

엔드밀 가공의 절삭력 예측 및 실험

이신영*, 임용묵[†]

(논문접수일 2004. 1. 16, 심사완료일 2004. 4. 9.)

Prediction and Experiments of Cutting Forces in End Milling

Sin-Young Lee*, Yong-Mook Im[†]

Abstract

A reasonable analysis of cutting force in end milling may give much advantage to improvement of productivity and cutting tool life. In order to analyze cutting force, the cutting dynamics was modelled mathematically by using chip load, cutting geometry, and the relationship between cutting forces and the chip load. The specific cutting constants of the cutting dynamics model were obtained by average cutting forces, tool diameter, cutting speed, feed, axial depth, and radial depth of cut. The model is verified through comparisons of model predicted cutting forces with measured cutting forces obtained from machining experiments. The results showed good agreement and from that we could predict reasonably the cutting forces in end milling.

Key Words : End milling(엔드밀 가공), Cutting force(절삭력), Prediction(예측), Chip load(칩 부하), Depth of cut(절삭깊이)

1. 서 론

엔드밀 가공은 절삭 공구의 개량과 제어 기술의 진보에 따라 가공 범위가 종래에 비하여 커지게 되어 각종 기계부품이나 금형 부품의 절삭가공 등 많은 분야에 널리 응용되고 있다. 엔드밀 가공시 다양한 절삭조건들이 절삭력에 미치는 영향을 예측하기 위해 많은 모델들이 개발되었다. Altintas 등⁽¹⁾과 Minis 등⁽²⁾은 직선 엔드밀 가공에 있어서 일정한 비절삭 압력과 절삭력비를 제시하였다. Tarnng⁽³⁾

은 증분식 접선력에 대한 비절삭 압력과 접선방향 힘에 대한 반경방향 힘의 비율을 회전 당 평균 칩 두께의 지수 함수로써 표현하였고 Smith 등⁽⁴⁾은 일정한 절삭강성을 도입하였고 반경방향 힘을 접선방향 힘에 비례한다고 고려하였다. 이 모델의 비절삭상수는 절삭실험에서 얻어진 평균절삭력으로부터 얻어진다. Kline 등⁽⁵⁾은 엔드밀 가공시 절삭력을 예측하기 위한 방안으로 밀링 가공의 절삭동역학에 대한 해석적 모델을 제시한다. Choi 등⁽⁶⁾은 볼 엔드밀 가공의 절삭력 모델에 대하여 연구하였고, Hong⁽⁷⁾은

* 군산대학교 기계공학부 (sinyilee@kunsan.ac.kr)

주소: 573-701 전북 군산시 미룡동 산68

+ 군산대학교 산업대학원(현, 전북기능대학 컴퓨터응용기계과)

엔드밀링에서 순간전단면을 이용한 절삭력 모델에 대하여 연구하였다. 본 논문에서의 절삭동역학 모델은 칩 부하와 절삭 기하학 및 절삭력과 칩 부하 사이의 관계에서 해석된다. 이 모델을 가지고 엔드밀 공정의 절삭력을 예측하기 위하여 다양한 절삭 조건에 대하여 2날 초경 엔드밀 직경 16mm와 20mm의 2종류를 사용하여 각각 40회의 건식 절삭실험을 수행하였다. 이 모델의 비절삭력 계수는 절삭실험의 평균 절삭력으로부터 얻어진다. 제시된 모델링을 검증하기 위하여 비절삭력계수를 사용하여 모사된 결과와 실험치를 비교하였다. 또한 건식 절삭에서 반경방향 절삭깊이 및 축방향 절삭깊이가 변화함에 따른 이송방향 및 직교방향에서의 절삭분력의 변화를 고찰하였다.

2. 엔드밀 가공의 절삭역학

밀링 절삭 가공 중 공구 날 1개에 발생하는 절삭력은 0부터 최대까지 변동하며 동시에 절삭날 수가 1 이상으로 되면 서로 중복되어 합력은 커진다. 따라서 절삭력 예측의 기본 요소는 공구에 작용되는 칩 부하(chip load)이고 식 (1)과 같이 설정할 수 있다⁽⁵⁾.

$$t_c = f \sin \beta \quad (1)$$

여기에서 t_c 는 순간적인 칩의 두께, f 는 날당 이송, β 는 절삭 중 공구날의 위치각을 나타낸다. 실제 절삭을 하는 동안 각 날의 위치가 다르게 되므로 절삭날의 위치마다 각기 다른 두께의 칩이 절삭되어 절삭력이 다르게 분포한다. 임의 순간에 대한 엔드밀 부하의 총합은 공구의 축을 따라서 Fig. 1과 같이 분할된 얇은 원판 형상의 각각의 칩 부하를 합한 것이다. 밀링 가공에서의 절삭력은 2차원 해석의 경우 접선방향 절삭력과 반경방향 절삭력으로 나눌 수 있다. 접선방향 분력은 밀링 커터의 접선방향으로 작용하는 절삭

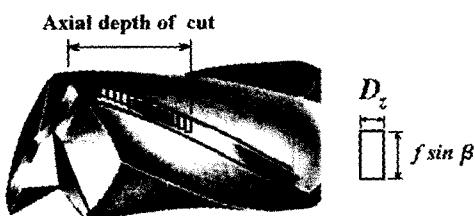


Fig. 1 End mill and its axial elements

력으로 반경방향 분력에 비하여 현저하게 크다. 일반적으로 절삭력은 칩 두께와 절삭폭에 비례한다. 따라서 접선방향 힘과 반경방향 힘은 칩 하중에 비례하므로 다음 식에 의하여 각 힘들을 구할 수 있다⁽⁵⁾.

$$\Delta F_{tan} = K_T D_z t_c \quad (2)$$

$$\Delta F_{rad} = K_R \Delta F_{tan} \quad (3)$$

위 식에서 ΔF_{tan} 과 ΔF_{rad} 는 각각 해당 요소의 접선방향 및 반경방향 힘, D_z 는 축방향으로 절단한 미소 절삭폭, K_T 와 K_R 은 비절삭력 계수로서 이송, 반경방향 절삭깊이, 축방향 절삭깊이 등의 각종 절삭조건에 따라 변한다. 반지름이 Rad , 엔드밀의 날 수가 N_f 이고 나선각이 α_{hx} 인 공구에 의한 하향절삭의 경우에 대하여 적용하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \beta(i, k, t) = & -\theta(t) + 2\pi(k-1)/N_f \\ & + (i-0.5)D_z \tan \alpha_{hx}/Rad \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 i 는 축방향 미소원판의 번호, t 는 경과시간, k 는 날의 번호이다. 이 $\beta(i, k, t)$ 값 중에서 절삭 범위 안에 해당하는 경우만이 절삭력에 기여하게 된다. 접선방향과 반경방향은 전체좌표계 X, Y 로 분해될 수 있고, 그 합이 절삭력이 된다. 여기에서 X 는 이송방향, Y 는 이송방향에 직각인 방향을 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_x(t) = & \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{k=1}^{N_r} \{-\Delta F_{rad}(i, k, t) \sin[\beta(i, k, t)] \\ & + \Delta F_{tan}(i, k, t) \cos[\beta(i, k, t)]\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_y(t) = & \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{k=1}^{N_r} \{+\Delta F_{rad}(i, k, t) \cos[\beta(i, k, t)] \\ & + \Delta F_{tan}(i, k, t) \sin[\beta(i, k, t)]\} \end{aligned} \quad (6)$$

특정한 절삭조건(주어진 공구에 대한 반경방향 및 축방향 절삭깊이, 이송)에 대하여 평균절삭력을 구하면, 평균절삭력은 K_R, K_T 의 함수이므로 1회의 실험에서 1쌍의 K_R, K_T 를 구할 수 있다. 이송과 반경방향 절삭깊이, 축방향 절삭깊이를 각각 변화시켜 가면서 최소자승법(least square method)에 의하여, 이송, 반경방향 절삭깊이 및 축방향 절삭깊이의 함수 형태로 비절삭력계수 K_T 와 K_R 을 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_T = & a_0 + a_1 RD + a_2 AD + a_3 f + a_4 RD \cdot AD \\ & + a_5 f \cdot RD + a_6 f \cdot AD + a_7 RD^2 \\ & + a_8 AD^2 + a_9 f^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} K_R = & b_0 + b_1 RD + b_2 AD + b_3 f + b_4 RD \cdot AD \\ & + b_5 f \cdot RD + b_6 f \cdot AD + b_7 RD^2 \\ & + b_8 AD^2 + b_9 f^2 \end{aligned} \quad (8)$$

3. 절삭 실험

본 실험에 사용된 공작기계는 주어진 가공 조건을 정확하게 제어하기 위하여 머시닝센터를 사용하였고, 절삭력 측정은 공구동력계를 사용하였다. Table 1은 실험 장비의 규격을 나타낸다. 본 절삭 실험에서 사용된 공구는 (주)한국야금의 지름 16mm, 2날 초경 엔드밀(ZSE 216)과 대한중석, 지름 20mm, 2날 초경 엔드밀(HHE 2200) 2 종류이었다. 본 실험에서 사용한 엔드밀의 규격은 Table 2와 같다.

본 실험에 사용된 절삭 재료는 기계구조용 강재인 SM 45C를 사용하였으며, 시편의 절삭부 폭은 45mm, 깊이는

Table 1 Specifications of experimental apparatus

Vertical machining center	model: Tongil TNV-40 bed size: 900×410 mm feedrate: 1~5000 mm/min spindle speed: 40~4000 rpm
Tool dynamometer	model: Kistler 9257B range: ±5 kN resolution: 0.01 N sensitivity: 7.5 pC/N
Charge amplifier	model: Kistler 5019A measuring range: 999000 pC frequency range: 0~200 kHz

Table 2 Specification of end mill

End mill	Specification	
diameter(mm)	16	20
flutes	2	2
total length(mm)	95	115
shank length(mm)	53	70
cutting edge length(mm)	30	32

45mm, 시편의 길이는 140mm로 제작하였다. 시편은 8개의 M10 볼트를 사용하여 공구동력계 위에 설치하였다. 머시닝센터에서 다양한 조건의 절삭실험에 의하여 비절삭력 계수를 실험적으로 결정하였으며, 실험에서 사용된 절삭조건은 Table 3과 같다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 머시닝센터에서 엔드밀 공정의 절삭력을 예측하기 위하여 Table 3과 같은 절삭조건에 따라 충분히 긴 시간동안 절삭실험을 하여 구한 평균 절삭력으로 비절삭력계수를 구하였다. 최소자승법에 의하여 개발된 프로그램은 Fig. 2와 같고, 프로그램으로부터 식 (7)과 (8)의 계수들을 구하였다. 비절삭력계수들은 Table 4와 같이 구해졌다.

4.1 반경방향 절삭깊이가 절삭력에 미치는 영향

반경방향 절삭깊이의 변화에 따른 절삭력의 변동을 Figs.

Table 3 Cutting conditions for tests

End mill diameter(mm)	ϕ 20	ϕ 16
Radial depth of cut(mm)	2, 4, 6, 8, 10	
Axial depth of cut(mm)		12, 20
Feed rate(mm/min)	67, 85	85, 120
spindle speed(R. P. M.)	480, 600	600, 900

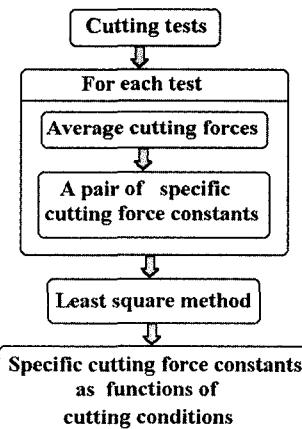
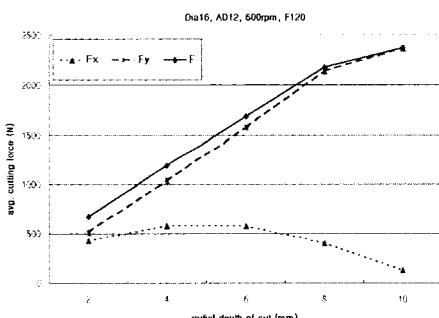


Fig. 2 Flowchart of the program for specific cutting force constants

Table 4 Specific cutting force coefficients

End mill	Coefficients	Values
$\phi 16$ mm	a_i	0.642E10, -0.143E12, 0.154E12, -0.846E14, -0.729E13, -0.199E15, -0.530E15, 0.179E14, -0.185E13, 0.535E18
	b_i	-0.138E01, 0.918E02, 0.215E03, -0.187E04, -0.552E04, -0.475E05, -0.282E05, 0.862E03, -0.584E04, 0.150E08
$\phi 20$ mm	a_i	0.122E11, 0.198E12, 0.177E11, -0.202E15, -0.190E13, -0.166E16, 0.283E15, -0.503E12, -0.308E12, 0.142E19
	b_i	0.795E00, 0.797E02, -0.674E01, -0.151E05, -0.232E03, -0.624E06, -0.134E06, -0.188E04, 0.646E03, 0.143E09

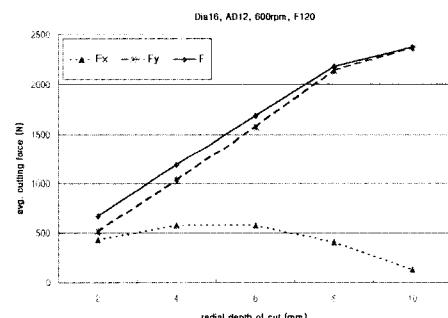


(a) Feed 85mm/min

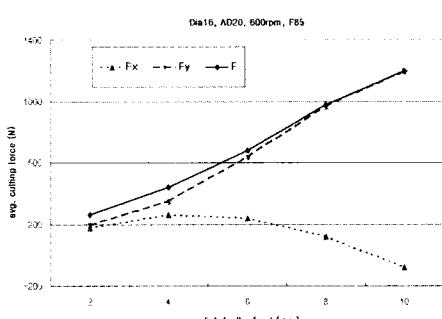
3~6에 나타내었다. 이것으로부터 반경방향 절삭깊이가 증가할수록 X방향 평균절삭력 F_x 는 포물선 모양으로 증가하다가 감소됨을 알 수 있다. 반경방향 절삭깊이가 커질수록 평균절삭합력(F)는 증가하나 반경방향 절삭깊이가 4 또는 6mm부터 절삭력 방향이 -로 작용하는 성분이 발생하다 8 또는 10mm가 되면 절삭력 방향이 -로 급격히 증가 결국 X방향 평균절삭력 F_x 가 작아진다. Y방향 평균절삭력 F_y 와 절삭합력은 반경방향 절삭깊이가 증가하면 평균절삭력이 거의 직선적으로 증가하였다.

4.2 축방향 절삭깊이가 절삭력에 미치는 영향

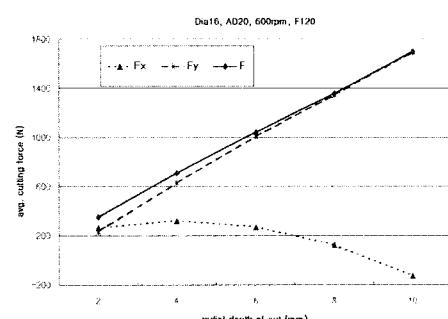
축방향 절삭깊이에 따른 절삭력의 변화를 Figs. 7~10에 나타내었다. 축방향 절삭깊이와 반경방향 절삭깊이를 변화시켜 가면서 실험한 결과 그림들을 보면, 축방향 절삭깊이가 증가하면 F_x , F_y 의 평균 절삭력과 그 합력도 증가함을 볼 수 있다. Fig. 9는 반경방향 절삭깊이가 작을 때는 Figs. 7, 8 및 Fig. 10과 같은 경향을 나타내었는데, 절삭



(b) Feed 120mm/min

Fig. 3 Average cutting force vs. radial depth of cut(end mill dia. 16, 600rpm, AD 12)

(a) Feed 85mm/min



(b) Feed 120mm/min

Fig. 4 Average cutting force vs. radial depth of cut(end mill dia. 16, 600rpm, AD 20)

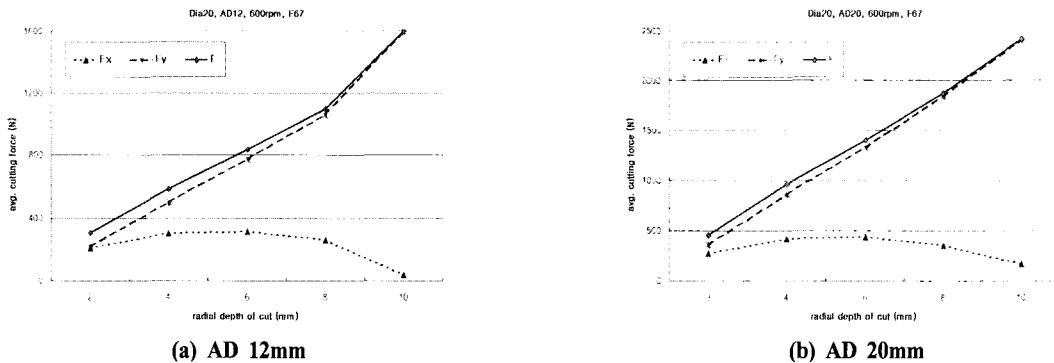


Fig. 5 Average cutting force vs. radial depth of cut(end mill dia. 20, 600rpm, feed 67)

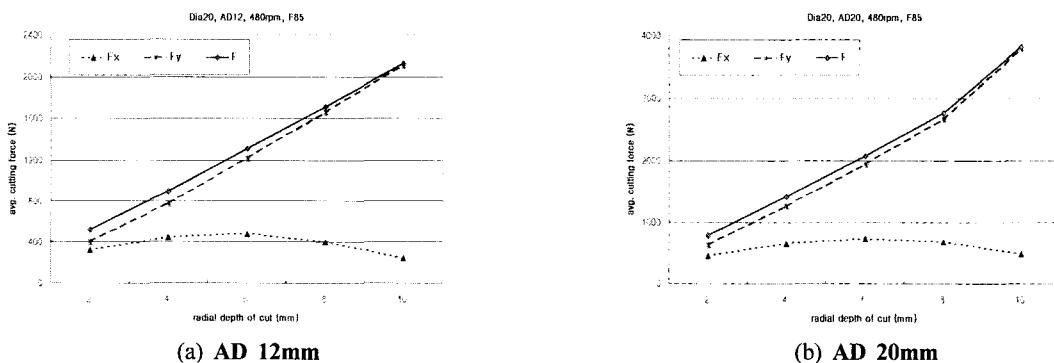
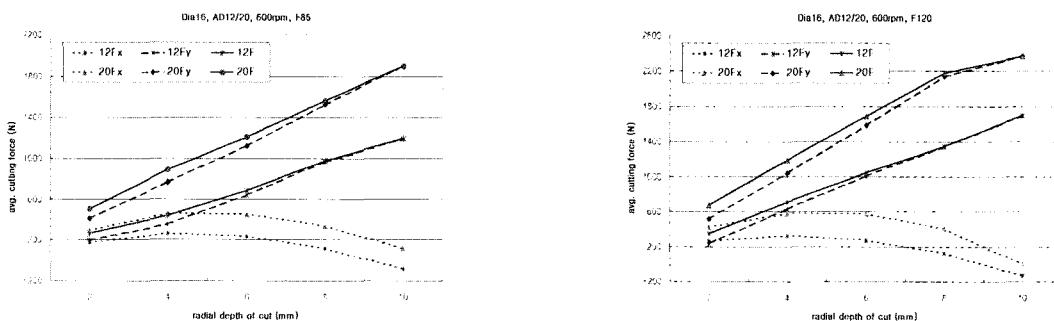


Fig. 6 Average cutting force vs. radial depth of cut(end mill dia. 20, 480rpm, feed 85)



깊이가 6mm와 10mm인 경우 다른 경향을 나타내었다. 그 설명은 4.3절에 기술한다.

4.3 평균절삭력의 실험값과 이론값의 비교
절삭실험을 통한 실험값과 이론식 (5)~(9)에 의한 이론값을 비교 분석한 전체적인 결과를 Figs. 11~14에 나타내

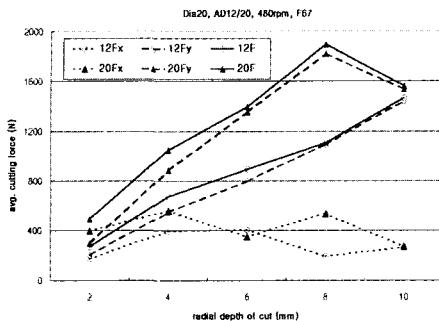


Fig. 9 Average cutting force(end mill dia. 20, 480rpm, feed 67mm/min)

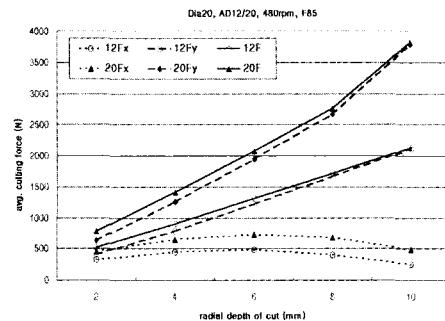


Fig. 10 Average cutting force(end mill dia. 20, 480rpm, feed 85mm/min)

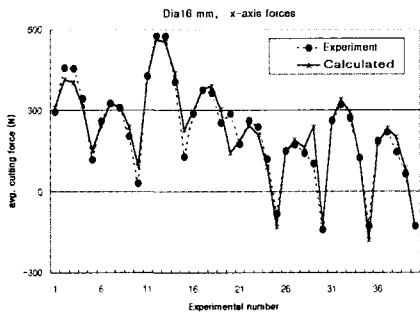


Fig. 11 Average cutting forces(end mill dia. 16, x-axis force)

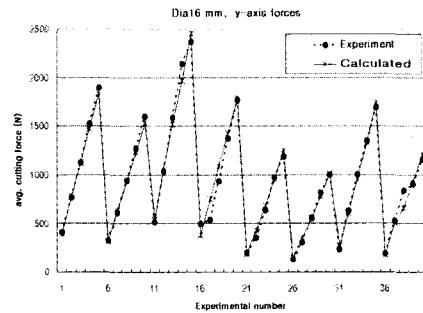


Fig. 12 Average cutting forces(end mill dia. 16, y-axis force)

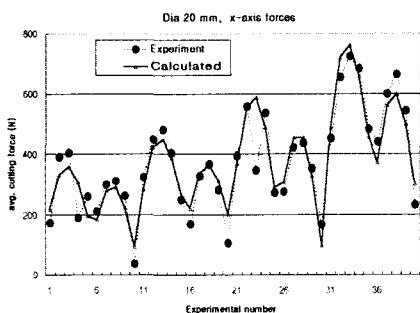


Fig. 13 Average cutting forces(end mill dia. 20, x-axis force)

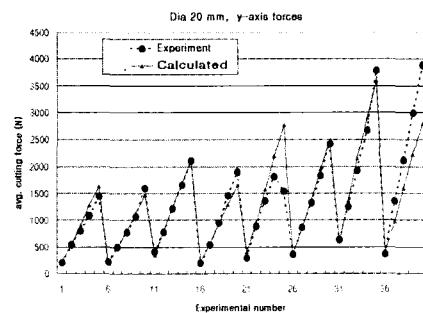


Fig. 14 Average cutting forces(dia. 20, y-axis force)

었고, 이 그림들은 광범위한 절삭조건을 모두 포함한다. Fig. 11과 12는 각각 공구지름 16mm인 경우의 F_x 와 F_y 를 나타내고, Fig. 13과 14는 각각 공구지름 20mm인 경우

의 F_x 와 F_y 를 나타낸다. Figs. 11~14를 자세히 고찰하면, 4.2절의 Fig. 9에서 다른 그림의 경우에서와 다른 경향을 나타낸 것이 실험에서의 오류임을 알 수 있다. 그 원인으

로는 첫째, 절삭조건이 공작기계의 진동특성과 우연히 일치하여 불안정한 절삭이 발생하였을 가능성, 둘째, 공작물의 불균일성에 의하여 절삭 부위가 우연히 약한 부위였을 가능성이, 셋째, 공구의 휨이 발생하여 절삭깊이의 변동이 발생하였을 가능성 등을 들 수 있는데, 우연적으로 발생한 실험 오차로 고려되었다.

6. 결 론

머시닝센터의 엔드밀 가공 중 발생하는 절삭력을 예측하기 위하여 절삭실험을 수행하였다. 그 결과를 정리함으로써 반경 방향 및 축방향 절삭깊이의 변화, 이송의 변화, 공구지름의 차이에 따른 절삭력의 변화 등을 고찰하였다. 또한 절삭실험으로부터 얻어진 평균절삭력을 최소자승법을 이용하여 작성한 전산프로그램에 대입하여 비절삭력계수를 구하였다. 최소자승법에 의해 시뮬레이션한 평균절삭력은 실험에 의하여 구한 평균절삭력과 대체로 일치하였고, 이로부터 절삭조건별 절삭력을 예측할 수 있었다. 또한 반경방향 절삭깊이가 증가함에 따라 이송방향 절삭분력은 증가하다 감소하는 포물선 형태를 나타내었고, 직각방향 분력은 단순 증가하였다. 축방향 절삭깊이가 증가하면 절삭력은 경우에 따라 증가율이 달라져서 일정하지 않은 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

- (1) Altintas, Y., and Ghan, P. K., 1992, "In-Process Detection and Suppression of Chatter in Milling," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.* Vol. 3, pp. 329~347.
- (2) Minis, I., Yanushevsky, R., and Tembo, A., 1990, "Analysis of Linear and Nonlinear Chatter in Milling," *Annals of the CIRP*. Vol. 39/1, pp. 459~462.
- (3) Tarnng, Y. S., Cheng, C. I., and Kao, J. Y., 1995, "Modeling of Three-Dimensional Numerically Controlled End Milling Operations," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 35. No. 7. pp. 939~950.
- (4) Smith, S., and Tlusty, J., 1993, "Efficient Simulation Programs for Chatter in Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1, pp. 463~466.
- (5) Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, J. R., "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," 1982, *Int. J. Mach. Des. Res.*, Vol. 22, No. 1, pp. 7~22.
- (6) Choi, J. G., Kang, Y. K., and Lee, J. J., 2003, "A Study on the Flexible Cutting Force Model in the Ball End Milling Process," *J. KSMTE*, Vol. 12, No. 2, pp. 44~52.
- (7) Hong, M. S., 2002, "A Study on the Instantaneous Shear Plane Based Cutting Force Model for End Milling," *J. of KSMTE*, Vol. 11, No. 4, pp. 34~43.