

# 실험계획법을 이용한 인서트 종류에 따른 Inconel 718 선삭가공조건 최적화

신필선\*, 김재경\*\*, 전의식\*<sup>\*,\*\*,#</sup>

\*공주대학교 기전공학과, \*\*공주대학교 생산기술연구소

## Optimization of the Turning Conditions of Inconel 718 according to Insert Materials using DOE

Pil-Seon Shin<sup>\*</sup>, Jae-Kyung Kim<sup>\*\*</sup>, Euy-Sik Jeon<sup>\*<sup>\*,\*\*</sup>,#</sup>

<sup>\*</sup>Department of Mechanical and Electrical Engineering, Kongju National UNIV.,

<sup>\*\*</sup>Industrial Technology Research Institute, Kongju National UNIV.,

(Received 09 June 2022; received in revised form 04 July 2022; accepted 13 July 2022)

### ABSTRACT

Inconel 718 is nickel-based and is increasingly being used as a key component in the nuclear, aerospace, and chemical industries which require high fatigue strength and oxidation, because of its excellent corrosion resistance, heat resistance, and wear resistance. It is a heat-resistant alloy which has excellent mechanical properties; however, material deformation, cracking, and shaking occur because of the high cutting temperature accumulated on the cutting surface during cutting processing, and heat accumulated at the insert boundary. Owing to these characteristics, various studies have been conducted, such as developing a tool exclusively for non-deletion, analyzing tool wear, and developing a tool cooling system. However, the optimization of the cutting process is still insufficient. In this study, the optimal process conditions were derived experimentally by cutting conditions according to the insert type during the cutting of Inconel 718.

Keywords : Turning Process(선삭공정), Inconel 718(인코넬 718), Ceramic Inserts(세라믹 인서트), Carbide Inserts(초경 인서트), DOE(실험계획법)

### 1. 서 론

Inconel 718 소재는 높은 내열성 및 내식성이 요구되는 첨단 산업에 사용이 점차 증가하고 있다. 저온에서 고온까지 우수한 인장강도, 피로강도, 크리프 파단 특성으로 우주항공, 원자력 반응기, 가스 터빈의 핵심 부품에 필수적으로 적용되고 있다<sup>[1]</sup>. Inconel 718에 대한 선삭 가공은 인서트 경계부에서 집중된 마찰로

접촉면에 높은 열이 발생한다. 이로 인해 가공경화가 발생하며 인서트 노즈부의 소성변형, 코팅층의 박리, 열 균열에 의한 경계 마모를 급속하게 발생시킨다. 이는 가공물의 정밀도에 큰 오차를 발생시키며 낮은 가공품질의 발생으로 이어짐에 따라 높은 생산 비용을 야기시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 마이크로 경도 측정을 통한 경계 마모 분석과 액화질소를 이용한 극저온 가공에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다<sup>[2-4]</sup>. 이러한 연구들은 일반적으로 초경합금 인서트를 이용하여 연구가 수행되었으며 최근에는, 세라믹 인서트를 이용한 가공으로 비용을 줄이고 재료

# Corresponding Author : osjun@kongju.ac.kr

Tel: +82-41-521-9284

특성 개선과 다양한 재료의 절단에서 세라믹 도구의 성능을 조사하기 위해 많은 연구가 수행되고 있다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서는 Inconel 718의 선삭 가공 시 가공 공정조건이 재료의 가공성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험계획법을 이용하여 최소의 실험을 수행하였으며 인서트 소재에 따른 회귀식 도출을 통해 가공성 향상을 위한 최적 공정 조건을 도출하였다<sup>[6]</sup>.

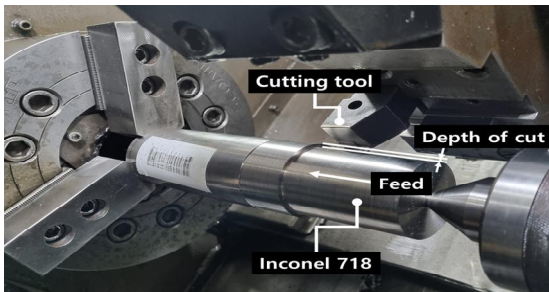
## 2. 실험대상 및 방법

### 2.1 실험장치 및 대상

Fig. 1은 실험에서 사용된 장비로 HWACHEON HI-EHCH 550 CNC선반을 이용하여 Ø51 Inconel 718 환봉을 세라믹 및 초경 인서트를 각 절삭조건에 대하여 선삭가공 실험을 하였다. Table 1, Table 2는 실험에 사용한 Inconel 718의 기계적 성질과 화학적 성질을 나타낸다. Fig. 2는 실험에 사용한 인서트로 내열합금 가공용 세라믹 인서트(CNGN120408)와 초경합금 인서트(CNMG120408)를 나타낸다. 홀더는 (CCLNR2525M12)를 사용하였다.



(a) Horizontal turning center



(b) Experimental setup

Fig. 1 Horizontal turning center and experimental set up



Fig. 2 Cutting tool assembly

Table 1 Material Properties of Inconel 718 alloy<sup>[7]</sup>

Material Properties	Units	Value
Tensile strength	MPa	1,448
Yield strength	MPa	1,158
Elastic modulus	GPa	211
Hardness	HRc	38
Thermal conductivity	W/m·K	11.2

Table 2 Chemical composition of Inconel 718 alloy<sup>[8]</sup>

Element	Wt(%)	Element	Wt(%)
Ni	Bal.	Si	0.07
Cr	18.2	Co	0.35
Cr	17.75	C	0.02
Mo	3	Ti	1.02
Nb	5.21	Mn	0.07
Ta		Al	0.423

Table 3 Cutting conditions for experiment

Parameters		Carbide	Ceramic
Cutting velocity	$C_v$ (m/min)	25, 62.5, 100	100, 150, 200
	Feed rate	$F_r$ (mm/rev)	0.1, 0.15, 0.2
Depth of cut		$D_c$ (mm)	0.2, 0.5, 0.8
Tool holder		CCLNR 2525M12	
Insert		CNMG 1204	CNGN 1204
Nose radius(mm)		0.8	
Cutting fluid		none	

## 2.2 절삭조건 및 범위 설정

Inconel 718 선삭가공 기초 실험을 통하여 주요 공정 변수는 이송속도( $C_v$  : Cutting velocity), 절삭속도 ( $F_r$  : Feed rate), 절삭깊이( $D_c$  :Depth of cut)로 설정하였다. 인서트의 소재는 세라믹과 초경합금으로 설정하였으며 절삭력 평가를 위한 반응 변수로는 표면 거칠기와 원통도로 설정하였다. 표면 거칠기는 가공에서 중요한 매개변수로서 항공 우주, 자동차 산업 및 금형 제조와 같은 다양한 분야의 새로운 적용으로 인해 매우 극도로 표면 조도가 높은 제품에 대한 요구가 높아지고 있다<sup>[9]</sup>. 표면 거칠기 값이 낮으면 피로 강도 및 내식성과 같은 제품의 엔지니어링 특성을 향상시킬 수 있다<sup>[10]</sup>.

초경합금 인서트를 적용한 기초 시험에서 절삭속도 100m/min 이상의 빠른 절삭조건에서는 인서트 경계부의 Flank wear의 발생으로 인서트 여유면의 마모가 확인되었으며, 25m/min이하에서 절삭 접촉면에 집중되는 마찰력에 Micro Chipping 발생으로 공구 수명이 짧아졌다. 최소 25m/min에서 최대 100m/min으로 공정 범위를 설정하였다. 세라믹 인서트는 200m/min 이상에서 초기 인서트가 결손 하는 현상이 발생하고 100m/min이하에서는 초경보다 오히려 공구 수명의 단축되거나 세라믹의 취성 특성으로 인서트에서 불규칙한 파손이 발생한다. 최종적으로 세라믹 인서트를 이용한 가공 시 절삭속도를 최소 100m/min, 최대 200m/min으로 설정하였다. 그 외 이송속도와 절삭 깊이는 일반적으로 선삭 가공 시 적용되는 공정 범위로 설정하였다. Table 3은 실험을 위한 절삭 조건과 범위를 나타낸다.

## 2.3 반응표면분석법을 이용한 실험 설계

반응표면분석법 중 실험횟수를 줄이고 공정조건을 최적화하는데 많이 사용되는 Box-Behnken법을 이용하여 실험계획을 수립하였다. 기초 시험을 통해 도출된 주요 공정변수와 범위를 설정하였으며 절삭력 평가를 위한 반응변수로 표면 거칠기와 원통도를 적용하였다. 표면거칠기 측정에는 Mitutoyo사의 SurfTest ST-301 모델을 사용하여 Cut-off 0.5mm, 이송속도 0.5mm/s의 조건으로 측정길이 7mm, 간격 10mm로 3회 측정하여 평균 거칠기를 측정하였다. 원통도 측정에는 3차원 측정기(ABERLINK Zenith3 1500)를 이용

하여 원통시편의 24 Point를 측정 후 평균 원통도 값을 측정하였다.

실험은 중앙점 3점을 포함하여 총 15회의 실험을 계획하였으며 반복 3회를 실시하여 총 45회의 실험을 계획하고 수행하였다. 공정조건별 절삭 실험은 인서트를 교환하여 동일한 Tooling 조건으로 하였으며 절삭유를 사용하지 않는 건식 실험으로 실시하였다.

실험 결과를 토대로 공정변수와 절삭성 간의 상관관계를 분석하고 인서트 종류에 따라 가공성에 미치는 영향을 비교 분석하였다. Table 4는 Box-Behnken법을 이용한 실험 계획이며 Table 5와 6은 인서트 종류에 따른 실험 결과이다.

**Table 4 Experiment design using Box-Behnken method**

Standard order	$C_v$ [Carbide (Ceramic)]	$F_r$	$D_c$
1	25(100)	0.1	0.5
2	100(200)	0.1	0.5
3	25(100)	0.2	0.5
4	100(200)	0.2	0.5
5	25(100)	0.15	0.2
6	100(200)	0.15	0.2
7	25(100)	0.15	0.8
8	100(200)	0.15	0.8
9	62.5(150)	0.1	0.2
10	62.5(150)	0.2	0.2
11	62.5(150)	0.1	0.8
12	62.5(150)	0.2	0.8
13	62.5(150)	0.15	0.5
14	62.5(150)	0.15	0.5
15	62.5(150)	0.15	0.5

**Table 5 Experiment results by using carbide insert**

Standard order	Surface roughness( $\mu$ m)			Cylindricity( $\mu$ m)		
	1	2	3	1	2	3
1	1.658	1.599	1.625	24.2	23.1	25.8
2	1.446	1.486	1.450	11.8	12.8	15.6
3	2.839	2.916	2.908	26.8	24.8	24.4
4	3.785	3.685	3.655	27.0	32.1	28.9
5	1.888	1.925	1.984	12.2	11.0	17.9
6	1.120	1.082	1.098	13.9	15.8	18.6
7	1.892	1.988	1.805	13.2	11.4	17.7
8	1.207	1.198	1.191	18.4	22.1	19.3
9	2.839	2.899	2.893	29.3	30.0	32.2
10	3.207	3.301	3.208	18.2	19.0	19.1
11	1.891	1.925	1.978	19.1	16.3	17.7
12	2.901	2.750	2.889	28.2	24.9	27.1
13	1.479	1.452	1.488	29.8	29.6	27.4
14	1.768	1.815	1.799	18.9	18.1	21.4
15	1.704	1.715	1.729	25.1	21.9	21.0

**Table 6 Experiment results by using ceramic insert**

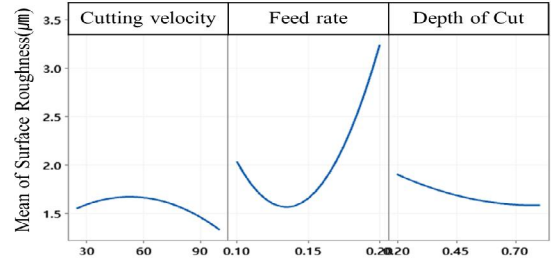
Standard order	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )			Cylindricity( $\mu\text{m}$ )		
	1	2	3	1	2	3
1	3.665	3.571	3.985	24.2	21.1	21.9
2	0.981	0.952	0.099	8.1	9.0	8.2
3	2.839	2.893	2.798	28.1	27.2	27.9
4	0.786	0.714	0.796	12.6	15.0	14.0
5	3.897	3.587	3.982	20.0	18.9	17.4
6	0.013	0.013	0.014	13.1	13.3	12.4
7	0.098	0.097	0.097	10.9	10.1	10.5
8	6.85	6.846	6.275	28.1	29.2	31.0
9	3.215	3.125	3.008	25.0	27.7	24.1
10	0.679	0.61	0.598	8.9	6.8	4.1
11	6.607	6.455	6.865	32.0	31.1	37.9
12	8.087	7.958	8.865	32.2	33.1	38.1
13	4.845	5.041	4.982	28.2	24.9	24.8
14	4.851	4.435	4.684	24.0	21.8	22.8
15	5.481	5.234	5.175	31.8	30.0	30.0

### 3. 결과 분석

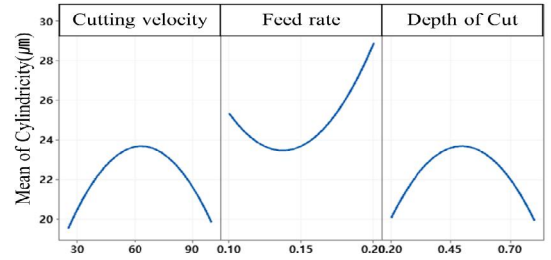
#### 3.1 초경 인서트 가공 결과 분석

초경 인서트를 이용한 가공 조건에 따른 Inconel 718 소재의 원통도와 조도 특성치 측정결과는 MINITAB을 이용하여 통계적 분석을 수행하였다. Fig. 3는 초경 인서트의 공정 조건이 조도와 원통도에 미치는 인자별 주효과도를 나타낸다. 이송속도가 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며 곡률효과가 있음을 알 수 있다. 이는 인서트 경계부에 집중된 마찰열로 인하여 경계부의 Cratering wear 발생으로 접촉면의 인선 마모에 의한 것으로 사료된다. 절삭속도는 원통도에 더 큰 곡률효과가 있으며 절삭 깊이는 조도와 원통도에 미치는 영향이 서로 상반되는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 인자간 교호작용을 나타내며 절삭속도와 이송속도, 이송속도와 절삭 깊이의 교호작용이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 절삭속도가 빠르고 이송속도가 느려 질수록 인서트에 전달되는 마찰열과 압력이 감소하여 조도는 더욱 정밀해지는 기술키가 커지는 것을 알 수 있다. 반면, 원통도에서는 절삭속도가 커질수록 원통도가 증가하다 감소하는 변곡점이 발생함을 알 수 있다. 이송속도와 절삭깊이의 교호작용은 조도에 큰 영향이 없으나 원통도에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 이송속도는 절삭 깊이에 따라 발생하는 변곡점의 위치가 완전히 상반되며 이는 가

공할 때 각별히 주의해야 할 것으로 사료된다.

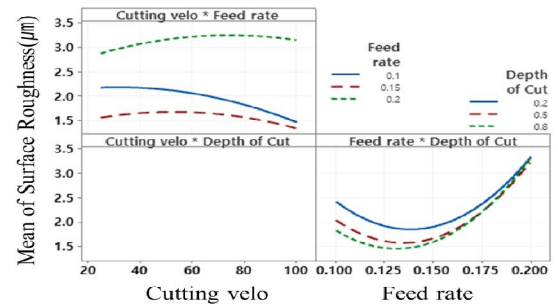


(a) Surface roughness

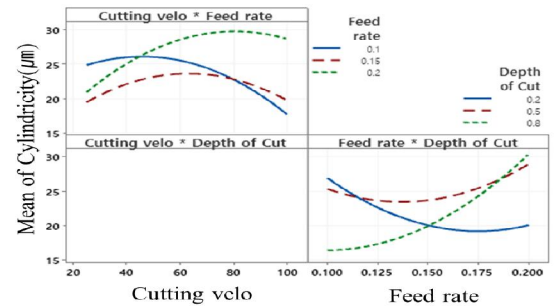


(b) Cylindricity

**Fig. 3 Main effect plot with carbide insert**



(a) Surface roughness



(b) Cylindricity

**Fig. 4 Interaction plot with carbide insert**

**Table 7 ANOVA for surface roughness with carbide insert**

Source	DF <sup>1)</sup>	Adj SS <sup>2)</sup>	Adj MS <sup>3)</sup>	F-Value <sup>4)</sup>	P-Value <sup>5)</sup>
Model	8	21.9510	2.7439	21.31	0.000
Linear	3	9.4839	3.1613	24.55	0.000
C <sub>v</sub>	1	0.2869	0.2869	2.23	0.144
F <sub>r</sub>	1	8.5861	8.5861	<b>66.69</b>	0.000
D <sub>c</sub>	1	0.6109	0.6109	4.74	0.036
Square	3	11.5061	3.8354	29.79	0.000
C <sub>v</sub> ×C <sub>v</sub>	1	0.5166	0.5166	4.01	0.053
F <sub>r</sub> ×F <sub>r</sub>	1	10.5507	10.5507	<b>81.95</b>	0.000
D <sub>c</sub> ×D <sub>c</sub>	1	0.0828	0.0828	0.64	0.428
2-Way Interaction	2	0.9610	0.4805	3.73	0.034
C <sub>v</sub> ×F <sub>r</sub>	1	0.7311	0.7311	5.68	0.023
F <sub>r</sub> ×D <sub>c</sub>	1	0.02299	0.2299	1.79	0.190
Error	36	4.6350	0.1287		
Lack of Fit	4	4.4008	1.1002	150.36	0.000
Pure Error	32	0.2342	0.0073		
Total	44	26.5860			

1) DF : Degree of freedom; 2) Adj SS : Sum of squares; 3) Adj MS : Mean of square; 4) F-Value : MSTR/MSE; 5) p-Value : The criterion for determining the significance level and the reference value is less than 0.05.

**Table 8 ANOVA for cylindricity with carbide insert**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	1054.51	131.814	8.82	0.000
Linear	3	76.35	25.451	1.70	0.184
C <sub>v</sub>	1	0.60	0.602	0.04	0.842
F <sub>r</sub>	1	75.62	75.615	5.06	0.031
D <sub>c</sub>	1	0.13	0.135	0.01	0.925
Square	3	486.72	162.240	10.86	0.000
C <sub>v</sub> ×C <sub>v</sub>	1	179.33	179.329	<b>12.00</b>	0.001
F <sub>r</sub> ×F <sub>r</sub>	1	131.31	131.313	8.79	0.005
D <sub>c</sub> ×D <sub>c</sub>	1	152.21	152.213	<b>10.19</b>	0.003
2-Way Interaction	2	491.44	245.721	16.45	0.000
C <sub>v</sub> ×F <sub>r</sub>	1	168.00	168.001	<b>11.25</b>	0.002
F <sub>r</sub> ×D <sub>c</sub>	1	323.44	323.441	<b>21.65</b>	0.000
Error	36	537.80	14.939		
Lack of Fit	4	270.37	67.592	8.09	0.000
Pure Error	32	267.43	8.357		
Total	44	1592.31			

Table 7과 8은 주효과 및 교호작용의 분산분석표이다. 조도 또는 원통도에 영향이 있는 인자들로 선정하였으며 영향을 미치지 않는 인자들은 모두 오차항으

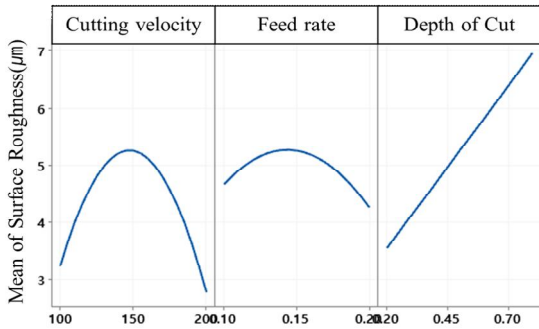
로 풀링 하였다. 조도에서는 이송속도의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다. 또한, 절삭속도의 경우 선형으로 큰 영향이 보이지는 않으나 곡률로 인한 효과와 이송속도와의 교호작용으로 유의성이 나타나는 것을 알 수 있다. 원통도는 조도와 다르게 이송속도와 절삭깊이간 교호작용의 영향이 가장 컸으며 순차적으로 절삭속도의 곡률성과 절삭속도와 이송속도의 교호작용, 절삭 깊이의 곡률의 영향이 있는 것을 알 수 있다. 아래 도출된 회귀식 (1)과 (2)는 초경 인서트 사용 시 공정조건에 따른 조도와 원통도를 예측할 수 있는 회귀를 나타낸다. 데이터 값과 적합치 간 거리 조정된 R제곱 값은 78.69%, 58.72%로 각각 확인되었다.

$$\text{Surface roughness} = 10.66 - 0.0035C_v - 118F_r - 2.88 D_c - 0.000154C_v^2 + 390.4F_r^2 + 0.96D_c^2 + 0.136C_v \times F_r + 9.23F_r \times D_c \quad (1)$$

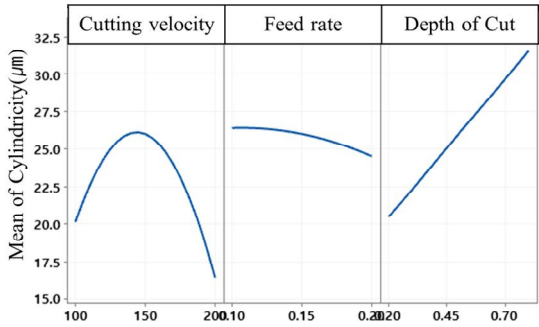
$$\text{Cylindricity} = 72.4 + 0.063C_v - 675F_r - 11D_c - 0.002861C_v^2 + 1377 F_r^2 - 41.2 D_c^2 + 2 C_v \times F_r + 346.1 F_r \times D_c \quad (2)$$

### 3.2 세라믹 인서트 가공 결과 분석

Fig. 5는 세라믹 인서트 적용 시 조도와 원통도에 미치는 주효과도 이다. 세라믹 인서트는 각 공정조건이 조도와 원통도에 미치는 영향이 유사하게 나타났다. 절삭 속도와 이송 속도는 곡률 효과가 있음을 알 수 있으며 절삭 깊이의 경우 절삭 깊이가 클수록 조도와 원통도가 커지는 일반적인 경향을 보였다. 이는 인서트의 초기 진입 시 Chipping 발생으로 내열충격이 증가함에 따라 인서트의 접촉면에서 마모가 발생하며 마모된 인서트가 Inconel 718과 접촉 시 White layer가 형성된 것으로 예상된다. 절삭속도와 이송속도의 경우 속도가 증가할수록 조도와 원통도가 커지며 일정 구간에서 다시 감소하는 특징을 보인다. Fig. 6은 인자간 교호작용을 나타내며 절삭 깊이는 절삭속도와 이송속도 간에 교호작용이 발생함을 확인할 수 있다. 절삭 깊이는 절삭 속도와 이송 속도가 느릴 경우 영향이 적게 나타나고 속도가 빨라질 경우 절삭 깊이에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 원통도의 경우 절삭 깊이가 커지고 이송속도가 빨라질수록 나타나는 경향이 다르기 때문에 주의가 필요하다.

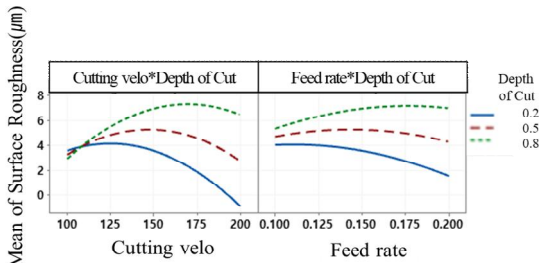


(a) Surface roughness

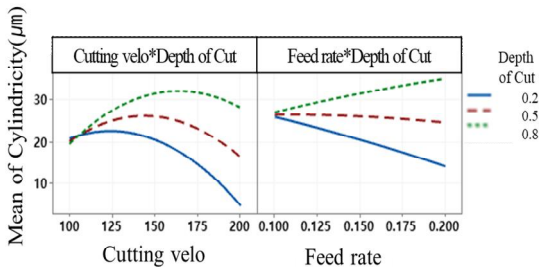


(b) Cylindricity

Fig. 5 Main effect plot with ceramic insert



(a) Surface roughness



(b) Cylindricity

Fig. 6 Interaction plot with ceramic insert

Table 9와 10은 세라믹 인서트 사용에 따른 영향 분석에 대한 분산분석표이다. 조도에서는 절삭 깊이의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며 순차적으로 절삭 속도의 곡률 효과, 절삭속도와 절삭 깊이 간의 교호작용이 영향을 미치는 것으로 보인다. 원통도에서도 각 인자들이 미치는 영향은 조도와 동일하게 분석된다.

Table 9 ANOVA for surface roughness with ceramic insert

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	194.668	27.8097	16.95	0.000
Linear	3	71.833	23.9443	14.59	0.000
$C_v$	1	1.331	1.3310	0.81	0.374
$F_r$	1	1.002	1.0025	0.61	0.439
$D_c$	1	69.499	69.4995	<b>42.36</b>	0.000
Square	2	60.630	30.3149	18.48	0.000
$C_v \times C_v$	1	56.240	56.2402	<b>34.28</b>	0.000
$F_r \times F_r$	1	6.893	6.8930	4.20	0.048
2-Way Interaction	2	62.205	31.1026	18.96	0.000
$C_v \times D_c$	1	49.301	49.3007	<b>30.05</b>	0.000
$F_r \times D_c$	1	12.904	12.9044	7.87	0.008
Error	37	60.707	1.6407		
Lack of Fit	5	58.421	11.6843	163.60	0.000
Pure Error	32	2.285	0.0714		
Total	44	255.375			

Table 10 ANOVA for cylindricity with ceramic insert

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	2250.24	321.462	8.35	0.000
Linear	3	833.63	277.877	7.22	0.001
$C_v$	1	81.40	81.402	2.11	0.154
$F_r$	1	20.72	20.720	0.54	0.468
$D_c$	1	731.51	731.510	<b>19.00</b>	0.000
Square	2	662.53	331.267	8.61	0.001
$C_v \times C_v$	1	662.53	662.531	<b>17.21</b>	0.000
$F_r \times F_r$	1	3.20	3.200	0.08	0.775
2-Way Interaction	2	754.07	377.035	9.79	0.000
$C_v \times D_c$	1	460.04	460.041	<b>11.95</b>	0.001
$F_r \times D_c$	1	294.03	294.030	7.64	0.009
Error	37	1424.29	38.494		
Lack of Fit	5	1237.76	247.552	42.47	0.000
Pure Error	32	186.53	5.829		
Total	44	3674.52			

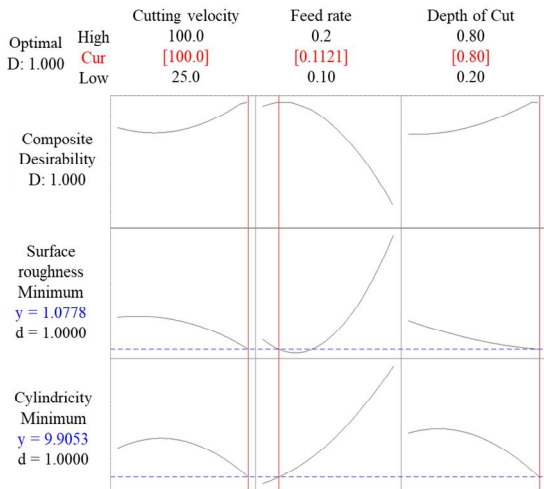
아래 도출된 회귀식 (3)과 (4)는 세라믹 인서트 사용 시 공정조건에 따른 조도와 원통도를 예측할 수 있는 회귀를 나타낸다. 데이터 값과 적합치 간 거리 조정된 R제곱 값은 71.73%, 53.91%로 각각 확인되었다.

$$\text{Surface roughness} = -8.25 + 0.1937C_v + 55.7F_r - 24.97D_c - 0.0009C_v^2 - 315 F_r^2 + 0.1351 C_v \times D_c + 69.1 F_r \times D_c \quad (3)$$

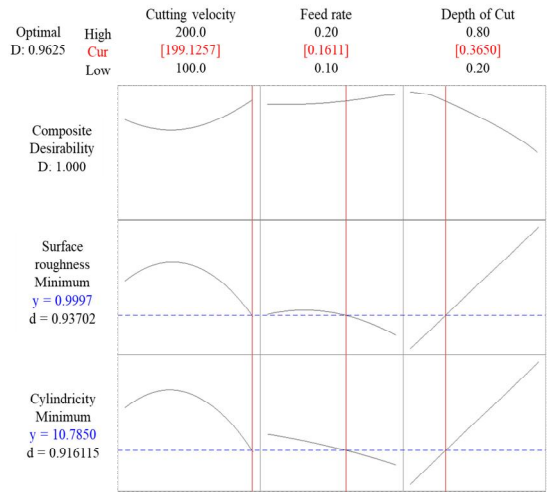
$$\text{Cylindricity} = 6.6 + 0.682C_v - 119F_r - 93D_c - 0.0031C_v^2 - 214F_r^2 + 0.413 C_v \times D_c + 330 F_r \times D_c \quad (4)$$

### 3.3 최적 공정조건 도출 및 고찰

반응 최적화 도구를 이용하여 Fig. 7과 같이 표면조도 및 원통도를 최소화하는 조건을 도출하였다. 초경합금 인서트의 경우 절삭속도 100m/min, 이송속도 0.11mm/rev, 절삭깊이 0.8mm이며 예측되는 조도와 원통도는 각각 1.078um, 9.9um이다. 세라믹 인서트의 경우 절삭속도 199.12m/min, 이송속도 0.16mm/rev, 절삭깊이 0.36mm이며 예측되는 조도와 원통도는 각각 1.078um, 9.9um이다. 예측되는 조건에 따라 검증 시험 결과 Table 11과 같이 나타났으며 최대 오차는 8% 수준으로 결과 예측에 대한 타당성을 검증하였다.



(a) Carbide insert



(b) Ceramic insert

Fig. 7 Optimized response plot

Table 11 Cutting conditions for experiment

No.	Carbide		Ceramic	
	DOE result	Exp. results	DOE result	Exp. results
Surface roughness	—	1.108	—	1.081
	: 1.078	1.110	1.000	1.079
	:	1.109	—	1.075
Cylindricity	—	10.1	—	11.0
	: 9.9	10.2	10.8	11.0
	:	10.1	—	11.0

## 4. 결론

본 논문에서는 Inconel 718 소재의 선삭 가공 시 절삭력 향상을 위해 실험계획법을 이용하여 가공 실험을 실시하였다. 초경 인서트를 이용하여 가공 시 이송속도의 영향이 가장 큰 것을 확인하였으며 세라믹 인서트 적용 시 절삭 깊이의 영향이 가장 큰 것을 확인하였다. 각 인자의 교호작용과 극률효과를 확인하였으며 인서트 재료 별 Inconel 718의 조도와 원통도를 최소화할 수 있는 가공조건을 도출하였다. 초경 인서트를 사용하여 Inconel 718 합금강의 절삭 가공 시 이송속도는 낮고 절삭 깊이를 깊게 가공할수록 표면 조도와 원통도의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 세라

믹 인서트를 이용하여 Inconel 718 합금강의 절삭 가공 시 절삭속도는 빠르고 절삭 깊이를 얇게 할수록 표면 조도와 원통도의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 최적공정조건에 대한 추가 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

도출된 최적 공정 조건 및 회귀식은 Inconel 718 소재를 선삭가공 하는데 있어 조도 및 원통도를 최소화시켜 가공 제품의 품질과 공구의 수명을 향상에 기여할 것으로 사료된다.

## References

1. Kejia, Z., Dahu, Z., Xiaoming, Z., Han, D., "Notch wear prediction model in turning of Inconel 718 with ceramic tools considering the influence of work hardened layer", *Wear*, Vol. 313, No. 1-2, pp. 63-74, 2014.
2. Davim, J., Gaitonde, V., Karnik, S., "Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 205, No. 1-3, pp. 16-23, 2008.
3. Koo, J., Kim, D., Kang, I., Jung, Y., Kim, Y., "Effect of Entering Angle on Notch Wear of Insert in the Turning Process of Inconel 718", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 29, No. 6, pp. 489-496, 2020.
4. Kim, J., Lee, Y., Park, S., Lee, Y., Kang, M., "Machinability Evaluation of Inconel 718 Material Using Indirect Cooling System", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 2, pp. 96-101, 2019.
5. Bartarya, G., Choudhury, S., "State of the art in hard turning", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 53, No. 1, pp. 1-14, 2012.
6. Kechagias, J., Aslani, K., Fountas, N., Vaxevanidis, N., Dimitrios, E., "A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy", *Measurement*, Vol. 151, 2020.
7. Park, J., Choi, W., Kwon, S., Cha, J., "Optimal Cutting Conditions of Surface Roughness for Inconel 718 Alloy in Turning Operation", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 8, No. 4, pp. 48-53, 2009.
8. Cha, J., Han, S., "Searching Optimal Condition for Surface Roughness in Turning Operation on Inconel 718 using Taguchi Method", *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 295-300, 2010.
9. Sharma, V., Dhiman, S., Sehgal, R., Sharma, S., "Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks", *J. Intell. Manuf.*, Vol. 19, pp. 473-483, 2008.
10. Niharika, B., Agrawal, I., Khan, Z., "Effects of cutting parameters on quality of surface produced by machining of titanium alloy and their optimization", *Arch. Mech. Eng.* Vol. 63, No. 4, pp. 531-538, 2016.