

# 선삭에서 공구의 윗면경사각이 비절삭저항에 미치는 영향

김정현\*, 김희술\*\*

## The Effect of Back Rake Angle of Tool for Specific Cutting Resistance in Turning

Jung-Hyun Kim\*, Hee-Sool Kim\*\*

### Abstract

Back rake angle of tool is one of the fundamental effects to the cutting ability. In this paper, for several back rake angle of lathe tool ( $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ), we experimentally examine cutting forces via orthogonal cutting. Using measured cutting forces, a formula for specific cutting resistance is derived according to the variation of tool angle. Also, the measured cutting forces are analyzed in both time and frequency domain. Cutting parameters are obtained by measuring the thickness of chip, and the effect of the back rake angle of tool is manifested. This study maintains the predicted cutting model with improved accuracy.

KeyWords : Back rake angle of tool(공구의 윗면경사각), Specific cutting resistance(비절삭저항), Cutting force model(절삭력 모델)

### 1. 서론

절삭 공구, 공작기계의 설계 및 경제적인 절삭조건의 결정 등을 위해서는 절삭과정중에 발생하는 절삭력을 정확히 예측하는 것이 필요하다. 특히 절삭력의 정확한 예측은 현재 선진각국 및 국내에서도 활발히 추진되고 있는 공장자동화 또는 무인화에 있어서 매우 중요한 위치를 차지하며, 더불어 컴퓨터와 각종 계측장비를 효과적으로 사

용하여 절삭력의 해석에 관한 연구가 더욱 증대되고 있는 추세이다.

1940년초 Merchant<sup>1)</sup>가 2차원 절삭(orthogonal cutting)과정의 절삭력을 해석적으로 접근함으로써 절삭역학이 학문으로 대두되었다고 볼 수 있다. 그는 공구(tool)와 칩(chip)간의 순간적 위치 관계에서 힘의 2분력 즉, 수평력과 수직력의 성분을 기술하는 벡터 원(circle)을 제시 하였으며, 최소 에너지 소비설에 입각한 전단각을

\* 경일대학교 기계공학부

\*\* 영남대학교 기계공학부

구하는 선도를 제시하였다.

그 후 이러한 전단계에 대한 연구로서 많은 실험결과와 실험식이 제시되었으며, Cook, Smith, Finne, Shaw 등<sup>2,3,4)</sup>에 의하여 이론적 골격이 완성되었다. Martellotti<sup>5)</sup>는 실제로 사용하기 부적합하고 복잡한 방법을 변형이 일어나기 전의 단면적과 절삭력간에 어떤 비례관계가 성립하며, 이 비례상수를 비절삭저항(specific cutting resistance)으로 절삭력을 해석하는 방법을 제시하였다.

Gygax, Ruzhong, Wang<sup>6,7)</sup>은 비절삭 저항을 이용하여 절삭력 해석이 비교적 복잡한 정면 밀링에서 단인 공구를 사용하여 2차원적인 절삭력 모델을 제시하였다. 이러한 비절삭 저항을 이용한 절삭력 해석을 최근 계측기의 급격한 발달로 인하여 절삭력 측정이 용이해짐으로써 Devor, Kapoor Kline<sup>8,9)</sup>등에 의해서 커터와 공작물의 형상, 그리고 런 아웃(runout)등을 고려한 절삭력 해석이 가능하게 되었다.

국내에서는 박희덕<sup>10)</sup>, 이우영<sup>11)</sup>등이 수직 절삭에서 얻어진 계수와 전단응력 특성을 이용하여 밀링의 기하학적 형상을 고려한 절삭력 예측모델을 제시하였으며, 김희술<sup>12)</sup>등은 3축 방향에서 측정된 평균 절삭력 성분과 수직 밀링의 기하학적 형상을 고려하여 정면밀링커터의 접선, 반경, 축 방향의 비절삭 계수를 이용한 절삭력 모델을 제시하였고, 스피들 편심 및 각 인서트들의 초기 위치 오차, 공구의 형상등에 따른 절삭칩 면적의 변화를 고려하여 절삭력 정밀도를 향상시킨 절삭력 모델을 제시하였다. 그러나 이와같은 절삭력 모델은 공구의 형상중 절삭성(cutting ability)에 큰 영향을 미치는 중요한 요소인 공구의 뒷면 경사각(back rake angle)의 영향을 표준공구로 가공시 비절삭저항을 구하여 공구각에 따른 미소 절삭면적을 고려하여 절삭력을 예측하였다.

따라서 본 연구에서는 공구의 뒷면경사각의 변화에 따른 비절삭저항의 변화를 연구하기 위하여 공구의 뒷면경사각(back rake angle)을  $-5^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$  로 선반용 공구를 제작하였다. 선삭에서 많이 쓰이는 대표적인 절삭조건을 선정후 제작된 공구로 2차원 절삭을 행하여 공구의 뒷면 경사각의 변화에 따른 절삭저항을 측정하여 경사각의 변화에 따른 비절삭저항을 커브피팅(curve fitting)하여 실험식을 만들었다. 측정된 절삭력을 시간 및 주파수로 분석하여 공구각이 비절삭저항에 미치는 영향을 제시하고, chip의 두께를 공구 현미경(tool microscope)으로 측정하여 2차원 절삭이론에 의하여 전단계, 마찰계수 및 마찰각을 구하여 그 원인을 규명함으로써 보다 정밀도가 향상된 예측절삭력의 모델개선에 이바지하고자 한다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험 장치 및 방법

이론해석은 참고문헌 13으로 대체한다. 본 실험에서 사용된 공작기계는 범용선반이고, 중공봉의 공작물, 공구로 구성되어 있다. 실험장치의 개략도는 <Fig. 1>과 같다.

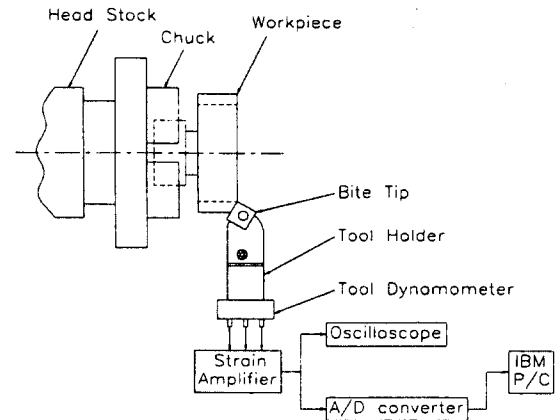


Fig. 1 Schematic diagram for experimental set up

개략도에서와 같이 절삭력 크기를 측정하기 위해서 스트레인 타입(strain type)의 공구동력계(tool dynamometer)를 사용하였다. 발생한 신호는 증폭기(amplifier)에서 증폭시켜 모니터링함과 동시에 12bit A/D 변환기를 이용하여 500Hz로 샘플링하여 데이터 개수 1024개를 연속적으로 측정하였고, 측정된 절삭력은 퍼스널 컴퓨터에 입력 저장하였다. 저장된 데이터는 F.F.T(Fast Fourier Transform)알고리즘을 이용하여 주파수 변환하였다. 또 절삭상태를 직접볼수 있도록 하기 위해 메모리 오실로스코프를 사용하였다. <Table 1>은 본 실험에 사용된 공작기계 및 계측기의 제원을 나타낸다.

Table 1. Specification of experimental instrument

Lathe	Daewoo, ED-18
Workpiece	SM 45 C
Tool Dynamometer	Kyowa, PM -300
A/D Converter	Global Lab(DT2833) Conversion rate : 30KHz Resolution : 12 Bit Input Range : $\pm 10V$
Computer	IBM PC(i486)DX-50
Oscilloscope	TEKTRONIX(2201 Digital Storage Oscilloscope)
Strin Amplifier	Kyowa, DPM -300, +10V

Table 2. Cutting conditions

Diameter of workpiece(mm)	45
R.P.M (rev/min)	490
Feed (mm/min)	0.2
Depth of cut (mm)	2

전단각 및 마찰계수, 마찰각을 구하기 위하여 칩(chip)의 두께를 측정하기 위하여 절삭가공후 칩을 수집하여 공구 현미경(Tool microscope)으로 여러번 측정하여 평균값을 이용하여 절삭비(chip thickness ratio)를 구하였다.

2-2. 재료 및 공구

본 실험에 사용한 재료는 일반 축 재료로 많이 사용하는 기계구조용 탄소강(SM45C)의 재료를 선택하였으며 화학적 성분은 <Table 3>과 같고, 기계적 성질은 <Table 4>와 같다.

Table 3. Chemical composition of SM45C (%)

Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (H <sub>B</sub> )	Reduction of area
71.3	36.45	18.6	206	44

Table 4. Mechanical property of SM45C

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0.44	0.22	0.74	0.02	0.015	0.3	0.01	0.01	0.01

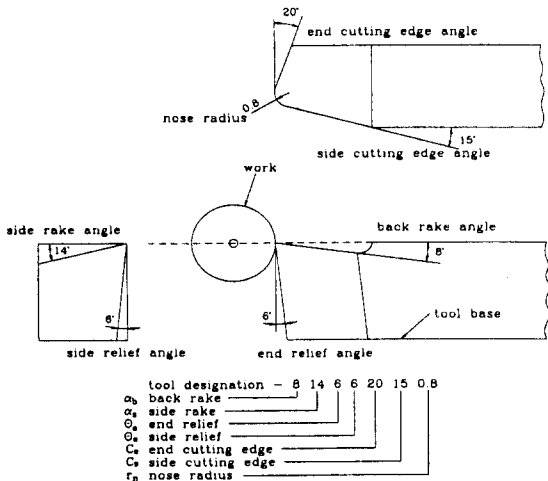


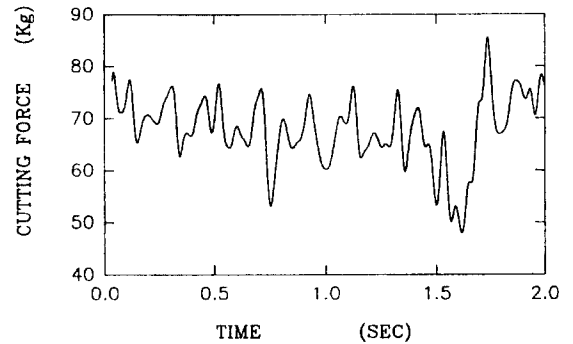
Fig. 2. Dimension of tool holder and tip

본 절삭실험에 사용한 공구는 국내에서 많이 사용되고 있는 대한중석의 초경합금 팁(SNMG 120408)을 Tool Holder(PSBNR 2525-M12)에 황동납으로 용접하여 공구연삭기로 뒷면경사각(Back rake angle)을 -5°, 0°, 5°, 10°, 15°로 제작하여 사용하였다. 이때 Tool Holder에 부착하여 사용하는 인서트팁(P20)으로 사용하였다. 이때 실험에 사용된 Tool Holder의 형상과 재원은 <Fig. 2>와 같다.

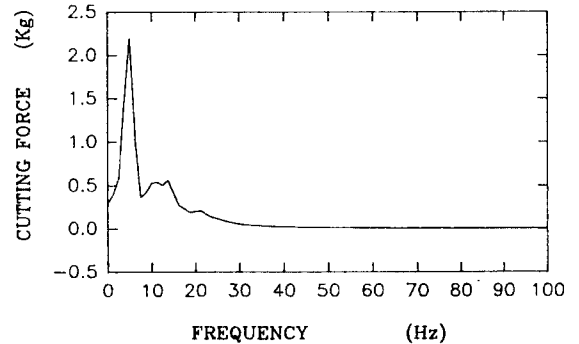
3. 결과 및 고찰

3-1. 절삭력

<Fig. 3~12>는 뒷면경사각(Back rake angle)이 -5°, 0°, 5°, 10°, 15°인 공구로 절삭실험을 행하여 주분력(X-direction) 및 이송분력(Y-direction)을



(a) Time domain

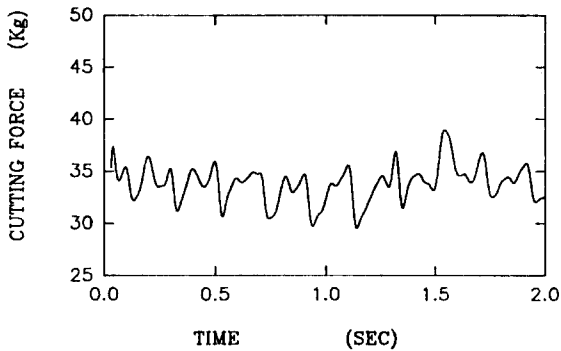


(b) Frequency domain

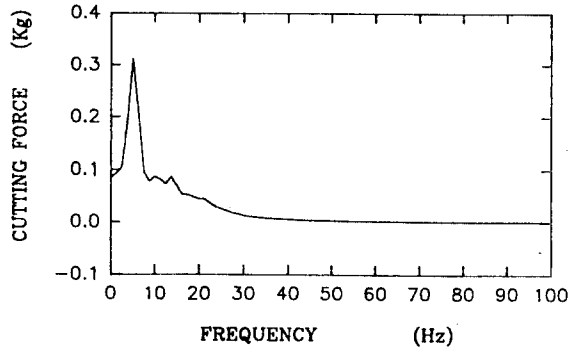
Fig. 3. The cutting force X-direction (-5°)

시간영역 및 주파수영역으로 나타낸 것이다. 공구 경사각이 증가함에 따라 평균 절삭저항은 감소함을 보였다. 주파수 영역에서 8Hz부근에서 피크값은 공작물의 회전 주

파수로 생각되며, 이 값은 공구의 윗면 경사각이 커짐에 따라서 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 공구의 윗면 경사각이 커질수록 전단각이 증가하는 것으로 생각된다.

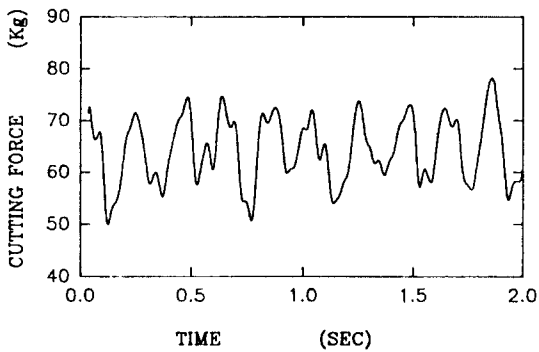


(a) Time domain

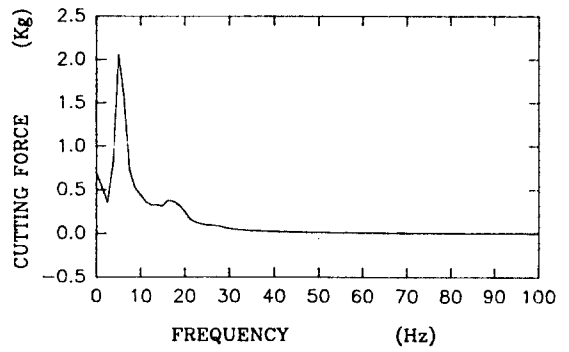


(b) Frequency domain

Fig. 4. The cutting force Y-direction ( $-5^\circ$ )



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 5. The cutting force X-direction ( $0^\circ$ )

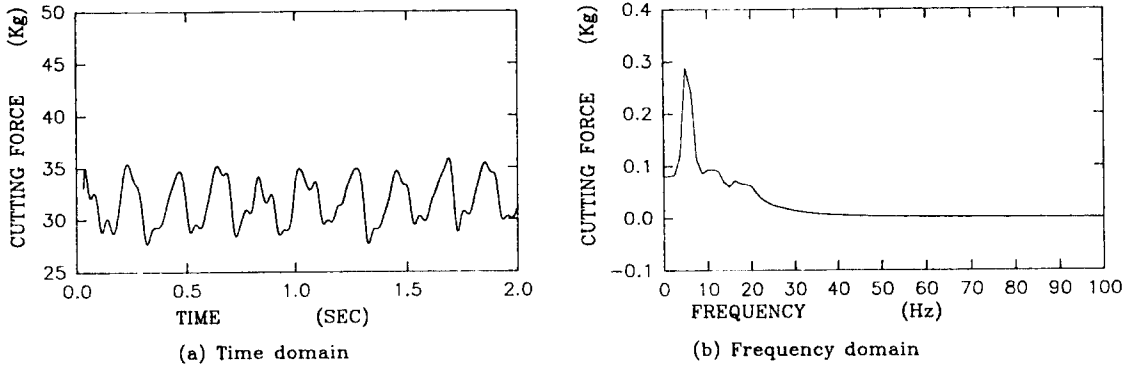


Fig. 6. The cutting force Y-direction ( $0^\circ$ )

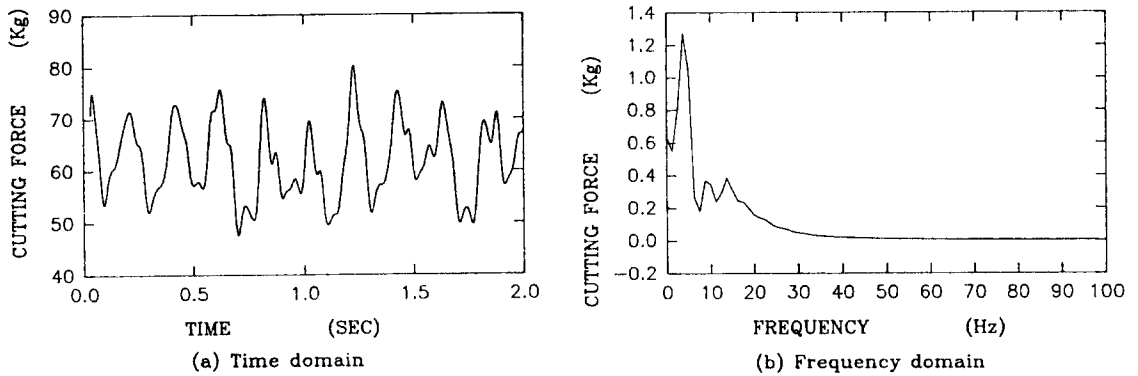


Fig. 7. The cutting force X-direction ( $5^\circ$ )

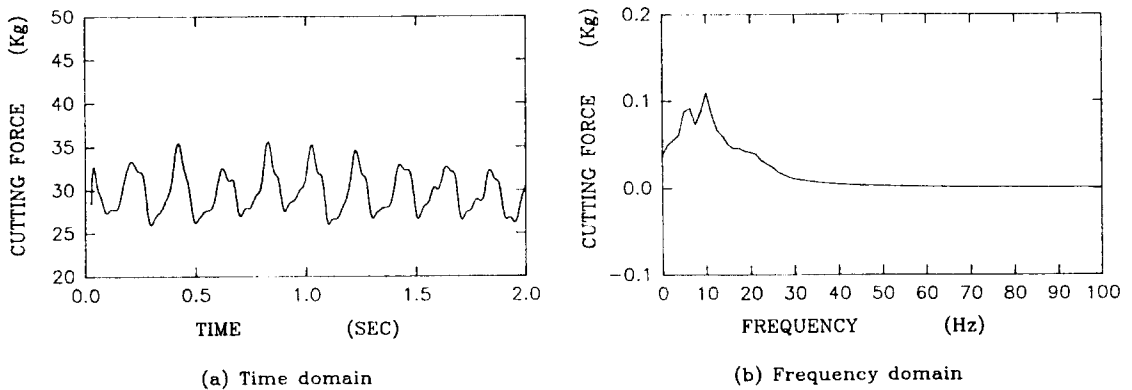


Fig. 8. The cutting force Y-direction ( $5^\circ$ )

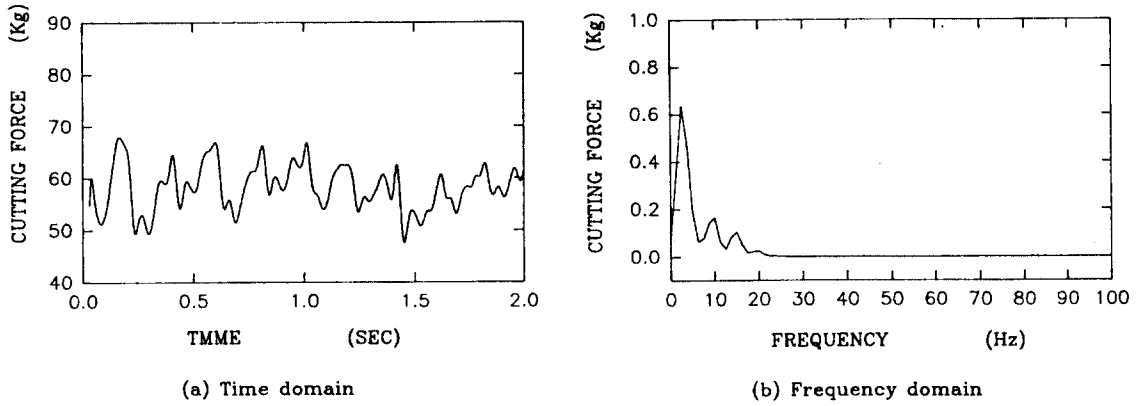


Fig. 9. The cutting force X-direction ( $10^\circ$ )

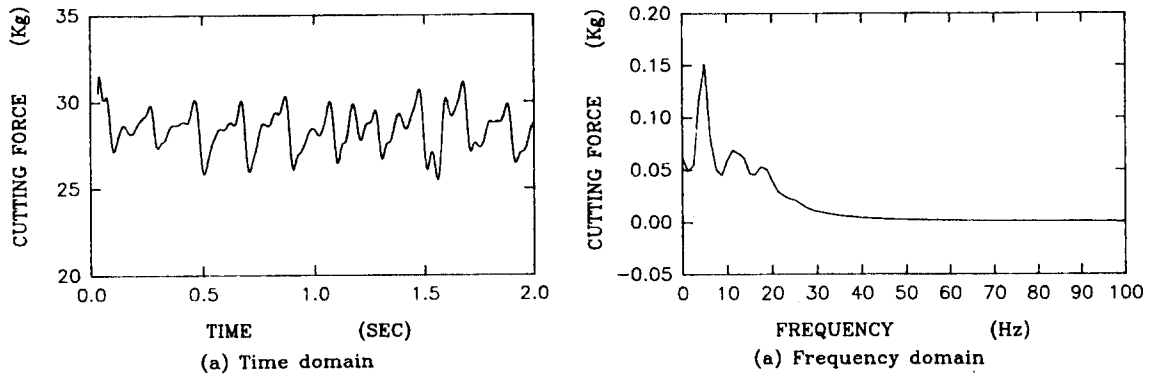


Fig. 10. The cutting force Y-direction ( $10^\circ$ )

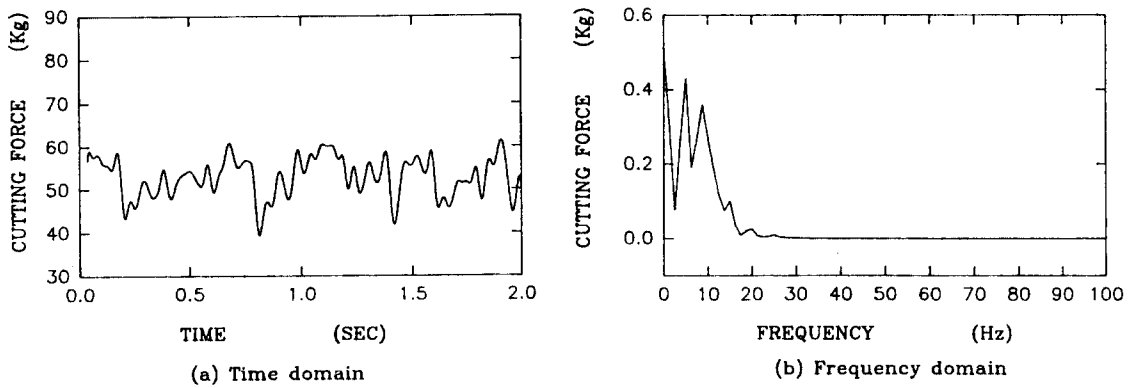


Fig. 11. The cutting force X-direction ( $15^\circ$ )

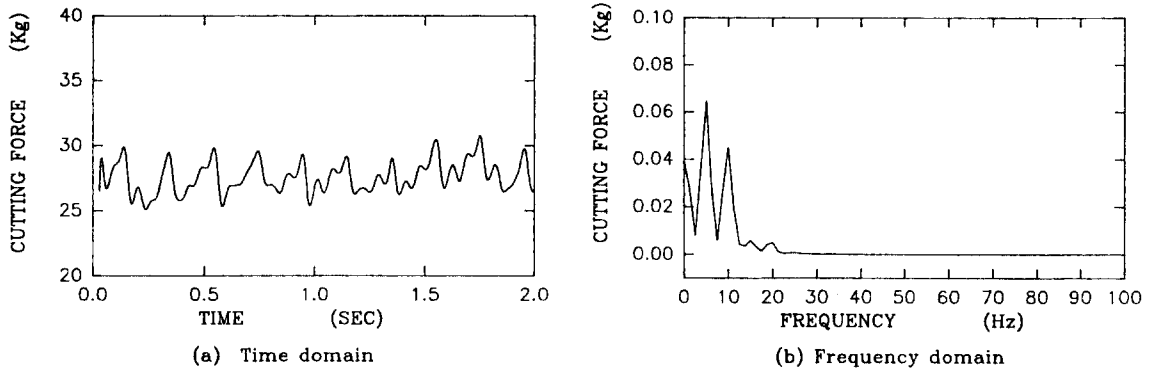


Fig. 12. The cutting force Y-direction (15° )

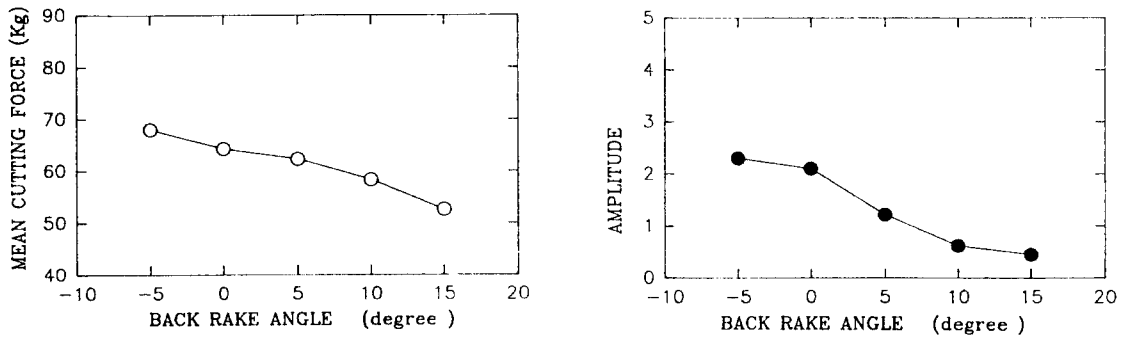


Fig. 13. The mean cutting force and amplitude according to back rake angle in X-direction

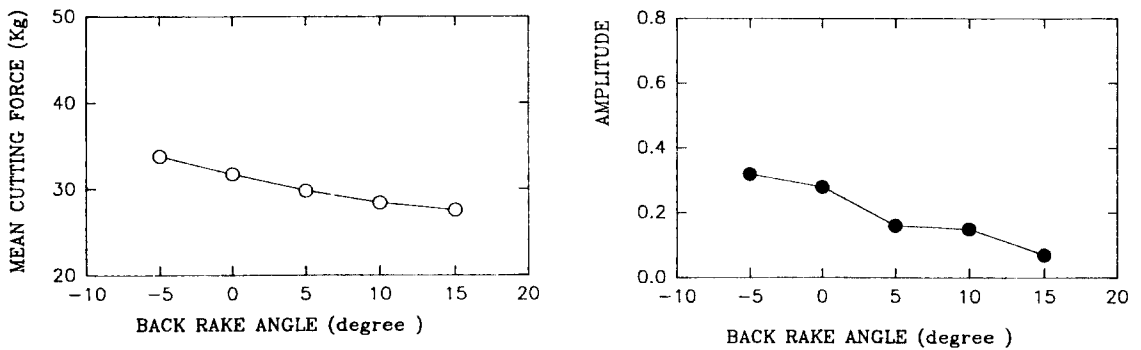


Fig. 14. The mean cutting force and amplitude according to back rake angle in Y-direction.

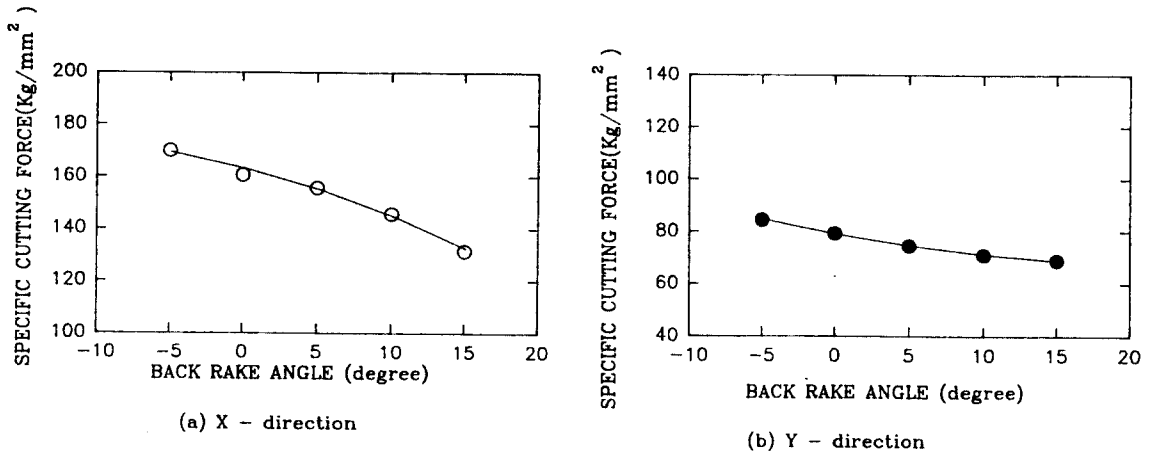


Fig. 15. The specific force according to back rake angle

〈Table 5〉는 공구의 윗면 경사각에 따른 X 및 Y 방향의 절삭저항의 평균값을 나타내었다.

Table 5. The mean forces of X-direction & Y-direction

	-5°	0°	5°	10°	15°
X-dir. (Kg)	68.00	64.30	62.30	58.30	52.60
Y-dir. (Kg)	33.82	31.75	29.82	28.40	27.57

〈Fig. 13~14〉는 공구의 윗면경사각에 따른 평균 절삭력 및 주파수 영역의 피크값을 나타낸 것이다. 공구의 윗면 경사각에 따라서 평균 절삭력은 감소하는 경향을 나타내었고, 주파수 영역의 피크값도 공구의 윗면 경사각의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 〈Fig. 13~14〉에서 공구의 윗면 경사각의 증가에 따른 평균절삭력의 감소는 X방향 및 Y방향이 비슷한 경향을 나타내었고, 주파수 영역에서도 공구의 윗면 경사각의 증가에 따른 피크값의 감소는 X방향 및 Y방향이 비슷한 경향을 나타내었다.

〈Fig. 15〉는 평균절삭력을 절삭면적(cutting area)으로 나누어준 비절삭저항을 공구의 윗면경사각의 증가에 따라 커브 피팅(curve fitting)하여 나타낸 것이다. X방

향 및 Y방향의 비절삭저항은 공구의 윗면경사각의 증가에 따라 감소하는 경향으로 나타났고, 실험식은 아래와 같다.

$$X \text{ 방향} : y = - 0.04286 x^2 - 1.4141 x + 163$$

$$Y \text{ 방향} : z = 0.02137 x^2 - 1.006 x + 79.10971$$

y : X 방향의 비절삭저항, z : Y 방향의 비절삭저항.

x : 공구의 윗면 경사각

### 3-2. 절삭 parameter

절삭이론에 적용하여 절삭 parameter를 구하기 위하여 칩의 두께(t<sub>2</sub>)는 절삭실험 후 칩을 채취하여 공구현미경으로 여러번 측정하여 그 평균값을 〈Table 6〉에 나타내었다. 칩의 두께(t<sub>2</sub>)가 증가하면 절삭비( $r_c = t_1/t_2$ )는 감소하여야 하고 Table 6에서 절삭비( $r_c$ )는 공구의 윗면 경사각이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타나 있다.

X방향의 힘과 Y방향의 힘 및 공구의 윗면 경사각에 의하여 계산된 마찰력(F)과 마찰력에 수직으로 작용하는 힘(N)은 공구의 윗면경사각의 증가에 따라 점차 증가하는 경향을 보였다.

마찰력(F)과 마찰력에 수직으로 작용하는 힘(N)에 의



하여 계산된 마찰계수( $\mu$ ) 및 마찰각( $\beta$ )는 공구의 윗면 경사각의 증가에 따라 점차 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 6. The cutting parameter according to back rake angle of tool

	$t_2(\text{mm})$	$r_c$	$\phi(^{\circ})$	N(Kg)	F(Kg)	$\mu$	$\beta(^{\circ})$
-5°	2.71	0.738	34.64	70.69	27.76	0.3927	21.44
0°	2.65	0.755	37.05	64.30	31.75	0.4938	26.28
5°	2.36	0.847	42.33	59.46	35.14	0.5910	30.58
10°	2.30	0.870	45.26	52.48	38.09	0.7258	35.97
15°	2.25	0.899	48.12	43.67	40.24	0.9215	42.66

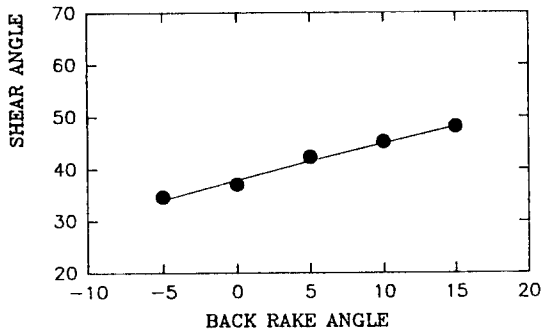


Fig. 16. The shear angle according to back rake angle of tool

(Fig. 16)은 공구의 윗면 경사각의 증가에 따른 전단각( $\phi$ )은 점차 증가하는 경향을 나타내었고, 이 전단각의 증가로 인하여 공구의 윗면경사각이 증가함에 따라 절삭력이 감소하는 원인으로 사료된다. 공구의 윗면경사각에 따른 전단각의 실험식은 아래와 같다.

$$\phi = -0.0414 x^2 + 0.74482 x + 38.06656,$$

$\phi$  : 전단각,  $x$  : 공구의 윗면경사각

#### 4. 결론

공구의 윗면 경사각을 -5°, 0°, 5°, 10°, 15° 로 공구를 제작하여 2차원 절삭실험을 행하여 비절삭저항의

변화 및 절삭 parameter를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 공구의 윗면경사각이 증가함에 따라 비절삭저항은 감소하는 경향을 나타내었고, 실험식은 다음과 같다.

$$X \text{ 방향 : } y = -0.04286 x^2 - 1.4141 x + 163,$$

$$Y \text{ 방향 : } z = 0.02137 x^2 - 1.006 x + 79.10971$$

2. 공구의 윗면경사각이 증가함에 따라 전단각은 증가하는 경향을 나타내었고, 이 전단각의 증가는 비절삭저항의 감소하는 원인으로 생각되며 실험식은 다음과 같다.

$$\phi = -0.0414 x^2 + 0.74482 x + 38.06656$$

3. 공구의 윗면경사각이 증가함에 따라 마찰계수 및 마찰각은 증가하는 경향으로 나타났다.

#### 참고 문헌

1. Merchant, M. E., "Analysis of the Milling Process, Part-down Milling," Trans. ASME, Vol. 67, p.67, 1941.
2. Nachitigal, C. L. and Cook, N.H. , "Active Contrl of Machine Tool Chtter," J. of Basic Eng. Trans. ASME, Series D, Vol. 92, No. 2, pp. 238-244, 1970.
3. Shaw, M. C., Cook, N. H., and Finne, "the Shear-Angle Relation Ship in Metal Cutting," Trans. ASME, Vol. 75, pp. 273-288, 1953.
4. Shaw, M.C., Cook, N.H., and Smith P. A., "The Machanics of Three Dimentional Cutting Opeartion," Trans. ASME, Vol. 74, pp. 1055-1064, 1952.
5. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. ASME, Vol. 67, p. 67, 1941.
6. Gygax, P.E., "Dynamics of Single Tooth Milling," Annals of CIRP, Vol. 28, Jan. pp.

- 65-71, 1979.
7. Ruzhong, z. and Wang, K.K. "Modeling of Cutting Force Pulsation on Face Milling." Annals of CIRP, vol. 321/1, pp. 21-26, 1983.
  8. Fu, H.J., Devor, R.E. and Kapoor, S. G., " A Mechanistic Model for Prediction of the Force System in Face Opertion," Trans of ASME J. of Eng. for Ind., Vol. 106, pp. 81-88, 1984.
  9. Kine, W.A. and Devor, R.E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Force in Milling," Int. j. of MTDR, Vol. 23, No. 2/3, pp. 123-140, 1982.
  10. 박희덕, 양민양, "불 엔드밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구." 대한기계학회논문집, 제13권, 제3호, pp. 422-433, 1989.
  11. 이우영, 신효철, "전단유동응력에 의한 정면밀링의 절삭력 해석," 대한기계학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 1170-1182, 1989.
  12. 김희술, 이상석, "3축방향의 비절삭계수를 이용한 정면밀링 절삭력 모델 개발," 한국정밀공학회지, 제8권, 제1호, pp. 116-129, 1991.
  13. 廉永夏, 工作機械의 切削理論, 東明社, pp.49-57, 1988.