

Turning 가공에서 채터진동에 영향을 미치는 파라메타의 규명 The Parameters Identification of Chatter Vibration in Turning Works

김배석*, 김종관**

* 조선대학교 대학원 기계공학과

** 조선대학교 공과대학 기계공학과

Abstract

In this study, the compliance measurement and cutting operation in tool - machine tool - workpiece system were carried out for the parameters identification of chatter vibration in turning.

1. 서론

오래전부터 알려진 바와 같이 기계가공에 있어서 생산성 향상의 저해요인은 자려진동에서 기인된 채터(Chatter) 현상이다^{1,2)}. 채터 현상이란 공구와 공작물의 상대운동 즉 절삭가공시에 나타나는 공구와 공작물의 이상 진동현상을 일컫는 말로써 그 원인과 현상은 매우 복잡 다양하여 예측하기가 곤란하다. 이와 같은 자려진동에서 기인된 채터 현상은 생산성의 저하뿐만 아니라 가공물의 정밀도, 공구마모 및 파손 등 가공기술상 여러 취약적인 문제들을 야기시키며, 나아가 공작기계의 무인화 실현을 불가능하게 하는 아주 중대한 과제이다. 따라서 본 연구에서는 칩-공작물계의 다양한 파라메타들을 조건으로 컴플라이언스 측정실험과 절삭실험을 통해 채터진동 특성에 영향을 미치는 여러 인자들에 대한 현상규명을 통하여 이들 사이의 상관관계를 파악하고 채터진동의 예측 및 방지에 대한 기술적인 자료를 마련함을 목적으로 하였다.

2. 공구·공작물의 정·동강성과 전공작기계의 강성

공구, 공작물의 간섭(절삭)에 의해 발생하는 상대적인 힘(절삭력)은 공구, 공작기계, 공작물의

순서로 전해지는 힘의 닫힌계(closed loop system)로써³⁾ 이 계내의 구성요소는 일반적으로 직렬 결합되어 있다고 생각할 수 있다.

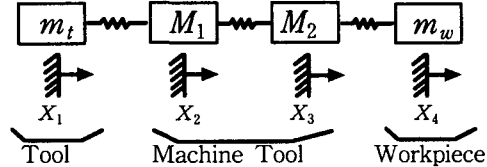


Fig. 1 Model of Tool-Machine Tool-Workpiece System

감쇄요소를 무시하면 계의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$([K] - \omega^2 [M])\{x\} = \{f\} \quad (1)$$

$$[K] = \begin{pmatrix} K_t & -K_t & & 0 \\ -K_t & K_t + K_m & -K_m & \\ & -K_m & K_m + K_w & -K_w \\ & & -K_w & K_w \end{pmatrix}$$

$$[M] = \begin{pmatrix} m_t & & & 0 \\ & M_1 & & \\ & & M_2 & \\ 0 & & & m_w \end{pmatrix}$$

여기서 강성 매트릭스 $[K]$, 질량매트릭스 $[M]$ 는 공구, 공작물에는 크기가 같고 역방향의 힘이 작용되므로, 이 크기를 F 라 하면, 힘의 벡터 $\{F\}$ 는

$$\{F\} = (F, 0, 0, -F)^T \quad (2)$$

지금 공작기계 본체의 특성을 생각하면,

$$m_t = m_w = 0, \quad k_t = k_w = \infty$$

합성절삭력 방향에 f 를 취하고 채터진동이 문제되는 방향을 x 로 하면, 상대진동에 대한 공구, 공작물간의 상대응답은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{즉, } \frac{x_1 - x_4}{f} = \frac{1}{K_m - \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \omega^2} \quad (3)$$

이것은 등가질량이 $M_1M_2/(M_1 + M_2)$ 의 1 자유도 진동계의 특성에 일치한다. 공구, 공작물의 질량이 충분히 적어서 무시할 수 있을 때의 상대응답은

$$\frac{x_1 - x_4}{f} = \frac{1}{K_m - \frac{M_1M_2}{M_1 + M_2} \omega^2} + \frac{k_t + K_w}{k_t \cdot k_w} \quad (4)$$

로 주어진다. 주파수가 영 즉 정적 컴플라이언스는

$$\frac{x_1 - x_4}{f} = \frac{1}{K_m} + \frac{1}{k_t} + \frac{1}{k_w} \quad (5)$$

로 주어진다. 이것으로서 계 전체로서의 강성은 공구, 공작기계, 공작물 내에서 가장 강성이 낮은 요소에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 공구, 공작물의 강성 k_t , k_w 는 또 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{k_t} = \frac{1}{k_{tt}} + \frac{1}{k_{tc}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{k_w} = \frac{1}{k_{ww}} + \frac{1}{k_{wc}} \quad (7)$$

여기서, k_{tt} , k_{ww} 는 각각 공구 및 공작물자체의 강성 및 k_{tc} , k_{wc} 는 각각 공구 및 공작물을 공작 기계에 부착하였을 때의 부착강성이다. 그러므로 경우에 따라서는 공구, 공작물자신의 강성보다도 부착강성이 문제되는 수가 있음을 조심하여야 할 것이다. 공구, 공작물의 강성은 이상과 같이 전체 공작기계의 정·동강성에 복잡하게 영향을 미치거나 가장 중요한 것은 공구 또는 공작물계의 강성이 상대적으로 낮아, 계 전체 중에서 Critical한 경우가 되는 일이다. 이 경우 단지 정적인 강성 뿐만이 아니라 공구, 공작물계의 감쇄가 문제되는 일이 많다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 충격 가진 시험

공작기계-공구-공작물계를 대상으로 컴플라이언스를 측정하기 위해 Photo. 1과 같은 충격 가진 시험 장치를 이용하였다. 그리고 충격가진 시험에 사용된 장치의 명세는 Table 1과 같다.

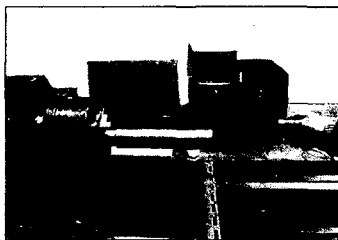


Photo. 1 Schematic diagram of excitation test

Table 1 Specification of experimental device

Experimental device	Main specification
Engine lathe	Chung-Song CSL-480×1100
Impact hammer	B&K type 8202 (Fre. Range : 0 to 7kHz , Force range : 0.5N to 5kN)
Gap sensor	AEC type 5706PS (Measuring range : 0 to 1 mm)
Data acquisition	Acquisition front end : B&K type 2825 Signal analyzer interface module : B&K type 7521 Input Module : B&K type 3022 (4 channel)
Accelerometer	B&K type 4395 (Range of Acc. : ±7500m s ⁻² peak , Range of Fre. ; 0.3 to 18kHz)
Torque wrench	Tohnichi (Model : 2800DB, 2800-50 kgf · cm)

컴플라이언스 측정을 위해 척물립력(1300 kgf · cm 에서 1800 kgf · cm 까지 100 kgf · cm 씩 각각 변화), 척물립길이(40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm), 방향특성(Along Jaw와 Against Jaw), 공작물의 돌출길이(유효측정길이 150 mm 부터 20 mm 간격) 그리고 공작물의 직경(φ60, φ55, φ50, φ45, φ40)을 파라메타로 하여 실험하였다. 가진방법은 임팩트 햄머로 충격하중을 작용시켰으며, 그 반대방향에 비접촉식 갭 센서를 설치하여 공작물의 진동변위를 검출하였으며, 이 신호들은 진동분석기에 수집하여 분석하였다.

3.2 절삭 실험

엔진선반을 대상으로, 칩 브레이커 타입의 드로우 어웨이 팁을 사용하여 절삭실험을 실시하였다. 절삭실험에 사용된 홀더는 PSDNN2525-M12 그리고 텃은 SNMG120412-GR의 규격을 사용하였다.

공작물은 척물립길이 100 mm, 유효절삭길이 250 mm의 전체길이 350 mm 로 제작하였으며, 직경의 변화에 따른 충격 가진 시험에서의 컴플라이언스 변화와 직접 절삭실험에 의한 채터진동의 거동을 고찰하기 위하여 공작물을 φ60, φ55, φ50, φ45, φ40로 각각 제작하였고, 공작물은 1 단 고정방식으로 척에서만 체결하였다. 그리고 절삭이송방향은 절삭칩의 영향과 채터진동 발생점에 대한 영향을 용이하게 고찰하기 위해 역방향 이송으로 선정하였으며, 검출된 입력신호는 4 채널 진동분석기를 이용하여 주파수 분석을 수행하였다. 또한 절삭실험에 의한 채터진동의 발생점에 대한 평가를 위하여 절삭 가공된 공작물을 대상으로 표면거칠기를 조사하였다. 절삭실험에 사용된 실험조건은 Table 2과 같다.

Table 2 Experimental conditions

Engine lathe	Chung-Song CSL- 480×1100
Chucking conditions	3-Jaw scroll chuck Chucking torque : 1800 kgf · cm
Tool	Tip : SNMG 120412 Shank type : PSDNN2525M12 Overhang length : 30 mm
Workpiece	Material : SM45C Diameter : 40, 45, 50, 55, 60 mm Effective length : 250 mm
Cutting conditions	Cutting speed : 193, 217.2, 241.3, 265.4, 289.5 m/min Spindle rpm : 1536 rpm Feed rates : 0.508 mm/rev Cutting depths : 0.5 mm, 0.6 mm
Roughness tester	Manufacturer : Kosaka Japan Model : DSF-1000 Accuracy : 100 nm/ 0.1 μm

4. 실험결과 및 고찰

4.1 척-공작물계의 고유진동수 측정 실험

척-공작물계를 대상으로 임팩트 햄머와 가속도계를 이용한 충격 가진을 시행하여 고유진동수를 측정하였고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

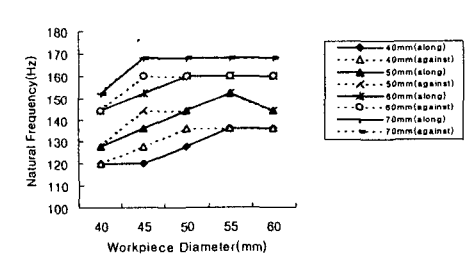


Fig. 2 Natural frequency

고유진동수의 변화는 척물립력 조건이 1300 kgf · cm 이상에서는 관찰되지 않았고, 척물립길이 및 공작물 직경이 커짐에 따라 측정된 고유진동수는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 각각의 공작물에서 척물립길이의 증가에 따라 Along jaw 와 Against jaw의 방향특성에 무관한 동일 고유진동수가 측정되었다.

4.2 척-공작물계의 컴플라이언스 측정

4.2.1 척물립력의 변화에 따른 컴플라이언스 특성

척물립력을 1300 kgf · cm에서 1800 kgf · cm까지 100 kgf · cm씩 변화시키면서 Along Jaw의 방향특성만을 고려하여 척-공작물계에 대한 충격가진 시험을 행하고 컴플라이언스 특성 변화를 측정하였다. 실험결과로서 Fig. 3에는 공작물직경 60

mm에 대해 측정된 결과를 나타내었다.

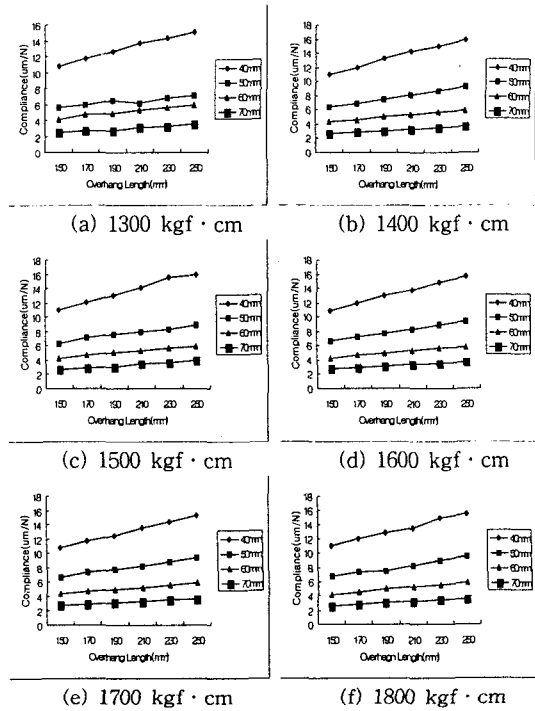


Fig. 3 Measured compliance for workpiece diameter 60mm(Along jaw)

척-공작물계에 대한 척물립력 변화에 따른 컴플라이언스 특성의 변화는 아주 미소하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 척물립력 1300 kgf · cm에서 척-공작물계는 이미 어느 정도 안정화 단계에 이르게 되어 그 이상의 척물립력에는 컴플라이언스가 크게 변화되지 않는 특성을 보이는 것으로 고찰된다.

4.2.2 척물립길이의 변화에 따른 컴플라이언스 특성

각각의 공작물에 대해 척물립길이를 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm로 변화시키면서 컴플라이언스를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

척물립길이 40 mm인 경우 측정된 컴플라이언스는 상대적으로 높게 나타났다. 척물립길이 50 mm인 경우에 비해 평균 1.49배, 60 mm에 비해 2.56배, 70 mm에 비해 3.7배 높게 나타났다. 또한 척물립길이 50 mm인 경우는 척물립길이 60 mm에 비해 1.74배 높게 측정되었고, 척물립길이 60 mm는 척물립길이 70 mm에 비해 평균

1.42배 높게 측정되었음을 확인할 수 있었다. 실험에 사용된 모든 척-공작물계에서 척물립길이를 10 mm씩 증가시켜 측정된 컴플라이언스는 약 63% 정도씩 감소하여 동적 특성이 향상되고 있음을 본 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

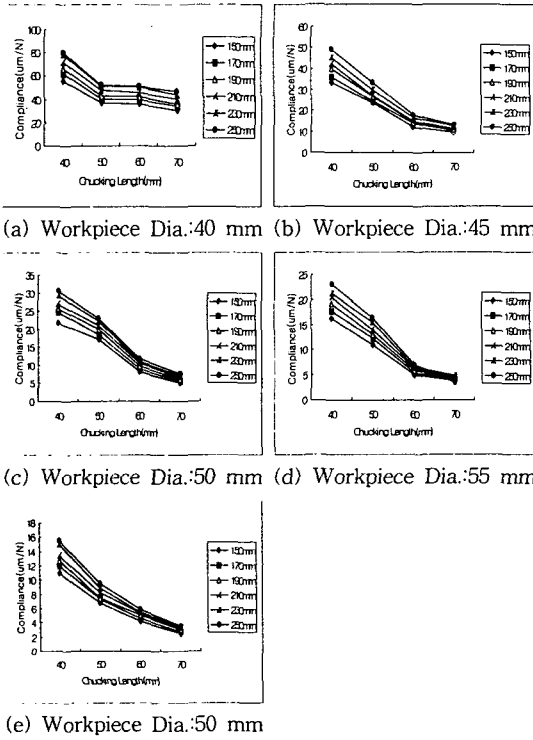


Fig. 4 Compliance variation by chucking length (Chucking torque : 1800 kgf · cm)

4.2.3 방향특성에 따른 컴플라이언스 특성

척-공작물계의 방향특성을 고려한 컴플라이언스 측정 실험을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

실험결과 Against Jaw 방향의 동적 강성이 Along Jaw 방향의 동적 강성보다 약 4% 향상되어 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

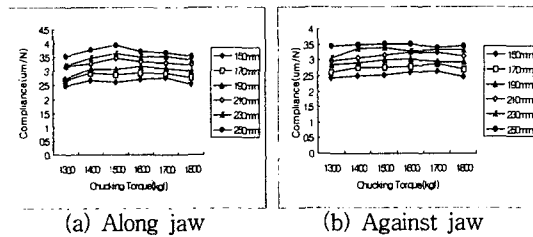


Fig. 5 Compliance variation by directional characteristics

4.2.4 공작물 직경의 변화에 따른 컴플라이언스 특성

공작물 직경에 따른 컴플라이언스 특성 변화를 고찰하기 위한 실험을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

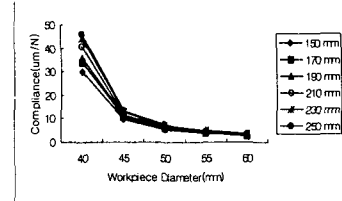


Fig. 6 Compliance variation as to the workpiece diameter (Chucking torque : 1800 kgf · cm, Chucking length : 70 mm)

공작물 직경 40 mm로부터 5 mm 씩 직경이 증가된 척-공작물계에서는 평균 55%의 동적 강성이 향상되고 있음을 본 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

4.2.5 공작물 길이의 변화에 따른 동적 컴플라이언스 특성

공작물의 길이에 따른 컴플라이언스 특성을 확인하기 위하여 4. 2. 1절에서 측정된 자료로부터 $\phi 60$, 척물립력 1800 kgf · cm인 경우를 Fig. 7에 나타냈다.

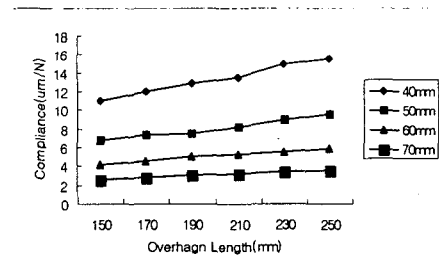


Fig. 7 Compliance variation as to the overhang length of workpiece (Workpiece diameter : 60 mm, Chucking torque : 1800 kgf · cm)

측정된 컴플라이언스의 평균을 취하면 공작물길이 150 mm에서는 $6.13 \mu\text{m}/\text{N}$, 170 mm에서 $6.66 \mu\text{m}/\text{N}$, 190 mm에서 $7.09 \mu\text{m}/\text{N}$, 210 mm에서 $7.55 \mu\text{m}/\text{N}$, 230 mm에서 $8.19 \mu\text{m}/\text{N}$ 그리고 공작물길이 250 mm에서 $8.62 \mu\text{m}/\text{N}$ 로 측정되어 공작물길이 증가에 따라 측정된 컴플라이언스는 증가하는 경향을 나타내며, 공작물길이가 20 mm 씩 증가됨에 따라 컴플라이언스는 약 7%씩 증가하여 공작물길이 증가에 따라 척-공작물계의 동적 강성이 저하되고 있음을 확인할 수 있었다.

4.3 절삭실험 결과 및 고찰

4.3.1 채터진동 검출을 위한 주파수 분석

직접 절삭실험시 주축회전수는 엔진선반의 최고 회전수인 1536 rpm으로 하였으며, 절삭시 이송은 0.508 mm/rev, 절입깊이는 0.5 mm 와 0.6 mm의 절삭조건하에서 공작물 $\phi 60$, $\phi 55$, $\phi 50$, $\phi 45$, $\phi 40$ 에 대해 각각 절삭을 실시하였고 공작물의 끝단에 비접촉식 갭 센서를 장착하여 직접 절삭에 따른 진동 신호를 검출하여 주파수 분석을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 8 및 Table 3에 나타내었다.

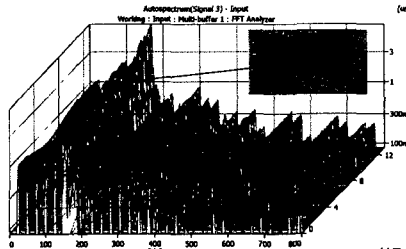


Fig. 8 Frequency analysis as to the workpiece chucking conditions and cutting conditions (D=60mm, F=1800kgf·cm, V=290 m/min, f=0.508 mm/rev, Cutting depth : 0.6mm, Chucking length = 70 mm)

Table 3 The result of frequency analysis for the cutting test

Workpiece diameter(φ)	Cutting depth(mm)	Chucking length(mm)	The result of frequency analysis			Cutting length(m)
			X(Hz)	V(μm)	Z(s)	
φ 40	0.5	50	144	7.1	0.7	2.22
	0.5	70	144	5.25	3.8	12.07
	0.6	50	128	14.1	0.06	0.19
	0.6	70	158	1.52	0.05	0.15
φ 45	0.5	50	142	12	0.402	1.44
	0.5	70	154	2.95	0.396	1.42
	0.6	50	142	9.69	0.199	0.71
	0.6	70	168	2.97	1.6	5.71
φ 50	0.5	50	142	1.77	0.27	1.07
	0.5	70	170	2.58	1.598	6.36
	0.6	50	144	9.8	1.926	7.65
	0.6	70	170	8.74	4.602	18.27
φ 55	0.5	50	142	3.83	1.8	7.89
	0.5	70	170	3.3	6.45	28.26
	0.6	50	144	4.86	2.236	9.78
	0.6	70	170	3.0	5.8	25.36
φ 60	0.5	50	143	3.01	2.398	11.47
	0.5	70	170	1.38	7.403	35.41
	0.6	50	145	2.54	5.199	24.82
	0.6	70	170	2.5	9.598	45.79

실험결과 측정된 절삭길이를 공작물직경별로 합하여 계산하면, 공작물직경 40 mm에 대해서는 3.66 m, 45 mm에서는 2.33 m, 50 mm에서는 8.34 m, 55 mm에서는 17.86 m 그리고 공작물직경 60 mm에서는 29.37 m로 나타나 공작물직경이 5 mm씩 증가됨에 따라 평균 2배정도의 절삭길이가 증가되고 있음을 확인할 수 있다.

4.3.2 채터진동 발생점 판정을 위한 표면거칠기 시험

본 실험에서는 절삭 가공된 공작물을 대상으로 표면거칠기를 측정하였고⁴⁾, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Commencing point of chatter vibration

Workpiece diameter(φ)	Cutting depth(mm)	Chucking length(mm)	Commencing point of chatter vibration(mm)	Cutting length(m)
φ 40	0.5	50	10	2.44
	0.5	70	50	12.21
	0.6	50	17	4.14
φ 45	0.6	70	39	9.25
	0.5	50	11	3.02
	0.5	70	24	6.60
φ 50	0.6	50	14	3.84
	0.6	70	22	6.04
	0.5	50	6	1.84
φ 55	0.5	70	33	10.10
	0.6	50	25	7.63
	0.6	70	64	19.54
φ 60	0.5	50	25	8.41
	0.5	70	83	27.96
	0.6	50	76	25.56
φ 60	0.6	70	81	27.24
	0.5	50	96	35.31
	0.5	70	99	36.41
φ 60	0.6	50	67	24.60
	0.6	70	114	41.86

주파수 분석 결과에 따른 공작물직경별 절삭길이의 총합과 표면거칠기 측정 결과에 따른 공작물직경별 절삭길이의 총합을 상대적인 비로 표현하면 절삭깊이 0.5 mm, 척물립길이 50 mm 조건하에서 전체 공작물을 대상으로 측정된 절삭길이의 비가 47%, 절삭깊이 0.5 mm, 척물립길이 70 mm에서는 90%, 절삭깊이 0.6 mm, 척물립길이 50 mm에서는 66%, 절삭깊이 0.6 mm, 척물립길이 70 mm에서는 92%로 나타났으며, 전체 평균 74%의 일치성이 있음을 확인할 수 있었다.

척물립길이 50 mm 조건에서는 주파수 분석 결과에 따른 절삭길이의 총합과 표면거칠기 측정 결과에 따른 절삭길이의 총합의 상대적인 비가 절삭깊이 0.5 mm에서는 47%, 절삭깊이 0.6 mm에서는 66%로 두 실험결과가 상대적으로 잘 일치하지 않는 것으로 나타났으며, 척물립길이 70 mm 조건에서는 두 결과가 거의 91%의 일치성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

4.4 킴플라이언스 특성실험과 절삭실험에 따른 채터진동과의 관계 고찰

4.1절에서 시행된 칩-공작물계의 고유진동수 측정 실험 결과와 4.3절에서 시행된 직접 절삭실험 결과에 대한 고찰의 비교를 통해 채터진동과 고유진동수의 관계를 고찰하였다.

척-공작물계를 대상으로 실시된 고유진동수 측정결과와 절삭실험 결과에 따른 채터진동수를 상호 비교하여 Table 5와 같이 나타내었다.

Table 5 The comparison of frequency between natural frequency and chatter frequency

Workpiece diameter (φ)	Cutting depth(mm)	Chucking length(mm)	Frequency(Hz)		
			Chatter frequency	Natural frequency	
				Along	Against
φ 40	0.6	50	128	128	128
	0.6	70	158	152	152
φ 45	0.6	50	142	136	144
	0.6	70	168	168	168
φ 50	0.6	50	144	144	144
	0.6	70	170	168	168
φ 55	0.6	50	144	152	152
	0.6	70	170	168	168
φ 60	0.6	50	145	144	144
	0.6	70	170	168	168

상기와 같은 실험결과들로부터 측정된 고유진동수와 직접 절삭에 따른 채터진동수는 거의 95% 이상의 범위에서 일치되고 있음을 본 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 척물립길이 변경에 따른 동적 킴플라이언스 측정 실험결과로써 척-공작물계의 척물립길이 10 mm씩 증가됨에 따라 킴플라이언스는 63% 정도씩 감소하고 있음을 확인할 수 있었으며, 절삭실험 결과에서는 척물립길이 50 mm에서 70 mm로 증가됨에 따라 채터진동 발생점까지의 절삭길이가 약 2.66 배 증가되어 척-공작물계의 동적 특성이 향상되었음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 척-공작물계의 척물립길이 증가는 동적 킴플라이언스 감소와 직접 절삭실험에 의한 채터진동 발생점까지 절삭길이의 증가를 가져와 척-공작물계의 동적 강성 향상에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 공작물 직경 변화에 따른 동적 킴플라이언스 특성 고찰결과 공작물 직경이 40 mm로부터 5 mm씩 증가하면 척-공작물계의 동적 강성이 55% 정도 향상되고 있음을 확인하였으며, 절삭 실험에서는 공작물직경이 5 mm씩 증가됨에 따라 채터진동 발생점까지의 절삭길이가 평균 2배 정도 증가함을 확인하였다. 따라서 척-공작물계의 공작물직경은 채터진동에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

척-공작물계를 대상으로 킴플라이언스 측정과 절삭실험을 실시하였고 아래와 같은 결과들을

확인할 수 있었다.

- (1) 척-공작물계의 고유진동수와 채터진동수는 95% 범위에서 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.
- (2) 척물립력 증가에 따라 측정된 킴플라이언스는 미소하게 감소됨을 확인할 수 있었다.
- (3) Against Jaw에서 측정된 동적 강성이 Along Jaw에서보다 4% 향상됨을 확인할 수 있었다.
- (4) 척-공작물계의 척물립길이가 10 mm 씩 증가됨에 따라 킴플라이언스는 약 63% 정도씩 감소되었고, 절삭실험 결과 척물립길이가 50 mm에서 70 mm로 증가됨에 따라 채터진동 발생점까지의 절삭길이가 약 2.66배 증가됨을 확인할 수 있었다.
- (5) 공작물 직경이 40 mm로부터 5 mm씩 증가하면 척-공작물계의 동적 강성은 평균 55% 정도 향상되었고, 절삭실험 결과 채터진동 발생점까지의 절삭길이가 평균 2배 증가됨을 확인할 수 있었다.
- (6) 절삭실험시 채터진동 발생점 판정을 위해 적용된 주파수 분석법과 표면거칠기를 이용한 방법을 절삭길이 측면에서 상호 비교하면 평균 74%의 일치성을 보이고 있어 절삭과정 중의 주파수 분석법이 효율적으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구에 사용된 장비는 산업자원부지정(사)부품산업테크노센터에서 제공된 것임.

참고문헌

- (1) S.A Tobias, "Machine Tool Vibration" Blackie & Son, London, 1965.
- (2) F.Koengsberger and J.Tlusty, "Machine Tool Structure", Vol.1, Perbamon Press, Oxford, 1970.
- (3) M.Weck, "Rechnerunterstützter Entwurf und Maßnahmen zur Ausführung flexibler Fertigungssysteme", Industrie-Anzeiger 96Jg., Nr.74, 1974, S.1683.
- (4) 森脇俊道 : 工作機械のダイナミク-その評價と設計への應用, 機械の研究, 第31卷, 第10號 pp.1207, 1979.