

다구찌 방법에 기초한 단면절삭에서 절삭파라미터 영향에 관한 연구

장성민*, 조명우⁺

A Study on the effect of cutting parameters in face turning based on the
Taguchi method

Sung-Min Jang*, Myeong-Woo Cho⁺

Abstract

In this paper, object of experiment is to study on the effect of cutting parameters to obtain optimal surface toughness in face turning. Surface roughness is significantly important to be high quality of parts produced by turning process. For this purpose, the optimization of cutting parameters for face turning operation is investigated applying the Taguchi method. An orthogonal array, signal-to-noise ratio, and the analysis of variance are employed to evaluate effect of cutting parameters for face turning. Also confirmation tests were performed to make a comparison between the results predicted from the mentioned correlations and the theoretical results. Cutting experiment is performed without cutting fluid using coated tungsten carbide inserts about workpieces of SM45C.

Key Words : face turning(단면절삭), taguchi method(다구찌방법), orthogonal array(직교배열), signal-to-noise ratio(신호대 잡음비)

1. 서론

절삭공구재료의 발전은 이전까지 선삭에서는 도저히 가공이 불가능하다고 생각되어지는 기계적 특징을 갖는 재료들까지도 가공이 가능하게 하였다. 이러한 가공이 가능하

게 된 것은 절삭공구 재료와 제조기술의 눈부신 발전이 있었기에 가능한 것이다. 또한 연삭공정 등 입자를 이용한 가공에서 가능했던 고경도 재료를 하드터닝에서 절삭가공이 가능할 만큼 절삭공구의 제조기술은 혁신적인 발전을 이루었을 뿐만 아니라 광범위한 산업적용에 대한 잠재성을

* 주저자, 인하대학교 기계공학과 대학원(g2002080@inhavision.inha.ac.kr)

주소: 인천 남구 용현동 인하대학교 기계공학과 정밀가공 및 측정연구소

+ 인하대학교 기계공학과

상당히 증가시켰다.

현재 산업현장에서 사용되고 있는 절삭공구 중 가장 많이 사용되고 있는 것은 초경절삭공구이며 절삭가공을 통한 제품의 품위를 결정하는 중요한 요인은 가공후 피재의 표면 거칠기입은 이제는 상식적인 표현이다. 이러한 초경절삭공구는 거의 모든 피삭재에 적용이 가능하도록 높은 인성과 낮은 절삭저항 등 뛰어난 성질을 갖고 있다. 초경절삭공구 재료는 일반적으로 크게 P, M, K 3종으로 분류되며 이들 중들은 각각 10, 20, 30종으로 세부적으로 분류되는 것이 일반적이다. 이렇게 분류된 절삭공구재료는 피삭재의 종류와 공구제조업체에서 추천하는 절삭속도 범위에 기초하여 작업자에 의해 세부적으로 선택 사용되어지고 있다. 절삭공구재료의 발전으로 고경도의 특성을 갖고 있는 피삭재의 가공을 가능하게 하였고 이에 따라 절삭공구를 선정하는 중요한 기준은 고경도 피삭재와 이의 가공으로 인한 높은 절삭열에 내성을 갖고 있는지의 여부가 중요한 요인임을 간과할 수 없다.

Salah R. Agha 등은 구름접촉을 갖는 AISI 52100 환면을 대상으로 하드터닝기술을 적용하여 표면에 대한 절삭 파라미터와 잔류응력에 관한 실험적인 연구를 수행하였다⁽¹⁾. G. Poulachon 등은 PCBN공구를 사용한 하드터닝에서 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 등의 파라미터를 적용하여 단면절삭에서 공구마모 메카니즘을 연구하여 공구마모에 기인한 표면거칠기의 증가는 스트레스 힘의 증가보다 더 늦게 나타난다는 것을 실험적으로 보였고 따라서 공구파손을 피하기 위해 몇몇 제조분야에서 하드터닝공정을 제어하기 위해 스트레스 힘을 모니터링하는 것이 가능하다는 것을 나타내었다⁽²⁾. 지금까지는 선삭가공이라함은 주로 원통가공에 중점을 두어 연구가 되어왔다. 본 연구에서는 단면절삭시에 노우즈반경의 변화에 따라 절삭파라미터가 표면거칠기에 어느정도나 영향을 미치는지 알아보기 위해 다구찌 방법에 기초하여 분석해보았다. 이론적인 평균표면거칠기는 $R_a = f^2/8r$ 으로 계산될 수 있다. 그러나 실제 실험에서는 절삭속도와 절삭깊이에 도 영향을 받을 뿐만 아니라 작업자가 제어할 수 없는 다양한 인자들에 의해 영향을 받을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 3종류의 바이트 노우즈 반경에 대해 절삭인자와 각각의 인자를 3개 수준으로 구분하여 다구찌방법에 기초하여 고찰하고자 한다. 또한 S/N비와 분산분석을 통하여 각각의 노우즈 반경에 따라 최적의 인자와 그 수준을 결정해보고자한다.

2. 다구찌 방법

본 연구에서는 선삭에서 노우즈 반경에 따른 단면절삭가공시에 절삭파라미터가 표면거칠기에 미치는 영향을 다구찌 방법에 기초하여 수행하였다. 다구찌방법은 최적화 기술을 위해 요구되는 대부분의 방법보다 훨씬 적은 노력으로 절삭 파라미터의 최적화를 위한 체계적이고 효율적인 방법론을 제공한다⁽³⁾. 다구찌방법에서 변수설계는 있음직한 잡음에 둔감하도록 결정한다. 작업자가 제어할 수 없는 대표적인 잡음은 환경적 영향을 예로 들 수 있다. 이와 같은 이유 때문에 실험결과 얻어진 절삭파라미터의 영향이 다른 환경에서 적용하였을 때 똑같은 영향을 미칠 것이라고 예상 할 수 없다. 결과적으로 작업자가 제어하지 못하는 인자들로 인해 결과의 차이가 발생할 수 있다는 것이다.

다구찌 방법에 기초한 본 논문에서는 최적의 표면거칠기를 얻기 위한 목적으로 수행하였다. 표면거칠기는 그 값이 작을수록 결과적으로 표면품위는 향상되는 것이므로 손실함수는 망소특성으로 하였다.

표면거칠기에 대한 S/N비의 값은 크게 나타나는 것이 좋으며, S/N비의 의미는 아래와 같다.

$$S/N = \frac{\text{Power of Signal}}{\text{Power of Noise}} \quad (1)$$

S/N비는 신호대 잡음의 비율이며, 따라서 S/N비의 값이 클수록 잡음에 둔감하다고 할 수 있다. 데이터의 반복적인 측정값을 y_1, y_2, \dots, y_n 라 할 때 MSD(mean squared deviation)는 다음식으로 나타낸다.⁽⁴⁾

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

여기서 n 은 실험의 수, y_i 는 i 차 실험에서 실험값이다. 결과적으로 S/N비는 다음 식으로 표현된다.

$$S/N = -10 \log(MSD) \quad (3)$$

직교배열표를 이용한 실험계획법에서 변동의 계산은 먼저 모든 열의 변동을 구하고, 어느 특정한 열의 변

동이 그 열에 해당된 인자의 변동으로 하면 된다. i 열의 변동을 S_i 라고 할 때 다음과 같이 구한다.

$$S_i = \frac{1}{r} (T_1^2 + T_2^2 + T_3^2) - CT \quad (4)$$

여기서 r 은 반복수이며 T_1, T_2, T_3 은 i 열의 각 수준의 합이며 CT 는 수정항으로 아래 식으로 계산된다.

$$CT = \frac{T^2}{N} \quad (5)$$

여기서 T 는 실험에서 계산된 S/N비의 총합이며 N 은 전체 실험의 수이다. 또한 열 수가 n 까지 있다면 전체 변동 S_T 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$S_T = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n \quad (6)$$

실험후에 표면거칠기에 영향을 주는 요인을 분석하기 위한 방법으로 분산분석(ANOVA)을 하여 통계적으로 분석하였다. 본 연구에서는 분산분석과 S/N비를 계산하여 분석한 후 최적수준의 조합을 선정하였다.

3. 직교배열에 의한 실험

본 연구에서는 실험을 위한 시편으로 SM45C를 사용하였으며 절삭인선인 드로우 어웨이 형식인 초경팁 SNMG 1204를 사용하여 CNC선반(Lynx 200A)에서 수행하였다. Fig. 1은 실험에 적용한 절삭모드를 나타내었다.

실험은 절삭유를 사용하지 않는 건식절삭방식에 의해 수행하였으며 사용한 드로우 어웨이 팁은 한번 사용후 새로운 팁을 사용하여 미소한 공구마모에 의한 영향을 받지 않도록 하였다. 선삭에서의 절삭가공시에 발생하는 칩은 회전중인 피삭재와 바이트에 갇히어 작업자의 작업환경을 위협하는 요소로 작용하고 있다. 본 연구에서도 그러한 경우가 종종 발생하였고 이러한 경우는 피삭재의 표면에 영향을 주어 결국 실험데이터에도 영향을 미치므로 칩이 피삭재에 갇히는 경우는 다시 실험을 하여 실험데이터에 영향을 주지 않도록 하였다.

Table 1은 제어인자로서 실험에 적용된 절삭파라미터 조건인 절삭인자와 각각의 인자들에 대한 수준을 3개의 수준으로 나타내었는데, 낮은 수준은 level 1, 중간수준은

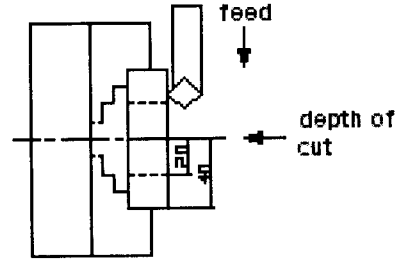


Fig. 2 Cutting mode

Table 1 Cutting parameters and their levels

Symbol	Cutting parameter	Unit	Level1	Level2	Level3
A	Feed	mm/rev	0.1	0.2	0.4
B	Cutting speed	m/min	120	200	340
C	Depth of cut	mm	0.4	0.7	1.2

level 2 그리고 높은 수준은 level 3로 표현하였다. 노우즈 반경에 따른 표면거칠기 영향을 분석하기 위해 본 연구에서 적용된 노우즈 반경은 0.4, 0.8, 1.2mm로 하였으며 절삭파라미터로 이송속도, 절삭속도, 절삭깊이를 적용하였다. 또한 실험에 적용된 직교배열표는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Orthogonal array of Taguchi $L_9(3^4)$

Experimental number	Cutting parameter level			
	A	B	C	D
1	Feed rate	Cutting speed	Depth of cut	Error
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

4. 실험결과

4.1 S/N ratio

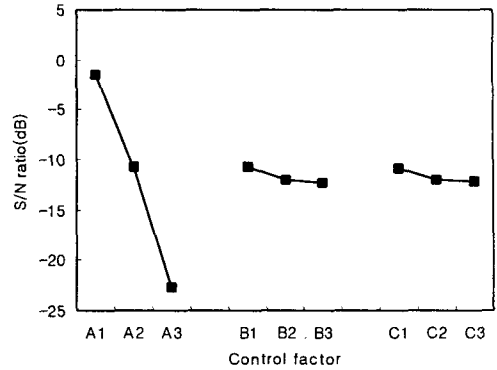
실험에 적용된 인자들과 그 수준들에 대한 각각의 응답성을 표면거칠기에 관련하여 얻었다. 다구찌 방법에서 얻고자 하는 데이터에 관하여 계산된 S/N비는 큰 값을 갖는 것이 더 좋은 특성을 나타낸다. 따라서 Table 3에서 알 수 있듯이 직교배열표 조건의 결과만을 살펴보면 노우즈 반경이 0.4, 0.8, 1.2mm일 때 각각 A1 B1 C1, A1 B2 C2, A1 B3 C3의 조합이 가장 좋은 표면거칠기를 나타내었다. Fig. 2는 표면거칠기에 대하여 인자들에 대한 각각의 수준에 따른 S/N비 값을 나타내었다. 그 결과 S/N비 값이 가장 크게 갖는 인자들에 대한 수준들의 조합은 0.4, 0.8, 1.2mm의 노우즈 반경에 대하여 각각 A1B1C1, A1B2C2, A1B3C2의 조합이다. 따라서 S/N비 분석결과 최적의 수분조합은 결정되었다. 노우즈 반경이 0.4, 0.8mm인 경우는 직교배열 조건에서의 결과와 S/N비 분석결과가 동일하게 나타났으며, 1.2mm의 노우즈 반경을 갖는 경우만 S/N비 분석결과와 다르게 나타났는데 그 차이는 무시할 정도로 나타났다.

Table 3 Experimental results for surface roughness and S/N ratio using an $L_9(3^4)$ orthogonal array

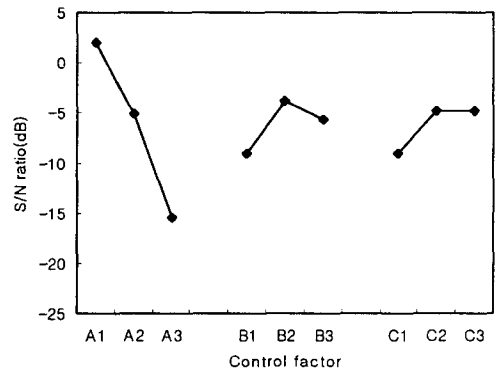
Experiment No.	Surface roughness(μm) R_a			S/N ratio(dB)		
	Nose radius			Nose radius		
	0.4	0.8	1.2	0.4	0.8	1.2
1	0.87	2.09	2.42	1.21	-6.40	-7.68
2	1.35	0.42	0.74	-2.61	7.54	2.62
3	1.44	0.58	0.67	-3.17	4.73	3.48
4	3.40	1.92	1.60	-10.63	-5.67	-4.08
5	3.42	1.59	1.63	-10.68	-4.03	-4.24
6	3.51	1.93	1.07	-10.91	-5.71	-0.59
7	13.50	5.78	4.03	-22.61	-15.24	-12.11
8	13.80	5.64	3.65	-22.80	-15.03	-11.25
9	13.75	6.43	3.70	-22.77	-16.16	-11.36

4.2 분산분석(ANOVA)

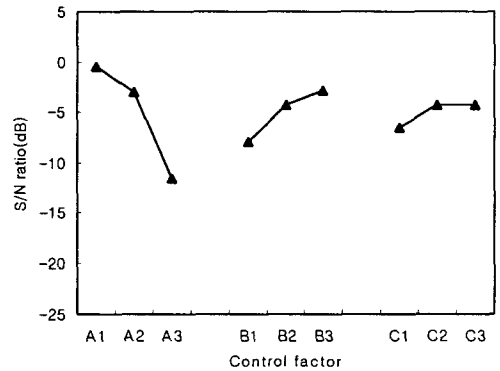
각각의 인자들이 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하기 위한 방법으로 분산분석을 하였다. 분석결과에서 알 수 있듯이 표면거칠기에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 이송속도이며 절삭깊이와 절삭속도는 상대적으로 그 영향이 작음을 알 수 있었다. 직교배열표에서 노우



(a) for nose radius 0.4



(b) for nose radius 0.8



(c) for nose radius 1.2

Fig. 2 S/N ratio response graphs of factors for nose radius

즈 반경에 따른 결과는 노우즈 반경이 0.8mm일 때 표면거칠기 결과가 가장 좋게 나타났다. 이러한 결과는 노우즈 반경이 작으면 노우즈 반경이 큰 바이트를 사용하였을 때 보다 이송에 대하여 선단 노우즈에

의해 피삭재에 남기는 트랙이 더 선명하게 나타나는 이유때문이다. 또한 상대적으로 빠른 절삭속도 조건에서 바이트의 노우즈 반경이 크면 피삭재와의 접촉면 증가로 인한 채터현상의 발생에 영향을 주어 표면거칠기가 좋지 못할 것이다. 이와 같은 이유와 더불어 현장에서 가장 많이 사용되는 바이트의 노우즈 반경이 0.8mm임을 감안하면 바람직한 결과로 사료된다.

Table 4 Results of the ANOVA for surface roughness

Nose radius	Source	Sum of Squares	DOF	Mean Square	F ₀	Contribution(%)
0.4 (mm)	A	678.63	2	339.32	178.59	98.36
	B	4.44	2	2.22	1.67	0.64
	C	3.13	2	1.57	0.84	0.45
	error	3.79	2	1.9		0.55
	Total	689.99	8			100
0.8 (mm)	A	461.60	2	230.8	14.30	80.66
	B	42.41	2	21.21	1.31	7.41
	C	35.99	2	18.00	1.12	6.29
	error	32.28	2	16.14		5.64
	Total	572.28	8			100
1.2 (mm)	A	401.80	2	200.9	10.97	82.16
	B	42.05	2	21.03	1.15	8.60
	C	8.54	2	4.27	0.23	1.75
	error	36.64	2	18.32		7.49
	Total	489.03	8			100

Fig. 3은 막대그래프를 이용하여 인자들이 표면거칠기에 미치는 영향을 나타내었다. 노우즈 반경에 대하여 모든 인자들이 미치는 영향은 이송속도의 경우가 가장 컸으며, 노우즈 반경이 증가할수록 이송속도의 영향은 점차 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 노우즈 반경이 작을수록 이송속도를 느리게 하여야 할 것이다.

4.2 확인실험

Fig. 2에서 노우즈 반경에 따라 최적의 표면거칠기를 얻기 위한 인자들의 조합은 결정되었다. 최적의 수준조합에 의한 이론적인 S/N비는 아래 식에 의해 계산할 수 있다.

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^p (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (7)$$

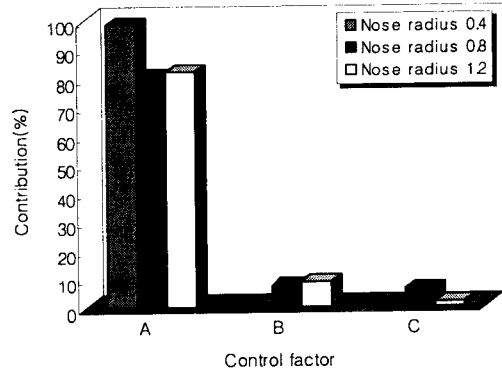


Fig. 3 Contribution of control factors

여기서 η_m , $\bar{\eta}_i$, σ 은 각각 실험에 적용된 직교배열표에서 전체평균 S/N비, 제어인자들의 최적수준에서 평균 S/N비 그리고 품질특성에 영향을 주는 주요 설계 파라미터의 수이다. 계산된 이론적인 S/N비를 근거로 하여 표면거칠기값은 얻어진다. 또한 얻어진 최적 조합의 조건에서 직접 실험하여 실제 표면거칠기를 측정하였으며, 이론적인 결과와 비교하였다.

Table 4 Result of the confirmation experiment for surface roughness

Nose radius : 1.2mm	Optimal cutting parameter	
	Prediction	Experiment
Factor and Level	A1B3C2	A1B3C2
Surface roughness(μm)	0.46	0.56
S/N ratio(dB)	6.74	5.04

본 연구에서는 직교배열표에서의 결과와 S/N비 분석 결과 얻어진 최적조건의 결과가 다르게 나타난 노우즈 반경이 1.2mm의 경우를 대상으로 확인실험을 수행하였으며 Table 4는 그 결과를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 실제 실험결과는 S/N비 분석에 의해 예상되는 값보다 S/N비 값이 다소 작게 나타났으나, 결과적으로 다구찌방법에 기초한 실험은 유효하다는 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 다구찌 방법에 기초하여 노우즈 반경이 변화되는 조건에서 단면 선삭가공 실험을 수행하여 절삭파라미터가 표면거칠기에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

1. 직교배열표 조건에서 실험결과 0.4, 0.8, 1.2mm의 노우즈 반경에서 표면거칠기를 가장 향상시키는 조건은 0.8mm이었으나 S/N비 분석결과 획득한 최적의 조건으로 실험을 한 결과 노우즈 반경 1.2mm의 조건에서 더 향상시킬 수 있었다.
2. 단면 선삭가공에서도 일반적인 방법과 같이 이송이 가장 작을 때 표면거칠기는 향상되었다.
3. 절삭깊이와 절삭속도는 표면거칠기에 크게 영향을 미치지 못하였는데, 이것은 이론적인 식 $R_a = f^2/8r$ 과 일치된다.
4. 분산분석결과 표면거칠기에 영향을 가장 크게 미치는 것은 이송속도이었다.
5. 공구의 노우즈 반경이 0.4, 0.8, 1.2mm일 때 분석결과 제품의 품위를 높일 수 있는 최적 인자의 수준조합은 각각 A1 B1 C1, A1 B2 C2, A1 B3 C2인 것으로 나타났다.
7. 확인실험 결과 최적수준조합으로 결정된 파라미터에 대하여 다구찌방법에 의한 이론적으로 예상되는 S/N비와 표면거칠기 값을 실험적으로 얻어진 값과 비교하였으며, 그 결과 최적의 조건으로 얻어진 S/N비와 표면거칠기 값은 이론적, 실험적으로 제품의 품위를 향상시킬 수 있었다.
8. 다구찌 방법을 통하여 단면선삭가공에서 표면품위를 높일 수 있음을 실험을 통하여 증명하였다.

참고 문헌

- (1) Salah R. Agha, C. Richard Liu, 2000, "Experimental study on the performance of superfinish hard turned surfaces in rolling contact", *Wear*, 244, pp. 52-59.
- (2) G. Poulachon, A. Moisan, I.S. Jawahir. 2001, " Tool-wear mechanism in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools", *Wear*, 250, pp. 576-586.
- (3) W.H.Yang, Y.S.Tarng, 1998, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *Journal of Materials Processing Technology* 84, pp122-129,
- (4) 박성현, 다구찌 방법을 중심으로 한 응용실험계획법, 1997, 영지문화사,