

선반용 보링바의 동적응답특성 변동에 관한 연구

A Study on the Dynamic Response Characteristics of Lathe Boring Bar

천세호¹, 고태조^{2,✉}
Se Ho Chun¹ and Tae Jo Ko^{2,✉}

1 영남대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Yeungnam Univ.)

2 영남대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)

✉ Corresponding author: tjko@yu.ac.kr, Tel: 053-810-3836

Manuscript received: 2010.3.15 / Accepted: 2010.6.9

Internal lathe machining with a boring bar is weak with respect to vibration because the bar is long and slender. Therefore, it is important to study the dynamic characteristics of a boring bar. The purpose of this study was to identify the effects of overhang and cutting conditions on the dynamic response characteristics of a boring bar. For an efficient experiment, an $L_9(3^3)$ orthogonal array was applied and the results were quantitatively analyzed by ANOVA. Overhang, feed per revolution, and depth of cut were selected as independent variables. Meanwhile, dynamic stiffness, damping ratio, damping coefficient, and acceleration were chosen as dependent variables. The vibration signal was obtained from an accelerometer attached to the boring bar, followed by visualization by a signal analyzer. The effect of overhang was found to have a significant effect on the dynamic stiffness, damping ratio, and damping coefficient, but the other variables did not. As the length of the overhang increased, the dynamic stiffness decreased and the damping ratio increased. In addition, the damping coefficient increased until the length of the overhang was $4D$ (where D is the shank diameter), after which it remained constant. The acceleration decreased until the overhang length was $4D$, and then increased sharply when the overhang was increased further. From these results, the behavioral trend of the damping characteristics changed when its overhang length was $4D$. Consequently, there is a critical point that the dynamic characteristics of boring bar change.

Key Words: Boring Bar (보링바), Dynamic Response Characteristics (동적응답특성), Dynamic Stiffness (동강성), Damping (감쇠), ANOVA (분산분석), Design of Experiment (실험계획법)

기호설명

s_o = chip thickness in steady-state condition

ds = chip thickness variation in dynamic condition

k_{ch} = chip thickness coefficient of regenerative effect

C_c = coefficient of cutting velocity effect

C_{fr} = coefficient of friction effect

M_o = equivalent mass of the tool

k_o = equivalent stiffness of the tool

C_o = equivalent damping coefficient of the tool

dF_{ch} = cutting force variation of chip thickness effect

dF_c = cutting force variation of cutting velocity effect

dF_{fr} = cutting force variation of friction effect

$x(t)$ = deflection of the tool

$\dot{x}(t)$ = vibration velocity of the tool

$\ddot{x}(t)$ = acceleration of the tool

ζ_o = initial damping ratio of the tool

ζ_n = damping ratio of the tool while cutting

ω_o = initial angular natural frequency of the tool

ω_n = angular natural frequency of the tool while cutting

L = overhang

Ap = depth of cut

V = cutting velocity

D = shank diameter

1. 서론

절삭가공에서 표면의 품질은 제품의 품질을 결정하는 매우 중요한 척도라 할 수 있다. 그러므로 양질의 표면 품질을 얻기 위해서는 적절한 가공조건 선정이 무엇보다 필요하다.¹⁻⁶ 이에 많은 연구자들이 표면품질에 영향을 주는 인자와 상관관계에 대해 연구를 진행하여 왔다. 그 결과 공구의 위치와 형상 및 절삭력의 변동에 의해 발생하는 공구 진동이 표면 품질에 많은 영향을 끼친다는 것을 밝혔다.⁷⁻⁹ 공구의 진동인 채터는 일반적으로 시간에 따라 불규칙적으로 거동하는 동적 상태이며 이를 이론적으로 규명하고 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 한편, 보링바(Boring bar)에 의한 내경 가공 작업에서는 길고 가느다란 공구 자체의 특성으로 인해 진동에 취약하다.^{10,11} 그러므로 적절한 가공조건 선정에 위해서는 보링바의 동적응답특성 파악이 선행 되어야 할 것이다.

진동은 질량-감쇠-강성 계(System)의 특성과 외부 가진력에 의해 결정된다. Tobias¹² 는 선형 채터이론을 통해 동적 영역에서의 절삭력 변동을 해석하였고 Hwang¹³ 과 Lin¹⁴ 은 비선형 절삭력 모델을 개발하여 이에 대한 해석을 시도 하였다. 또한 Song¹⁵ 등은 보링바의 정적응답특성을 파악하기 위하여 광섬유 센서를 이용해 오버행(Overhang)의 길이 변화에 따른 고유진동수 변동을 분석하였다. 이에 따르면 보링바의 오버행이 짧아질수록 고유진동수는 증가하는 경향을 보이며 강성에 보다 유리함을 판단할 수 있다. Chun 과 Ko¹⁶ 는 절삭력이 작용하는 조건에서 보링바의 동강성 변화율을 분석하였고 보링바의 동강성은 비선형적으로 거동함을 확인하였다. 그리고 Thomas 와 Beauchamp¹⁷ 는 실험계획법의 일종인 완전요인 계획법을 적용하여 절삭조건에 따른 모달 파라미터의 변동을 조사하였다. 이 연구에서 오버행이 증가할수록 진동이 감소되는 현상을 언급하였는데 이는 오버행이 증

가함에 따라 감쇠의 효과가 커지기 때문이라 하였고 진동의 크기는 강성보다 감쇠의 변동과 밀접한 연관이 있다고 분석하였다. 따라서 참고문헌 [16]의 연구에 이어서 보링바의 응답특성을 밝히기 위해서는 강성의 변동과 더불어서 감쇠특성에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 보링바의 오버행 및 절삭 단면적의 변화가 동적응답특성을 결정짓는 동강성 및 감쇠에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 유의성을 검토하였다. 그리고 절삭력이 작용하는 조건에서 진동가속도 응답의 변화 경향을 통해 이를 확인 하였다. 실험을 위해 구조용으로 널리 사용되는 AISI4140 강(Steel)을 내경 보링 가공하였다. 독립변수는 오버행의 길이와 절삭단면적(또는 접촉단면적)을 구성하는 인자인 회전당 이송(mm/rev) 및 절입 깊이를 선정하였다. 특히 강의 절삭에서 구성인선(Built up edge, BUE) 및 공구수명에 지대한 영향을 미치는 인자인 절삭속도는 예비실험을 통해 구성인선이 최소화 되는 200m/min 으로 결정하였고 모든 실험에 대해 동일한 절삭속도를 적용하였다. 또한 직교배열표를 통해 실험수를 최소화하여 효율적인 실험이 될 수 있도록 구성하였다. 측정된 데이터는 분산분석(ANOVA)을 통해 정량적으로 파악하였고 그 유의성을 검토하였다.

2. 관련 이론

2.1 실험계획법

실험계획법이란 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것으로 반응값에 영향을 준다고 판단되는 요인들을 선정하고 이를 효율적으로 배치하여 적합한 실험이 될 수 있도록 적용하는 방법이다. 이는 가설의 검증을 위해 통계적인 방법을 이용하여 실험방법의 선정, 데이터의 획득과 처리방법 그리고 최소의 실험에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 방법을 계획하는 것이라 말할 수 있다. 일반적으로 비용과 시간의 한계 때문에 일부 실시법이 주로 이용되고 있다. 본 연구에서는 $L_9(3^3)$ 직교배열표를 적용하였고 개별 인자가 동적 응답특성 변동에 미치는 영향을 파악하기 위함으므로 교호작용에 대한 영향은 배제 하였다. 그리고 분산분석이란 반응값의 산포와 요인들의 제곱합의 비율로 분산비를 나타내어 오차에 비해 큰 영향을 주는 요인들을 정량적으로 파악 할 수 있게 하는 분석 방법이다.¹⁸

2.2 동적응답특성 변동 기구

채터는 운동 자체가 가진력을 발생시키는 자려진동(Self excited vibration)의 일종이다. 자려진동의 해석은 절삭력 변동을 유발하는 절삭공정의 수학적 모델을 통한 해석이 기본적인 방향이라 할 수 있다.¹⁹ Fig. 1 은 주절삭 분력 방향에서 절삭력 변동 모델을 나타내고 있다.

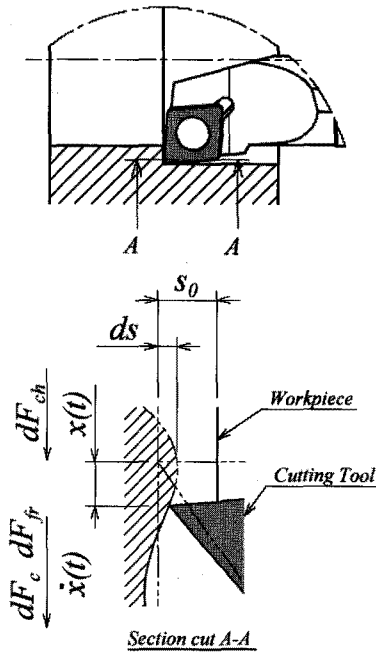


Fig. 1 Model of dynamic cutting process

절삭력 변동에 의한 진동의 발생 원인은 칩두께, 마찰조건, 이송속도, 그리고 절삭속도의 변화 때문이다. 이들에 의해 모달 파라미터가 변화하여 동적응답특성을 결정한다.^{12,17} 진동이 없는 정상 상태라면 시간에 따라 변함없이 초기 칩두께(s_0)에 의해 일정한 절삭 단면적이 형성되어 절삭력(F_{st})이 결정된다. 하지만 진동의 영향을 받는 동적 상태에서는 불규칙적인 칩두께 변화량(ds)이 발생하며 공구의 굽힘에 의한 위상 변화량($x(t)$)에 영향을 미친다. 칩두께 변화에 의한 절삭력 변동은 식(1)과 같다. 또한 칩두께의 불규칙적인 변동은 마찰조건 및 절삭속도에도 영향을 미치게 되므로 이들에 의한 절삭력 변동은 식(2),(3)으로 나타낼 수 있다.

$$dF_{ch} = k_{ch}x(t) \tag{1}$$

$$dF_c = C_c\dot{x}(t) \tag{2}$$

$$dF_{fr} = C_{fr}\dot{x}(t) \tag{3}$$

식(1),(2),(3)에서 정의한 절삭력 변동 모델을 보링바의 운동 방정식에 대입하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며 이를 다시 정리하면 식(5),(6),(7)이 된다. 식(6)과 (7)에서와 같이 변동 절삭력이 보링바의 감쇠와 강성에 영향을 미쳐 동적응답특성을 변화시킨다는 것을 알 수 있다.

$$M_0\ddot{x}(t) + C_0\dot{x}(t) + k_0x(t) = -dF_{ch} - dF_c - dF_{fr} - F_{st} \tag{4}$$

$$\ddot{x}(t) + \left(\frac{C_0 + C_c + C_{fr}}{M_0}\right)\dot{x}(t) + \left(\frac{k_0 + k_{ch}}{M_0}\right)x(t) = -\frac{F_{st}}{M_0} \tag{5}$$

$$2\xi_n\omega_n = 2\xi_0\omega_0 + \frac{(C_c + C_{fr})}{M_0} = \frac{C_n}{M_0} \tag{6}$$

$$\omega_n^2 = \omega_0^2 + \frac{k_{ch}}{M_0} = \frac{k_n}{M_0} \tag{7}$$

3. 실험

3.1 실험 장치

실험에 사용된 보링바 및 인서트(Insert)는 대구택(TaeguTec Co.)의 S16R SCLCR 09 와 CCMT 09T308 MT TT3500 으로 선정하였다. Fig. 2 와 같이 보링바는 슬리브(Sleeve)에 장착하여 공구 인신부와 슬리브 사이의 간격을 오버행으로 정의하였다.

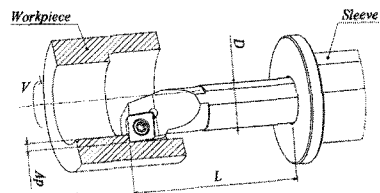


Fig. 2 Boring bar setting for experiment

시편은 기계 구조용으로 사용되는 AISI4140 강을 사용하였으며 시편의 기계적 성질은 Table 1 과 같다. 선반은 DMC(대구중공업)사의 DC-2 모델이고 주축 동력은 5.5kW 이다.

Table 1 Mechanical properties of AISI4140

Specification	Value
Yeild Strength(kg/mm ²)	>85
Tensile Strength(kg/mm ²)	>100
Elongation(%)	>12
Reduction of Area(%)	>45
Charpy Impact Value(kg _f m/cm ²)	>6
Hardness(HB)	285~352

Fig. 3 과 같이 주절삭 분력 방향에 진동 가속도 센서(B&K, 4383)를 장착하였으며 획득된 신호는 증폭기(B&K, 2635)를 통해 신호분석기에서 시각화 하였다.

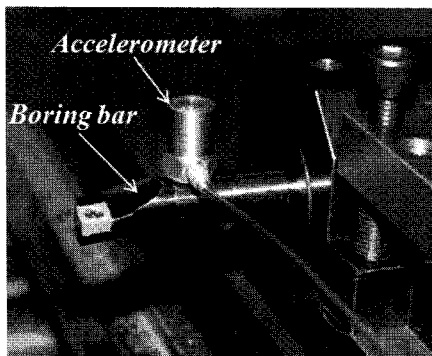


Fig. 3 Accelerometer set-up

3.2 실험 설계

인자에 따른 수준별 절삭 조건은 Table 2 와 같다. 모든 절삭조건은 선반 주축 동력의 70% 이내 가 되도록 제한하였다. 그리고 저이송(Low feed) 영역에서 발생하는 경작력(Ploughing force)²⁰의 영향을 받지 않도록 하기 위해 인선 끝에 처리된 호닝량을 감안하여 최저 이송을 0.05mm/rev 으로 제한하였다. 절삭속도는 모든 조건에서 200m/min 으로 일정하게 유지하였고 건식 절삭으로 실험을 실시하였다. 이상과 같은 설계인자를 모두 고려하여 실험하려면 27 가지의 실험이 필요하지만 직교배

열을 구성하면 인자간에 서로 독립적이라는 가정 하에 다른 인자에 영향을 받지 않아 9 가지의 실험만으로 수준별 주효과의 평가가 가능하게 된다. Table 3 에서 본 실험에서 사용한 L₉(3³) 직교배열표를 나타내었다.

Table 2 Levels of the variables in the experiment

	Level	1	2	3
A	Overhang(mm)	48	64	80
B	Feed(mm/rev)	0.05	0.15	0.25
C	Depth of cut(mm)	0.3	0.65	1

Table 3 Orthogonal array table L₉(3³)

Experiment No.	Level		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

3.3 고유진동수 및 감쇠비 측정

Chun 과 Ko¹⁶ 그리고 Song 등¹⁵ 은 보링바를 슬리브에 장착시켜 오버행의 길이에 따른 모드시험을 실시하였다. 이때 주파수 응답 함수(FRF)를 관찰해보면 1 자유도 계에 근접한 특성을 보이고 있다. Fig. 4 는 직교배열표의 4 번에 해당하는 실험결과이며 시간영역에서 획득한 데이터를 주파수 영역으로 나타내었다. 여기서도 전형적인 1 자유도 계의 거동을 보이며 이때 측정된 고유진동수(f_n)는 1.728 kHz 이다.

감쇠비의 측정을 위해서는 하프파워법(Half-power bandwidth method)^{21,22} 을 적용하여 근사치를 구할 수 있다. 시스템의 감쇠는 고유진동수(f_n)와 고유진동수의 변화량(Δf)의 비율에 의해 결정되는데 여기서 고유진동수의 변화량은 고유진동수에 해당하는 최고값에서 반치점(Half-power point) 아래에 해당하는 주파수($f_{1/2}$) 사이의 간격을 말한다.

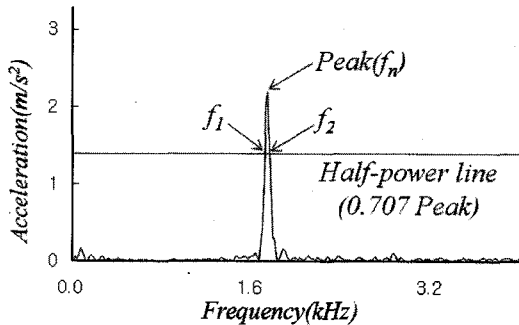


Fig. 4 Acceleration response of A₂B₁C₂

4. 결과 및 고찰

4.1 동강성의 변동

식(7)에서 알 수 있듯이 보링바의 동강성의 변동은 절삭시 가공조건에 따라 형성되는 각고유진동수($\omega_n, \text{rad/s}$)의 제곱과 선형비례 관계다. 그리고 각고유진동수의 제곱은 고유진동수의 제곱과 선형비례 하므로 측정된 고유진동수(f_n)의 제곱을 반응값으로 하면 동강성의 변동을 파악할 수 있다.

Table 4 ANOVA of f_n^2 variation

Factor	DF	SS	MS	F	P
A	2	56.558	28.279	25.52	0.038
B	2	1.713	0.8566	0.77	0.564
C	2	1.538	0.7692	0.69	0.590
Error	2	2.216	1.1082		
Total	8	62.026			

Notes) DF = degree of freedom, SS = sum of squares, MS = mean square, F = Fisher statistic, P = probability of type I error

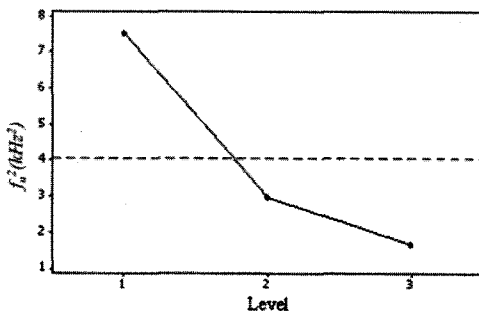


Fig. 5 Main effects plot of f_n^2 (A, overhang)

Table 4 는 반응값에 대한 분산분석을 나타낸 결과이다. 여기서 오버행에 의한 효과만이 95% 신뢰수준 내에서 유의하고 나머지 회전당 이송 및 절입 깊이에 의한 효과는 유의성이 낮음을 알 수 있다. Fig. 5 는 유의한 인자인 오버행에 대하여 평균에 관한 주효과(Main effect)를 나타낸 도표이다. 오버행의 증가에 따라 반응값이 급격하게 저하되는 것을 관찰할 수 있다.

4.2 감쇠비의 변동

감쇠비(Damping ratio)는 계의 응답특성을 결정하는 요소중의 하나이다. 일반적으로 감쇠비가 증가하면 가속도 응답이 감소하게 된다. Table 5 는 반응값에 대한 인자별 분산분석을 실시한 결과이며 오버행만이 95% 신뢰수준 내에서 유의하였다.

Table 5 ANOVA of damping ratio variation

Factor	DF	SS(10^{-3})	MS(10^{-3})	F	P
A	2	1.035	0.517	19.32	0.049
B	2	0.002	0.001	0.03	0.972
C	2	0.050	0.025	0.93	0.519
Error	2	0.054	0.027		
Total	8	1.140			

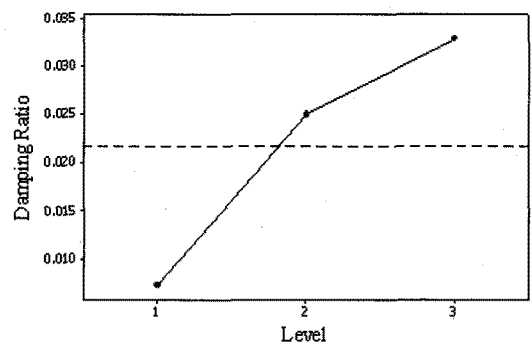


Fig. 6 Main effects plot of damping ratio (A, overhang)

Fig. 6 에서는 유의하다고 판단된 오버행에 대하여 평균에 관한 주효과를 나타내었다. 여기서 오버행 증가에 따라 감쇠비도 증가함을 알 수 있는데 이는 오버행이 증가할수록 보링바가 보다 유연해져 감쇠의 효과가 증대되기 때문이라 판단된다.

4.3 감쇠계수의 변동

감쇠계수(C_d)는 보링바의 운동방정식에서 감쇠 특성을 나타내는 파라미터이다. 감쇠계수는 각고 유진동수와 감쇠비의 관계로 나타낼 수 있으며 고유진동수(f_n)와 감쇠비(ξ_n)의 곱을 반응값으로 하면 절삭조건에 따른 감쇠계수의 거동을 파악할 수 있다. Table 6은 인자별 분산분석 결과를 나타내고 있으며 오버행만이 90% 신뢰수준 내에서 유의함을 알 수 있다.

Table 6 ANOVA of $f_n \xi_n$ variation

Factor	DF	SS	MS	F	P
A	2	1012.5	506.25	13.78	0.068
B	2	9.5	4.75	0.13	0.886
C	2	193.5	96.75	2.63	0.275
Error	2	73.5	36.75		
Total	8	1289.0			

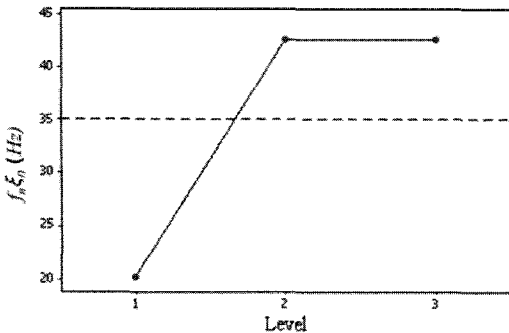


Fig. 7 Main effects plot of $f_n \xi_n$ (A, overhang)

Fig. 7은 오버행의 수준 변화에 따른 주효과를 나타낸 그림이다. 1에서 2수준으로 오버행 길이가 증가함에 따라 감쇠비의 거동과 유사하게 감쇠계수 역시 증가한다. 하지만 2에서 3수준으로 오버행이 증가하게 되면 이와는 달리 감쇠계수가 일정하게 유지하는 경향을 보이는데, 이는 오버행 증가에 따라 감쇠비는 증가하였으나 고유진동수가 줄어들었기 때문이라 판단된다.

4.4 진동 가속도의 변동

Fig. 4에서와 같이 진동가속도의 최고값(Peak)을 반응값으로 하여 인자에 따른 분산분석을 실시하였고 주효과를 파악하였다. Table 7은 분산분석 결과로서 오버행 및 절입 깊이는 99% 신뢰수준

내에서 유의함을 보이며 회전당 이송은 95% 신뢰수준 내에서 유의한 인자라는 것을 알 수 있다.

Table 7 ANOVA of acceleration variation

Factor	DF	SS	MS	F	P
A	2	644.34	322.17	305.16	0.003
B	2	201.62	100.81	95.49	0.010
C	2	263.35	131.67	124.72	0.008
Error	2	2.11	1.06		
Total	8	1111.42			

Fig. 8, 9, 10은 인자별 수준에 따른 주효과를 나타낸 그림이다. Fig. 8에서 오버행이 1에서 2수준으로 증가할 때 진동은 감소하고 있는데 이는 오버행이 증가할수록 동강성은 감소하지만 감쇠비는 지속적으로 증가하기 때문이며 보링바의 감쇠특성을 나타내는 감쇠계수 역시 이 구간에서 증가하고 있다. 한편 2에서 3수준에서는 진동 가속도가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 감쇠가 일정한 상태에서 동강성이 지속적으로 감소하기 때문이라 판단된다. 그러므로 1에서 2수준의 범위에서는 감쇠의 영향이 지배적이며 2에서 3수준의 범위에서는 동강성의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 이와 같이 오버행의 길이 변화는 보링바의 동적응답특성을 변화시키며 특히 응답을 최소화시키는 임계점이 존재함을 확인하였다.

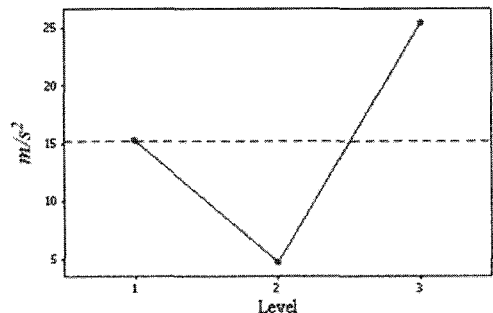


Fig. 8 Main effects plot of accel. (A, overhang)

Fig. 9와 Fig. 10에서 절삭단면적을 구성하는 회전당 이송 및 절입 깊이에 관해서는 특성 변화가 관측되지 않았고 수준의 증가에 따라 반응값이 증가하였다. 그러므로 이들 인자는 동강성 및 감쇠의 변화에 미치는 영향은 미미하지만 정상 상태에

서의 절삭력(F_{st}) 크기를 결정하는 요소임을 알 수 있다. 여기서 진동 저감을 위한 최적 절삭 조건은 $A_2B_1C_1$ 임을 알 수 있다.

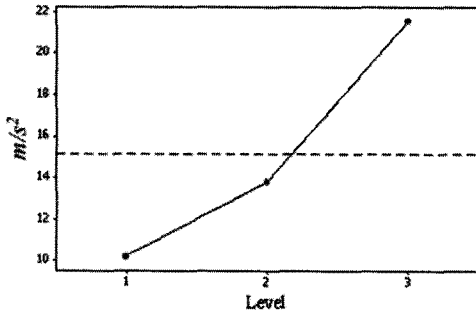


Fig. 9 Main effects plot of accel. (B, feed)

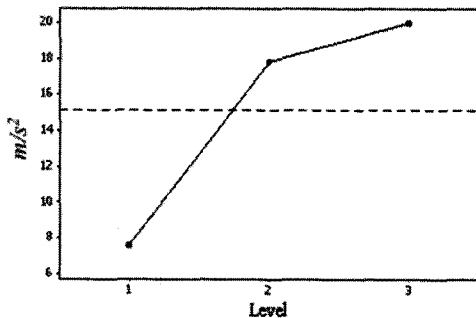


Fig. 10 Main effects plot of accel. (C, depth of cut)

5. 결론

본 연구에서는 보링바를 이용하여 내경 가공시 오버행의 길이와 절삭 단면적을 구성하는 회전당 이송 및 절입깊이의 변화가 동적응답특성 변화에 미치는 영향을 정량적으로 파악하였다. 이를 위해 보링바에 장착된 진동 가속도계로부터 신호를 획득하여 동강성, 감쇠비, 감쇠계수 그리고 진동가속도에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 오버행의 길이는 보링바의 동적응답특성 변화에 영향을 미치는 유의한 인자임을 확인하였다. 그리고 특성 변화가 발생하는 임계점이 존재함을 확인 하였다. 본 실험에서는 4D 에서 응답이 최소화되었다. 그러므로 보링바의 진동과 관련된 표면 조도 및 가공 정밀도에 관한 후속 연구시 동적응답특성이 바뀌는 임계점을 고려하여 실험설계 및 해석방향을 결정해야 할 것으로 판단된다.

2) 절삭 단면적을 구성하는 인자인 회전당 이송 및 절입 깊이는 보링바의 동적응답특성 변화에 미치는 영향력은 미미하였다. 하지만 이들 인자에 의해 정상 상태에서 절삭력 크기가 결정되어 응답을 양적으로 변화시키는 유의한 요인임을 확인하였다.

참고문헌

1. Sandvik Coromant, "Modern Metal Cutting," 1994.
2. Shaw, M. C., "Metal Cutting Principles," Oxford University Press, 1984.
3. Lee, S. Y. and Kim, H. N., "Effects of Cutting Conditions on Surface Roughness in Turning," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 139-149, 2001.
4. Beauchamp, Y., Thomas, M., Youssef, Y. A. and Masounave, J., "Investigation of Cutting Parameter Effects on Surface Roughness in Lathe Boring Operation by Use of A full factorial Design," 18th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Vol. 31, No. 3-4, pp. 645-651, 1996.
5. Choudhury, I. A. and El-Baradie, M. A., "Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 67, No. 1-3, pp. 55-61, 1997.
6. Sahin, Y., Motorcu, A. R., "Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool," Materials and Design, Vol. 26, No. 4, pp. 321-326, 2005.
7. Jang, D. Y. and Seireg, A., "Dynamic simulation for predicting surface roughness in turning," ASME Machinery Dynamics-Applications and Vibration Control Problems, Vol. 18, No. 2, pp. 31-36, 1989.
8. Rakhit, A. K., Osman, M. O. M. and Dankar, T. S., "Machine tool vibrations: its effect on manufactures surfaces," Proceedings of the Fourth Canadian Congress of Applied Mechanics, pp. 463-464, 1973.
9. Abouelatta, O. B. and Madl, J., "Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, No. 1-3, pp. 269-277, 2001.
10. 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.
11. Kim, J. S., Kang, M. C. and Park, S. K., “Dynamic Behavior of Boring Bar with Continuous System Analysis,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 38-46, 1994.
 12. Tobias, S. A., “Machine Tool Vibration,” Blackie & Son, 1965.
 13. Hwang, C. C. and Fung, R. F., “Strong non-linear dynamics of cutting processes,” Journal of Sound and Vibration, Vol. 203, No. 3, pp. 363-372, 1997.
 14. Lin, J. S. and Weng, C. I., “Non-linear dynamics of the cutting process,” International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 33, No. 8, pp. 645-657, 1991.
 15. 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.
 16. Chun, S. H. and Ko, T. J., “Study on the dynamic stiffness variation of boring bar by Taguchi Method,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 3, pp. 98-104, 2009.
 17. Thomas, M. and Beauchamp, Y., “Statistical investigation of modal parameters of cutting tools in dry turning,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 11, pp.1093-1106, 2003.
 18. Park, S. H., “Design of Experiment,” Minyoungsa, 2003.
 19. Kim, N. K., Kang, M. C. and Kim, B. R., “A Study on the Chatter Vibration-Mechanism with Two Degree of Freedom,” J. Industrial Technology Res. Inst., Vol. 1, No. 1, pp. 11-25, 1994.
 20. Kim, J. D. and Kim, D. S., “Theoretical Analysis of Micro-Cutting Characteristics in Ultra-Precision Machining,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 49, No. 3-4, pp. 387-398, 1995.
 21. Bert, C. W., “Material Damping : An introductory review of mathematical measures and experimental techniques,” Journal of Sound and Vibration, Vol. 29, No. 2, pp. 179-153, 1973.
 22. Clarence, W. D. S., “Vibration Damping, Control, and Design,” CRC Press, 2007.