

단면 선삭가공에서 최적의 표면품위를 위한 파라미터 분석에 관한 연구

맹민재[†] · 장성민^{*}

동서울대학 컴퓨터응용기계공학부 · *유한대학 기계과
(2005. 5. 4. 접수 / 2006. 1. 16. 채택)

A Study on Analysis of Parameter for Optimal Surface Quality in Face Turning

Min-Jae Maeng[†] · Sung-Min Jang^{*}

Division of Computer Aided Mechanical Engineering, Dong Seoul College

^{*}Department of Mechanical Engineering, Yuhan College

(Received May 4, 2005 / Accepted January 16, 2006)

Abstract : In this paper, object of experiment is to study on the effect parameters to obtain optimal surface roughness 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, 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 insert about workpiece of SM45C. And regression analysis technique has been used to study the effects of the cutting parameters.

Key Words : face turning, taguchi method, orthogonal array, signal-to-noise ratio, regression analysis

1. 서 론

절삭공구 재료의 발전은 이전까지, 선삭에서는 가공이 불가능하다고 여겨지는 기계적 특징을 갖는 재료들까지도 가공을 가능하게 하였다. 이것은 절삭공구 재료와 제조기술의 눈부신 발전이 있었기에 가능한 것이다. 또한 연삭공정 등 지립자를 이용한 가공에서 가능했던 고경도 재료를 하드터닝 공정에서 절삭가공을 가능할 만큼 절삭공구의 제조기술은 혁신적인 발전을 이루었을 뿐만 아니라 광범위한 산업 적용에 대한 잠재능력을 상당히 증가시켰다.

현재 산업현장에서 사용되고 있는 절삭공구 중 가장 많이 사용되고 있는 것은 초경 절삭공구이다. 절삭가공을 통한 제품의 품위를 결정하는 중요한 요인은 가공 후 피삭재의 표면거칠기 임은 누구나 다 인지하고 있다. 이러한 초경 절삭공구는 거의 모든

피삭재에 적용이 가능하도록 높은 인성 및 절삭저항 등 뛰어난 성질을 지니고 있다. 초경 절삭공구 재료는 일반적으로 크게 P, M, K 등 3종으로 분류되며 이들 종들은 각각 10, 20, 30종 등 세부적으로 분류되는 것이 일반적이다. 이렇게 분류된 절삭 공구재료는 피삭재의 종류와 공구 제조업체에서 추천하는 절삭속도 범위에 기초하여 작업자에 의해 세부적으로 선택 사용되어지고 있다. 절삭 공구재료의 발전으로 고경도의 특성을 갖고 있는 피삭재의 가공이 가능하게 되었으며, 이에 따라 절삭공구를 선정하는 중요한 기준은 고경도 피삭재의 가공으로 인한 내열성을 갖고 있는지의 여부가 중요한 요인임을 간과할 수 없다. Salah R. Agha 등¹⁾은 구름접촉을 갖는 AISI 52100 환면을 대상으로 하드 터닝기술을 적용하여 표면에 대한 절삭 파라미터와 잔류응력에 관하여 실험적인 연구를 수행하였다. G. Poulachon 등²⁾은 PCBN공구를 사용한 하드 터닝에서 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 등의 파라미터를 적용하여 단면 절

[†]To whom correspondence should be addressed.
mjmaeng@dsc.ac.kr

삭에서 공구마모 메카니즘을 연구하였다. 공구마모에 기인한 표면거칠기의 증가는 스퍼스트 힘의 증가보다 다소 늦게 나타난다는 것을 실험적으로 증명하였다. 따라서 하드 터닝공정을 제어하기 위해 스퍼스트 힘을 모니터링 하는 것이 가능하다는 것을 나타내었다.

지금까지는 선삭 가공이라 함은 주로 원통가공에 중점을 두어 연구가 되었다. 일반적인 선삭가공 외에 단면 선삭시에도 바이트에 칩이 뒤엉킬 경우 작업자에 위협이 된다. 또한 제품의 품위에도 치명적인 손상을 일으키는 주요 원인이 된다. 본 연구에서는 단면 절삭시에 노우즈 반경의 변화에 따라 절삭 파라미터가 표면거칠기에 어느 정도나 영향을 미치는지 알아보기 위해 다구찌 방법에 기초하여 분석하였다. 표면거칠기는 이송속도의 크기와 공구의 노우즈 반지름에 따라 기하학적 파형을 형성하게 된다. 이론적 분석은 부절인각의 크기를 C_e 라고 한다면 이송속도가 비교적 작은 $f \leq 2r \sin C_e$ 의 경우 평균 표면거칠기는 $R_a = f^2 / 8r$ 으로 계산될 수 있다. 절삭 파라미터의 관점에서 살펴보면 절삭속도와 절삭 깊이에도 영향을 받을 뿐만 아니라 작업자가 제어할 수 없는 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다. 실제로 절삭 깊이가 증가할수록 빌트업 에지가 크게 되고 칩의 변형이 증가되어 칩은 전단형을 거쳐 균열형칩을 형성한다. 또한 공구의 측면과 피삭재 표면사이의 국부적인 압력의 영향에 의한 것으로 판단되는 압착효과는 마모된 공구를 사용하여 절삭하였을 때 명백하게 나타나게 되는데, 이것은 재료의 소성유동을 증가시킨다³⁾. 이러한 압착효과는 절삭깊이가 커짐에 따라 증가할 것으로 판단되며, 압착효과가 크게 작용할 경우 표면품위는 악화될 것이다. 표면거칠기에 미치는 이와 같은 복잡한 절삭 파라미터에 관한 영향을 분석하고자 한다.

따라서 노우즈 반경이 각각 다른 3종류 공구에 대하여 절삭인자와 이에 대한 각각의 인자를 3개 수준으로 구분하여 다구찌 방법에 기초하여 실험하였다. 또한 S/N비와 분산분석을 통해 각각의 노우즈 반경에 따른 최적 인자와 그 수준을 결정하고, 이에 따른 근거로 하여 회귀분석방법을 적용하여 표면거칠기 실험식을 제시 하였다.

2. 단면 선삭가공

비구면 렌즈의 금형은 CBN이나 다이아몬드 공구

를 이용하여 선삭 가공공정을 통하여 생산된다. 특히, 다이아몬드 공구를 이용한 선삭가공에서 중요한 것은 가공면의 표면거칠기와 각 제품에서 요구되는 치수의 형상정밀도를 향상시키고 새로운 재질의 가공물에 응용하는 기술을 개발하는 것이다. 이러한 비구면 렌즈와 반사경의 제작을 위해서는 제품 생산에 필요한 금형을 비구면으로 생산해야 한다. 지상 관측용 망원경에 이용되는 렌즈 반사경은 낮은 열팽창 계수를 가지는 세라믹 렌즈 개발, 혹은 경량의 렌즈 개발이 가능함에 따라 획기적인 전환점을 맞이하고 있다⁴⁾.

노우즈 반경이 크고 이송속도가 작으면 이론적으로 표면거칠기는 양호해진다. 절삭조건에 대한 실험적인 결과로는 피삭재가 칩으로부터 돌출길이 및 절삭속도가 작을수록, 이송속도가 클수록 절삭시스템은 채터에 대해 안정하다고 발표하였다⁵⁾. 변수를 노우즈 반경과 이송속도 두 가지로 고정할 경우 실제로 노우즈 반경이 무리하게 크대거나 이송속도가 과도하게 느리게 되면 채터 현상으로 표면품위는 오히려 악화된다. 따라서 실험 중 발생할 수 있는 채터 현상에 영향을 받지 않도록 칩으로부터 피삭재의 돌출길이를 짧게 하여 절삭실험을 수행하였다. 회전수가 일정한 경우, 단면 전체를 가공할 때 단면의 감소에 따라 절삭속도는 선형 감소하게 된다(Fig. 1)⁶⁾. 이때 절삭시간은 아래식과 같다.

$$Cutting\ time = \frac{D_2}{2fn} \tag{1}$$

여기서, f 는 이송속도, n 은 회전수이다. 일정한 절삭속도에서 단면 전체를 가공하는 것은 실제로 불가능하다. 단면 가공시에 공작물의 지름이 매우 작아지는 경우 절삭중에 회전수는 매우 높아야 한다. 절삭속도가 일정한 상태에서의 단면 선삭가공은 경우에 따라서 바이트의 이송이 지름 D_2 에서 D_1 까지에서만 수행될 수 있다. 따라서 절삭속도를 일정하게 하여 단면 선삭가공하기 위해서는 공작물의 지름을 고려하여 사용되는 기계의 최대 회전수 범위 내에서 사용하여야 한다. Fig. 1과 같이 일정한 절삭속도에서 D_2 부터 D_1 까지 단면을 가공할 때 절삭시간은 다음과 같다.

$$Cutting\ time = \frac{D_1^2 + D_2^2}{4000fv} \tag{2}$$

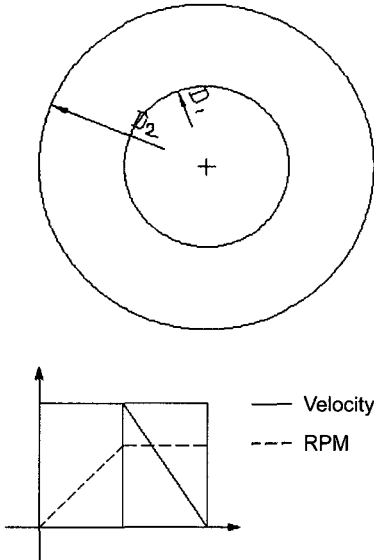


Fig. 1. Face turning of encircled surface. From D_2 to D_1 at $V = \text{constant}$ and from D_1 to D_0 at $N = \text{constant}$.

본 연구는 일반적인 원통 선삭가공과는 달리 절삭속도를 일정하게 하여 단면의 선삭가공을 통해 절삭품위에 영향을 미치는 파라미터에 관하여 분석하였다.

3. 다구찌 방법

노우즈 반경에 따른 단면 절삭 가공시에 절삭 파라미터가 표면거칠기에 미치는 영향을 다구찌 방법에 기초하여 수행하였다. 다구찌 방법은 최적화 기술을 위해 요구되는 대부분의 방법보다 훨씬 적은 노력으로 절삭 파라미터의 최적화를 위한 체계적이고 효율적인 방법론을 제공한다⁷⁾. 다구찌 방법에서 변수설계는 작업자가 제어할 수 없는 잡음에 둔감하도록 한다. 작업자가 제어할 수 없는 대표적인 잡음은 작업환경 영향을 예로 들 수 있다. 이와 같은 이유 때문에 실험결과에서 얻어진 절삭 파라미터의 영향이 다른 작업환경에서 적용하였을 때 완벽하게 똑같은 영향을 미칠 것이라고 예상 할 수 없다. 결과적으로 작업자가 제어하지 못하는 인자들로 인해 결과에 미소한 차이가 발생할 수 있다는 것이다. 다구찌 방법에 기초한 최적의 표면거칠기를 얻기 위한 목적으로 수행되었다. 표면거칠기는 그 값이 작을수록 결과적으로 표면품위는 향상되는 것이므로 손실함수는 망소특성으로 하였다. 표면거칠기에 대한 S/N비 값은 크게 나타나는 것이 좋으며, S/N비 의

미는 아래와 같다.

$$S/N = \frac{\text{Power of Signal}}{\text{Power of Noise}} \quad (3)$$

S/N비는 신호대 잡음의 비율이며, 인자들에 관한 최적의 설계를 위해서는 실험의 특성치에 영향을 크게 미치는 인자와 그 수준을 결정하고 결정된 인자들에 대하여 작업자가 제어할 수 없는 인자들에 의한 잡음의 영향을 최소화 하여 최적의 특성치를 얻고자 하는 것이다. 따라서 S/N비의 값이 크면 클수록 잡음에 둔감하다고 할 수 있다. 데이터의 반복적인 측정값을 y_1, y_2, \dots, y_n 라 할 때 MSD(mean squared deviation)는 다음 식으로 나타낸다.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (4)$$

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

$$S/N = -10 \log(MSD) \quad (5)$$

실험 후에 표면거칠기에 영향을 주는 요인을 분석하기 위한 방법으로 분산분석(ANOVA)을 이용하여 통계적으로 분석하였다. 본 연구에서는 S/N비와 분산분석을 한 후 최적수준의 조합을 선정하였다.

4. 직교배열에 의한 실험

본 연구는 시편을 SM45C로 사용하였으며 절삭공구는 드로우 어웨이 형식인 초경팁 SNMG 1204를 사용하여 CNC선반(Lynx 200A)에서 절삭실험을 수행하였다. Fig. 2는 실험에 사용한 절삭모드를 나타낸다. 실험은 절삭유를 사용하지 않는 건식 절삭방식에 의해 수행하였으며 사용한 드로우 어웨이 팁은 한번 사용 후 새로운 팁을 사용하여 미소한 공구마모에 의한 영향을 받지 않도록 하였다. 절삭가공시 발생하는 칩은 회전중인 피삭재와 바이트에 얽혀 작업자의 작업환경을 위협하는 요소로 작용하고 있다. 본 연구에서도 그러한 경우가 종종 발생하였고 이러한 경우는 피삭재의 표면에 영향을 주어 결국 실험데이터에도 영향을 미치므로 칩이 피삭재에 감기는 경우는 다시 실험을 하여 실험데이터에 영향을 주지 않도록 하였다.

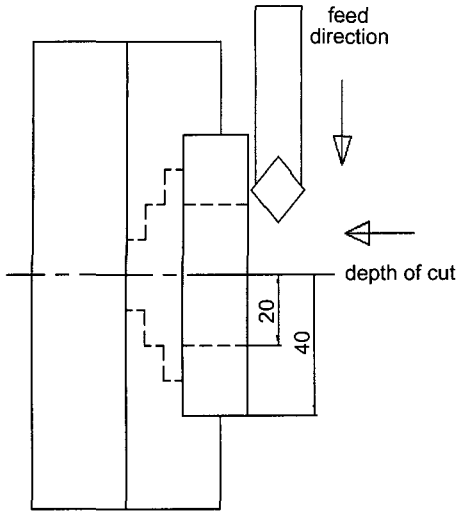


Fig. 2. Cutting mode.

Table 1. Cutting parameters and their levels

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

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

Experimental number	Cutting parameter level			
	A	B	C	D
	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

Table 1은 제어인자로서 실험에 사용된 절삭조건이다. 절삭인자와 인자들에 대한 수준을 3수준으로 나타내었다. 낮은 수준, 중간 수준, 높은 수준을 각각 level 1, level 2, level 3으로 표현하였다. 노우즈 반경에 따른 표면거칠기의 영향을 분석하기 위해 본 연구에서 사용된 노우즈 반경은 0.4, 0.8, 1.2mm로 하였다. Table 2는 실험에 사용된 직교배열표이다. 절삭파라미터는 이송속도, 절삭속도, 절삭깊이를 사용하였다.

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

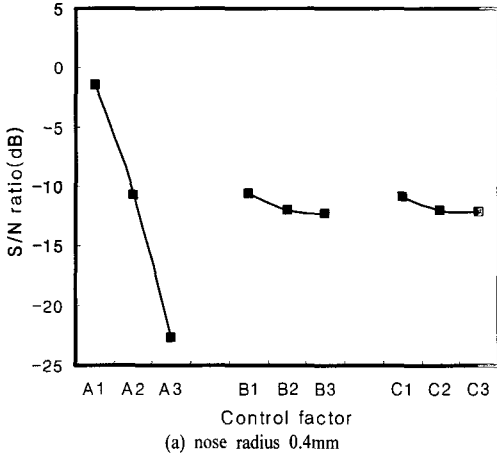
5. 실험결과 및 고찰

5.1. 신호대 잡음비(S/N Ratio)

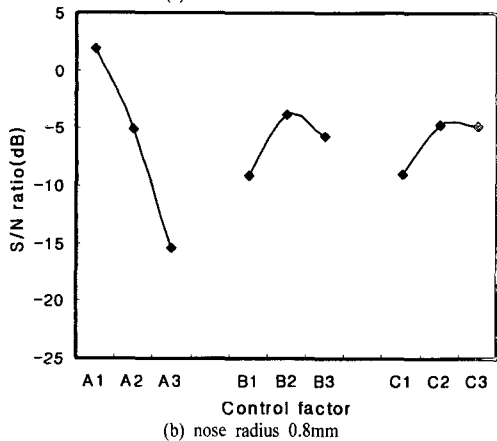
Table 3은 직교배열표에 따른 각각 노우즈 반경에 대한 가공 단면의 표면거칠기와 신호대 잡음비의 결과를 나타내고 있다. 실험에 사용된 인자들과 그 수준들에 대한 각각의 응답성을 표면거칠기에 따라 S/N비를 구하였다. 다구찌 방법에서 계산된 S/N비는 큰 값의 결과가 양호한 특성치로 나타난다. 노우즈 반경이 0.4, 0.8, 1.2mm일 때 각각 A1B1C1, A1B2C2, A1B3C3의 조합에서 최적의 표면품위를 나타낸다. 직교배열표에서 노우즈 반경에 따른 결과는 노우즈 반경이 0.8mm일 때 표면거칠기가 가장 양호하게 나타났다. 이러한 결과는 노우즈 반경이 작은 경우가 상대적으로 큰 노우즈 반경을 갖는 공구를 사용하였을 때 보다 선단 노우즈에 의해 피삭재에 남는 가공자국이 규칙적으로 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 또한 상대적으로 빠른 절삭속도 조건에서 공구의 노우즈 반경이 크면 피삭재와의 접촉면 증가로 채터 현상에 영향을 주어 표면거칠기가 불량하게 되는 결과를 초래할 것으로 판단된다.

Fig. 3(a,b,c)는 각각 노우즈 반지름에 대한 인자의 수준별 S/N비 값을 나타내고 있다. 그 결과 S/N비 값을 가장 크게 갖는 인자와 그 수준들의 조합은 0.4, 0.8, 1.2mm의 노우즈 반경에 대하여 각각 A1B1C1, A1B2C2, A1B3C2의 조합이다. 노우즈 반경이 0.4, 0.8mm인 경우에는 특성치에 관한 최적 조건이 직교배열 조건에서의 결과 및 인자의 수준별 S/N비 분석에서의 결과가 동일하게 나타났다. 그러나 1.2mm의 노우즈 반경을 갖는 경우에는 직교배열 조건

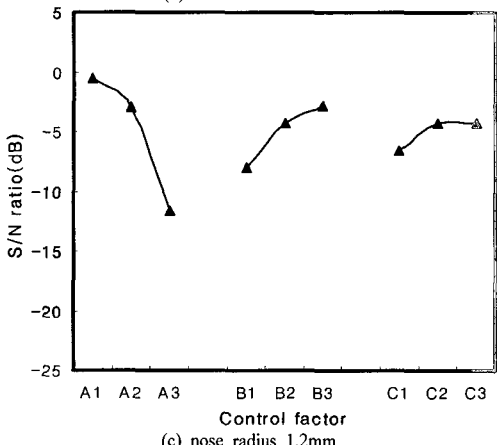
에서의 결과 S/N비와 인자의 수준별 S/N비 분석에서의 결과가 다르게 나타났다. 그러나 그 차이는 Fig. 3(c)의 결과에서도 알 수 있듯이 C2, C3의 S/N비의 값이 무시할 정도로 작게 나타났다.



(a) nose radius 0.4mm



(b) nose radius 0.8mm



(c) nose radius 1.2mm

Fig. 3. S/N ratio response graphs of factors for nose radius.

Table 4. Results of the ANOVE 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	1.17	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

5.2. 분산분석(ANOVA)

Table 4는 각각의 인자들이 특성값에 어느 정도의 영향을 미치는지를 나타내어주는 분산분석표이다. 여기서 검정통계량 F₀의 값의 크기는 수행 특성에 관한 중요성의 정도를 나타낸다. 각 인자에 대한 분석 결과를 살펴보면 이송속도, 절삭속도, 절삭깊이의 순서로 영향을 특성치에 미치는 것으로 분석되었다. 특히 이송속도는 다른 절삭조건에 비해 영향이 크게 작용하는 것으로 분석되었다. 절삭속도와 절삭깊이는 상대적으로 그 영향이 작음을 알 수 있다.

5.3. 진단실험

Fig. 3에 나타난 결과와 같이 최적의 표면거칠기를 얻기 위한 수준의 최적조건은 선택되었다. 선택된 각각의 제어인자들의 수준을 적용하여 데이터 분석으로부터 제어인자들의 최적결합이 품질 특성을 개선시킨다는 것을 예측하고 증명이 요구된다. 제어 인자들간의 선택된 최적수준으로부터 평가된 이론적인 S/N비는 아래 식에 의해 계산할 수 있다⁸⁾.

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^o (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (6)$$

여기서, η_m 은 실험에 적용된 전체평균 S/N비, $\bar{\eta}_i$ 는 제어 인자들의 최적수준에서 평균 S/N비, o 는 품질특성에 영향을 주는 주요 설계 파라미터의 수이다.

Table 5. Results 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

이론적인 S/N비를 근거로 하여 표면거칠기 값은 얻어진다. 직교배열표 및 인자의 수준별 S/N비 분석 결과에서 최적조건이 다르게 나타난 노우즈 반경 1.2mm의 경우를 대상으로 진단실험을 수행하였다. Table 5는 분석된 최적의 제어인자들의 수준을 적용하여 이론적으로 예측된 표면거칠기와 실험적인 방법으로 측정된 결과를 비교하여 나타내었다. 표면거칠기의 오차는 약 0.1μm 정도의 미미한 차이가 측정됨을 알 수 있다. 이상의 결과를 비교하면 단면 선삭 가공에서 최적의 표면품위를 얻기 위한 파라미터 분석에 적용된 다구찌 실험계획 방법은 상당히 유용하며 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

5.4. 모델화된 표면거칠기

실험결과를 근거로 회귀분석방법을 적용하여 표면거칠기 실험식을 제시하였다. 실험에 사용된 인자 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$R_a = C_R f^x v^y d^z \quad (7)$$

여기서, R_a 는 산술 평균으로서 평균 표면거칠기값을 의미한다. 또한 C_R , x , y , z 는 상수이다. 노우즈 반경에 대한 통계적인 표면거칠기 모델식을 각각 다음과 같이 도출하였다.

Nose radius : 0.4mm

$$\Rightarrow R_a = 26.7919 f^{1.7608} v^{0.1772} d^{0.1384} \quad (8)$$

Nose radius : 0.8mm

$$\Rightarrow R_a = 130.0735 f^{1.4476} v^{-0.3735} d^{-0.4404} \quad (9)$$

Nose radius : 1.2mm

$$\Rightarrow R_a = 144.5752 f^{0.9171} v^{-0.5671} d^{-0.2319} \quad (10)$$

6. 토 의

6.1. 안전에 미치는 S/N비의 영향

기본적인 외경절삭 외에 단면절삭의 경우에도 절삭공구에 칩이 엉켜서 회전하여 작업자에게 상처를 주는 일이 발생하므로 칩을 파단 시키는 방법을 반드시 고려해야 한다. 또한 품위에 영향을 미치는 표면조도를 양호하게 생성시키기 위해서는 유동형 칩의 생성과 동시에 칩브레이커에 의한 칩의 절단이 중요하다. 실험결과를 살펴보면 큰 값의 S/N비를 갖는 절삭조건에서는 이상적인 칩이 생성되었다. 이러한 실험을 바탕으로 절삭조건을 사용하면 칩이 뒤엉켜 작업자에게 위험을 초래하는 원인으로부터 벗어날 수 있을 것으로 사료된다.

7. 결 론

본 연구는 다구찌 방법에 기초하여 노우즈 반경 변화에 따른 단면 선삭 가공 실험을 수행하여 각각 제어인자들의 특성치인 표면거칠기에 미치는 영향을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 직교배열표 조건의 결과는 노우즈 반경이 0.4, 0.8, 1.2mm일 때 각각 A1B1C1, A1B2C2, A1B3C3의 조합에서 가장 좋은 표면품위를 얻었다.

2) S/N비 분석결과는 노우즈 반경이 0.4, 0.8mm인 경우에는 표면품위에 관한 최적 조건이 직교배열 조건에서의 결과가 동일하게 나타났지만, 1.2mm 노우즈 반경을 갖는 경우에는 직교배열 조건에서의 결과와 인자의 수준별 S/N비 분석결과의 차이는 미미하게 나타났다.

3) 직교 배열표와 S/N비 분석결과에서 도출한 최적조건이 다르게 나타난 노우즈 반경 1.2mm의 경우를 대상으로 진단실험을 수행한 결과 표면거칠기의 오차는 약 0.1μm 정도의 미미한 차이가 측정되었다.

4) 인자들 간의 영향은 원통절삭에서와 같이 이송속도의 영향이 가장 크게 나타난다. 절삭깊이와 절삭속도는 표면거칠기에 영향을 미치지 못하며, 이것은 이론적인 식 $R_a = f^2 / 8r$ 과 일치된다.

5) 노우즈 반경에 대한 통계적인 표면거칠기 모델 계산식을 도출하였다.

참고문헌

- 1) Agha, S. R., and Liu, C. R., "Experimental study on the performance of super finish hard turned surfaces

- in rolling contact”, *Wear*, Vol. 244, pp. 52~59, 2000.
- 2) Poulachon, G., Moisan, A., and Jawahir, I. S., “Tool-wear mechanism in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools”, *Wear*, Vol. 250, pp. 576~586, 2001.
 - 3) Kishawy, H. A., and Elbestawi, M. A., “Effects of process parameters on material side flow during hard turning”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 1017~1030, 1999.
 - 4) Kim, G. H., Go, J. B., Kim, H. B., and Won, J. H., “A Study of Aluminum Reflector Manufacturing in Diamond Turning Machine”, *KSMTE*, Vol. 11, No. 4, pp. 1~5, 2002.
 - 5) Nam, Y. S., Cho, J. R., Kim, C. S., and Jung, Y. G., “Monitoring of Chatter Vibration using Neural Network in Turning Operation”, *KSPE*, Vol. 18, No. 4, pp. 72~77, 2001.
 - 6) Kuljanic, E., “Face Turning on CNC Lathe”, *Annals of the CIRP*, Vol. 40, 1991.
 - 7) Yang, W. H., and Tarng, Y. S., “Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, pp. 122~129, 1998.
 - 8) Hong, M. S., and Lian, Z. M., “The optimal selection of cutting parameters in turning operations”, *Transaction of NAMRI/SME*, Vol. XXIX, pp. 319~325, 2001.