

공구재종에 따른 엔드밀 가공의 절삭력에 관한 통계적해석

최만성[†]

[†]한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Statistical Analysis of Cutting Force for End Milling with Different Cutting Tool Materials

Man Sung Choi[†]

[†]School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

End milling is an important and common machining operation because of its versatility and capability to produce various profiles and curved surfaces. This paper presents an experimental study of the cutting force variations in the end milling of SM25C with HSS(high speed steel) and carbide tool. This paper involves a study of the Taguchi design application to optimize cutting force in a end milling operation. The Taguchi design is an efficient and effective experimental method in which a response variable can be optimized, given various control and noise factors, using fewer resources than a factorial design. This study included feed rate, spindle speed and depth of cut as control factors, and the noise factors were different cutting tool in the same specification. An orthogonal array of $L_9(3^3)$ of ANOVA analyses were carried out to identify the significant factors affecting cutting force, and the optimal cutting combination was determined by seeking the best cutting force and signal-to-noise ratio. Finally, confirmation tests verified that the Taguchi design was successful in optimizing end milling parameters for cutting force.

Key Words : End milling, Process parameter, Taguchi method, Optimization

1. 서 론

엔드밀 가공은 자동차 부품, 금형산업, 항공 산업의 부품가공에 널리 이용되는 가공법으로 허용공차 이내의 정밀가공을 필요로 하고, 생산성 향상을 위한 가공시간을 단축할 필요가 있다. 엔드밀 가공은 슬로팅, 포케팅, 표면가공 등에 널리 사용되는 기계가공법으로 엔드밀 공구재료는 일반적으로 고속도강(high speed steel) 공구나 초경합금공구(cemented carbide tool)를 많이 사용하고 있으며, 공구의 내마모성을 증대시키고 공구수명을 고려한 코팅공구도 사용된다. 고속도강 공구는 한정된 고온경도를 가지고 있어 550℃ 이하의 온도에서만 절삭용으로 사용할 수

있다. 또한 초경합금공구는 1200℃의 높은 온도에서 고온경도를 유지할 수 있어서 높은 절삭 속도에서 가공이 가능하다. 엔드밀 가공에서 절삭 성에 영향을 미치는 인자로는 절삭속도, 이송, 절삭깊이, 절삭방향, 공구의 재종 등을 생각할 수 있다. 산업현장에서는 이러한 절삭조건을 경험 적으로 많이 다루고 있으나, 다양한 공작기계, 피삭재, 공구의 종류, 윤활유, 작업자의 숙련도 등의 인자를 고려하지 못하는 실정이다. 다구찌법(Taguchi method)은 기계, 화학, 전기, 전자 등 산업전반에 걸쳐 생산공정의 공정조건을 최적화 하고, 품질손실비용을 줄일 수 있는 설계기법이다[1-6]. 절삭력은 공구수명에 강한 상관관계를 가지므로 이에 대한 연구는 공정을 모니터링 하는데 매우 중요한 역할을 한다[7-8]. 따라서 본 연구에서는 절삭력을 최적화하기 위해 엔드밀가공에서 파라미터를 설계하고 생산성을 향상시키기 위해, 직교배열에 의한 실험계

[†]E-mail: mschoi@koreatech.ac.kr

회과 SN비를 도출하고 분산분석(ANOVA)을 하였다. 이를 통하여 공구재질의 특성에 따른 절삭조건이 절삭력에 미치는 영향을 검토하고 공정변수의 최적조건을 구하였다.

2. 실험계획법

2.1 Taguchi 법의 개요

Taguchi법은 최적생산조건을 찾는 기법으로 핵심은 파라미터 설계이다. 파라미터 설계는 원류단계인 제품기획이나 설계단계에 이루어져야 효과가 있다. Taguchi법이 추구하는 목적은 크게 특성치의 분산을 적게 하고 평균이 목표치에 근접하도록 하는 제어인자의 최적조건을 찾는 것이다. 파라미터 설계로 제어인자의 최적조건을 찾은 후에는 허용차 설계를 한다. Taguchi법은 목적을 추구하는 방법과 수단을 평가해주는 합리적인 방법을 제시해 주고 있다. 외측직교표에 배치한 인자는 목적을 합리적으로 설명하기 위한 것이고, 내측직교표에 배치한 인자는 수단을 평가하기 위한 것이다. 실험인자 배치는 직교배열표를 이용하여 배치한다. 실험의 반복수는 잡음인자를 고려하여 배치한다. 내부배열에는 제어인자로 2수준계, 3수준계 등의 직교배열표 실험배치를 하고, 외부배열은 동적 특성치 문제에서는 신호인자의 수준, 잡음인자의 수준 및 반복실험을 고려하고, 정적 특성치 문제에서는 잡음인자의 수준 및 반복실험을 고려하여 배치한다.

2.2 SN 비

Taguchi기법의 목적은 잡음에 강한 설계를 하는 것이다. 생산현장은 재료의 다양함, 작업자의 부주의, 통제 불가능한 외부환경 등이 있다. 따라서 Taguchi기법은 잡음의 영향을 최소화하고 제어가능한 영향력이 강한 인자를 찾아내어 잡음의 영향력을 최소화하는 강건설계(robust design)가 핵심이다. 이러한 강건설계에 필요한 기법이 SN (signal-to-noise)비이다. 망소특성은 음수 값을 갖지 않고 작을 수록 좋은 특성으로인 SN는 다음과 같다. 망소특성은 음수 값을 갖지 않고 작을 수록 좋은 특성으로인 SN는 다음과 같다.

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

망대특성(higher the better characteristics)은 음수 값을 갖지 않고 클수록 좋은 특성으로 SN비는 다음 식으로 주어진다.

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (2)$$

여기서 y_i 는 실험에서 얻어진 데이터이고 n 은 실험의 횟수를 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 실험조건

실험에 사용된 밀링기계와 측정장비의 사양은 Table 1과 같다. 엔드밀 가공에 사용된 공작기계는 (주)화천(HWACHEON)의 HMV-F이다. Fig. 1은 밀링기계에 장착된 공구동력계를 통하여 절삭력을 구하는 실험장치를 나타낸 것이다.

Table 1. Specification of used device

Name	Model	Co. Ltd
Milling M/C	HMV-F	HWACHEON
Dynamic strain amp.	N9354	SHOWA
Tool dynamometer	FKM2000	TOKYO testing M/C
Data acquisition sys.	T3831-G	Data translation
Surface roughness measurement device	SURF 5000	MAHR
Used cutting tools	End mills (helix 30°)	YG-1

기계적 특징으로서는 좌우와 전후의 이송속도가 15~720mm/min, 스핀들 회전수가 95~1400rpm으로 스핀들의 변환범위가 넓어 공구에 적합한 절삭 속도를 제공하고, 치구 등의 밀링, 드릴링, 보링 작업에 용이하며, 난삭재 가공에 적합한 강력 절삭용 밀링기계이다.

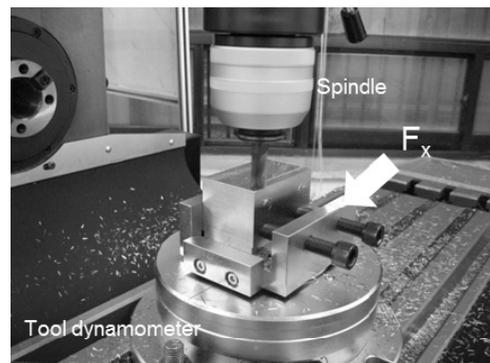


Fig. 1. Machining setup of the end milling process.

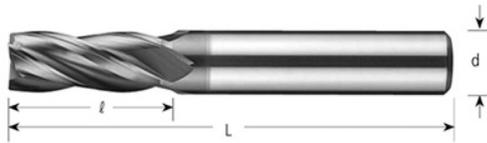


Fig. 2. Specification of cutting tool.

Fig 2의 절삭공구는 와이저원의 고속도강과 초경 합금 재질의 공구이다. 고속도강은 범용 강력절삭 용으로 적합하며, 광범위한 피삭재의 홈가공, 측 면절삭, 구멍 뚫기에 뛰어난 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 이 공구는 엔드밀4날이고, 코발트 함유량이 8%이며 TiAN코팅되어 있다. 고속도강과 초경합금의 규격은 1.0mm, 생크(d) 6mm, 날장(l) 10 mm, 전장(L) 55mm, 나선각(helix angle)은 30°이다. 또한 실험에 사용된 피삭재는 범용강인 SM25C이고 그 기계적 성질과 화학적 성분은 표 2 및 표 3과 같다. 시편 제작은 금속 절단기를 이용하여 SM 25C강을 W*L*H (50*50*70 mm)로 9개의 시편을 표면다듬질하고, 직교배열 표에 따라 실험을 하였다. 그리고 시편의 다른 면을 반복 실험하는데 1개의 시편 당 4면을 절삭하여 총 36번의 실험을 수행하였다.

Table 2. Mechanical properties of SM25C

Tensile strength [N/mm ²]	Elongation [%]	Hardness [HB]
45 이상	27 이상	123~183

Table 3. Chemical composition of SM25C

C	Mn	Si
0.22~0.28	0.30~0.60	0.15~0.35

Table 4. Codes, parameters, and level values used for orthogonal array

Parameter	Code	Level 1	Level 2	Level 3
Depth of cut	A	0.3	0.6	0.9
Feed rate	B	127	187	267
Cutting speed	C	3.0 x10 ⁻²	4.7 x10 ⁻²	6.0 x10 ⁻²

Table 4는 엔드밀가공 공정의 실험 조건을 나타낸 것이다. 여기서 A는 절삭깊이, B는 이송량, C는 절삭속도를 나타낸다. 엔드밀 가공 시 절삭력(F_X)은 공구동력계를 사용

하여 구하였다. 실험조건 으로서는 표 4와 같은 직교배열 법에 따라 실험을 하였다. 여기서 절삭 깊이의 단위는 [mm], 이송량은 [mm/rev], 절삭속도는 [m/min], 절삭력은 Kg_r 이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 고속도강공구의 절삭력 분석

Table 4의 실험조건에 따라, 고속도강공구를 사용하여, 엔드밀 가공을 2회 반복실험을 통하여 얻은 절삭력과 그에 따른 SN비를 계산한 값을 나타낸 것이 Table 5이다. Table 5에서 N1과 N2는 절삭력을 반복하여 2회 측정된 값이다. 이 표에서 SN 비는 특성 값이 작으면 작을수록 좋은 망소 특성의 식(1)에 의해 구하였다. Table 5의 자료에 따라 분산분석을 하면 Table 6과 같은 분산분석 결과를 얻을 수 있다. 분산분석은 공정의 파라 메터를 분석하기 위한 한 방법으로 각 인자들이 특성 값에 미치는 유의성을 검정할 수 있다. Table 6의 분산 분석 표에서는 모형의 각 항에 대한 자유도 순차제곱 합(sequential sum of squares), 수정제곱 합(adjusted sum of squares), 수정 평균 제곱(adjusted mean of squares)을 사용하여 F-통계량, p-값을 구하였다. 순차제곱 합은 이전에 포함된 항에 하나의 새로운 항이 추가된 모형에서의 제곱 합이고, 이 값은 모형 차수에 따라 달라진다. 수정제곱 합은 다른 항 모두가 모형에 이미 포함되어 있을 때 각 특정 항을 추가하므로써 결정되는

Table 5. Experiment results for cutting force F_X and their responding SN ratio for high speed steel tool

Run	Inner control factor array			Outer noise factor array		
	A	B	C	F _X [Kg]		SN ratio
				N1	N2	
1	1	1	1	30.32	21.46	-28.39
2	1	2	2	35.24	34.03	-30.79
3	1	3	3	42.10	33.11	-31.57
4	2	1	2	51.16	61.03	-35.01
5	2	2	3	50.42	29.71	-32.34
6	2	3	1	48.02	46.96	-33.53
7	3	1	3	35.73	37.96	-31.33
8	3	2	1	40.26	39.12	-31.97
9	3	3	2	45.89	54.10	-34.01

추가적인 제곱 합이다. 이 값은 모형 차수에 따라 달라지지 않는다. 그리고 순차 제곱 합을 선택한 경우에는 평균 제곱 및 F-검정에 이 값이 사용된다. 이 표에서 공학적 유의확률 값인 p의 값을 살펴보면 10% 유의수준에서 절삭 깊이가 유의함을 알 수 있다. 또한 Table 6의 결과를 사용하여 요인과 반응데이터의 상관관계가 높은지 여부와 모형에서 각 요인의 상대적 중요도를 확인할 수 있다. 이 모형에서 상관계수 R²은 91.34%이고 수정상관계수 R²(adj.)은 65.35%로 각 요인과 특성치의 관계는 충분히 실험 자료로 설명할 수 있다.

Table 6. ANOVA analysis for cutting force F_X for high speed steel tool

Source	df	Seq. SS	Adj. MS	F	p
A	2	17.622	8.811	6.65	0.131
B	2	3.924	1.962	1.48	0.403
C	2	6.417	3.208	2.42	0.292
Error	2	2.652	1.326		
Total	8	30.615			

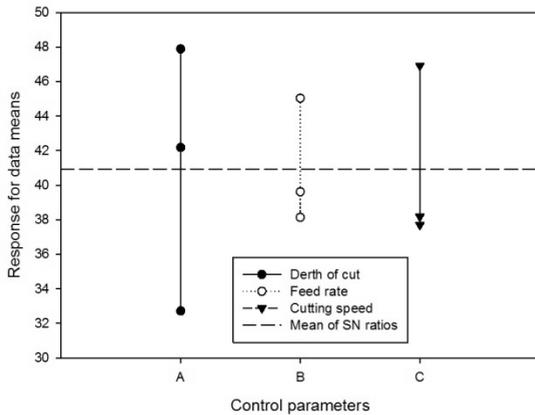


Fig. 3. Response for data means with control parameters.

Fig 3에서는 각 요인수준에 대해 실험한 절삭력의 평균의 평균을 나타낸 것으로, 이 그림에서 효과의 상대적 크기를 비교할 수 있다. Fig 3에서 볼 때 효과의 상대적 크기는 A, C, B의 순이다. 즉, 절삭깊이, 절삭속도, 이송속도의 순서대로 절삭력에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. Fig 4는 특성 값이 작으면 작을수록 좋은 망소 특성에 대한 신호 대 잡음비 (SN비)의 주효과를 나타낸 것으로

가공조건에 따라 절삭력에 미치는 영향이 매우 다름을 알 수 있다. 고속도강공구에서 절삭력에 영향을 크게 미치는 최적가공조건은 절삭깊이가 0.3mm, 절삭속도가 3.0x10² m/min, 이송량이 127mm/rev 인 A₁C₁B₁ 이다.

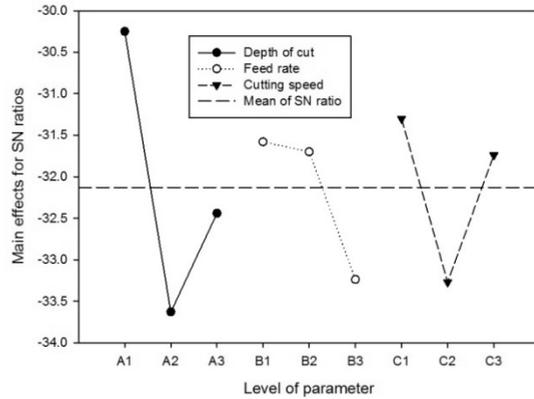


Fig. 4. Main effects plot for SN ratios.

4.2 초경공구의 절삭력 분석

아래의 Table 7은 L₉(3³)의 실험배치법에 따라 구한 실험 값이다. 절삭력의 단위는 [Kg]이다.

Table 7. Experiment results for cutting force F_X and their responding SN ratio for carbide tool

Run	Inner control factor array			Outer noise array		
	A	B	C	F _X [Kg]		SN ratio
				N1	N2	
1	1	1	1	28.09	30.58	-29.36
2	1	2	2	30.58	16.96	-27.86
3	1	3	3	32.17	15.95	-28.09
4	2	1	2	20.26	21.84	-26.47
5	2	2	3	30.42	32.65	-29.98
6	2	3	1	45.09	42.43	-32.83
7	3	1	3	36.34	41.52	-31.82
8	3	2	1	29.42	52.36	-32.56
9	3	3	2	40.26	30.48	-31.05

Table 7의 자료는 Table 4의 실험조건에 따라, 초경 공구를 사용하여, 엔드밀 가공을 2회 반복실험을 통하여 얻은

절삭력과 그에 따른 SN비를 계산한 값을 나타낸 것이다. SN비는 이 실험값에 따라 망소특성으로 구하였다. 이 표에서 공학적 유의확률 값인 p의 값을 살펴보면 10%의 수준에서 모든 제어인자가 유의하지 않음을 알 수 있다. 또한 Table 6의 결과를 사용하여 요인과 반응 데이터의 상관관계가 높은지 여부와 모형에서 각 요인의 상대적 중요도를 확인할 수 있는데 이 모형에서 상관계수 R²은 87.74%이고 수정상관계수 R²(adj.)은 65.35%로 각 요인과 특성치의 관계는 어느 정도 실험자료를 설명할 수 있다.

Table 8. ANOVA analysis for cutting force F_x for carbide tool

Source	df	Seq. SS	Adj. MS	F	p
A	2	17.368	8.684	3.54	0.220
B	2	3.190	1.595	0.65	0.606
C	2	14.583	7.292	2.97	0.252
Error	2	4.910	2.455		

Fig 5에서는 각 요인수준에 대해 실험한 절삭력의 평균의 평균을 나타낸 것으로, 이 그림에서 효과의 상대적 크기를 비교할 수 있다. Fig 5에서 볼 때 효과의 상대적 크기는 고속도강공구와 마찬가지로 A, C, B의 순이다. 즉, 절삭 깊이, 절삭속도, 이송속도의 순서대로 절삭력에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

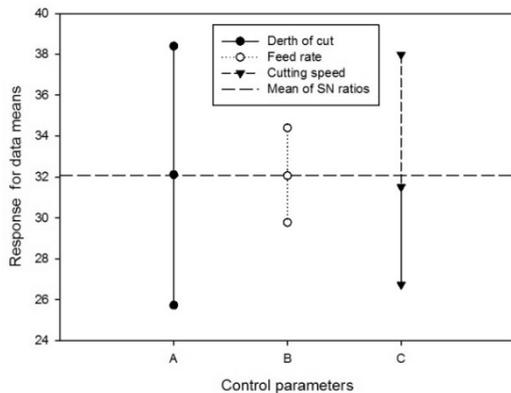


Fig. 5. Response for data means with control parameters.

Fig 6은 초경공구의 절삭력에 대한 망소특성에 대한 신호대 잡음비 (SN비)의 주효과를 나타낸 것으로 가공조건에 따라 절삭력에 미치는 영향이 매우 다름을 알 수 있다. 초경공구에서 절삭력에 영향을 크게 미치는 최적 가공조

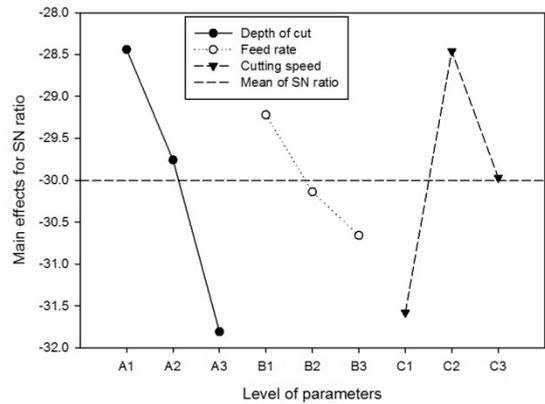


Fig. 6. Main effects plot for SN ratios.

건은 절삭깊이가 0.3 mm, 절삭속도가 4.70x10² m/min, 이송량이 127 mm/rev 인 A₁C₁B₂ 이다.

4. 결론

본 연구에서는 Taguchi법을 이용하여 SM25C를 피삭재로 사용하고, 같은 규격의 고속도강 공구와 초경공구로 엔드밀가공을 하여 절삭조건이 절삭력에 미치는 영향을 연구하였다. 각 공구에 따라 절삭가공조건을 동일하게 적용하고 이에 따른 절삭력의 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 고속도강과 초경공구의 절삭력에 영향을 크게 미치는 절삭조건은 절삭깊이, 절삭속도, 이송량의 순서였다. 아울러 공구재질이 다르더라도 공구의 형상과 절삭조건이 같으면 절삭력에 미치는 영향은 거의 유사하다. 다만 각 절삭조건에 대한 중간수준의 SN비의 경향은 공구재질에 따라 다르므로 반응표면법 등의 실험계획을 통하여, 구체적인 실험을 실시해서 이 문제를 해결할 필요가 있다.

참고문헌

- Ghani, J.A., Choudhury, I.A., Hassan, H.H., "Application of Taguchi Method in the Optimization of End Milling," J. Mater. Process. Tech. Vol. 145(1) pp. 84-92, 2004.
- Lin, T. R., "Experimental Design and Performance Analysis of Tin -Coated Carbide Tool in Face Milling Stainless Steel," J. Mater., Process. Technology. 5654, pp. 1-7, 2002.
- Fuh, K.H., Wu, C.F., "A Proposed Statistical Model for Surface Quality Prediction in End-Milling of Al alloy," Int. J. Mach. Tool Manuf. Vol. 35(8), pp. 1187-1200, 1995.

4. Tsai, Y.H., Chen, J.C., Lou, S.J., "In-process Surface Recognition System Based on Neural Networks in End Milling Cutting Operations," *Int. J. Mach. Tool Manuf.* Vol. 39(4), pp. 583-605, 1999.
5. Bouzid, W., Zghal, A., "Taguchi Method for Design Optimization of Milled Surface Roughness," *Mater. Technol.* Vol. 19 (3), pp. 159-162, 2004.
6. Ismail, F., Elbestawi, M.A., Du, R., Urbasik, K., "Generation of Milled Surfaces Including Tool Dynamic and Wear," *J. Eng. Ind. T. ASME* Vol. 115 (3), pp. 245-252, 1993.
7. Li, H.Z. Chen, X.Q., Zeng, H., "Flank Wear of Coated Carbide Inserts in the End Milling of Inconel 718," in: *Proceedings of International Conference on Precision Engineering (IcoPE2003/04)*, Grand Hyatt, Singapore, March 2-5, pp. 203-209, 2004.
8. Prickett, P.W., Johns, C., "An Overview of Approaches to End Milling Tool Monitoring," *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 39, 105-122, 1999.

접수일: 2016년 12월 13일, 심사일: 2016년 12월 23일,
게재확정일: 2016년 12월 23일