

이 논문은 1998 학년도 한양대학교 공학기술연구소 연구비에 의하여 연구되었음.

정밀 레이저 디버링을 위한 어쿠스틱 에미션 피드백

이성환*

Acoustic Emission Feedback for Precision Laser Deburring

Seoung Hwan Lee*

ABSTRACT

Sensor feedback for process control is one of the essential elements in an automated deburring procedure. This paper presents the implementation of acoustic emission (AE), which has been developed as a feedback sensing technique for precision (mechanical) deburring, in a precision laser deburring process. AE signals were sampled for laser machining/deburring under various experimental conditions and analyzed using several signal-processing methods including AErms and spectral analysis. The results, such as the sensitivity of AE signals for different laser cutting depths, edge detection capability and the frequency analysis show a clear correlation between physical process parameters and the AE signals. A subsequent control strategy for deburring automation is also briefly discussed.

Key Words : Burr(버), Precision Laser Deburring(정밀 레이저 디버링), Deburring Automation(디버링 자동화), Sensor Feedback(센서 피드백), Acoustic Emission(어쿠스틱 에미션)

1. 서론

버 (burr)는 가공중의 소성 변형의 결과로써 가공 후 모서리 부분에 발생하는 물체의 원치 않는 투영부(projection)라고 정의 된다. 버는 생산부품의 검사, 조립 및 정밀부품의 공정자동화 등에 있어 많은 문제점들을 야기시키는데, 특별히 정밀부품의 경우 디버링 공정이 부품원가의 30% 까지 차지할 뿐 아니라 ⁽¹⁾ 잘못된 디버링 공정으로 인한 2 차 치수 오차 등이 발생하므로, 효과적인 버 제거 기술을 이용한 디버링 공정의 자동화가 전체 공정자동화 공정중의 중요한 한 부분으로 인식되어 다각적인 연구가 진행되고 있다.

현재까지 주로 사용되어 온 기계적인 방식의 디버링 방법은 디버링 공구와 공작물(버) 간의 접

촉 등으로 인하여 모재의 손상, 공구 마멸 및 진동 등의 문제점을 야기시키며, 또한 자동화에 필요한 안정적인 센서 제어신호를 얻는데 많은 어려움이 수반되어 ⁽²⁾, 새로운 디버링 기술의 개발이 중요한 과제로 등장하였다. 이러한 관점에서, 최근에 산업현장에서 널리 응용되는 레이저 가공에 주목하게 되었는데, 특별히 레이저는 무 공구 가공이고, 비접촉식이며, 자동화가 용이하다는 점에서, 정밀부품의 디버링 자동화에 적합한 성질을 가지고 있다고 하겠다. Lee ⁽²⁾ 등은 디버링 도구로써 고출력 레이저를 선택하여, 그에 대한 실험 및 유한요소 모델 해석을 통한 연구를 수행한 바 있다.

일반적인 절삭 가공 시에는 절삭공구의 형상이 주어지고 그에 따라 원하는 모양의 부품이 가공되지만, 레이저 가공과 같은 비접촉식 특수가

* 한양대학교 기계공학과

공 시에는 절삭 깊이 등이 미리 정해지는 것이 아니고 레이저 빔과 피가공재 간의 상호 작용의 결과로써 얻어지게 되므로, 실제 레이저 가공도중 빔 상태의 변동에 따라 피가공재의 기계적 성질이 변할 수 있고, 이밖에 다른 가공 조건의 변화에 따라 절삭 형상이 정확하게 예측되지 못하는 결과가 발생하게 된다. 따라서, 공정 조건을 레이저와 피가공재 간의 가공 조건에 따라 유연하게 적합시키기 위해서는 가공 중 상호 작용에 관한 데이터가 필요하고, 이 데이터를 바탕으로 하여 원하는 가공형상을 얻게 된다⁽³⁾. 이러한 이유로 레이저 가공 시 공정 제어를 위한 센싱 기술이 필요하며, 특히 가공 후 양질의 표면정도 및 정확한 치수를 요구하는 정밀 레이저 디버링에서, 실시간 피드백 센싱 제어의 필요성은, 이 기술이 자동화된 정밀 디버링의 유연성의 정도를 결정하는 요소라는 점에서 큰 중요성을 갖는다⁽⁴⁾.

기계적 디버링에서와 같이 자동화된 레이저 디버링의 경우에도 두 가지 종류의 센서 피드백 문제가 발생한다. 즉, 안정적인 피가공물 제거를 위한 공정 제어설계와, 미지의 형상을 가진 부품의 끝 모서리를 인지하고 추적하기 위한 제어방법의 개발이다⁽⁵⁾. 이미 힘 센서 피드백과 같이 공구와 피가공재 간의 접촉을 이용하여 공구를 피가공재 모서리를 따라 이동시키고 재료제거속도(material removal rate)를 조절하는 전통적인 방법 등이 디버링에 적용된 바 있지만^(5, 6) 이 방법들은 비접촉, 무공구 가공인 레이저 디버링에는 쓰일 수 없으므로, 새로운 센서 기술 도입의 필요성이 부각되었다.

본 연구에서는 AE(Acoustic Emission) 신호가 피가공재 모서리 감지 및 추적, 또 재료 제거속도를 제어하기 위하여 사용되었다. 레이저(디버링) 가공 시 발생하는 AE 신호와 물리적 변수간의 상관 관계 및 AE 신호 피드백의 레이저 디버링 자동화에의 적용에 관하여 검토하였다.

2. 레이저 가공과 AE 센싱

온도 센서나 광학 센서 등이 레이저 가공 중 실시간 제어를 위하여 사용된 바 있지만^(7, 8) 레이저 가공은 그 특성상, 높은 온도(구배) 및 다량의 열 에너지(high heat fluxes)가 순간적으로 아주 작은 가공면에 집중되기 때문에, 상기된 센싱 방법의

실제 적용에는 많은 어려움이 따른다⁽⁹⁾. 본 연구에서는 AE 신호를 레이저 디버링 작업의 자동화를 위한 피드백 신호로 사용하였다.

AE란 재료 내부의 한 부분으로부터의 탄성 에너지의 빠른 방사로 인하여 생성되는 과도 저준위(low intensity) 고주파(100kHz-1MHz) 탄성 응력파를 말하며, 탄성, 소성, 혹은 미세한 소성 변형, 입계 균열 및 균열 전파, 상 변태 및 변환, 마찰 및 기타 기계적, 화학적 혹은 열적으로 유도되는 동적운동으로부터 생성된다⁽¹⁰⁾. AE 신호는 재료 구조상의 모든 방향으로 전파되어 피가공재의 표면에서 감지되며, 감지된 표면과의 속도나 변위가 전기신호로 변환되어 (주로 압전 변환자를 이용) 증폭되고, 이 신호가 신호처리과정을 거쳐 필요한 정보를 위하여 해석된다. AE 센서기술은 AE 신호에 의해 전달되는 정보를 이용하여 발생원의 정확한 성질을 규명하는데 그 목적을 둔다.

AE는 레이저 가공을 포함하여, 다양한 생산공정의 특성에 민감성을 보인 바 있다. Chryssoulouris 등은 음성 센서를 이용하여 레이저 홈가공 시 홈 깊이의 제어를 시도한 바 있는데⁽⁹⁾, 그 결과로 음성 공진 주파수와 레이저 가공 깊이 간의 상관 관계가 도출되었으나, 추출된 신호가 가청주파수 범위(5-20 KHz)에 있기 때문에, 가공 시 주위 환경적 소음과 실제 레이저 가공 시 발생하는 신호음과의 구별이 어렵고, 따라서 산업 현장에의 적용에 난점을 가진다. Konishi 등은 AE 신호를 레이저 절단공정을 감시하는데 사용하였다⁽¹¹⁾. fractal 차원이 추출된 AE 신호를 분석하는데 사용되었는데, AE 신호와 물리적 변수 간의 관계를 명확하게 보이지는 못하였다. 그 밖에 레이저 용접 분야(용접 상태 감시 등)에서 AE 기술을 이용한 연구사례 들이 보고되었는데, Whittaker 등은 레이저 용접 중 레이저 빔과 용접선의 부정렬을 AE(rms)를 이용하여 감지하였고⁽¹²⁾, Jon 도 레이저 용접중 발생하는 레이저 실화, 출력손실, 부정확한 초점 등의 문제점을 AE 기술을 이용하여 관찰하였다⁽¹³⁾. 상기 연구 사례들에서, AE 신호와 레이저 가공중의 물리적 변수간에는 밀접한 상관관계가 존재한다는 것이 보여졌다.

레이저 빔이 피가공재에 쏘여질 때 빔에 노출된 재료부분은 용융이나 기화의 과정을 거치게 된다. 본 연구에 사용된 AE 센싱에서의 기본 가정은 피가공재(탄소강)가 주로 고출력 레이저에 의한

용융과정을 통해 제거된다는 것이다^(12,14). 그러므로 레이저 디버링 시의 AE 발생기구(source mechanism)는, 레이저 절단전면에서 동축상의 공기제트(co-axial air jet)에 의해 가해지는 공기압과 더불어, 액체-고체 상태 간의 빠른 상 변화(phase change)가 된다. Borchers⁽¹⁵⁾ 등은 금속이 용융된 후 빨리 응고될 때(급작스러운 부피 변화와 소성 변형 등으로 인하여) 충격파 (impulse)가 발생되고, 이 충격파가 광폭 스펙트럼을 갖는 AE 신호를 발생시킨다는 것을 보인 바 있다. Bolotin 등은 AE 신호 발생에 필요한 기계적 하중은 불균등한 금속재료 구조 및 비균일성 열적 조건에 기인한다고 하였다⁽¹⁶⁾. 즉 상당량의 응력이 용융상태의 재료나 HAZ (heat affected zone)에서 발생하고, 이 응력이 불완전한 조직을 가진 금속구조를 통하여 AE 를 발생 전파시킨다는 것이다. 다른 연구 결과에서도 용융-응고의 메카니즘이 그에 따른 AE 신호를 발생시킨다는 것이 보고된 바 있다^(17,18).

3. 신호 처리 (Signal Processing)

AE 기술을 공정 감시에 적용하려면 공정 중 발생하는 변수들과 신호간의 연관성을 알아야 하고, 특히 AE 발생과 직접 관련이 있는 발생기구에 대한 이해가 필요하다⁽¹⁹⁾. 아래에서 관련된 신호 처리방법 및 발생신호의 특성에 대하여 논의하였다.

3.1. AErms

대부분의 생산 공정에서와 같이, 레이저가공 시 AE 의 발생은 공정 중 에너지 소비에 관련되어있고, 몇 가지 변수(예를 들면, 레이저 출력 및 이송속도 등)로 특성 지어진다. 다른 기계적(접촉식) 가공에서와 같이, 평균 AE power 는 재료 제거 속도 (MRR[mm³/s])에 비례한다⁽²⁰⁾.

$$\overline{AEpower} = A * MRR \quad (1)$$

여기서 A 는 레이저 절단면 형상이나 광학적 변수 및 재료의 열적/기계적 성질 등의 변수에 비례하는 비례상수이다. (1) 에서 $\overline{AEpower}$ 는 일정 시간 동안의 평균치를 의미한다. 또 재료제거 속도는 레이저 출력 및 이송속도의 영향을 포괄하고있다. 레이저 가공의 경우 재료 제거속도는 레이저 출력(P[watts]) 과 이송속도(f[mm/s])에 의해서 결

정되기 때문에, 레이저 가공 시 평균 AEpower 는 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{AEpower} = A/f * P \quad (2)$$

재료 이송속도가 일정하다면, 레이저 출력에 비례하는 레이저 절단면적(A_L [mm²])은 다음과 같다.

$$A_L = \alpha_1 * P \quad (3)$$

또한,

$$A_L = \alpha_2 * d^2 \quad (4)$$

여기서 α_1 은 레이저 효율 상수, α_2 는 기하학적 상수이고 d[mm]는 레이저 절삭 깊이를 나타낸다. (3) 과 (4)를 (2)에 대입하면 평균 AEpower 와 레이저 절삭 깊이간의 관계식이 산출된다.

$$\overline{AEpower} = (A\alpha_2/f\alpha_1) * d^2 \quad (5)$$

또 AErms [volt]는 다음 식과 같다.

$$AErms = C_1 * d \quad (6)$$

여기서 $C_1 = \sqrt{A\alpha_2 / f\alpha_1}$ 이다. 같은 방법으로, 출력이 일정하다면, $\overline{AEpower}$ 와 AErms 는 각각

$$\overline{AEpower} = (A\alpha_1 P / \alpha_2) * d^2 \quad (7)$$

$$AErms = C_2 * d \quad (8)$$

와 같이 표현된다. 여기서 α_3 , α_4 는 각각 이송속도에 관한 레이저 효율상수 및 기하학적 상수이고, $C_2 = \sqrt{A\alpha_1 P / \alpha_3}$ 이다.

레이저가공 시 에너지 소비를 AErms 로 나타낸 식 (6)과 (8)은 레이저 절삭/홈 가공 시 절삭 깊이, 레이저 디버링 시 제거된 버의 두께와 AE 신호간의 기초 관계식이 된다. 실험적 검증은 본고의 후반부에서 언급되었다.

3.2. 스펙트럼 해석

AErms 신호는 공정 감시 시 항상 충분한 정보를 제공하는 것은 아니므로⁽²¹⁾, 추출된 신호로부터 필요한 정보를 얻기 위해서는 다른 종류의 신호처리 기술도 함께 요구된다. 본 연구에서는 레이저(디버링) 가공 시 AE 발생원의 물리적 성질을 주파수 영역에서 해석하기위해 스펙트럼 해석

(spectral analysis)을 사용하였다. 시간 영역에서 샘플링된 신호들을 FFT 아날라이저를 이용하여 주파수 영역의 신호로 변환하여 주파수 특성들을 살펴보고, 평균 주파수와 실험시의 물리적변수와와의 관계를 고찰하였다. 평균 주파수(f_m)는 다음식으로 정의된다.

$$f_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_i f_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (9)$$

여기서 S_i 는 주파수 f_i 의 값에서 정규화 된 파워값(normalize signal power) 이고 n은 스펙트럼 상에서 평균을 취한 주파수의 수이다. f_m 은 스펙트럼 상의 총 파워를 두 부분으로 나누는데, f_m 값이 크면 파워 값이 고주파 쪽으로 집중된다는 것을 뜻한다⁽²²⁾. 이러한 주파수 영역의 연구는 AErms와 함께 실험 중 AE 신호의 거동을 연구하는데 사용되었다. 주파수영역의 연구는 가공과 동시에 일어나는 재료 변형의 상대적 정도를 결정하는데 유용하다고 알려져 있는데, 특히 레이저 가공과 같은 열-기계적(thermo-mechanical) 공정에서는 상변환(phase transformation)과 미소 균열, 소성변형등이 모두 재료의 기계적 거동에 영향을 주기 때문에 이러한 변형들과 연관을 가진 주파수영역의 연구가 더욱 필요하다. 더욱이, 레이저가공 시 발생하는 AE는 넓은 주파수 범위에서 다양한 거동을 나타내므로 스펙트럼 해석 방법은 AE 신호를 해석하는데 있어 중요한 도구가 된다.

4. 실험장치

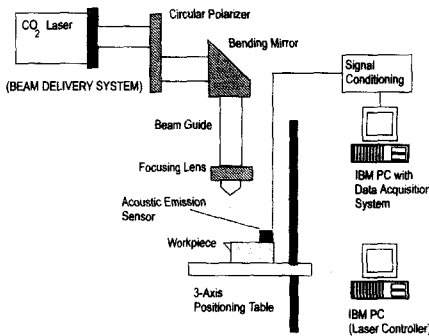


Fig. 1 Experimental Setup

Fig. 1은 정밀 레이저 디버링을 위한 AE 센서 피드백 실험을 위한 개략도이다. 직육면체 형상의

AISI 1045 탄소강 시편에 대한 실험이 3 차원 위치 제어시스템을 가진 1500Watt CO₂ 레이저를 사용하여 수행되었다. AE 센서는 시편에 고정되어 레이저가 시편에 주사될 때(또는 동시에 움직일 때) 발생하는 신호를 기록, 추출하게 된다 (Fig. 2).

광폭 AE 센서(PAC model S9208)가 실험 시 발생하는 응력파를 측정하기 위해 사용되었다. 신호는 40 dB의 고정 이득을 가지고 50kHz의 절점 주파수를 가진 하이 패스 필터가 장착된 전치 증폭기를 거쳐 20dB 이득을 가진 증폭기 (Dunegan-Endevco 증폭기)를 이용하여 증폭된 후, 50 kHz에서 1 MHz사이의 주파수로 대역 필터 되었다. 처리된 신호들은 AE 원 신호의 기록을 위해서 바로 PC에 장착된 data acquisition system으로 보내지거나, rms 신호의 기록을 위해 rms meter를 거쳐 data acquisition system으로 보내졌다. IBM-PC에 장착된 data acquisition system(GageScope CS1012와 National Instrument GPIB board)이 데이터의 저장, 디지털화 및 분석을 위해 사용되었고, 디지털 오실로스코프 (HP5401A)가 AE 전압 신호 추출 시 신호의 감시를 위하여 사용되었다.

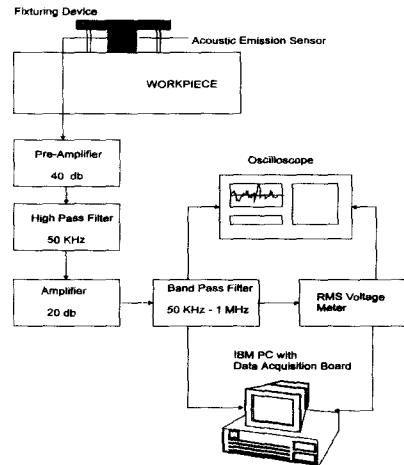


Fig. 2 Signal Flow

5. 레이저 실험

레이저 홈가공과 레이저 절삭/디버링 시의 신호들이 다양한 실험 조건하에서 채록되었다. AE 원신호의 경우 샘플링 주파수가 2.5MHz였고 rms 신호의 시간상수는 50µs와 0.5ms 사이에서 결정되었다. AE 센서는 버가 한쪽 측면을 따라 형성되

어있는 직육면체(100 mm (L) x 50mm (W) x 23mm (H), 버 평균 높이= 0.5 mm) 탄소강 시편에 고정도구를 사용하여 고정되었다(Fig. 2). 레이저 출력은 200 W에서 600 W 사이에서 두 가지 이송속도(1.3 mm/sec. 와 2.5 mm/sec.)를 가지고 변화되었다.

Fig. 3은 행해진 실험들을 도해한 것이다. 먼저 레이저 디버링 중의 다양한 신호를 얻기 위해, 레이저빔을 각각 버끝, 버의 중간 부분, 버의 root 부분(deburring), 및 시편 안쪽 부분(grooving)을 향하도록 하여 가공하였다(Fig. 3(a)). 다음에 레이저 디버링시 절삭깊이와 AERms 신호와의 상관관계를 얻기 위하여, 레이저가 3/90의 기울기(즉, 최종(최대) 레이저 절삭깊이가 3mm 이고 그 측면의 길이는 90 mm)의 비스듬한 경로를 따라 주사되도록 하였다. 또한 서로 다른 높이의 층 단면을 가지는 시편에 대해 레이저 홈 가공을 수행하였고(Fig. 3(c)) 시편 모서리를 탐지(edge detection)하는 실험도 행하여(Fig. 3(d)) 레이저 가공 중 AE 센싱의 다양한 실험조건에 따른 변화 감지능력을 살펴 보았다. Fig. 3(e)는 레이저 출력과 이송속도를 변화시키면서 수행한 레이저 홈 가공 실험을 보여준다.

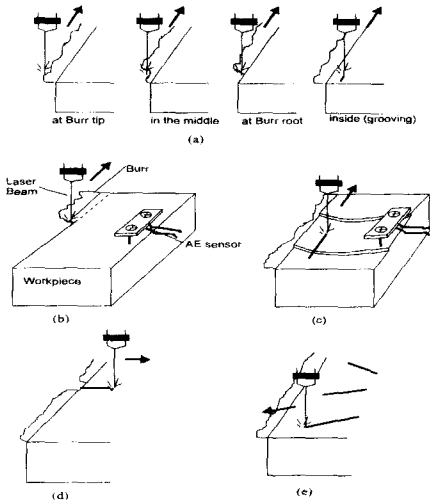


Fig. 3 Laser Experiments

6. 결과 및 토론

Fig. 4는 레이저 디버링 및 홈 가공시의 AERms 데이터를 나타낸다. 레이저 디버링의 경우(Fig. 4(a), (b), (c)) 제거된 재료의 양이 증가함에 따라 신호

의 진폭이 커짐을 알 수 있다. 또 실제로 디버링이 행해진 Fig. 4(c)의 경우 버의 형상이 시편 측면을 따라 정확하게 표시됨을 알 수 있다. 레이저빔이 시편 안쪽에 위치하여 가공할 경우(레이저 홈 가공, Fig. 4(d)), 가장 강한 신호가 관측되었다

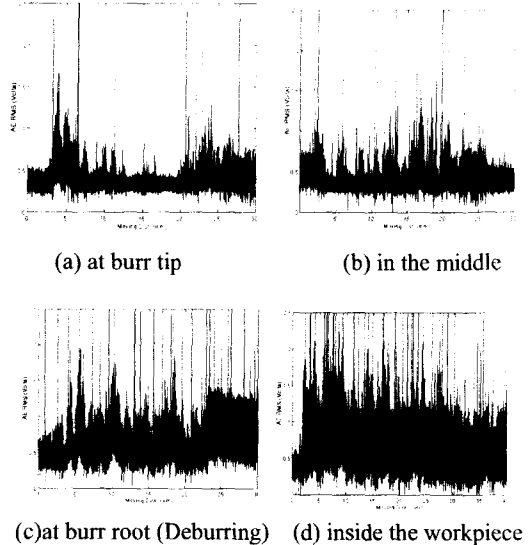


Fig. 4 AERms from Laser Deburring Experiments (power =400W, Feed rate = 2.5 mm/sec., Time Const.= 0.5 msec.)

Fig.5는 빔 진행방향으로 경사를 가지면서 레이저 디버링/절삭 가공을 수행하였을 때, 즉 절삭깊이가 변화할 때(Fig. 3(b)) AERms 에너지와 절삭깊이간의 관계를 나타낸다. 수직축의 절편이 원점 위쪽에 위치하여 계측기의 잡음을 표시하며, fit된 직선으로부터 식(6)의 상수 C_1 값이 결정된다.

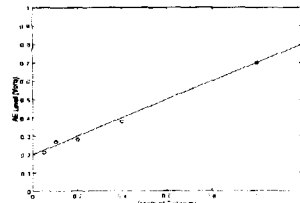


Fig. 5 Average Values of AE and Depth of Cut (Power =400W, Feed Rate=2.5mm/sec.)

식으로 주어진 모델에 의한 예측이 동일 실험의

AErms 데이터와 같이 그려졌는데(Fig. 6), AErms와 절삭깊이 간의 선형 비례성이 잘 나타나고 있다.

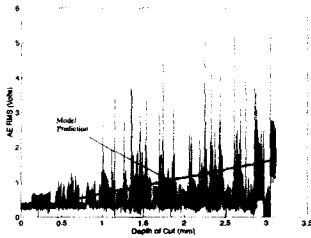


Fig. 6 AE rms for a slope cutting (Power = 400W, Feed Rate = 2.5mm/sec., Time Const. = 0.5ms)

Fig. 7은 서로 높이가 다른 층 단면(0.5 mm 높이차)을 가지는 시편을 레이저 홈 가공했을 경우 발생하는 AErms 데이터인데, 각 층 단면의 경계가(그림에서의 화살표) 명확하게 보여진다. 지금까지의 결과에서, 레이저 가공 시 가공 상태의 변화는 항상 AE 신호의 증감을 수반하며 그 결과는 AE 신호로써 쉽게 감지할 수 있다는 것을 보였다. 또한 AErms 신호가 레이저 절삭 깊이에 선형 비례한다는 식 (6)(또, 이송 속도의 변화는 출력의 변화로 보정될 수 있으므로 식 (8))이 검증되었다.

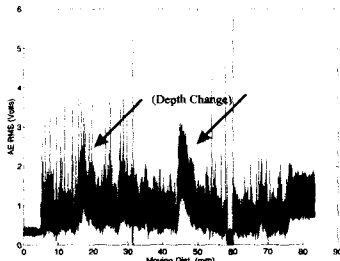


Fig. 7 AE rms for a grooving with uneven tiers (Power = 400W, Feed Rate = 2.5mm/sec., Time Const. = 0.5ms)

Fig. 8은 시편 모서리 탐지시의 AErms 신호이다. 레이저가 버에 수직인 방향으로 시편의 바깥쪽에서 안쪽 방향으로 움직일 때(Fig. 3 (d)) 세가지 상이한 높이의 신호가 관측되었다. 각 신호들은 각기 절삭 전, 버 절삭, 시편 내부에서의 홈 가공을 나타낸다. 이 실험 결과로서 레이저 가공 시 AE 센싱 기술로 모서리 탐지가 가능하다는 것이 실증되었다. 실험 파라미터(이송속도나 레이저 출

력 등)의 변동여부에 상관없이 AE 센서는 레이저 절삭의 시작(즉 시편 모서리 버 부분의 탐지)을 25 micron의 반복도로 감지하였다.

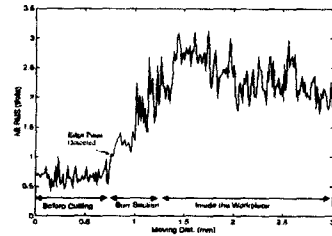


Fig. 8 AE rms for Edge Detection (Power=300W, Feed Rate=2.5mm/sec., Time Const. = 50 μs)

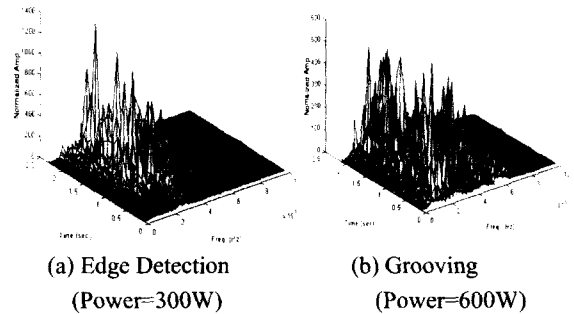


Fig. 9 AE Frequency Spectrum for Edge Detection And Grooving Experiment (Feed Rate=2.5mm/sec., Sampling Fre.=2.5MHz)

주파수 성분의 분석을 위해 AE 원 신호들이 FFT를 사용하여 변환, 분석되었다. Fig. 9(a)는 모서리 탐지 실험에서 2초의 간격동안 스펙트럼의 변화를 나타낸다. 레이저가 시편을 향해 접근해가지만 절삭이 이루어지기 전인 처음 0.5 초 동안은 200-300 KHz의 주파수를 가지는 매우 낮은 진폭의 AE 신호가 관측되었다. 또 레이저가 버 부분을 지나는 동안(0.5-1 초), 버 두께만큼의 레이저 절삭이 이루어져서 좀더 높은 민감도의 AE 신호가 보여졌으며, 그 이후 레이저가 시편 안쪽에서 움직이면서 홈 가공을 하는 동안에는 같은 주파수대에서 가장 높은 민감도를 보였는데, 이것은 레이저 절단 전면에서 공기 제트 압력에 의한 기계적 접촉이 주발생원으로 보여진다. 전체 실험을 통하여, 레이저가공은 일반적인 기계가공 시와 유사한 주파수 영역대(200 -300 kHz, (23))에서 가장 높은 민감

성을 보였다. 한 가지 특이한 점은 버 부분 절단 시나, 홈 가공 시 600 kHz 근처에서 보여지는 센서의 민감도이다.

일반적으로 소성 변형의 경우, 고주파 특성은 큰 변형도를 가질 때 많이 관측되고 있다 (10). 또, Graham 과 Alers (24)는 고주파 신호(즉 (9)에서 정의된 평균 주파수에서 관심 범위 상한 주파수인 1 MHz 까지)는 일반적으로 큰 변형도를 수반하는 소성 흐름(plastic flow)과 연관되어 있고 저주파 신호는 주로 균열에 의한 전파에 기인한다고 보고한 바 있다. 같은 맥락에서, 본 실험에서의 고주파 성분 (600 kHz 정도)은 레이저 가공 시 레이저 절단 전면(cutting front) 근처의 큰 열 응력 및 높은 온도(구배)로부터 기인한다고 보여진다.

Fig. 9 (b)는 레이저 홈 가공시 스펙트럼의 변화이다. 전 구간에 걸쳐, 200-300 kHz 의 주파수 근처에서 민감도를 보여주고 있으며, 600 kHz 근처에서도 주파수 peak 들이 관찰되는데, 이 경우도 빠른 상변화에 의한 광폭 스펙트럼을 나타낸다.

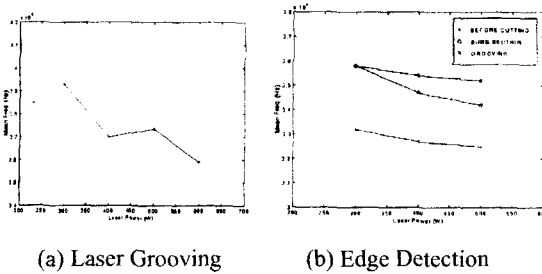
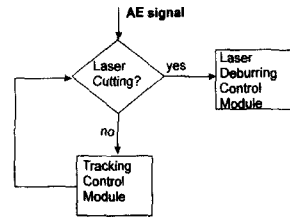


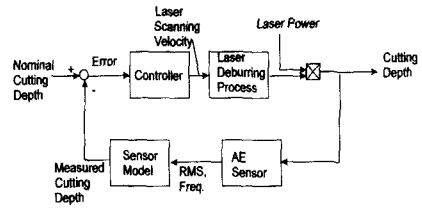
Fig. 10 Mean Frequency vs. Laser Power (Feed =2.5 mm/sec)

Fig. 10 은 절삭 깊이와 직접적 연관성을 가지는 절삭시 레이저 출력과 평균 주파수간의 관계를 나타낸다. 레이저 파워가 증가함에 따라 절단전면의 용해 물질이 증가하여 냉각속도가 느려지고, 따라서 충격파의 주파수가 낮아지는 결과를 초래한다. Fig. 10(a)는 레이저 홈 가공시의 데이터인데, 레이저 출력과 평균 주파수간의 선형 역비례 관계를 보여주고 있다. Fig. 10(b)는 모서리 탐지 실험의 경우인데, 홈 가공과 유사한 결과를 보여주고 있다. 특별히, 시편 안쪽 가공 시(홈 가공)와 버 절단시의 평균 주파수가 가공이 이루어지기 전의 평균 주파수보다 높은 값을 보였는데, 이것은 실험

데이터의 스펙트럼 분석 결과와 일치하는 것이다.



(a) Flow Chart for the Control Scheme



(b) An Example of Laser Deburring Control (27)

Fig. 11 Laser Deburring Control Scheme

위의 결과 및 토론을 통하여 AE 기술은 자동 레이저 디버링 시스템에 적합한 센싱 피드백 기능을 가진다는 것을 보였다. 이 센싱 방법을 실제 디버링 시 피드백 제어에 이용하는 가능한 예를 제시하면 다음과 같다: 우선 1. 버의 모서리 부분은 레이저 빔 진행 방향에 맞추어 정렬되었으며, 2. 버 두께나 최소 레이저 출력 등의 디버링 공정 시 필요한 정보가 버 정형화 (25), 버 생성 모델 (26), 디버링 공정 모델 (2) 등의 디버링 자동화 관련 모델들을 통하여 주어진다 가정한다. 먼저 AE 피드백을 이용하면, 현재의 레이저 공정이 절단 전, 버 부분, 혹은 시편 안쪽 가공 (홈 가공) 상태인지 판별할 수 있고, 만일 레이저 빔이 버 부분에 위치되지 않고 있다면 AE 피드백 신호를 이용하여 버 부분으로 유도된다(Fig. 11). 이후 폐 루프제어를 이용하여(Fig. 11(b)) (27), 디버링 가공이 전 공정에 걸쳐 버 부분에서만 이루어지도록 조절된다.

7. 결론

AE 기술이 자동화된 정밀 레이저 디버링의 센싱 피드백으로 제안되었다. 실제 공정 시 발생하는 경우를 고려한 실험 시 추출된 데이터들이

AERms 및 주파수 해석 등의 신호처리 방법 등을 사용하여 분석되었다. 그에 따른 디버링 자동화를 위한 제어방식이 간략하게 설명되었다.

AERms 는 절삭 깊이 등 다양한 실험 조건에 매우 민감하게 반응하였으며, 그 변화를 명확하게 보여주었다. 또한, 주파수(스펙트럼) 해석은 레이저 가공 시 AE 발생원의 물리적 측면을 이해하는데 유용성을 보였다. 상기한 해석결과를 통하여, AE 센서 피드백을 사용하면 디버링 시 재료제거 제어 및 시편(버) 모서리의 탐지/추적이 가능함을 보였다. 따라서, 적절한 공정제어와 함께 전체적 디버링 시스템에 연계하여 사용하면, AE 기술은 정밀 디버링 공정을 자동화하는데 있어 경쟁력 있는 방법이 될 것이다.

참고문헌

- Gillespie, L., "Deburring Precision Miniature Parts," *Prec. Eng.*, Vol. 1, N4, pp. 189-198, July, 1979.
- Lee, S. H. and Dornfeld, D., "Analysis of Precision Deburring Using a Laser," ESRC Report, 1996.
- Chryssolouris, G., "Sensors in Laser Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 43/2, pp. 513-519, 1994.
- Dornfeld, D. and Lisiewicz, V., "AE Feedback For Precision Deburring," *CIRP*, V 41, pp. 93-96, 1992.
- Her, M. G. and Kazerooni, H., "Automated Robotic Deburring of Parts Using Compliance Control," *J. Dyn. Sys. Meas. Control*, 113, pp. 60-66, 1991.
- Loucks, C. and Selleck, C., "CAD-Directed Robot Edge Finishing," *Proc. Deburring and Surface Conditioning*, Paper MR89-114, SME, 1989.
- Chin, B., et al., "Infrared Thermography for Sensing the Arc Welding Process," *W. J.*, pp. 227-234, 1983.
- Konig, W. et al., "Process monitoring of High Power CO2 Lasers in Manufacturing," *Proc. of 2nd Int. Conf. on Lasers in Mfg. (LIM2)*, pp. 129-140.
- Chryssolouris, G., et al., "Process Control of Laser Grooving Using Acoustic Sensing," *Trans. of ASME, J. of Engi. Ind.*, Vol. 113, n3, pp. 268-275, 1991.
- Hartman, W. and Kline, R., "Variations in Frequency Content of Acoustic Emission During Extension of HF-1 Steel," *Mat. Eva.*, V 35, No. 7, pp. 47-51, 1997.
- Konishi, Y. et al., "Basic Study For Relationship Between Fractal Dimension of AE Signal and Laser Cutting," *Int. J. JSPE.*, Vol. 28, No. 2, 1994.
- Whittaker, J. et al., "In Process AE Monitoring of Laser Welds," 2nd I. C. on AE, Lake Tahoe, 1985.
- Jon, M., "Noncontact AE Monitoring of Laser Beam Welding," *W. Journal*, Vol. 64, pp. 43-48, Sept. 1985.
- Wei, P. S. and Chiou, L. R., "Molten Metal Flow Around the Base of a Cavity During a High Energy Beam Penetrating Process," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 918-923 Nov. 1988.
- Borchers, H. and Tensi, H., "Improved Piezoelectric Method for Investigation of Processes in Metals during Mechanical Stressing and Phase Changes," *Zeit. fur Metallkunde*, V51(4), pp. 212-218, 1960.
- Bolotin, Y. et al., "Welding Quality Control by AE during EB Welding," *W. P.*, 23(4), pp. 28-30, 1976.
- Nondestructive Testing Handbook, ASNT, V. 5, 1987.
- Dickhaut, E and Eisenblatter, J., "AE Measurements During Electron Beam Welding of Nickel Base Alloys," *J. of Eng. for Power*, V 97, pp. 47-52, 1975.
- Rangwala, S. and Dornfeld, D., "A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting-I Energy Analysis," *Int. J. M. Sci.*, V. 33, p471, 1991.
- Kannatey-Asibu, E. and Dornfeld, D., "Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting," *J. of E. Ind.*, V.103, pp. 330-340, 1981.
- Rangwala, S. and Dornfeld, D., "Sensor integration using neural networks for intelligent tool condition monitoring," *J. of Engi. Ind.*, Vol. 112, p219, 1990.
- Rangwala, S. and Dornfeld, D., "A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting-2: Spectral Analysis," *I. J. M. Sci.*, V33, p489, 1991.
- Liu, J. J., "Monitoring the Precision Machining Process: Sensors, Signal Processing and Information Analysis," Ph. D dissertation, U. C. Berkeley, 1991.
- Graham, L. and Alers, G. "Spectrum Analysis of A E in A533-B Steel," *Mat. Eva.* Vol. 32, pp. 31-37, 1974.
- Lee, S. H., Park, D.S. and Dornfeld, D.A., "Burr Size Measurement Using a Capacitance Sensor," *Proc. of 2nd S. M. Wu Symp.*, Ann Arbor, MI., May, 1996.
- Park, I. Lee, S. H. and Dornfeld, D., "Modeling of Burr Formation Process in Orthogonal Cutting by the FEM," ESRC Report, Univ. of Calif., 1994.
- Chryssolouris, George, "Laser Machining," Springer-Verlag, New York, 1990.