

# 다구찌 방법을 이용한 보링바의 동강성 변동에 관한 연구

천세호\*, 고태조#

## Study on the dynamic stiffness variation of boring bar by Taguchi Method

Se-Ho Chun\*, Tae-Jo Ko#

(Received 13 July 2009; received in revised form 20 September 2009; accepted 29 September 2009)

### ABSTRACT

The objective of this paper is to investigate the effect of factors on the dynamic stiffness variation of boring bar. The experiment was carried out by Taguchi Method and Orthogonal array table. The results indicate that overhang was found out to be dominant factor with 95% confident intervals and feed rate and depth of cut were insignificant. In addition, analysis of loss function shows that loss value increased sharply from 3D to 4D(D is a shank diameter). Consequently, there is critical point which changes property of dynamic stiffness.

**Key Words :** Boring bar(보링바), Dynamic stiffness(동강성), Design of Experiment(실험계획법), Taguchi Method(다구찌 방법), Orthogonal array table(직교배열표), S/N ratio(신호대 잡음비), ANOVA(분산분석), Loss function(손실 함수)

### 1. 서 론

일반적으로 정밀한 내경가공을 위해서는 황삭 드릴(drill)가공 후 보링바(boring bar)를 사용하여 정삭 작업을 한다. 하지만 보링바는 가공 특성상 공구직경에 비해 길이가 길기 때문에 동강성이 낮아서 진동이 발생하는 경우가 많다<sup>[1,2,3]</sup>. 절삭 중 진동은 표면조도와 가공 정

밀도를 저하시키는 원인이 되어 생산성을 저하시키게 된다<sup>[3]</sup>. 그러므로 진동의 직접적인 원인이 되는 보링바의 동강성에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

Beauchamp<sup>[4]</sup>는 보링 가공시 절삭조건이 표면조도에 미치는 영향을 연구하였다. 그는 주효과와 2차 교호작용까지 파악할 목적으로 실험계획법의 일종인 완전요인 계획법(full factorial design)을 적용하였고 216회의 실험을 실시하였다. Thomas<sup>[5]</sup>는 공구의 진동이 표면조도에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 완전요인 계획법을 적용하여 288회의 실험을 실시하였고 각 절삭조건에 따른 진동 및 표

\* 영남대학교 기계공학부 대학원  
# 교신저자 : 영남대학교 기계공학부  
E-mail : [tjko@yu.ac.kr](mailto:tjko@yu.ac.kr)

면조도 데이터를 획득하였다. 가진력의 변동은 칩 두께 변화, 공구 진동의 진폭 그리고 절삭중 동강성 변동과 상관관계가 있다고 하였다. 그의 후속 연구<sup>[6]</sup>에서는 외경 선삭 공정시 절삭 중 동강성의 변동을 통계적인 방법으로 조사하였다. 이와 같이 몇몇의 연구가 이루어졌지만 보링바에 대한 연구는 미흡한 실정이며 실험 횟수가 너무 많아서 비효율적이었다.

이에 본 논문에서는 기계 구조용강으로 널리 쓰이고 있는 SCM440을 내경 보링 가공시 동강성에 영향을 끼치는 인자를 파악하기 위하여 실험계획법의 일종인 다구찌 방법<sup>[7]</sup>을 적용하였다. 동강성에 영향을 주는 절삭력은 절삭저항에 비례하며 절삭저항은 비절삭 저항과 절삭 면적의 곱으로 나타낼 수 있다. 이때 절삭 면적은 회전당 이송(mm/rev)과 절입 깊이(mm)의 곱으로 나타낼 수 있기 때문에 각각 요인으로 선정하였다. 효율적인 연구를 위해 직교배열표(orthogonal array table)를 이용해서 실험수를 줄였으며, 측정 오차를 고려하여 반복실험을 통해 S/N비를 산출하여 요인별 주효과를 파악하였다. 또한 손실함수를 통해 동강성에 대한 손실의 향상정도를 정량적으로 비교, 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 동강성의 변화율

절삭 가공시에 발생하는 진동은 기본적으로 강제진동(forced vibration)과 자려진동(self excited vibration)으로 나눌 수 있다<sup>[8]</sup>. chatter라고 알려져 있는 자려진동은 주로 절삭과정에서 공구와 공작물 사이의 상호작용에 의해 야기된다. chatter는 시스템의 동강성 또는 감쇠능을 증대시킴으로 억제시킬 수 있다. 여기서 동강성이란, 가진력을 이로 인한 동적변위의 진폭으로 나눈 값을 말한다<sup>[9]</sup>.

Fig. 1에서 보링바에 가해지는 가진력의 변동( $\Delta F(t)$ )은 공구의 처짐( $x(t)$ )을 유발한다. 이

로 인해 공구가 피삭재(workpiece)를 파고들어 칩두께( $h(t)$ )를 변화시키게 된다. 식(1)에서와 같이 칩두께의 변화는 가진력의 변동과 비례 관계임을 나타내며  $\Delta K$ 는 보링바의 동강성을 의미한다<sup>[5]</sup>.

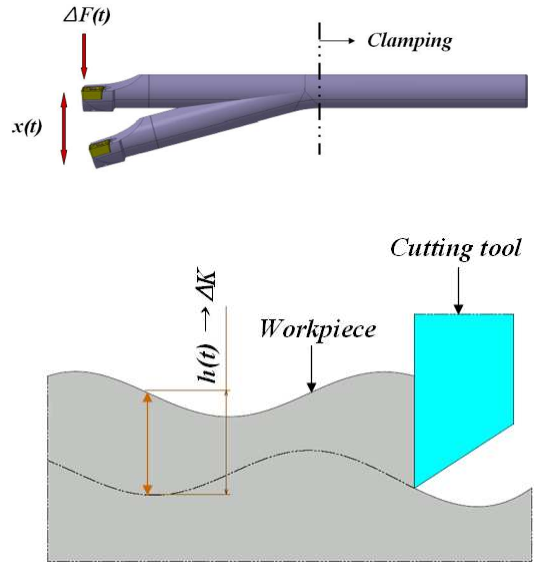


Fig. 1 Vibration of boring bar

Fig. 1에서 보링바의 진동을 주절삭 분력 방향만 고려 했을때 1자유도계로 볼 수 있으며, 식(2)의 운동방정식으로 표현할 수 있다. 식(1)을 식(2)에 대입하여 정리하면 식(3)으로 나타낼 수 있는데 이는 절삭 과정중 가진력의 변동으로 인해 보링바에 동강성의 변동이 발생한다는 의미이다. 절삭 가공 중 보링바의 고유진동수는 식(4)로 나타낼 수 있고, 이를 이용하여 식(5)와 같이 보링바의 동강성( $\Delta K$ )을 정의할 수 있다. 식(6)은 보링바에서 동강성의 변화율을 의미하는데 고유진동수의 측정만으로 나타낼 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$\Delta F(t) = \Delta K \cdot x(t) \quad (1)$$

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = \Delta F(t) \quad (2)$$

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + (K - \Delta K)x(t) = 0 \quad (3)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(K - \Delta K)}{M}} \quad (4)$$

$$\Delta K = 4\pi^2 M(\omega_0^2 - \omega_1^2) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\omega_0^2 - \omega_1^2}{\omega_0^2} \quad (6)$$

## 2.2 실험계획법

실험계획법(Design of Experiment)이란 특성치에 영향을 준다고 판단되는 요인들을 선정하고 적절히 배치하여 효율적인 실험이 될 수 있도록 하는 방법을 의미하는 것으로, 통계적인 방법을 통해 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험 방법의 선정 및 데이터의 획득 방법 그리고 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 방법을 계획하는 것이라고 정의할 수 있다<sup>[10]</sup>. 실험계획법은 일부 실시법과 완전요인 계획법으로 나눌 수 있다. 비용과 시간의 한계 때문에 일부 실시법의 일종인 직교배열 표가 많이 이용되며 종속변수에 영향을 미치는 인자의 특성을 효과적으로 추정할 수 있게 한다.

분산비는 특성치 전체의 산포와 요인들의 제곱합의 비율로 나타낼 수 있고 이로써 오차에 비해 큰 영향을 주는 요인들을 정량적으로 파악할 수 있다. 이러한 방식을 분산분석(ANOVA)이라 한다<sup>[10]</sup>.

## 2.3 다구찌 방법

제품의 특성치를 망목특성, 망대특성, 망소특성의 세가지로 분류하여 각각에 대한 손실함수(loss function)를 별도로 정의한다. 품질특성을

다룰 때 신호 입력과 잡음이 시스템의 산출물에 어느 정도의 영향을 주는가를 조사하게 된다. 이때 목적을 수행하기 위해 전달된 신호 입력이 산출물의 품질수준에 영향을 주며, 시스템에 가해지는 잡음이 산출물의 품질에 변동을 초래하게 되어 결과에 대한 신뢰성을 떨어뜨리게 된다. S/N비는 신호대 잡음의 비율을 의미하는 것으로, 아래 식과 같이 신호 입력과 잡음이 주는 영향이 힘의 비율로서 나타내어진다<sup>[7,10]</sup>.

$$S/N \text{ ratio} = \frac{\text{Power of Signal}}{\text{Power of Noise}}$$

본 연구에서는 동강성의 감소율이 적을수록 양호한 경우이기 때문에 목적하는 값이 작을수록 좋은 망소특성을 적용하여 특성치를 식(7)과 같이 계산하였다. 이 식에 따르면 평균 및 변동이 작을수록 SN비 값은 커지게 된다. 여기서 n은 실험 반복횟수, yi는 반복 데이터를 의미한다<sup>[7,10]</sup>.

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (7)$$

망소특성에서의 손실함수는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다. A는 소비자 손실이고, Δ는 소비자 허용한계이다<sup>[10]</sup>.

$$L(y) = ky^2 = \frac{A}{\Delta^2} y^2 \quad (8)$$

MSD는 0으로부터의 평균제곱편차(mean squared deviation)를 의미하고 식(9)와 같이 사용할 수 있으며, n개의 시료 데이터가 얻어진 경우의 개당 평균 손실함수는 식(10)으로 구해진다<sup>[10]</sup>.

$$S/N = -10 \log[MSD] \quad (9)$$

$$L(y) = k[MSD] \quad (10)$$

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$$

### 3. 실험장치 및 설계

#### 3.1 실험장치

Fig. 2는 가속도계가 장착된 보링바의 모습이다. 시편은 기계구조용으로 널리 쓰이는 SCM440으로 Table 1에 기계적 성질을 나타내었다. 보링바와 인서트는 대구택(주)사의 S16R SCLCR 09 및 SCMT 09T308 MT이다.

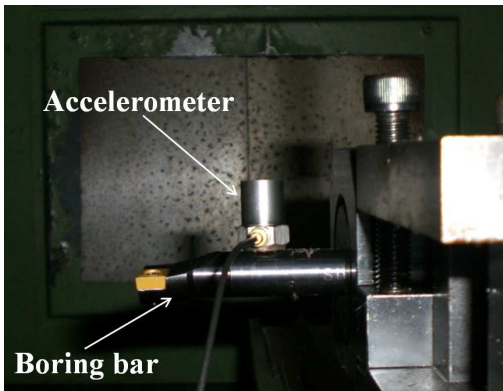


Fig. 2 Experimental set-up

주분력(main cutting force)방향에 가속도 센서(4383, B&K)를 장착하였고 검출되는 신호를 증폭기(2635, B&K)와 신호분석기(HP35665A, Agilent)를 통해 시각화 하였다. 실험에 사용된 선반은 DMC(대구중공업)사의 DC-2 모델이며 주축동력은 5.5kW이다.

Table 1 Mechanical prop. of SCM440

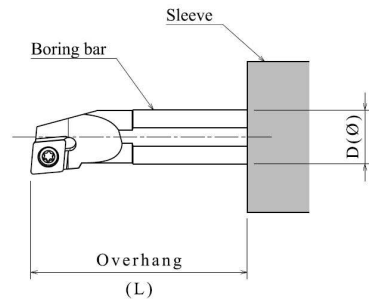
Specification	Value
Yeild Strength( $kg_f/mm^2$ )	>85
Tensile Strength( $kg_f/mm^2$ )	>100
Elongation(%)	>12
Reduction of Area(%)	>45
Sharpy Impact val.( $kg_f \cdot m/cm^2$ )	>6
Hardness(HB)	285~352

#### 3.2 실험 설계

Table 2는 각 수준별 절삭조건을 나타낸 것이다. 공구 제조사의 추천 절삭조건을 따르되 모든 절삭조건에서 장비 주축 동력의 70%이내 가 되도록 설정하였다. 오버행(overhang)은 자루(shank) 직경의 3배, 4배, 5배로 나누어 실시하였고 Fig. 3과 같다<sup>[11]</sup>. 절삭 속도는 200m/min으로 일정하게 하였으며 건식 절삭(dry cutting)으로 진행하였다.

Table 2 Cutting conditions

Condition	1	2	3
(A) Overhang	3D	4D	5D
(B) Feed rate(mm/rev)	0.05	0.15	0.25
(C) Depth of cut(mm)	0.3	0.65	1



$$Overhang (L) = n \cdot D(\varnothing)$$

Fig. 3 Schematic diagram of boring bar

특성치는 앞에서 언급한 식(6)으로 정의 하였으며 보링바의 초기 고유진동수( $\omega_0$ )를 알아 내기 위해 모드 시험(modal test)을 실시하였 고 그 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 5에서는 Ansys Workbench를 이용하여 3차원 시뮬레이션 해석을 동시에 수행하였다. 외팔보 진동이론을 바탕으로 진행되었으며 실제 측정치와 비교 분석하였다<sup>[11]</sup>. 그 결과 수치해석 결과보다 실제 고유진동수는 낮게 측정되었다. 이는 보링바가 슬리브(sleeve)에 장착될 때 조립공차에 의한 미세한 틈이 발생함으로 인해 보링바와 슬리브가 이상적인 면 접촉이 아니라 선 접촉이나 부분적인 면 접촉 상태에 놓이게 되기 때문이다. 이때 실제 측정된 고유진동수는 Fig. 4와 같이 3.26 kHz이다.

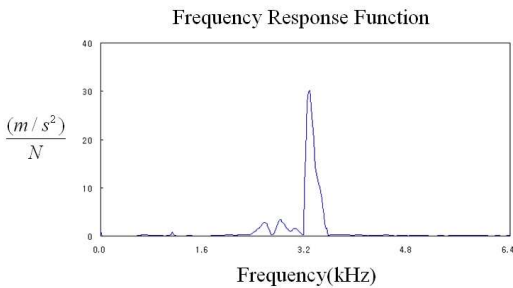


Fig. 4 Modal test of initial condition

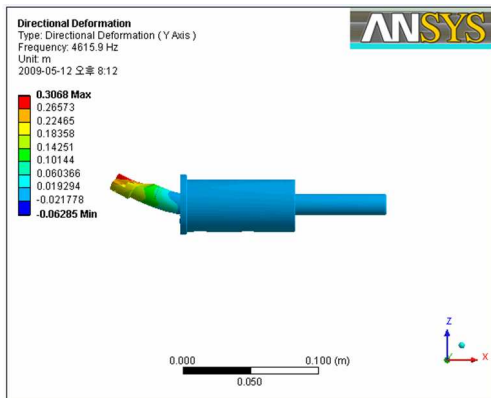


Fig. 5 Result of simulation

## 4. 실험 결과의 분석

### 4.1 실험 결과

Table 3은 직교배열표의 실험순서에 따라 특성치인 동강성의 감소율을 나타낸다. 본 연구에서는 인자간의 교호작용은 배제하고 주효과만을 조사 하였다.  $L9(3^3)$  직교배열표를 사용하였으며 각 실험 조건에 따라 3회 반복 실험하여 측정하였다.

각 수준에서 S/N비의 평균과 합을 구해서 동강성의 감소율에 대한 S/N비의 수준별 주효과를 나타낸 그래프가 Fig. 6이며 최적조건은  $A_1B_1C_1$ 임을 알 수 있다. 그리고 인자간의 변동을 계산하여 S/N비에 대한 분산분석(ANOVA)을 수행하였고 이에 대한 결과는 Table 4에 나타나 있다. 분산분석(ANOVA) 결과 오버행(A)만이 95% 신뢰수준 내에서 유의하고 회전당 이송 및 절입 깊이는 P값이 각각 0.140, 0.209으로 신뢰수준이 낮음을 알 수 있다. 이는 보링바의 진동 메커니즘이 어떤 경계선을 기준으로 확연히 변경되었기 때문에 이들의 영향력이 작아졌기 때문이라 판단된다.

Table 3  $L9(3^3)$  table and results

No.	Factor			$\frac{\Delta K}{K}$			S/N
	A	B	C	N1	N2	N3	
1	1	1	1	0.112	0.146	0.250	14.9322
2	1	2	2	0.328	0.308	0.345	9.6998
3	1	3	3	0.421	0.410	0.441	7.4487
4	2	1	2	0.472	0.420	0.468	6.8599
5	2	2	3	0.719	0.750	0.711	2.7710
6	2	3	1	0.703	0.670	0.652	3.4097
7	3	1	3	0.841	0.858	0.865	1.3635
8	3	2	1	0.838	0.761	0.783	1.9964
9	3	3	2	0.849	0.845	0.862	1.3909

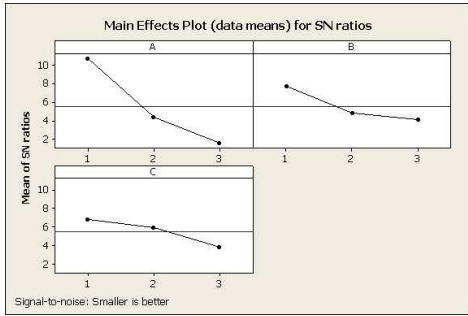


Fig. 6 Main effect of factors

Table 4 Analysis of variance(ANOVA)

Factor	DF	SS	MS	F	P
A	2	130.909	65.454	36.26	0.027
B	2	22.151	11.075	6.14	0.140
C	2	13.655	6.828	3.78	0.209
Error	2	3.610	1.805		
Total	8	170.325			

## 4.2 추정 및 손실 예측

Table 5에서는 회전당 이송 및 절입 깊이를 각각 1수준으로 고정하고 유의한 인자인 오버행의 수준에 따른 S/N비 및 평균의 추정값을 나타내었다.

Table 5 Prediction of S/N ratio and mean

	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>
S/N ratio	14.1089	7.76213	4.99887
Mean	0.17288	0.48444	0.69966

A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>는 다음의 식(11),(12)를 이용하여 구하였다<sup>[10]</sup>.

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(A_2B_1C_1) &= \mu + \widehat{a_2} + \widehat{b_1} + c_1 \\ &= \mu + \widehat{a_2} + \mu + \widehat{b_1} + \mu + c_1 - 2\hat{\mu} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(A_3B_1C_1) &= \mu + \widehat{a_3} + \widehat{b_1} + c_1 \\ &= \mu + \widehat{a_3} + \mu + \widehat{b_1} + \mu + c_1 - 2\hat{\mu} \end{aligned} \quad (12)$$

위에서 구한 S/N비를 바탕으로 식(10)에 적용하면 손실함수의 비로 나타낼 수 있는데 이로써 조건의 향상정도를 배수관계로 파악할 수 있다. 오버행이 3수준에서 2수준으로 변경되면 S/N비는 7.76213-4.99887=2.76326만큼 향상 되었으며  $10^{0.276326} = 1.889$ 배 만큼 손실금액이 감소하였다. 또한 2에서 1수준으로 변경시 S/N비는 14.1089-7.76213=6.34677만큼 개선되었고 손실금액은  $10^{0.634677} = 4.312$ 배 감소되었다. 또한 Table 5에서 각 수준에 따른 평균의 변화를 살펴보면 3수준에서 2수준으로 변경시 동강성의 변화율이 1.44426배 감소하였고 2수준에서 1수준으로 변경시 2.80217배 감소하였다. 이때 1수준과 2수준 사이를 경계로 손실정도 및 평균이 확연히 달라짐을 알 수 있는데 이는 그 경계를 전후하여 보링바의 동강성 변동 특성이 달라짐을 의미한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 보링바의 동강성에 영향을 주는 인자를 정량적으로 파악하기 위하여 다구찌 방법을 적용하였다. 보링바에 장착된 가속도계로 부터 진동신호를 획득하여 절삭 조건에 따른 보링바의 동강성 변동을 계산하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동강성의 변동에 가장 영향을 많이 미치는 요소는 오버행이며 95% 신뢰수준 내에서 유의 하였다. 그리고 회전당 이송 및 절입 깊이는 동강성의 변동에 미치는 영향이 미미 하였다.

2. 손실함수 및 평균의 추정치를 이용한 평가에서 3D와 4D사이를 경계로 손실 금액의 향상 정도가 확연히 달라졌다. 이는 그 경계를 기점으로 보링바의 동강성 변동 특성이 달라짐을 의미한다.
3. 본 연구의 결과로 보링바의 동강성 특성이 바뀌는 경계가 존재함을 확인 하였다. 그러므로 공구 강성과 연관된 진동, 표면조도 그리고 가공 정밀도 등에 관한 후속 연구시 기초 자료로 이용될 수 있을것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Jae-Hyuk Lee, Kyung-Hwa Rim, "Vibration Analysis of Boring Bar with Dynamic Vibration Absorber", Proceeding of Korean society for noise and vibration engineering, Vol.2000 No.3, pp.1796-1802, 2000.
2. Hyeong-Chul Kim, Ki-Soo Kim, Seung-Duck Hahm and Suk Namgung, "A Study on the Chatter Characteristics of a Carbon/Epoxy Composite Boring-bar", Research Institute of Industrial Technology, Vol.9, No.1, June 1994.
3. Jeong-Suk Kim, Myeong-Chang Kang, Soo-Kil Park, "Dynamic Behavior of Boring Bar with Continuous System Analysis", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.11, No.4, August 1994.
4. Y. Beauchamp, M. Thomas, A.Y. Youssef, J. Masounave, "Investigation of cutting parameter effects on surface roughness in lathe boring operation by use of a full factorial design", Computers and Industrial Engineering 31, pp.645-651, 1995.
5. M. Thomas, Y. Beauchamp, Y.A. Youssef, "Effect of lathe boring cutting parameters on surface roughness and tool dynamic forces", Proceedings of the 13th Symposium on Engineering Applications of Mechanics, Manufacturing Science and Engineering, Canadian Society of Mechanical Engineering, pp.521-527, 1996.
6. M. Thomas, Y. Beauchamp, "Stastical Investigation of modal parameters of cutting tools in dry turning", International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, pp.1093-1106, 2003.
7. G. S. Pease, "Taguchi Methods", Addison-wesley publishing company, 1993.
8. S. A. Tobias, "Machine-tool vibration", John & Wiley & Sons. Inc., 1965.
9. S. Kalpakjian, "Manufacturing Processes for Engineering Materials", 3rd edition, Pearson Education Korea Ltd., 1998.
10. S. H. Park, "Morden Design of Experiments", 2001.
11. Doo Sang Song, Jun Hee Hong, Hwang Young Jeong, Dae Hwa Kang and Byung In Kim, "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.