

다구찌 실험 계획법을 이용한 고속가공에서 공구수명 조건의 최적화

임 표*, 양균의#

Optimal Cutting Condition of Tool Life in the High Speed Machining by Taguchi Design of Experiments

Pyo Lim*, Gyun-Eui Yang#

ABSTRACT

High Speed Machining(HSM) reduces machining time and improves surface accuracy because of the high cutting speed and feedrate. Development of HSM makes it allowable to machine difficult-to-cut material and use small-size-endmill. It is however limited to cutting condition and tool material. In the machining operation, it is important to check main parameter of tool life and select optimal cutting condition because tool breakage can interrupt progression of operation.

In this study, cutting parameters are determined to 3 factors and 3 levels which are a spindle speed, a feedrate and a width of cut. Experiment is designed to orthogonal array table for L9 with 3 outer array using Taguchi method. Also, it is proposed to inspect significance of the optimal factors and levels by ANOVA using average of SN ratio for tool life. Finally, estimated value of SN ratio in the optimal cutting condition is compared with measured one in the floor shop and reduction of loss is predicted.

Key Words : High Speed Machining(고속가공), Small-size-Endmill(소경공구), Tool life(공구수명), Orthogonal array (직교배열), Taguchi method(다구찌 방법), ANOVA(분산분석), SN ratio(신호대 잡음비), Optimal cutting condition(최적 절삭조건)

1. 서 론

고속 가공(High Speed Machining) 기술은 높은 주축 회전수와 고속 이송속도(feedrate)를 바탕으로 한 절삭

속도(cutting speed)의 증가로 높은 금속제거율(MRR)을 얻을 수 있게 되었으며, 가공시간의 감소와 고정도의 표면 조도로 인한 가공 정밀도의 향상으로 금형 및 자동차, 항공, 전자 산업 전반에 널리 적용되고 있다.^[1] 이 기술은 초경재 공구의 출현과 공구 코팅 기술의 발전으로 기존 절삭 방법으로는 어려웠던 고경도 난삭재의 가공 및 소경 공구의 사용을 가능하도록 하였다.^[2] 또한, 열처리 등의 추가 공정의 단

* 전북대학교 대학원 기계공학과

교신저자 : 전북대학교 기계항공시스템공학부

E-mail : geyang@moak.chonbuk.ac.kr

축과 미세 가공의 가능으로 생산 공정의 변화를 야기하였다.^[3]

하지만, 고속 절삭으로 인하여 공구 파손 등으로 인한 공정 중단 등의 문제점으로 가공 조건에 대한 최적화의 필요성은 더욱 증가하게 되었다. 이와 같은 요구는 가공 공정을 효율적이며 지능적으로 관리하고자 하는 CIM 시스템에서는 매우 중요한 요소이기 때문에 가공 조건이 공구 수명에 어떻게 영향을 끼치는지를 파악하여 공정의 중단을 방지하고 공정 특성에 따른 최적 조건을 선정하는 것은 매우 중요한 작업이라고 할 수 있다.

기존 연구를 살펴보면, Taylor 공식을 적용하여 절삭속도, 피드, 절삭깊이 등의 변화가 공구수명에 영향을 끼치는 주요 인자로서 방정식을 유도하도록 하였으며,^[4] 선삭이나 드릴 공구에 대한 연구가 주를 이루었다.^[5,6] 몇몇의 엔드밀 공구에 대한 연구가 이루어졌지만 이는 중대경 공구에 대한 연구가 대부분이며, 공구 유효직경이 작아 마모와 파단이 동시에 발생하기 쉽고 작은 치수로 인하여 제품의 품질에 민감한 영향을 끼치는 소경 공구에 대하여 적용하기에는 무리가 따랐다. 특히, 소경공구의 경우에는 중대경 공구에 비하여 제어하기 힘든 환경적인 요소와 공구 세팅 등의 기계적 오차에 따른 영향을 많이 받기 때문에 정확한 조건 선정에 어려움이 많았다.^[7]

이에, 본 논문에서는 자동차 및 전자 제품의 부품군을 생산하기 위하여 주로 사용되는 사출금형의 재료인 KP4M를 고속 가공하는데 있어서 소경공구의 수명에 영향을 끼치는 인자를 파악하고자 하였다. 최적의 가공조건을 선정하기 위하여 다구찌 실험 계획법을 적용하였는데,^[8,9] 소경공구가 주로 정삭에 사용된다는 공정특성을 고려하여 주축회전수, 분당 이송거리, 절삭폭을 요인으로 선정하였다. 직교배열에 의하여 실험수의 최소화 및 가공상의 오차를 고려한 반복실험을 통해 SN비를 산출하고, 주효과를 파악하여 최적조건을 선정하였다. 마지막으로, 산출된 최적조건의 SN비의 모평균의 추정 및 유의성 검증과 손실함수식을 이용하여 기존의 가공조건과 비교하여 공구수명에 대한 손실의 향상정도를 정량적으로 파악하였다.

2. 다구찌 실험계획법

2.1 실험계획법

실험계획법(Design Of Experiments; DOE)은 데이터를 분석하기 위한 실험의 계획 방법을 의미한다. 제품의 특성에 영향을 미치는 요인들이 무엇인지 알아보고 실험의 배치와 실시를 어떠한 방법으로 수행하고 얻어진 데이터를 어떠한 통계적인 방법을 통하여 분석해야만 최소의 노력과 비용으로 최대의 정보를 얻을 수 있는지에 대한 가장 경제적인 선택적인 방법론을 찾아가는 과정이라고 할 수 있다.

많은 실험계획법이 존재하지만, 크게 완전 실험계획법과 일부실험법으로 나눌 수 있으며, 일부의 실험을 통하여 얻고자 하는 데이터를 획득하기 위하여 직교배열표를 이용한 실험의 배치가 많이 사용된다. 실험의 분석은 특성값 전체의 산포와 요인들의 제곱합의 비로 나타내어지는 분산비를 이용하여 오차에 비해 큰 영향을 주는 요인들을 찾아내는 분산분석(Analysis of variance: ANOVA)을 이용한 방법이 많이 사용되고 있다.^[12]

2.2 다구찌 방법

효과적인 실험의 실시 및 데이터의 분석을 위한 실험계획법 중의 하나인 다구찌 방법은 종래의 제어 불가능한 환경 조건이나 제어하기 어려운 기계적 오차 등의 잡음 인자들로 인하여 중요한 요인들이 데이터에 끼치는 정도를 정확하게 파악하기 어려웠던 점을 객관적이고 계량적으로 평가하기 위하여 제시되어진 방법이다. 산포의 크기를 SN비로 변환하여 산포를 작게 하는 인자를 찾아가는 파라미터의 설계(Robust Design)가 주로 이용되고 있다. 신호대 잡음비를 의미하는 SN비는 잡음으로 인한 특성치의 변동이 초래되어 결과에 대한 신뢰성을 떨어뜨리게 되므로 신호의 힘을 증가시켜 시스템을 안정화 하도록 도입되었으며, 특성치에 따라 망목(nominal-is-best), 망소(smaller-the-better), 망대(larger-the-better) 특성으로 나누어진다.^[12,13,14]

본 연구에서는 망대 특성을 다루었으며, SN비는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

위 식에서 n은 실험 횟수이며, y_i 는 i번째 특성값을 나타낸다.

이때, 망대특성에서의 손실함수는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L(y) = k \left(\frac{1}{y^2} \right), \quad k = A\Delta \quad (2)$$

여기에서, A는 소비자 손실이고, Δ 는 소비자허용한계이다.

이때, 0으로부터의 평균제곱편차(mean squared deviation)을 식(3)과 같이 정의하면, (4)와 같이 n개의 데이터가 얻어진 경우의 개당 평균 손실함수를 구할 수 있다.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (3)$$

$$L(y) = k \cdot MSD \quad (4)$$

3. 실험장치 및 설계

3.1 실험장치 및 방법



Fig. 1 Vertical machining center with spindle speeder

Fig. 1은 공구수명 측정 실험에 사용된 수직형 머

시닝 센터에 고속 증속기를 장착시킨 모습이다. 이는 기어형으로 머시닝 센터의 주축 회전수를 50,000 rpm 까지 증속 가능하게 한다.

Table 1은 사출 금형 가공시 경면 가공용에 주로 사용되는 난삭재인 KP4M에 대한 기계적 성질을 보여주고 있다.

Table 1 The mechanical properties of KP4M

Specification	Value
Yield Point (kgf/mm ²)	65.80
Tensile Strength (kgf/mm ²)	75.90
Elongation (%)	> 15
Reduction if Area (%)	> 40
Impact Abso. Energy (Joule)	> 60
Surface Hardness (HRC)	28 - 34

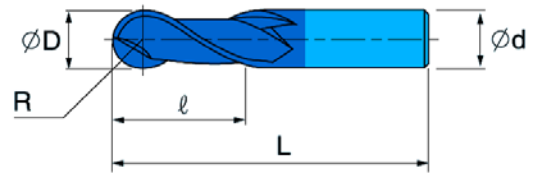


Fig. 2 Shape of the end mill

Fig. 2는 공구 수명 실험을 수행하기 위하여 사용된 ø1인 공구 형상의 세부적인 모습을 보여주고 있다. 공구 수명을 파악하기 위한 실험은 30cm 길이의 사출금형용 KP4M으로 만들어진 평판을 제작하여 왕복 가공하는 방법을 채택하였으며, 공구파단을 정확하게 파악하기 위하여 윤활 작용이 없는 드라이(dry) 가공을 통하여 수행되었다.

3.2 실험 설계

실험계획법에 의한 실험을 설계하기 위해서는 실험의 목적에 따른 특성치를 먼저 선정해야 한다. 본 연구에서는 공구수명을 특성치로 정하였기 때문에, 공구수명을 정의하는 기준이 필요하다. 이에, 과절삭에 의한 공구파단과 공구 직경의 1/10을 임계 마모값으로 잡아 한날의 마모가 이 기준에 이를 때를 공구

수명으로 정의하였다. 공구파단이 발생하는 경우에는 문제가 없지만, 공구마모의 경우에는 절삭공정에서 임계 마모값에서의 공구수명의 정확한 측정이 어렵기 때문에 실제의 임계값은 $0.1 \pm 0.05\text{mm}$ 구간 내에 존재하였다.

절삭공정을 정확하게 파악하기 위해서는 공구수명에 영향을 가지는 가공변수를 모두 선택하는 것이 좋다. 하지만, 실제로는 과도한 인자의 선택으로 쓸데없이 실험의 수를 증가시켜 비용 효율성과 실험의 정도를 떨어뜨릴 수 있다. 이에, 주로 정삭가공조건으로 사용되는 주축회전수, 분당이송거리, 절삭폭을 인자로 선정하였으며, 각 인자에 대한 수준은 3수준을 선택하여 실험을 설계하였다. Table 2는 인자에 대한 각각의 수준값을 보여주고 있다.

Table 2 Factors and levels of experiments for tool life

Condition	1	2	3
Spindle speed(rpm)(A)	22,000	25,000	28,000
Feedrate (mm/min) (B)	600	800	1000
Width of cut(mm) (C)	0.13	0.21	0.29

실험의 설계는 교호작용을 회생시켜 실험의 횟수를 줄이고 간단하게 나타내기 위하여 직교배열표 (tables of orthogonal arrays)를 이용하였다. 총 9번의 실험수를 갖도록 내측 배열이 배치되었으며, 가공 중에 발생할 수 있는 환경적 요인인 기계적 오차와 마모 및 파단 상에서 발생할 수 있는 가공 중의 오차를 고려하여 3번의 반복실험을 통하여 외측 배열이 배치되었다.

4. 실험 결과의 분석

4.1 실험 결과

Table 3은 3수준계 3인자 실험을 실시하기 위하여 L9의 직교배열표를 이용한 공구수명의 반복 실험값과 망대 특성에 의하여 각 실험 번호별로 구해진 SN비의 값을 보여주고 있다.

Table 3 Orthogonal array table for L9 with 3 outer array

No	Factor			Tool life(min)			SN ratio
	A	B	C	N1	N2	N3	
1	1	1	1	115	125	108	41.2427
2	1	2	2	38	46	37	31.9938
3	1	3	3	9	14	10	20.3861
4	2	1	2	75	70	60	36.5782
5	2	2	3	38	47	33	31.6252
6	2	3	1	108	102	95	40.1077
7	3	1	3	28	23	23	27.7329
8	3	2	1	110	124	106	41.0296
9	3	3	2	31	27	23	28.4338

이 SN비의 각 인자별 수준의 평균과 합을 구하여 보면 Table 4와 같다.

Table 4 Average SN ratio for each level

Factor \ Level	A	B	C
1	31.2075	35.1845	40.7933
2	36.1037	34.8829	32.3353
3	32.3988	29.6425	26.5814
Total	99.71	99.71	99.71

Table 4를 이용하여 공구 수명에 대한 SN비의 수준별 주효과를 나타낸 그래프가 Fig. 3이고, 각 인자의 변동을 구하여 SN비에 대한 분산분석을 수행한 결과값을 Table 5가 보여주고 있다.

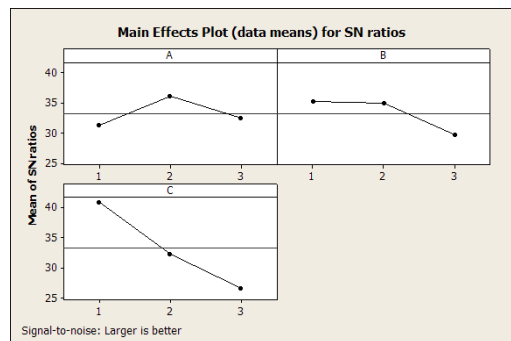


Fig. 3 Main effect for SN ratio of tool life

Table 5 ANOVA for SN ratio of tool life

Factor	S	ϕ	V	F	F(0.05)
A	39.117	2	19.559	21.36*	19.0
B	58.266	2	29.133	31.82*	19.0
C	306.623	2	153.311	167.43**	19.0
error	1.831	2	0.916		
Total	405.838	8			

* : it is significant at 95% confidence level

** : it is significant at 99% confidence level

Table 5에서 F-검정을 실시한 결과를 살펴보면, A, B 인자는 95% 유의수준 내에서, C 인자는 99% 유의수준 내에서 모두 유의함을 의미한다. 이를 바탕으로 Fig. 3에서 유의한 인자의 공구수명에 대한 S/N의 평균값을 이용하여 조건 $A_2B_1C_1$ 에서 최적 조건임을 알 수 있었다.

4.2 SN비 추정 및 손실 예측

최적조건으로 예측된 조건 $A_2B_1C_1$ 은 9번의 실험을 통하여 수행된 실험 조건이 아니기 때문에, 추정된 최적조건에서의 SN비의 추정치는 식 (5)를 이용하여 구하였다.

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(A_2B_1C_1) &= \widehat{\mu + a_2 + b_1 + c_1} \\ &= \widehat{\mu} + \widehat{a_2} + \widehat{b_1} + \widehat{c_1} - 2\widehat{\mu} \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서, $\widehat{\mu}$ 는 추정된 평균값을, $\widehat{a}, \widehat{b}, \widehat{c}$ 는 추정된 인자의 주효과를 말한다.

또한, 유의한 인자 A, B, C의 각 수준에서 SN비의 추정치에 대한 95% 신뢰구간을 구하고자 식 (6)을 이용하였다.

$$\hat{\mu}(A_2B_1C_1) \pm t(\phi_E; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_E}{N_E}} \quad (6)$$

여기에서, t는 t-분포, ϕ_E 는 오차의 자유도, α 는 유의수준, V_E 는 오차의 분산, N_E 는 유효반복수를 가르킨다.

Table 6은 식 (6)을 통하여 구하여진 최적조건에서

의 SN비 추정치에 대한 95% 신뢰구간을 보여주고 있다.

Table 6 Confidence interval for SN ratio estimates

	Lower value	Upper value
$\hat{\mu}(A_2B_1C_1)$	43.2305	47.9859

최적조건으로 추정되어진 $A_2B_1C_1$ 조건에서 9번의 실험과 같은 방법을 이용하여 3회 반복실험을 실시하였으며, 이 때 구하여진 각각의 공구수명에 대한 SN비 값을 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 이 때 구하여진 최적조건에서의 실제 SN비값은 43.3727이었는데, 이는 Table 6에서 구한 95% 신뢰구간 내에 존재한다. 그러므로, 본 공구수명 실험은 95% 유의범위 내에서 유의하다고 할 수 있다.

Table 7은 식 (5)를 이용하여 구한 최적조건에서의 SN비의 추정치와 기초조건으로 선정된 현장값인 $A_1B_1C_1$ 에서의 SN비 값을 비교한 것이다.

Table 7 Prediction of SN ratio in the optimal condition

	$A_1B_1C_1$	$A_2B_1C_1$
SN ratio (db)	41.2427	45.6082

SN비를 살펴보면, 최적조건일 때가 기존조건일 때보다 $45.6082 - 41.2427 = 4.3655$ 만큼 개선되었음을 알 수 있다. 소비자 손실은 공구 개당 가격이며, 소비자 허용한계는 파악하지 않았으므로, 식 (3),(4)을 이용하여 손실함수의 비로 나타내어 미지항을 제거하였다. 이러한 방법으로 현장에서 사용되는 조건을 기준으로 최적조건의 향상정도를 배수관계로 파악할 수 있는데, $10^{0.43655} = 2.732$ 배만큼 기존조건보다 손실금액이 감소되었음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 관심 영역 내에서 고속가공을 수행

하는데 있어서 소경공구의 최적 공구수명 조건을 탐색하고, 기존 조건과 비교하여 향상 정도를 정량적으로 파악하기 위하여 다구찌 실험계획법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 3인자 3수준계의 직교배열표를 이용하여 실험수를 최소화하여 수행하였고, 공구수명에 주축회전수, 분당이송거리가 유의한 인자임을 확인하였으며, 절삭폭은 두 인자보다 더욱 중요한 인자임을 통계적 방법을 통하여 입증하였다.
2. SN비 분석을 통하여 기존조건에 비하여 주축회전수를 증가시켜 절삭속도를 증가시킨 가공조건이 공구수명을 더욱 연장시킬 수 있음을 입증하였고, 관심영역 내에서 최적 가공조건을 선택할 수 있었다.
3. 최적조건에서 재실험을 통하여 얻어진 SN비 값이 신뢰구간내에 존재함을 보여 본 실험의 유의성을 검증하였고, 최적조건이 기존조건에 비하여 얼마만큼 향상되었는지를 정량적으로 파악할 수 있었다.

for end milling steel (190BHN),” Journal of Materials Processing Technology, No. 68, pp. 50-59, 1997.

6. Choudhury, I. A. and El-Baradie, M. A., “Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290BHN),” Journal of Materials Processing Technology, No. 77, pp. 319-326, 1998.
7. Lim, P., Park, S. Y. and Yang, G. E., “A Study on tool life in the high speed machining of small-size end mill by factorial design of experiments and regressing model,” Journal of Korean Society of Precision Engineering, No. 118, pp. 29-35, 2001.
8. Chen, T. C. and Hong, H., “Comparison of the tool life of tungsten carbides coated by multi-layer TiCN and TiAlCN for end mills using the Taguchi method,” Journal of Materials Processing Technology, No. 123, pp. 1-4, 2002.
9. Park, S. H., Morden Design of Experiments, Minyongsa, pp. 305-329, 2001.

참고문헌

1. Dewes, R. C. and AspinWall, D. K., “A Review of Ultra High Speed Milling of Hardened Steels,” Materials Processing Technology, Vol. 69, pp. 1-17, 1997.
2. Nakamura, S., “High speed spindles for machine tools,” Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. Vol. 30, No. 4, pp. 291-294, 1996.
3. Lim, P., Jang, D. K., Lee, H. K. and Yang, G. E., “High speed machining of cavity pattern in prehardened mold using the small size tool,” Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 133-139, 2004.
4. Sharman, A., Dewes, R. C. and Aspinwall, D. K., “Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718TM,” Journal of Materials Processing Technology, No. 118, pp. 29-35, 2001.
5. Alauddin, M., I. A., El-Baradie, M. A., “Tool life