

<論 文>

공작기계의 동적 성능 시험 및 평가에 관한 연구(I)

—기초 이론 및 실험—

이 장 무*

(1985년 2월 2일 접수)

A Study on the Dynamic Performance Tests of Machine Tools(I)

—(I) Basic Theory and Experiments—

Jang Moo Lee

Abstract

Direct cutting tests were carried out to evaluate the dynamic performance of lathes under various cutting conditions. Significant factors influencing the chatter limits were identified through use of analysis of variance. Dynamic performances of two lathes were compared and the merits and drawbacks of the direct cutting test were discussed. Exciting-direct-cutting test method was newly proposed as a more rational method of dynamic performance test. The basic theory and experimtns of the test were explained. The results shows that the method can be used as a powerful tool for the evaluation and the improvement of dynamic performance of machine tools.

1. 서 론

공작기계의 기본적인 기능은 공작물을 만족할 만한 표면 조도와 요구된 기하학적 형상으로 경제적으로 단 시간에 많은 양을 가공하는 것이다. 그러므로 공작기계의 상대적인 장점을 평가하기 위하여는 가공된 공작물의 기하학적 정밀도·표면 조도와 같은 공작물의 품질과 최대 절삭양과 같은 공작기계의 능력을 측정할 필요가 있다. 현재 알려져 있는 동적성능 시험에서는 chatter 진동을 발생시키지 않고 가공할 수 있는

한계절삭 깊이나 한계절삭폭을 직접 측정하든가, 또는 이에 관계되는 적절한 특성치를, 예를 들어 공작기계 컴플라이언스(compliance)의 음의 실수부의 최대치 등을 측정하여 성능을 평가하고 있다. 시험방법과 특성치에 따라서 여러가지 시험법이^(1,2,3,4) 알려져 있으나 대표적인 것으로서 Fig. 1 과 Fig. 2에 보인 직접절삭 시험법(direct cutting test)과 가진 시험법(exciting test)을 들 수 있다. 직접절삭시험법 중 Fig. 1에 보인 MTIRA(Machine Tool Industry Research Association, England)의 직접절삭법은 여러 절삭조건조하에서 절삭 깊이 또는 절삭폭이 점차적으로 증가하는 표준 가공물

* 정희원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

을 사용하여 단 한 번의 가공으로 한계절삭 깊이 또는 폭을 구할 수 있는 장점이 있다. 이 방법은 시험장치 설치비가 적고 동적성능의 주인자를 통계적으로 추출하고 동적성능을 비교, 평가하는 데 있어서 가진 시험법보다 유리하나 시험결과를 설계개선에 이용하기 어려운 결정적인 단점이 있다. 한편 현재까지 알려져 있는 가진 시험법은 Fig. 2와 같이 임의의 원통형의 가공물을 절삭중 또는 정지시 가진시켜서 동적 컴플라이언스를 측정하여 특정 절삭조건하에서 한계 절삭깊이 또는 폭을 구하므로^(5,6,7) 각종 절삭조건에 영향을 과소 평가되는 단점이 있다.

측정된 공작기계의 동적성능은 절삭조건과 공작기계의 동적 컴플라이언스의 복합적인 함수이므로 공작기계의 동적 성능을 정확히 평가하고 설계·개선을 용이하게 하기 위하여는 직접절삭시험 중 가진 시험을 동시에 수행하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 선반의 외경 선삭가공중의 동적성능을 직접절삭시험과 가진 직접절삭법을 통하여 평가하고자 한다.

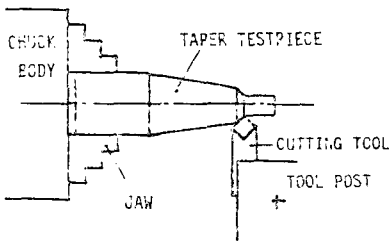


Fig. 1 A schematic diagram of the direct cutting test

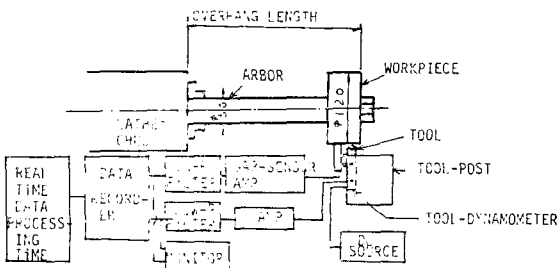


Fig. 2 A schematic diagram of the exciting test

관계되는 인자들은 공작기계의 가공의 종류에 따라 그 미치는 영향이 다르다. 이러한 인자들에는 공작물의 재질, 기계, 절삭속도, 이송, 베어링의 온도, 공구의 오우버행, 공구의 클램핑(clamping) 토크 및 공작물의 클램핑 토크 등이 있다. 그러므로 공작기계의 동적성능을 평가하기 위하여는 우선 어느 인자들이 채터 한계에 큰 영향을 미치는가를 통계적으로 확인한 후 이 주요 인자들을 변화시키면서 채터한계의 변화를 비교·평가하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 MTIRA가 제안한 표준시험(Fig. 3)과 실험계획법(design of experiment)을 이용하여 국산 선반의 동적 특성 주요인자 확인시험을 수행하였다. 확인시험은 편의상 두 시험으로 분류하였고, 각각의 인자와 변수는 Table 1과 같다. 각 인자마다 두 레벨의 변수를 두어서 $2 \times 2^2 = 64$ 개의 시험(가공물)을 사용하였다. 실험대상이 된 공작기계는 시방이 동일한(베드위의스윙 460mm, 최대센터거리 960mm, 주축단 크기 ASA A2-6, 속도변환범위 25~1500rpm, 주전동출력 7.5HP, 4P) 국산 선반 2대이었고 가공물은 각각 SCM 3 합금강과 SM45C 탄소강으로 제작되었다(재질은 HRC 25 ± 2 로 조질 열처리하였다). 공구는 대한중석의 화이트홀더와 드로우 어웨이 팁(throw away tip) SNMG 120 404를 사용하였다. 베어링의 온도는 프론트 베어링 하우징(front bearing housing)의 표면 온도를 측정하여 대신 하였다. 실험을 행할 때에 표준 가공물을 척으로 돌린 후 센터를 정확히 맞추기 위하여 다이얼게이지를 이용하여 편심을 측정하여 조정하였다. 또한 척과 공구의 클램핑 토크는 토크-렌치를 이용하여 조절하였다. 각각의 인자에 대하여 두 레벨의 값으로 변화시키면서 총 64회의 직접절삭시험을 수행

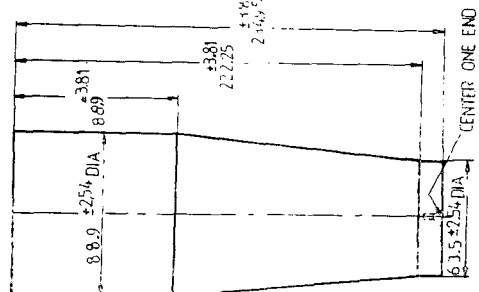


Fig. 3 MTIRA standard test work-piece

2. 직접 절삭시험법에 의한 주요 인자의 추출 및 평가

2.1. 주요인자를 확인하기 위한 실험

공작기계의 동적성능의 지표가 되는 한계절삭폭에

하였다. 채터가 일어나는 채터한계를 정확히 관측하기 위하여 청각을 이용하여 채터소리가 발생할 때 또한 공구에 부착된 비접촉변위계의 신호가 작은 불규칙 진동신호에서 큰 규칙진동신호로 바뀌는 것을 오실로

Table 1 Factors and variables

	Factors	Variables	
		Value 1	Value 2
Test 1	A ; Material	SCM3	SM45C
	B ; Machine	Machine 1	Machine 2
	C ; Bearing temperature	33°C	43°C
	D ; Speed	232rpm	483rpm
	E ; Feed	0.101mm/rev	0.203mm/rev
Test 2	A ; Material	SCM 3	SM45C
	B ; Machine	Machine 1	Machine 2
	C ; Tool clamping torque	700kg·cm	900kg·cm
	D ; Overhang	45mm	65mm
	E ; Workpiece clamping torque	1000kg·cm	1300kg·cm

Table 2 Values of limiting width in test 1 (mm)
(F denotes feed rate)

			Material 1		Material 2	
			Machine 1	Machine 2	Machine 1	Machine 2
Bearing Temperature 1	Speed 1	F 1	3.375	3.575	3.625	3.825
		F 2	2.875	2.850	2.900	2.825
	Speed 2	F 1	2.800	2.800	2.950	2.975
		F 2	2.375	2.700	2.625	2.875
Bearing Temperature 2	Speed 1	F 1	2.975	3.425	3.450	3.650
		F 2	2.250	2.450	2.375	2.600
	Speed 2	F 1	2.325	2.375	2.475	2.725
		F 2	2.175	2.425	2.200	2.675

스코프로 판측했을 때에 가공을 중지하고 chatter mark (chatter mark)를 확인하여 캘리퍼스로 chatter 한계 길이를 측정하였다.

2.2. 직접 절삭시험 결과 및 통계적 해석

직접 절삭시험 1 및 2의 결과는 Table 2 및 Table 3과 같다. 시험대상의 공작기계의 chatter 한계에 영향을 미치는 인자들 중에서 어떠한 인자를 고려하여야 하고, 또한 고려할 인자의 영향이 어느 정도인가를 알기 위하여는 통계적인 방법으로 분산해석 (analysis of variance)

을 이용할 수 있다.

Table 2 및 Table 3의 절삭시험 데이터에 대하여 분산해석을 수행하기 위하여 컴퓨터 프로그램 팩키지 ANAVA⁽²⁾를 이용하였다. 일반적으로 분산해석에 있어서 인자의 수가 m 이고, 각 인자에 대하여 n 개의 레벨을 고려하여 각 조건에 대해서 p 번 반복실험을 하면 필요한 전체실험수는 $p \cdot m^n$ 이 된다. 시험 1 및 시험 2의 경우 각각 $m=5, n=2, p=1$ 이었다. Table 2의 데이터 처리에 대한 예는 다음과 같다. 우선 Table 2의 32개의 데이터를 ANAVA에 입력시키면 Table 4

Table 3 Values of limiting width in test 2 (mm)
(WCT denotes workpiece clamping torque)

			Material 1		Material 2	
			Machine 1	Machine 2	Machine 1	Machine 2
Tool clamping torque 1	Overhang 1	WCT 1	2.200	2.325	2.400	2.825
		WCT 2	2.125	2.250	2.325	2.825
	Overhang 2	WCT 1	1.925	2.000	2.225	2.375
		WCT 2	2.050	2.075	2.150	2.400
Tool clamping torque 2	Overhang 1	WCT 1	2.300	2.825	2.650	2.850
		WCT 2	2.375	2.700	2.625	2.875
	Overhang 2	WCT 1	2.125	2.350	2.350	2.400
		WCT 2	2.150	2.175	2.300	2.800

와 같이 자승총합(sum of squares), 자유도(degrees of freedom), 평균자승값(mean squares)과 잔여값(residual) 등을 얻는다. 여기서 A 는 공작물의 재질, B 는 공작기계의 종류, C 는 베어링의 온도, D 는 절삭속도, E 는 이송속도(feed rate)를 의미한다. $AB, AC, \dots, ABC, \dots, CDE$ 등은 각각의 인자들의 상호작용에 의한 값이며, 잔여값은 4개 이상의 인자들의 상호작용의 항을 모두 더한 것이다. 또한 평균자승 값은 자승총합을 자유도로 나눈 값이다. 우선 인자 A 가 의미가 있는가를 확인하기 위하여 인자 A 의 평균자승값을 잔여값의 평균자승 값으로 나누면 50.22을 얻는다. A 의 자유도는 1이고 잔여값의 자유도는 6이므로 통계학책⁽⁸⁾의 F -분포표에 (6.1)의 값을 찾으면 5.99이다.

위에서 얻은 값 50.22은 5.99보다 크므로 A 는 의미있는 인자가 된다. 이와같이 잔여 값의 평균자승값과 각 인자의 평균자승 값을 비교하면 의미있는 인자는 $A, B, C, D, E, AE, BC, DE, BDE, CDE$ 임을 알 수 있다. 이때에 잔여값에 포함되는 항은 임의로 결정할 수 있는데 일반적으로 3개의 인자들의 상호작용까지를 중요하다고 볼 수 있으므로 4개 이상의 인자들의 상호작용을 잔여값으로 택한다. Table 4에서 잔여값의 자유도가 6인 것은 4개 이상의 인자들의 상호작용이 여섯가지이었기 때문이다.

위와 같이 크게 의미가 있는 인자들을 확인한 후에는 이 인자들이 채택한계에 미치는 영향의 크기를 계산할 수 있다. 이를 위하여 크게 의미가 없는 인자들의 자승총합, 자유도 등을 모두 잔여값에 합쳐서 새로운 잔여값은 평균자승값을 구한다.

시험 1의 경우 중요한 인자들은 $A, B, C, D, E, AE, BC, DE, BDE, CDE$ 이므로 나머지 인자들은 잔여값에 포함시키면 새로운 잔여값의 자승총합은 0.09912, 자유도는 21, 평균자승 값은 0.00472가 된다. 이제 의미가 있는 인자들에 대하여 아래와 같은 방정식을 세울 수 있다.

$$A : \sigma_0^2 + 16\sigma_A^2 + 8\sigma_{AE}^2 = 0.28125 \quad (1)$$

$$B : \sigma_0^2 + 16\sigma_B^2 + 8\sigma_{BC}^2 + 4\sigma_{BDE}^2 = 0.28125 \quad (2)$$

$$C : \sigma_0^2 + 16\sigma_C^2 + 8\sigma_{BC}^2 + 4\sigma_{CDE}^2 = 0.91125 \quad (3)$$

$$D : \sigma_0^2 + 16\sigma_D^2 + 8\sigma_{DE}^2 + 4(\sigma_{BDE}^2 + \sigma_{CDE}^2) = 1.78133 \quad (4)$$

$$E : \sigma_0^2 + 16\sigma_E^2 + 8(\sigma_{AE}^2 + \sigma_{DE}^2) + 4(\sigma_{BDE}^2 + \sigma_{CDE}^2) = 2.07571 \quad (5)$$

$$AE : \sigma_0^2 + 8\sigma_{AE}^2 = 0.03445 \quad (6)$$

$$BC : \sigma_0^2 + 8\sigma_{BC}^2 = 0.04500 \quad (7)$$

$$DD : \sigma_0^2 + 8\sigma_{DE}^2 + 4\sigma_{BDE}^2 + 4\sigma_{CDE}^2 = 0.91125 \quad (8)$$

$$BDE : \sigma_0^2 + 4\sigma_{BDE}^2 = 0.09031 \quad (9)$$

$$CDE : \sigma_0^2 + 4\sigma_{CDE}^2 = 0.06125 \quad (10)$$

$$\sigma_0^2 = 0.00472 \quad (11)$$

윗식을 풀면, $\sigma_{CDE} = 0.0594, \sigma_{BDE} = 0.0731, \sigma_{DE} = 0.1546, \sigma_{BC} = 0.0355, \sigma_{AE} = 0.0304, \sigma_E = 0.1332, \sigma_D = 0.1166, \sigma_C = 0.1125, \sigma_B = 0.0485, \sigma_A = 0.0621$ 를 얻는다. 통계학 이론에 의하면, 테이타의 95% 신뢰구간은 평균값을 중심으로 $\pm 1.96\sigma$ 이다. 즉 어떤 인자의 σ 를 알 수 있다면, 순수한 그 인자의 변화에 의한 결과치의 변화가 전체 테이타의 평균값을 중심으로 $\pm 1.96\sigma$ 이내에 있을 확률이 0.95가 된다. 따라서 95% 신뢰구간의 최대분산값은 1.96σ 를 전체평균치(=2.8282)

Table 4 Results of analysis of variance for test #1

Source of variation	Sums of squares	Degrees of freedom	Mean squares
A	0.28125	1	0.28125
B	0.28125	1	0.28125
C	0.91125	1	0.91125
D	1.78133	1	1.78133
E	2.07571	1	2.07571
AB	0.00031	1	0.00031
AC	0.00781	1	0.00781
AD	0.00008	1	0.00008
AE	0.03445	1	0.03445
BC	0.04500	1	0.04500
BD	0.00195	1	0.00195
BE	0.00195	1	0.00195
CD	0.00008	1	0.00008
CE	0.00383	1	0.00383
DE	0.91125	1	0.91125
ABC	0.00281	1	0.00281
ABD	0.01320	1	0.01320
ABE	0.00070	1	0.00070
ACD	0.00633	1	0.00633
ACE	0.00195	1	0.00195
ADE	0.02000	1	0.02000
BCD	0.00383	1	0.00383
BCE	0.00070	1	0.00070
BDE	0.09031	1	0.09031
CED	0.06125	1	0.06125
Residual	0.03359	1	0.00560
Total	6.57218	31	

로 나눈 값의 백분율이다. 중요인자의 영향의 크기, 즉 최대분산은 Table 5 및 Table 6과 같다.

Table 5 Maximum variation of significant factors in test #1 (95% confidence level)

Source of variation	Maximum variation (%)
Material	± 8.6
Machine	± 6.7
Bearing temperature	±15.6
Speed	±16.2
Feed	±18.5
Material X feed	± 4.2
Machine X bearing temperature	± 4.9
Speed X feed	±21.4
Machine X speed X feed	±10.1
Bearing temperature X speed X feed	± 8.2

Table 6 Maximum variation of significant factors in test #2 (95% confidence level)

Source of variation	Maximum variation (%)
Material	±15.9
Machine	±13.5
Press on tool	±12.05
Overhang	±16.65

2.3. 주요 인자의 영향 및 내채터 가공 능력의 평가

앞의 Table 5의 통계해석 결과로부터 본 연구의 실험 조건하에서는 이송속도·절삭속도·베어링의 온도·절삭속도와 이송속도의 상호작용에 의한 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다. Table 6의 통계해석 결과는 가공물의 척(chuck) 클램핑 토크 인자를 제외한 가공물의 재질·공작기계의 종류·공구의 오우버행(Overhang), 공구의 클램핑 토크 등이 거의 같은 수준으로 영향으로 미치는 것을 알 수 있다. 가공물의 재질과 공작기계의 종류가 채터한계에 미치는 영향이 절삭 시험 2에서 절삭시험 1보다 크게 나온 것은 전자의 경우 두 인자 이상의 상호작용에 의한 영향이 매우 적기 때문인데 앞으로 더 많은 실험을 통하여 규명할 계획이다.

이상의 통계해석으로부터 시험대상 공작기계의 채터한계에 영향을 미치는 주요 인자들과 그 영향의 정도가 파악 되었으므로 공작기계의 내채터 가공능력을 비교 평가할 수 있다. 본 연구에서는 시방이 동일한 선반 1과 선반 2의 동적성능은 비교하기 위하여 아래와 같이 시험을 수행하였다.

- (1) 시험중 운동이 요구되지 않는 모든 요소와 미끄럼 부들은 일정한 위치에 고정시켜서 이들의 구조의 진동에 미치는 영향을 최소로 하였다.
- (2) 절삭공구에 있어서 절삭날에 관계된 변수를 최소화하기 위하여 드로우어웨이 팁 SNGG 120404로 고정하여 매 실험마다 새 팁을 사용하였다. 또한 팁의 고정칩 브레이커, 바이트홀더, 공구 높이 등을 일정하게 하였다.
- (3) 본 실험에서 고려한 주요인자들은 설정한 레벨 변화내에서는 가공물의 척 클램핑 토크를 제외한 모든 인자들이 성능에 비교적 높은 영향을 미쳤으므로 이들 인자들을 변화시키면서 두 공작기계의 채터한계를 비교하는 것이 가장 신뢰성이 있는 평가 방법이 된다. 그러나 이 실험을 위하여는 공작

물의 재료 및 가공의 비용이 막대하므로 본 연구에서는 공작물의 재질은 SM45C, 베어링의 온도는 33°C, 공구의 오우버행은 45mm. 이송은 0.203 mm/rev, 공구의 클램핑토크는 900kg·cm, 척 클램핑토크는 1000kg·cm 로 고정시키고 232rpm, 358rpm, 483rpm의 세 절삭회전속도에 대하여 각각 반복하여 4회씩 실험을 수행하였다.

두 대의 공작기계에 대한 이상의 성능비교 시험 결과를 Fig. 4에 圖示하였다. 그림에서 사선 부분은 95% 신뢰도 구간을 나타내며 선반 2가 선반 1보다 우수한 것을 보여 준다. 비용이 허용하는 한에서 다른 因子の 변화에 대하여도 채터한계를 비교하는 것이 성능 비교의 신뢰성을 높여 줄 것이다.

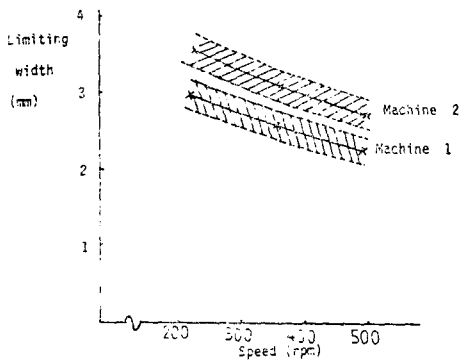


Fig. 4 Comparison of limiting width-speed curves of two machine tools

3. 가진 직접 절삭시험법

3.1. 시험 방법

전술한 바와 같이 직접절삭법은 공작기계의 동적 성능인 耐채터한계에 영향을 미치는 주요 인자들을 통계학적으로 정확하게 판정할 수 있는 장점이 있으나 채터현상을 전적으로 현상학적으로만 관찰하므로써 성능 비교 평가시험의 비용이 매우 크게 되고 성능의 차이가 어디서 연유되었는지 또는 어떠한 방향으로 설계를 개선할 것인지 알 수 없다. 그러므로 직접 절삭 시험을 수행하면서 加振실험을 동시에 행할 수 있으면 이론적인 채터해석과 채터한계 예측이 가능하여 지므로 절삭시험법의 장점과 일반적인 '가진시험법(정지시 또는 일정한 절삭깊이로 가공하는 공작기계계의 가진 시험)'의 장점을 공유하게 된다. 새로 제안하는 가진 직접 절삭시험은 직접 절삭시험법과 동일하나 추가되는 것은 Fig. 5 및 Fig. 6에서와 같이 직접 절삭시험중에 충격

햄머로 공작물을 타격하면서 공구에 부착된 비접촉 변위계로부터 가공물과 공구간의 상대진동을 측정하여, 충격력과 상대진동을 NSC 660B 신호분석기에 입력시켜서 FFT 처리하여 절삭단에서의 공작기계의 동적 컴플라이언스(또는 전달함수)를 구하는 것이다. 그러므로 가진 직접 절삭시험을 행하면, 개개의 시험으로부터 채터한계 깊이를 측정할 수 있으므로 전술한 통계적 해석이 가능하고 또한 측정된 동적 컴플라이언스로부터 채터한계 깊이를 이론적으로 예측할 수 있다.

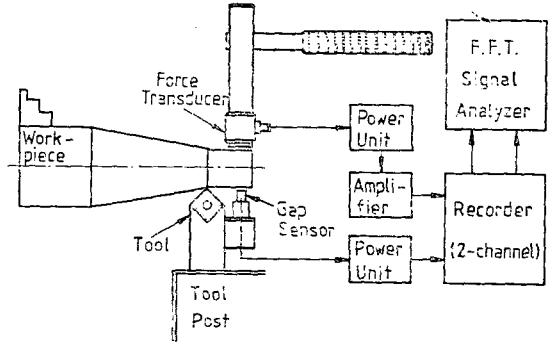


Fig. 5 A schematic diagram for the direct cutting of the MTIRA workpiece with impulse tests

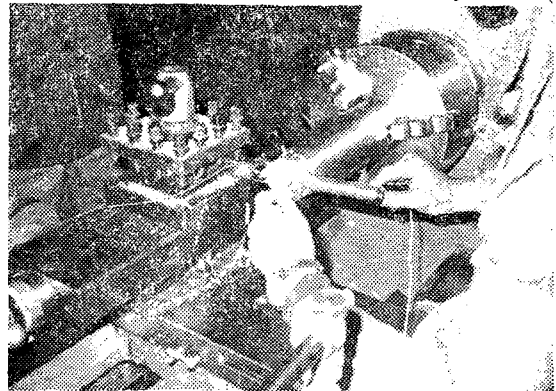


Fig. 6 Photograph of the experimental set-up

3.2. 가진 직접 절삭시험의 채터 이론

가진 직접 절삭시험을 하는 선반의 채터는 테이퍼(taper)진 임의의 재질의 공작물을 임의의 형상의 공구로 선삭할 때 동적 절삭력과 절삭깊이를 연관시키는 절삭동력학 $K_c(S)$, 공구 공작물의 상대대위를 연관짓는 구조동력학(동적 컴플라이언스) $G(s)$, 중첩계수 μ 와 공작물의 한 회전에 의한 시간지연 ϵ 등에 의하여 결정되며 이 관계를 블록선도로 표시한 채터루우프(chatter loop)는 다음 Fig. 7과 같다.

채터 루우프를 대수 방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$[(K_c^{(0)}(s) \cdot T(s) - K_c^{(1)}(s)) - G^{-1}(s)]X^{(1)}(s) = 0 \quad (12)$$

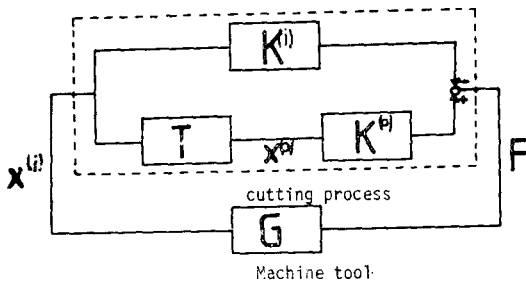


Fig. 7 A block diagram of chatter loop

여기서 첨자 (0)와 (i)는 각각 외측 모델레이션과 내측 모델레이션을 의미하고 $T(s)$ 및 $G^{-1}(s)$ 는 아래와 같다.

$$T = \mu \cdot e^{-\tau s} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$G^{-1}(s) = \begin{pmatrix} M_{xx}(s) & M_{xy}(s) & M_{xz}(s) \\ M_{yx}(s) & M_{yy}(s) & M_{yz}(s) \\ M_{zx}(s) & M_{zy}(s) & M_{zz}(s) \end{pmatrix} \quad (14)$$

식 (14)의 첨자 x, y, z 는 각각 공구에 평행한 배분력(thrust force)방향, 주분력(cutting force) 방향, 횡분력(feed force) 방향을 의미한다. 식 (12)의 특정방정식은

$$\det[A(s)] = 0 \quad (15)$$

여기서, $A(s) = [(K_c^{(i)}(s) \cdot T(s) - K_c^{(0)}(s)) - G^{-1}(s)]$ 가 된다.

이 시스템이 안정되기 위해서는 S 의 실수부가 반드시 음수이어야 하기 때문에 $s = \sigma + j\omega$ 로부터 $s = j\omega$ 일 때가 안정한계라 할 수 있다. 그러므로, 이 시스템의 안정한계는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\det[A(j\omega)] = 0 \quad (16)$$

이 식으로부터 $X_c^{(i)}(t)$ 의 변화가 어떠한 방향의 절삭력의 변화에도 영향을 미치지 않는다는 가정과 구조강성의 전달함수가 다른 성분과 서로 상관관계를 갖지 않으며, M_{zz} 가 무한히 크다는 가정으로부터 다음과 같은 간단한 안정성 판별방정식을 유도할 수 있다.

$$K^{(0)}_{c,xx}(j\omega) \cdot \mu \cdot e^{-j\omega\tau} - K^{(i)}_{c,xx}(j\omega) = M_{xx}(j\omega) \quad (17)$$

위 방정식의 왼쪽부분은 배분력 방향의 절삭강성의 전달함수를 나타내며 오른쪽은 같은 방향의 구조강성의 전달함수를 나타낸다.

이상의 안정성 판별이론을 이용하여 chatter한계를 예측하는 프로그램의 유통도는 Fig. 8과 같다.

이 프로그램은 Sata의 원통형 가공물에 대한 절삭이론⁽⁹⁾, Usui의 칩유동각에 대한 최소에너지 이론을⁽¹⁰⁾

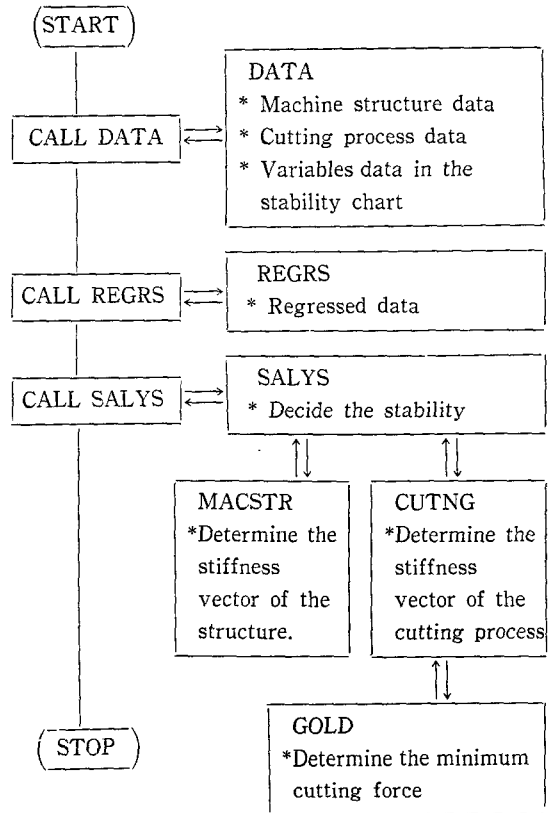


Fig. 8 Flow chart of the computer program for the chatter analysis of the exciting-direct-cutting tests

이용하여 테이퍼형 가공물의 절삭동력학을 구하고 채터해석을 수행할 수 있도록 확장 개발한 것으로 저자와 공동연구자의 과거의 연구⁽¹¹⁾에 상세하게 설명되어 있다.

3.3. 가진 직접 절삭시험 및 결과분석

Fig. 6에 보인 바와 같이 MTIRA 표준시험 공작물(전체길이 240mm, 좌측단직경 90mm, 우측단직경 65mm, 테이퍼진 부분의 길이 135mm)을 시방이 동일한 두 대의 국산공작기계(선반 3, 선반 4)로 절삭가공하면서 동시에 가진 시험을 수행하였다. 가진 직접절삭시험은 실험양이 방대하여지는 관계로 Table 7에 보인 바와 같이 단지 4개의 인자(공작기계, 절삭속도, 공구의 오우버행, 공작물의 칩 클램핑 토오크)에 대하여 두 레벨의 변수를 두어서 16종류의 시험을 행하였다. 일관성있는 결과를 얻기 위하여 고려하지 않는 다른 인자들을 일정하게 유지하였다.

시험의 재질은 SM45C 탄소강을 사용하였고 공구 텅

Table 7 Factors and variables in exciting direct cutting test

Factors	Variables	
	Value 1	Value 2
A : Speed	338rpm	483rpm
B : Machine	Machine 3	Machine 4
C : Tool overhang	45mm	65mm
D : Workpiece clamping torque	1000kg·cm	1300kg·cm

은 드로우어웨이 팁 TK1504(-6, -6, 6, 45, 45, 0.4)을 이용하였다. 이송속도는 0.203mm/rev, 베어링의 온도는 33°, 공구 클램핑토크는 900 kg·cm 로 유지하였다. 절삭은 가공물의 원추형 표면의 우측단에서부터 시작하였으며, 절삭개시 직후 로드셀이 부착된 충격햄머(PCB 209A)로 수차타격하면서 이때의 충격과 비접촉 변위계(PU-05 pick-up, AEC-2525-05 amp.)의 과도진동을 FM 데이터레코더(Shinkoh RC-9101)에 저장하였다. 측정된 과도 진동변위와 충격력의 예는 Fig. 9 와 같다. 저장된 두 신호를 디지털 신호분석기(NSC 660B)에 의하여 처리하면 Fig. 10 과 같이 절삭단에서의 동적 컴플라이언스 또는 전달함수를 구할 수 있다.

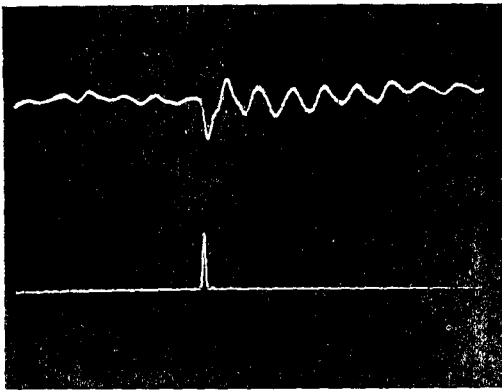
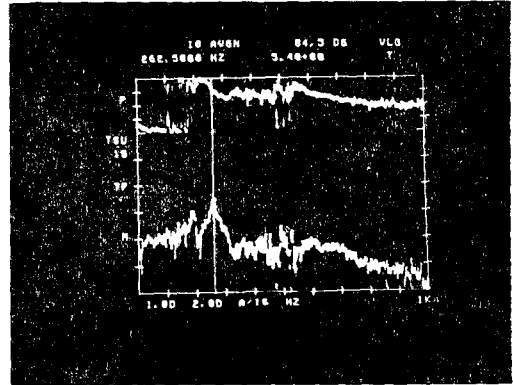


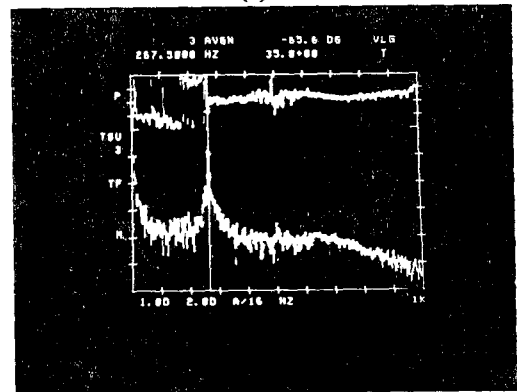
Fig. 9 A photograph of the impulsive force and the transient vibration

본 실험에서는 가공물이 정지하여 있을 때(static test)와 가공물이 회전하고(절삭되고) 있을 때(dynamic test)의 전달함수를 측정하여 비교하였는데 Fig. 10 에서 알 수 있듯이 두 결과가 상이하므로 가공물이 정지된 상태에서 전달함수를 측정하여 채터해석을 하는 것은 옳지 않다고 생각된다.

전달함수를 구할 때에 소음의 영향을 줄이기 위하여 10 회의 타격 평균(averaging)을 행하였고 신호분석기



(a)



(b)

Fig. 10 Transfer functions of machine-tool workpiece system (chuck clamping torque=1000kg·cm, tool overhang=65mm, cutting speed=338rpm, machine= #3 (a) static test, (b) dynamic test

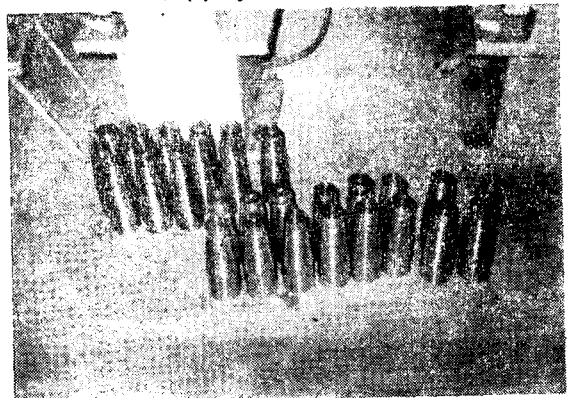


Fig. 11 A photograph of the cut MTIRA workpiece에 연결된 소형 컴퓨터(HP9845)를 이용하여 전달함수를 출력시켰다. 가진 시험을 하면서 계속 절삭을 수행하여 직접절삭 시험시와 같이 채터가 발생되면 가공을 중단하고 채터 한계 깊이를 캘리퍼스로 측정하였다. 시

Table 8 Experiemtnal values of the limiting depth of cut for the exciting-direct cutting tests(mm)

		Machine 3		Machine 4	
		Speed 1	Speed 2	Speed 1	Speed 2
Tool overhang 1	Workpiece clamping torque 1	1.9	1.5	2.4	2.0
	Workpiece clamping torque 2	1.9	1.6	2.7	2.3
Tool overhang 2	Workpiece clamping torque 1	1.8	1.5	1.9	1.5
	Workpiece clamping torque 2	1.5	1.6	1.7	1.4

힘후 채터 한계 깊이 측정에 사용된 시편의 사진은 Fig. 11과 같다. 또한 채터 한계 깊이 측정결과는 Table 8과 같다.

채터 한계를 이론적으로 예측하기 위하여는 전술한 바와 같이 공작기계 구조의 전달함수 $G_{xx}(j\omega)$ 또는 $M_{xx}(j\omega)$ 와 절삭강성의 전달함수⁽¹¹⁾ $K^{(0)cxx}(j\omega)$ 및 $K^{(1)cxx}(j\omega)$ 를 구하여야 한다. 절삭강성의 전달함수는 Fig. 8의 부프로그램 CUTNG에 의하여 구할 수 있는데 이 부프로그램에 입력시킬 주요한 데이터는 2차원 정상절삭시험(orthogonal steady-state cutting test)으로부터 구하였다. SM45C 탄소강 공작물을 절삭하여 만든 가공성 지수(universal machinability index), 등가전단각(equivalent shear angle) ϕ_e , 마찰각(friction angle) β , 전달응력(shear stress) τ_s 에 대한 아래의 데이터를 얻었다.

$$D = K_c / K_s = 117.1 / 77.1 = 1.52 \quad (18)$$

$$\phi_e = \exp(0.98\alpha_n - 1.24) \quad (19)$$

$$\beta = \exp(1.486\alpha_n - 0.44) \quad (20)$$

$$\tau_s = -68.8\alpha_n + 67.0 \quad (21)$$

위에서 K_c 는 절삭력 F_c (kg)과 전단면적 A_s (mm²)의 비율기, K_s 는 전단력 F_s (kg)과 전단면적 A_s (mm²)의 비율기, α_n 은 법선 레이크각(normal rake angle)을 의미한다⁽¹²⁾. 또한 테이퍼진 MTIRA 공작물을 가공할 때의 칩유동각(chip flow angle)은 원통형 공작물의 칩유동각에 대한 Usui의 최소에너지 이론⁽¹⁰⁾을 원용하여 Fig. 8의 부프로그램 GOLD와 공구형상데이터 및 식 (19), (20), (21)의 데이터로부터 구하여 진다. 이상의 절삭동역학 데이터와 공작기계구조의 전달함수를 Fig. 8의 채터한계 해석프로그램에 입력시켜 Fig. 12와 같이 불안정한 영역(+로 표시됨)이 얻어지고 이로부터 실선의 외곽선으로 표시된 접선안정성 경계선(tangential borderline of stability)이 구하여 진다. 이 접선안정성 경계선은 공작기계의 동적성능에 대한 중요한 특성치가 된다. 이와 같이 구한 접선안정성 경

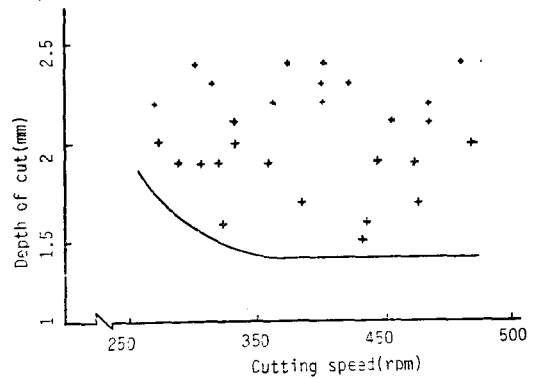


Fig. 12 The construction of the tangential borderline of stability

계선 선도를 실험값(0 및 +로 표시)과 비교한 예를 Fig. 13에 보였다. Table 9의 채터한계 깊이의 이론값, 즉 접선안정성 경계값은 실험값과 비교적 잘 일치하고 있으나 일반적으로 이론값이 실험값보다 낮은 것을 보여 주고 있다. 이것은 접선안정성 경계값이 채터한계 깊이의 하한값을 나타내기 때문이고 설계의 관점에서 실제의 채터한계(lobed borderline of stability)보다 더 의미가 있다. 또한 저자의 연구⁽¹³⁾에 의하면, 절삭깊이가 늘수록 공작기계구조의 전달함수의 감쇠(damping)가 커지는 경향이 있는데 본 연구의 테이퍼형 공작물의 절삭깊이는 점진적으로 증가하고 있고 이때의 구조 전달함수는 채터가 일어나기 훨씬 이전인 절삭초기(절삭깊이가 작을 때)에 구한 값이므로 한계 깊이의 이론값이 실험값보다 작게 예측된 것에 영향을 미쳤다고 생각된다. Table 9에서 알 수 있는 바와 같이 절삭속도 인자는 일반적으로 실험의 경우나 이론적인 경우 속도가 증가하면 한계절삭 깊이가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 절삭동역학에서 동적절삭력의 배분력 성분은 공작기계의 고유진동수와 절삭속도의 함수로 주어지므로⁽¹¹⁾ 절삭속도가 한계깊이를 결정하는 주요 인자임을 알 수 있고 그 영향을 Fig. 13에 보

Table 9 Measured and predicted limiting depth of cut on two lathes (measured/predicted)(mm)

		Machine 3		Machine 4	
		Speed 1	Speed 2	Speed 1	Speed 2
Tool overhang 1	Workpiece clamping torque 1	1.9/1.1	1.5/1.3	2.4/1.9	2.0/1.5
	Workpiece clamping torque 2	1.9/0.8	1.6/0.9	2.7/1.6	2.3/1.2
Tool overhang 2	Workpiece clamping torque 1	1.8/1.2	1.5/1.1	1.9/1.1	1.5/0.9
	Workpiece clamping torque 2	1.5/1.2	1.6/0.7	1.7/1.6	1.4/1.3

인 바와 같이 정량적으로 계산할 수 있다.

또한 전체적으로 선반 4가 선반 3보다 우수한 것(한계절삭 깊이가 더 큰 것)을 알 수 있는데 이것은 두 공작기계의 구조동력학(구조의 전달함수)을 비교한 결과 Fig. 14의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 선반 4의 동적 컴플라이언스의 크기가 선반 3의 것보다 작기 때문인 것으로 판명되었다. 공구의 오우버행은 그 길이가 작은 경우가 큰 경우보다 한계절삭 깊이가 더 컸는데 이것은 Fig. 15의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 오우버행 길이가 클 경우 동적컴플라이언스의 피크(peak) 값이 두 개 이상이 되면서 오우버행 길이가 작은 경우보다 그 크기가 커지기 때문인 것을 확인할 수 있었다. 공작물의 척 클램핑 토크의 경우는 실험값과 이

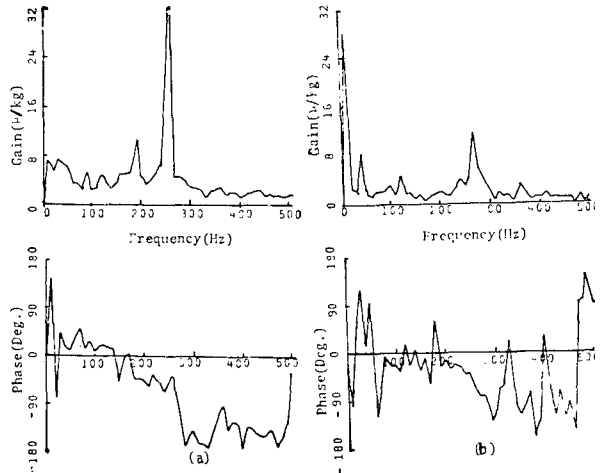


Fig. 14 Comparison of the dynamic compliances of two different machine-tools.

Chucking torque=1300kg·cm, Tool overhang =45mm, Cutting speed=338rpm. Case(a); machine #3. Case(b); machine #4.

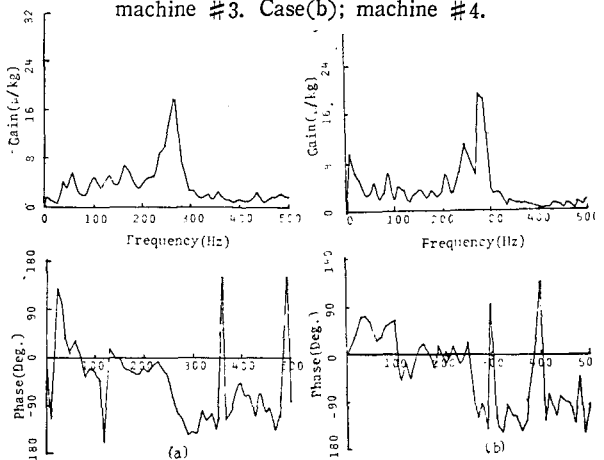


Fig. 15 Effect of tool overhang on the dynamic compliance of machine #4. Chucking torque=1000kg·cm, cutting speed=338rpm. Case(a); tool overhang=45mm, Case(b); tool overhang=65mm.

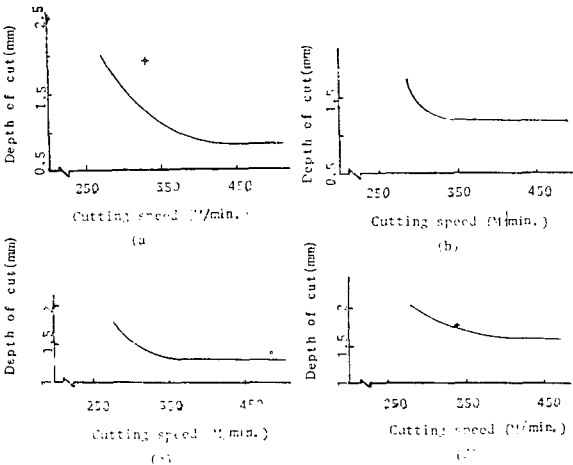


Fig. 13 The tangential borderline of stability for various cutting conditions. Tool tip TK 1504 (-6, -6, 6, 45, 45, 0.4) Tool clamping torque 900kg·cm. Chucking torque 1300kg·cm — predicted, experimental
 o 483rpm; + 338rpm
 Case(a) and (b); tool overhang 45mm, machine #3
 Case (c) and (d); tool overhang 65mm, machine #4

론 값의 경우 모두 일관성 있는 결과를 얻지 못하였는데 이는 칩 클램핑 토크보다도 센터링 작업의 오차가 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 추정된다. 이상의 결과는 chatter한계의 실험값을 통계적으로 분산해석 처리한 Table 10의 결과와도 일치하므로 상호보완적 차원에서 직접절삭법과 가진 시험법이 동시에 수행되는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Table 10 Maximum variation of significant factors in exciting direct cutting test (95% confidence level).

Source of variation	Maximum variation (%)
Speed	±13.95
Machine	± 9.5
Tool overhang	±22.87
Machine X tool overhang	±19.73

4. 결 론

공작기계의 합리적인 동적성능 시험 및 평가방법을 확립하기 위하여 여러가지 인자(공작물의 재질·기계·절삭속도·이송·베어링의 온도·공구의 오우버행, 공구의 클램핑토크·공작물의 칩클램핑토크)를 변화시키면서 MTIRA의 직접절삭시험법에 따라 chatter시험법을 수행하고 분산해석을 통하여 주 인자를 추출하고 두 기계의 성능을 비교하였고 문제점을 기술하였다 보다 합리적인 시험평가 방법으로서 직접절삭시험 중에 가진 시험도 동시에 수행하는 가진 직접절삭 시험법을 제안하고 이와 관련된 테이퍼형 공작물 가공에 대한 chatter해석 이론 및 실험방법을 기술하였다. 두 대의 공작기계에 대하여 가진 직접절삭시험을 수행하고 chatter해석 및 분산해석을 하여 아래의 결론을 얻었다.

- (1) 가진 직접절삭시험을 수행하면 직접 절삭시험을 통하여 얻어지는 모든 결과를 얻을 수 있고, 통계적 분산해석의 결과를 최소한 일부 정량적으로 확인할 수 있고 실험의 양을 축소할 수 있다. 또한 두 공작기계의 성능이 왜 차이가 있는지를 규명하는데 도움이 되며, 시뮬레이션을 통한 동적 성능 설계 개선이 가능하여 진다.
- (2) 본 연구에서 개발한 가진 직접절삭의 chatter해석 컴퓨터 프로그램을 이용하면, 공구의 형상변화, 공작물의 재질, 각종 절삭조건변화, 공작기계 구

조의 차이 등에 따른 chatter한계의 변화를 비교적 정확히 예측할 수 있다.

- (3) 본 연구는 실험양이 방대하여 경비관계로 제한된 조건에서 실험이 수행되었으므로 이 방법의 효용성은 보다 많은 실험과 응용을 통하여 검증되어야 한다.

후 기

이 연구는 최근 수년간 서울대학교 기계설계학과 기계역학 실험실에서 수행하여 온 공작기계의 동통성 연구를 기초로 하여 1984년 문교부 기초연구비의 지원하에 수행되었다. 이 연구보고가 가능하도록 재정적인 지원을 하여준 문교부에 감사한다. 또한 이 연구에 직접·간접으로 도움을 준 김규일군, 고성립군, 쌍곤지 박사, 이신영군, 윤병옥군, 주식회사 대한중기에 감사한다.

참 고 문 헌

- (1) M. Rahman and Y. Ito, "Some Necessary Considerations for the Dyanmic Performance Test Proposed by the MTIRA", Machine Tool Design and Research, Vol.21, 1981
- (2) MTIRA Technical Report, *Dynamic Performance for Lathes*, 1971
- (3) M. Weck and K. Teipel, "Assessing the Chatter Behavior of MachineTools", Annals of the CIRP., Vol.27, 1978
- (4) M. Weck and K. Teipel, *Dynamisches Verhalten Spanender Werkzeugmaschinen*, Spring-Verlag, 1977
- (5) T. Moriwaki and K. Iwata, "In Process Analysis of Machine Tool Structure Dynamics and Prediction of Machining Chatter" J. of Eng. for Ind., Transactions of ASME, Vol. 98, 1976
- (6) M.M. Nigm, "A Method for the Analysis of Machine-tool Chatter", Machine Tool Design and Research, Vol.21, 1981
- (7) 이장무, 조동우, 서준교, "선삭계의 안정성에 관한 연구", 대한기계학회논문집 제6권 제1호, 1982
- (8) 박성현, 현대실험계획법, 대영사, 1982
- (9) T. Sata and T. Inamura, "Stability Analysis of Three Dimensional Cutting", Proc. Int. Conf. Prod. Eng., 1975

- (10) E. Usui and A. Hirota, "Analytical Prediction of 3 Dimensional Cutting Process; Part I and II", ASME Papers 77-WA/Prod. -9, 77-WA/Prod. -10, 1977
- (11) J. Ssengonzi, J. Lee and Y. Yum, "A Study on the Prediction of the Limiting Depth of Cut in Dynamic Cutting of Tapered Workpiece", Transactions of KSME, Vol. 6, 1982
- (12) J. Ssengonzi, "An Angalysis of Chatter Vibration while Turnin Tapered Workpiece", Ph. D. Thesis, Seoul National University, 1982
- (13) J. Lee, "A Study on Machine Tool Structural Dynamics by Digital Correlation Method", Transactions of KSME, Vol. 5, 1981
- (14) D. Milner, "System Identification of the Machining Process", Transactions of ASME, Vol. 97, 1975
- (15) M. Das and S. Tobias, "The Relation between the Static and Dynamic Cutting of Metals", Machine Tool Design and Research, Vol. 7, 1967