

〈論 文〉

공구고정부에 점탄성재료 삽입을 통한 채터감소에 관한 연구

유 영 기* · 심 송* · 김 광 준**

(1989년 4월 17일 접수)

A Study on the Chatter Suppression by Inserting Viscoelastic Materials between Tool and Toolpost

Young-Kee Yoo, Song Sim and Kwang-Joon Kim

Key Words : Shear Impedance Test(횡방향 임피던스 실험), Shape Factor(형상계수), Viscoelastic Material(점탄성 재료), Complex Elastic Modulus(복소탄성계수), Impact Test(충격실험)

Abstract

This work is concerned with the chatter suppression by inserting viscoelastic materials into tool clamping area. Chatter was observed with and without the viscoelastic materials during cutting tests, where the overhang of the tool was made long so that the tool may be a major cause for the chatter. Two viscoelastic materials were used and the effects of thickness and prestrain were investigated. Impact tests were performed on the tool in cases where the tool post was set on the cross slide and was free from any boundary conditions. Material properties of the viscoelastic materials were also obtained from resonance test results. The effects on the chatter suppression by the type of the viscoelastic material and prestrain are discussed in relation with the measured material properties.

기 호 설 명

E^*	: 복소 탄성계수	k_s	: 형상계수(shape factor)
E_r	: 가공오차	$[M]$: 축약된 공구의 질량 행렬
$\{F\}$: 공구의 수직방향으로 작용하는 외력행렬	R	: 가공전 공작물의 반지름
f_n	: 횡방향 임피던스 실험(shear impedance test)에서의 고유진동수	r	: 가공하고자 하는 공작물의 반지름
$[K]$: 축약된 공구의 강성 행렬	r'	: 가공후 공작물의 반지름
$[\Delta K]$: 구조감쇠를 갖는 공구체결부와 삽입 재료의 강성 행렬	w_i	: 공구의 수직방향변위
K	: 구조감쇠를 갖는 공구체결부와 삽입 재료의 강성 계수	$\{W\}$: 공구의 수직방향변위 행렬
		$\bar{\eta}$: 구조감쇠를 갖는 공구체결부와 삽입 재료의 손실계수
		η	: 횡방향 임피던스 실험결과에서 얻은 손실계수
		θ_i	: 공구 각 절점에서의 회전변위
		Δ	: 공구선단에서의 절삭력에 의한 처짐

* 한국과학기술원 생산공학과

** 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

1. 서 론

공작기계에 있어서 채터(chatter)진동은 가공능률과 정밀도의 저하, 그리고 공작 기계와 공구의 수명저하 등의 주된 원인으로 알려져 있다. 이러한 채터진동의 발생을 억제하기 위해 공작기계를 다시 설계하는 경우 많은 비용과 시간이 들게 된다. 따라서 절삭작업시 발생하는 채터의 진동원인을 파악하고, 일부 구조의 변경을 통해 채터진동 감소를 얻기 위한 연구가 진행되어 왔다⁽¹⁾.

채터진동의 원인은 여러가지가 있을 수 있으나 보오링가공에서는 공구부의 동적 강성이 약하여 일어나는 경우가 많다. 본 연구에서는 이러한 경우를 대상으로 하여, 채터발생의 주원인이 공구가 되도록 돌출길이를 충분히 길게 한 상태에서 공구체결부에 점탄성재료를 삽입하고 채터진동 억제 효과를 검토하였다. 또한 점탄성 재료 삽입으로 인한 공구 고정부의 강성 및 감쇠의 변화를 공구고정부에 대한 유한요소해석(FEA) 및 충격실험 등을 수행하여 알아보았으며, 정적 강성의 저하로 인해 안정절삭조건에서 발생할 수 있는 정밀도저하를 검토하여 보았다.

2. 이론적 배경

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 이 그림에서 공구고정부(tool post part) I은 크로스 슬라이드를 포함하는 공구 고정부를 의미하며, 공구고정부(tool post part) II는 크로스 슬라이드를 포함하지 않는 공구고정부로서 크로스슬라이드로부터 분리된 상태의 공구고정부를 지칭한다.

2.1 채터 발생 이론

절삭작업에서의 채터 진동은 여러가지 요인에 의하여 발생할 수 있는데, 일반적으로 절삭날의 동적 변위 혹은 속도에 비례하는 절삭력이 공구에 작용하기 때문인 것으로 알려져 있다⁽²⁾.

Fig. 1에 보인 선삭작업의 경우, 공구 끝부분의 동적인 거동은 아래 보인 식 (1)과 같이 1자유도계로 근사화할 수 있다.

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = F(t) \quad (1)$$

여기서

M : 공구선단의 등가 질량

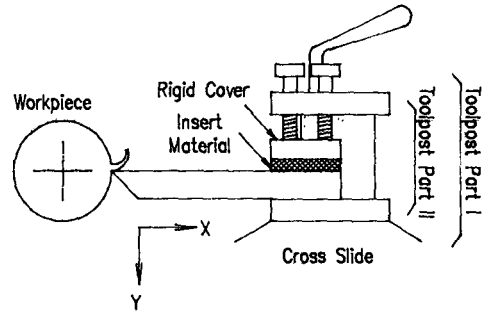


Fig. 1 Set-up for cutting test

C : 공구선단의 등가 감쇠계수

K : 공구선단의 등가 강성계수

$F(t)$: 외력

Y : 공구의 주분력방향 변위

또한 절삭시 발생하는 절삭력은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$F(t) = C_1 \dot{Y} + C_2 Y \quad (2)$$

여기서

C_1 : 속도에 비례하는 힘성분의 계수

C_2 : 변위에 비례하는 힘성분의 계수

위의 (1), (2)식을 정리하면,

$$M\ddot{Y} + (C - C_1)\dot{Y} + (K - C_2)Y = 0 \quad (3)$$

으로 표현할 수 있다. 여기서 $C - C_1$ 값이 음의 값을 가지면 이 계는 동적으로 불안정하게 되며, 이때 큰 진폭의 채터 진동이 발생하게 된다.

본 연구는 위의 식 (3)에서 공구 및 고정부특성에 의해 정해지는 감쇠량 C 를 증가시킴으로써 채터발생을 억제하도록 하기 위하여, 공구고정부에 점탄성 재료를 삽입하고 충격실험 및 절삭실험을 통하여 이에 의한 강성변화 및 감쇠효과를 검토하였다.

2.2 점탄성재료의 동적성질

점탄성재료는 외부에서 응력이 가해질 경우, 받은 에너지중 일부는 복원가능한 탄성에너지로 저장하고 나머지는 열에너지로 발산시켜 버리는 성질을 가진 물질로서 강성과 감쇠성을 함께 가지고 있다⁽³⁾. 즉, 응력이 주기적으로 변할 때, 변형과 응력 사이의 위상차는 완전탄성체(perfectly elastic body)처럼 0° 가 아니고, 완전점성유체(perfectly viscous fluid)처럼 90° 도 아닌 그 사이값이 된다. 변형률과 변형률의 시간에 대한 변화량이 작을 때,

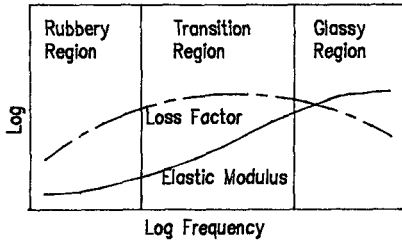


Fig. 2 Elastic modulus and loss factor of viscoelastic materials

응력과 변형률사이의 관계는 일정한 계수를 가지는 편미분방정식으로 표현되며⁽⁴⁾, 이 식을 주파수 영역에서 간단히 쓰면 다음과 같이 응력과 변형률의 비는 복소수로서 표현된다.

$$\sigma(j\omega) / \varepsilon(j\omega) = E^*(j\omega) = E(\omega) (1 + j\eta(\omega)) \quad (4)$$

여기서

$E^*(j\omega)$: 복소탄성계수

$E(\omega)$: 탄성계수

$\eta(\omega)$: 손실계수

위 식 (4)는 변형률과 응력사이에는 $\tan^{-1}\eta$ 만큼의 위상차가 있음을 나타내고 있다.

한편, 점탄성재료의 탄성계수와 손실계수의 일반적인 주파수의존특성은 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 공구고정부에 대한 예비 충격실험을 하여 얻은 주요 고유진동수 범위에 따라 관심의 대상이 되는 주파수범위를 1.0kHz에서 2.0kHz까지로 정하여 검토하였다.

2.3 점탄성재료의 전단탄성계수와 손실계수 측정

점탄성재료에서는 프와송비가 0.5에 근접하기 때문에 탄성계수 E 와 전단탄성계수 G 사이에는 $E = 3G$ 의 관계가 있다. 따라서 전단탄성계수를 측정함으로써 탄성계수를 추정할 수 있게 된다. Fig. 3과 같이 점탄성재료를 집중질량 M 의 네 위치에 고정하고 횡방향 임피던스 실험(shear impedance test)을 통하여 전달함수를 측정하면, 공진점으로부터 다음과 같이 전단탄성계수와 손실계수를 구할 수 있다⁽³⁾.

(1) 전단탄성계수 (shear modulus)

전단탄성계수 G 는 공진주파수 f_n 을 측정함으로써 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

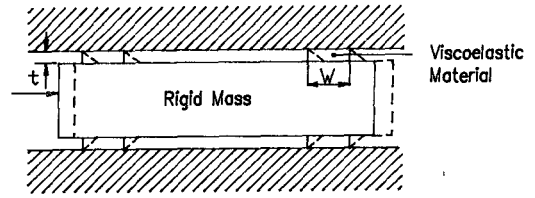


Fig. 3 Test set-up for impedance measurement

$$G = M \cdot (2\pi \cdot f_n)^2 \cdot \frac{t}{S} \cdot \frac{1}{k_s} \quad (5)$$

여기서

k_s : 형상계수 (= $1/(1+t^2/6R^2)$)

S : 힘을 받는 면적 (= WL)

L : 시편의 지면에 수직방향으로의 길이

t : 시편의 두께

R : 시편단면의 회전반경 (= $W/\sqrt{12}$)

M : 강체질량

(2) 손실계수 (loss factor)

공진주파수 f_n 주위의 3dB(0.5 power) 지점에 해당하는 주파수를 $f_1, f_2(f_1 < f_2)$ 라 하면 손실계수 η 는 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_n} \quad (6)$$

2.4 공구고정부의 모형화

공구고정부에 점탄성재료 삽입으로 인한 강성 및 감쇠의 변화를 알아보기 위하여 Fig. 4와 같이 모형화하였다. 우선 공구의 탄성계수, 질량 및 기하학적 형상을 정하고 공구를 유한 요소법(FEM)에 의해⁽⁵⁾ 절점(node) 13개로 구성한 후 수직방향변위 (W_i)와 회전변위 (θ_i)를 고려하여 공구의 질량행렬과 강성행렬을 구하였다. 또한 공구체결부에 삽입

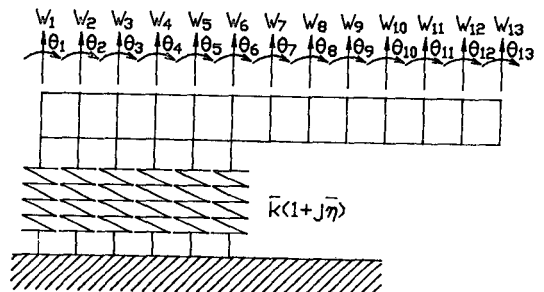


Fig. 4 A model of tool clamping part

된 점탄성재료로 인한 강성 및 감쇠효과를 고려하기 위하여 절점 1에서 6까지 구조감쇠를 갖는 동일한 스프링이 보에 수직방향으로 연결된 것으로 가정하였다. 공구의 질량행렬과 강성행렬은 수직방향 변위에 대하여 13×13으로 축약(condensation)될 수 있으며⁽⁶⁾, 공구체결부 강성행렬은 다음과 같이 수직방향변위 13×13 행렬의 해당 위치를 택하여 쓸 수 있다.

$$[\Delta K] = \bar{k}(1 + j\bar{\eta}) \cdot \begin{bmatrix} 100000 \\ 010000 \\ 001000 \dots 0 \\ 000100 \\ 000010 \\ 000001 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$[\Delta K]$: 구조감쇠를 갖는 공구체결부의 강성 행렬

\bar{k} : 구조감쇠를 갖는 스프링의 강성계수

$\bar{\eta}$: 구조감쇠를 갖는 스프링의 손실계수

따라서 공구고정부의 운동방정식은 각 절점의 수직방향 변위에 대해 차원 13×13의 행렬로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[M] \{\ddot{W}\} + ([K] + [\Delta K]) \{W\} = \{0\} \quad (8)$$

여기서

$[M]$: 공구의 질량 행렬

$[K]$: 공구의 강성 행렬

$\{W\}$: 수직방향변위 행렬

2.5 정적 정밀도저하 추정

점탄성재료의 삽입으로 인하여 감쇠특성은 향상되지만 정적 강성의 저하로 인하여 가공 정밀도가 저하될 가능성이 있다. 이 현상은 다음과 같이 절삭력에 의한 공구선단에서의 정적 처짐을 계산함으로써 살펴볼 수 있다. 힘과 변위와의 정적인 관계는 식 (8)을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$([K] + [\Delta K]) \{W\} = \{F\} \quad (9)$$

여기서

$\{F\}$: 공구에 수직방향으로 작용하는 외력 행렬

절삭작업시 절삭력은 공구의 선단절점 13에만 작용하므로 외력행렬 $\{F\}$ 는 이 항을 제외하고는 모

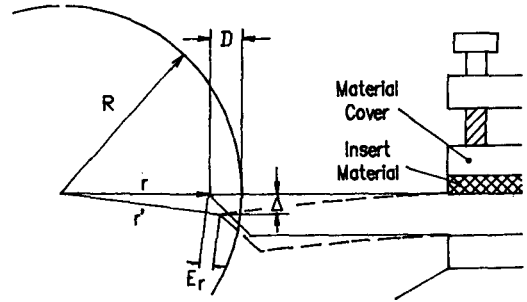


Fig. 5 Definition of cutting error due to tool deflection

두 0의 값을 갖는다. 위에서 구한 수직방향변위 행렬요소중 공구선단에서의 처짐 W_{13} 을 기호 Δ 로 표시하여, 공구가 Fig. 5와 같이 정적 처짐을 일으키는 것으로 가정하면 가공오차 E_r 은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$E_r = r' - r = r \left(\sqrt{\left(\frac{\Delta}{r}\right)^2 + 1} - 1 \right) \quad (10)$$

여기서

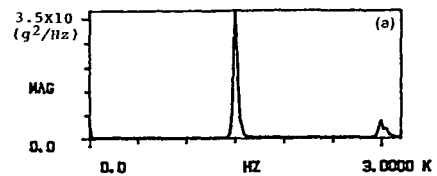
r' : 처짐이 있을 경우 공작물 반경

r : 처짐이 없을 경우 공작물 반경

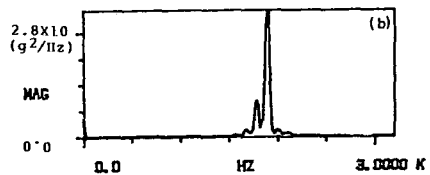
3. 실험방법 및 실험결과

3.1 절삭 실험

공구(옆면절삭날각: 45°, 여유각: 0°, 경사각: -7°, 길이: 125mm)의 두 돌출길이 조건(75mm와 65mm)에서 토오크렌치를 사용하여 일정한 토오크



(a) Overhang length : 75mm



(b) Overhang length : 65mm

Fig. 6 Autospectrum of the tool vibration under chatter condition

80N·m로 점탄성재료를 삽입하지 않고 체결한 경우, 절삭속도 134m/min, 절삭깊이 15mm, 이송속도 0.1mm/rev로 하여 절삭실험한 결과 두 조건 모두에서 큰 소음을 내며 공구가 크게 진동하였다.

이 두 경우에 대한 공구선단 가속도의 자기스펙트럼은 Fig. 6에서와 같이 약 1.5kHz와 1.9kHz에서 극대값(peak)을 보였다.

3.2 채터 원인 규명

자기스펙트럼(autospectrum)의 극대값 주파수는 Table 1과 같이 절삭속도에 비례하여 변하지 않았으며, Kegg의 진동원인 판별방법^(7,8)에 따라 큰 진폭, 소음의 진동 원인은 자려진동을 확인할 수 있었다. 채터 발생의 보다 근본적인 원인을 알아보기 위하여 Fig. 7과 같이 공구선단부, 공구대 및 공작물에서의 컴플라이언스를 충격실험으로 측정하였다.

(1) 공구선단부의 충격실험

공구를 공구대에 고정하고 점 6에서 충격을 가하

Table 1 Comparison of the chatter frequency for cutting test

Cutting speed(m/min)	Chatter frequency(Hz)
110	1777.
170	1892.
278	1777.

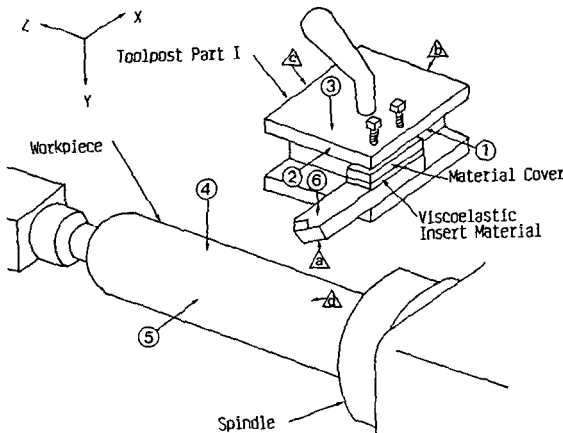


Fig. 7 Measurement points in impact test on the lathe

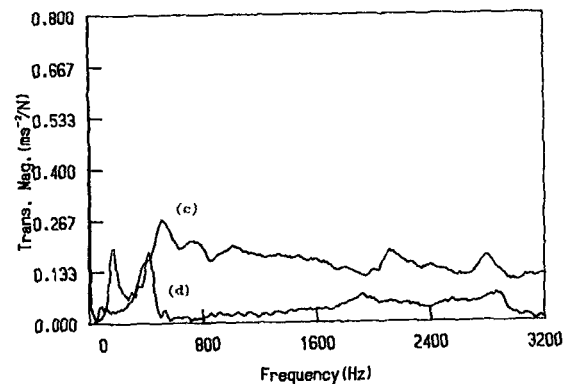
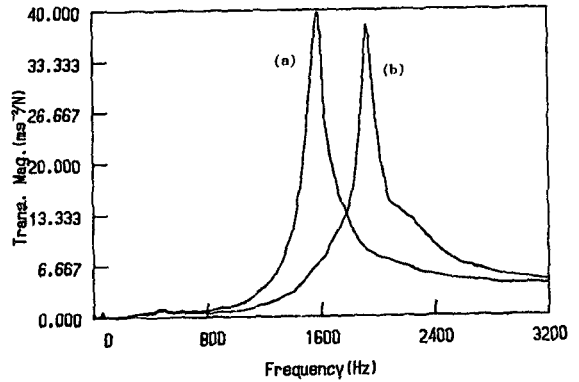
(1, 2, 3, 4, 5, 6 : Impact point)

(a, b, c, d : Location of the accelerometer)

여 채터 진동수를 포함하도록 관심주파수를 3kHz로 하였으며 이 범위에서 Y방향의 컴플라이언스를 구하였다. 돌출길이 75mm와 65mm에서 80N·m의 토크로 체결한 경우, Fig. 8(a)와 (b)에 보인바와 같이 돌출길이 75mm에서는 고유진동수가 1575Hz이고, 돌출길이 65mm에서는 고유진동수가 1925Hz로 나타났다.

(2) 공구대의 충격 실험

공구대 위의 점 1, 2, 3에 대해 X, Y, Z방향의 충격실험을 하여 관심주파수범위에서 공구대의 컴플라이언스를 구하였다. Fig. 8(c)에 X방향의 충격실험 결과의 한 예를 보이고 있듯이 공구선단의 컴플라이언스에 비해 상당히 작은 값을 갖는다. 즉



(a) Overhang length 75mm, natural frequency 1575(Hz)

(b) Overhang length 65mm, natural frequency 1925(Hz)

(c) Transfer function of the toolpost

(d) Transfer function of the workpiece

Fig. 8 Transfer functions of tool, toolpost and workpiece

Table 2 Comparison of the X, Y, Z axis acceleration

Length(mm)	Depth of cut(mm)	X	Y	Z
65	20	0.232	0.855	1.598
65	25	0.175	1.118	2.245
65	30	0.324	1.388	2.189
75	15	0.862	1.714	2.717
75	20	0.913	2.400	4.187
75	25	0.710	1.978	3.062

공구대는 공구선단에 비해 강성이 크다는 것을 알 수 있다.

(3) 공작물 충격실험

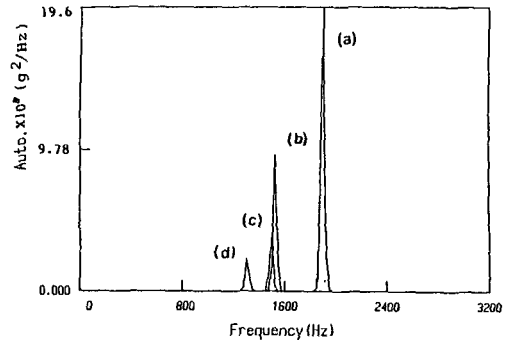
공작물을 척에 고정된 후 점 4와 점 5에 충격을 가하여 공작물의 কম플라이언스를 구하였다. 이 결과 Fig. 8(d)에서와 같이 관심 주파수영역에서는 공구선단의 কম플라이언스보다 낮게 나타났다. 따라서, 공작물 또한 공구보다 강성이 크다는 것을 알 수 있다.

3.1절의 절삭실험 결과에서 언급한 바처럼 자기 스펙트럼의 극대값에 해당하는 주파수가 1.5kHz와 1.9kHz로서 공구에 대한 가진실험에서의 고유진동수와 거의 일치하고 있고 공구의 কম플라이언스가 공구대와 공작물에 비하여 크게 나타났으므로 절삭실험에서 일어난 채터의 원인은 공구에 있음을 알 수 있다.

다음은 채터억제를 위한 가장 효과적인 방향을 찾기 위하여 세방향 가속도계(B&K, 4321)를 사용하여 채터 발생시 세방향의 가속도를 동시에 측정하였다. Table 2는 절삭속도 110m/min, 이송속도 0.1mm/rev로 일정하게 하여 돌출길이와 절삭깊이의 변화에 따른 세방향의 진동크기를 구하였다. 가속도의 크기는 $Z < X < Y$ 순으로 나타났고 Z방향에 비하여 Y방향은 상당히 큰 가속도의 변화를 보이고 있다. 즉, 공구의 진동은 공작물의 원주속도 방향으로 가장 심하게 일어남을 알 수 있었다. 따라서, 공구의 진동에 관심을 기울일 방향은 Y 방향으로 결정하였다.

3.3 점탄성 재료 삽입후 절삭실험

공구고정부에 점탄성 재료를 삽입하고 크로스 슬



(a) No. insert material
 (b) PVC, thickness 1.2mm, strain 33.34(%)
 (c) PVC, thickness 2.1mm, strain 23.81(%)
 (d) PVC, thickness 3.2mm, strain 23.44(%)

Fig. 9 Autospectrum of tool accelerations with/without viscoelastic materials

라이드에 고정된 상태에서 충격실험을 하여 손실계수 및 고유진동수를 알아보고, 채터 발생시 채터 주파수와 각 삽입재료의 두께 및 초기변형률의 변화에 따른 채터정도를 검토하기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다.

(1) 공구고정부 I 에 대한 충격실험

공구의 돌출 길이를 75mm로 유지한 상태에서 삽입재료 폴리우레탄과 PVC의 두께가 각각 3.2, 2.1, 1.2mm인 경우에 크로스 슬라이드에 고정된 공구고정부에 삽입하고 초기변형률을 변화시키면서 충격 실험을 하였다. 이때, 절삭작업시 이송방향 절삭력에 의한 체결부에서 미끄러짐을 방지하기 위하여 삽입재료에 대한 변형률은 30%이상으로 하여 충분한 체결력이 발생하도록 하였다. 삽입재료의 형상은 가로 20mm, 세로 50mm된 판형이었다. 실험결과로부터 산출된 고유진동수와 손실계수는 Table 3의 네번째, 다섯번째 열에 나타낸 바와 같고, 이를 간략히 정리하면 다음과 같다.

- (i) PVC보다 폴리우레탄의 손실계수가 약간 더 크게 나타났다.
- (ii) 두 재료 모두에서, 초기변형률 1.5배 증가에 따라 손실계수는 약 16%의 감소를 보였다.
- (iii) 같은 재료, 같은 초기변형률의 경우, 삽입재료의 두께가 증가할수록 감쇠효과는 증가하였다.
- (iv) 고유진동수는 두께가 증가할수록 감소하고 변형률이 증가할수록 증가하였으며 폴리우레

Table 3 Comparison of the chatter for the loss factor

Insert mater.	Thickness (mm)	Strain (%)	Nat. freq. (Hz)	Loss factor	Chat. freq. (Hz)	Peak value (g ² /Hz)
No mat.	0	0	1965.6	.01513	1900.0	18711.33
PVC	1.2	33.34	1795.2	.03397	1525.0	8880.34
PVC	1.2	41.67	1803.1	.03197	1637.5	11278.78
PVC	1.2	51.67	1811.8	.02853	1698.5	12469.33
PVC	2.1	23.81	1790.0	.05599	1500.0	6534.34
PVC	2.1	28.57	1812.5	.05033	1601.4	8993.09
PVC	2.1	35.71	1815.6	.04567	1627.5	10532.39
PVC	3.2	23.44	1734.4	.06021	1312.5	2127.52
PVC	3.2	29.69	1768.7	.06962	1462.5	3854.04
PVC	3.2	35.94	1770.4	.07150	1550.0	8992.25
PU.	1.2	45.45	1675.0	.03663	1475.4	6332.82
PU.	1.2	54.55	1696.9	.03630	1501.7	7020.38
PU.	1.2	63.64	1718.7	.03610	1598.5	8136.19
PU.	2.1	28.57	1646.9	.04696	1437.5	2950.89
PU.	2.1	33.33	1681.2	.04434	1480.5	4411.25
PU.	2.1	40.48	1693.7	.04019	1508.4	7978.45
PU.	3.2	28.12	1615.6	.08771	1231.4	1333.07
PU.	3.2	35.94	1654.4	.08636	1357.0	3731.79
PU.	3.2	43.75	1670.6	.06609	1462.5	7139.98

탄보다 PVC의 경우가 고유진동수가 크게 나타났다.

(2) 절삭실험

채터발생시 Y방향으로의 진동에 대한 주파수별 특성규명을 위하여 공구선단부에 가속도계를 설치하여 자기스펙트럼을 구하였다. 채터 주파수에서의 진동정도를 알기 위하여 절삭속도 145m/min, 절삭깊이 3mm, 이송속도 0.1mm/rev에서 폴리우레탄 PVC의 두께를 3.2, 2.1, 1.2mm로 변화시키며 실험한 결과, Table 3의 여섯번째, 일곱번째 열과 같은 채터주파수와 자기스펙트럼의 극대값 결과를 얻었고, PVC의 경우에 두께 변화에 따른 자기스펙트럼은 Fig. 10에 보인 바와 같다. 전반적으로 PVC보다 폴리우레탄이 채터를 크게 감소시키고 있고, 각 재료의 경우 두께가 증가할수록 감소효과가 증가하였다. 한편, 변형률이 증가할수록 감소효과가 작아지는 경향을 알 수 있고, 이 경향은 폴리우레탄을 사용한 경우의 표면거칠기를 보인 Fig. 10에서도 볼 수 있다. 공구고정부에 대한 충격실험

결과와 비교하면, 손실계수가 클수록 채터정도가 뚜렷하게 감소함을 알 수 있다.

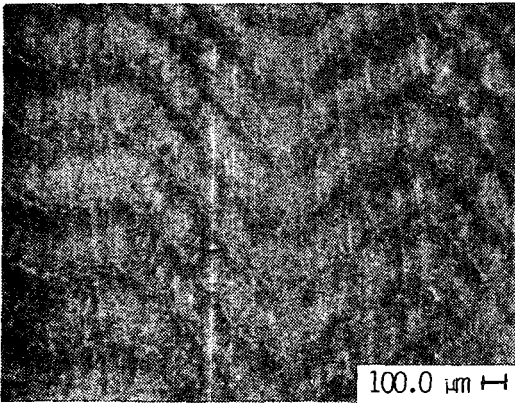
3.4 분리된 공구고정부 II에서 점탄성재료 삽입으로 인한 강성 및 감쇠변화규명

분리된 공구고정부 II에서 점탄성재료의 삽입으로 인한 강성의 변화를 알아보기 위하여, 자유경계 조건하에서의 공구고정부에 대한 충격실험으로부터 측정된 고유진동수와 유한요소법에 의한 계산결과가 일치되도록 삽입재료의 강성계수를 구하였다. 또한 각 재료의 삽입조건에서의 충격실험 결과로부터 감쇠계수의 변화를 조사하였다.

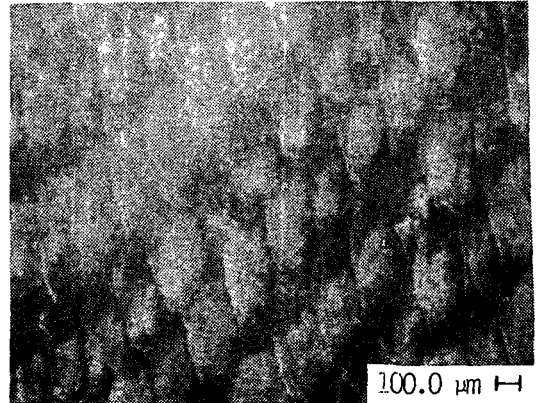
(1) 공구재료의 탄성계수 측정

우선 Fig. 4에 보인 유한요소모델에서 공구의 강성행렬을 구성하는데 필요한 탄성계수를 구하기 위해 자유경계조건 상태에서 충격에 의한 굽힘진동을 측정하였다.

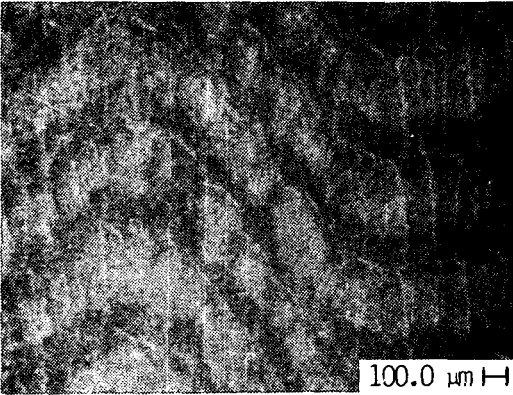
이 결과 첫번째 굽힘 고유진동수는 6600Hz로 나타났다. 따라서 공구의 탄성계수는 일정단면을 갖



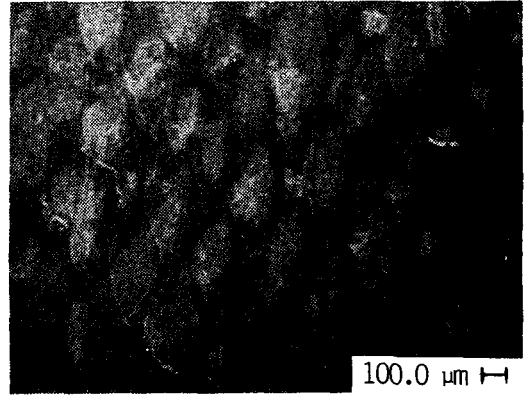
(a) No inserted material. $Ra=4.39\mu\text{m}$



(c) Polyurethane, thickness 3.2mm strain 35. 94%. $Ra=3.317\mu\text{m}$



(b) Polyurethane, thickness 3.2mm strain 28. 30%. $Ra=2.627\mu\text{m}$



(d) Polyurethane, thickness 3.2mm strain 43. 75%. $Ra=3.622\mu\text{m}$

Fig. 10 Cut surfaces of workpieces for various prestrain levels of Polyurethane. Ra : surface roughness

는 보가 자유경계조건에서 첫번째 굽힘 모우드에 해당하는 고유진동수가 다음과 같음을 이용하여 추정하였다⁽⁹⁾.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} (1.506\pi)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (11)$$

여기서

m : 단위 길이당 보의 질량(kg/m)

I : 보의 면적관성 모멘트(m^4)

L : 보의 길이(m)

즉, 보의 탄성계수는 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$E = \frac{mL^4}{I} \left[\frac{2\pi \times f_n}{(1.206\pi)^2} \right]^2 \quad (12)$$

공구의 형상을 길이: 0.12m, 높이: 0.02m,

폭: 0.02m인 일정단면의 보로 근사화하고, 공구의 무게를 측정하여 m : 3.0833kg/m을 구한 후, 이를 식 (12)에 대입한 결과, 공구 재료의 탄성계수는 $1.712949 \times 10^{11} (\text{N}/\text{m}^2)$ 이었다.

(2) 자유경계조건에서의 공구고정부 II에 대한 충격실험

공구고정부와 크로스 슬라이드와의 접촉과 이송대와 베드면과의 접촉 등에 의한 영향을 배제한 공구고정부 II에서만의 삽입재료에 의한 강성 및 감쇠효과를 알아보기 위하여 공구고정부 II를 스펀지 위에 올려놓고 (근사적 자유경계조건) 충격실험을 하여 고유진동수와 손실계수를 구하였다. 이 결과로부터 구해진 점탄성재료에 의한 공구체결부의 강

Table 4 Stiffness and loss factor of the toolpost part II

Insert mater.	Thickness (mm)	Strain (%)	Stiffness (N/m)	Loss factor
No mat.	0	0	2.0274E+09	0.069
PVC	1.2	33.34	1.0949E+09	.164
PVC	1.2	41.67	1.3994E+09	.135
PVC	1.2	51.67	1.5029E+09	.130
PVC	2.1	23.81	3.7750E+08	.181
PVC	2.1	28.57	8.8998E+08	.161
PVC	2.1	35.71	1.4544E+09	.138
PVC	3.2	23.44	5.7899E+08	.195
PVC	3.2	29.69	6.5949E+08	.179
PVC	3.2	35.94	7.5149E+08	.149
PU.	1.2	45.45	6.5949E+08	.319
PU.	1.2	54.55	8.5898E+08	.235
PU.	1.2	63.64	9.5397E+08	.201
PU.	2.1	28.57	3.9000E+08	.164
PU.	2.1	33.33	5.9899E+08	.135
PU.	2.1	40.48	8.0298E+08	.296
PU.	3.2	28.12	3.3700E+08	.531
PU.	3.2	35.94	4.6650E+08	.478
PU.	3.2	43.75	7.5149E+08	.312

성 및 손실계수는 각각 Table 4의 세번째, 네번째 열에 보인 바와 같으며, 이에 의하면 전체적 경향이 크로스 슬라이드에 고정된 경우의 결과인 Table 3과 유사함을 알 수 있다. 즉, 감쇠효과는 재료의 두께가 증가할수록 증가하고 변형률이 증가할수록 감소하며, 강성은 재료의 두께가 증가할수록 감소하고 변형률이 증가할수록 증가함을 보였다. 또한 폴리우레탄이 PVC보다 같은 두께 및 변형률에서 감쇠효과는 크나 강성이 낮음을 알 수 있다.

(3) 정적 정밀도의 변화

다음은 위의 실험결과로 구한 강성행렬 $[ΔK]$ 을 이용하여 식 (9)로부터 절삭력 1000kgf에 해당하는 공구선단부의 처짐을 계산하였다. 개재물이 없는 경우 $7.8481 \times 10^{-4}m$ 이고, 두께 3.2mm, 변형률 28.12%인 폴리우레탄의 경우 $8.556072 \times 10^{-4}m$ 가 되었다.

따라서 공작물의 지름이 5cm이고 절삭깊이를 1mm로 할 때 식 (10)에 필요한 변수값들은 다음과

같으므로

$$r = 0.025 - 0.001$$

$$Δ_1 = 7.8481 \times 10^{-4} (m) \text{ (개재물이 없을 경우)}$$

$$Δ_2 = 8.556072 \times 10^{-4} (m) \text{ (개재물 : 폴리우레탄)}$$

각각의 경우 정밀도저하는 아래와 같다.

$$E_{r1} = r \left(\sqrt{\left(\frac{Δ_1}{r} \right)^2 + 1} - 1 \right) = 1.2828 \times 10^{-5} (m)$$

$$E_{r2} = r \left(\sqrt{\left(\frac{Δ_2}{r} \right)^2 + 1} - 1 \right) = 1.5254 \times 10^{-5} (m)$$

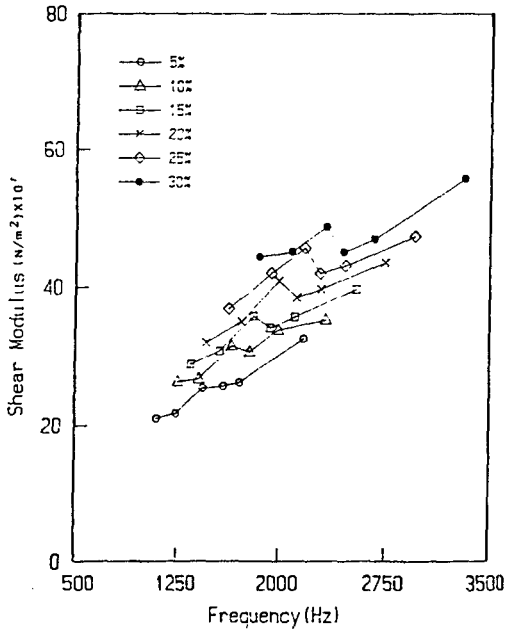
즉, 개재물이 폴리우레탄인 경우, 개재물이 없는 절삭조건에 비하여 가공 후 예상되는 반지름 증가는 약 $2.42 \mu m$ 이었다.

3.5 점탄성재료의 전단탄성계수 및 손실계수 측정

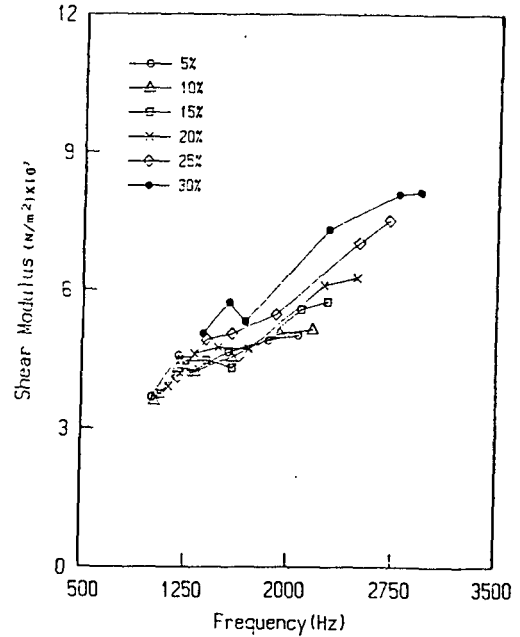
공구체결부에 삽입된 점탄성재료에 의해 계의 강성 및 감쇠특성이 변화함을 살펴보았는데, 이 변화

가 점탄성재료의 특성과 어떻게 관련되는지를 규명하기 위하여, 2.3절에 설명된 방법에 따라 실험장치를 구성하고 횡방향 임피던스 실험(shear impedance test)을 하였다.

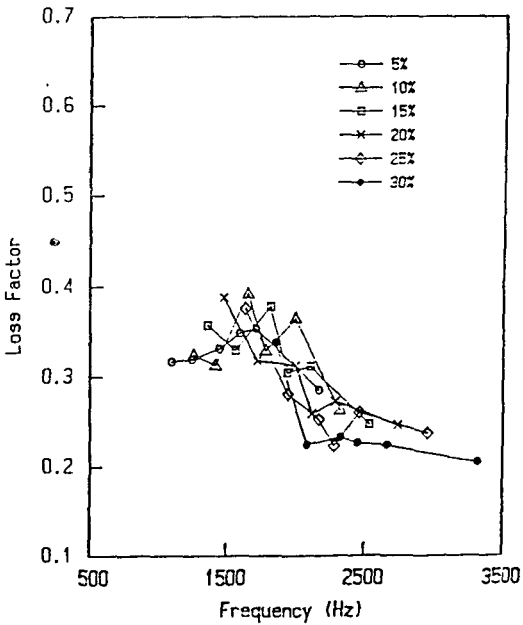
점탄성 재료인 폴리우레탄과 PVC를 바이스에 고정하고 재료의 폭을 조절함으로써 고유 진동수를 변화시키고, 또한 두께의 변형률도 5%에서 30%까지 변화시키면서 충격 실험을 수행하였다. 이 실험



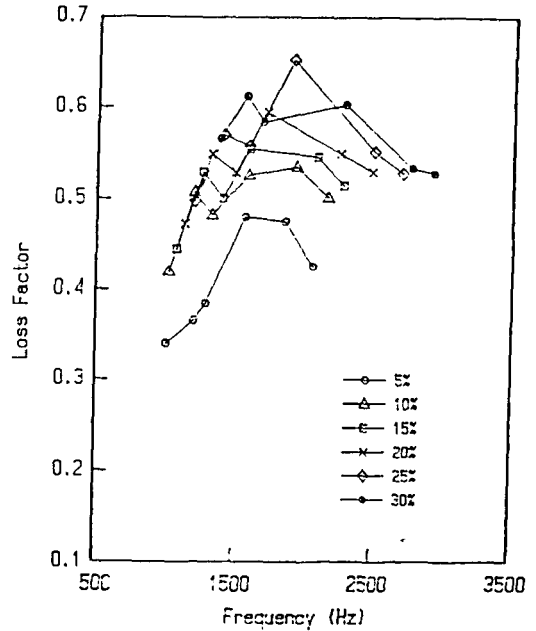
(a) Shear modulus of PVC



(c) Shear modulus of polyurethane



(b) Loss factor of PVC



(d) Loss factor of polyurethane

Fig. 11 Loss factor and shear modulus of the viscoelastic materials

결과는 Fig. 11에 나타낸 바와 같으며, 각 재료에 대하여 특성을 살펴보면 다음과 같다.

PVC의 손실계수는 변형률 증가의 초기에는 변형률에 크게 의존하지 않지만, 변형률이 증가할수록 감소하고 있으며, 주파수의 증가에 따라서는 전단탄성계수는 변형률과 주파수가 증가할수록 증가함을 보이고 있다.

폴리우레탄의 손실계수는 낮은 변형률에서는 변형률이 증가할수록 증가하나 높은 변형률에서는 증가율이 둔화되고 있으며, 주파수 의존성의 경우 1.6kHz에서 비교적 크게 나타나다가 감소함을 보이고 있다. 또한 전단탄성계수는 PVC와 마찬가지로 변형률과 주파수가 증가할수록 증가함을 보이고 있다.

4. 고찰 및 결론

공구고정부 II가 크로스슬라이드에 고정된 상태에서의 실험결과인 Table 3과 자유경계조건하에서의 실험결과인 Table 4 및 점탄성재료의 물성치인 Fig. 11을 면밀하게 검토함으로써 다음과 같은 사항을 도출할 수 있었다.

- (1) 손실계수의 경우 대체적으로 Fig. 11, Table 4, Table 3의 순서로 적어짐을 알 수 있으며, 이는 접속구조물이 증가함에 따라 점탄성재료가 소화시킬 수 있는 에너지가 운동에너지나 위치에너지에 비해 상대적으로 적어지는 때문으로 생각된다.
- (2) 공구체결부에 점탄성재료를 삽입함으로써 채터진폭이 감소될 수 있고, 그 효과는 PVC보다는 폴리우레탄에서 잘 나타나고 있다. 이는 Fig. 11에 보인 바와 같이 후자의 감쇠계수가 약 2배에 이르는 때문으로 생각된다.
- (3) Table 4는 같은 삽입재료의 경우 두께의 증가, 예비변형률(23-63% 범위)의 감소에 따라 채터 정도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 후자의 경우

재료만의 물성치를 나타낸 Fig. 11에서 볼 수 있듯이, 5-30%의 예비변형률 범위에서 변형률에 따라 증가하거나(폴리우레탄) 혹은 크게 관련되지 않는(PVC) 경향과 잘 일치하지 않고 있다. 이는 변형률이 커짐에 따라 물성치규명 실험 자체가 어려워지고 또한 수학적 모형의 유용성에 한계가 있기 때문으로 판단된다.

한편 체결부의 정적 강성은 점탄성재료의 삽입으로 인해 저하되고 있으며, 이로 인해 가공정밀도의 저하가 발생할 수 있으며 본 연구에서 택해진 한 공구체결조건에서 1000kgf의 절삭력에 의해 2.42 μ m 정도임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 하재용, 1985, "점탄성 동흡진기를 이용한 공작기계의 동특성 개선", 한국과학기술원 생산공학과 석사학위논문.
- (2) Tobias S.A., 1965, "Machine-Tool Vibration", John Wiley & Sons.
- (3) Jones, D.I., 1974, "Temperature-Frequency Dependence of Dynamic Properties of Damping Material", J. of Sound and Vib., Vol. 33, No. 4 pp. 451~470.
- (4) Nashif, A.D., Jones, D.I.G. and Henderson, J.P., 1985, "Vibration Damping", John Wiley & Sons.
- (5) Breddia, C.A. and Serrante, A.J., "Computational Methods for Solution of Engineering Problems", Pentech Press, London Plymouth.
- (6) Meirovitch, L., 1980, "Computational Methods in Structural Dynamics", Sijthoff & Noordhoff, Netherlands.
- (7) Weck, M, 1984, "Hand Book of Machine Tools", Vol. 4, John Wiley & Sons.
- (8) 이장무, 김광준, 1985, "절삭공작기계의 동특성", 대광문화사.
- (9) Meirovitch, L., 1967, "Analytical Methods in Vibrations", Macmillan.