

다구찌 방법을 이용한 Inconel 718 소재의 선삭가공에서 표면거칠기 최적화

차진훈*, 한상보⁺

(논문접수일 2009. 7. 9, 심사완료일 2010. 3. 08)

Searching Optimal Cutting Condition for Surface Roughness in Turning Operation on Inconel 718 using Taguchi Method

Jinhoon Cha*, Sangbo Han⁺

Abstract

Inconel 718 alloy, widely used as material of aircraft engine, has a good mechanical property in high temperature, strong anti-oxidation characteristics in oxidated current over 900°C, and also is not easily digested in the air containing sulfur, therefore, its usage as mechanical component is expanding rapidly. Even though Inconel alloy 718 is difficult to machine, it requires highly precise processing/machining to sustain its component quality of high accuracy. In this paper, general turning operation conditions are tested to select the best cutting process condition by measuring surface roughness through implementing experiments with orthogonal array of cutting speed, feeding speed and cutting depth as processing parameters based on the Taguchi method. Optimal turning operation conditions are extracted from the proposed experimental models.

Key Words : Optimal cutting condition(최적 절삭 조건), Taguchi method(다구찌 방법), Orthogonal array(직교 배열), SN ratio(신호 대 잡음비), Turning operation(선삭가공), ANOVA(분산분석)

1. 서론

항공·우주산업과 해양산업의 중요 구성요소인 엔진·터빈 등의 제작에는 고정밀도, 고신뢰도, 고강도, 내부식성, 내마

모성, 우수한 내열성 등의 다양한 요구조건을 필요로 하는 부품·소재 사용 요구가 증가하고, 이러한 다양한 요구조건을 만족하는 부품·소재의 생산을 위해 다양한 기능성 재료들의 개발이 이루어져 산업 전반에 사용되고 있지만 개발된 재료

* 경남대학교 대학원 (hiturbo@Kyungnam.ac.kr)
주소: 631-701 경남 마산시 월영2동 449

+ 경남대학교 기계자동화공학부

들은 대부분은 절삭성이 떨어지는 난삭재라는 단점이 있다.

이러한 다양한 난삭재중 항공기 엔진 부품 소재로 사용이 늘어나고 있는 초내열합금인 Inconel 718 합금은 정밀도 향상을 위해 실시하게 되는 절삭가공시 공작물과 공구의 마찰에 의해 발생되는 고온의 절삭온도로 인하여, 생산 부품 소재가 경화되고, 큰 열 변형이 발생하여 공구의 수명이 단축되는 등의 다양하고 복잡한 문제가 가공시에 발생된다.

이러한 Inconel 718합금의 절삭가공시의 문제점 해결을 위해, 절삭공구의 변경으로 가공성을 개선하거나, 특수 가공법인 고속가공법, 고온가공법, 저온가공법 등을 이용하여 가공하거나, 동일계열 합금소재의 가공 특성을 통해 가공성을 유추하기도 하였다.⁽¹⁻⁶⁾

하지만 이러한 연구노력의 결과를 산업 현장에 적용하기 위해서는 생산 공정의 변경, 생산단가 상승 등의 문제점을 가지고 있어 효율성이 떨어짐으로 인해 일반 상용선삭 가공에서의 최적의 절삭가공조건을 도출이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 절삭가공의 우수성 평가지표로 사용되는 표면거칠기를 측정, 분석하여 Inconel 718 합금의 상용 선삭가공에서의 최적 가공 조건을 선정 하고자 한다.

하지만 절삭가공시 표면거칠기는 절삭속도, 절삭깊이, 이송비, 절삭공구의 종류, 절삭유 사용유무 등의 제어 가능한 파라미터와 작업자의 숙련도같이 제어 불가능한 파라미터들이 표면거칠기에 영향을 미침이 알려져 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

따라서 본 연구에서는 제어 가능한 파라미터인 절삭속도, 이송비, 절삭깊이가 표면거칠기에 미치는 상대적인 민감도를 알아보기 위하여, 다구찌 실험 계획법에 기초한 직교배열표를 작성 하고, SN비의 분산분석(ANOVA)을 통하여 절삭에 관여 하는 파라미터들의 각각의 민감도를 예측하고, 최적의 성능을 가지는 가공 조건을 선정 하고자 한다.

2. 실험 계획법

2.1 다구찌 방법

여러 가지 실험 계획법 중 다구찌 방법은 최적화 기술을 위해 요구되는 대부분의 방법보다 적은 노력으로 절삭 파라미터의 최적화를 위한 체계적이고 효율적인 방법론을 제공한다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

다구찌 방법은 기존의 제어 불가능한 파라미터로 인식되었던 환경조건, 기계적 오차나 잡음 등의 제어가 어려운 파라미터들이 실험 결과에 미치는 영향을 객관적이고 정량적으로 평가가 가능하다. 따라서 본 연구는 다구찌 방법에 기초하여 최적의 표면거칠기를 얻기 위한 목적으로 수행하였

으며, 표면거칠기는 그 값이 작을수록 결과적으로 표면상태는 향상되는 것이므로 손실함수는 망소특성(Smaller-the-better characteristics)으로 하였다.

표면거칠기에 대한 신호대 잡음비인 SN비의 값은 크게 나타나는 것이 좋으며, SN비는 유효한 신호를 잡음으로 나는 비로써 아래의 식 (1)과 같이 표현된다. 따라서 SN비의 값이 클수록 잡음에 둔감하고, 반대로 SN비의 값이 작을수록 잡음에 민감하다.

$$SN = \frac{\text{Power of Signal}}{\text{Power of Noise}} \quad (1)$$

반복 실험 측정 결과인 측정 데이터 값을 y_1, y_2, \dots, y_n 라 할 때 MSD(Mean Squared Deviation)는 식 (2)와 같이 표현 된다.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - 0)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2)$$

여기서 n 는 실험의 수, y_i 는 i 차 실험에서 실험값이다. 손실함수를 망소특성으로 간주하였으므로 SN비는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$SN = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) = -10 \log(MSD) \quad (3)$$

3. 선삭 가공 실험

3.1 Inconel 소재

Ni 합금인 Inconel계열 합금은 내열성이 우수하고, 경도 및 강도의 우수성과 합금 조성비의 조절로 다양한 특성을 가지는 제품들 생산이 가능함으로 인해서, 고가이고 난삭재라는 결점이 있음에도 항공 우주분야에서의 수요가 증가하고 있다.

그중 Inconel 718 합금은 화학적 조성이 Ni를 기반으로, 18%정도의 크롬, 18%의 철, 1%의 티탄, 1% 이하의 알루미늄-망간-구소로 이루어져 있고, 신장-인장강도-항복점등 여러 기계적 성질이 600°C 정도까지 대부분 변화하지 않는 등의 우수한 기계적 성질을 가지고 있고, 유기물-염류용액에 대해서도 부식이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 아래의 Table 1은 실험에 사용된 Inconel 718 합금의 합금 성분 조성비를 나타내고, Table 2는 기계적인 특성을 나타내고 있다.

Table 1 Chemical composition of Inconel 718 alloy (Wt)

Element	Wt(%)	Element	Wt(%)
Ni	Bal.	Mn	0.077
Cr	17.76	Al	0.42
Si	0.07	Ti	1.02
Mo	3.00	Nb	5.12
Co	0.35	Ta	
C	<0.02	Fe	18.20

Table 2 Material properties of Inconel 718 alloy

Material Properties	Unit	
Tensile strength	MPa	1310
Yield strength (0.2% offset)	MPa	1110
Elastic modulus	GPa	206
Hardness	HRC	38
Density	g/cm^2	8.19
Melting Temp.	$^{\circ}C$	1300
Thermal conductivity	W/mK	11.2

3.2 실험 방법 및 조건

Fig. 1은 실험에 사용된 CNC선반이고, 상용 선삭가공에서의 표면거칠기는 일반적으로 절삭속도, 이송비, 절삭깊이, 공구의 노우즈 반경 등과 같은 절삭 파라미터들이 영향을 미침이 알려져 있으므로 4개의 독립변수를 이용하여 상용 선삭에서 표면거칠기는 식 (4)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$R_a = f(v_c, v_f, a_f, r_e) \tag{4}$$

여기서 R_a 는 중심선 평균거칠기(μm), v_c 는 절삭속도(m/min), a_f 는 절삭깊이(mm), v_f 는 이송 $lathe$ (mm/rev), r_e 는 공구 노우즈 반경(mm)을 나타낸다. 본 실험에서는 절삭 인서트의 노우즈 반경이 표면거칠기에 미치는 영향은 무시하기 위하여 가공시 마다 새로운 인서트를 사용하여 동일한 실험 조건을 유지하였으며, 인서트의 파괴나 공구결손이 일어난 경우의 실험 결과는 제외 하였다.

실험에 사용된 공구는 초경합금 인서트(CNMA 1204)와 공구 홀더(PCLNR/L 2525M-12)이고, 자세한 실험 조건은 Table 3에 나타내었다. 절삭 조건의 수준 선정은 기존의 Inconel 계열 합금 관련 연구를 바탕으로 선정 하였다.

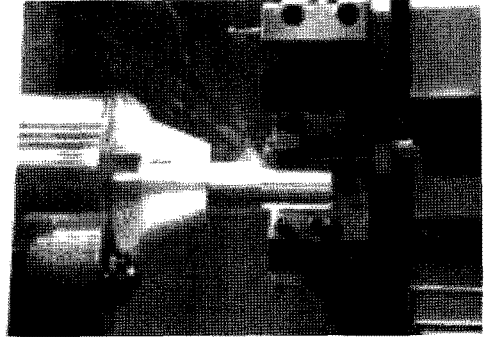


Fig. 1 Photograph of experimental with CNC

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed	80, 100, 120 (m/min)
Feed rate	0.02, 0.04, 0.06 (mm/rev)
Depth of cut	0.1, 0.3, 0.5 (mm)
Tool holder	PCLNR/L 2525M-12
Insert	CNMA 1204
Nose radius	0.8mm

Table 4 Cutting parameters and their levels

Sym.	Cutting parameters	Unit	L1	L2	L3
A	Cutting speed	m/min	80	100	120
B	Feed rate	mm/rev	0.02	0.04	0.06
C	Depths of cut	mm	0.1	0.3	0.5

표면거칠기 측정을 위해 Mitutoyo사 SurfTest SJ-301 모델을 사용하였으며, 측정 기준은 일본 공업 규격인 JIS2001을 적용하였다.

프루브의 이동 속도는 0.5mm/sec 이고, 샘플링 길이는 0.8mm이고, Cut off값은 0.8mm이며, 평가 길이는 4.0mm이다.

3.3 파라미터 선정 및 측정

다구찌 방법에 기초한 실험 계획을 작성하기 위하여 Table 4는 여러 가지 절삭 파라미터 중 제어 가능한 선정 파라미터와 선정 파라미터들의 각각의 수준을 보여주고 있다. 낮은 수준은 level 1(L1), 중간수준은 level 2(L2) 그리고 높은 수준은 level 3(L3)로 표현하였다. 실험에 적용된 각각의 파라미터들이 가지는 수준에 대한 응답성을 표면거칠기의 값으로 얻었다.

4. 실험 결과

4.1 SN비

Table 5는 절삭 파라미터들의 수준에 따른 주효과를 알아보기 위하여 작성한 직교 배열표와 표면거칠기 측정 결과에 따른 SN비를 나타내고 있다.

측정된 표면거칠기 값을 식 (2)와 (3)을 이용하여 신호대 잡음비인 SN비를 계산 하였으며, 절삭파라미터들의 수준은 Table 4와 같이 3개의 수준으로 하고 각 파라미터들 사이에는 교호작용이 없는 것으로 예상하여 만든 3수준 최소 직교 배열이다. 실험번호가 실험순서를 의미하지는 않는데 이는 다구찌 방법의 기본적인 조건으로 실험순서는 랜덤 하게 실시하였다.

Table 6은 각 파라미터들인 절삭속도(A), 이송비(B), 절삭깊이(C)의 각각의 수준에서의 SN비 평균이고, Fig. 2는 SN비의 주효과를 보여주고 있다.

Fig. 2와 Table 6을 살펴보면 절삭깊이(C) 파라미터가 가장 큰 민감도를 가지고 있음을 알 수 있고, 절삭속도 파라미터(A)의 민감도는 상대적으로 적음을 알 수 있다.

Table 7은 측정된 SN비의 분산분석표이고, 이를 통해 표

면거칠기의 변화에 절삭속도(A), 이송비(B), 절삭깊이(C) 모두가 유효한 영향을 미침을 알 수 있는데, 절삭속도의 경우 95%(F(0.05) = 19)내에서, 나머지 두 파라미터인 이송비와 절삭깊이는 99%(F(0.01) = 99)내에서 유효함을 알 수 있다.

본 연구에서 손실함수를 망소특성을 가지는 표면거칠기로 선정하였으므로 각각의 파라미터들의 SN비가 큰 조건의 조합인 A1B1C1이 가장 우수한 표면거칠기를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 2 S/N ratio response graphs of factors for surface roughness

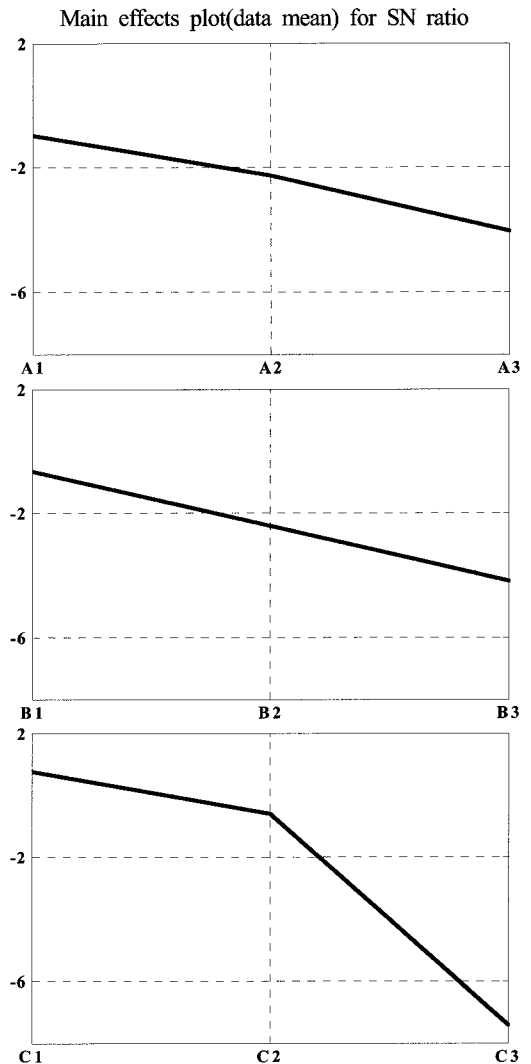


Table 5 Orthogonal array of $L_9(3^4)$

Exper. No.	Factor				SN Ratio
	A	B	Error	C	
1	1	1	1	1	3.7417
2	1	2	2	2	1.1103
3	1	3	3	3	-7.7121
4	2	1	2	3	-5.2490
5	2	2	3	1	0.9151
6	2	3	1	2	-2.4115
7	3	1	3	2	-0.4238
8	3	2	1	3	-9.2480
9	3	3	2	1	-2.4115

Table 6 Average SN ratio for each level

	A	B	C
1	-0.9534	-0.6437	0.7484
2	-2.2485	-2.4075	-0.5750
3	-4.0278	-4.1784	-7.4030
Total	-7.2296	-7.2296	-7.2296

Table 7 ANOVA for SN ration of surface roughness

factor	S	ϕ	V	F0	Contribution (%)
A	14.30	2	7.148	45.73*	4.98
B	157.76	2	78.879	504.63**	54.93
C	114.82	2	57.410	367.29**	39.99
error	0.31	2	0.156		0.10
Total	287.19	8			100

* : It is significant at 95% Confidence level

** : It is significant at 99% Confidence level

4.2 SN비 추정 및 검증

각 파라미터들의 S/N비의 추정치는 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(A1B1C1) &= \mu + \hat{a}_1 + \hat{b}_1 + \hat{c}_1 \\ &= \hat{\mu} + \hat{a}_1 + \hat{\mu} + \hat{b}_1 + \hat{\mu} + \hat{c}_1 - 2\hat{\mu} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\hat{\mu}$ 는 전체 평균을, \hat{a} , \hat{b} , \hat{c} 는 각 파라미터의 주효과를 의미한다. 최적의 가공 조건으로 판단되어지는 가공 조건 A1B1C1의 평균 SN비는 1.561이고, 절삭깊이(C)를 변화시킨 A1B1C2의 SN비는 0.238이다. 따라서 두 실험 사이의 SN비의 차이는 $1.561 - 0.238 = 1.323$ 이 되고, 1.2756배 만큼 성능이 떨어짐을 알 수 있고, A1B1C3일때의 SN비를 유추하여 보면 -6.590이고 최적 가공 조건 일때와 비교하면 6.53배 거칠어짐을 예상 할 수 있다.

이송비(B)의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 예상해 보면 A1B2C1일 때 SN비 변화는 1.764, A1B3C1일 때 SN비 변화는 0.412이므로 각각 1.494배와 1.101배 거칠어짐을 추정할 수 있다.

다구찌 방법 실험으로 추정한 결과의 검증을 위하여 A1B2C1의 조건으로 실제 가공을 실시한 후 추정치와 비교한 결과가 Table 8에 주어져 있다. 통계적인 표면거칠기 추정치가 $1.15\mu\text{m}$ 이고, 실제 실험을 통해 측정된 값은 $1.09\mu\text{m}$ 로 실제 실험결과에서 추정치 보다 약간 우수하게 나타났다으나 그 차이는 미미함을 알 수 있다.

5. 결론

항공기 엔진 부품-소재로 사용이 증가 하고 있는 Inconel

Table 8 Result of the confirmation experiment for surface roughness

Factor Level	Cutting parameter	
	Prediction	Experiment
Surface Roughness	1.15	1.09
S/N ratio(dB)	-1.188	-0.749

718 합금의 상용 선삭가공에서 최적 표면거칠기를 얻기 위한 다구찌 방법을 이용한 실험에서 각 파라미터들이 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보고 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 다구찌 방법을 통해서 Inconel 718 합금 소재의 선삭가공에서 표면거칠기에 영향을 미치는 파라미터들의 상대적 민감도를 알 수 있었다.
- (2) Inconel 718 합금의 상용 선삭 가공시, 절삭깊이를 0.1mm에서 0.3mm로 변경할 경우 표면 거칠기는 1.323배 거칠어지고, 0.5mm로 변경 할 경우 6.53배 거칠어짐을 예측 할 수 있다.
- (3) Inconel 718 합금의 선삭 가공시, 이송비를 0.02mm/rev에서 0.04mm/rev로 변경할 경우 표면 거칠기는 1.497배 거칠어지고, 0.06mm/rev로 변경 할 경우 1.01배 거칠어짐을 예측 할 수 있다.
- (4) 직교배열표를 이용하여 실험의 수를 최소한으로 줄일 수 있고, 실제 실험을 실시하여 얻은 SN비가 95%내의 신뢰구간에 존재함으로써 실험계획법 적용 실험의 유효성을 검증 하였다.
- (5) 본 연구의 결과를 활용하면, Inconel 718 합금 소재의 상용 선삭 가공에서 제품의 요구 표면거칠기를 만족하는 가공 조건의 예측 가공에 적용할 수 있다.

후기

본 연구는 2009학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원으로 이루어졌음.

참고 문헌

- (1) Hwang K. C., Yoon, J. H., Choi, J. H., and Kim, S. C., 2002, "Machinability Characteristics of Inconel 690 Alloys," *The Korean Society of Machine Tool Engineers Spring Conference*, Vol. 11, pp. 87~94.

- (2) Kim, S. W., Park, H. B., Lee, D. W., and Kim, J. S., 1998, "Evaluation on High-Speed Machining of Inconel 718," *Korean Society for Precision Engineering, Spring Conference*, pp. 182~185.
- (3) G. Appa Rao, M. Srinivas, D. S. Sarma, 2004, "Effect of thermomechanical working on the microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superally Inconel 718," *Materials Science and Engineering A* 383, pp. 201~212.
- (4) Adrian Sharman, Richard C. Dewes, David K. Aspimwall, 2001, "Tool Life when high speed mill nose end milling Inconel 718," *Journal of Materials Processing Technology* 118, pp. 29~35.
- (5) Choi, H. S., Ko, D. C., and Kim, B. M., 2007, "Variation of microstructures and mechanical properties of hot heading process of super heat resisting alloy Inconel 718," *KSME, Spring Conference* pp. 362~367.
- (6) Kwon, H. W., Kang, I. S., Kim, J. S., Moon, S. J., and Kim, K. T., 2008, "Machinability evaluation of Inconel 718 by characteristics analysis of tool life," *Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Spring Conference*, pp. 219~213.
- (7) Choi, J., H., 2008, "Improvement of Surface Roughness by the Cutting Speed Control for Turning Operation," *Journal of the The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 7, No. 2, pp. 23~30.
- (8) Chung, E. S., and Suk, N. G., 1982, "A Study on the Dynamic Component of Cutting Force in Turning[I] - Recognition of Chip Flow by the Dynamic Cutting Force Component," *Korean Society for Precision*, Vol. 5, No. 1, pp. 84~93.
- (9) Ha, S. K., and Lee, G. J., 1999, "A Study on the Effects of Cutting Resistance and Surface Roughness in Turning," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 5, pp. 47~53.
- (10) Lim, J. S., Chung, W. J., and Lee, C. M., 2003, "Selection of Bearing Position for Improving Static and Dynamic Stiffness of 40,000rpm High-speed Spindle," *Journal of the The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 8 No. 1, pp. 10~17.
- (11) Jang, S. M., and Cho, M. W., 2003, "A Study on the effect of cutting parameters in face turning based on the Taguchi method," *The Korean Society of Machine Tool Engineers, Spring Conference*, pp. 111~116.
- (12) Lim, P., and Yang, G. E., 2006, "Optimal Cutting Condition of Tool Life in the High Speed Machining by Taguchi Design of Experiments," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 5, No. 4, pp. 59~64.