

보링바 고유진동 계측을 위한 광섬유 진동센서 연구

A Study of the Boring Bar Vibration Measurement using Optical Fiber Sensor

송두상^{1,✉}, 홍준희¹, 정황영¹, 강대화², 김병인³
Doo Sang Song^{1,✉}, Jun Hee Hong¹, Hwang Young Jeong¹, Dae Hwa Kang² and Byung In Kim³

¹ 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, ChungNam Univ.)

² 한국조폐공사 (Korea Minting and Security Printing Corp.)

³ 한국기계연구원 (Korea Institute of Machine & Materials)

✉ Corresponding author: machine626@naver.com, Tel: 042-670-6690

Manuscript received: 2008.6.26 / Revised: 2008.12.8 / Accepted: 2009.1.15

In this paper, we studied of measurement the vibration of natural frequency using optical fiber sensor. The boring bar for measurement of vibration in use optical fiber sensor has the advantage of direct measure for the frequency than accelerometer. Because it deal with output value on electrical signal of optical fiber in physical disturbance when it measures the frequency of vibration. The optical fiber sensor measured the vibration of boring bar by the gap in sensing jig while optical fiber just kept contact with boring bar. A prototype system was composed of jig part with gap and optical system part. In this paper, we found out the possibility to measurement of vibration by the gap in use optical fiber.

Key Words : Overhang (오버행), Natural Frequency (고유진동수), Boring Bar (내경절삭공구)

기호설명

α = maximum incident angle of optical fiber

Θ = angle between optical axis of beam

$\Delta \Theta$ = a small area of angle between optical axis of fiber

r_c = radius of optical axis of beam

r_r = radius of irradiated area on image plan of receiving fiber

L = overhang

E = elasticity modules

E_0 = incident intensity of illumination

b = the gap between transmitting optical fiber and receiving optical fiber

1. 서론

선반의 보링가공에서는 보링바의 오버행이 또 하나의 변수가 되어 외경가공대비 절삭조건에 대한 제한을 가진다. 따라서 마찰진동에 대한 실시간 측정이 필요하며, 더불어 보링바 자체의 능동적인 방안이 필요하다.

그러나 마찰진동을 측정하기 위해서는 보링바의 오버행에 따르는 고유진동수에 대한 고찰이 우선되어야 한다.

기존의 많은 연구에서 고유진동수(Natural Frequency) 측정은 가속도 센서나 깎 센서를 이용하여 외관보 형태의 실험적 시편을 통해 측정된 것이 대부분이다.¹

특히 선반을 통한 절삭가공에서는 강제진동(Forced Frequency)의 하나인 마찰에 의한 진동(Chatter)이 발생한다.² 이를 측정하기 위하여 외경가공을 토대로 진동여부를 측정하였다.

이에 본 논문에서는 진동을 측정하기 위한 기존의 상용화 센서 이외에 다른 방법을 통한 진동 측정의 가능성을 고찰한다. 향후 가공에서 발생하는 여러 진동들이 공진되어 야기되는 문제점들을 줄이기 위하여 진동에 대한 실시간 감시와 신호화가 필요하다. 나아가 감지된 진동신호를 또 다른 입력신호로 활용해야 할 것이다.

특히 보링작업은 외팔보 형태의 보링바가 공작물의 내부로 진행되면서 가공된다. 이에 내부에서 칩이나 절삭유 의 비산이 발생하여 진동이 야기되는 절삭위치에 기존의 가속도 센서나 갭 센서로 접근하기가 매우 곤란하다.

본 연구에서는 기존의 센서에 비해 구조적으로 간단하고 제작비용이 저렴하며 높은 성능을 구현할 수 있는 광섬유 센서를 이용하였다. 광섬유 센서는 관련 부품들의 성능향상으로 회전, 가속도, 전기, 자기장, 온도, 압력, 음파, 진동,³ 위치, 응력, 습도, 점도, 화학 측정에 사용 및 연구되고 있다. 광섬유 센서의 진동 측정에 상용 가속도 센서와 비교 고찰하고 광섬유 센서의 진동측정의 가능성을 검토하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 진동특성 해석

본 논문에서는 보링바의 고유진동수를 측정하기 위해 앞서 외팔보 진동이론을 바탕으로 외팔보의 3 차원 시뮬레이션 모드 해석하였다. 이를 통하여 보링바의 고유진동수를 간접적으로 예측하고 진동 모드에 대한 경향을 분석하였다.

해석에는 원통 외팔보로 간주하고 척과 슬리브 그리고 보링바의 조립된 상태로 고려하여 보링바의 오버행에 대한 고유진동수의 변화를 확인하고 각 모드별 주파수의 차이에 대하여 고찰하였다.

보링바의 진동특성의 유한요소해석은 상용프로

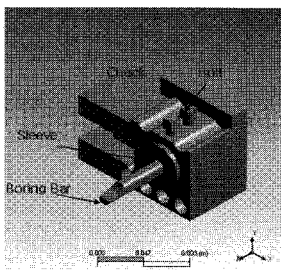


Fig. 1 Model of Analysis

그램인 Ansys workbench 를 이용하였다. 해석모델은 Fig. 1 과 같으며 그림에서의 해석변수는 보링바의 직경과 오버행이다.

해석에 적용한 보링바는 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있는 일반적인 스틸 보링바를 직경 (D) Ø16, Ø20, Ø25 로 3 개를 선정하였다. 보링바의 오버행(L)은 각 직경의 3 배, 5 배, 7 배로 나누어 실시하였다.

오버행과 직경의 모습은 Fig. 2 와 같으며 관계식은 다음과 같다.

Overhang L (mm) = n × D(Ø) (1)

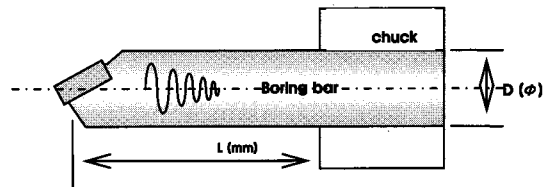


Fig. 2 Schematic diagram of boring bar

Fig. 2 를 토대로 여러 모드에 대하여 해석하였으나 보링바에 대한 진동특성은 1 차 모드와 2 차 모드로 국한되었기 때문에 본 논문에서는 1 차와 2 차 모드에 대해서만 논하였다.

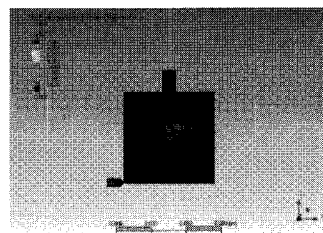


Fig. 3 (a) Radial force of mode analysis(1st mode)

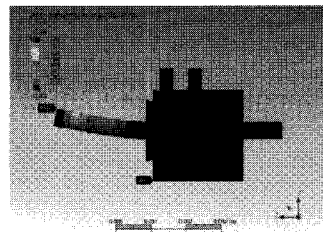


Fig. 3 (b) Cutting force of mode analysis(2nd mode)

본 논문에서는 Fig. 3 과 같이 볼트로 척킹된 방

향을 주분력(Cutting force), 그에 수직되는 방향을 배분력(Radial force)이라 한다.

2.2 진동특성 고찰

1 차 모드(Radial force)와 2 차 모드(Cutting force)에 대해 고유진동수를 시뮬레이션한 결과 Fig. 4 및 Table 1 과 같다.

그 결과 보링바의 직경이 작을수록 높은 고유진동수를 가지며, 오버행이 길수록 낮은 고유진동수를 보였고 주분력과 배분력의 고유진동수는 보링바의 오버행에 따라 동일한 경향을 나타내었다. 그러나 주분력 방향으로 척킹 된 볼트로 접촉면의 강성이 증가하여 배분력 보다 주분력의 고유진동수가 약간 높은 경향을 나타내었다

Table 1 Result of Natural Frequency

Boring bar		Cutting force (Hz)	Radial force (Hz)
Dia.	overhang		
Ø16	3D	3971	3908
	5D	1562	1549
	7D	824	820
Ø20	3D	3179	3148
	5D	1239	1234
	7D	654	651
Ø25	3D	2509	2469
	5D	998	987
	7D	521	524

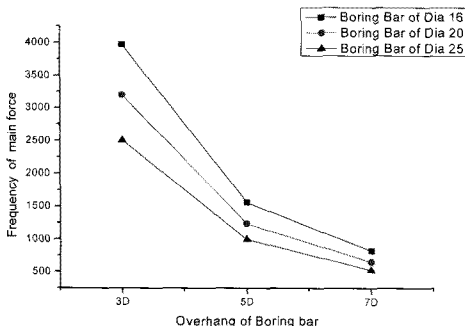


Fig. 4(a) Cutting force trend of natural frequency for overhang on analysis

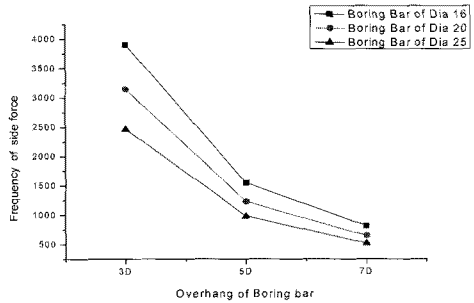


Fig. 4(b) Radial force trend of natural frequency for overhang on analysis

3. 광섬유 진동센서의 설계

3.1 광섬유 진동센서의 원리

투광섬유로부터 방사되는 빛은 일정한 α 각으로 퍼져나가며 일정거리 b 만큼 떨어진 수광 면의 γ, γ' 인 원형조사면적을 가진다. 그러므로 방사된 빛의 일부분만 수광 섬유로 입사된다.⁴

광섬유로부터 나오는 광속(Φ)과 평면에 조사된 광속이 보존됨을 전제로 일정한 광량의 크기 E 를 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{\Phi t}{\pi r^2} \tag{2}$$

식(2)에 $r_c = r_t + b \tan \alpha$ 를 적용하면 거리 b 에 대한 조도분포를 해석할 수 있다.

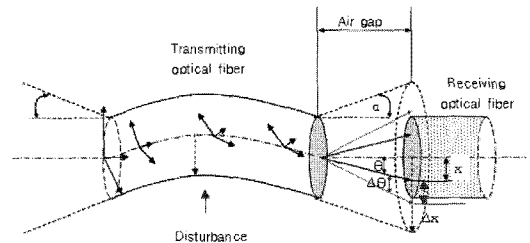


Fig. 5 Principle of sensing with optical fiber

α 이내에 방사각도 θ 가 존재하는 동일한 거리 b 에서 방사각도 θ 에 따른 x 는 다음과 같은 관계를 갖는다.⁵

$$x = b \tan \theta \tag{3}$$

이에 투광파이버에 외란을 가하면 투광파이버에서 방사되는 빛이 외란에 비례하는 만큼 θ 각에서 $\Delta\theta$ 만큼의 변화를 유발하여 Δx 의 거리만큼의 조도분포 변화가 광량의 손실변화로 야기되고 식 (4)와 같이 광 강도의 크기 변화가 변화로 유발된다.

이러한 변화는 외란의 주파수 특성과 동일한 주파수 성분을 갖는다.

$$E = \frac{\theta t}{\pi(\Delta x + x)^2} \tag{4}$$

3.2 가진기에 의한 진동 센서의 성능평가

진동 센서의 최적적인 성능을 위해 Fig. 6 과 같이 시험 센싱 시스템을 구성하였고 두 가지로 실험하고 고찰하였다.

Fig. 6 과 같이 레이저다이오드에 연결된 광섬유와 포토다이오드에 연결된 광섬유를 지그를 이용하여 간극을 주고 가진기로 강제진동을 주었다.

그러면 가진기의 강제진동에 의해 변화하는 광 강도에 대한 주파수 특성이 단선된 수광 광섬유를 통해 포토다이오드로 수신되고 오실로스코프로 신호를 출력한다.

가진은 함수발생기를 통해 $t = \infty$ 의 정현파를 가진기에 전달하여 가진 하도록 장치를 구성하였고 장치에 대한 사항은 Table 2 와 같다

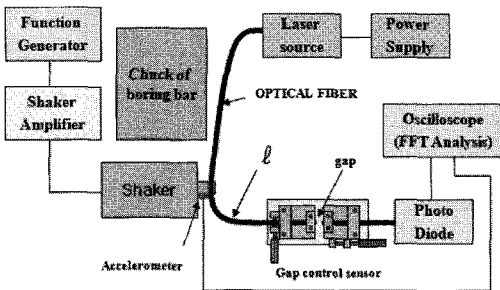


Fig. 6 Block Diagram of Test System

Table 2 Device of installation on vibration

Component	Model name	Specification
Optical fiber sensor	FD-620-10	∅1
Shaker	Wilcoxon	RMS 1.5 AMS
Function generator	FF-1883	1~100 Hz
Oscilloscope	TDS3000	DC 500MHz

첫 번째 실험은 가진기와 센싱 지그 사이의 광부의 광섬유 길이를 변수로 하여 성능 실험을 하였다. 광섬유 길이는 각각 짧은 것을 100mm 로 하고 긴 것은 1000mm 로 하였다. 이에 대하여 주파수를 100, 300, 500, 800, 1200, 1500, 1800, 2100Hz 의 정현파 강제진동을 가하여 센싱 감도를 고찰하였다.

광섬유 길이에 관계없이 저주파 보다 고주파의 감도가 상대적으로 낮은 경향을 알 수 있었으며 광섬유 길이에 따라 진폭의 차이가 있음을 알 수 있었다.

광섬유의 길이가 길수록 보다 높은 감도를 보였으며 저주파(100Hz)에서도 노이즈가 작은 것을 알 수 있었다.

이는 가진기와 센싱지그 사이의 광섬유 길이가 짧으면 가진기의 진동과 광섬유의 물리적인 진동이 시간에 따라 중첩되어 노이즈 발생에 직접적인 영향이 있음을 실험을 통해 알 수 있었기에 이후 광섬유 진동센서 실험에서는 광섬유의 길이를 1000mm 이상의 조건에서 실시하였다.

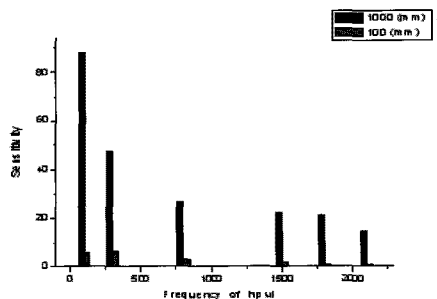


Fig. 7 Sensitivity of optical fiber length

$$Sensitivity = \frac{\text{signal of output with photodiode}}{\text{signal of input with shaker}} \tag{5}$$

두 번째 실험은 센싱 간극을 변수로 성능 실험을 하였다. 센싱 지그의 간극 크기는 0mm 부터 5mm 까지 1mm 간격으로 하고, 가진 주파수를 100, 500, 1000, 2100Hz로 나누어 센싱 감도를 고찰하였다.

Fig. 8(a)는 갭이 1mm 로서 에서도 0mm 와 마찬가지로 저주파에서 노이즈가 발생하며 고주파로 갈수록 감도 및 노이즈가 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는 갭이 4mm 로서 그래프가 100Hz 의 저주파에서 노이즈가 감소하는 것을 알 수 있고, 다른 주파수 대역도 0mm~2mm 의 갭 조건보다 감도가 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 8(c)는 갭이 5mm 의 경우에는 다시 저주파에서 노이즈가 발생하고 고주파의 진폭도 3mm~4mm 대비하여 낮아지는 것을 알 수 있다.

실험결과 센싱 지그의 간극은 4mm 에서 가장 좋은 감도를 나타내었다.

따라서 본 실험에서의 광섬유 진동센서는 광섬유의 길이를 1000mm 이상으로 하고 센싱 간극은 4mm 로 구성하였다.

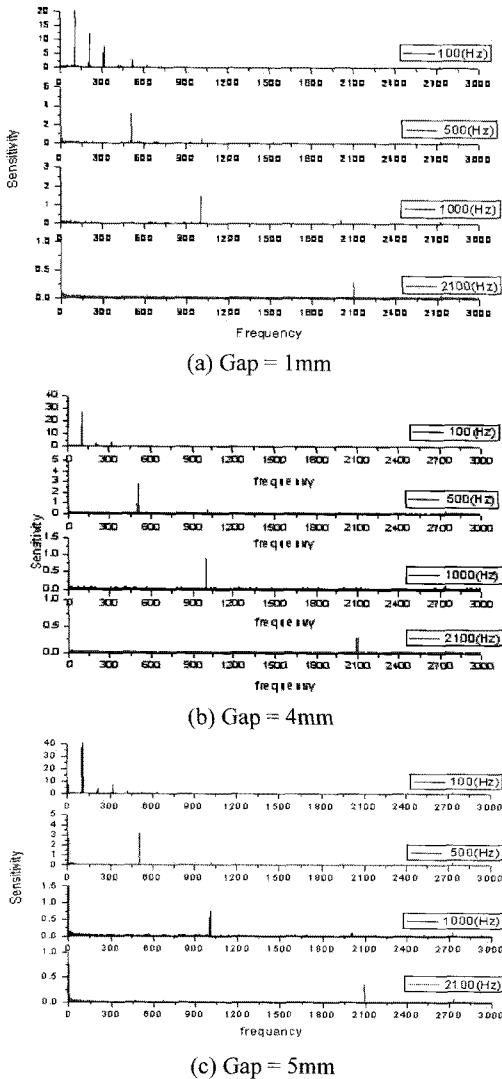


Fig. 8 FFT analysis according to gap size

4. 측정방법 및 실험고찰

4.1 측정방법

보링바에 센서 부착 시 부착 방향과 위치에 따라 고유진동수의 변동여부를 검토하기 위하여 센서의 부착 위치에 따른 진동의 변화를 측정 검토하였다.

측정은 상용화된 가속도 센서를 이용하여 주분력 방향과 배분력 방향으로 Fig. 9 와 같이 A, B, C 구간으로 나누어 각각의 위치에서의 고유진동수를 측정 및 비교 고찰하였다.

가속도 센서는 부착위치에 따라 방향성을 가지고 있으므로 충격망치도 가속도 센서의 부착의 방향성에 맞추어 주분력 방향과 배분력 방향으로 나누어 타격하였다.

보링바는 Ø16 을 이용하고 오버행은 5D 로 설정하여 실시하였다.

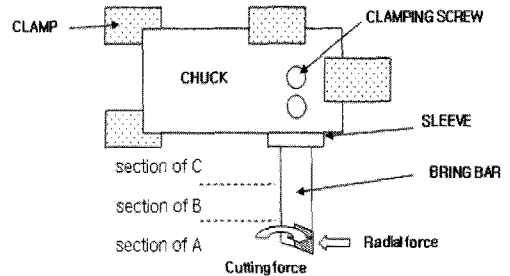


Fig. 9 Assembly condition

센서의 부착위치와 타격위치를 변수로 하고 타격횟수는 각 위치에서 10 회 이상을 실시하였고 table 3 과 같이 보링바의 오버행에 따라 센서의 위치를 3 구간으로 나누었다.

그러나 Fig. 9 의 A, B, C 부분으로 나누어 부착하여도 같은 방향에서는 고유진동수의 변화가 없는 것으로 고찰되었다.

Table 3 Natural frequency in each position

Boring bar	A section	B section	C section
Cutting force	1.6 kHz	1.6 kHz	1.6 kHz
Radial force	1.5 kHz	1.5 kHz	1.5 kHz

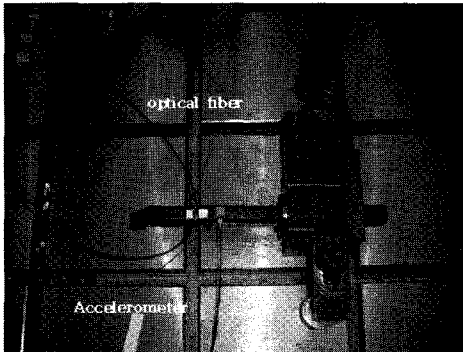
즉 보링바의 오버행에 대한 고유진동수 측정은 접근성이 용이한 위치에 센서를 부착하여도 결과에 영향이 없다는 결과를 토대로 센서의 부착위치

는 타격과 간섭을 고려하여 C 위치에 부착하고 측정 시스템을 구성하였다.

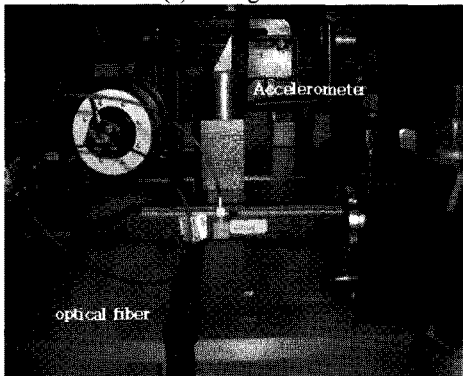
4.2 실험고찰

광섬유 진동센서의 유효성을 검증하기 위해 광섬유 진동센서와 상용 가속도 센서를 Fig. 10 과 같이 주분력과 배분력에 대하여 같은 부위에 센서를 부착 하였다.

유한요소 해석 할 때와 동일하게 3 종류의 보링바(직경이 각각 Ø16, Ø20, Ø25)에 대해 각각 3D, 5D, 7D 의 오버행을 변수로 하고 가속도센서와 광섬유 진동센서를 동시에 이용하여 보링바의 고유진동수를 실험하였다.



(a)Cutting force

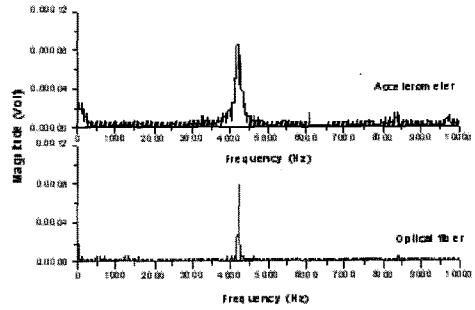


(b)Radial force

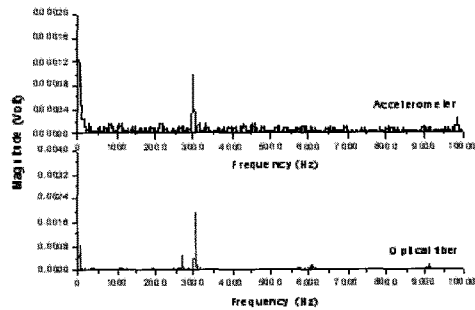
Fig. 10 Photograph of Test System

실험 결과는 Fig. 11 과 같으며 Table 4 와 같이 가속도 센서와 광섬유 진동센서에서 측정한 각각의 주파수 값은 일치하거나 동일한 경향임을 알 수 있었다.

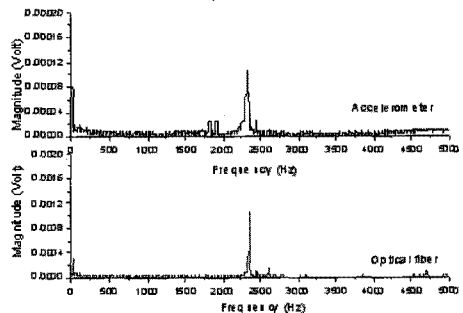
즉 광섬유진동센서가 상용 가속도 센서 및 유한요소해석의 결과와 동일하거나 거의 일치하므로



(a) Ø16



b) Ø20



c) Ø25

Fig. 11 FFT analysis of cutting force on the boring bar with overhang(3D)

Table 4 Final compared data with test

Boring bar Dia.	Overhang	Ansys analysis	Accelerometer	Optical fiber
Ø16	3D	3971	4185	4200
	5D	1532	1645	1650
	7D	824	860	865
Ø20	3D	3197	2985	3005
	5D	1239	1185	1185
	7D	652	645	645
Ø25	3D	2508	2585	2605
	5D	997	995	1005
	7D	524	540	545

본 논문에서 제안한 광섬유진동센서가 매우 유효하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 상용 가속도 센서로 적용이 곤란한 절삭상태에서 보링바의 진동측정 문제에 대해 매우 간소한 구조의 광섬유 센서를 제작하여 그 적용 가능성을 확인하였다.

이에 광섬유의 길이, 고정구 간극에 따른 진동 측정신호의 특성을 고찰하고 최적의 구성으로 광섬유 진동센싱 장치를 제작하였다.

이 조건으로 제작된 측정 장치를 이용하여 실험하였고 상용 가속도 센서와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최적의 광섬유 진동센서장치를 구성하는데 광섬유의 길이가 길수록 좋으며 고정구 간극은 4mm 일 때 가장 감도가 우수하였다.

(2) 유한요소해석과 상용 가속도 센서 결과를 광섬유 진동센서와 비교한 결과 거의 동일한 결과를 보였으며 오히려 광섬유 진동센서의 고유진동수 측정감도가 보다 우수함을 확인하였다.

따라서 본 논문에서 제안한 보링바의 진동 측정에 광섬유 진동센서를 이용할 수 있는 가능성을 확인했다.

향후 광섬유의 타입별, 광원의 종류별 센싱 감도에 대한 비교 검토가 이루어지면 가공 시 발생하는 진동에 대한 효율적인 측정이 가능할 것으로 전망한다.

참고문헌

1. Youn, J. W., "A Study on the Detection of Chatter Vibration using Cutting Force Measurement," Trans. of KSMTE, Vol. 9, No. 3, pp. 150-159, 2000.
2. Choi, C. K., Lee, D. J. and Lee, W. Y., "A Study on the Efficiency Improvement of a Anti-Vibration Boring Bar," Research Institute of Industrial Technology, Vol. 13, No. 1, pp. 149-154, 1998.
3. Yang, Y. C., Hwang, W. B., Park, H. C. and Han, K. S., "Vibration Sensing and Impact Location Measurement Using Intensity-Based Optical Fiber Vibration Sensor," J. of KSCM, Vol. 13, No.5, pp. 1-9, 2000.
4. Shin, S. C. and Namgung, S., "Influence of Chucking Conditions on the Chatter Vibration Commencing Point in Turning," Trans. of KSMTE Vol. 7, No.1, pp. 89-94, 1998.
5. Shin, W. C., "Design of multimode optical fiber displacement sensor by transmitting light irradiance distribution modeling," A doctor's thesis of Mechanical Engineering on Chung-nam National University, 2006.
6. Giallorenzi, T. G., "Optical fiber sensor technology," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 108, No. 4, pp. 472-511, 1982.
7. Grattan, K. T. V. and Sun, T., "Fiber optic sensor technology: an overview," Sensor and Actuators A:Physical, Vol. 82, No. 1, pp. 40-61, 2000.
8. Wickersheim, K. A. and Hyatt, W. D., "Commercial application of fiberoptic temperature measurement," Fiber Optic Sensors IV, Proc. SPIE, Vol. 1267, pp. 84-96. 1990.