

# Inconel 718의 절삭성 개선을 위한 플라즈마 고온 절삭 가공법에 관한 연구

김진남\*

## A Study on the Plasma Hot Machining to Improve the Machinability of Inconel 718

Jin-Nam Kim\*

### Abstract

An experimental study of hot machining has performed to improve the machinability of Inconel 718. This experiment used plasma arc for heating materials and Whisker-reinforced aluminum oxide ceramic tool insert.

An assembled plasma heating system are described and experimental results obtained from both conventional and plasma hot machining of Inconel 718 are compared.

The experiments with plasma heating demonstrated the following effectiveness.

- 1) The cutting force was reduced with increasing surface temperature of workpiece from 450°C up to 720°C as much as approximately from 20 to 40%.
- 2) Surface roughness(Ra) was improved by as much as a factor 2 in case of one pass cutting with new ceramic tool inserts.
- 3) The depth of cut notch wear at primary cutting tool was significantly reduced.

### 1. 서론

난삭재의 한 종류인 Inconel 718은 Ni기(Ni base alloys) 내열합금으로 항공산업 및 발전산업등에 널리 사용되고 있지만 절삭성(machinability)이 나빠 현재까지 그 절삭 가공에 많은 어려움이 따르고 있다.

Inconel을 초경합금 공구로 절삭하는 경우 절삭속도의 증가에 따라 공구의 마모가 급격히 진행되므로 절삭속도를 0.5m/s 이상 할 수 없다. 최근 개발된 세라믹 공구를

사용하면 가공속도를 3m/s까지 향상시킬 수 있지만 공구 수명은 5분을 넘지 않을 정도로 짧으므로 난삭재인 Inconel 718의 가공이 여전히 산업현장에서 중요한 문제가 되고 있다.<sup>(1)</sup>

최근에는 난삭재를 효과적으로 절삭하기 위하여 공구의 개발과 새로운 가공방법의 시도가 활발히 이루어지고 있으며 그중 고온가공법(hot machining)이 주목받고 있다.

그러나 난삭재의 절삭에 고온가공법을 이용하려는 것

\* 삼척산업대학교 기계공학과

은 새로운 방법이 아니다. 금속재료가 온도가 상승하면 재료가 연화하여 전단강도 및 변형경화가 감소하는 것을 절삭가공에 적용시켜 보려는 시도가 이미 40여년 전부터 연구되어 왔다.<sup>12)</sup> 예를 들면 Inconel 718의 항복강도(yield stress)는 온도가 900°C까지 상승하게 되면 1120MPa에서 약 300MPa로 그 값이 떨어진다.

공작물을 가열하는 방법에 따라 가스토치에 의한 가열, 가열로를 이용하는 방법, 전기저항 및 전기 유도열등을 이용한 여러 가지 고온절삭 가공방법이 시도되었다.<sup>13, 34, 5)</sup> 그러나 이러한 가열방법은 절삭 직전의 공작물을 국부적으로 가열하지 못함으로써 공작물의 열변형에 의한 가공정밀도 저하가 고온가공법의 문제로 제기되었다.

고온절삭가공법을 효과적으로 이용하기 위해서는 공작물 표면의 가열온도 및 가열면적을 조절할 수 있어야 하므로 제어성과 열투사강도(Kcal/sec mm<sup>2</sup>)가 큰 플라즈마와 레이저를 이용하는 것이 바람직하다. 예를들면 CO<sub>2</sub> 레이저는 직경 0.1mm, 플라즈마의 경우는 직경 1mm 수준의 가열면적 조절이 가능하다. 가열면적의 제어성은 플라즈마가 그 성능이 떨어지지만 넓은 면적을 가열하는 경우에는 훨씬 유리하다. 그리고 두 가지 열원(heat source)모두 작동조건을 변경하므로써 열원의 강도를 조절할 수 있지만 설치 비용 면에서 살펴보면 플라즈마의 경우가 레이저보다 가격 면에서 훨씬 우수하다.

1978년 Copley<sup>16, 7)</sup>의 레이저를 이용한 고온절삭가공법(Laser Hot Machining; LHM)의 연구에 의하면 LHM으로 Inconel 718의 절삭성을 개선하였지만 레이저의 설치비용이 높아 레이저를 이용한 고온절삭가공법의 실효성에 의문점을 시사하였다.

최근 플라즈마를 이용한 고온가공법(Plasma Hot Machining; PHM)의 연구에 의하면 Köning<sup>8)</sup>은 Cobalt 강을 선삭한 경우 공구의 마모를 40% 감소할 수 있었으며, 초경합금 공구를 사용하여 Cr 주강을 절삭 실험한 Kitagawa<sup>9)</sup>에 의하면 PHM을 이용하므로 전체 절삭비용이 감소하였고, 공구의 치핑과 마모를 약 50% 가량 감소시킬 수 있었다. 이후에 Kitagawa와 Maekawa<sup>10)</sup>는 플라즈마 제트 열을 이용하여 세라믹 가공을 시도하여 여기에서 사용한 다이아몬드 공구의 마모를 크게 감소시킬 수 있었다. 그리고 1994년 Novack J.W와 Shin Y.C<sup>11)</sup>는 Inconel 718의 절삭에 PHM의 적용이 많은 이점이 있음을 기초 실험결과로써 시사하고 있다.

결국 플라즈마와 레이저가 실용화되기 전의 고온가공법은 공작물을 국부적으로 정밀하게 가열할 수 없었으므로 “난삭재 가공에서 고온가공법(hot machining)”이 정당하게 평가되지 못한 점이 있다.

본 연구에서는 난삭재인 Inconel 718의 절삭성(machinability)을 개선하는 효과적인 PHM 공정을 개발하기 위하여 플라즈마 아크에 의한 공작물 가열 특성, 세라믹 공구를 이용한 전통적인 절삭가공과 PHM의 절삭 특성을 실험을 통하여 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig.1과 같이 플라즈마 발생장치를 보통 선반(NADRINI, 7Hp)에 부착시켜 PHM 실험장치를 구성하였다.

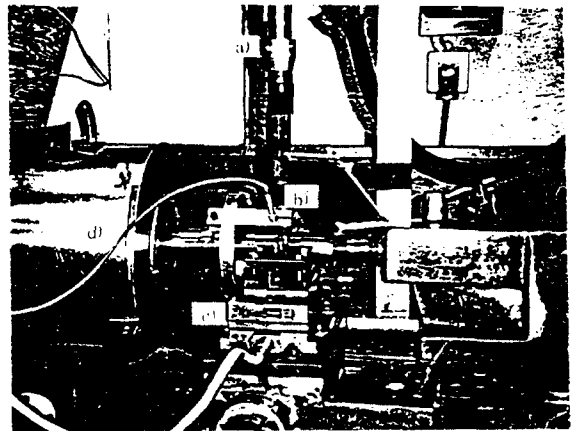


Fig. 1 Photograph of plasma hot machining equipment

- a) Plasma torch
- b) Infrared thermometer sensor
- c) Tool dynamometer
- d) Air shield cap

실험에 사용한 공구재료는 최근 개발되어 Inconel 절삭에 비교적 우수한 특성을 갖고 있는 것으로 알려져 있고<sup>(12, 13, 14)</sup> 열적 특성이 우수한 Greenleaf의 WG-300 SNGN 452 T1(Whisker-reinforced aluminum oxide) 인서트를 절삭날 각 15°, 주경사각 -5°, 측면경사각 -10° 인

를 홀더에 고정하여 사용하였다.

피삭재료는 지름 83mm인 Inconel 718(Rc 42, Haynes 제품) 환봉을 사용하였으며 모든 절삭 실험은 건식 절삭을 하였다.

플라즈마 발생장치는 전원 공급장치(DC 300A), 플라즈마 발생장치, 플라즈마 토치, 냉각수 순환장치 및 원격 제어장치로 구성되어 있다. 플라즈마 토치는 직경 3.18mm의 노즐과 20° 원추 각을 갖는 텅스텐 전극 봉을 실험에 사용하였다. 플라즈마 아크는 전극 봉과 노즐의 출구사이의 거리(setback)에 따라 열 강도와 가열범위가 변화하게 된다. 본 실험의 경우에는 전극 봉과 노즐의 수명을 증가시키기 위해 그 값을 최소 setback인 0.81mm를 기준으로 사용하였다. 최대 setback인 2.36mm와 비교하여 보면 플라즈마 아크의 가열범위가 확장되어 열 투사강도가 약간 떨어지게 된다. 더욱 플라즈마 토치의 수명을 증가시키기 위하여 플라즈마 가스(플라즈마 가스)와 실드 가스(shield gas) 유량을 1.7lpm과 14lpm을 사용하였다.

균일한 실험 결과를 얻기 위하여 토치의 위치와 상태를 매 실험마다 재 측정하고 토치의 노즐과 텅스텐 전극이 심하게 마모되거나 산화되면 교환하였다. 플라즈마 토치는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 공작물 중심 위치의

수직 방향에 설치하였으며 플라즈마 아크의 중심부가 절삭 직전의 공작물을 효과적으로 가열할 수 있도록 Fig. 2의 a)와 같이 공구 날 끝의 위치보다 이송 방향으로 1.5mm 앞선 위치에 설치하였다. Fig.2의 b)는 플라즈마 토치와 복사고온계 및 공구의 설치 위치를 나타냈다.

공작물과 노즐 사이의 거리는 12.5mm를 기준으로 사용하였으며 복사고온계는 공구와 플라즈마 토치 사이에 위치하도록 하였다. 플라즈마 아크를 발생시키기 전에 노즐과 텅스텐 전극의 산화를 방지시키기 위하여 수 분간 플라즈마 가스와 실드 가스를 분출시키고 아크 발생을 중단한 후에도 수 분 동안 냉각수와 플라즈마 가스를 순환시켜 열로 인한 토치의 과열을 방지하였다. 그리고 공작물이 척에 접근하였을 때 척으로부터 발생하는 주변 공기 흐름이 플라즈마 노즐을 통한 가스의 흐름과 공작물의 가열 효과에 영향을 주지 않도록 척의 회전에 따른 공기 유동을 막을 수 있도록 척에 공기 흐름 차폐 캡을 설치하여 실험하였다.

공작물의 표면 온도, 절삭력은 매 실험실시중(on line)에 측정하였으며, 절삭 실험 이 끝난 후에는 표면조도, 가공 면의 표면 온도, 공구 마모, 공작물의 직경 등을 측정하였다. 절삭력은 KISTLER 9257B 압전형 3축 공구동력 계를 이용하여 절삭력을 측정하고 적외선 복사고온계는 WILLIAMSON Fiber view 6200E를 사용하였다. 여기서 측정된 값은 Tektronix data acquisition system을 이용하여 수집 분석하였다.

복사고온계는 방사율(Emissivity) 값이 0.2에서 1.0, 온도는 450°C~1000°C까지 측정할 수 있다. 이 복사고온계는 2개의 렌즈로 구성된 수광부(probe)의 끝이 공작물과 12.5mm 수직 방향으로 떨어져 있을 때 직경 1mm의 면적부의 온도를 측정하도록 되어 있다. 그리고 이 복사고온계는 1.6 $\mu$ m의 좁은 밴드필터를 갖고 있으므로 플라즈마 적외선 복사 빛이 직접 반사되어 프로브에 진입하는 것을 막기 위하여 복사고온계와 플라즈마 노즐 사이에 차광판을 설치하였다.

절삭이 끝난 후 공작물을 상온까지 냉각시킨 후 칩 및 공구 마모, 가공표면의 조도를 측정하였다. 공구 마모는 공구 현미경을 사용하여 플랭크 마모, 크레이터, 노치 마모 등을 측정하였고, 표면조도는 Rank Taylor Hobson Surtrone 3P 표면조도계를 이용하여 길이 방향과 원주 방향으로 측정하였다.

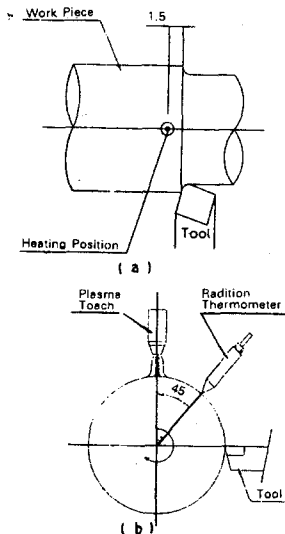


Fig. 2 Set up plasma heating  
 a) Schematic diagram of plasma arc torch  
 b) Set up for temperature measurement

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 플라즈마 가열 특성

##### 3.1.1 Inconel 718의 방사율(Emissivity)

PHM에서 공작물 표면온도를 정확히 측정하는 일은 실험결과를 해석하기 위하여 매우 중요하다. 고속으로 회전하는 물체의 온도를 측정하기 위하여 직접 접촉에 의한 방법(Thermo couple)은 매우 어렵다. 따라서 비접촉 측정장치중 약간의 방사율이 변하거나 미확실한 방사율에서도 사용하기 쉽고 이미 공구<sup>(15)</sup> 및 연삭온도<sup>(16)</sup>를 측정하는 데 유효한 것으로 알려진 복사고온계(monochromatic infrared thermometer)를 사용하여 표면온도를 측정하였다. 복사고온계는 직접 온도를 측정하는 것이 아니라 적외선 복사량을 측정하는 것이므로 Inconel 718의 방사율을 정확히 아는 것이 필요하다. 방사율의 값은 물체의 표면조도, 산화 및 화학적 구성에 따라 다르지만 여기서는 표면조도 Ra의 값이 0.86과 0.5인 시편을 만들어서 실험으로 그 값을 구하였다. 실험할 때 공작물의 실제 표면조도가 다르고 산화 막이 발생하는 것이 실험조건과 다르지만, 표면 조도가 크고 산화 막의 유무에 따라 방사율이 약간 증가하는 경향<sup>(17)</sup>이 있지만 방사율 값이 크게 변하지 않으므로 실험으로 구한 방사율값을 공작물의 표면온도를 구하는 데 사용하였다.

실험 값으로 구한 방사율의 값을 Fig. 3에 나타내었으며 이 값을 이용하여 다음과 같은 회귀분석식(Regression Model)<sup>(18)</sup>을 사용하였다.

$$\epsilon = 41.458 - 0.212T_{sp} + 0.0365T_{sp}^2 - 2.08 \times 10^{-7}T_{sp}^3 \quad (1)$$

방사율의 값을 복사고온계로 측정한 공작물의 Spectral Temperature  $T_{sp}$ 을 이용하여 구할 수 있으므로 실제의 표면온도는 다음 식으로 계산된다.

$$Ts = \left( \frac{1}{T_{sp}} + \frac{\lambda}{C_1} \ln \epsilon \right)^{-1} \quad (2)$$

여기서  $\epsilon$ 는 방사율(Emissivity),  $T_{sp}$ 은 Spectral Temperature, Ts는 공작물의 표면온도,  $\lambda=1.6\mu m$ ,  $C_1=14.388\mu m \cdot K$ 이며 온도의 단위는 Kelvin 이다.

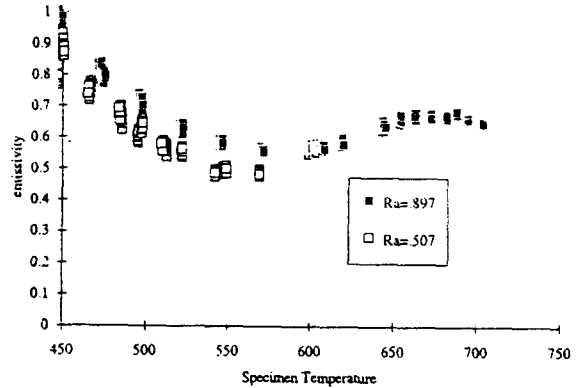


Fig. 3 Emissivity for two different Raroughness values

##### 3.1.2 플라즈마 가열 특성

플라즈마 아크에 의해서 가열되는 공작물의 열 전달 특성을 조사하기 위하여 절삭을 하지 않고 몇 가지 가열 실험을 하였다.

PHM에서 플라즈마 가열 특성에 영향을 주는 것은 크게 나누어서 플라즈마 아크의 제어변수와 공작물의 회전 속도(절삭속도), 이송, 초기온도, 플라즈마 아크와 공작

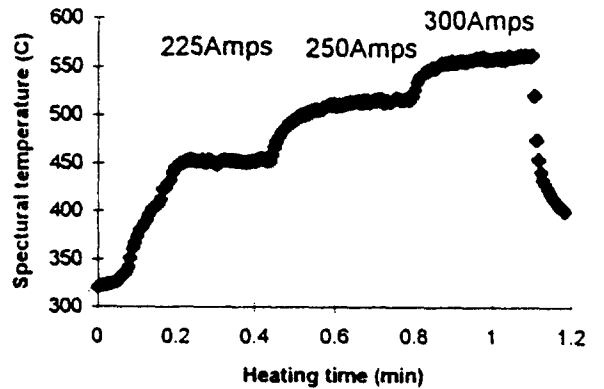


Fig. 4 Spectral temperature as function of heating time (82mm diameter workpiece, 0.124mm/rev feed, 800rpm)

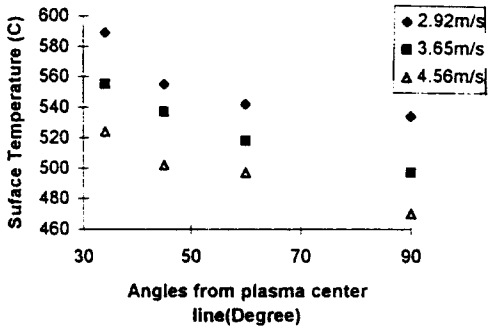


Fig. 5 Surface temperature versus variable angles from plasma centerline(250 Amp plasma current, 69.7mm diameter workpieces, 0.124mm/rev feed)

물의 상대위치등이 있다. 플라즈마 아크의 제어변수<sup>(19)</sup>로는 플라즈마 아크의 전류, 플라즈마와 실드 가스의 유량, 플라즈마 노즐과 공작물 사이의 높이, 텅스텐 전극과 노즐 표면과의 setback등이 있다. 여기서는 플라즈마 아크 전류, 공작물의 회전속도(절삭속도), 플라즈마 아크의 이송속도, 공작물의 초기온도에 따른 플라즈마 가열 특성을 조사하였다.

Fig. 4에는 공작물 직경이 82mm, 회전속도 800rpm (3.43m/s), 플라즈마 아크의 이송이 0.124mm/rev이고, 복사고온계의 위치가 노즐로부터 원주 방향으로 45°에 위치하고 있을 때 플라즈마 아크의 전류를 225, 250, 300Amp로 변화하는 경우 측정온도(Spectral Temperature)를 나타내었다. 그림에서 플라즈마 아크가 발생하고 난 직후 온도가 상승하기 시작하여 플라즈마 아크 전류에 따라 높아지고 있다. 본 논문에서 사용한 공작물의 표면온도는 Fig. 4와 같이 측정된 온도(Spectral Temperature)의 평균값을 이용하여 식 (1)과 식 (2)에 의하여 계산하여 사용하였다.

Fig. 5에는 플라즈마 아크 전류 250Amp, 이송속도가 0.124mm/rev이고 공작물의 직경이 69.7mm일 때 회전속도에 대한 복사고온계의 원주 방향 위치 34, 45, 60, 90°에서의 표면온도 특성을 나타내었다. 그림에서 플라즈마 아크로부터 측정위치가 멀어질수록 같은 속도에서 공작물의 온도가 감소하고 있다. 플라즈마 아크의 열로부터

복사고온계를 보호하기 위하여 34°보다 작은 위치에서는 측정할 수가 없었다. 이 그림에서 복사고온계의 위치가 원주 방향으로부터 45°와 90°위치 사이에는 약 20~40°C 정도의 작은 온도차가 있으므로 절삭 공구의 설치 위치를 고려하여 45°부근에서 측정된 표면온도값을 절삭 직전의 공작물의 표면온도로 이용하였으며, 본 연구에서 특별히 기술하지 않은 공작물 표면온도는 플라즈마 아크로부터 45°위치에서 측정된 온도를 나타낸다.

Fig. 6에는 플라즈마 아크 전류와 일정한 공작물 회전속도에 대한 공작물 표면온도 변화를 나타내었다. 플라즈마 아크 전류의 증가에 따라 거의 직선적으로 온도가 증가하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 7, Fig. 8은 공작물 회전속도와 플라즈마 아크 이송속도에 대한 플라즈마 가열 특성을 나타내고, Fig. 9는 공작물의 초기온도에 대한 가열 특성의 실험결과이다.

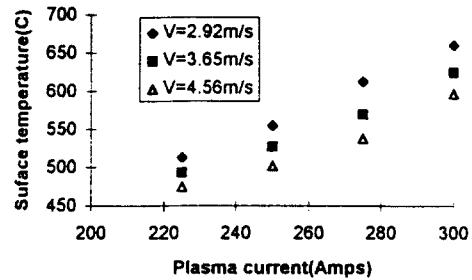


Fig. 6 Surface temperature versus plasma current at variables surface speed(69.0mm diameter workpieces, 0.124mm/rev feed)

아래 실험으로 다음과 같이 공작물에 대한 플라즈마 아크 가열 특성을 얻었다.

- 1) 플라즈마 아크 전류가 증가하고, 공작물의 회전속도 및 이송속도가 감소하고 공작물의 직경이 작을수록 공작물의 표면온도는 증가하는 경향이 있다.
- 2) 플라즈마 아크의 가열 위치로부터 원주 방향으로 45°위치한 곳과 90°위치한 곳의 온도차는 20~40°의 범위에 있다.
- 3) 공작물의 초기온도가 높을수록 표면온도가 증가하는 경향이 있다.

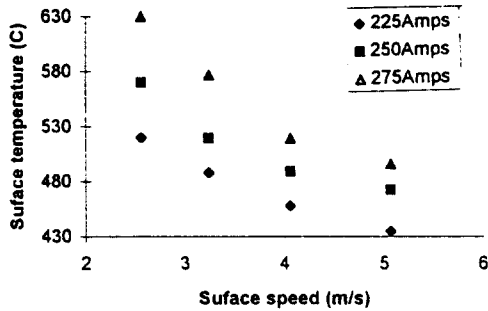


Fig. 7 Surface temperature versus surface velocity at variable plasma current(77.5mm diameter workpieces, 0.124mm/rev feed)

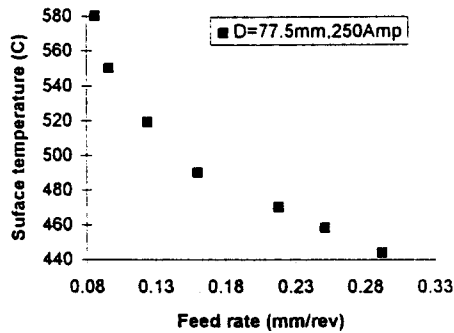


Fig. 8 Surface temperature versus feed rate(3.24m/s surface velocity, 250Amp plasma current, 77.5mm diameter workpiece)

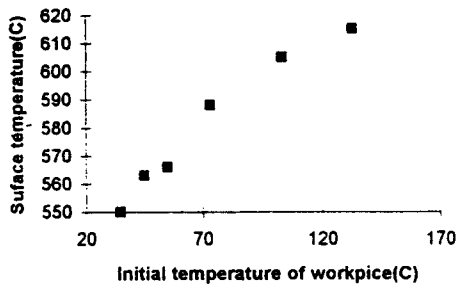


Fig. 9 Surface temperature versus workpiece initial temperature(3.64m/s surface speed, 66.2mm diameter workpiece, 0.124mm/rev feed)

### 3.2 PHM과 전통적인 절삭 가공의 절삭 특성 비교 검토

두 가지 가공법을 비교하기 위하여 WG-300 세라믹 공구를 이용하여 Inconel 718을 건식 절삭하였다. 절삭 실험은 이송속도 0.124mm/rev, 절삭깊이 0.8mm를 기준으로 절삭속도 2~6m/s 범위에서 절삭 실험을 하였으며 세라믹의 공구 수명이 매우 짧은 것을 고려하여 각 절삭 실험마다 새로운 절삭 날을 사용하였다. PHM의 경우 플라즈마 아크 전류의 증감으로 공작물의 표면온도를 조정하였고 다른 플라즈마 아크의 제어변수는 실험방법에서 기술한 바와 같이 고정하여 사용하였다.

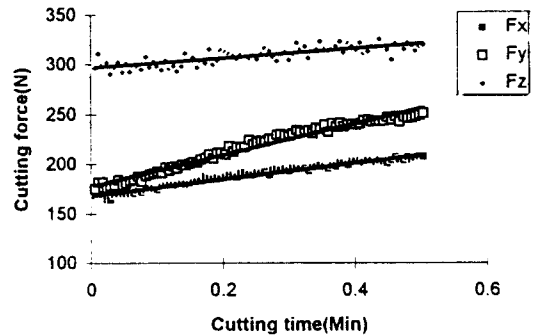


Fig. 10 Components of cutting force as a function of cutting time during conventional machining(cutting speed 6.28m/s, 0.124mm/rev feed)

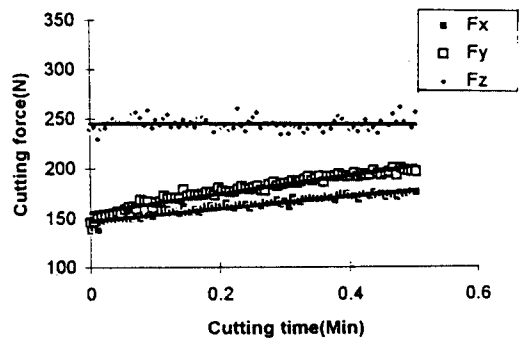


Fig. 11 Components of cutting force as a function of cutting time during PHM(plasma current 250Amp, cutting speed 6.28m/s, 0.124mm/rev feed)

Fig. 10과 11은 세라믹 공구로 0.5분 절삭하였을 때 전통적인 절삭가공과 PHM에서 공구의 마모에 따라 절삭분력이 증가하는 전형적인 실험 값을 나타내었다. 이 두 가지 실험에서 절삭속도는 6.28m/s이며 PHM의 플라즈마 아크 전류는 250Amp이다. 두개의 측정값을 비교하여 보면, 전통적인 절삭방법인 경우 PHM에 비하여 절삭시간에 대하여 절삭분력의 증가율이 크고 그 값도 크다.

절삭분력의 크기는 플랭크 마모, 치핑등 공구의 기하적 변화에 따라 변화하므로, 본 실험에서 실험 중 공구의 마모율을 직접 측정할 수 없었지만 두 가지 가공법의 절삭과정중의 공구 상태에 대하여 추론할 수 있다. 공구가 마모하게 되면 공구와 공작물의 접촉면적은 증가하고 절삭가공면과 경계 절삭부가 가공 경화되어 이송분력과 배분력이 증가하게 된다.

Fig. 10과 11의 절삭실험에서, 절삭시간 0.5분 동안 전통적인 절삭가공법에서는 이송분력이 약 70N, 배분력은 20N, 주분력은 20N 증가한 것에 비하여, PHM에서는 주분력은 거의 증가하지 않고 이송분력과 배분력이 35N, 25N으로 각각 증가하고 있다. 특히 전통적인 절삭가공에

서 이송분력의 증가율이 큰 것은 주절삭날의 경계 마모가 PHM에 비하여 크고 이에 따른 경계 마모 부위의 가공 경화된 측면 Burr의 증가에 의한 것으로 보인다. PHM에서는 주절삭날의 경계 부근에 발생하는 측면 Burr가 전통적인 절삭보다 작거나, Burr가 플라즈마 아크에 의하여 절삭되기 직전에 연화 및 용융되는 경향이 있어 주절삭날의 경계 마모가 감소되고 이송분력 증가율이 보다 작아졌다.

그림에서 PHM의 배분력과 주분력 증가율이 감소하는 것도 공구의 마모와 밀접한 관계가 있다. 부절삭날의 치핑에 따른 배분력의 증가는 절삭가공면의 표면조도와 깊은 관계가 있다. PHM에서는 주절삭날과 부절삭날의 치핑이 감소되어 주분력과 배분력의 증가율이 감소하고, 이것은 역으로 공작물의 연화와 절삭력의 감소와 밀접한 관련이 있다.

Fig. 12는 세라믹 공구의 공구 수명에 가장 중요한 영향을 주는 주절삭날의 경계 마모 크기를 비교하기 위하여 절삭깊이 1.5mm, 절삭속도 5.5m/s로 절삭길이 50mm를 절삭한 경우 a) 전통적인 절삭가공과 b) PHM의 경우 공구 마모 상태를 나타낸 사진이다. 전통적인 절삭의 경우 주절삭날의 경계 마모가 PHM에 비하여 훨씬 크다. Fig. 11과 12를 함께 비교해 보면 경계 마모의 증가와 이송분력의 증가는 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다.

세라믹 공구로 Inconel을 절삭하는 경우 주절삭에 발생하는 경계 마모에 따라 이송분력이 증가하고 점점 마모 폭과 깊이가 크게 성장하여, 이것이 공구 수명에 가장 큰 영향을 준다.<sup>(20)</sup> PHM을 이용하면 주절삭날의 경계 마모를 줄이고 공구 수명을 연장시킬 수 있다. 그러나 PHM에서는 공구와 공작물의 온도 상승에 따라 공작물이 공구에 응착하거나 화학반응에 따른 마모가 발생하지만 그 영향을 여기서는 검토하지 않았다.

사진에서 살펴보면 PHM의 경우 크레이터 마모가 발생한 부분보다 떨어진 부분의 경사면 위에 공구가 열로 인하여 파손된 것을 관찰할 수 있다. 이것은 공작물이 회전함에 따라 공구와 칩이 접촉하지 않은 부분이 플라즈마 아크 열에 직접 영향(주로 대류 열 전달)을 받아 국부적으로 큰 열 응력이 발생되어 손상된 것으로 보인다. 이 부분은 직접 절삭과는 무관하지만 전체적으로 공구의 강도를 저하시키게 되므로 PHM에서 플라즈마 가열 원의 위치를 조절하거나 공구 보호를 위하여 열 차단

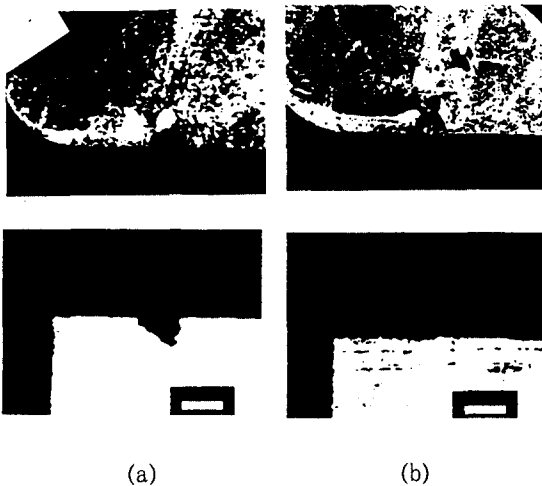


Fig. 12 Photograph of the tool wear(cutting speed 5.5m/s, feed 0.124mm/rev, cutting length 50mm, depth of cut 1.5mm)

- a) Conventional cutting
- b) PHM(plasma current 250Amp)

막을 설치하는 것이 필요함을 시사해 주고 있다.

전통적인 절삭의 경우 공구 경사면 위에 가공경화된 칩의 압괴작용에 따라 칩 출구 방향으로 전단 파괴에 따른 마모(attritious wear) 및 칩의 일부가 용착된 것이 관찰되었다. 그리고 플랭크 마모의 크기는 PHM과 전통적인 절삭에서 거의 비슷하나, PHM에서 주 절삭 날의 치평이 전통적인 절삭가공보다 작은 것을 확인하였다. 치평이 감소되는 것은 절삭력 감소에 따른 공구 용력 감소 및 온도 상승에 따른 공구 연성(ductility)의 증가에 기인하는 것으로 보인다.

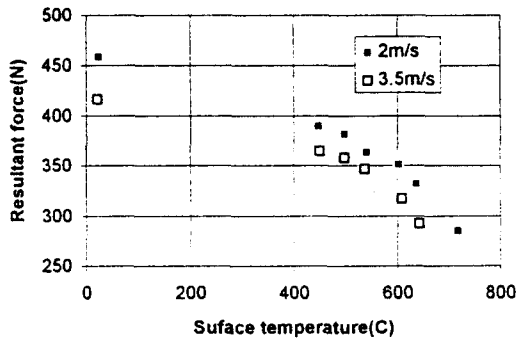


Fig. 13 Resultant cutting force versus surface temperature (0.124mm/rev, cutting speed 3.5m/s and 2m/s)

Fig. 13은 절삭속도가 2m/s, 3.5m/s일 때 전통적인 가공방법과 PHM에서 공작물 표면온도에 대한 절삭력을 나타내었다. 플라즈마 아크의 전류가 증가하여 공작물 표면온도가 상승할수록 절삭력이 감소하며, 표면온도가 같은 경우 절삭속도가 증가할수록 절삭력이 감소한다. 이것은 플라즈마 아크에 의하여 국부적으로 가열하는 외부 열에너지와 절삭속도 증가에 따라 소성영역에서 발생한 열에너지가 상승작용하므로써 공작물의 유동용력이 감소한 것이다. 전통적인 절삭에서 절삭속도의 증가에 따른 절삭력의 감소와 비슷한 경향을 갖고 있다. 공작물 표면온도가 500°C에서 절삭력이 20% 감소하고 절삭속도가 2m/s일 때 720°C에서 약 40%로 크게 감소하고 있다. 그러나 외부 열에너지가 과도하게 입력되면 가공표면이 산화하게 되므로 절삭력의 감소와 가공표면의 질, 공구 마모를 함께 고려하여 최적 절삭조건을 구하여야

할 것이며 이에 대한 연구가 더 필요하다.

PHM에 의한 절삭저항 및 공구 마모의 감소는 1) 공작물의 외부 열원에 의하여 국부적으로 연화되어 소성영역에서 전단강도와 가공경화가 감소되고 2) 이것이 전체 절삭저항을 감소시키고, 재료의 강도에 밀접한 관계를 갖는 공구 마모를 감소시키게 된다.

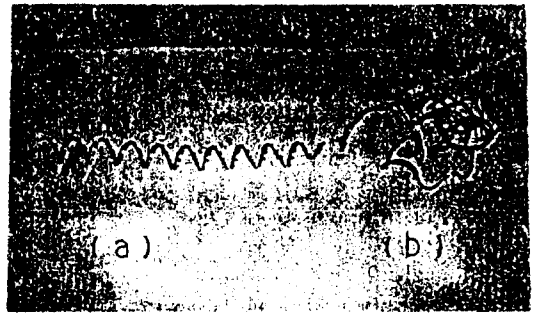


Fig. 14 Comparison of formed chip  
a) Conventional cutting  
b) PHM

Fig. 14는 절삭속도가 3.5m/s일 때 a) 전통적인 절삭과 b) PHM에서 발생한 대표적인 칩의 형태를 나타내었다. PHM에서 칩의 곡률 반지름이 훨씬 크다. 이것은 플라즈마 아크로 국부적으로 절삭 직전의 공작물을 가열하므로써 칩의 표면과 공구와 공작물이 접촉하는 면 사이에 열구배(Temperature gradient)가 변화하므로써 칩 단면의 응력 상태가 변화하고, 재료의 연화에 따른 칩의 전단강도가 감소하므로써 일어난다. PHM에서 칩의 표면은 쉽게 산화되지만 칩과 공구의 접촉면은 산화되지 않는 경향이 이를 설명하고 있다. 칩 처리의 관점에서 살펴보면 오히려 PHM에서 발생하는 칩의 형태는 전통적인 절삭 방법에서 발생하는 칩의 형태보다 처리가 곤란하므로 PHM에서 칩 처리에 관한 연구가 필요하다.

Fig. 15는 절삭속도가 3.5m/s인 경우 표면조도 Ra값을 공작물의 표면온도에 따라 측정된 실험 값을 표준편차를 이용하여 나타내었다. 전통적인 절삭의 경우 Ra 평균값이 1.3 $\mu$ m이지만 450°C에서 그 값이 0.58 $\mu$ m로 약 2배 이상 개선된 효과를 얻을 수 있었다. 여기서 실험한 것은 매 실험마다 새로운 절삭 날을 이용하여 0.5분 절삭한



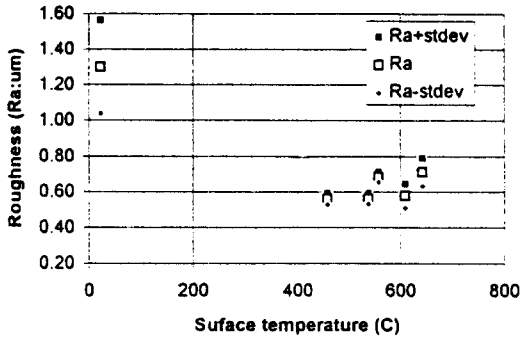


Fig. 15 Surface roughness versus surface temperature(cutting speed 3/5m/s, feed 0.124mm/rev, cutting time 0.5min)

후 얻은 평균값으로서 절삭시간이 길게 되면 표면조도의 개선효과는 상대적으로 더욱 좋아질 것으로 기대된다. 표면의 온도가 450°C 이상 증가하면 오히려 Ra값이 증가하는 경향이 있다. 이곳은 가공물 표면온도가 530°C 이상이 되면 가공표면이 산화하고 배출되는 칩이 플라즈마 아크에 의하여 가공 표면에 용융비산되는 것과 관련이 있다.

PHM에서 표면조도가 크게 향상되는 것은 주로 1) 공작물의 경도 감소에 따라 칩의 파단응력(rupture stress)이 감소하므로 칩 배출이 원활해지고 2) 공작물의 연성이 증가하므로 구성인선과 2차 절삭날 축의 치핑이 감소하여 Ra값이 향상된다. 그리고 새로이 창성된 공작물 표면의 날카로운 돌기 부분이 플라즈마 아크 열의 영향에 의하여 용융되어 돌기 부분이 등글게 되는 경향도 Ra값 개선과 관련이 있어 보인다.

#### 4. 결 론

Inconel 718의 절삭 성을 향상시키기 위하여 플라즈마 아크를 이용한 고온가공법(Plasma Hot Machining)에 대한 기초 실험을 하였다.

공구는 Greenleaf의 WG-300 세라믹 공구를 이용하였으며 실험을 통하여 다음 결론을 도출하였다.

1) 플라즈마 아크의 가열에 따른 공작물의 표면온도는

플라즈마 아크 전류의 증가, 공작물 직경의 감소, 공작물 회전속도, 이송속도의 감소 및 공작물 초기온도가 높을 수록 증가한다.

2) Inconel 718의 표면 가열온도가 상승하면 절삭력의 감소율도 증가하며 표면온도가 450°C~700°C 범위에서 약 20~40% 감소하였다.

3) PHM에서 표면조도가 전통적인 절삭보다 Ra값이 2배 가량 개선되었으며 표면가열온도가 450°C~500°C 부근에서 최적인 값을 갖고 이 보다 높은 온도에서는 가공표면이 산화되며 Ra값이 증가하는 경향이 있다.

4) PHM에서 세라믹 공구의 주 절삭 날의 경계 마모가 크게 감소하였다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Gorsler, F.W., "High Speed Machining of Aircraft Engine Alloys", Proc. of Int. Conf. on Productivity Machining", pp.57-67, 1985
- (2) Krabacher, E. J. and Merchant, M.E., "Basic Factors in Hot-Machining of Metals", Trans. ASME, Vol.73, No.5, pp.761-776, 1951
- (3) Pentland, W., Mehl, C.C., Wennberg, J.L., "Hot Machining", American Machinist/Metal Working Manufacturing, July, pp.117-132, 1960
- (4) Barrow, G., "Machining of High Strength Materials at Elevated Temperatures Using Electric Current Heating", Annals of the CIRP, Vol.16, pp.145-151, 1966
- (5) Uehara, K., "On the Mechanism of Temperature Rise and the Choice of Tool Material in Electric Hot Machining", Annals of the CIRP, Vol.16, pp.85-91, 1968
- (6) Copley, S.M., "Laser Applications", Handbook of High Speed Machining Technology, Chapter 16, ed. by R.L. King, Chapman and Hall, 1985
- (7) Bass, M., Copley, S.M. and Beck, D., "Laser Assisted Machining", Proc. of the 4th European Electrooptics Conference, Utrecht, Netherlands, 1978
- (8) König, W., Cronjger, L., Spur, G., Tshiff, H.K., Vigneau, M. and Zdehlick, W.J., "Machining of New Materials", Annals of the CIRP, Vol.39/2, pp.673-681, 1990
- (9) Kitagawa, T., Katsuhiko, K. and Kubo, A., "Plasma Hot

- Machining for High Hardness Metals”, Bull. Japan Society of Precision Engineering, Vol.22, No.2, pp.145-151, 1988
- (10) Kitagawa, T. and Maekawa, K., “Plasma Hot Machining for New Engineering Materials”, Wear, 139, pp. 251-267, 1990
- (11) Novak, J.W., Shin, Y.C. and Incropera, F.P., “Assessment of Plasma Enhanced Machining of Improved Machinability of Inconel 718”, Manufacturing Science and Engineering, ASME PED, Vol.68, No.1, pp.443-451, 1994
- (12) Mehrotra, P. and Beeghly, C., “Advanced Ceramic Tools for High Productivity Machining of Superalloys”, Proc. of the SCTE '89 Conference, San Diego, pp.11-19, 1989
- (13) Johnson, A.D., Thangaraj, A.R. and Weinmann, K.J., “The Influence of Mechanical Properties on the Performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC<sub>w</sub> Ceramics in the Machining of Inconel 718”, Material Issues in Machining and Physics of Machining Processes, The Minerals, Metals and Materials Society, pp.187-201, 1992
- (14) Smith, K., “The Application of Whisker Reinforced and Phase Transformation Toughened Materials in Machining of Hardened Steels and Nickel-based Alloys”, Proc. of the SCTE '89 Conference, San Diego, pp.81-88, 1989
- (15) Lin, J.L., Chen, T.C. and Weng, C.I., “Development of the Infrared Pyrometer With Fiber Optic for Measuring Cutting Temperature at High Speed Cutting”, ASME PED, Vol.44, pp.17-32, 1990
- (16) Ueda, T., Hosokawa, A. and Yamamoto, A., “Measurement of Grinding Temperature Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber”, ASME J. Eng. for Industry, Vol.108, pp.247-251, 1986
- (17) Incropera, Frank P. and DeWitt, David P., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, 3rd ed., 1990
- (18) Carl, E. Leshock, “Temperature Measurement and Analysis During Turning”, M. Thesis, Purdue Univ., 1994
- (19) Kishigami, T., Heberlein, J.V. and Pfender, E., “Experimental Investigation of Heat Transfer between Plasma Jets and Substrate”, Proc, 10th Int. on Plasma Chemistry, Bochum, Germany, Vol.1, pp.3-11, 1991
- (20) N.Nautaki, Y. Yamane, “High Speed Machining of Inconel 718 With Ceramic Tools”, Annals of the CIRP, Vol.42, pp.103-106, 1993