

엔드밀 가공시 절삭조건이 비절삭력계수에 미치는 영향

이신영*

(논문접수일 2004. 5. 3, 심사완료일 2004. 8. 25.)

Effects of Cutting Conditions on Specific Cutting Force Coefficients in End Milling

Sin-Young Lee*

Abstract

For improvement of productivity and cutting tool life, cutting force in end milling needs to be predicted accurately. 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. Specific cutting force coefficients of the cutting dynamics model were obtained by average cutting forces, tool diameter, cutting speed, feed, axial depth, and radial depth of cut. The effects of the cutting conditions on the specific cutting force constants in milling were studied. The model is verified through comparisons of model predicted cutting forces with measured cutting forces obtained from machining experiments.

Key Words : End Milling(엔드밀 가공), Cutting Force(절삭력), Prediction(예측), Chip Load(칩 부하), Depth of Cut(절삭깊이), Machining Experiment(가공 실험)

1. 서론

엔드밀 가공은 각종 기계부품이나 금형 부품의 절삭가공 등 많은 분야에 널리 응용되고 있다. 엔드밀 가공 시의 절삭력을 해석하기 위하여 많은 모델들이 개발되었다. Altintas 등⁽¹⁾과 Minis 등⁽²⁾은 직선 엔드밀 가공에 있어서 일정한 비절삭 압력과 절삭력비를 제시하였다.

Tarn⁽³⁾은 증분식 접선력에 대한 비절삭 압력과 접선방향 힘에 대한 반경방향 힘의 비율을 회전당 평균 칩 두께의 지수함수로써 표현하였고 Smith 등⁽⁴⁾은 일정한 절삭강성을

도입하였고 반경방향 힘을 접선방향 힘에 비례한다고 고려하였다. 이 모델의 비절삭상수는 절삭실험에서 얻어진 평균 절삭력으로부터 얻어진다. Kline 등⁽⁵⁾은 엔드밀 가공 시 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 엔드밀링에서 순간단면적을 이용한 절삭력 모델에 대하여 연구하였다. 본 논문에서는 엔드밀 가공 시 절삭력을 예측하기 위한 방안으로 머시닝센터의 절삭동역학에 대한 해석적 모델을 제시하기 위하여 절삭 조건

* 군산대학교 기계공학부 (sinylee@kunsan.ac.kr)
주소: 573-701 전북 군산시 미룡동 산68

의 각 인자가 비절삭력계수에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 절삭동역학 모델은 칩 부하와 절삭기하학 및 절삭력과 칩 부하 사이의 관계에서 해석된다. 이 모델을 가지고 엔드밀 공정의 절삭력을 예측하기 위하여 다양한 조건에 대하여 2날 초경엔드밀을 사용하여 건식 절삭실험을 수행하였다. 이 모델의 비절삭력계수는 절삭실험의 평균절삭력으로부터 얻어진다. 각각의 비절삭력계수에 대하여 분산분석을 통한 연구를 행함으로써 각 절삭 인자가 미치는 영향을 분석하였다. 또한 제시된 모델링을 검증하기 위하여 해석결과와 실험치를 비교하였다.

2. 엔드밀 가공의 절삭역학

밀링 절삭가공 중 절삭력 예측의 기본요소는 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 날 당 이송, β 는 절삭 중 공구날의 위치각을 나타낸다. 임의의 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. 일반적으로 절삭력은 칩 두께와 절삭폭에 비례한다. 따라서 접선방향 힘과 반경방향 힘은 칩 하중에 비례하므로 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} 는 해당 날의 접선방향 힘, ΔF_{rad} 는 날에 대한 반경방향 힘, D_z 는 축방향으로 절단한 미소 절

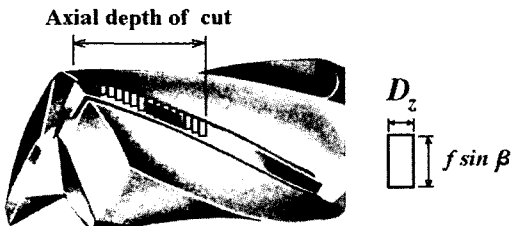


Fig. 1 End mill and its axial elements

삭폭, t_c 는 식 (1)의 칩 두께, K_T 와 K_R 은 상수이다. 비절삭력 계수 K_T 는 이송, 반경방향 절삭깊이, 축방향 절삭깊이 등의 각종 절삭조건에 따라 변한다. 반경이 Rad , 엔드밀의 날 수가 N_f 이고 나선각이 α_{ix} 인 공구에 의한 하향 절삭의 경우에 대하여 적용하면

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

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 (절삭깊이 방향), Y (이송방향)로 분해될 수 있고, 그 합이 절삭력이 된다⁽⁵⁾.

$$F_x(t) = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_k} \{ -\Delta F_{rad}(i, k, t) \sin[\beta(i, k, t)] + \Delta F_{\tan}(i, k, t) \cos[\beta(i, k, t)] \} \quad (5)$$

$$F_y(t) = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_k} \{ +\Delta F_{rad}(i, k, t) \cos[\beta(i, k, t)] + \Delta F_{\tan}(i, k, t) \sin[\beta(i, k, t)] \} \quad (6)$$

특정한 절삭조건에 대하여 평균절삭력을 구하면, 1회의 실험에서 1쌍의 K_R , K_T 를 식 (7)~(8)과 같이 구할 수 있다.

$$K_T = \frac{A_1 \overline{F_x} + A_2 \overline{F_y}}{A_1^2 + A_2^2} \quad (7)$$

$$K_R = \frac{A_1 \overline{F_y} - A_2 \overline{F_x}}{A_1 \overline{F_x} + A_2 \overline{F_y}} \quad (8)$$

여기에서

$$A_1 = \frac{1}{N_\theta} D_z f \sum_{j=1}^{N_\theta} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_k} \sin \beta \cos \beta$$

$$A_2 = \frac{1}{N_\theta} D_z f \sum_{j=1}^{N_\theta} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_k} \sin^2 \beta$$

이송과 반경방향 절삭깊이, 축방향 절삭깊이를 각각 변화시켜 가면서 비절삭력계수를 구하면 최소사승법에 의하여, 이송, 반경방향 절삭깊이 및 축방향 절삭깊이의 보간합수

형태로 표현할 수 있다.

$$K_T = a_0 + a_1Rd + a_2Ad + a_3f + a_4Rd \cdot Ad + a_5f \cdot Rd + a_6f \cdot Ad + a_7Rd^2 + a_8Ad^2 + a_9f^2 \quad (9)$$

$$K_R = b_0 + b_1RD + b_2AD + b_3f + b_4RD \cdot AD + b_5f \cdot RD + b_6f \cdot AD + b_7RD^2 + b_8AD^2 + b_9f^2 \quad (10)$$

3. 분산 분석

본 논문에서는 낱당 이송, 축방향 절삭깊이, 반경방향 절삭깊이의 세 인자를 변화시켜서 실험을 수행함으로써 절삭 인자의 효과를 분석하고자 하였다. 분산의 원천이 되는 인자를 A, B, C라고 하고 인자의 변화단계를 각각 a, b, c; 개별 조건에서의 반복횟수를 n 개라고 하면, 각각의 측정치는 선형 통계학적 모델을 사용하여 다음과 같이 모델링 된다⁽⁸⁾.

$$y_{ijkm} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \epsilon_{ijkm} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ m = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

여기에서 μ 는 전체평균을 나타내고, $\tau_i, \beta_j, \gamma_k$ 는 각각 인자 A, B, C의 처리수준 효과를, 그들의 곱은 해당인자들의 상호작용을 나타내는 상호작용효과를 나타낸다. 오차항 ϵ_{ijkm} 은 평균이 0이고 공동분산 σ^2 을 갖는 정규분포를 따르는 독립인 확률변수들이다. 전체 제곱합 SS_T 는 다음과 같이 구해진다.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{m=1}^n y_{ijkm}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (12)$$

여기에서 $y \dots = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{m=1}^n y_{ijkm}$

한 인자에 대한 제곱합은 식 (13), (14) 등과 같다.

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i \dots}^2}{bcn} - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (13)$$

여기에서 $y_{i \dots} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{m=1}^n y_{ijkm}$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j \dots}^2}{acn} - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (14)$$

여기에서 $y_{.j \dots} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \sum_{m=1}^n y_{ijkm}$

두 인자의 상호작용에 대응하는 제곱합은 각각 다음의 식 (15), (16) 등과 같이 주어진다.

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij \dots}^2}{cn} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B \quad (15)$$

여기에서 $y_{ij \dots} = \sum_{k=1}^c \sum_{m=1}^n y_{ijkm}$

$$SS_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{i \cdot k \dots}^2}{bn} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_C \quad (16)$$

여기에서 $y_{i \cdot k \dots} = \sum_{j=1}^b \sum_{m=1}^n y_{ijkm}$

본 논문에서는 세 인자의 상호작용을 무시하였고, 그 경우 오차 제곱합 및 오차의 자유도는 식 (17), (18)과 같다.

$$SS_E = SS_T - (SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC}) \quad (17)$$

$$DOF_E = abcn - 1 - ab - ac - bc - a - b - c \quad (18)$$

이상의 기호들을 사용하여 세 가지 인자에 대한 분산분석

Table 1 Analysis of variance table for 3 factor model

Source	DOF	MS	Fo
A	a-1	SS _A /(a-1)	MS _A /MS _E
B	b-1	SS _B /(b-1)	MS _B /MS _E
C	c-1	SS _C /(c-1)	MS _C /MS _E
AB	(a-1)(b-1)	SS _{AB} /(a-1)(b-1)	MS _{AB} /MS _E
AC	(a-1)(c-1)	SS _{AC} /(a-1)(c-1)	MS _{AC} /MS _E
BC	(b-1)(c-1)	SS _{BC} /(b-1)(c-1)	MS _{BC} /MS _E
Error	DOF _E	SS _E /DOF _E	
Total	abcn-1		

표를 작성하면 Table 1과 같다.

절삭실험의 결과 얻어진 통계치는 제곱합이 각각 독립이며 각각의 제곱합을 해당하는 자유도로 나눈 평균제곱은 그 항의 자유도를 n_s 라 할 때, 자유도 (n_s, DOF_E)인 F분포를 한다. 따라서 Table 1의 F_o 값과 F분포표의 $F_{DOF_E}^{ns}(\alpha)$ 를 비교하면 유의수준 ($1 - \alpha$)에서의 영향여부를 판정할 수 있다.

4. 절삭 실험

본 실험에 사용된 공작기계는 주어진 가공 조건을 정확하게 제어하기 위하여 머시닝센터를 사용하였고, 절삭력 측정에는 공구동력계를 사용하였다. Table 2는 실험 장비의 규격을 나타낸다.

본 절삭 실험에서 사용된 공구는 A실험: OSG CPM-EDS16, 직경 16mm, B실험: (주) 한국야금, 2날 초경엔드밀(ZSE 216), 직경 16mm와 C실험: 대한중석, 2날 초경 엔드밀(HHE 2200), 지름 20mm의 3종류이었다. 본 실험에 사용된 절삭 재료는 기계구조용 강재인 SM45C를 사용하였으며, 시편의 절삭부 폭은 45mm, 높이는 45mm, 시편의 길이는 140mm로 제작하였다. 시편의 제작은 실험 A, B, C

Table 2 Specifications of experimental apparatus

Machining center	A: Daewoo ACE-V35 B, C: Tongil TNV-40
Tool dynamometer	model: Kistler 9257B resolution: 0.01N sensitivity: 7.5pC/N
Charge amplifier	model: Kistler 5019A frequency range: 0~200kHz sensitivity: 9.99pC/M.U.

Table 3 Cutting conditions for tests

Experiment case	A	B	C
End mill dia(mm)	$\phi 16$	$\phi 16$	$\phi 20$
Radial DOC, R_d (mm)	2~6	2, 4, 6, 8, 10	
Axial DOC, A_d (mm)	10, 13, 16	12, 20	
Feed rate(mm/min)	80~120	85, 120	67, 85
spindle speed(RPM)	400, 600	600, 900	480, 600

의 경우 다른 업체에서 각각 가공 및 열처리되었다. 시편은 8개의 M10 볼트를 사용하여 공구동력계 위에 설치하였다. 머시닝센터에서 다양한 조건의 절삭실험에 의하여 비절삭력 계수를 실험적으로 결정하였으며, 실험에서 사용된 절삭 조건은 Table 3과 같다.

5. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 머시닝센터에서 엔드밀 가공의 절삭력을 연구하기 위하여 Table 3과 같은 절삭 조건에 따라 절삭실험을 하여 구한 평균절삭력으로부터 비절삭력계수를 Table 4~6과 같이 구하였다.

절삭인자의 변화에 따른 비절삭력계수의 변화 효과를 분석하기 위하여 공구지름에 따른 비절삭력계수 K_T 와 K_R 의 분산분석⁽⁸⁾을 행하였고, 그 결과는 Table 7~12와 같다. 표에서 SS는 제곱합, DOF는 자유도, MS는 제곱평균을 나타낸다. 이 표들로부터 밀링 가공 시의 비절삭력계수에 주로 영향을 미치는 개별 인자는 Table 내의 F분포의 데이터와 비교하여 구할 수 있다. Table 7~11에서 각각 영향인자를 인지할 수 있으며, Table 12는 다른 표들과 달리 오차의 평균이 크게 나타나 90% 수준에서 의미 있는 변수가 구해지지 않았다. 비절삭력계수 K_T 에 큰 영향을 미치는 인자는 {날당 이송}, {반경방향 절삭깊이}, {축방향 절삭깊이}, {날당 이송×축방향 절삭깊이}, {날당 이송×반경방향 절삭깊이}로 날당 이송의 영향이 가장 크게 나타났다. 비절삭력계수 K_R 에 영향을 미치는 인자는 {날당 이송}, {축방향 절삭깊이×반경방향 절삭깊이}, {축방향 절삭깊이}, {반경방향 절삭깊이}가 큰 영향을 미치고 다른 인자의 효과는 상대적으로 작게 나타났다.

5.1 절삭깊이가 비절삭력계수에 미치는 영향

반경방향 절삭깊이의 변화에 따른 비절삭력계수의 변동을 Fig. 2~9에 나타내었다. 이것으로부터 반경방향 절삭깊이가 증가함에 따라 비절삭력계수 K_T 는 대체적으로 포물선 모양으로 단순 감소하는 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 Case C의 경우를 표시하는데, 이 경우 전체적인 단순 감소 경향에서 벗어나는 경우가 많았다. 비절삭력계수 K_R 은 반경방향 절삭깊이가 상대적으로 작은 값을 취하는 Fig. 6과 7의 경우는 단순 감소하는 경향을 잘 나타내는 데 반하여, 반경방향 정삭 깊이가 상대적으로 광범위한 Fig. 8과 Fig. 9의 경우에는 일관된 경향을 나타내지 못하고, 몇 개의 실험결과는 Figs. 2~7의 경향과 어긋나는

Table 4 Specific cutting force coefficients(case A)

	rpm	feed	Ad	Rd				
				2	3	4	5	6
				$K_T \times 10^{10}$				
	400	80	10	.540	.481	.433	.405	.397
			13	.484	.438	.400	.379	.377
			16	.401	.404	.383	.368	.360
		120	10	.545	.409	.373	.364	.337
			13	.407	.375	.358	.337	.339
			16	.375	.333	.325	.316	.311
	600	80	10	.582	.495	.465	.448	.429
			13	.545	.453	.414	.395	.382
			16	.505	.442	.401	.393	.380
		120	10	.461	.425	.396	.389	.378
			13	.425	.395	.376	.365	.356
			16	.417	.372	.350	.342	.335
K_R								
	400	80	10	.439	.391	.359	.331	.333
			13	.424	.385	.363	.336	.316
			16	.441	.427	.393	.361	.344
		120	10	.342	.351	.327	.304	.269
			13	.405	.347	.318	.291	.274
			16	.436	.366	.327	.300	.278
	600	80	10	.460	.414	.391	.380	.374
			13	.475	.427	.398	.377	.364
			16	.505	.463	.448	.426	.404
		120	10	.431	.404	.383	.373	.357
			13	.456	.419	.396	.384	.368
			16	.453	.401	.392	.374	.356

Table 5 Specific cutting force coefficients(case B)

	rpm	feed	Ad	Rd					
				2	4	6	8	10	
				$K_T \times 10^{10}$					
	600	85	12	.369	.325	.330	.350	.342	
			20	.405	.383	.356	.351	.347	
		120	12	.360	.350	.343	.338	.344	
			20	.394	.357	.346	.341	.306	
		900	85	12	.439	.376	.399	.323	.417
				20	.513	.439	.425	.423	.430
	120		12	.404	.408	.401	.348	.346	
			20	.462	.308	.312	.327	.360	
	K_R								
			600	85	12	.374	.249	.375	.476
		20			.508	.359	.344	.356	.381
		120		12	.254	.439	.489	.515	.548
20				.425	.395	.385	.398	.390	
900		85		12	.256	.388	.505	.414	.634
				20	.441	.417	.422	.431	.432
		120	12	.327	.533	.606	.541	.594	
			20	.632	.282	.357	.403	.271	

Table 6 Specific cutting force coefficients(case C)

	rpm	feed	Ad	Rd					
				2	4	6	8	10	
				$K_T \times 10^{10}$					
	480	67	12	.453	.606	.546	.477	.546	
			20	.546	.556	.461	.518	.349	
		85	12	.696	.616	.608	.602	.608	
			20	.605	.570	.572	.586	.658	
		600	67	12	.668	.639	.616	.611	.688
				20	.569	.603	.598	.612	.642
	85		12	.440	.549	.586	.637	.661	
			20	.619	.719	.746	.779	.811	
	K_R								
			480	67	12	.463	.351	.360	.563
		20			.217	.421	.630	.422	.414
		85		12	.506	.470	.470	.479	.483
20				.584	.520	.492	.465	.471	
600		67		12	.399	.447	.460	.475	.605
				20	.532	.555	.543	.541	.544
		85	12	.474	.438	.474	.540	.562	
			20	.276	.606	.562	.555	.556	

Table 7 Analysis of variance for K_T (case A)

(a) 400rpm

Source	SS	DOF	MS	Fo	F(0.1)
Feed	1.31e-2	2	6.57e-3	17.3	2.67
Ad	8.98e-3	2	4.49e-3	11.8	2.67
Rd	6.78e-2	4	1.69e-2	44.7	2.33
Feed · Ad	1.13e-2	4	2.83e-3	7.48	2.33
Feed · Rd	1.23e-3	8	1.54e-4	0.41	2.09
Ad · Rd	5.66e-3	8	7.07e-4	1.86	2.09
Error	6.07e-3	16	3.79e-4		
Total	1.14e-1	44			

(b) 600rpm

Source	SS	DOF	MS	Fo	F(0.1)
Feed	3.07e-2	2	1.53e-2	18.4	2.67
Ad	2.20e-2	2	1.10e-2	13.2	2.67
Rd	6.48e-2	4	1.62e-2	19.4	2.33
Feed · Ad	1.27e-3	4	3.19e-4	3.83	2.33
Feed · Rd	5.10e-3	8	6.37e-4	7.65	2.09
Ad · Rd	4.34e-4	8	5.42e-5	0.65	2.09
Error	1.33e-3	16	8.33e-5		
Total	1.26e-1	44			

Table 8 Analysis of variance for K_R (case A)

(a) 400rpm

Source	SS	DOF	MS	Fo	F(0.1)
Feed	1.79e-2	2	8.93e-3	29.1	2.67
Ad	3.73e-3	2	1.86e-3	6.08	2.67
Rd	7.80e-2	4	1.95e-2	63.6	2.33
Feed · Ad	1.02e-3	4	2.56e-4	0.84	2.33
Feed · Rd	1.05e-3	8	1.32e-4	0.43	2.09
Ad · Rd	1.50e-3	8	1.87e-4	0.61	2.09
Error	4.90e-3	16	3.06e-4		
Total	1.08e-1	44			

(b) 600rpm

Source	SS	DOF	MS	Fo	F(0.1)
Feed	6.68e-3	2	3.34e-3	51.2	2.67
Ad	3.96e-3	2	1.98e-3	30.4	2.67
Rd	4.86e-2	4	1.22e-2	18.6	2.33
Feed · Ad	4.96e-3	4	1.24e-3	19.0	2.33
Feed · Rd	2.90e-4	8	3.62e-5	0.55	2.09
Ad · Rd	7.42e-4	8	9.27e-5	1.42	2.09
Error	1.04e-3	16	6.52e-5		
Total	6.63e-2	44			

Table 9 Analysis of variance for K_T (case B)

Source	SS	DOF	MS	Fo	F(0.1)
Feed	4.21e-2	3	1.40e-2	17.1	2.61
Ad	7.22e-4	1	7.22e-4	0.88	3.18
Rd	1.89e-2	4	4.72e-3	5.76	2.48
Feed · Ad	4.97e-3	3	1.66e-3	2.02	2.61
Feed · Rd	4.76e-3	12	3.97e-4	0.48	2.15
Ad · Rd	4.68e-3	4	1.17e-3	1.43	2.48
Error	9.83e-3	12	8.19e-4		
Total	8.59e-2	39			

Table 10 Analysis of variance for K_R (case B)

Source	SS	DOF	MS	Fo	F(0.1)
Feed	1.89e-2	3	6.29e-3	1.59	2.61
Ad	2.93e-2	1	2.93e-2	7.39	3.18
Rd	4.25e-2	4	1.06e-2	2.68	2.48
Feed · Ad	2.16e-2	3	7.12e-3	1.82	2.61
Feed · Rd	5.80e-2	12	4.83e-3	1.22	2.15
Ad · Rd	1.90e-1	4	4.76e-2	12.0	2.48
Error	4.76e-2	12	3.96e-3		
Total	4.08e-1	39			

Table 11 Analysis of variance for K_T (case C)

Source	SS	DOF	MS	Fo	F(0.1)
Feed	1.26e-1	3	4.21e-2	16.2	2.61
Ad	1.77e-3	1	1.77e-3	0.68	3.18
Rd	9.49e-3	4	2.37e-3	0.92	2.48
Feed · Ad	7.21e-2	3	2.40e-2	9.26	2.61
Feed · Rd	7.05e-2	12	5.88e-3	2.27	2.15
Ad · Rd	3.10e-3	4	7.76e-4	0.30	2.48
Error	3.11e-3	12	2.59e-3		
Total	3.14e-1	39			

Table 12 Analysis of variance for K_R (case C)

Source	SS	DOF	MS	Fo	F(0.1)
Feed	4.68e-2	3	1.56e-2	2.29	2.61
Ad	5.70e-3	1	5.70e-3	0.84	3.18
Rd	3.17e-2	4	7.93e-3	1.16	2.48
Feed · Ad	7.31e-3	3	2.44e-3	0.36	2.61
Feed · Rd	6.87e-2	12	5.72e-3	0.84	2.15
Ad · Rd	4.88e-2	4	1.22e-2	1.79	2.48
Error	8.18e-2	12	6.82e-3		
Total	2.91e-1	39			

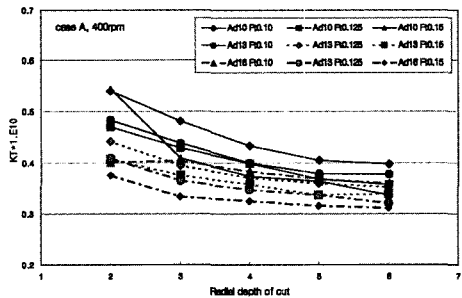


Fig. 2 Specific cutting force coeff. K_T (case A, 400rpm)

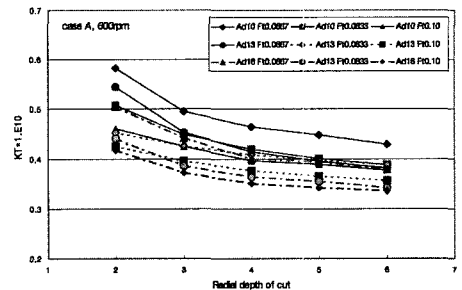


Fig. 3 Specific cutting force coeff. K_T (case A, 600rpm)

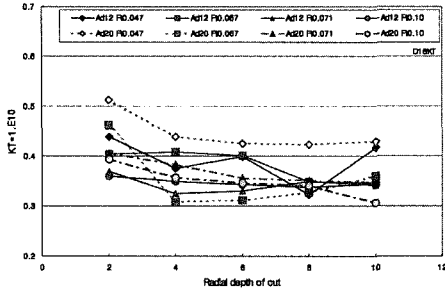


Fig. 4 Specific cutting force coeff. K_T (case B)

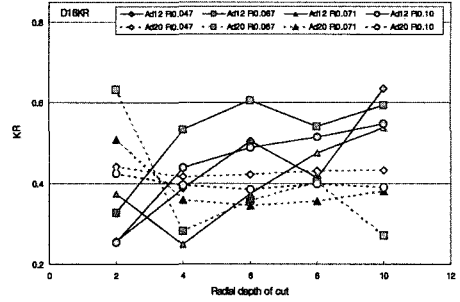


Fig. 8 Specific cutting force coeff. K_R (case B)

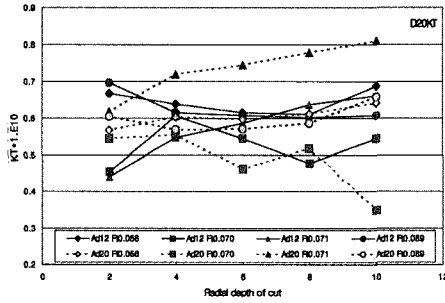


Fig. 5 Specific cutting force coeff. K_T (case C)

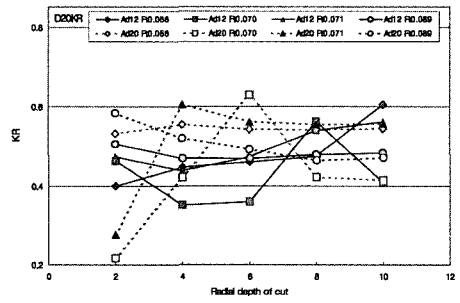


Fig. 9 Specific cutting force coeff. K_R (case C)

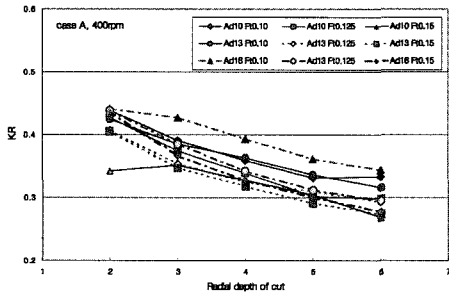


Fig. 6 Specific cutting force coeff. K_R (case A, 400rpm)

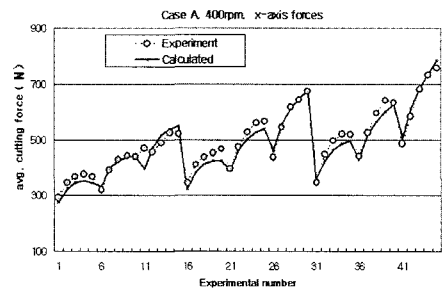


Fig. 10 Average cutting forces(case A, x-axis force)

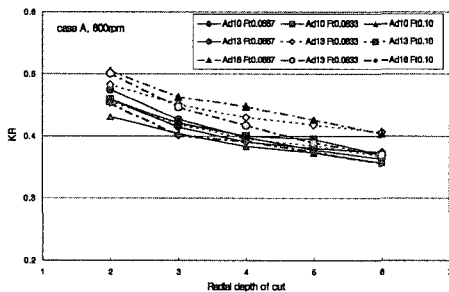


Fig. 7 Specific cutting force coeff. K_R (case A, 600rpm)

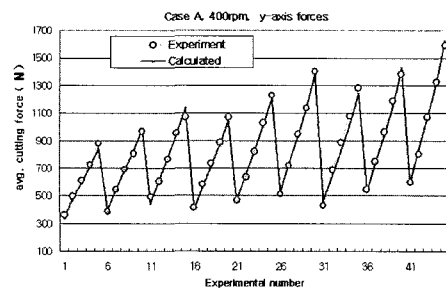


Fig. 11 Average cutting forces(case A, y-axis force)

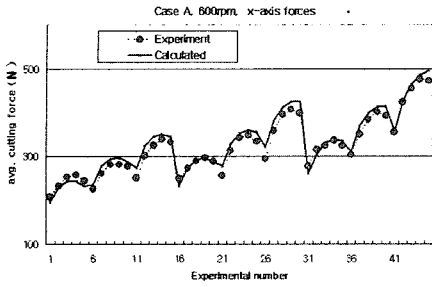


Fig. 12 Average cutting forces(case A, x-axis force)

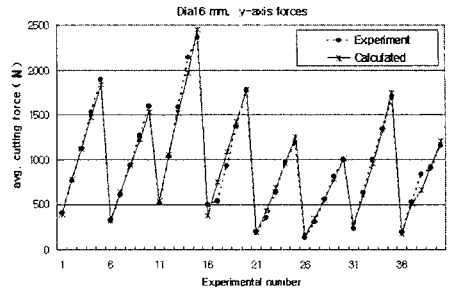


Fig. 15 Average cutting forces(case B, y-axis force)

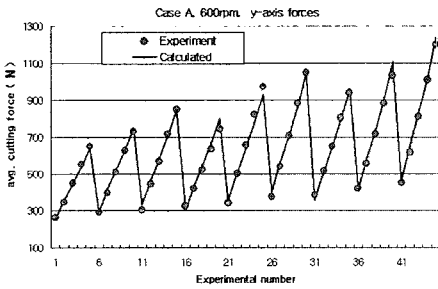


Fig. 13 Average cutting forces(case A, y-axis force)

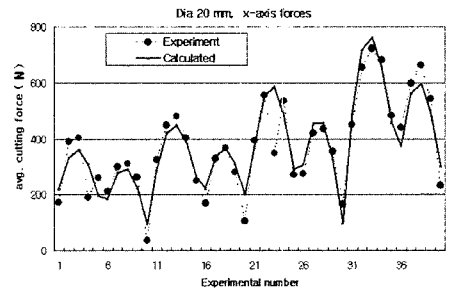


Fig. 16 Average cutting forces(case C, x-axis force)

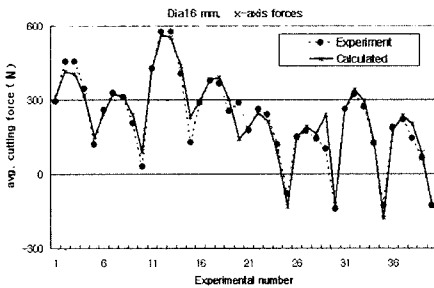


Fig. 14 Average cutting forces(case B, x-axis force)

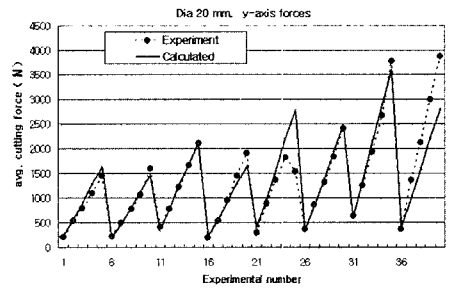


Fig. 17 Average cutting forces(case C, y-axis force)

분포를 나타내었다. 단, 그 경우에도 비절삭력계수 값의 분포는 최소 0.26 또는 0.22, 최대 0.63으로 큰 편차를 나타내지 않았다.

5.2 평균절삭력의 실험치와 곡선적합치의 비교

절삭실험에 의한 실험치와 계산식 (7)~(8)에 의한 곡선적합치를 비교 분석한 전체적인 결과를 Fig. 10~17에 나타내었다. Fig. 10과 11은 각각 공구직경 16mm인 경우 A의 400rpm일 때, F_x 와 F_y 를 나타내고, Fig. 12와 13은 경

우 A의 600rpm일 때, Fig. 14와 15는 각각 공구직경 16mm인 경우 B의 F_x 와 F_y 를 나타내고, Fig. 16과 17은 각각 공구직경 20인 경우 C의 F_x 와 F_y 를 나타낸다. 이 그림들에서 원의 중심이 직선에서 이격된 거리가 실험치와 곡선적합치의 차이를 나타낸다.

Fig. 10~17을 자세히 고찰하면, Fig. 5와 9에서 다른 그림의 경우에서와 상이한 경향을 나타낸 것이 실험에서의 오류로 인한 것임을 알 수 있다. 또한, Figs. 10~17을 종합적으로 고찰하면, x축 방향 힘의 오차 평균은 6.7%, y축 방향

힘의 오차 평균은 5.6%로 비교적 잘 일치하였다.

6. 결론

머시닝센터의 엔드밀 가공 중 발생하는 절삭력을 예측하기 위하여 절삭실험을 수행하고, 그 결과를 정리함으로써 반경 방향 및 축방향 절삭깊이의 변화, 이송의 변화, 공구직경의 차이에 따른 절삭력의 변화 등을 고찰하였다. 또한 절삭실험으로부터 얻어진 평균절삭력을 최소자승법을 이용하여 비절삭력계수를 구하였다. 절삭조건의 변화에 따른 비절삭력계수의 분산분석을 통하여 영향도를 분석하였고, 절삭조건의 변화에 따른 비절삭력계수의 변화를 도시하였다. 최소자승법에 의해 시뮬레이션한 평균절삭력은 실험에 의하여 구한 평균절삭력과 비교하여 오차 x축 평균 6.7%, y축 평균 5.6%로 비교적 잘 일치하였고, 이로부터 절삭조건별 절삭력을 예측할 수 있다.

참고 문헌

- (1) Altintas, Y., and Ghan, P. K., 1992, "In-Process Detection and Suppression of Chatter in Milling," *Int. J. MTRD.*, Vol. 32, No. 3, pp. 329~347.
- (2) Minis, I., Yanushevsky, R., and Tembo, A., 1990,

"Analysis of Linear and Nonlinear Chatter in Milling," *CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 459~462.

- (3) Tarng, Y. S., Cheng, C. I., and Kao, J. Y., 1995, "Modeling of Three-Dimensional Numerically Controlled End Milling Operations," *Int. J. MTRD.*, Vol. 35, No. 7, pp. 939~950.
- (4) Smith, S., and Tlustý, J., 1993, "Efficient Simulation Programs for Chatter in Milling," *CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 463~466.
- (5) Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. MTRD.*, Vol. 22, No. 11, 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. of 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.
- (8) Montgomery, D. C., 1976, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons.