

광섬유 센서의 보링 바 삽입에 의한 진동측정

The Vibration Measurement of Boring Process by Using the Optical Fiber Sensor at inside of Boring Bar

송두상¹, 홍준희^{2,✉}, 곽양양¹
Doo Sang Song¹, Jun Hee Hong^{2,✉} and Yang Yang Guo¹

¹ 충남대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chung Nam Univ.)

² 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chung Nam Univ.)

✉ Corresponding author: hongjh@cnu.ac.kr, Tel: 010-5263-5423

Manuscript received: 2010.11.1 / Revised: 2011.3.18 / Accepted: 2011.3.23

Chattering in cutting operations are usually a cumbersome part of the manufacturing process in mechanical. Particular, machining performance such as that of the boring process is limited by cutting condition at the movable components. Among various sources of chatter vibration, detrimental point in cutting condition is found a mechanical condition on overhang. It limits cutting speed, depth, surface roughness and tool wear failure as result because the all properties are varying with the metal removal process. In this case, we have to observe the resonance frequencies of a boring bar for continuous cutting. In the established research, boring bar vibration of cutting system has been measured with the aid of accelerometer. However, the inherent parameters of internal turning operations are severely limit for the real time monitoring on accelerometers. At this point, this paper is proposed other method for real time monitoring during continuous cutting with optical fiber at the inside of boring bar. This method has been used a plastic fiber in the special jig on boring bar by based on experimental modal analysis. In this study, improvement of monitoring system on continuous internal cutting was attempted using optical fiber sensor of inside type because usually chattering is investigated experimentally measuring the variation in chip thickness. It is demonstrated that the optical fiber sensor is possibility to measure of chattering with real time in boring process.

Key Words: Chattering (채터링), Overhang (오버행), Boring Bar (보링바), Cutting Condition (절삭조건)

기호설명

$u(t)$: cutting depth of moment .

$u_0(t)$: cutting depth of stable.

$y(t)$: parameter of work-piece.

μ : overlap factor.

$F(t)$: cutting force.

k : k_c (static stiffness), k_m (dynamic stiffness)

w : natural frequency

1. 서론

현재까지 무수히 많은 형태의 공작기계들이 전 세계에 공급되고 있으며, 특히 중앙 아시아의 급속한 경제발전을 주축으로 기계가공분야의 지속적인 발전이 이루어지고 있다.

특히 선반가공에서 보링가공(internal cutting system)은 많은 연구가 이루어지고 있으나 보링바(boring bar)의 오버행(overhang)에 대한 한계로 인한

여 소비자의 욕구를 충족하지 못하고 있다. 즉, 보링가공 시 오버행에 따라 변화하는 동적 특성은 진동 주파수 성분에 직접적인 영향을 미치며 제품의 품질까지도 영향을 미치기 때문이다.¹ 오버행의 한계는 보링바의 재질이 강(steel)의 경우 보링바 직경의 4 배, 초경(tungsten carbide)의 경우 6 배 정도를 보장하는 것이 일반적이며, 그 이상의 오버행이 필요한 깊은 홀(deep hole)가공에서는 절삭조건(회전속도, 이송, 절삭깊이)을 낮추어 사용되고 있기 때문에 생산성 감소로 이어지고 있다.² 다른 대책으로 오버행을 보링바 직경에 7~10 배를 보장하는 경우가 있는데 이는 일반 보링바에 비해 상당히 고가이며, 능동적인 방진(active damping)이 아닌 수동적인 방진(passive damping)의 형태로 이루어진다.²

이는 각 현장마다 다른 작업조건(절삭조건, 장비, 작업자, 소재, 기타)에 따라 보링 가공 시 발생하는 동적 특성인 자려 진동에³ 대한 직접적인 감시(monitors)가 곤란하기 때문에 능동적인 방진바(active damping bar)의 개발이 어려운 실정이다.

진동에 관한 연구는 다양하게 이루어지고 있으나 공작기계, 공구, 공작물 등이 매우 복잡한 동적 특성을 갖고 있으므로 이들이 상호 운동할 때 각종 원인에 의해 진동이 발생한다.

특히 보링공정에서는 공구와 공작물의 주기적인 상대진동이 원인이 되어 정밀도와 공구 수명에 영향을 주며 여러 손실을 초래하게 된다.⁴

따라서 보링 가공 시 발생하는 진동에 대한 실시간 감시측정이 가능한 센서의 개발이 요구된다.

이에 본 연구에서는 보링바의 오버행을 보링바 직경의 7 배 이상으로 하고 보링 가공 시 발생하는 진동에 대해 능동적 방진을 하기 위한 기초연구로서 보링바 내부에 광섬유 센서를 삽입하여 실제 보링가공에서 발생하는 진동을 실시간 측정하고 고찰하는 것을 목적으로 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 이론적 배경

채터링(chattering)은 공작기계에서 공구와 공작물 사이에서 발생하는 과도한 진동을 말하며 자려 진동(self-excited vibration)과 강제 진동(forced vibration)으로 나뉜다. 자려 진동은 절삭공구와 공작물의 사이에서 발생하는 동적 특성에 의해 발생하며 강제진동은 기계내부에 있는 모터, 기어, 베

어링 등에서 많이 발생한다.

자려 진동에 의한 해석은 Fig. 1 과 같이 2 차원 절삭을 기초로 한다.⁵ $u(t)$ 를 순간 절삭량, $u_0(t)$ 를 정상 상태에서의 절삭량, $y(t)$ 를 공작물의 변위라고 하고 T 를 공작물이 1 회전에 걸리는 시간이라 할 때 다음과 같은 관계식이 성립한다.

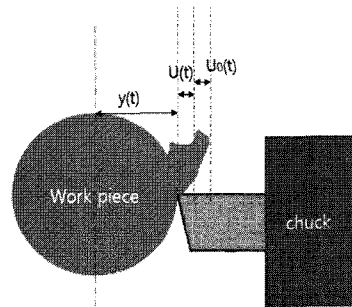


Fig. 1 Analysis model of self excited vibration chatter

$$u(t) = u_0(t) - y(t) + \mu y(t - T) = \frac{1}{N} \quad (1)$$

식(1)을 Laplace 변환하면

$$\mu(s) = \mu o(s) - y(s) + \mu e^{Ts}(s) \quad (2)$$

절삭력과 비절삭 칩 두께와의 관계는 다음과 같이 정의한다.

$$F(t) = kcu(t) \quad (3)$$

양변을 Laplace 변환하면 다음과 같이 된다.

$$F(s) = kcu(s) \quad (4)$$

절삭력 F 와 변위 y 와의 관계를 구조 방정식에 의해 다음과 같은 수식으로 가정 될 수 있다.

$$\frac{y(s)}{F(s)} = \frac{1}{km} Gm(s) \quad (5)$$

위에서 유도된 식을 통해 시스템의 블록선도를 나타내면 Fig. 2 와 같이 된다.

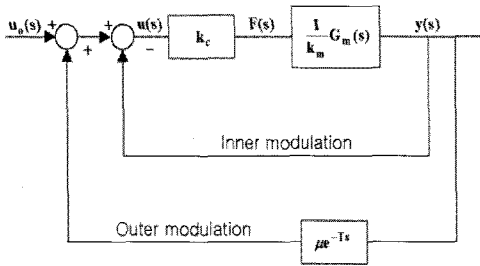


Fig. 2 System block diagram

2.2 HEAD 관련 실험

본 논문에서는 Fig. 3 과 같이 진동 특성의 기초 실험 장치를 구성하기 위해 보링바 앞 단에 조립되는 부분을 별도로 제작하였으며 Head 라 명칭하였다.

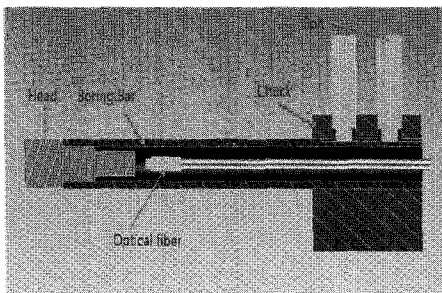


Fig. 3 The structure of Head test

Head 에서 보링바에 삽입되는 구간을 Fig. 4 와 같이 A 라 하고 각기 다른 A 치수 즉, Head-1 은 10mm, Head-2 는 20mm 그리고 Head-3 은 30mm 로 설정하고 충격 실험을 실시하였다.

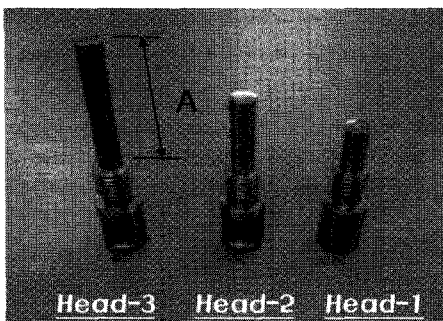


Fig. 4 Photo of the Head

이 실험의 목적은 보링바 내부에 광섬유 센서를 삽입하여 Head 로부터의 반사광을 받아 진동을 계측하는데 진동 신호를 가장 잘 받을 수 있는

Head 의 삽입 길이를 정하기 위함이다.

즉 각각의 보링바 끝부분의 Head 에 충격을 가하여 주파수의 특성을 파악하기 위해 진동실험을 실시하였다.

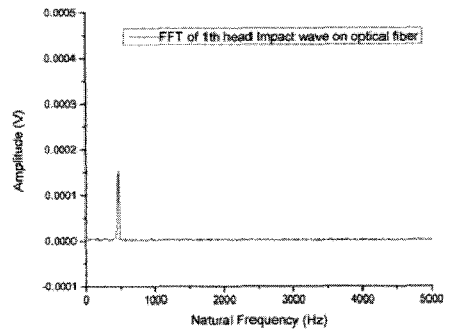


Fig. 5 The FFT of frequency wave with Head-1

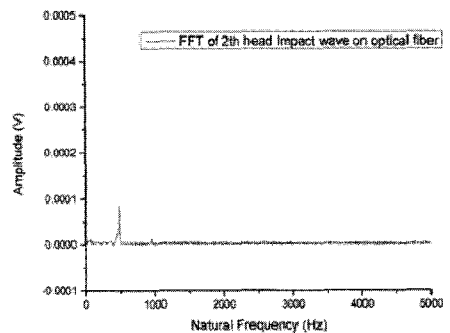


Fig. 6 The FFT of frequency wave with Head-2

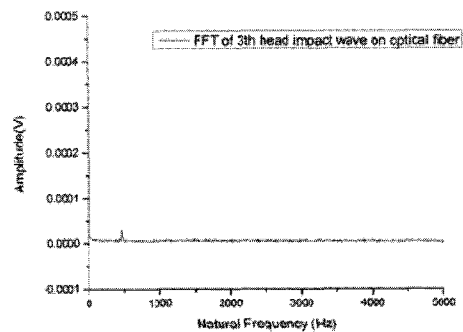


Fig. 7 The FFT of frequency wave with Head-3

각각 실험한 진동을 FFT 분석한 결과, Fig 5 ~ Fig. 7 과 같이 나타났다. 이 결과에 의하면 A 길이가 짧을수록 좋은 감도를 나타내었고 진동 특성의 기초 실험용 Head 로 Head-1 즉, A 의 치수가

10mm 인 Head 가 가장 좋은 감도를 나타내어 이것을 기초 실험의 Head 로 적용하였다.

2.3 진동특성의 기초실험

2.2 절에서 실험한 결과를 토대로 보링바 Head 를 제작하였으며 Head 의 사진 모습은 Fig. 8 과 같다.

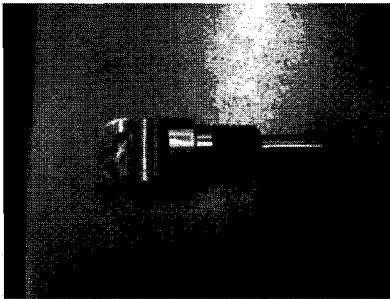


Fig. 8 Photo of the boring bar Head

Fig. 8 과 같이 제작된 보링바 Head 를 이용하여 Fig. 9 와 같은 기초실험장치를 구성하였다. 그림에서 가속도 센서는 광섬유 센서의 진동 실험 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 부가적으로 설치한 것이다.

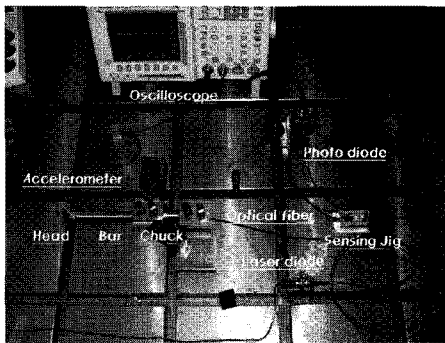


Fig. 9 Photo of the basic test equipment

기초실험 결과 Fig. 10 과 같이 가속도 센서는 400Hz 를, Fig. 11 과 같이 광섬유센서는 475Hz 를 나타내었다.

실험 결과 가속도 센서와 광섬유 센서가 약간의 차이 즉, 75Hz 정도의 차이를 나타냈는데 이것은 광섬유 센서가 보링바 내부에 삽입된 형태이고 가속도 센서는 외부에 부착된 형태이므로 가속도 센서의 자체 질량과 부착 위치의 미세한 변수에 인한 것으로 판단된다.

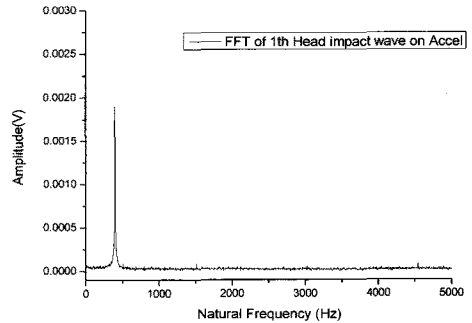


Fig. 10 FFT analysis of cutting force on static property with accelerometer

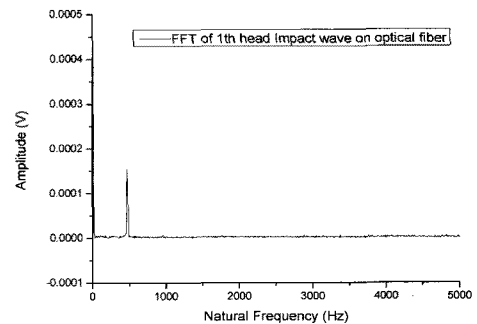


Fig. 11 FFT analysis of cutting force on static property with optical fiber sensor

3. 절삭가공 실험

3.1 광섬유 진동센서

보링바 내부에 삽입되는 광섬유는 오토닉스사의 FD-620-10 모델을 사용하였다.⁶

광섬유 진동센서는 Fig. 12 와 같이 발광 부의 빛을 보링바 내부의 폴리싱한 Head 단면에 반사시켜 단면의 진동에 의한 광량의 변화를 수광부에서 인식하는 형태로 되어 있다.

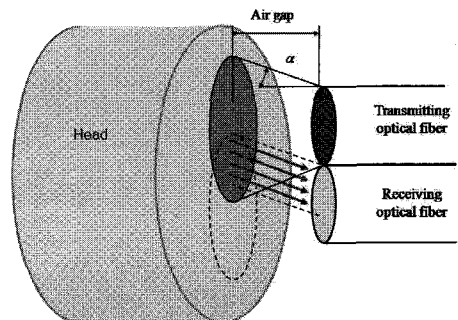


Fig. 12 Principle of sensing system of optical fiber

Fig. 13 과 같이 Head 단면에서 반사되어 수광부에 입사되는 즉, 센싱되는 광량은 정지 시에 A 만큼의 크기를 갖는다.

그러나 진동을 하게 되면 반사면의 기울기가 변하여 반사광의 수광부에 입사되는 광량은 변하며 그에 대한 주파수 특성도 변하게 된다.⁷

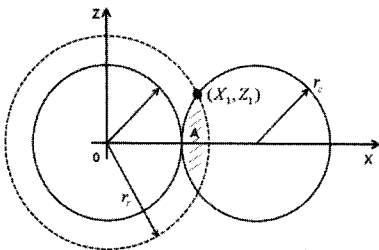


Fig. 13 Sensing area of receiving optical fiber

3.2 장치구성

2.3 절의 진동특성에 대한 기초실험을 토대로 Fig. 14 와 같이 절삭가공 실험장치를 구성하였다.

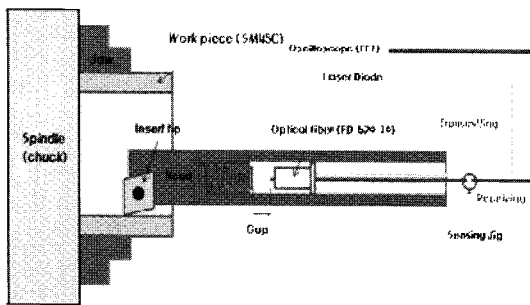


Fig. 14 Structure of test system on cutting process

본 실험에서 보링바의 직경은 $\phi 20$ 으로 설정하였으며 Head 와 Body 를 각각 제작하고 조립하였다.

공작기계는 범용선반(화천기계 400*750)을 사용하였으며 적용공구는 상용품으로 미쯔비시사의 DCMT 11T304-FV/UE 6020 을 이용하였다.

적용공구의 형태는 마름모형이며 모서리각이 55° 이고 한 변의 길이가 11mm 이며 두께는 3.18mm 그리고 코너반경은 0.4mm 이다.

Fig. 15 는 구성된 실험장치의 사진이며 실험에 사용한 공작물의 재료는 합금강의 일반적인 소재인 SM45C 를 이용하였다.

소재의 형태는 내경 $\phi 30$, 외경 $\phi 60$ 그리고 길이 30mm 인 Tube 형태이다.

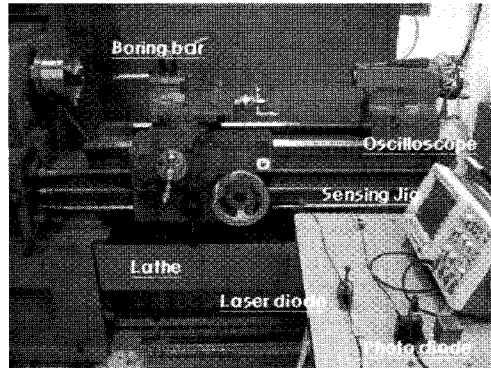


Fig. 15 Photo of composition on equipment

3.3 실험조건

보링바의 오버행은 보링바 직경의 7 배 이상인 150mm 로 설정하였다. 보링바는 Fig. 16 과 같이 슬리브와 척을 이용하여 선반의 공구대에 설치하였다.

Fig. 16 의 설치조건을 토대로 1 차 실험은 회전속도를 1249rpm 으로, 2 차 실험은 620rpm 으로, 그리고 3 차 실험은 440rpm 으로 고정하고 절삭깊이를 각각 0.2mm 와 0.5mm 로 하였다. 이것을 정리한 것이 Table 1 이다.

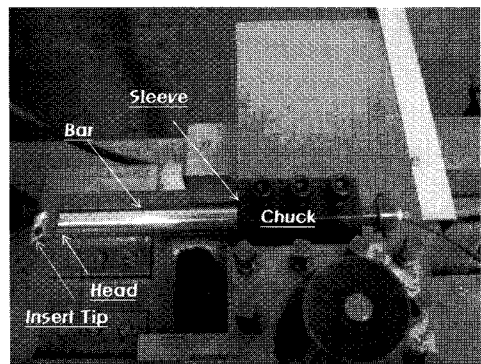


Fig. 16 Photo of Boring Assembly

Table 1 Test condition of boring process

	Rotational speed (rpm)	Depth of cut (mm)
Test1	1249	0.2
		0.5
Test2	620	0.2
		0.5
Test3	440	0.2
		0.5

4. 실험 결과 및 고찰

보링바 내부에 삽입된 광섬유 센서를 통해 3 차 실험을 실행한 결과 1 차 실험의 경우, 절삭 깊이가 0.2(mm)에 대해 Fig. 17 과 같은 신호 특성을 얻었으며 주파수 특성은 700Hz 로 나타났다.

한편 절삭 깊이가 0.5(mm)에 대해서는 Fig. 18 과 같은 신호 특성을 얻었으며 주파수 특성은 625Hz 로 나타났다.

Table 2 Result of chatter vibration boring process

	Depth of cut (mm)	FFT analysis (Hz)
Test1	0.2	700
	0.5	625
Test2	0.2	650
	0.5	525
Test3	0.2	525
	0.5	500

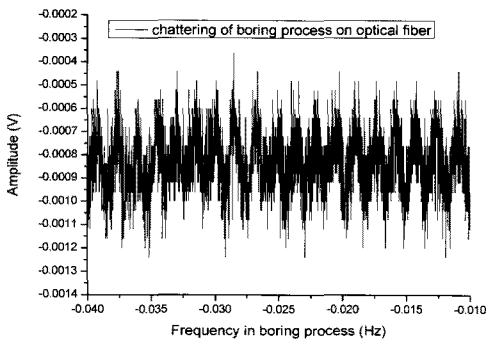


Fig. 17 Chattering of 1th test condition on depth 0.2mm

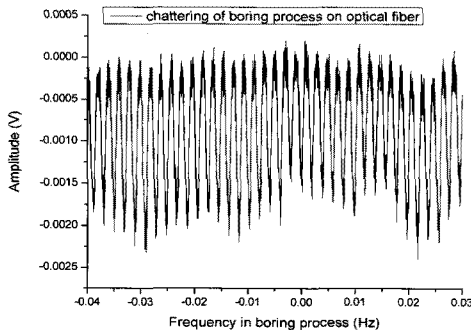


Fig. 18 Chattering of 1th test condition on depth 0.5mm

2 차 실험과 3 차 실험에 대해서도 신호 특성을 통해 FFT 분석한 결과 Table 2 와 같은 결과가 나타났다.

이 결과를 보면 절삭 깊이가 커짐에 따라 주파수 값이 작아졌으며 또한 회전속도가 감소함에 따라 주파수가 감소하는 것을 알 수 있었다.

이것은 절삭 깊이 및 회전 속도, 즉 절삭력⁸에 따라 주파수 특성이 변하는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 상용 가속도 센서의 적용이 곤란한 절삭공정, 즉 보링 가공공정에서 대하여 기존의 많은 연구에서 밝히는 보링 바의 진동문제를 개선하기 위하여 우선적으로 진동에 대한 실시간 모니터링에 중요성을 파악하고자 매우 간단한 구조의 광섬유 센서를 제안하고 보링 바 내부에 삽입한 후, 가속도 센서와 비교하는 기초실험을 통해 그 유효성을 확인하였으며 나아가 보링 바 내부에 삽입된 상태로 보링 가공을 통해 실시간 모니터링의 가능성을 확인하였다.

이에 본 연구에서는 실험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 절삭 깊이에 따라 주파수 특성의 변화를 확인할 수 있었다. 즉, 절삭 깊이가 클수록 채터링에 대한 진폭은 크지만 주파수 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 절삭속도에 따라 주파수 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 회전속도가 낮을수록 낮은 주파수를 나타냈다.

(3) 보링가공 시 발생하는 다양한 외부조건(절삭유, 칩, 기타)에 간섭을 최소화하기 위하여 광섬유 센서를 보링바 내부에 삽입하고 보링 가공을 실험하였으며 이 결과 실시간 진동 모니터링이 가능함을 확인하였으며 실시간 진동 모니터링의 가능 여부를 토대로 능동형 방진바의 연구에 기초가 될 것을 전망한다.

후 기

이 연구는 2009 년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

참고문헌

1. Song, D. S., Hong, J. H., Jeong, H. Y., Kang, D. H. and Kim, B. I., "A Study of the Boring Bar Vibration Measurement using Optical Fiber Sensor," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 107-113, 2009.
2. Handbook from Sandvik Coromant, "Metalcutting Technical guide," pp. A19-A25, 2005.
3. Kondo, E., Tanaka, H. and Kawagoishi, N., "Regenerative Chatter Vibrations of Work-piece in High Speed Cutting Process on Lathe," *Asia-Pacific Vibration Conference*, Vol. 9, No. 2, pp. 454-459, 1997.
4. Roa, B. and Shin, Y. C., "A Comprehensive Dynamic Cutting Force Model of Chatter Prediction in Turning International," *Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 10, pp. 1631-1654, 1999.
5. Lee, H. T., "An Experimental Study on the Chatter Detection and Analysis using Accelerometer in Turning," *Mechanical Engineering*, A Master's Thesis of Chung-Buk National University, 2002.
6. Kang, D. H., "A Study of the Non-Contact Bill Counter using Optical Fiber Sensor," *Mechanical Engineering*, A Master's Thesis of Chung-Nam National University, 2006.
7. Shin, W. C., "Design of multimode optical fiber displacement sensor by transmitting light irradiance distribution modeling," *Mechanical Engineering*, A Doctor's Thesis of Chung-Nam National University, 2006.
8. Youn, J. W., "A Study on the Detection of Chatter Vibration using Cutting Force Measurement," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 3, pp. 150-159, 2000.
9. Moradi, H., Bakhtialr-Nejad, F. and Movahhedi, M. R., "Tunable vibration absorber design to suppress chatter in boring manufacturing process," *International Mechanical Engineering Congress*, Vol. 9, No. C, pp. 1943-1950, 2007.
10. Jung, S. K., Song, D. S., Jeong, J. and Hong, J. H., "A Study of the Boring Bar Internal Vibration Measurement using Optical Fiber Sensor," *Proc. of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference*, pp. 527-528, 2009.
11. Cardì, A. A., Firpi, H. A., Bement, M. T. and Liang, S. Y., "Work-piece dynamic analysis and prediction during chatter of turning process," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, No. 6, pp. 1481-1494, 2008.
12. Mei, C., "Active regenerative chatter suppression during boring manufacturing process," *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, Vol. 21, No. 2, pp. 153-158, 2005.
13. Andren, L., Hakansson, L., Brandt, A. and Claesson, I., "Identification of motion of cutting tool vibration in a continuous boring operation-correlation to structural properties," *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 18, No. 4, pp. 903-927, 2004.
14. Ema, S. and Marui, E., "Suppression of chatter vibration of boring tools using impact dampers," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 8, pp. 1141-1156, 2000.
15. Kim, J. S., Kang, M. C. and Park, S. K., "Dynamic Behavior of Boring Bar with Continuous System Analysis," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 38-46, 1994.
16. Chun, S. H. and Ko, T. J., "A Study on the Dynamic Response Characteristics of Lathe Boring Bar," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 8, pp. 62-69, 2010.