

◆특집◆ 선삭 가공 공정의 가공 정밀도 향상

선삭가공에서 초내열합금 Inconel 600의 가공성 평가

원종식*, 임은성#, 정윤교**

Estimation of Machinability for Super Heat-resistant Alloys Inconel 600 in Turning Process

Jong-Sik Won*, Eun-Seong Lim#, Yoon-Gyo Jung**

(Received 21 November 2011; received in revised form 5 December 2011; accepted 6 December 2011)

ABSTRACT

Recently, super heat-resistant alloy Inconel 600 come into spotlight as the material of airplane parts but this material causes lots of problems that is, reduction of machinability and attritious wear and breakage of cutting tool during turning processing due to high temperature strength and cohesion between tool material and Inconel 600. Therefore, in this study, it was purposed to determine tool material kind and to select of proper cutting range when turning process was carried out for Inconel 600. In order to these Purpose, coated carbide tool and ceramic tool was used in this experiment and the machinability of Inconel 600 was investigated from perspective of the cutting force, chipping and wear of tool and deposition phenomenon of chip.

Key Words : Inconel 600(인코넬 600), Turning(선삭), Cutting Force(절삭력), Tool Wear(공구마멸)

1. 서 론

원자력 및 우주항공사업에 주로 사용되어지고 있는 초내열합금은 산업이 고도화되어짐에 따라서 각종 산업기계와 자동차분야에까지 광범위하게 사용되어지고 있다. 대표적인 초내열합금인 인코넬은 고온강도가 높고 화학적으로도 안정하여 부식에도 강한 장점을

을 가지고 있을 뿐만 아니라 인성과 Creep 특성이 우수하여 최근 항공기부품재료로 각광을 받고 있다.

그러나 인코넬의 고온강도성 및 공구재료와의 친화성이 피삭성의 저하를 초래하여 선삭가공시 많은 문제점을 야기시킨다^[1-3]. 특히 절입경계부에 이상손상이 생기기 쉽고, 칩은 전단형으로 생성되는 경우가 많으며, 열전도성이 나쁜 공구에 용착하여 공구의 파손을 일으키는 경우가 많다. 이러한 인코넬의 선삭 가공시에는 인성이 우수한 초경 K종이 유리하다고 알려져 있으나 고속절삭에는 부적합하며, 정삭가공에서는 내마멸성이 뛰어난 CBN 소결체공구가 고속절삭에서는 고경도이면서 비교적 경제적인 세라믹공구가 적합하

* 창원폴리텍 7대학 컴퓨터응용기계과
교신저자 : 창원대학교 기계공학과 대학원
E-mail : dmstjddmsnr@daum.net
** 창원대학교 기계공학과

다고 알려져 있다^{4,5)}. 그러나 어떠한 절삭영역에서 어떠한 공구가 인코넬의 선삭에서 우수한 절삭성능을 가지는가에 대한 종합적인 연구가 수행되어진 바는 없으며, 이러한 연구에 대한 데이터의 축적이 인코넬의 절삭성을 높이는 방안이라 할 수 있다.

본 연구에서는 일반적으로 사용되어지고 있는 공구 재종인 코팅초경합금공구(CTCI)와 세라믹공구(CI)를 사용하여 대표적 초내열합금인 인코넬을 선삭가공하여 절삭저항, 공구의 파손 및 마모, 칩의 용착현상 등의 가공성에 영향을 주는 요인들에 대하여 검토함으로써, 공구의 종류에 대응하는 적절한 절삭영역을 설정하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 인코넬 600의 선삭가공을 위하여 화천(주)의 정밀고속선반을 사용하였다. 절삭저항의 3분력은 Kistler사제 9257B의 압전소자형 공구동력계를 사용하여 측정하였으며 측정되어진 아날로그신호는 A/D 변환기를 통하여 디지털신호로 변경시킨 후 PC에 입력하여 분석하였다. 공구 인선부의 마모 및 파손은 주사전자현미경으로 관찰하였으며 칩의 형태는 금속현미경으로 촬영하였다.

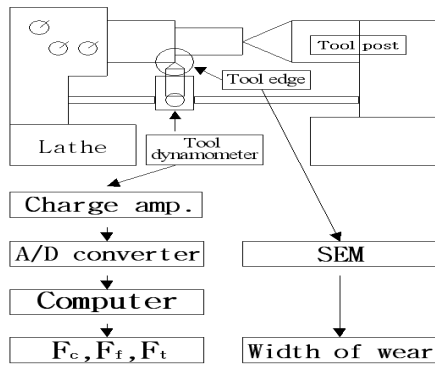


Fig. 1 Experimental setup

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

실험에 사용한 피삭재는 인코넬 600으로서 가공성의 비교를 위하여 SM45C도 함께 선삭가공을 수행하였다. Table1은 피삭재의 화학적 조성을, Table 2는 피

삭재의 기계적 성질을 나타내고 있다. 절삭속도에 대한 가공성 평가는 단면절삭을 행하여 피삭재의 직경의 변화에 따라 절삭속도가 변할 수 있도록 절삭조건을 설정하였다. 전 실험을 통하여 절삭유는 사용하지 아니하였다. 각 실험조건은 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of materials

Composition Material	unit : (%)								
	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

Properties Material	Yielding stress (N/mm ²)	Tensile stress (N/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (HB)
Inconel 600	245<	550<	30	179<
SM45C	345<	570<	20<	167~229

Table 3 Experimental conditions

Items	Conditions
Lathe	Precision 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+TiN) Ceramic insert (A-65 : Al ₂ O ₃ +TiC)
Cutting velocity(V _c)	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.

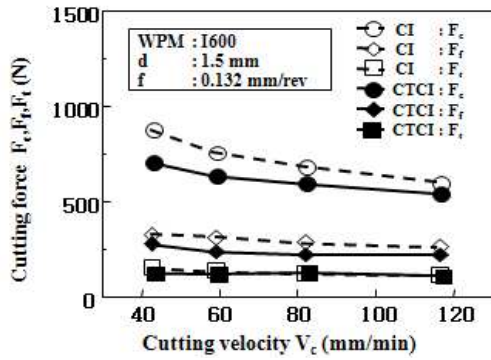


Fig. 2 Cutting forces for I600 with CI and CTCI

Fig. 2는 절입깊이(d) 1.5mm, 이송(f) 0.132mm/rev의 조건으로 초경 및 세라믹공구로서 인코넬을 절삭 가공하였을 경우, 절삭속도의 변화에 대한 절삭저항의 3분력의 변화를 보여주고 있다. 예상되는 바와 같이 어느 공구를 사용하여도 3분력 중 주분력, 이송분력 및 배분력의 순서로 절삭저항의 크기가 작아지며, 세라믹공구로 절삭하였을 경우 초경공구의 경우보다 절삭저항이 약간 증대하고 있음을 알 수 있다.

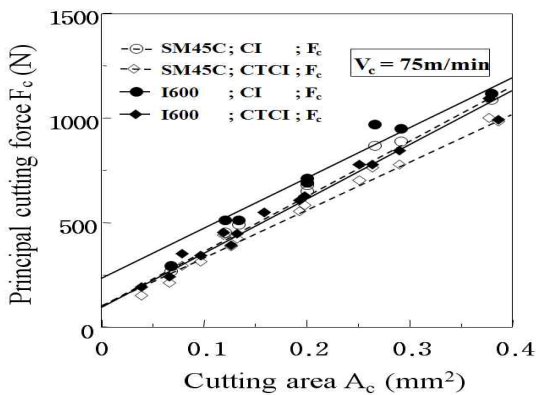


Fig. 3 Relationship between cutting area and principal cutting force for various cutting conditions

Fig. 3은 공구재료 및 가공재료별 절삭면적에 대한 주분력과의 관계를 도시하고 있다. 그림에서 나타나듯이 절삭저항은 절삭조건의 차이에는 무관하게 절삭면적에 대하여 일정한 상관관계를 갖는다 할 수 있으며, 인코넬 절삭의 경우가 SM45C 절삭의 경우보다 절삭저항이 크게 나타나는 것으로 보아 인코넬은

SM45C에 비교해서 난삭성을 갖는다고 할 수 있다.

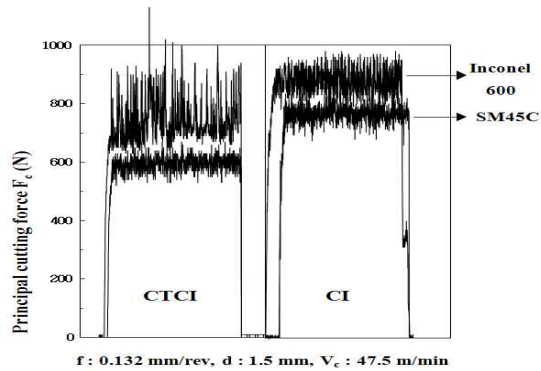


Fig. 4 Change of principal cutting force of I600 and SM45C with CTCI and CI

Fig. 4는 절삭속도 47.5m/min, 절삭깊이 1.5mm, 이송 0.132mm/rev의 절삭조건으로 초경 및 세라믹공구로서 인코넬 및 SM45C를 절삭하였을 때 절삭시간에 따른 절삭저항의 변동폭을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이, 인코넬을 가공한 경우 절삭저항의 변동폭이 SM45C보다 2배 이상 큰 것을 알 수 있는데 이는 연성이 뛰어난 인코넬 600이 갖는 재료 특성에서 기인하는 것으로 보이며 이러한 연성으로 인하여 구성인선이 발생한 때문이라고 생각된다. 절삭저항의 변동폭이 이렇게 큰 것으로 볼 때 톱날 모양의 칩이 생성되며, 이는 절인에 채터진동을 유발되어 정상마모의 진행을 촉진시키거나 이상손상이 생기게 하는 요인으로 작용한다.

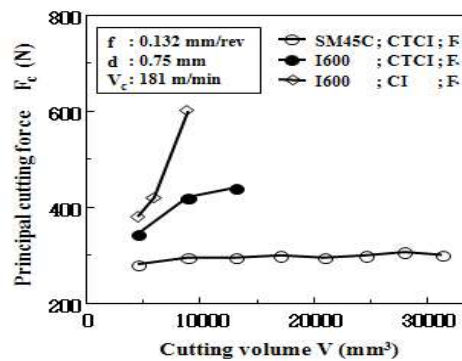


Fig. 5 Relationship between cutting volume and principal cutting force

Fig. 5는 초경공구와 세라믹 공구로 SM45C와 인코넬을 절삭하였을 때 가공체적의 증가에 따른 주분력의 변화를 보여주고 있다. 여기에서 사용한 절삭속도는 181m/min으로서 초경공구에 의한 일반 강재 절삭에 적합한 조건이었다. 그림에서 보듯이 SM45C 절삭의 경우에는 가공체적이 증가함에 따라 절삭저항이 매우 완만하게 증가하는 반면에 인코넬 절삭의 경우는 매우 급격한 증가를 보이는 것으로 보아 인코넬의 피삭성은 SM45C에 비하여 상대적으로 매우 낮은 것을 알 수 있다. 이처럼 초경으로 인코넬을 절삭할 때 절삭저항이 급증하는 이유는 Fig. 6(A)에서 보는 것과 같은 심한 용착현상으로 인하여 공구마모가 신속히 진행되기 때문이라고 생각되며, 세라믹 공구로 인코넬을 절삭할 경우에는 Fig. 6(B)에서 볼 수 있는 바와 같은 공구인선의 칩핑 및 대형 파손 때문이라고 사료된다.

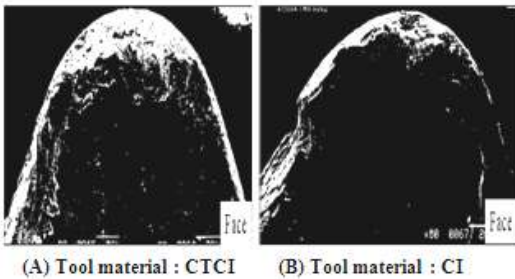


Fig. 6 SEM micrographs of worn tool edges

따라서, 난삭재의 효율적인 절삭을 위해서는 절삭속도와 이송 및 절삭깊이 등의 변화에 대한 공구마모율을 종합적으로 검토하여 공구재료에 대한 적절한 절삭영역을 설정할 필요가 있다.

4. 공구마모 및 파손

상술한 바와 같이 인코넬이 가지는 높은 인성은 절삭조건에 따라서 비정상적인 절삭가공을 초래할 뿐만 아니라 공구의 마모에도 큰 영향을 미칠 수 있다.

Fig. 7은 초경과 세라믹공구로 인코넬을 가공했을 경우, 절삭깊이별 가공시간에 대한 주분력의 변화를 나타내었다. 초경은 세라믹에 비하면 비교적 인성이

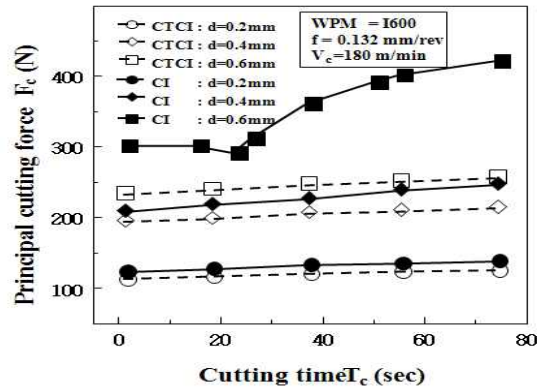


Fig. 7 Change of principal cutting force for lapse of cutting time

크므로 프랭크마모와 경계마모가 공구 손상의 주체가 되기 때문에 절삭깊이의 변화에 관계없이 절삭저항이 점진적으로 증가함을 볼 수 있다. 그러나 세라믹공구의 경우 절삭깊이가 0.6mm에 도달하면 가공시간 20초를 전후하여 취성에서 기인한 칩핑이 발생하고 그 이후 파괴된 인선에 의한 절삭이 계속되면서 절삭저항이 비정상적으로 증가하는 거동을 나타내고 있다.

Table 4는 각종 절삭조건에 따른 공구의 프랭크면 마모폭을 SEM 사진에 의해 관찰한 것을 정량화하여 나타낸 것이다. 이 데이터는 절입깊이가 0.2, 0.4, 0.5 및 0.6의 조건에서 가공시간 37초와 74초의 시점에서 초경합금공구와 세라믹공구의 프랭크마모 폭을 비교한 것이다.

Table 4 Width of flank wear

Depth of cut (mm)	Width of flank wear V _b (μm)			
	Cutting time : 37(s)		Cutting time : 74(s)	
	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

표에서 알 수 있는 것처럼 가공시간의 증가에 따라 마모가 증가하며, 74초의 시점에서는 초경합금공구가 세라믹공구보다 2배 이상 마모 폭이 크게 된다. 또한 초경합금공구의 경우는 프랭크면 마모와 병행하여 인

선부위에 칩의 용착현상이 두드러지며(Fig. 8(A)), 세라믹공구인 경우 프랭크마모 폭에 있어서는 초경보다 적으나 인선부위에 칩핑현상(Fig. 8(B))을 발견할 수 있다.

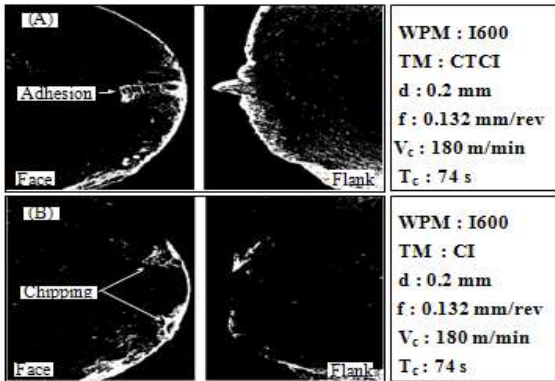


Fig. 8 Observation of cutting edge for CI and CTCl

5. 구성인선 및 채터

전절의 Fig.4에서 언급한 바와 같이 인코넬을 절삭할 때 주분력의 변동폭은 SM45C 절삭의 경우보다 매우 큰 것을 알 수 있는데, 이렇게 주분력의 변동폭이 큰 것은 구성인선과 채터진동의 발생이 주요 원인이라 할 수 있다. 구성인선이 발생된 경우에는 구성인선이 공구날끝 역할을 하게 되어 공구의 실제 경사각이 증가되는 효과가 있으므로 주분력이 감소하고^[6], 탈락된 시점에서는 공구의 원래 경사각이 유효하기에 상대적으로 주분력이 크게 되며, 이러한 현상이 구성인선의 발생, 성장, 탈락에 따라 반복되어 주분력의 변동이 심하게 나타나는 것으로 판단된다. 특히 코팅된 초경합금을 사용한 경우 세라믹 바이트를 사용한 경우보다 변동이 더욱 큰 것을 알 수 있는데 이는 초경공구와 피삭재의 친화력이 세라믹과 피삭재의 친화력보다 커서 구성인선이 용이하게 발생했기 때문이라고 생각된다.

Fig. 9는 Fig. 4의 절삭조건으로 가공한 경우 공구인선의 상태를 촬영한 사진이다. 그림에서, 공구날 끝에 구성인선으로 보이는 물질이 관측되어짐을 알 수 있다.

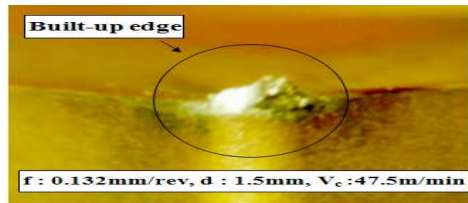


Fig. 9 Photo of tool edge

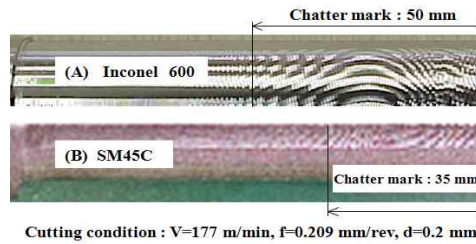


Fig. 10 Chatter mark on machined surface

Fig. 10은 외경 20mm인 인코넬 600과 SM45C를 척에서부터 100mm 돌출되도록 고정된 가공물을 절삭속도 177m/min, 이송 0.209mm/rev, 절삭깊이 0.2mm의 절삭조건으로 가공한 표면 사진이다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, SM45C의 경우 가공물의 자유단으로부터 35mm 지점까지 채터무늬가 있는 반면에 인코넬 600의 경우에는 50mm 지점까지 심한 채터무늬가 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 인코넬의 칩이 쉽게 절단되지 않고 톱날모양으로 형성되는 특징으로 인하여 SM45C에 비하여 채터가 심하게 발생된다고 생각된다. 따라서 인코넬은 SM45C에 비하여 구성인선 및 채터의 발생이 용이한 난삭성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

6. 최적 가공영역의 설정

이상의 결과들로부터 인코넬의 가공성은 공구인선의 마모 및 파손과 칩의 용착 현상에 영향을 미치는 제 조건들, 즉 절삭속도, 이송, 절삭깊이에 관계된다고 사료된다. 따라서 본 절에서는 각종 절삭조건과 공구의 손상관계를 규명하여 적절한 가공영역을 설정하고자 한다.

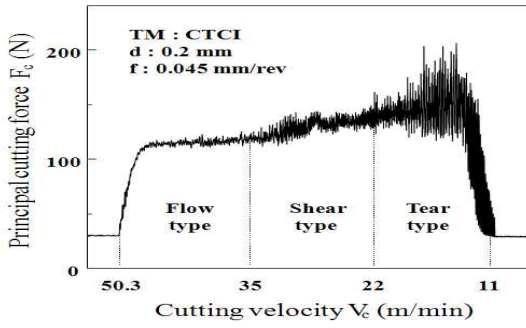


Fig. 11 Change of principal cutting force for cutting speed with CTCI

Fig. 11은 초경공구를 사용하여 인코넬을 단면 절삭하였을 때 주분력의 변화를 도시한 것이다. 단면절삭을 행할 때 공작물의 외주에서 내주로 절삭하였기 때문에 공작물직경의 변화에 따라 절삭속도는 감소한다. 본 절삭조건에서는 절삭속도가 50~35m/min 사이의 영역에서는 유동형 칩이 발생하는 구간으로 정상적인 절삭이 이루어지고 있다. 그러나 절삭속도가 대략 35 m/min 이하가 되면 칩의 형태가 전단형으로 바뀌기 시작하면서 절삭저항의 변동폭이 커지게 된다. 절삭속도가 22m/min 정도로 적어지면 칩의 형태는 열단형 칩으로 바뀌면서 절삭저항의 변동폭은 더욱 커지는 것으로 미루어 이 시점에서부터 구성인선이 발생한다고 사료된다.

에서는 유동형 칩이 생성되었고, 상대적으로 낮은 속도에서는 전단형 칩이, 가장 낮은 속도에서는 열단형 칩이 생성된 것을 확인할 수 있으며 칩의 모양도 톱날 모양을 하고 있는 것을 확인할 수 있다.

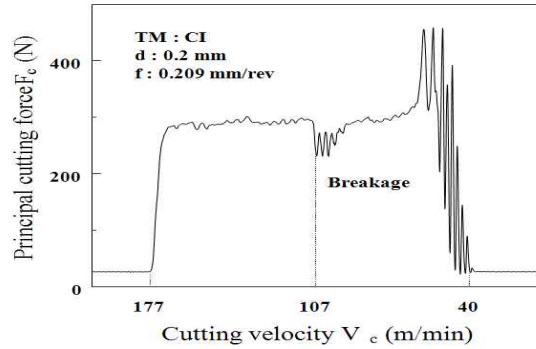


Fig. 13 Change of principal cutting force for cutting speed with CI

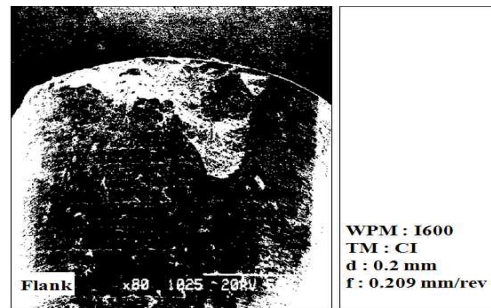


Fig. 14 Breakage of CI cutting edge




Feed : 0.045mm/rev, Depth of cut : 0.2mm	
Flow type chip Cutting speed : 50 ~ 35m/min	 × 10
Shear type chip Cutting speed : 35 ~ 22m/min	 × 10
Tear type chip Cutting speed : 20m/min	 × 10

Fig. 12 Observation of chip type for various cutting velocity

Fig. 12는 각 절삭속도별 칩의 형태를 채취하여 관찰한 것이다. 그림에서 보듯이 비교적 고속인 절삭속도

Fig. 13은 세라믹공구로 인코넬을 절삭속도 177-40m/min의 범위로 절삭하여 얻은 절삭속도와 주분력과의 관계를 도시하고 있다. Fig. 3-11의 절삭조건에 비하여 상대적으로 높은 절삭속도로 가공했기 때문에 절삭저항의 변동폭은 점차로 증가하는 경향을 나타내지는 않았으며 칩의 형태도 열단형은 발생하지 않았다. 그러나 절삭속도 107m/min 부근에서 주분력이 현저하게 감소되는 거동을 보이는데 이는 세라믹 공구의 취성으로 인한 공구 날끝의 결손에서 기인하는 것이라고 판단되며 이는 Fig. 14의 파손된 인선의 모양을 나타내는 사진에서 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 인코넬의 절삭에 있어서 낮은 절삭속도에서는 전단형 또는 열단형 칩이 발생하고 구성인선의 발생과 큰 절

삭저항의 변동 등으로 인하여 가공품의 표면 거칠기도 불량하게 되는 단점이 있으며, 과도하게 높은 절삭속도와 이송속도의 조건에서는 공구인선이 파손되는 현상이 나타난다. 따라서 인코넬 절삭에 적합한 공구재료별 최적 가공영역을 선정할 필요가 있다.

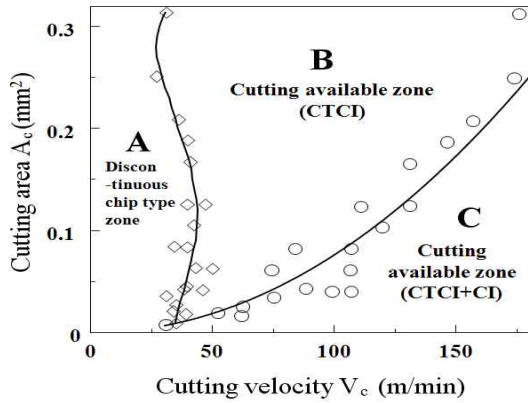


Fig. 15 Plotting of available cutting zone

Fig. 15는 다양한 절삭조건에서의 실험 결과를 토대로 하여 절삭면적 및 절삭속도에 따른 공구재료별 절삭특성을 영역으로 구분하여 나타낸 것으로서, 초경공구로 절삭한 경우는 □印을 세라믹공구로 절삭한 경우는 ○印으로 나타내었다. 절삭특성은 그림에서 보는 바와 같이 A, B 및 C의 3영역으로 구분할 수 있다. A영역은 초경공구와 세라믹으로 절삭시 전단형 또는 열단형 칩이 발생되고 구성인선도 발생되므로 표면품질이 불량하게 되고, 특히 세라믹공구를 사용하는 경우 인선에 칩핑이 빈번히 발생하므로 이 영역은 바람직한 절삭이 이루어지지 않는 영역이라 할 수 있다. B영역은 초경공구와 세라믹 모두 유동형 칩을 발생시키는 영역으로서 표면품질이 좋은 가공품을 얻을 수 있다. 다만 세라믹공구를 사용할 경우에는 인선의 결손이 발생치 않도록 기계와 공구 및 공작물이 강성을 갖도록 주의를 기울여야 하는 영역이다. C영역은 초경공구와 세라믹 모두 절삭저항의 변동폭이 적고 구성인선도 발생하지 않으며 유동형 칩이 발생하는 영역으로서 표면품질이 양호한 가공을 수행할 수 있는 영역이라 할 수 있다. 그러나 초경공구를 사용할 경우 절삭속도가 약 100m/min 이상 증가하면 B 및 C영역일지라도 용착마모가 발생하게 되므로 가공시간,

인선의 상태, 이송 및 절삭속도 등을 고려하여 용착마모를 피하도록 해야 한다.

7. 결론

본 장에서는 산업현장에서 상용되는 공구재료인 초경공구와 세라믹공구로 SM45C와 인코넬 600을 각종 절삭조건에서 가공하여, 절삭저항, 공구의 파손과 마모, 칩의 용착 및 구성인선의 발생, 체터진동 등의 관점에서 가공성을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 초경공구에 의한 인코넬 600 절삭시 절삭저항은 SM45C에 비하여 크며, 재료의 인성에 기인하여 절삭저항의 변동폭이 크고 공구 인선에 칩의 용착현상과 구성인선이 발생됨이 확인되었다.
2. 인코넬 600 절삭시 공구마모는 SM45C에 비하여 매우 신속히 진행됨을 확인하였다. 세라믹공구의 경우 공구의 취성 때문에 칩핑에 의한 공구 파손이 유발됨을 알 수 있었다.
3. 인코넬 600의 고속 절삭에서는 SM45C 절삭의 경우보다 체터진동이 쉽게 발생함을 확인할 수 있었다.
4. 각종 절삭조건을 종합적으로 검토한 결과 초경공구와 세라믹공구에 의한 인코넬 600 절삭시 적용 가능한 최적 절삭조건을 설정할 수 있었다.

후 기

이 논문은 지식경제부 지방혁신사업(RT104-01-03)으로 수행되었음.

참고문헌

1. D.G.Thakur, B.ramamoorthy, L.Vijayaraghavan, 2010, "Effect of high speed cutting parameters on the surface characteristics of Superalloy Inconel 718", Proceedings of the World Cogress on engineering 2010, Vol. III WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.

2. Krzysztof Jemielniak, "Rough turning of Inconel 718", 2009, Advances in manufacturing science and technology, Vol. 33, No. 3, 2009, pp. 5-15.
3. K. W. Kim, H. M. Choi, W. S. Chae, D. H. Kim., 2003, "Performance of PVD and CVD coated carbide tools in machining Inconel 718", NuriMedia co., Ltd, pp. 41-48.
4. Chang-soo Son., 1998, "High speed machining characteristics of Nickel-Based superalloy Inconel 718", Department of Mechanical and Precision Engineering, Graduate School, Pusan National University, pp. 43-44.
5. Jong-Min Park, Won-Sik Choi, Soon-hong Kwon, Jin-hoon Cha., 2009, "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.
6. J.H. Cha, S.B. Han., 2010, "Searching Optimal Cutting 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, 2010, 4, pp. 295-300.