한다.

### 2.2 음향신호 분석 장치

음향신호는 표면가공과정에서 바이트와 피삭재의 상호작용에 의한 절삭과정에서 발생한다. 공구대에 20 mm간격으로 설치되어있는 황삭 바이트와 정삭 바이트가 이송되면서 황삭 가공과 정삭 가공이 동시에 진행된다. 따라서 절삭과정에서 발생하는 음향신호를 바이트에 부착된 음향센서로부터 수집하였다. Fig. 2는 황삭, 정삭 바이트와 각각에 부착된 음향센서의 위치를 보여주고 있다. 수집된 음향신호는 디지털 오실로스코프로 볼 수 있다. 측정에 사용된 음향센서와 디지털 오실로스코프의 성능은 Table 1에 요약하였다. 디지털 오실로스코프의 샘플링 데이터 수는 오실로스코프에 내장된 메모리에 의해 결정된다. 실험에 사용된 Lecroy Wave-Surfer 424는 최대 250 k 샘플을 버퍼에 저장할 수 있다. 그러나 데이터가 버퍼로부터 메모리에 저장되는 동안 발생한 데이터의 손실이 불가피하다. 그런데 결함은 극히 짧은 시간 동안에 발생하기 때문에 버퍼로부터 메모리에 저장되는 동안의 데이터의 손실이 발생하지 않도록 한 개의 원통을 가공하는 동안 발생한 데이터 양을 버퍼의 용량으로 설정하였다. 따라서 샘플링 레이트를 초당 5k로 하면 50초 동안에 발생한 데이터는 250 k가 되기 때문에 신호 데이터를 손실하지 않고 버퍼에 저장할 수 있다.

## 3. 음향신호 분석 결과

### 3.1 표면결함 고찰

피삭재의 재질은 알루미늄이고 0.7 mm 두께의 중공 박판원통으로 강성이 약하여 경면 가공이 어렵기 때문에 Fig. 3에서 보여준 것처럼 우레탄 재질의 중자(mandrel)를 알루미늄 파이프의 중공부에 삽입하여 가공을 한다. 알루미늄 박판원통의 가공표면을 확대하여 관찰하면 Fig. 4(a)처럼 규칙적인 줄무늬의 배열로 이루어져 있다. 규칙적 줄무늬는 바이트의 절삭경로로 바이트 이송 간격으로 나타난다. Fig. 4는 가공된 알루미늄 박판원통의 표면을 50배율로 확대한 현미경 사진이다. (a)는 정상적으로 가공된 알

루미늄 박판원통의 표면이고 (b)는 표면 결함이 있는 사진이고, (c)는 중자를 삽입하지 않고 가공할 경우 비늘 모양의 표면을 갖는 매우 거친 표면이다. Fig. 4(b)는 규칙적 배열의 줄무늬를 이루다가 중간 부분 이후에 불규칙적인 표면을 확인할 수 있다. 공구 채터링이 표면 결함을 발생시킨 대표적 예이고 육안으로 확인할 때도 얇은 띠 형태의 결함을 확인할 수 있었으며 이 부분의 표면조도도 정상표면에 비해 높게 나타난다. Fig. 4(c)는 중자를 삽입하지 않고 가공할 경우 진동과 소음이 발생하면서 가공된 비늘모양의 매우 거친 표면이다.

### 3.2 표면가공 음향신호

가공 중 발생하는 음향신호는 황삭 바이트에서 측정되는 신호, 정삭 바이트에서 측정되는 신호로

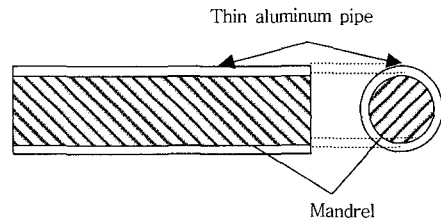


Fig. 3 Aluminum pipe and mandrel

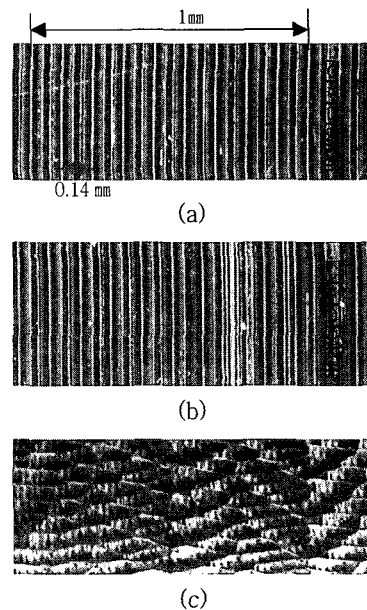


Fig. 4 (a) Normal surface (b) Surface defect (c) Surface without mandrel

구성된다. Fig. 5는 정상바이트에서 측정된 음향신호 (a)와 황삭 바이트에서 측정된 음향신호 (b)를 나타내고 있고, 공구대의 이송, 척에 의한 피삭재를 고정할 때 발생하는 신호, 스핀들의 회전 시작 신호, 그리고 선삭 공정에서 발생하는 신호를 포함하고 있다. 음향신호는 공구대의 이송신호를 시작으로 하고 공구대가 영점으로 움직이는 신호를 끝으로 측정이 종료된다. 공구대가 가공위치로 이송을 한 후 스핀들이 회전을 시작하여 가공회전수에 도달하면 스핀들 회전신호는 약해진다. Fig. 5에서 구간 ㉓는 스핀들의 가속신호와 가속 후 일정한 속도를 유지한 때의 신호를 보여주고 있고, ㉔구간에서 황삭 바이트의 가공만 진행되고 있다. 회전속도 4,000 rpm, 이송속도 0.14 mm/rev이기 때문에 황삭 바이트와 정상바이트의 거리는 20 mm로 2.144초가 된다. ㉕는 황삭 바이트와 정상 바이트가 동시에 가공을 하는 구간이고 ㉖는 황삭 바이트의 가공은 끝나고 정상바이트만 가공을 하는 구간이다. ㉗구간은 황, 정삭이 완료된 후의 신호이기 때문에 기계로부터 발생하는 신호로 해석할 수 있다. Fig. 5에서 구간 ㉘는 황삭 가공만 진행되는 구간이다. 정상 바이트로부터 수집된 신호는 황삭 가공으로부터 발생된 신호가 피삭재로 전달된 신호와 기계 소음으로 해석할 수 있다. 기계신호와 황삭 바이트에서 전달된 신호는 기계신호만 있는 ㉕구간 신호와 비교하면 큰 차이가 없기 때문에 황삭 공정에서 발생하는 신호는 정상 바이트에 거의 전달되지 않음을 알 수 있다. 즉, 정상 바이트로부터 수집된 신호는 정상 가공으로부터 발생된 신호로 해석할 수 있고 황삭으로부터 발생하는 신호에 거의 영향 받지 않음을 알 수 있다. 황삭 공정은 근사 치수로 거친 절삭을 하는 반면 정상 공정은 정밀 치수로 경면가공을 하게 된다. 따라서 다듬질 역할을 하는 정상 공정에 의해 가공 표면이 결정된다고 할 수 있다. 따라서 음향신호는 정상 바이트에 부착

된 음향센서로부터 수집하여 분석하였다.

(1) 정상표면의 음향신호 특성

정상바이트에서 수집된 음향신호는 실시간 신호, 푸리에 변환(FFT)에 의한 주파수 스펙트럼(frequency spectrum), 실효값(RMS)을 구하여 신호의 특성을 고찰하였다. 실시간 신호는 가공을 위한 준비 과정인 공구대의 이송신호와 스핀들의 구동신호를 포함한 가공으로부터 발생하는 음향신호이다. 진동수 분포 분석으로부터 표면 결함으로부터 발생하는 특성 주파수 영역과 바이트의 채터링을 고찰하였다. 여러 가지 표면 결함에 대한 상대적 진폭 변화를 고찰하기 위해 실효값을 구하였고, 실효값은 1초 단위로 초당 5,000개에 대해 계산되었다. Fig. 6은 정상 표면에 대한 신호이고, Fig. 5의 ㉕+㉖ 구간의 신호이다. (a)는 실시간 데이터, (b)는 실효값, (c)는 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

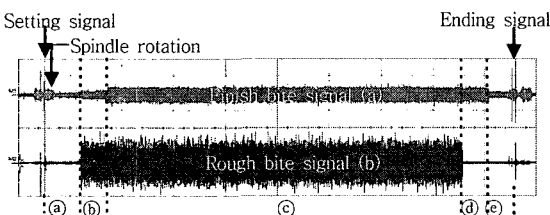
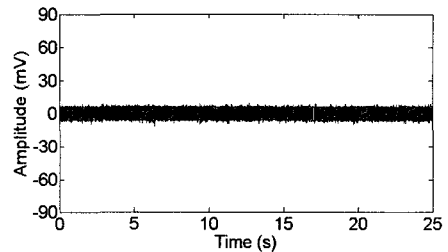
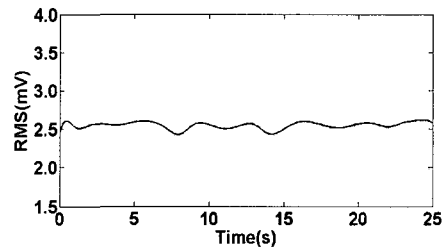


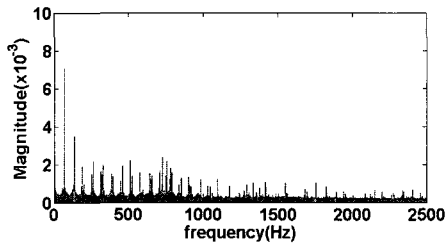
Fig. 5 Real time acoustic signal in turning



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Signal from good surface: (a) Real-time data, (b) RMS, (c) Frequency spectrum

(2) 중자없는 파이프의 음향신호 특성

중자는 우레탄 재질로 중공 알루미늄 원통의 강성을 보강해 주는 역할을 한다. 중자의 지름이 알루미늄 파이프의 내경에 비해 작을 경우는 강성을 보강하고자 하는 목적을 달성할 수 없게 되고 너무 꼭맞는 경우는 작업의 효율을 떨어뜨린다. 따라서 중자의 표면을 매끄럽게 하고 열변형이 적은 재질을 사용하고 있다. 중자의 반경방향 치수가 매우 작음을 가정하여 중자를 삽입하지 않고 가공을 하여 발생하는 현상을 관찰하였다. 중자제거 가공의 표면은 앞서 보았던 Fig. 4(c)와 같은 비늘모양의 무늬가 나타났고 가공 중 큰 소음이 발생하여 17초 부근까지 가공을 하고 중단하였다. Fig. 7은 중자를 삽입하지 않은 빈 파이프를 선삭할 때 발생하는 신호의 특성이다. 실시간 데이터와 RMS로부터 가공시작 5초 이후 음향신호의 진폭이 커지고 있음을 볼 수 있다. 가공 표면에서도 47 mm부근에서부터 비늘모양의

무늬가 관찰되었다. 선삭표면은 Fig. 4(c)와 같고 0.7 mm 두께의 원통형 파이프는 피삭재의 강성을 보강하기 위한 중자를 삽입하지 않을 경우 바이트의 진동과 소음이 심하여 선삭가공이 불가능함을 의미하고 신호의 특성은 Fig. 7로부터 관찰할 수 있다. Fig. 7(a)에서 약 17초 이후의 신호가 없는데 이는 진동과 소음이 심하여 기계의 손상을 우려하여 가공을 중단했기 때문이다.

(3) 기계진동에 의한 음향신호

가공 중 기계진동 및 외부의 진동은 가공 표면에 영향을 미친다. 특히 선반가공의 경우 스피들의 회전 불균형, 척의 고정상태 불량, 공구의 불안정한 고정상태 등에 많은 영향을 받는다. 스피들의 회전속도가 불안정한 선반에서의 신호특성을 고찰하였다. 실시간 데이터와 RMS에서 볼 수 있듯이 가공부의 전 영역에서 큰 진폭의 조화 파동을 확인할 수 있다. 이는 규칙적이고 전 영역에 걸쳐 나타난다. 특정

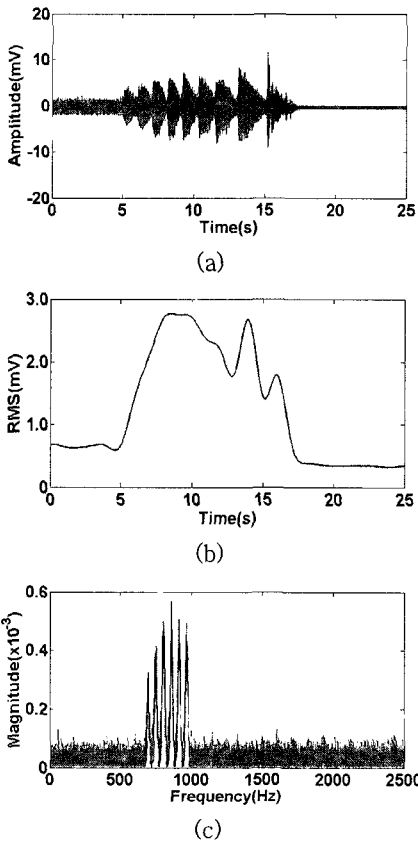


Fig. 7 Signal in turning without mandrel: (a) Real-time data, (b) RMS, (c) Frequency spectrum

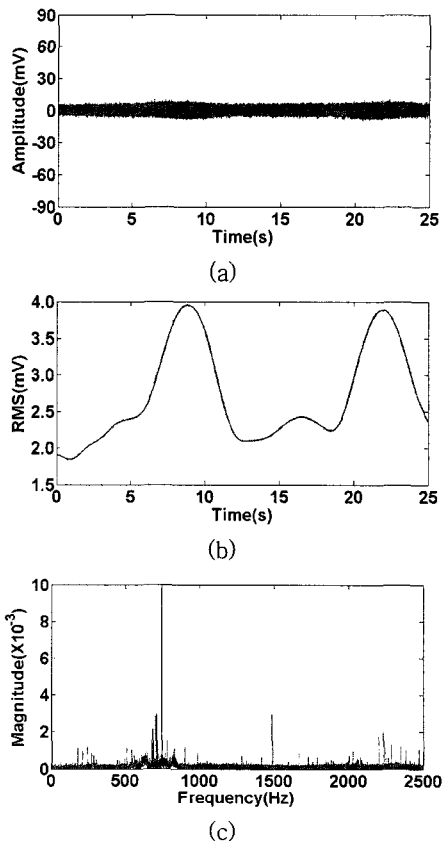


Fig. 8 Signal in the machine vibration: (a) Real-time data, (b) RMS, (c) Frequency spectrum

부분에 발생하는 결함 신호와는 별개로 일정한 유형을 나타냈다. 주파수 스펙트럼에서는 750 Hz, 1.5 kHz, 2.3 kHz의 등간격의 주파수 대역에서 진폭이 커짐을 확인할 수 있다. 동일조건외의 가공으로부터 Fig. 6은 신규장비로부터 얻은 신호이고 Fig. 8은 10년 이상 사용된 장비로부터 얻은 신호이다. 두 신호를 비교해보면 노후 장비로부터 얻은 신호 (Fig. 8)에서 이러한 현상을 보다 선명하게 확인할 수 있다. Fig. 8(a)을 보면 실시간 데이터로부터 공진 현상을 확인할 수 있고, Fig. 8(b) 실효치의 8초, 23초 부분에서 과도한 진폭 상승을 확인할 수 있다. 실효치는  $\Delta t$ 를 1 sec으로 하여 계산하였다. Fig. 8(c)의 주파수 스펙트럼으로부터 750 Hz, 1.5 kHz, 2.3 kHz 공진 주파수의 특성이 확대되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 장비의 특성으로 볼 수 있고, 마모에 의한 스프린들의 회전 불균형이 원인으로 생각된다. 이러한 실험 결과로 볼 때 음향신호를 이용하여 부분

의 미소 결함은 물론 기계 진동 등에 의한 영향도 검출 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

(4) 표면결함에 의한 음향신호 특성

음향신호는 공구의 절삭력과 비교할 수 있다. 공구의 채터링에 의해 절삭력의 변화가 크게 되면 공구와 피삭재 간에 일정한 전단력이 작용하지 않아 가공 면에 결함이 발생하게 된다. 따라서 피삭재의 전단에 의해 발생하는 음향신호는 변화가 생길 것이고 이를 측정함으로써 표면의 결함이 있음을 추정할 수 있다. Fig. 9는 실시간 신호로부터 결함을 감지하고 그 위치를 확인한 경우이다. 실시간 데이터와 실효값의 12초 부분에서 결함신호가 발생되었고 실제 정상 가공이 시작된 뒤 12초의 위치인 112 mm 부근에서 결함이 있음을 확인하였다. Fig. 9(c)의 주파수 스펙트럼은 정상상태의 주파수 스펙트럼(Fig. 6(c))과 비교하여 750 Hz 영역에서 주파수 특성을 나타내지만 진폭은 센서의 고정 상태에 따라 변화가 있기 때

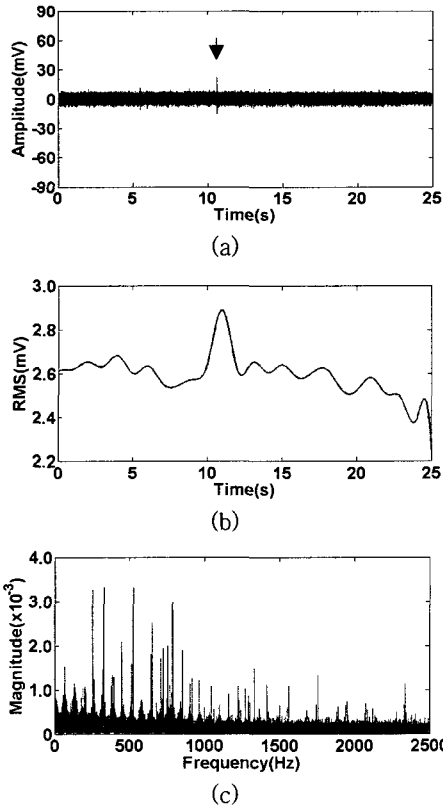


Fig. 9 Signal of visible defect by bite chattering : (a) Real-time data, (b) RMS, (c) Frequency spectrum

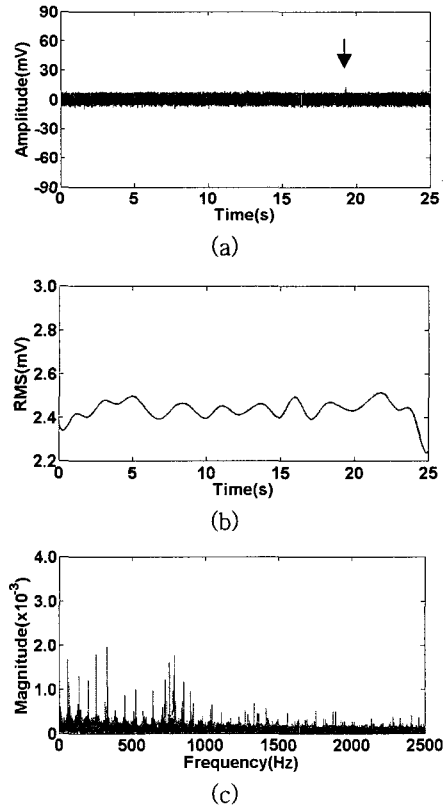


Fig. 10 Signal of invisible defect by bite chattering : (a) Real-time data, (b) RMS, (c) Frequency spectrum

문에 결함검출의 기준으로 적용하기는 어려움이 있었다. Fig. 10은 육안검사 과정에서 결함이 발견되지 않았지만 음향신호에서 결함신호를 발견해 재검사를 통해서 발견된 경우이다. 실시간 데이터 (a)와 실효치 (b)는  $\Delta t$ 를 1sec으로 하여 계산하였고, 19초 위치인 159 mm 부근에서 아주 미세한 결함을 발견했다. 실효치에서 25 sec 부근의 진폭이 작아지는 것은 황삭이 완료되고 정상만 진행되는 상태이기 때문이다. Fig. 9에 비하면 결함이 아주 미세하기 때문에 육안 검사에서 정상 표면으로 판정되었다. 그러나 알루미늄 박막원통의 코팅공정 이후에 이러한 미세 결함도 선명하게 나타날 수 있어 불량이 되기 쉽다. 실시간 데이터에서 비교적 검출이 용이했지만 실효값에서는 미세결함은 구분되지 않았다. 따라서 실효값보다 실시간 데이터가 결함 검출에 더 유용함을 알 수 있었다.

(5) 표면결함 검출

가공 표면의 결함을 검출하는 방법은 결함 유무를 판단하고 결함의 위치를 확인하기 위하여 실시간 데이터 변환하여 결함 검출 기준을 결정하였다. 파이프 1개의 선삭 공정에서 발생하는 실시간 데이터의 k번째 데이터를  $S_k$ 라고 하고, N개의 그룹으로 구분하여  $S_k$ 의 절댓값을  $A_{ij}$ 로 다음과 같이 정의하였다.

$$A_{ij} = |S_{(i-1)n+j}| \quad (1)$$

여기서 i는 그룹 번호이고 n은 그룹의 데이터 수, j는 i번째 그룹에서 j번째 데이터임을 의미한다. 각 그룹의 최대값은

$$A_{imax} = \max(A_{ij}) \quad (2)$$

으로 표현되고  $A_{imax}$ 의 최소값은  $A_{imin} = \min(A_{imax})$

으로 표현되고 그룹 최대값 평균은

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^N A_{imax}}{N} \quad (3)$$

으로 표현된다. 판별기준  $a$ 를

$$a = \bar{A} + (\bar{A} - A_{imin})Q_L \quad (4)$$

으로 정하였다. 여기서  $Q_L$ 은 품질관리계수이다.  $A_{imax} \geq a$  이면 i 샘플그룹에 속하는 부분에 표면 결

함의 발생을 의미하고  $A_{imax} < a$ 이면 정상 표면임을 의미한다. Figs. 6, 8, 9의 음향신호는 식 (2)에 의하여 Fig. 11과 같이 변환되고 식 (3)에서 품질관리계수  $Q_L$ 이 1, 1.5, 2일 경우 표면 결함을 의미하는 신호의 위치를 표시하였다.  $Q_L$ 이 작은 값일수록 고품질임을 의미한다. 가공 품질평가 결과는 Table 2와 같다. 따라서  $Q_L$ 은 품질 기준으로 적용될 수 있고  $Q_L$ 이 2.0일 때 육안 검사 결과와 근접하고 있다.

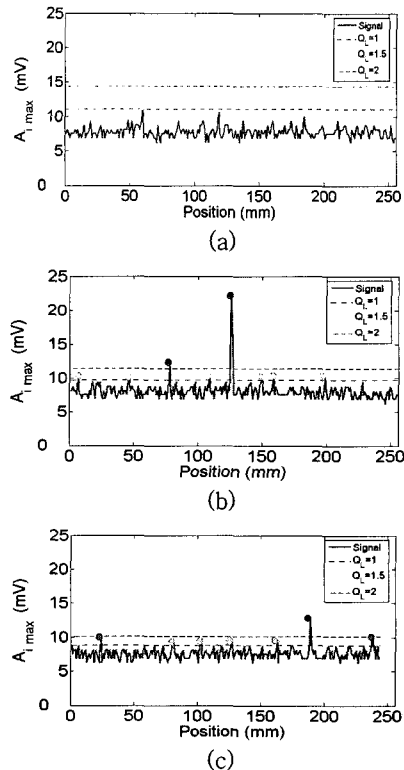


Fig. 11 Surface quality evaluation : (a) Good surface, (b) Visible defects (c) Invisible defects

Table 2 Surface defects evaluation

Case	$\bar{A}$ (mV)	QL	a(mV)	Number of defects
Good surface (Fig. 6)	7.7	1.0	11.0	1
		1.5	12.7	0
		2.0	14.4	0
Visible defects (Fig. 9)	8.0	1.0	9.7	8
		1.5	10.6	2
		2.0	11.4	2
Invisible defects (Fig. 10)	7.5	1.0	8.8	7
		1.5	9.5	3
		2.0	10.1	1

#### 4. 결 론

박판 두께의 알루미늄을 선삭 공정으로 발생하는 표면 결함을 검출하기 위해서 음향신호 처리 기술을 적용하였다. 정상 바이트로부터 수집된 신호는 황삭 공정에서 발생하는 신호로부터 독립성이 강함을 고찰 하였다. 정상 바이트로부터 수집된 신호를 분석함으로써 기계의 동적 상태와 바이트 채터링에 의한 표면 결함에 대한 신호의 특성을 고찰할 수 있었다. 실시간 신호 분석, 실효값과 주파수 스펙트럼을 고찰하였지만 실시간 신호분석이 표면 결함을 검출하는 데 효과적임을 알 수 있었다. 향후 음향신호 처리를 선삭공정에 적용하여 공구 상태를 감시하고 공구수명을 예측하는 데 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 표면 결함에 대한 음향신호 특성의 기준을 설정하고 프로그램화해서 음향신호 처리 장치에 삽입함으로써 현재 육안으로 하고 있는 검사 체계를 자동화 할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구 지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- (1) Lee, E. B. and Kim, J. D., 1993, "A Study on the Prediction of Mirror-like Surface Generation by Frequency Analysis of Cutting Force and Simulation", Journal of KSME, Vol. 17, No. 3, pp. 576~585.
- (2) Kim, J. D. and Lee E. B., 1993, "A Study on the Modeling of Tool Motion and High Accuracy Surface Generation by Use of Cutting Force Signal", Journal of KSME, Vol. 17, No. 8, pp. 1951~1962.
- (3) Kwak, J. S. and Song, J. B., 2000, "Estimation of the Ground Surface Roughness Applied by Acoustic Emission Signal", Journal of KSPE, Vol. 17, No. 4, pp. 240~246.
- (4) Kim, J. D., Kim, S. R., Kim H. Y. and Ahn J. H., 2001, "Development of Acoustic Emission Sensor Using Piezoelectric Elements and Monitoring System for Polishing Process", Journal of KSPE, pp. 560~565.
- (5) Kim, W. I. Wang, D. .H. and Kim, Y. S., 2002, "Behaviors of Cutting Force and Acoustic Emission in Different Helix Angle End Milling", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 15~22.
- (6) Ertekin, Y. M., Kwon, Y. G. and Tseng Tzu-Liang(Bill), 2003, "Identification of Common Sensory Features for the Control of CNC Milling Operations under Varying Cutting Conditions", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp. 897~904.
- (7) Dragos, A., Axinte, N. G., Kate, F. and Iker, U., 2004, "Process Monitoring to Assist the Workpiece Surface Quality in Machining", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 1091~1108.
- (8) Ganesan, R., Das, T. K., Sikder, A. K. and Kumar, A., 2003, "Wavelet-based Identification of Delamination Defect in CMP(Cu-Low k) Using Nonstationary Acoustic Emission Signal", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 16, No. 4, pp. 677~685.
- (9) Kwak, J. S. and Ha, M. K., 2002, "Intelligent Diagnosis of Grinding State Using AE and Power Signals", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 60~67.
- (10) Kwak, J. S. and Ha, M. K., 2004, "Neural Network Approach for Diagnosis of Grinding Operation by Acoustic Emission and Power Signals", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 147, pp. 65~71.
- (11) Godin, N., Huguet, S., Gaertner, R. and Salmon, L., 2004, "Clustering of Acoustic Emission Signals Collected during Tensile Tests on Unidirectional Glass/Polyester Composite Using Supervised and Unsupervised Classifiers", NDT&E International, Vol. 37, pp. 253~264.
- (12) Lee, S. K., 1998, "Fault Diagnosis in Gear Using Adaptive Signal Processing and Time Frequency Analysis", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 746~756.