

# 복합재료 보링바의 동적 특성에 관한 연구

황희윤\* · 김진국\* · 이대길\*\*

## A Study on the Dynamic Characteristics of the Composite Boring Bar

Hui Yun Hwang, Jin Kook Kim and Dai Gil Lee

**Key Words** : Boring bar (보링바), Composite (복합재료), Chatter vibration (채터 진동)  
Dynamic stiffness (동적 강성), Specific stiffness (비강성), Damping (감쇠)

### ABSTRACT

Machining of deep holes with conventional boring bars frequently induce chatter vibration because of their low dynamic stiffness which is defined as the product of static stiffness and damping of conventional boring bar materials. In addition, the specific stiffness ( $E/\rho g$ ) of boring bars is more important than the static stiffness to increase the fundamental natural frequency of boring bars in high speed machining. Therefore, boring bar materials should have high static stiffness and high damping as well as high specific stiffness. The best way to meet requirements is to employ fiber reinforced composite materials for high speed boring bars because composite materials have high static stiffness, high damping and high specific stiffness compared to conventional boring bar materials. In this study, the dynamic characteristics of carbon fiber epoxy composite boring bars were investigated. From the metal cutting test, it was found that the chatter was not initiated up to the ratio of length to diameter of 10.7 at the rotating speed of 2,500 rpm.

### 1. 서론

절삭 가공시 채터 (Chatter) 현상은 절삭 깊이나 절삭 속도가 공구나 공작 기계의 절삭 안정성 (Stability of metal cutting)의 한계를 넘게 되면 발생한다. 채터 현상 없이 가공이 가능한 최대 절삭 깊이는 공구의 동적 강성 (Dynamic stiffness)에 비례하며, 동적 강성은 정적 강성 (Static stiffness)과 감쇠 (Damping)의 곱으로 표현된다 [1]. 따라서, 절삭 공구의 동적 특성을 향상시키기 위하여 절삭 공구의 재료는 높은 정적 강성과 감쇠를 가져야 한다. 또한, 고속 가공에 사용되는 공구는 선회 진동 (Whirling vibration)이 고려되어야 하므로, 고유

진동수를 높이기 위하여 높은 비강성 (Specific stiffness,  $E/\rho g$ )을 가져야 한다 [2].

공구 재료로 널리 사용되는 강은 낮은 정적 강성 및 감쇠로 인하여 길이 대 직경 비 (Ratio of length to diameter,  $L/D$ )가 5 이상인 보링바를 제작하는데 한계가 있다 [3-4]. 이러한 한계를 극복하기 위하여, 튠드 댐퍼 (Tuned damper), 임팩트 댐퍼 (Impact damper), 가이드 패드 (Guide pad) 등의 특수한 장치를 이용하여 보링바의 동적 강성을 향상시키기 위한 연구가 수행되었으며,  $L/D$ 가 6인 보링바의 제작이 가능하였다 [5-6]. 또한, 텅스텐 카바이드 (Tungsten carbide)와 같은 높은 정적 강성을 가지는 재료를 이용하면  $L/D$ 가 7 이상인 보링바의 제작이 가능하다 [7]. 그러나, 특수 장치나 고강성 금속 재료를 이용하여 제작된 보링바는 비강성이 작아 작동 회전수의 향상에 한계가 있으며, 가격이 높은 단점이 있다 [3].

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 교수

따라서, 동적 강성과 비강성을 동시에 향상시킬 수 있는 섬유 강화 복합재료를 이용한 보링바 제작에 관한 연구가 Lee [7], Nagano [8] 등에 의하여 수행되었으나, 상기 연구는 공작물이 회전하여 가공이 수행되는 경우를 대상으로 하였으며, 보링바가 회전하는 경우나 고속 가공에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 정적 강성, 감쇠 및 비강성이 우수한 탄소섬유 에폭시 복합재료를 이용하여 채터 현상 없이 고 회전수에서 가공이 가능한 복합재료 보링바의 동적 특성에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 복합재료 보링바의 동적 특성

복합재료 보링바는  $L/D$ 가 6인 기존의 텅스텐 카바이드 보링바 (Fig. 1)를 기준으로 설계되었다. 복합재료 보링바의 기본 형상과 단면의 형상은 Fig. 2와 Fig. 3과 같다. 복합재료 보링바는 심재, 복합재료, 접착층 및 강철 커버로 구성된다. 보링바의 대부분을 구성하는 복합재료는 보링바의 정적 강성, 감쇠 및 비강성을 향상시키며, 커버는 복합재료를 외부 환경으로부터 보호한다. 커버와 복

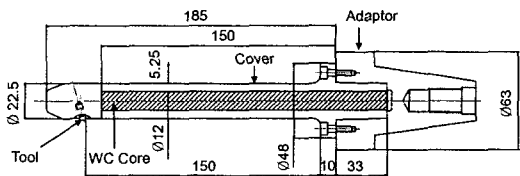


Fig. 1 Drawing of conventional tungsten carbide boring bar (Units in mm).

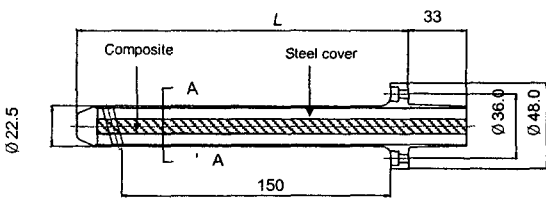


Fig. 2 Drawing of composite boring bar (Units in mm).

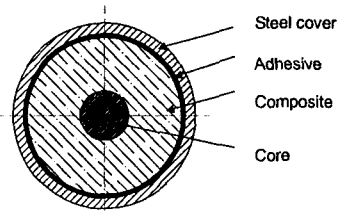


Fig. 3 Section view of composite boring bar (A-A').

합재료의 접합을 위한 접착층과 심재는 보링바의 감쇠를 향상시키는 역할을 한다. 기존의 텅스텐 카바이드 보링바와의 비교를 위하여, 보링바의 외경, 공구의 위치, 결합부의 형상을 동일하게 결정하였으며, 심재의 종류 및 직경, 커버의 두께와 접착 두께를 변수로 하여 복합재료 보링바를 제작하였다. 본 연구에 사용된 복합재료는 SK Chemicals에서 생산하는 피치계열 고강성 탄소섬유 에폭시 프리프레그 (URN 300)를 이용하여 제작되었으며, 기계적 물성은 Table 1과 같다. 강철 커버와 복합재료 접합을 위하여 3M (USA)사의 에폭시 접착제 (DP 460)을 사용하였다.

먼저, 복합재료 보링바의 설계 변수에 따른 동적 특성을 파악하기 위하여 Fig. 4와 같은 단순한 형상의 보링바 시편을 제작한 후, 진동 실험을 수행하였다. 진동 실험은 실제 보링바와 동일한 경계 조건인 고정-자유 경계 조건 하에서 수행되었으며, 고정부 길이는 40mm이고, 토크 렌치를 이용하여 동일한 클램핑 하중을 부여하였다. 주파수 응답함수는 주파수 분석기 (FFT analyzer, B&K 3560C)를 통하여 측정하였다.

### 2.1 심재의 종류 및 직경 변화에 따른 영향

심재의 직경 및 종류에 변화에 따른 고유 진동수 및 감쇠비의 변화를 알아 보기 위하여 커버의 두께와 접착층의 두께를 각각 1 mm, 0.1 mm로 고정하였다.

Fig. 5와 6은 심재의 직경과 종류에 따른 고유 진동수 및 감쇠비를 나타낸다. 진동실험 결과로부터 심재의 직경이 6 mm 까지는 고유 진동수와 감쇠비가 거의 일정하였으며, 상대적으로 고유 진동수의 변화가 크을 알 수 있었다. 그러나, 심재의

Table. 1 Mechanical properties of carbon-fiber epoxy composites (URN 300)

Longitudinal modulus (GPa)	382
Transverse modulus (GPa)	5.10
Shear modulus (GPa)	5.53
Poisson's ratio	0.29
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,755

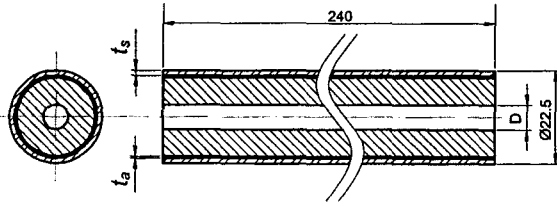


Fig. 4 Drawing of composite boring bar specimen (Units in mm).

종류에 따라서는 감쇠비의 변화가 매우 심하였으 며, 납을 사용한 6, 7번의 경우가 다른 경우에 비

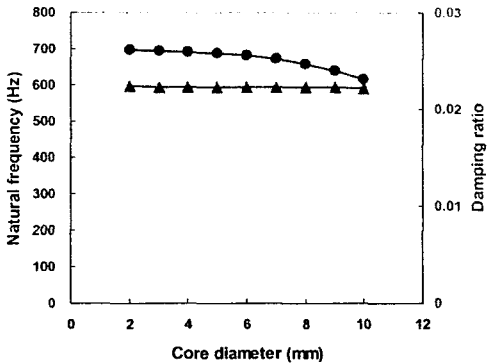
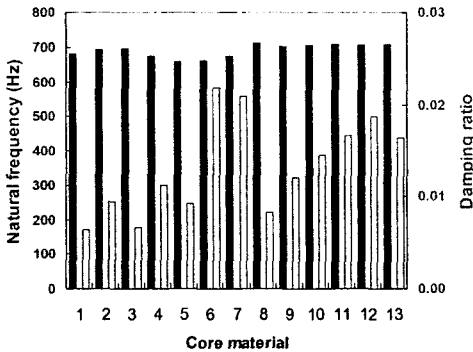


Fig. 5 Fundamental natural frequency (●) and damping ratio (▲) of composite boring specimens with respect to core diameter.



Case	Damping core material
1	Steel
2	Aluminum
3	Tungsten carbide
4	Polyoxymethylene
5	Teflon
6	Lead
7	Lead in stainless steel pipe
8	Stainless steel pipe
9	Alumina particle (#36) in stainless steel pipe
10	Alumina particle (#120) in stainless steel pipe

11	Alumina particle (#220) in stainless steel pipe
12	Silicone oil (1 Pa-s) in stainless steel pipe
13	Silicone oil (100 Pa-s) in stainless steel pipe

Fig. 6 Fundamental natural frequency (■) and damping ratio (□) of composite boring specimens with respect to core materials.

하여 3배 이상의 감쇠비를 가짐을 알 수 있었다. 이상의 실험을 바탕으로 직경 6 mm인 납을 채운 강관을 심재로 결정하였다.

## 2.2 커버의 두께 변화에 따른 영향

강철 커버의 두께 변화에 따른 고유 진동수 및 감쇠비의 변화를 알아보기 위하여 2.1 절에서 결정한 직경 6 mm의 납을 녹여 채운 강관을 심재로 사용하고 접착층이 0.1 mm인 경우에 대하여 커버의 두께를 변화시켜 가면서 복합재료 보링바를 제작하였다.

Fig. 7은 진동실험으로부터 구한 고유 진동수 및 감쇠비를 나타낸다. 진동실험 결과로부터 고유 진동수와 감쇠비는 커버의 두께가 얇을수록 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 커버의 두께는 실험 결과와 가공성을 고려하여 0.25 mm로 결정하였다.

## 2.3 접착층의 두께 변화에 따른 영향

접착층의 두께 변화에 따른 고유 진동수 및 동적 강성의 변화를 알아보기 위하여 2.1 절과 2.2 절에서 결정한 직경 6 mm 납을 심재로 사용하고 커버의 두께가 0.25 mm인 경우에 대하여 접착층의 두께를 변화시켜 가면서 복합재료 보링바를 제작하였다.

Fig. 8은 진동실험으로부터 구한 고유 진동수 및 감쇠비를 나타낸다. 진동실험 결과로부터 고유 진동수와 감쇠비는 접착 두께가 얇을수록 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 일반적으로 접착 강도는 접착층의 두께가 0.10 mm인 경우에 최대가 된다 [10]. 따라서, 실험 결과와 접착 강도를 고려하여 접착층의 두께는 0.10 mm로 결정하였다.

## 3. 복합재료 보링바의 가공 실험

2 절의 결과로부터 직경 6 mm인 납을 채운 강관을 심재로 사용하고, 강철 커버와 접착층의 두께가 각각 0.25 mm와 0.10 mm인 경우에 대하여 L/D

를 변화시켜 가면서 제작된 복합재료 보링바의 가공 실험을 수행하였다. 가공 실험에 사용된 공작 기계는 현대 자동차에서 생산하는 수직형 머시닝 센터 (Vertical machining center, SPT-V1000)이다

가공 실험은 직경 25.5 mm의 구멍이 미리 가공된 알루미늄 (6061-T6) 시편에 대하여 작동 회전수 2,500 rpm, 이송속도 0.04 mm/rev, 절삭 깊이

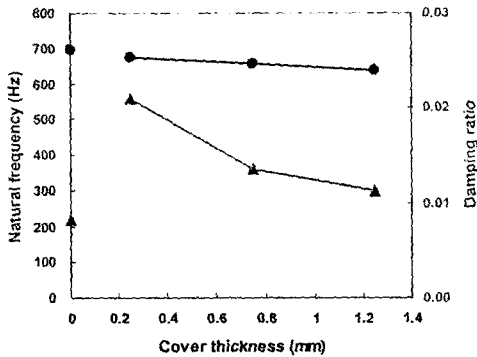


Fig. 7 Fundamental natural frequency (■) and damping ratio (▴) of composite boring specimens with respect to cover thickness.

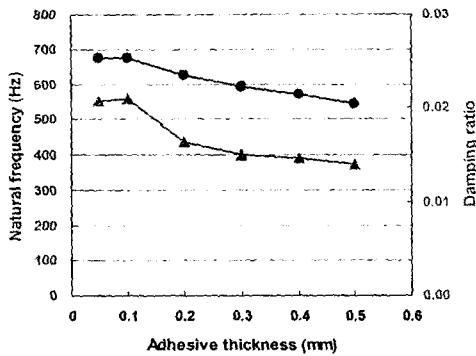


Fig. 8 Fundamental natural frequency (■) and damping ratio (▴) of composite boring specimens with respect to adhesive thickness.

0.25 mm의 가공조건에서 수행하였다. 가공 실험 결과  $L/D$ 가 10.7 까지는 chatter 진동이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 보링바의 고유 진동수 및 동적 강성을 향상시키기 위하여 고강성 탄소섬유 복합 재료를 이용하여 보링바를 개발하였다. 또한, 복합 재료 성형시 심재로 감쇠비가 큰 납을 사용하고,

강으로 구성된 커버를 복합재료와 접착제로 접합 하는 방법으로 보링바의 동적 강성을 향상시켰다.

직경과 길이가 각각 22.5 mm와 150 mm로 제작된 복합재료 보링바의 설계, 진동 실험 및 알루미늄 (Al 6061-T6)의 가공 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

심재의 직경이 6 mm까지는 동적 특성의 변화가 거의 없었으나, 종류에 따라서는 감쇠비의 영향이 매우 컸으며, 납을 사용한 경우가 가장 우수하였다. 커버와 접착층의 두께는 얇은 경우가 동적 특성이 우수하였다. 이상의 결과로부터 직경 6 mm인 납을 채운 강관을 심재로 사용하고, 커버와 접착층의 두께가 각각 0.25 mm와 0.10 mm인 경우에 대하여 보링바를 제작하였으며, 복합재료 보링바의 가공 실험 결과  $L/D$ 가 10.7 까지는 chatter 현상이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 과학 기술부에서 시행한 국가지정 연구실 (NRL) 사업에 의해 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) G. Thusty, *Manufacturing Process and Equipment*, Prentice Hall, 2000, Chapter 9.
- (2) G. M. Harris, *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill, 1998, Chapter 1.
- (3) 이대길, 정광섭, 최진호, *복합재료 역학 및 제조기술*, 시그마프레스, 1998, Chapter 1.
- (4) T. Hoshi, *Vibration Analysis of Mechanical Cutting*, Kogyo Chasakai Publishing Co. Ltd, 1990, Chapter 1.
- (5) S. Ema and E. Marui, "Suppression of Chatter Vibration of Boring Borings Using Impact Dampers," *International Journal of Machine Borings and Manufacturing*, 2000, Vol. 40, pp. 1141-1156.
- (6) R. Richardson and R. Bhatti, "A Review of Research into the Role of Guide Pads in BTA Deep-hole Machining," *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, Vol. 110, pp. 61-69.
- (7) T. H. Kang, "Chatter Vibration in Precision Boring," *Machine Boring Development Prod. Eng. Res. Conference, ASME*, 1963, pp. 171-189.
- (8) S. Nagano, T. Koizumi, T. Fujii, N. Tsujiuchi and H. Ueda, "Development of a Composite Boring Bar," *Composite Structures*, 1997, Vol. 38, No. 1-4, pp. 531-

539.

- (9) D. G. Lee, "Manufacturing and Testing of Chatter Free Boring Bars," *Annals of the CIRP*, 1988, Vol. 37, pp. 365-368.
- (10) J. H. Choi and D. G. Lee, "An Experimental Study of the Static Torque Capacity of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint," *Journal of Adhesion*, 1996, Vol. 55, pp. 245-260.