

시간-주파수 분석에 의한 금형 마모 분석

이창희*, 한호영⁺, 서건석⁺⁺, 김용연⁺⁺⁺

(논문접수일 2010. 03. 15, 심사완료일 2010. 06. 07)

Stamping Tool Wearing Analysis by Time-Frequency Analysis

Chang Hee Lee*, Ho Young Han⁺, Geun Seok Seo⁺⁺, Yong Yun Kim⁺⁺⁺

Abstract

This paper reports on the research which analyzes acoustic signals acquired in progressive compressing, hole blanking, and burr compacting process. An acoustic sensor was set on the bed of hydraulic press. Acoustic signal is generated from progressive stamping process. First the signal acquired from the unit process; compressing, blanking or compacting, is studied by Fourier Transform and Short Time Fourier Transform. The blanking process emitted ultrasonic signal with more than 20kHz, but the compressing and compacting processes emitted acoustic signals with lower than 10kHz. The combined signals periodically acquired right after the tool grinding were then analyzed. 70-80kHz signals appeared in time-frequency domain, but not in the frequency domain, the magnitude of which was related to the tool wear. Short Time Fourier Transform made up for the Fourier Transform in analyzing the emitted signal for stamping process in the ultrasonic domain.

Key Words : Compressing process(압착 공정), Blanking process(블랭킹공정), Deburring process(버제거공정), Frequency spectrum(주파수 스펙트럼), Short time frequency analysis(단시간-주파수 분석)

1. 연구 배경

탄성파동 및 음향방출 기술을 이용한 소재 평가와 공구 감시 및 가공 불량 검출을 위한 탄성과 전달 특성을 응용한

연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 접합 검사와 납 접이음의 신뢰성 검사를 위하여 음파의 전달 기술을 적용하여 그 가능성을 제시하고 있을 뿐 아니라, 철삭 가공의 표면 평가를 생산 공정에 적용하여 실시간으로 평가한 연구도 진

* 넥센타이어 연구개발본부 제품평가팀
+ 충북대 대학원 정밀기계공학과
++ 포스코 선제부 기술개발팀
+++ 교신저자, 충북대학교 기계공학부 (yykim@cbnu.ac.kr)
주소: 361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)

행되고 있다. 프레스 생산 공정에서 생산 금형의 상태는 제품 생산 품질에 절대적으로 영향을 미치기 때문에 금형 상태를 모니터링 하는 기술이 절실히 요구되고 있다. 현재는 작업자의 경험에 의존하고 있기 때문에 공정을 관리하는 데 어려운 점이 많다. 따라서 가공 공정으로부터 발생하는 음향 신호를 검출하여 음향신호의 특성과 제품의 품질 및 금형 상태를 분석할 수 있는 검출 시스템이 요구되고 있다.

Lee와 Kim^(1,2)은 절삭력 신호를 이용한 경면생성에측에 관한 연구를 통해 절삭력을 이용한 표면조도를 예측하였고, Kwak과 Song⁽³⁾은 음향신호를 이용하여 표면조도를 예측을 하였다. 미세한 진동신호를 감지하기에 음향센서가 유리함을 이용하여 Kim⁽⁴⁾은 압전소자를 이용한 음향센서를 제작하여 연마공정 감시 장치를 개발했다. 또한 Kim⁽⁵⁾은 엔드밀가공에서 절삭력과 음향신호의 관련성을 규명하였고, Ertekin⁽⁶⁾은 밀링가공에서 재료별로 가공환경의 변화에 따른 음향신호를 측정하였다. Axinte⁽⁷⁾는 음향신호를 통해 브로칭 가공의 가공표면 상태 예측을 시도하였고, Ganesan⁽⁸⁾은 폴리싱 가공에 음향신호를 가공표면 측정에 이용함으로써 연삭가공을 비롯한 밀링가공, 브로칭 가공, 그리고 정밀한 폴리싱 가공에도 음향신호를 적용할 수 있음을 제시하였다. Kwak과 Ha^(9,10)는 음향신호 처리를 위한 신경회로망(Neural network) 이론을 도입하여 표면가공 상태를 진단하는 시도를 통해 새로운 신호처리 방법을 제시하였고, Godin⁽¹¹⁾은 복합재료의 인장시험에서 음향방출 신호 특성을 가공 평가와 재료의 특성 평가에 적용하였고, Rhee⁽¹²⁾는 음향방출 신호의 웨이브렛 변환 분석으로 맞대기 용접 이음재의 파괴특성을 고찰하였다. Kim과 Lee⁽¹³⁾는 알루미늄 박판 원통의 정밀 선삭 공정으로부터 음향신호를 실시간으로 분석하여 미세 크랙을 검출하는 데 적용하였다. Kim⁽¹⁴⁾은 프레스 스탬핑 공정에서 발생하는 음향 신호를 푸리에 변환에 의한 특성 주파수 분석으로부터 금형 마모 상태를 고찰하였지만, 특성 주파수의 발생하는 시간은 분석할 수 없었다. 따라서 본 논문에서는 프레스 공정으로부터 수집된 신호를 단시간-주파수 분석을 하여 특성 주파수의 발생 시간을 고찰함으로써 다단계 동시 스탬핑 공정으로부터 단위 공정 및 블랭킹의 세부 공정에 대한 분석을 하였다. 본 논문에서 분석한 공정, 실험장치 및 수집된 신호는 Kim⁽¹⁴⁾과 동일하다.

2. 실험 장치

2.1 스탬핑 공정

프레스와 고전압용 헤드핀의 가공 장치는 Fig. 1(a)와 같

다. 헤드핀 가공에 이용되는 프레스는 80ton급 싱글 크랭크 유압 프레스이고, 규격은 Table 1과 같다. Fig. 1(b)로부터 신호 센서는 탄성파의 음압을 감지하는 탐촉자로 프레스 베드 위에 부착됨을 볼 수 있다. 금형 다이부는 베드위에 고정되었고, 펀치부는 상부에 위치하고 있음을 볼 수 있다. 헤드핀은 Fig. 2와 같이 (a) 원소재로부터, (b) 머리부를 압착하고, (c) 머리 형상 커팅과 구멍 블랭킹을 동시에 하고, (d) 다지는 3단계 연속공정으로 동시에 가공된다.

2.2 신호수집장치

광대역 음향방출센서를 프레스 베드에 Fig. 1(b)와 같이

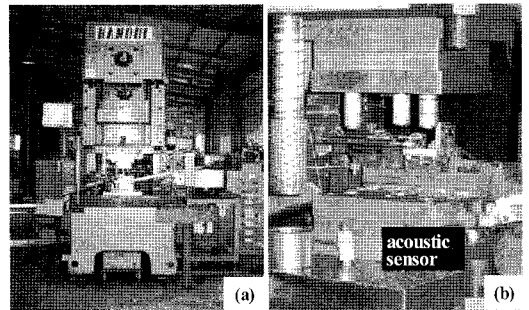


Fig. 1 Stamping system: (a) press, and (b) sensor setting

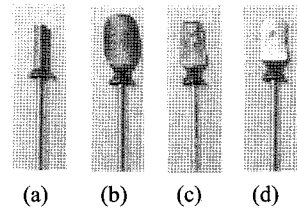


Fig. 2 Picture of specimen for the process; (a) preformed material, (b) compression of head, (c) hole blanking and edge cutting, and (d) deburring

Table 1 Press specification

Model	HNCP-80
Capacity (ton)	80
Stroke length (mm)	130
Velocity (SPM)	50~80
Height (mm)	350
Bed Area (mm×mm)	1000×600
Power (HP)	15

Table 2 Specification of oscilloscope and sensor

Acoustic sensor	
Model	B1025 (Digital wave)
Freq. Range	1kHz ~ 1.5MHz
Oscilloscope	
Model	Wave Surfer424 (Lecroy)
Bandwidth	200MHz
Sampling Rate	2GS/s max.
Record Length	500Kpts/Ch, 2Mpts max
Vertical Resolution	1mV/div~10 ³ mV/div

부착하여 프레스 공정으로부터 방출되는 신호를 수집하였다. 음향방출센서와 신호 수집 장치의 제원은 Table 2와 같다. 센서로부터 감지된 음향신호는 디지털 오실로스코프로 실시간으로 관찰하고 저장하였다. 측정에 사용된 음향센서와 디지털 오실로스코프의 제원은 Table 2에 요약하였다. 디지털 오실로스코프의 샘플링 데이터 수는 오실로스코프에 내장된 메모리에 의해 결정된다. Lecroy Wave-surfer 424의 최대 버퍼 저장 용량은 2Mpts 이고, 신호 수집 속도는 10Mpts/sec로 하였다. 금형 연마 직후부터 다음 연마시점(240,000개 생산)까지 30,000개 생산 주기로 각각 0.05초 동안 가공공정으로부터 방출되는 신호를 수집하였다.

3. 신호분석 및 고찰

일반적 푸리에 변환은 일련의 전체 신호에 대한 주파수 분석을 가능하게 한 반면, 실시간 신호의 시간 영역에서 임의의 시간, t 를 중심으로 단시간에 대한 신호 특성은 단시간-주파수 분석을 함으로서 가능하다. 시간, t 를 중심으로 한 단시간에 대한 신호, $s_t(\tau)$ 는 창함수, $h(t)$ 를 신호, $s(t)$ 에 곱함으로써 얻을 수 있고, 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$s_t(\tau) = s(\tau)h(\tau - t) \quad (1)$$

즉, $s_t(\tau)$ 는 임의의 시간, t 의 근접영역에서 $s(\tau)$ 가 되고 그 외 영역에서는 0이 된다. 시간, t 를 중심으로 한 단시간에 대한 신호에 대한 주파수 스펙트럼을 구하기 위한 푸리에 변환식은,

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{0.05} e^{-j\omega\tau} s_t(\tau) d\tau \quad (2)$$

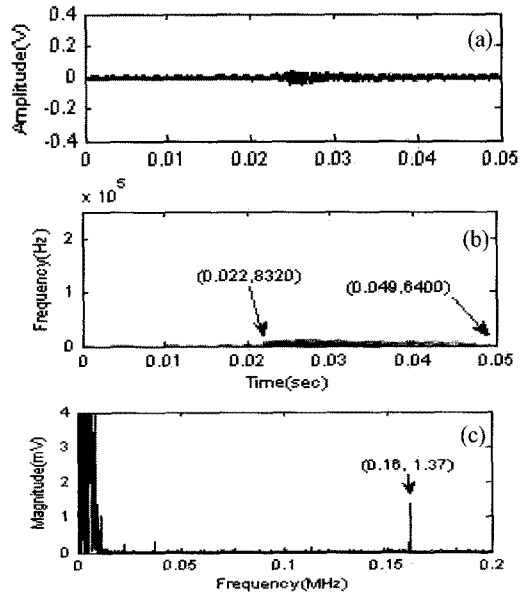


Fig. 3 Signals emitted during compressing process: (a) real time data, (b) STFT spectrum, and (c) frequency spectrum

이다. 단시간-주파수 분석에 Matlab의 specgram.m을 사용하였다. 단시간 영역에서 주파수 스펙트럼을 구하기 위해 창의 단시간 대역을 1.56 ms(15624 샘플)로 하고, 창의 실시간 신호의 시간 축으로 0.78 ms(7812 샘플)씩 이동 시키면서, 각 창함수에 의한 단시간 신호, $s_t(\tau)$ 에 대해 주파수 스펙트럼을 식 (2)로부터 계산하였다. 분석가능 최소 주파수는 20Hz 이다.

3.1 단위 공정 신호 분석

시간-주파수 분석은 식 (1)-(2)를 적용하고, 전체 신호에 대한 주파수 분석은 푸리에 변환을 적용하였다. Fig. 3-Fig. 5는 Fig. 2에서 보여준 압착, 블랭킹, 디버링의 단위 공정으로부터 방출되는 신호분석 결과이다. Fig. 3은 편머리 부분을 형성하기 위해서 봉을 압착시켜 평판을 형성시키는 공정으로부터 발산되는 신호이다. $\Phi 3.42\text{mm}$ 봉을 두께 0.8mm의 평판으로 성형하는 데 프레스 램은 0.262mm 이동하고 공정에 소요되는 시간은 램의 평균속도로부터 7.4 ms 임을 계산할 수 있다. 그러나 하중이 작용할 때 속도가 느려짐을 고려하면 약 10 ms 소요된다. 각 그림에서 (a)는 실시간 데이터이고, (b)는 시간-주파수 스펙트럼으로 흑색에 근접할수록

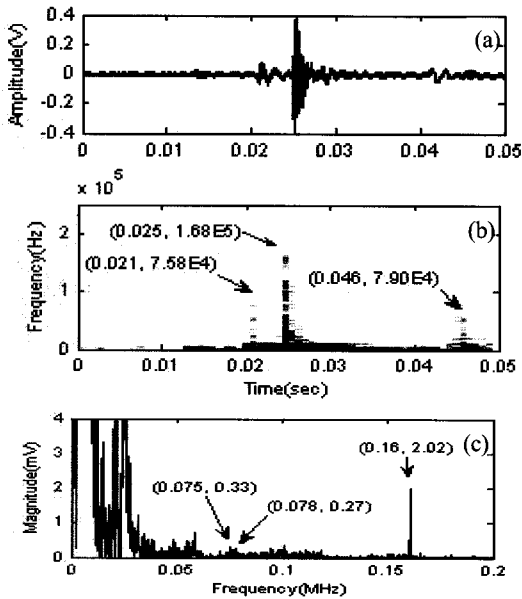


Fig. 4 Signals emitted during blanking process: (a) real time data, (b) STFT spectrum, and (c) frequency spectrum

진폭이 크고, 백색에 근접 할수록 진폭이 작음을 의미한다. (c)는 전체 신호에 대한 주파수 스펙트럼이다. Fig. 3은 압착공정에 발생하는 신호로 8.32kHz 이하의 신호가 공정 전역에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 하단 그림에서 0.16MHz의 특성 주파수가 발생되나 시간-주파수 분석에서는 확인되지 않기 때문에, 0.16MHz 신호는 특정 시간에서 발생되지 않고 압착공정 동안 일정하게 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 4는 블랭킹 공정(Fig. 2(c))으로 전체 신호에 대한 주파수 스펙트럼은 하단 그림에서 볼 수 있는 데, 0.16MHz의 특성주파수는 관찰할 수 있지만, 75kHz 영역은 관찰되지 않는다. 그러나 가운데 그림인 시간-주파수 영역에서 0.021초에서 75.8kHz, 0.025초에서 0.168MHz, 0.049초에서 79kHz의 특성 주파수가 발생함을 볼 수 있다. 가장자리 전단 공정과 구멍 블랭킹은 동시에 진행되지만 신호는 0.021초와 0.025초에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 0.025초에서 발생하는 신호는 가장자리가 전단 변형 후 전단되기 때문에 0.004초의 시간 지연이 발생하는 것으로 해석할 수 있고, 가장자리 전단 면적이 블랭킹된 구멍의 전단 면적보다 상대적으로 크기 때문에 고주파 성분도 상대적으로 선명하게 나타

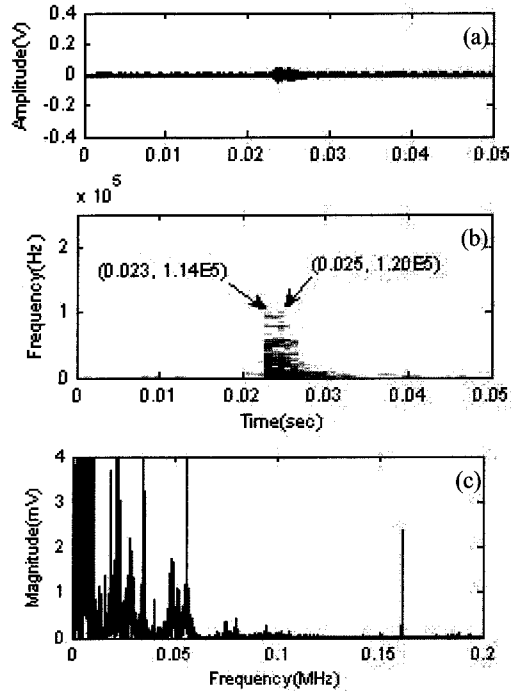


Fig. 5 Signals emitted during bur-compact process: (a) real time data, (b) STFT spectrum, and (c) frequency spectrum

남을 볼 수 있다. 0.021초에 발생하는 신호는 구멍이 블랭킹될 때 발생하는 신호로 해석할 수 있다. 0.049초에서 79kHz 신호는 버가 생성되면서 발생하는 신호로 해석될 수 있다.

Fig. 5는 버 다짐 공정 신호를 분석한 것으로, 단시간-주파수 분석에서 0.023초에서 0.114MHz, 0.025초에서 0.120MHz의 특성 주파수를 볼 수 있으나 이 신호 역시 압착공정에서 처럼 푸리에 변환에 의한 신호 분석에서는 관찰 되지 않고 0.16MHz의 특성 신호만 관찰된다. 버 다짐에서 0.16MHz 신호는 버 다짐 공정 전체에서 발생하는 신호로 해석될 수 있다.

3.2 동시 공정 신호 해석

Fig. 6은 금형을 연마한 직후 압착, 블랭킹, 다짐을 동시 가공할 때 발생하는 음향신호를 수집하여 분석하였다. 0.16MHz의 특성주파수도 Fig. 3-5에 비교하여 크지 않음을 볼 수 있는 데, 펀치 연삭 효과로 해석할 수 있다. 같은 이유로 75kHz 영역대의 특성도 잘 나타나지 않음을 볼 수 있다.

Fig. 7은 금형을 연마한 직후부터 30,000개 생산량을 주

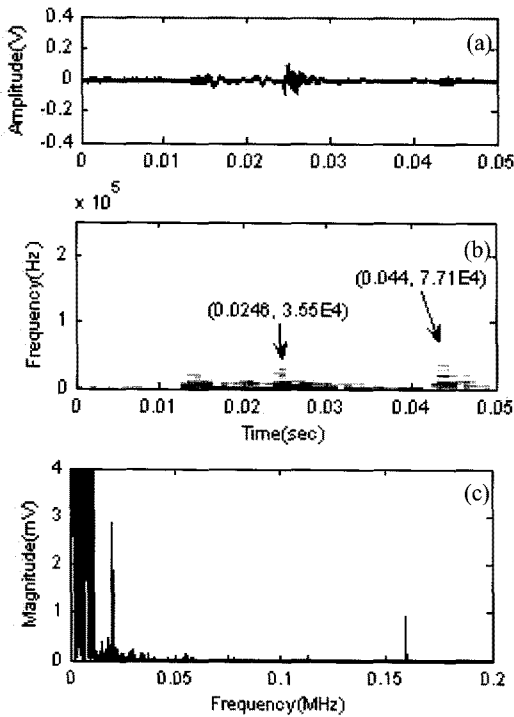


Fig. 6 Signal right after regrinding: (a) real time data, (b) STFT spectrum, and (c) frequency spectrum

기로 음향신호를 수집하여 주파수 특성을 고찰하였다. 압착, 블랭킹, 다짐을 동시 가공할 때 발생하는 신호를 수집, 분석한 것으로 생산량에 따라 특성 주파수의 크기가 변하는 것을 확인할 수 있다. 블랭킹이나 전단공정에서 발생하는 0.16MHz 신호는 0.0246초에서 일정하게 발생되지만, 0.021초 영역에서는 신호의 강도가 상대적으로 약함을 볼 수 있고, 생산량이 증가함에 따라 고주파가 나타남을 볼 수 있다. 0.042-0.043초에서 발생하는 신호의 가장 높은 주파수는 Fig. 7(a)에서 79kHz 이고 Fig. 7(e)에서 59kHz이다. 생산량이 증가할수록 펀치의 마모는 증가하고 버의 크기도 커지는 것으로 해석할 수 있다. Fig. 8은 180,000개-240,000개 생산시점에서의 신호의 분석 결과이다. Fig. 7과 비교해서 버의 특성 주파수는 53kHz로 낮고(Fig. 8(a)), 잡신호가 크게 발생함을 Fig. 8에서 볼 수 있다. 0.043초 영역에서 발생하는 신호가 Fig. 8(c)에서 0.006초 지연됨을 관찰할 수 있는데, 버의 길이가 늘어남을 의미한다. 특히 180,000개 생산시점이 연마시기를 확인하였지만, 분석을 위해서 240,000개 까지 생산하였다.

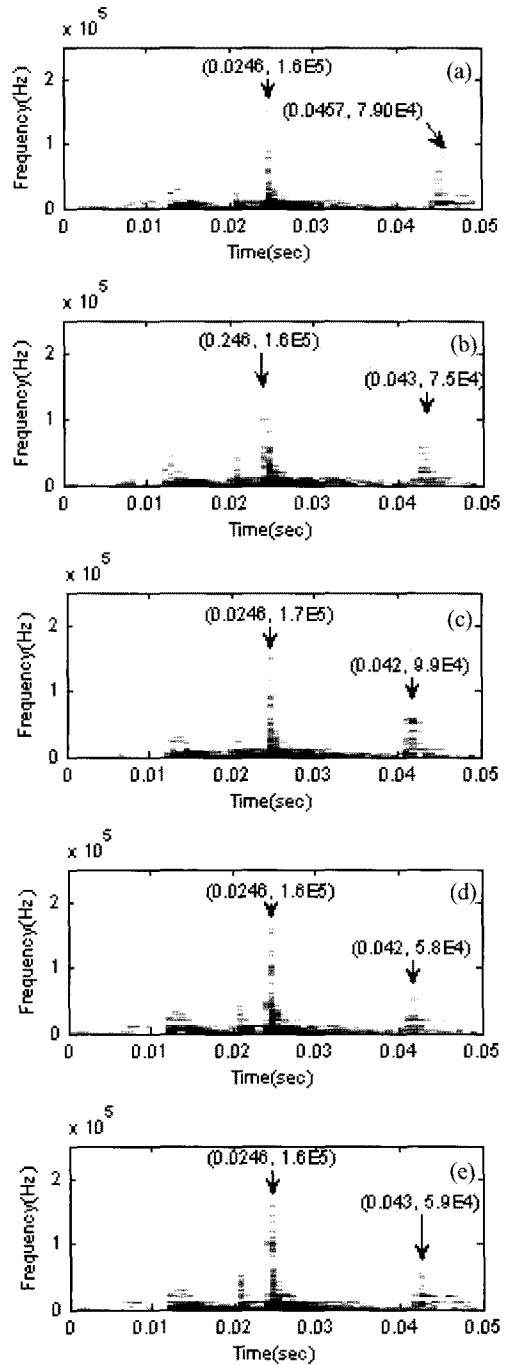


Fig. 7 Signals at about (a) 30,000, (b) 60,000, (c) 90,000, (d) 120,000, and (e) 150,000 strokes

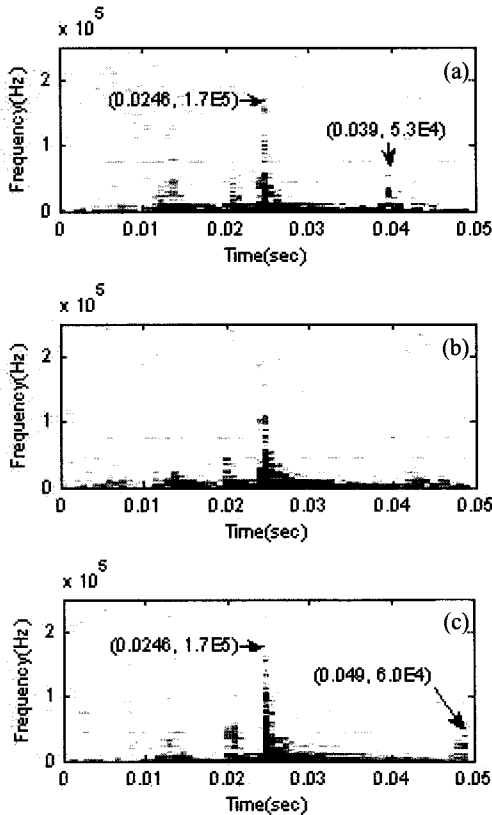


Fig. 8 Signals at about (a) 180,000, (b) 210,000, and (c) 240,000 strokes

4. 결론

헤드 핀을 가공하는 스탬핑 공정에서 발생하는 신호에 대해 음-초음파 영역에서 단위 공정의 특성 주파수를 고찰하고, 동시 공정으로부터 생산량이 증가함에 따른 특성 신호의 변화를 고찰하였다. 또한 시간-주파수 분석은 단시간 동안의 주파수 스펙트럼을 분석하여 특성 주파수의 물리적 의미를 해석할 수 있었다. 결론적으로 소성 변형 및 전단 공정으로부터 0.16MHz 신호가 발생됨을 확인하였다. 이 신호는 다짐 공정에서는 약하게 발생되나, 구멍 블랭킹 및 가장자리 전단 공정에서 강하게 발생하는 것을 고찰할 수 있었다. 둘째로, 버의 크기에 따라 신호는 53kHz - 99kHz 영역에서 특성 주파수를 갖고, 시간 지연으로부터 버 길이 변화를 고찰할 수 있었다. 마모가 증가할수록 버에 의한 특성 주파수는 낮아짐을 고찰할 수 있었다. 셋째로, 180,000개 생산 시

점은 연마시점으로 버의 특성 주파수는 53kHz 였고, 잡신호도 급격히 증가함을 관찰할 수 있었다. 따라서 스탬핑 공정으로부터 발생하는 음향방출 신호의 시간-주파수 분석에 의한 공정별 특성 신호(특히 버로부터 발생하는 신호)의 특성 주파수와 크기변화와 시간지연을 고찰함으로써 금형 마모 상태를 실시간으로 확인하고 연마시기를 결정할 수 있을 것이다.

후기

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구 지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- (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," Proceedings of KSPE conference, April, 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 KSMT, Vol. 1, No. 1, pp. 15~22.
- (6) Ertekin, Y. M., Kwon, Y., and Tseng, T., 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) Axinte, D. A., Gindy, N., Fox, K., and Unanue, I., 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., Arun, 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) Rhee, Z., 2007, "A study on the Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals Generated from Fusion-Welded Butt Joints in Steel during Tensile Test and its Applications," *TKSMTE*, Vol. 16, No. 1, pp. 26~32.
- (13) Kim, Y. Y., and Lee, C. H., 2007, "An Investigation of Acoustic Signal Characteristics in Turning of Aluminum," *Journal of KSNVE*, Vol. 17, No. 6, pp. 507~514.
- (14) Kim, Y. Y., 2009, "Characterization of Acousto-Ultrasonic Signals for Stamping Tool Wear," *Journal of KSNVE*, Vol. 19, No. 4, pp. 386~392.