

# 초내열합금 Inconel의 가공성 평가

## Estimation of Machinability for Super Heat-resistant Alloy (Inconel)

정 경효\*, 정 윤교\*

\* 창원대학교 기계공학과 대학원

\*\* 창원대학교 기계공학과

### 1. 서 론

종래의 초내열합금은 원자력산업과 우주항공산업등에 주로 사용되었으며, 산업이 고도화되어짐에 따라 각종 산업기계와 자동차 분야에까지 광범위하게 사용되어지고 있다. 대표적인 초내열합금으로서의 인코넬(Inconel)은 인성과 Creep 특성이 우수하고, 특히 고온강도가 높고 화학적으로도 안정하여 부식에도 강한 장점을 지니고 있어 항공기 부품재료로서 최근 각광을 받고 있다.

그러나, 인코넬의 고온강도, 공구재료와의 친화성, 열전도성 등과 같은 성질은 피삭성의 저하를 초래하여 절삭가공에 많은 문제점을 야기시킨다.<sup>[1-3]</sup> 특히 절입경계부에 이상순상이 생기기 쉽고, 칩은 전단형으로 생성되는 경우가 많으며, 열전도성이 나쁜 공구에 용착하여 파손을 일으키는 경우가 많다. 이러한 인코넬의 가공시에는 인성이 우수한 초경 K종이 유리하다고 알려져 있으나 고속절삭에 부적합하고<sup>[2]</sup>, 다듬질가공에는 내마멸성이 우수한 CBN소결체가 적합하며<sup>[1][3]</sup> 고속절삭에서는 고경도이면서 가격이 저렴한 세라믹공구가 적합하다고 알려져 있다.<sup>[5][6]</sup>

그러나 어떠한 절삭영역에서 어떠한 공구가 인코넬의 절삭에서 우수한 절삭성능을 가지는가에 대하여서는 종합적으로 연구되어진 바가 없으며, 이에 대한 데이터의 축적이 인코넬의 절삭성을 높이는 방안이라 할수 있다.

본 연구에서는 일반적으로 사용되어지고 있는 공구재종인 코팅초경합금공구(Coated Tungsten Carbide Insert)와 세라믹 공구(Ceramic Insert)를 사용하여 초내열합금인 인코넬 600 을 절삭가공하여, 절삭저항(Cutting force), 공구의 파손 및 마모, 칩(Chip)의 용착현상등의 가공성에 영향을 주는 요인에 대하여 검토함으로서, 공구의 종류에 대응하는 적절한 절삭영역을 설정하는 것을 목적으로 하였다.

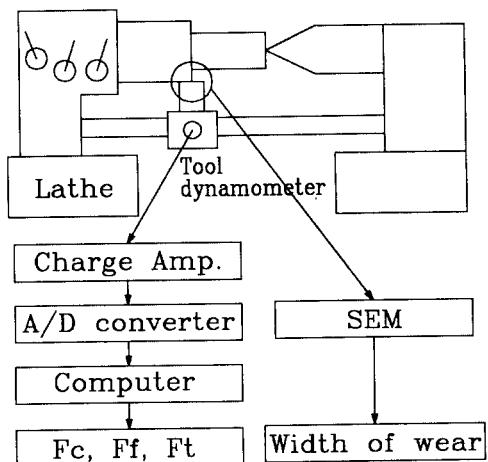


Fig.1 Experimental setup

### 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 인코넬절삭을 위해 화천(주)의 정밀고속선반을 사용하였다. 절삭저항의 3분력은 Kistler 사제 9257B의 압전소자형 공구동력계를 치구를 제작하여 선반에 부착시켜 A/D converter와 PC를 사용하여 측정하였다. 공구인선부의 마모 및 파손은 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 칩의 형태는 금속현미경으로 촬영하였다. 그림1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

실험에 사용한 피삭재는 인코넬 600으로서 가공성의 비교를 위하여 SM45C도 함께 절삭을 행하였다. Table 1 은 피삭재의 화학적 조성을, Table 2 는 피삭재의 기계적 성질을 나타내고 있다. 절삭속도에 대한 가공성평가는 단면절삭을 행하여 피삭재의 직경의 변화에 따라 절삭속도가 변할수 있도록 절삭조건을 설정하였다. 전 실험을 통하여 절삭유는 사용하지 아니하였으며, 각 실험조건은 Table 3 에 나타내었다.

Table 1 Chemical components of materials<sup>[7]</sup>

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Cu
Inconel 600	0.15>	0.50>	1.0>	0.3>	0.015>	72<	14~17	6~10	0.50>
SM45C	0.42 ~0.48	0.15 ~0.35	0.6~0.9	0.030>	0.035>				

Table 2 Mechanical properties of materials<sup>[7]</sup>

	Yielding stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile stress (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (H <sub>B</sub> )
Inconel 600	245<	550<	30<	179>
SM45C	345<	570<	20<	167~229

Table 3 Experimental conditions

Items	Conditions
Lathe	Precison high speed lathe (HL-460 WHACHON Co.)
Dynamometer	Piezo electro type (Kistler : 9257B)
Materials	SM45C and Inconel 600
Tools	Coated tungsten carbide insert (KT300 : TiC+Ti+TiN) Ceramic insert (A-65 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC)
Cutting velocity(V <sub>c</sub> )	10~200(m/min)
Feed(f)	0.045~0.314(mm/rev)
Depth of cut(d)	0.1~1.5(mm)
Cutting fluid	Dry

### 3. 절삭저항에 의한 가공성 평가

절삭가공에 있어서 절삭저항은 피삭재의 절삭능률 및 가공정밀도와 같은 가공성을 평가하는 척도로서 중요한 요소이다.

그림2는 초경 및 세라믹공구로서 인코넬을 절삭가공하였을 경우, 절삭속도의 변화에 대하여 절삭저항의 3분력의 변화를 보여주고 있다. 예상되는 바와 같이 어느공구를 사용하여도 3 분력중 주분력 횡분력 및 배분력의 순으로 절삭저항의 크기가 작아지며, 세라믹공구로 절삭하였을 경우 초경공구의 경

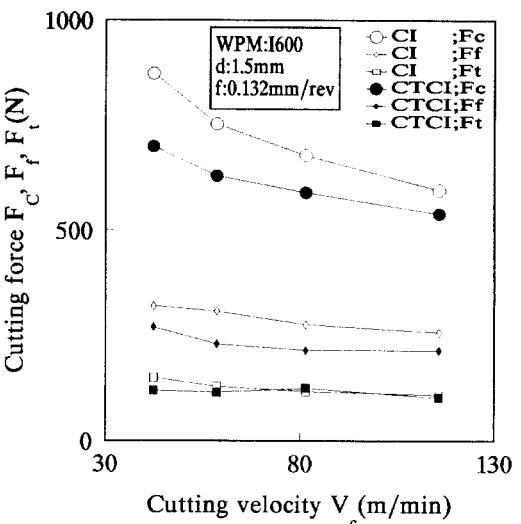


Fig.2 Difference of cutting force for I600 with CI and CTCI

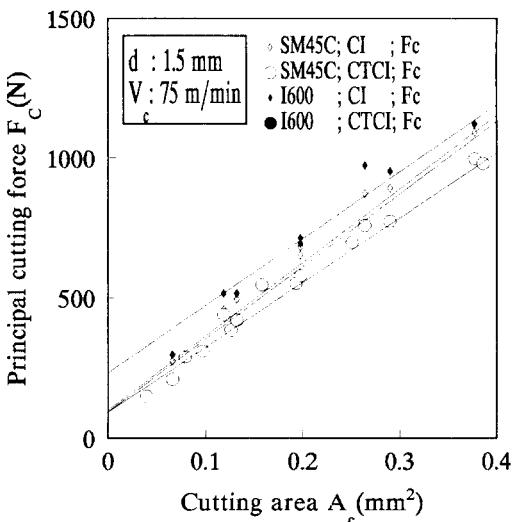


Fig.3 Relationship between cutting area and principal cutting force for various cutting conditions

우보다 절삭저항이 약간 증대하고 있음을 알 수 있다. 절삭저항에 관련하여 모든 조건을 종합적으로 고찰하기 위하여 일정한 절삭속도 하에서 절삭면적과 절삭저항의 주분력과의 관계를 도시한 것이 그림 3이다. 절삭조건의 상이에는 무관하게 절삭저항은

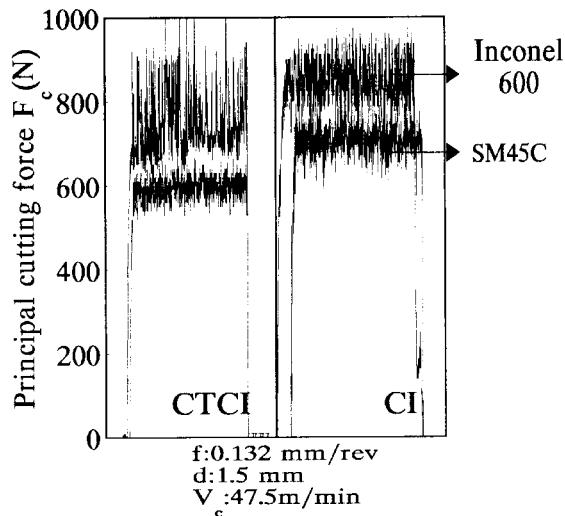


Fig.4 Change of principal cutting force between Inconel 600 and SM45C with CTCI and CI

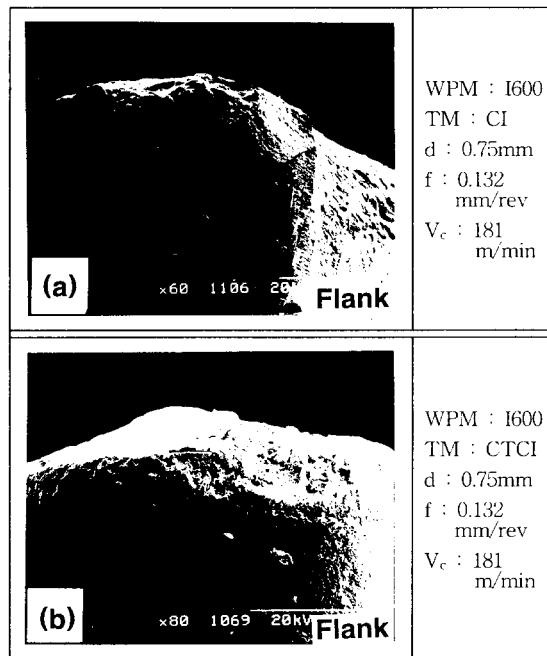


Fig.6 Photograph for cutting edge of CI and CTCI

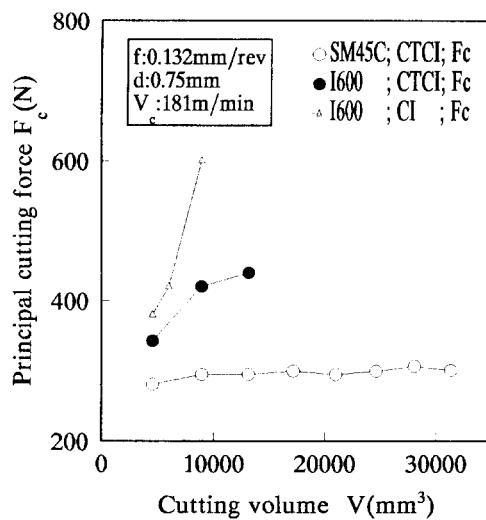


Fig.5 Relationship between cutting volume and principal cutting force

절삭면적에 대하여 일의적이라 할수 있으며, 이러한 결과로 부터 인코넬의 가공성을 절삭저항의 대소(大小)에 의해 판단하면 인코넬은 SM45C에 비교해서 난삭재라고 말하기 어렵다.

인코넬 600은 연성이 뛰어난 재료로서 이러한 성질이 절삭가공을 어렵게 하고 있다. 그림4는 초경및 세라믹공구로서 인코넬및 SM45C를 절삭하였을때 절삭시간에 따른 절삭저항의 변동폭을 비교한 그림이다. 인코넬을 가공했을 경우 절삭저항의 변동폭이 SM45C보다 2 배이상 크며, 이 그림에서의 절삭조건에서는 인코넬의 절삭기구가 전단형 칩을 발생시킨다는 것을 뒷받침하고 있다. 그림5는 초경공구를 사용하여 인코넬과 SM45C를, 세라믹공구를 사용하여 인코넬을 절삭하였을때, 가공량에 대한 주분력의 변화를 보여주고 있다. 가공량이 많아 질수록 SM45C에 대해서는 절삭저항의 큰 변화를 볼수 없지만 인코넬의 절삭인 경우는 급격한 절삭저하의 증가를 볼 수있다. 초경으로 인코넬을 절삭하였을 경우의 절삭저항의 급증은 가공량의 증가에 따른 공구인선의 마모와 칩의 용착에 의한 현상이며 (그림 6(b)참조), 세라믹공구로 인코넬을 절삭했을 경우는 공구인선의 파손(그림 6(a)참조)에 기인한다고 사료된다. 이러한 결과는 특정한 절삭조건인 경우이고, 절삭속도, 이송 및 절입깊이등을 종합적으로 검토하면 공구재료에 대한 적절한 절삭영역을 설정할수 있을 것이다.

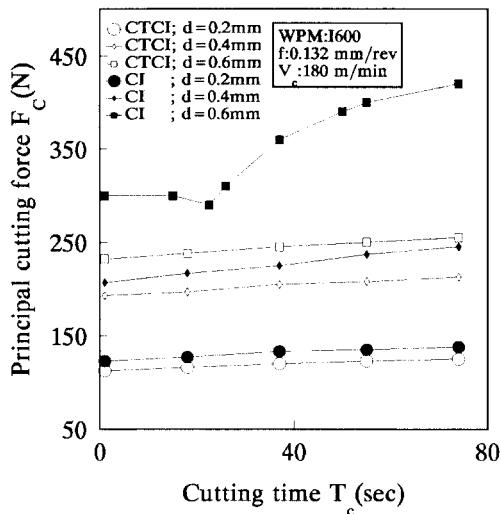


Fig.7 Change of principal cutting force for lapse of cutting time

Table 4 Width of flank wear

Depth of cut (mm)	Width of flank wear $W_b$ ( $\mu\text{m}$ )			
	Cutting time 37 (sec)		Cutting time (74 sec)	
	CTCI	CI	CTCI	CI
0.2	72	44.8	120.7	51.7
0.4	50	32.7	75.9	43.1
0.5	36.2	34.5	84.5	43.1
0.6	25.9	Breakage	70.7	Breakage

#### 4. 공구의 마모 및 파손

상술한 바와같이 인코넬이 가지는 높은 인성은 절삭조건에 따라서 비정상적인 절삭가공을 초래할 뿐만아니라 공구의 마모에도 큰 영향을 미칠수 있다.

그림7은 초경과 세라믹공구로서 인코넬을 가공했을 경우, 절입깊이를 변화시켰을때 가공시간에 대한 주분력의 변화를 나타내었다. 초경은 세라믹에 비하면 비교적 인성이 있는 재료이기 때문에 프랭크면의 마모가 공구 손상의 주체되어, 절입깊이의 변화에 관계없이 절삭저항의 점진적 증가가 보인다.

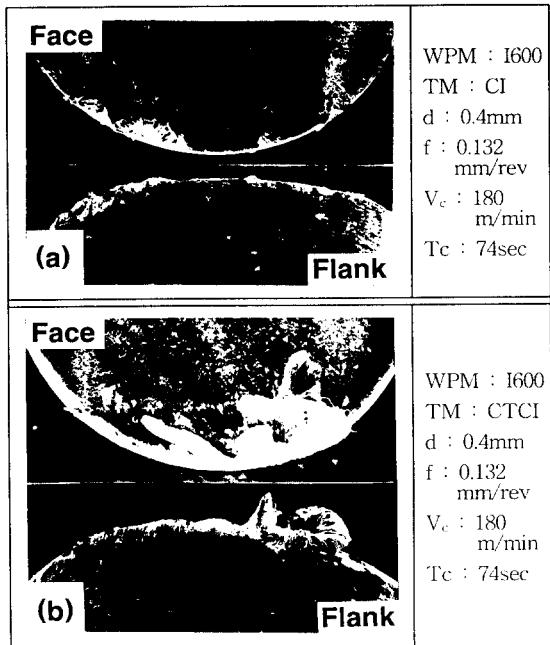


Fig.8 Observation of cutting edge for CI and CTCI

그러나 세라믹공구인 경우에는 절입깊이가 0.6 mm가 되면 공구재료의 취성에 기인하여, 본 실험의 조건에서는 20여초를 전후하여 인선의 대규모파괴를 초래하며, 그 이후 파괴되어진 인선에 의해 절삭저항이 비정상적 증가를 보이고 있다.

여기에서 공구의 프랭크면 마모폭을 각종 절삭조건에서 SEM 사진에 의해 관찰하여 정량화한 표가 Table 4 이다. 이 표는 가공시간 37초와 74초의 시점에서 초경과 세라믹공구의 프랭크마모폭을 비교한 것이다. 표에서 알 수있는 것처럼 가공시간의 증가에 따라 프랭크마모폭이 증가하며, 초경이 세라믹공구보다 2배이상 마모폭이 크게됨을 알 수 있다. 또한 초경의 경우는 프랭크면마모와 병행하여 인선부위에 칩의 용착현상이 두드러지며(그림8(b)), 세라믹공구인 경우 프랭크마모폭에 있어서는 초경보다 적으나 인선부위에 칩핑현상을 발견(그림8(a)) 할수 있다.

#### 5. 가공영역의 설정

이상의 결과들로 부터 인코넬의 가공성은 공구인선의 마모 및 파손과 칩의 용착현상에 영향을 미치는 제조건물 즉 절삭속도, 이송, 절삭깊이에 관

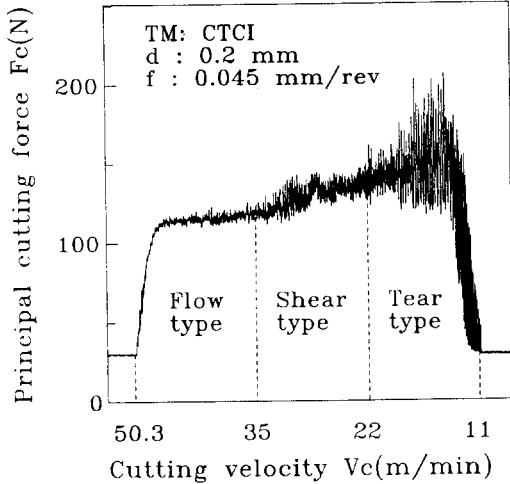


Fig.9 Change of principal cutting force for cutting velocity with CTCI

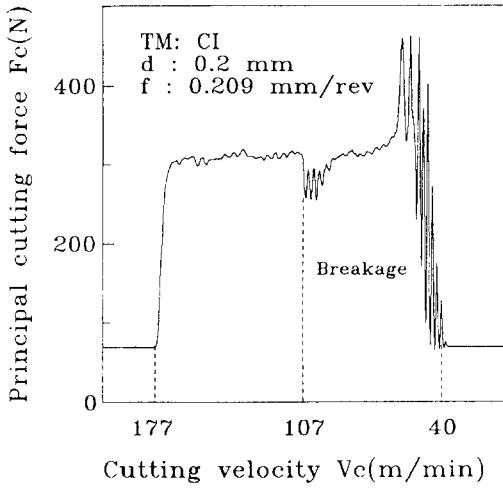


Fig.11 Change of principal cutting force for cutting velocity with CI

Flow type chip $V_c$ : 50~35 m/min	Shear type chip $V_c$ : 35~22 m/min	Tear type chip $V_c$ : 22m/min 이하

Fig.10 Observation of chip type for various cutting velocity

계된다고 사료된다. 따라서 본 절에서는 각종 절삭 조건과 공구의 손상 관계를 규명하여 적절한 가공 영역을 설정하고자 한다.

그림9는 초경공구를 사용하여 인코넬을 단면 절삭하였을 때 주분력의 변화를 도시한 것이다. 단면 절삭을 행할 때 공작물의 외주에서 내주로 절삭하였기 때문에 공작물 직경의 변화에 따라 절삭 속도는 감소한다. 본 절삭 조건에서는 절삭 속도가 50~35 m/min 사이의 영역에서는 유동형 칩이 발생하는 구간으로 정상적인 절삭이 이루어지고 있다. 그러나 절삭 속도가 대략 35 m/min 보다 작게 되면 칩의 형태

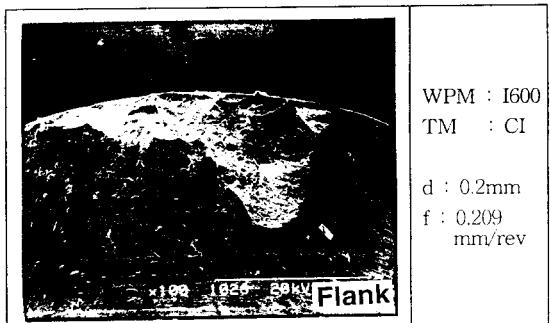


Fig.12 Breakage of CI cutting edge

가 전단형으로 바뀌기 시작하면서 절삭 저항의 변동 폭이 크지게 된다. 절삭 속도가 22 m/min 부근에서 작아지게 되면 열단형 칩으로 되면서 절삭 저항의 변동 폭은 더욱 크지고 있는 것을 그림 9는 보여주고 있다. 이러한 현상을 확인하기 위하여 각 영역에서의 칩의 형태를 채취하여 관찰한 것이 그림 10이다. 또한 세라믹 공구를 사용하여 동일한 실험을 행한 결과가 그림 11이다. 초경공구와 같은 칩의 형태의 변화는 볼 수 없었으나, 본 실험 조건에서는 절삭 속도 107 m/min 부근에서 인선의 결손이라 생각되는(그림 12 참조) 절삭 저항의 격감이 보이며 그 이후는 비정상적 절삭이 지속되고 있다.

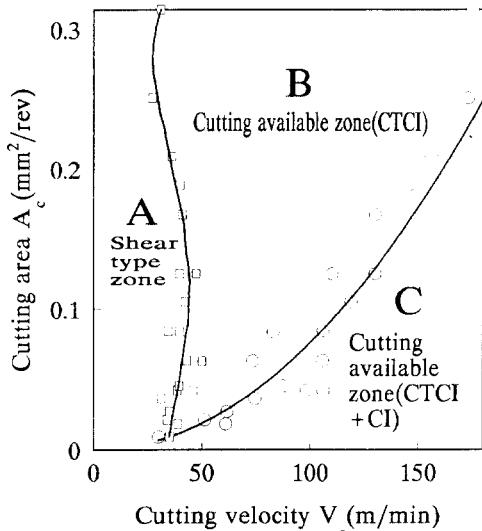


Fig.13 Plotting of cutting available zone

이러한 결과를 토대로 하여 절삭깊이, 이송 및 절삭속도를 변화시켜 정상상태와 비정상상태의 절삭영역을 구분하는 임계절삭속도를 대한 절삭면적(이송×절삭깊이)과의 관계를 초경공구로 절삭한 경우(□표)와 세라믹공구로 절삭한 경우(○표)를 함께 도시한 것이 그림13이다. 그림에서 보는바와 같아, 절삭영역은 A, B 및 C의 3영역으로 구분되어지며, A영역은 초경공구인 경우에 전단형 및 열단형 칩이 발생되어지고, 세라믹공구인 경우는 인선의 파손을 초래하는 영역으로서 비정상상태의 가공이 이루어 진다고 할수 있다. B영역은 초경공구에 의해서 만이 유동형침을 발생시키는 영역으로서 정상상태의 절삭이 이루어 지며, 세라믹공구인 경우는 인선의 결손이 발생하는 영역이다. C영역은 초경과 세라믹공구 어느쪽도 정상절삭을 행할수 있는 영역이라 할수 있다. 그러나 여기에서 주지해야 할 사항은 절삭속도가 약 100 m/min 이상 증가하면 B 및 C 영역이라 할지라도 초경공구인 경우는 공구와 피삭재의 친화성과 빨열에 의한 피삭재의 연화에 기인하여 용착현상이 발생하는 것을 실험을 통하여 경험하였다. 용착현상의 발생은 가공시간, 인선의 상태, 이송 및 절삭속도등에 복합적으로 관계된다고 생각되며 앞으로 이 부분에 대한 검토가 되어져야 할것으로 사료된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 일반적으로 사용되어지고 있는 공구재종인 초경공구와 세라믹 공구를 사용하여 초내열합금인 인코넬 600을 각종 절삭조건에서 가공하여, 절삭저항, 공구의 파손 및 마모, 칩의 용착 현상등의 관점에서 가공성을 검토한 결과 아래와 같은 결론을 얻을수 있었다.

- (1) 초경공구인 경우 인코넬600은 절삭저항의 크기의 관점에서는 SM45C에 유사하나, 재료의 인성에 기인하여 절삭저항의 변동폭이 크며 공구 인선에 칩의 용착현상을 발생시킨다.
- (2) 세라믹공구로 인코넬600을 절삭한경우 공구의 취성적 성질에 기인하여 공구 인선의 결손을 유발시킴을 알수 있었다.
- (3) 각종 절삭조건을 종합적으로 검토한 결과 인코넬600의 절삭에 대하여 초경공구와 세라믹공구의 유용한 절삭영역을 설정할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 新谷一博ら, “インコネル 718材 加工における CBN工具の摩耗特性”, 精密工學會誌, 58/10/1992.
- [2] 狩野勝吉, “データでみる切削加工の最先端技術”, 工業調査會, 1992.
- [3] 성기석와 1인, 1993, “나침절삭시 CBN, 소결 및 단결정 다이아몬드 공구의 마멸과 예측에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집 제 17권 제 1호.
- [4] 김진남, “Plasma 고온가공법을 이용한 Inconel 718의 선삭가공에 관한 연구”, 한국정밀공학회 '95년도 춘계학술대회 논문집, 1995.
- [5] Norihiko NARUTAKI, “高速切削におけるセラミック系工具の損傷”, 日本機械學會論文集(C編), 58권543호(1992-3).
- [6] 山根八州男, “セラミック工具によるインコネル718の高速切削”, 日本精密工學會誌, 59/11/1993, 1815~1820.
- [7] JIS, G 4051, G 4901 p1231~1237, p1393~1397