

<論 文>

선반주축계의 동특성 향상에 관한 연구

—주축대와 베드의 보울트 결합을 중심으로—

신용호* · 박태원** · 홍동표*** · 정인성***

(1987년 3월 23일 접수)

A Study on the Improvement of Dynamic Characteristics of Spindle-Work System in Lathe

—Focused on the Bolt Joint between Headstock and Bed—

Yong-Ho Shin, Tae-Won Park, Dong-Pyo Hong and In-Sung Chung

Key Words: Bending Stiffness(굽힘강성), Dynamic Characteristics(동특성), Bolt Joint Force(보울트 체결력), Machine Tool(공작기계), Chatter Vibration(채터진동)

Abstract

In this report, the experimental works on the dynamic characteristics of a spindle-work system in lathe and of a column model have been done, when aluminium plate, brass plate and stainless steel plate were inserted into the contact surface between headstock and bed in lathe.

From this reserch work, following interesting conclusions were obtained;

(1) Bending stiffness and dynamic characteristics of a spindle are increased by inserting thin plate beteen headstock and bed.

(2) Bending stiffness and dynamic characteristics of the spindle are improved by inserting low hardness plates than high hardness plates.

1. 서 론

최근 정밀기계 공업의 발달로 공작기계의 정밀성이 요구되고 있으며 이 때문에 공작기계의 정적특성과 동적특성의 향상이 중요한 문제로 대두되고 있다.

그러나 공작기계들은 대부분 많은 결합부를 포함하

고 있기 때문에 일체형 구조보다는 정적강성의 면에서 문제점을 가지고 있다. 그러나 공작기계의 결합형구조는 제작, 분해, 운반상의 이점도 있고 진동감쇠와 같은 동적안정성에도 크게 기여하는 등의 유리한 점도 많다.

따라서 결합형 구조가 정적강성이 저하되는 불가피한 점을 동적특성의 향상으로 보완하여 고정도화에 접근 하려는 노력이 필요하다고 생각한다.

1965년 Connolly⁽¹⁾는 보울트 접합면의 압력분포와 플랜지의 두께에 관하여 연구하였고 1967년 Levia⁽²⁾는

* 정회원, 전북대학교 대학원

** 정회원, 전주공업전문대학 기계과

*** 정회원, 전북대학교 공과대학 기계공학과

접합면의 표면거칠기, 습윤상태, 보울트길이등의 영향을 검토하였으며 1971년 Thornly⁽³⁾는 접합면에 윤활유등의 계재물이 존재하였을 때 동적특성이 향상됨을 밝혔다. 1971년 伊東 諠⁽⁴⁾는 보울트 결합부의 감쇠능에 관하여 결합조건을 변경하였을 때의 영향을 검토하였고 1978년 梶 正臣⁽⁵⁾은 컬럼모델(column model)을 사용하여 보울트 결합부의 동적특성을 해석하였다.

본 연구에서는 컬럼모델을 보울트로 고정할 때 접합면에 알루미늄판(Al), 황동판(CuS), 스테인리스판(SNC)등을 삽입하고 정적강성과 동적특성을 검토하여 이것을 기초로 공작물-주축대-베드(bed)-공구로 형성되고 있는 사이클 중에서 선반의 주축대와 베드를 연결하는 결합부에 모델실험에 사용한 계재물을 삽입하고 선반구축계의 동적특성을 검토 하였다. 산업현장에서는 정적강성만을 중요시하고 동적특성에 대하여 등한시하고 있기 때문에 주축제와 베드의 결합면에 대하여 검토하는 것이 매우 중요하다고 생각한다.

2. 실험장치와 실험방법

2.1 컬럼모델의 정적강성과 동적특성

계재물의 삽입여부에 따른 보울트 결합부의 정적강성과 동적특성의 변화를 검토하기 위하여 컬럼모델을 이용한 실험장치를 Fig. 1에 표시한다. 실험장치의 설치를 위한 실험대 위에 실험용 기초를 M16 보울트 4개로 고정하고 실험용 기초 위에 컬럼모델(Fig. 2)을 체결력이 측정될 수 있는 스트레인 게이지가 보울트 생크부에 부착된 보울트 2개로 체결하였다. 이때 컬럼모델과 기초 사이에는 계재물로써 두께 0.2mm이고 비커스경도 Hv 52.18의 알루미늄판, Hv 116.14의 황동판, Hv 224.14의 스테인리스판을 삽입하였다. 그

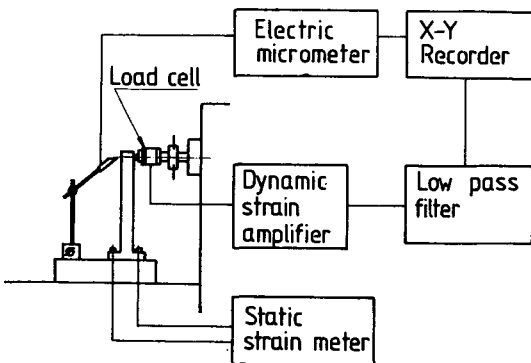


Fig. 1 Schematic diagram of measuring apparatus for static stiffness of column model

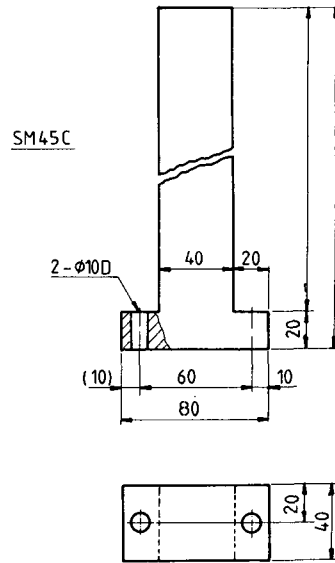


Fig. 2 Shape of column model

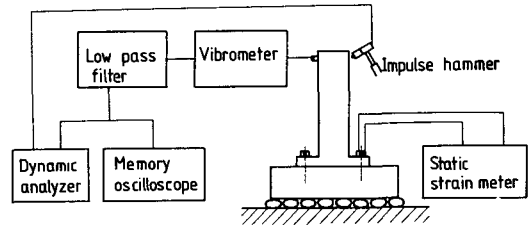


Fig. 3 Schematic diagram of measuring apparatus for dynamic characteristic of column model

리고, 컬럼모델 상단을 하중계(load cell: Lu-500kE)가 부착된 나사잭(screw jack)으로 굽힘하중을 가하였으며, 이에 의한 굽힘변위를 기초 위에 설치된 전기마이크로미터(MA-7, Mitutoyo)로 측정하여 굽힘강성을 구하였다. 여기에 사용된 컬럼모델의 형상을 Fig. 2에 표시한다.

또 결합부의 동적특성을 검토하기 위한 실험장치를 Fig. 3에 표시한다. 실험용 기초 위에 컬럼모델을 M8 보울트 2개로 체결한 것을 실험대로부터의 영향을 제거하기 위하여 연식정구볼 위에 올려놓고 컬럼모델의 상단부에 나사로 가속도계를 부착시킨 다음 그의 뒷면을 충격해머(impulse hammer: 086 BO 3 PCB Piezotronics)로 충격력을 주어 얻은 자유감쇠진동으로부터 동적특성을 구할 수 있도록 하였다.

2.2 공작물-주축계의 동적특성

선반의 주축대와 베드 접촉면 사이에 계재물을 삽입

하였을 때 공작물-주축계의 동특성을 검토하기 위하여 본 실험에 이용한 선반은 스윙(swing) 240 mm, 베드길이 1000 mm, 마력 3 PS인 일본 EGROV GL-120형 정밀고속 선반이다. 이 선반의 주축대를 체결력을 측정할 수 있는 스트레인 게이지가 부착된 M8 육각홈볼이 보울트 4개로 선반베드에 고정하였으며 결합면 사이에는 모델실험에 사용한 개재물을 삽입하였다. 이 선반의 주축은 미끄럼 베어링으로 지지되어 있으며, 공작물은 만능식척에 토오크렌치(torque wrench)를 이용하여 250 kg·cm의 토오크로 전실험을 통하여 일정하게 고정하였다. 이렇게 고정된 시험편의 자유단에 나사로 가속도계를 부착시키고 그의 뒷편을 충격헤머로 충격력을 주어 얻은 자유감쇠진동을 가속도계(Piezo-electric type V 301 C)와 주파수분석기(dynamic analyzer: SD-375)에 의하여 주축의 동특성을 검토하였다. 이때 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 4에 표시한다.

이 장치에 의하여 주파수분석기 상에 나타난 이너턴스곡선(inertia curve)으로부터 고유진동수를 취한다. 그리고 시스템의 감쇠능을 판별할 수 있는 대수감쇠율은 이너턴스의 실수부곡선으로부터 최대치(f_a)와 최소치(f_b)를 취하고, 증폭인자 $Q = \{(f_a/f_b)^2 + 1\} / (f_a/f_b)^2 - 1$ 로부터 감쇠율 $\zeta = \frac{1}{2Q}$ 을 구하여, 대수감쇠율 $\lambda = 2\pi\zeta / \sqrt{1 - \zeta^2}$ 를 구하였다.

2.3 절삭 실험

직경 30 mm, 길이 210 mm의 시험편을 돌출길이 140 mm 되도록 만능식척에 고정하고 공작물 바이트(bite)로 다듬질가공(표면거칠기: 이송방향 Ra 1 μm, 절삭방향 Ra 0.4 μm)을 한 다음에 절삭속도 17~150 m/min의 사이를 7단계로 선택하고, 절입량 0.02 mm 이송량 0.12 mm/rev의 절삭조건으로 chatter진동(chatter vibration) 상태에서 절삭 실험을 시행하였다. 이때 바이트(앞경사각 0°, 앞여유각 10°, 절삭폭 5 mm)를 돌출길이 40 mm 되도록 M8 보울트 3개로 토오크렌치

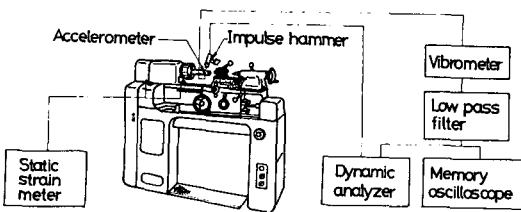


Fig. 4 Schematic diagram of measuring apparatus for dynamic characteristics of spindle

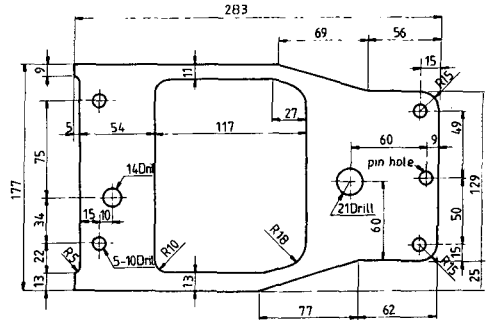


Fig. 5 Shape of contact surface between headstock and bed

를 이용하여 체결하였으며, 체결토오크는 150 kg·cm로 전실험을 통하여 일정하게 유지하였다.

또 chatter 발생한계의 영향을 검토하기 위하여 바이트 폭을 1.6 mm로 하고 회전수를 변경하면서 절삭실험을 행하였다. 이때에 주축대를 체결하는 보울트의 체결력은 600 kgf로 하였다. 이 실험은 준 2차원 절삭상태에서 시행하기 때문에 시험에 사용한 바이트의 옆절삭날은 0°가 되도록 하고 절삭속도는 $V = \pi DN / 1000$ 로 계산된다. 이 실험에서도 주축대와 베드 결합면에 개재물을 삽입하였으며 개재물의 크기 즉 접합면의 형상은 Fig. 5와 같다.

또 개재물의 성분은 Table 1과 같다

Table 1 Chemical composition of materials

	Cu	Mn	Al	Ni	Si	Mo	Cr
SNC	0.11	0.335	—	0.46	0.064	0.006	0.009
CuS	92.95	0.002	0.293	—	—	0.001	—
Al	1.383	0.006	94.46	—	0.447	—	—

3. 실험결과와 고찰

3.1 모형에 의한 접합면의 정적강성

보울트의 체결력을 변화시켜 가면서 컬럼모델의 선단에 굽힘하중(Pst=10 kgf)을 작용시켰을 때 선단의 변위 δ를 측정하여 개재물의 종류를 변수로 굽힘강성을 표시하면 Fig. 6과 같다. 정적강성으로서 굽힘강성은 체결력의 증가에 따라 커지고 있으며, 개재물을 삽입하지 않았을 때보다 개재물을 삽입하였을 때 강성이 크고 개재물의 경도가 낮은 것이 큰강성을 나타내고 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 시험편의 접합면에 존재

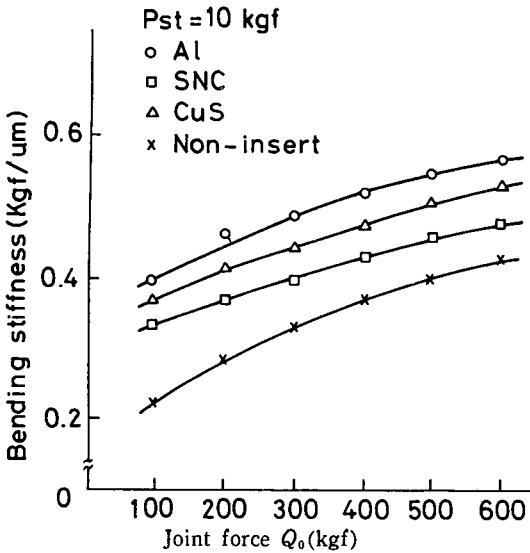


Fig. 6 Influence of joint force and plate material on bend stiffness

하는 표면과형과 거칠기 때문인 것으로 생각된다. 이것은 두평면이 접할 때 단면곡선이 일직선이 아니기 때문에 완전한 접합상태가 되지 않으며 표면이 거칠면 정적강성이 저하된다⁽⁷⁾. 이러한 곳에 경도가 낮은 개재물을 삽입하므로써 틈새에 삽입재료가 끼어들어 정강성이 높아지고 동특성이 향상된다.

이와같이 보울트 결합부에 개재물을 삽입하여도 결합형 구조의 결접인 정적강성의 저하가 생기지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 모형에 의한 접합면의 동적특성

컬럼모델의 자유단에 충격하중이 작용할 때 보울트 결합부에는 전단력과 굽힘모멘트가 작용되므로 컬럼 모델을 Fig. 7 과 같이 등가모형화 (equivalent modeling) 하고 결합부가 존재하는 부분을 선형스프링 K_{eq} 와 회전형스프링 K_t 로 치환하였다. 이 모형에 Bernoulli-Euler Beam 의 자유진동방정식을 이용하여 정리하면 진동수 방정식 (frequency equation)⁽⁸⁾ 은 다음과 같이 표시된다.

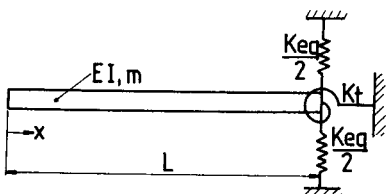


Fig. 7 Equivalent model of column model

$$K_1 \cdot K_2 (1 + \cos F \cosh F) - K_1 F (\sin F \cosh F - \cos F \sinh F) - K_2 F^3 (\sin F \cosh F + \cos F \sinh F) + F^4 (1 + \cos F \cosh F) = 0$$

또한 진동모우드를 나타내는 고유함수 (eigen function) 를 구하기 위해서 정리하면 다음과 같은 고유함수 식으로 표시할 수 있다.

$$Y(\xi) = B \{ [K_1 K_2 (\sin F - \sinh F) - 2K_1 \cdot F \cosh F + F^4 (\sin F + \sinh F)] \cdot \sin(1 - F\xi) + \{K_1 K_2 (\cos F + \cosh F) - 2K_2 F^3 \sinh F + F^4 (\cos F - \cosh F)\} \cos(1 - F\xi) + \{K_1 K_2 (\sinh F - \sin F) - 2K_1 F \cos F + F^4 (\sin F + \sinh F)\} \sinh(1 - F\xi) + \{-K_1 K_2 (\cos F + \cosh F) + 2K_2 F^3 \sin F + F^4 (\cos F - \cosh F)\} \cdot \cosh(1 - F\xi) \}$$

여기서

K_{eq} : 선형스프링상수

K_t : 회전형스프링상수

$K_1 = \frac{K_{eq} L^3}{EI}$: 무차원 선형스프링상수

$K_2 = \frac{K_t L}{EI}$: 무차원 회전형스프링상수

$F = \left(\frac{\rho A \omega^2}{EI} \right)^{1/4} \cdot L$: 무차원진동수

$\xi = \frac{x}{L}$: 무차원한 자유단으로부터의 거리이며 컬럼 모델의 기계적 성질과 제원은 종탄성계수 $E = 2.11 \times 10^6 \text{Kgf/cm}^2 = 2.07 \times 10^{11} \text{N/m}^2$

단면 2 차 모우먼트 $I = 2.1333 \times 10^{-7} \text{m}^4$

단면적 $A = 1.6 \times 10^{-3} \text{m}^2$

길이 $L = 0.28 \text{m}$

단위길이당 질량 $m = 12.769 \text{kg/m}$ 이다.

그리고 2.1 항에서 설명한 실험방법에 의하여 컬럼의 자유단에 정하중을 가하고 자유단의 처짐량 δ 를 측정하면 이것은 컬럼자체의 굽힘변위 δ_b 와 컬럼의 보울트 결합부가 하중작용 방향으로 변하는 변위 δ_0 그리고 보울트 결합면 편의 경사에 의한 자유단의 변위 δ_0 를 합한 것이다. 여기서 δ_b 는 보울트 결합부의 존재에 관계없이 일정하며 이론적으로 계산된다. 또 δ_0 는 컬럼의 선단이 아니고 보울트 결합부에 하중을 작용시켜서 측정한다.

따라서 δ_0 에 의하여 K_{eq} 를 얻을 수 있고, $\delta_0 = \delta - (\delta_0 + \delta_b)$ 에 의하여 K_t 를 구할 수 있다. 그리고 K_{eq} , K_t 를 진동모우드식에 적용하여 전산기를 통하여 결합면 사이에 삽입한 개재물의 종류에 따른 고유진동수와 진동모우드를 검토할 수 있다. 그리고 컬럼모델의 대수감쇠율 측정치를 Fig. 8 에 표시한다. 그림에 의하면 개재물을 삽입하지 않았을 때보다 알루미늄판을 삽입하였을 때가 대수감쇠율이 크다. 이와같이 보울트 결

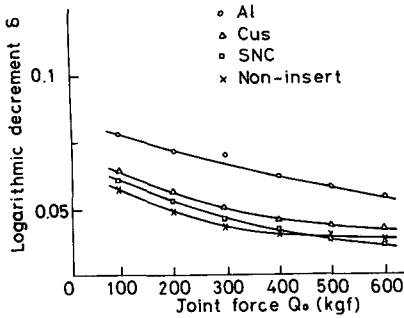


Fig. 8 Influence of joint force and plate material on logarithmic decrement for column model

합부에 개재물을 삽입하므로써 정적강성이 저하되지 않고 동적특성이 향상되므로 이러한 사실을 선반의 주축대와 베드 결합면에 응용한다.

3.3 공작물-주축계의 동특성

선반(EGROU GL-120형)에 시편을 고정한 후 주축대와 베드의 결합면 사이에 개재물을 삽입하고 보울트를 체결하였을 때 공작물-주축계의 1차 고유진동수를 Fig. 9에 표시한다. 그리고 공작물-주축계의 대수 감쇠율은 Fig. 10에 표시한다. 그림에 의하면 경도가

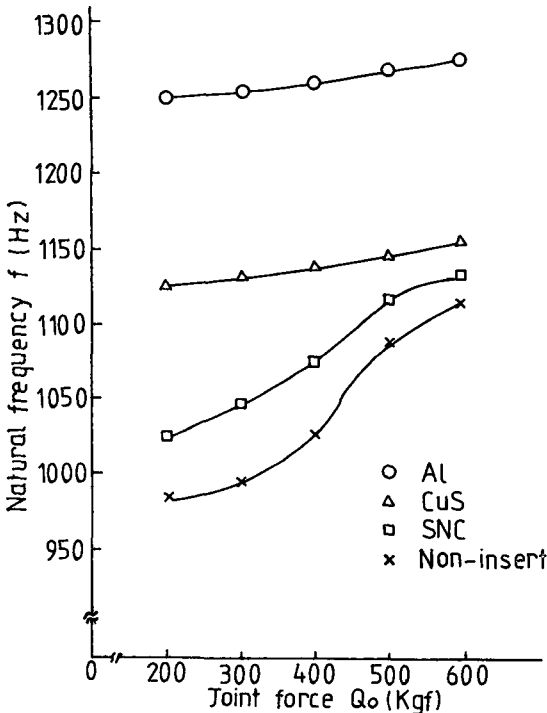


Fig. 9 Influence of joint force and plate material on 1st mode natural frequency for spindle system

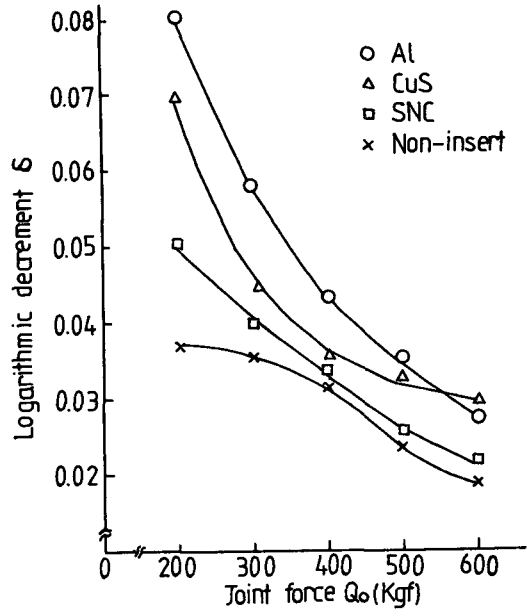


Fig. 10 Influence of joint force and plate material on logarithmic decrement for spindle system

낮은 판재를 삽입하므로써 주축계의 감쇠능력을 크게 할 수 있음이 확인된다.

3.4 채터마크의 검토

주축대와 베드의 결합면 사이에 개재물을 삽입하고 채터진동 상태에서 가공을 시행하였을 때 시편의 채터마크를 비교하면 Fig. 11과 같다. 이 그림은 바이트 폭 5mm 이고 보울트 체결력 $Q=600\text{ kgf}$ 이며 주축을 1000 r.p.m으로 회전시켰을 때이다. 위 그림에 나타나 있는 채터마크의 이송방향 크기를 Fig. 12에 표시한다. 그림에 의하면 회전수의 증가와 함께 채터마크의 길이가 삽입판재의 경도가 낮을수록 커짐을 알 수 있으며 개재물을 삽입하였을 때 상당히 크게 나타나 있다. 채터상태하에서 가공한 가공물의 이송방향 조도를 비교한 결과를 Fig. 13에 표시한다. 그림에 의하면 회전수의 증가에 대한 거칠기의 변화는 나타나지 않고 있으나 개재물의 삽입에 따라 조도가 크게 향상되고 있음을 알 수 있다.

3.5 채터 발생 검토

채터발생 조건을 검토하기 위하여 절삭조건을 2.3항에서 설명한 바와같이 하고 바이트폭만을 변경시켜 보았을 때 Table 2에 나타난 바와같이 바이트폭 1.6mm의 경우에 800 r.p.m과 850 r.p.m 사이에서 채터가 발생됨을 알 수 있으며 Table 2에 의하면 주축대와 베

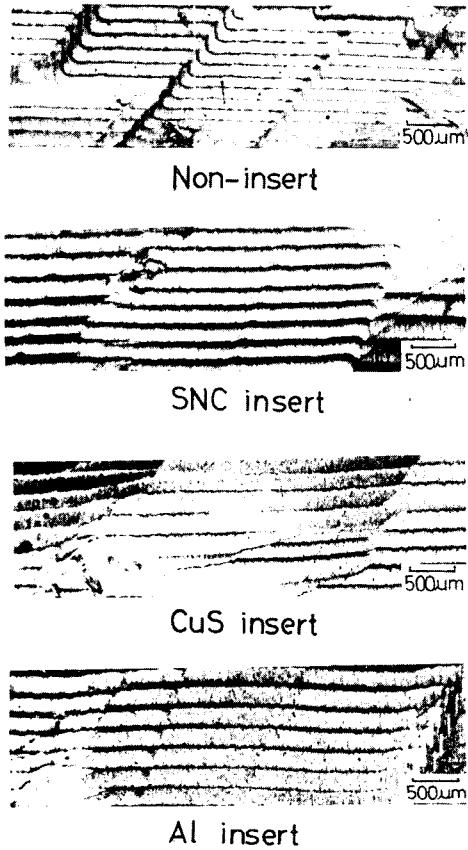


Fig. 11 Type of chatter mark (joint force $Q_0=600$ kgf, spindle speed $N=1000$ r.p.m)

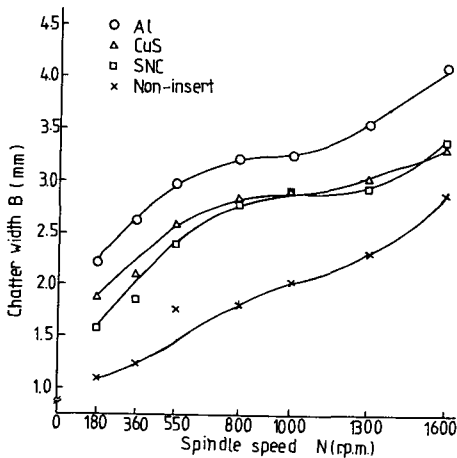


Fig. 12 Influence of spindle speed and plate material on chatter width (joint force $Q_0=600$ kgf)

드의 결합면 사이에 경도가 낮은 판재의 계재물을 삽입하였을 때 표면조도가 향상됨을 알 수 있고 chatter 발생 가능성도 적어지는 것을 알 수 있다.

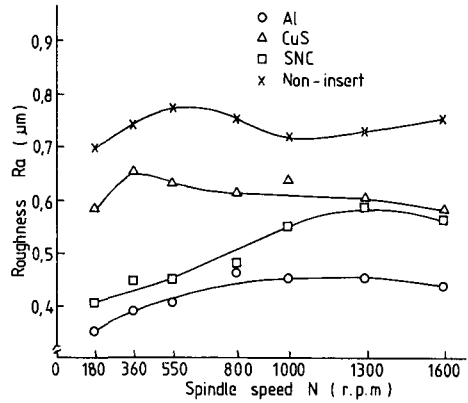


Fig. 13 Influence of spindle speed and plate material of feed direction on roughness (joint force $Q_0=600$ kgf)

Table 2 Point of chatter occurrence and cutting conditions

Insert plate	Hardness (Hv)	Point of chatter occurrence (r.p.m)	Roughness before chatter occurrence (Ra)	Roughness after chatter occurrence (Ra)
Aluminium	52.14	838	1.68	3.4
Brass	116.14	820	2.06	3.68
Stainless Steel	224.14	810	1.77	3.03
Non-insert		804	3.4	3.93

Feed : 0.12 mm/rev
 Depth of cut : 0.02 mm
 Diameter of workpiece : 30 mm
 Length of projecting part from chuck : 140 mm
 Bite width : 16 mm
 back rake angle : 0°
 end relief angle : 0°
 side relief angle : 10°
 length of projecting part from tool post : 40 mm

4. 결 론

기계 구조물과 선반 주축계의 정적강성과 동적특성을 향상시키기 위하여 켈럼모델과 선반 주축대의 보울트 결합면에 계재물을 삽입하고 주축계의 동적특성을 검토하였다.

두께 0.3 mm의 비커스경도 Hv 52.18의 알루미늄판 Hv 116.19의 황동판, Hv 224.14의 스테인리스판의 계재물을 삽입하였을 때 정적강성과 동적특성이 향상된다.

그리고 계재물 중에서 경도가 낮은 판재를 삽입함으로써 정적강성과 동적특성의 향상이 크며 채터진동의 가능성이 적어지는 것도 알 수 있다.

후 기

이 논문은 '85년도 한국학술진흥재단의 연구비로 이루어 졌습니다.

참 고 문 헌

- (1) R. Connolly and R.H. Thornly, 1965, "The Significance of Joints on the Overall Deflection of Machine Tool Structures", Proc 6th Int. MTDR Conf., pp.139~155.
- (2) J.M. Levina, 1967, "Research on the Static Stiffness of Joints in Machine Tools", Proc Int, 8th MTDR Conf., pp.737~758.
- (3) R.H. Thornly. et al., 1965, "The Effect of Surface Topography upon the Static Stiffness of Machine Tool Joints", into Mach, Tool Des. Res 5 $\frac{1}{2}$, pp.57~72.
- (4) 伊東 諄, 1971, "工作機械のボルト結合部の曲げ静剛性に關する研究", 日本東京工業大學 學位論文.
- (5) 堤 正臣, 1978, "工作機械のボルト結合部動特性に關する研究", 日本東京工業大學 學位論文.
- (6) A.L. Sweet. J. Genin, P.F.MIakar, 1976, "Vibratory Identification of Beam Boundary Conditions", ASME Journal of Dynamic System. Measurment and Control, Vol. 98, pp.387~394.
- (7) R.H. Thornley and F.Koenigberger, 1971, "Dynamic charateristics of Machined Joints Loaded and Excited Normal to the Joint Face", Anabs of the C.I.R.P. Vol. 44, pp.459~469.