

밀링가공시 절삭조건이 비절삭력계수에 미치는 영향 분석

이 신 영*

Effects of Cutting Conditions on Specific Cutting Force Coefficients in Milling

Sin-Young Lee*

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. 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 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 절삭가공에서 절삭 공구의 개량과 제어기술의 진보에 따라 가공 범위가 종래에 비하여 커지게 되어 많은 산업에 널리 응용되고 있다. 엔드밀 가공 시 다양한 절삭 조건들이 절

삭력에 미치는 영향을 예측하기 위하여 많은 모델들이 개발되었다. Altintas 등⁽¹⁾과 Minis 등⁽²⁾은 직선 엔드밀 가공에 있어서 일정한 비절삭 압력과 절삭력비를 제시하였다. Tarng⁽³⁾은 증분식 접선력에 대한 비절삭 압력과 접선 방향 힘에 대한 반경방향 힘의 비율을 회전당 평균 칩 두께의 지수함수로써 표현하였고 Smith 등⁽⁴⁾은 일정한 절삭

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

강성을 도입하였고 반경방향 힘을 접선방향 힘에 비례한다고 고려하였다. 이 모델의 비절삭상수는 절삭실험에서 얻어진 평균 절삭력으로부터 얻어진다. 본 논문에서는 엔드밀 가공시 절삭력을 예측하기 위한 방안으로 머시닝 센터의 절삭동역학에 대한 해석적 모델을 제시하기 위한 사전 단계로써 절삭 조건의 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 초경엔드밀 직경 16mm와 20mm의 2 종류를 사용하여 각각 32회의 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 공구 날 1개에 발생하는 절삭력은 0부터 최대까지 변동하며 동시 절삭날 수가 1 이상으로 되면 서로 중복되어 합력은 커진다. 따라서 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. 실제 절삭을 하는 동안 각 날의 위치가 다르게 되므로 절삭날의 위치마다 각기 다른 두께의 칩이 절삭되어 절삭력이 다르게 분포한다. 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. 접선방향 분력은 밀링 커터의 접선방향으로 작용하는 절삭력으로 반경방향 분력에 비하여 현저하게 크다. 일반적으로 절삭력은 칩 두께와 절삭폭에 비례한다. 따라서 접선방향 힘과 반경방향 힘은 칩 하중에 비례하므로 각 힘들을 구할 수 있다⁽⁶⁾.

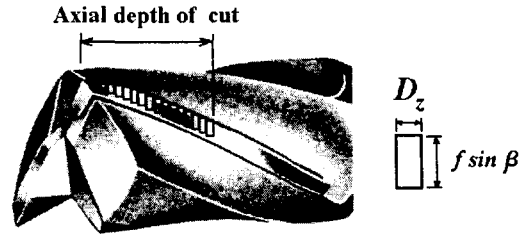


Fig. 1 End mill and its axial elements

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

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

위 식에서 ΔF_{\tan} 는 해당 날의 접선방향 힘, ΔF_{rad} 는 날에 대한 반경방향 힘, D_z 는 축방향으로 절단한 미소 절삭폭, 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. 반지름이 Rad , 엔드밀의 날 수가 N_f 이고 나선각이 α_{hx} 인 공구에 의한 하향절삭의 경우에 대하여 적용하면

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

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 절삭력 기여하게 된다. 접선방향과 반경방향은 전체좌표계 X, Y 로 분해될 수 있고, 그 합이 절삭력이 된다⁽⁵⁾.

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

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

특정한 절삭조건(주어진 공구에 대한 반경방향 및 축

방향 절삭깊이, 이송)에 대하여 평균절삭력을 구하면, 평균절삭력은 K_R , K_T 의 함수이므로 1회의 실험에서 1쌍의 K_R , K_T 를 구할 수 있다.

3. 절삭 실험

본 실험에 사용된 공작기계는 주어진 가공 조건을 정확하게 제어하기 위하여 머시닝센터를 사용하였고, 절삭력 측정에는 공구동력계를 사용하였다. Table 1은 실험 장비의 규격을 나타낸다.

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 sensitivity : 9.99 pC/M.U.

본 절삭 실험에서 사용된 공구는 (주) 한국야금 지름 16, 2날 초경엔드밀(ZSE 216)과 대한중석, 지름 20, 2날 초경 엔드밀(HHE 2200) 2 종류이었다. 본 실험에서 사용한 엔드밀의 규격은 Table 2와 같다. 본 실험에 사용된 절삭 재료는 기계구조용 강재인 SM45C를 사용하였으며, 시편의 절삭부 폭은 45 mm, 높이는 45 mm, 시편의 길이는 140 mm로 제작하였다.

Table 2 Specifications of end mill

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

시편은 8개의 M10 볼트를 사용하여 공구동력계 위에 설치하였다. 머시닝센터에서 다양한 조건의 절삭실험에 의하여 비절삭력 계수를 실험적으로 결정하였으며, 실험에서 사용된 절삭조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Cutting conditions for tests

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

4. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 머시닝센터에서 엔드밀 공정의 절삭력을 연구하기 위하여 Table 3과 같은 절삭 조건에 따라 절삭실험을 하여 구한 평균절삭력으로부터 비절삭력계수를 Table 4, 5와 같이 구하였다.

절삭인자의 변화에 따른 비절삭력계수의 변화 효과를 분석하기 위하여 공구지름에 따른 비절삭력계수 K_T 와 K_R 의 분산분석^(6,7)을 행하였고, 그 결과는 Table 6~9와 같다. Table 6~9에서 SS는 제곱합(sums of

Table 4 Specific cutting force coefficients(Tool dia. 16)

	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	.539
			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 5 Specific cutting force coefficients(Tool dia. 20)

	rpm	feed	Ad	Rd										
				2	4	6	8	10						
				K_T $\times 10^{10}$						480	67	12	.453	.606
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	
	480	67	12							.463	.351	.360	.563	.408
			20							.217	.421	.630	.422	.414
85		12	.506							.470	.470	.479	.483	
		20	.584							.520	.492	.465	.471	
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 6 Analysis of variance for K_T (Tool dia. 16mm)

Source	SS	DOF	MS	F ratio
Ft(Feed/tooth)	4.21e-2	3	1.40e-2	17.13
Ad	7.22e-4	1	7.22e-4	0.88
Rd	1.89e-2	4	4.72e-3	5.76
Feed · Ad	4.97e-3	3	1.66e-3	2.02
Feed · Rd	4.76e-3	12	3.97e-4	0.48
Ad · Rd	4.68e-3	4	1.17e-3	1.43
Error	9.83e-3	12	8.19e-4	
Total	8.59e-2	39		

squares), DOF는 자유도(degree of freedom), MS는 제곱평균(means of squares)을 나타낸다. 이 Table들로부터 밀링 가공 시의 비절삭력계수에 주로 영향을 미치는 개별인자는 다음과 같은 F분포의 데이터와 비교하면,

$$F_{12}^1(0.05) = 4.75, F_{12}^1(0.10) = 3.18,$$

$$F_{12}^3(0.05) = 3.49, F_{12}^3(0.10) = 2.61,$$

$$F_{12}^4(0.05) = 3.26, F_{12}^4(0.10) = 2.48.$$

비절삭력계수 K_T 에 큰 영향을 미치는 인자는 {날당 이송}, {반경방향 절삭깊이}, {축방향 절삭깊이},

Table 7 Analysis of variance for K_R (Tool dia. 16mm)

Source	SS	DOF	MS	F ratio
Ft(feed/tooth)	1.89e-2	3	6.29e-3	1.59
Ad	2.93e-2	1	2.93e-2	7.39
Rd	4.25e-2	4	1.06e-2	2.68
Feed · Ad	2.16e-2	3	7.12e-3	1.82
Feed · Rd	5.80e-2	12	4.83e-3	1.22
Ad · Rd	1.90e-1	4	4.76e-2	12.00
Error	4.76e-2	12	3.96e-3	
Total	4.08e-1	39		

Table 8 Analysis of variance for K_T (Tool dia. 20mm)

Source	SS	DOF	MS	F ratio
Ft fed/tooth)	1.26e-1	3	4.21e-2	16.23
Ad	1.77e-3	1	1.77e-3	0.68
Rd	9.49e-3	4	2.37e-3	0.92
Feed · Ad	7.21e-2	3	2.40e-2	9.26
Feed · Rd	7.05e-2	12	5.88e-3	2.27
Ad · Rd	3.10e-3	4	7.76e-4	0.30
Error	3.11e-3	12	2.59e-3	
Total	3.14e-1	39		

Table 9 Analysis of variance for K_R (Tool dia. 20mm)

Source	SS	DOF	MS	F ratio
Ft feed/tooth)	4.68e-2	3	1.56e-2	2.29
Ad	5.70e-3	1	5.70e-3	0.84
Rd	3.17e-2	4	7.93e-3	1.16
Feed · Ad	7.31e-3	3	2.44e-3	0.36
Feed · Rd	6.87e-2	12	5.72e-3	0.84
Ad · Rd	4.88e-2	4	1.22e-2	1.79
Error	8.18e-2	12	6.82e-3	
Total	2.91e-1	39		

{날당 이송×축방향 절삭깊이}, {날당 이송×반경방향 절삭깊이}로 날당 이송의 영향이 가장 크게 나타났다. 비절삭력계수 K_R 에 영향을 미치는 인자는 {축방향 절삭깊이×반경방향 절삭깊이}, {축방향 절삭깊이}, {반경방향 절삭깊이}가 큰 영향을 미치고 다른 인자의 효과는 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

4.1 절삭깊이가 절삭력에 미치는 영향

반경방향 절삭깊이의 변화에 따른 절삭력의 변동을 Fig. 2~5에 나타내었다. 이것으로부터 반경방향 절삭

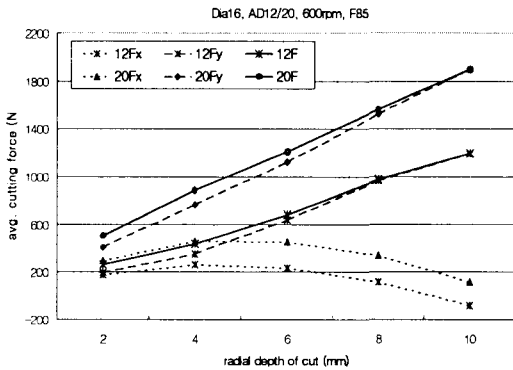


Fig. 2 Average cutting force(dia. 16, 600rpm, F85)

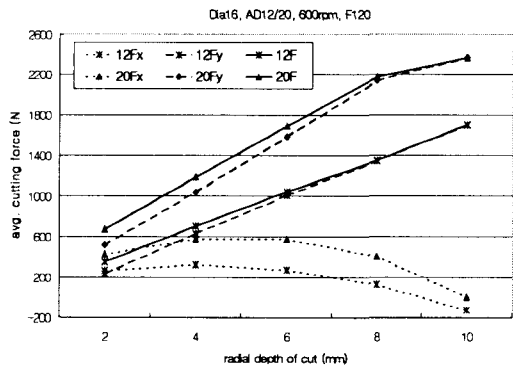


Fig. 3 Average cutting force(dia.16, 600rpm, F120)

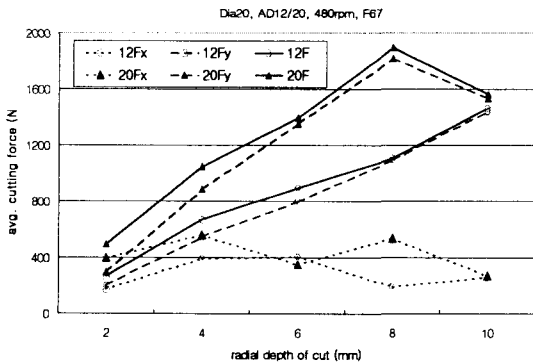


Fig. 4 Average cutting forces(dia. 20, 480rpm, F67)

깊이가 증가할수록 X방향 평균절삭력 Fx는 포물선 모양으로 증가하다가 감소됨을 알 수 있다. Y방향 평균 절삭력 Fy와 절삭합력 F는 반경방향 절삭깊이가 증가하면 평균절삭력이 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 축방향 절삭깊이가 증가하면 Fx, Fy의 평균 절삭력과 그 합력 F도 증가함을 볼 수 있다.

4.2 평균절삭력의 실험값과 곡선접합 값의 비교

절삭실험을 통한 실험값과 이론식에 의한 곡선접합한 값을 비교 분석한 전체적인 결과를 Fig. 6~9에 나타내었다. Fig. 6과 7은 각각 공구지름 16mm인 경우의 Fx와 Fy를 나타내고, Fig. 8과 9는 각각 공구지름 20mm인 경우의 Fx와 Fy를 나타낸다. Fig. 6~9를 자세히 고찰하면, Fig. 4에서 다른 그림의 경우에서와 다른 경향을 나타낸 것이 실험에서의 오류임을 알 수 있다.

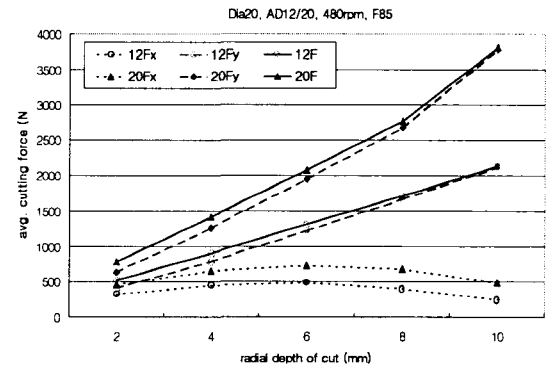


Fig. 5 Average cutting forces(dia. 20, 480rpm, F85)

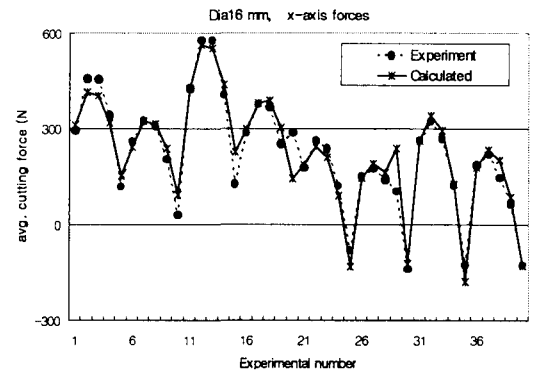


Fig. 6 Average cutting forces(dia. 16, x-axis force)

5. 결론

머시닝센터의 엔드밀 가공 중 발생하는 절삭력을 예측하기 위하여 절삭실험을 수행하고, 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 있다.

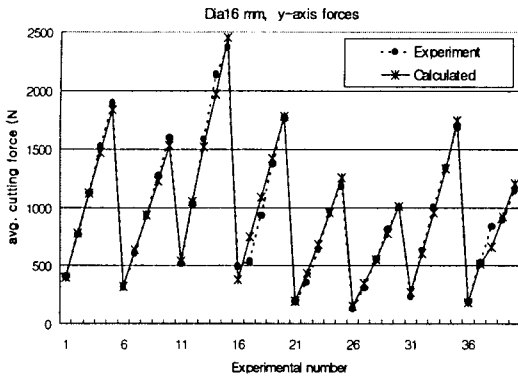


Fig. 7 Average cutting forces (dia. 16, y-axis force)

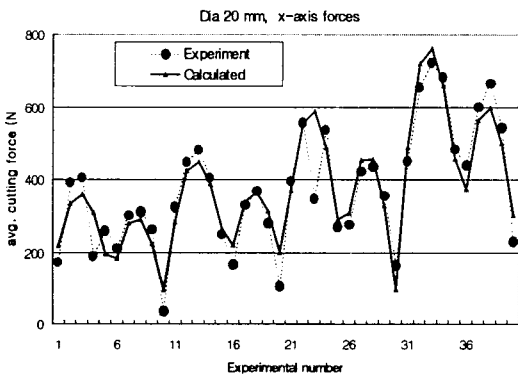


Fig. 8 Average cutting forces (dia. 20, x-axis force)

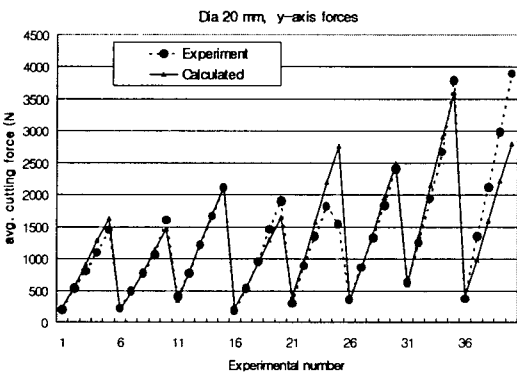


Fig. 9 Average cutting forces (dia. 20, y-axis force)

참고 문헌

- (1) Altintas, Y., and Ghan, P. K., 1992, "In-Process Detection and Suppression of Chatter in Milling," *Int. J. MTDR.*, 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) Tarn, Y. S., Cheng, C. I., and Kao, J. Y., 1995, "Modeling of Three-Dimensional Numerically Controlled End Milling Operations," *Int. J. MTDR.*, 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. MTDR.*, Vol. 22, No. 11, pp. 7~22.
- (6) Montgomery, D. C., 1976, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons.
- (7) Lee, S. Y., and Kim, H. N., 2001, "Effects of Cutting Conditions on Surface Roughness in Turning," *J. of KSPE*, Vol. 18, No. 8, pp. 139~149.