

니켈기 초내열합금의 절삭성에 관한 연구

강 신 호*, 김 대 은**

Machining Characteristics of Ni-based Heat Resisting Alloy

Kang, Sin Ho*, Kim, Dae Eun**

ABSTRACT

Ni-based heat resisting alloys are commonly used for high temperature applications such as in aircraft engines and gas turbines. In this work, the machinability of Nimonic 263 alloy is investigated with respect to optimum tool type and cutting conditions for both continuous and discontinuous machining as well as weld region. Among the five types of tools tested, K25 tool experienced the least of damage in machining the weld region. Furthermore, despite their superior high temperature hardness, Si-Al-O-N and CBN tools performed poorly in machining Nimonic 263.

Key Words : Heat Resisting Alloy(초내열합금), Tool Life(공구수명), Coated Carbide Tool(피복초경공구), Si-Al-O-N Tool(사이아론공구), CBN Tool(입방정질화붕소 공구), Tool Wear(공구마모), Transverse Rupture Strength(항절력)

1. 서 론

발전용 가스터빈과 항공기용 엔진의 고온부 부품소재(hot section materials)로 필수적인 초내열합금의 역사는 약 60년이다. 가스터빈의 발달은 초내열합금의 발달 과정과 맥을 같이 하고 있는데, 가스터빈의 출력과 효율 향상을 위해서는 터빈입구에서의 연소가스 온도를 올려야 하기 때문이다.

일반적으로 연소가스의 온도가 55℃(100℉) 증가하면 단순사이클의 출력이 10~13% 향상되고 효율은 2~4% 증가한다. 가스터빈의 경우는 1090℃~1260℃(2000℉

~2300℉)의 온도범위를 기록하고 있으며 약 1540℃(2800℉)까지 올려질 전망이다.⁽¹⁾ 따라서 이러한 온도범위에서도 고온강도와 고온내식성을 유지할 수 있는 초내열합금소재를 개발하려는 노력과 투자는 끊임없이 계속되고 있다.

초내열합금에는 철기(iron-base), 니켈기(Ni-base), 코발트기(Co-base)의 세 종류가 있는데, 이중 니켈기 초내열합금의 적용범위가 가장 넓으며 가스터빈에서는 디스크류, 연소실부품, 터빈의 케이스, 회전익(blades), 고정익(vanes) 등으로 사용되고 있다.

국내에서는 급증하는 전력수요에 대비하기 위해 한전

* 한전기공주식회사 G/T정비센터
** 연세대학교 기계공학과

및 민간자본이 동원되어 스팀/가스터빈을 이용한 복합사이클 발전설비를 증설하고 있다. 또 항공기의 경우에도 항공기 대형화의 세계적인 추세와 더불어 국내 항공산업의 신장에 따라 항공기 엔진을 비롯한 가스터빈류에 대한 정비(maintenance) 및 재생수리(renewal repair)의 수요가 증가되고 있는 실정이다.

반면에 초내열합금에 대한 절삭데이터는 그다지 확보되어 있는 편이 아니다. 그 이유는 초내열합금 자체가 워낙 고가인데다가 대부분 수입에 의존하고 있고, 국내의 가스터빈 정비기술이나 생산능력이 아직은 초보단계이기 때문이다. 현재까지 진행되고 있는 초내열합금의 절삭성에 관한 연구동향은 다음과 같다.

Vleugels⁽²⁾는 고속절삭가공시 고온에서 장시간 노출된 공구와 피삭재 사이의 화학적 상호작용이 공구마모기구가 뒹을 고찰하기 위해 Si-Al-O-N공구와 Pure Nickel, Inconel 600, Nimonic 105 를 실험하였다. 그에 의하면, 섭씨 1200도에서 Si-Al-O-N공구로부터 분리된 요소는 Pure Nickel로 용해 확산되고, Inconel 600 중의 니켈(Ni)과 크롬(Cr)은 Si-Al-O-N공구의 질소와 결합하여 질화물을 생성함으로써 친화력이 높아졌다. 또 Nimonic 105의 반응성은 Pure Nickel보다 낮는데 그 원인으로 티타늄과 질화물의 보호막이 연속적으로 생성되기 때문이라고 분석하였다.

He⁽³⁾는 혼합세라믹공구와 Si-Al-O-N공구로 니켈기 Inconel 718과 GH 4169를 절삭실험하였는데, 음의 인선경사각(negative cutting edge inclination)과 작은 공구안내각(tool lead angle)이 세라믹공구의 결손방지에 유리하다고 하였다. 또 절입경계손상(notching at depth of cut)은 절입경계내에서 일어나는 것이 아니라 톱니형의 거스러미(sawtooth-shaped burr)와 지느러미모양의 모서리를 지닌 칩(fin-shaped edges of chip)에 의해 경계면 밖에서 일어난다고 하였다.

Thangaraj⁽⁴⁾는 Inconel 718재료를 Silicon Carbide Whisker-Reinforced Aluminum Oxide Insert로 가공시의 공구마모유형에 대해 연구하였는데, 상대적으로 연한 니켈기의 Inconel 718 가공시에 발생하는 공구파손은 과도한 마모에 기인한 것이었고, 이 때 여유면마모(flank wear)는 낮은 절삭속도에서, 절입경계손상(depth of cut notch)은 높은 절삭속도에서 공구파손에 영향을 준다고 하였다.

Ohtani⁽⁵⁾는 코발트기 초내열합금인 스텔라이트합금을 CBN공구와 초경합금공구로써 정삭조건에서 절삭실험을

한 후, 공구파손, 공구수명과 피삭재의 표면거칠기를 측정하여 비교하였다. 그 결론으로 스텔라이트 합금은 CBN공구를 쓸 때가 초경공구를 쓸 때보다 훨씬 높은 절삭속도에서 절삭이 가능하며, 표면거칠기값도 초경공구로 절삭속도 65m/min 이상의 영역에서의 것을 제외하면 어느 것이나 $R_{max} 8\mu m$ 이내였다.

Tasaki⁽⁶⁾는 CBN공구로 Inconel 718을 절삭실험하여 공구마모와 공구수명, 표면거칠기 등을 초경공구로 절삭했을 때의 것과 비교하였다. 그 결과로 CBN으로 절삭할 때가 초경공구로 절삭할 때보다 수명이 길었으며, 적정절삭속도로는 초경공구일 경우 50m/min 이하이고 CBN공구일 경우 100m/min까지도 가능하다고 하였다.

정경효⁽⁷⁾는 니켈기 초내열합금인 Inconel 600의 가공성을 평가하기 위하여 피복초경합금공구(coated cemented carbide insert)와 세라믹공구(ceramic insert)를 사용하여 절삭실험하였다. 그 결과, 피복초경합금공구의 경우 재료의 인성에 기인하여 절삭저항의 변동폭이 크며 공구인선에 칩의 용착현상이 발생하였으며, 세라믹공구로 Inconel 600을 절삭한 경우 공구의 취성적 성질에 기인하여 공구인선의 결손이 발생했다고 하였다.

이상과 같이 사용빈도가 높은 니켈기 초내열합금인 Inconel합금과 코발트기합금인 스텔라이트합금(stellite alloy)의 절삭성에 대해 다양한 공구를 사용한 활발한 연구가 진행되고 있음을 알 수 있었다.

그러나 보통의 합금공구강 등과는 달리 절삭가공 전에 초내열합금 소재의 절삭성을 변화시킬 수 있는 열처리(heat treatment)나 용접육성(weld build-up)과 같은 공정이 가공조건에 어떤 변수로 작용하는가에 대해서 다루어진 것은 찾아보기가 힘들었다.

본 논문에서는 니켈기초내열합금인 Nimonic 263의 절삭성(machinability)을 각 공정별로 분석하고 공구마모기구에 대해 고찰함으로써, 적정공구재를 제시하고 능률적인 가공조건을 수립하는데 목적을 두었다.

2. 실 험

2.1 시험편 및 절삭공구

2.1.1 시험편(specimen)

1) 재질 : Nimonic 263(precipitation hardenable Ni-based high temperature alloy) 1971년도에 Rolls Royce Ltd.에 의해 개발되었으며, 80년대 초부터 GE사에서 보다 큰 용량의 가스터빈 연소기부품과 고

정의재료로 적용하기 시작한 니켈기 합금으로서 절삭성 지수(Machinability Index) 20에 해당하는 난삭성을 지니고 있다.⁽⁸⁾ 다음의 Table 1은 Nimonic 263의 합금성분을 보여주고 있으며, Table 2는 기계적 성질을 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of Nimonic 263⁽⁹⁾

Ni	Co	Cr	Mo	Fe	Cu	C	Si	Mn	Al	Ti	Al+Ti	S	other
Bal	19.0-21.0	19.0-21.0	5.6-6.1	0.7*	0.2*	0.04-0.08	0.40*	0.60*	0.30-0.60	1.9-2.4	2.4-2.8	0.007*	Ag, Bi, Pb

* maximum

Table 2 Average room temperature tensile data⁽¹⁰⁾

Form	Ultimate Tensile Strength		Yield Strength at 0.2% offset		Elongation in 50.8mm percent
	MPa	Ksi	MPa	Ksi	
Sheet(1~0.71-3.6mm.) Solution heat-treated and aged for 8hrs at 800°C and air cooled	993	144	600	87	37

(2)시험편의 크기 : $\phi 51 \times 400^L$
(annealed and ground)

연속절삭(continuous cut)과 단속절삭(interrupted cut)실험을 위하여 아래의 Fig. 1과 같이 시험편의 한쪽(길이 200mm)에 폭 5mm의 홈을 대칭형으로 가공하여 표면조건을 단속적으로 만들었다.

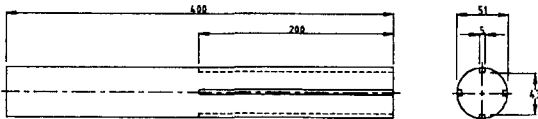


Fig. 1 Overall dimension of specimen

2.1.2 절삭공구(cutting tools)

기존의 절삭데이터를 보면 니켈기 초내열합금의 선삭가공에는 ISO의 M계열공구 또는 K계열 공구가 제시되고 있다.

한편으로는 고온경도가 우수한 세라믹공구와 CBN공구를 추천하고도 있으며, 취약한 성질이 있음에도 불구하고 단속절삭에 적용가능한 것으로 제시하고 있다.⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

최근의 피복초경공구는 코팅기술의 발달에 따라 초경소재(cemented carbide substrate)의 특성보다는 코팅재

의 특성에 따라 적용범위가 정해지며 그 범위 또한 넓어지고 있다. 따라서 동일 인서트 ISO P계열과 K계열에 동시에 해당하는 적용범위를 갖고 있을 수 있으나, 본 실험에서는 현장에서 공구제작업체로부터 추천받아 사용하고 있는 인서트 중 사용빈도가 높은 것을 선택하였고, 공구는 -5, -5, 5, 5, 5, 5, 1.2 형상의 Lever type holder와 인서트를 사용하였다(Table 3 참조).

Table 3 Specification of inserts

No	Insert 규격	ISO Grade	Coating Materials	Appr. Coating Thickness(μ m)	Manufacturer / Index
1	CNMG 190612	P25	Al ₂ O ₃ + Ti(C, N)	10 μ m (CVD coating)	Sandvik / GC 4025MR
2	CNGA 190612	Si-Al-O-N Ceramic			Kennametal / Kyon 2000
3	CNMG 190612	M15	TiN + TiC	8 μ m (CVD coating)	Sandvik / GC 2015MM
4	CNMG 190612	K20 - K30	TiN+Ti(C,N) + TiC	9 μ m (CVD coating)	Kennametal / KC250
5	CNMA 120412	CBN			Sandvik / CB20

2.2 실험장비

세차레의 실험을 진행하는 동안 다음과 같은 장비들을 동원하였다.

Table 4 Experimental Equipments

Experimental Equipment	Manufacturer	Model/Specification
Lathe	Kwangju Namsun Lathe Ltd., Co.	Mecca Turn 600×2000 Range 27~1200(rev/min)
Microhardness Tester	Buehler(USA)	Micromet 2003
SEM (Scanning Electron Microscope)	Hitachi(Japan)	S-2460N, Resolution 3.5nm Max. Magnification 20000
Metallurgical Microscope	Buehler(USA)	Vermet3, Max.Mag.1500
Surface Roughness Tester	Mitutoyo(Japan)	Surftest SV-600
Vacuum Furnace	Abar Ipsen	HR50×48-1475
TIG Welder	Lincoln(USA)	Square Wave TIG 355

2.3 실험방법 및 목적

2.3.1 1차 절삭실험

1차 절삭실험의 목적은 압연가공 후 용체화풀림된 상태(초기상태)의 소재의 절삭성을 파악하기 위한 실험이다. 절삭조건 $f=0.15\text{mm/rev}$, $d=0.1\text{mm}$ 로 연속절삭 및 단속절삭을 진행하였다. 연속절삭실험은 120m/min에서, 단속절삭실험은 120m/min을 포함한 5개의 속도영역에서 진행하여 동일시간별 또는 동일절삭거리별로 여유면마모를 측정 비교하였다.

2.3.2 2차 절삭실험

2차 절삭실험의 목적은 합금에 고온강도를 부여하기 위해 수행하는 용체화와 시효경화처리(solution and age heat-treatment)후의 절삭성 변화를 분석하기 위한 실험이다.

이를 위해 1차 실험이 끝난 시험편에 대해 용체화 및 시효경화처리를 하였으며, 조직분석용 시료를 채취한 뒤 시험편의 연속부 및 단속부에 대해서 1차 실험과 동일한 조건으로 절삭실험을 진행하였다. 아울러 가공면의 표면 거칠기도 각 절삭조건별로 측정하여 비교하였다.

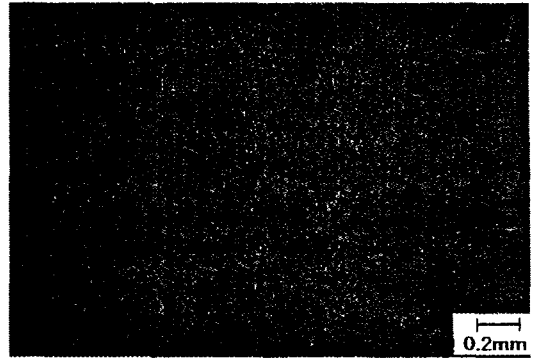


Fig. 2 Microstructure of specimen in mill annealed condition

2.3.3 3차 절삭실험

3차 실험의 목적은 용접육성된 부위를 절삭가공할 때 흔히 겪게되는 난삭특성을 분석하기 위한 실험이었다. 즉 용접부의 비이드 표면을 가공할 때 공구의 마모가 급속히 진행됨을 경험하게 되는데, 이것이 용착금속의 절삭성 변화에 기인한 것인가를 분석하기 위함이었다.

2차 실험이 끝난 시험편의 단속부를 TIG 용접기를 이용하여 약 3mm 두께로 다층 육성용접한 후 용접부와 모재의 금속적 특성변화를 분석하기 위해 시료를 채취하였으며, 용접비이드의 표면을 황삭절삭하여 약 20%정도의 절삭표면이 얻어졌을 때부터 실험을 진행하였다. 용접표면의 절삭은 자연스럽게 형성된 단속조건으로 진행되었으며 1, 2차 실험을 통해 절삭성능이 입증된 공구만을 사용하여었다.

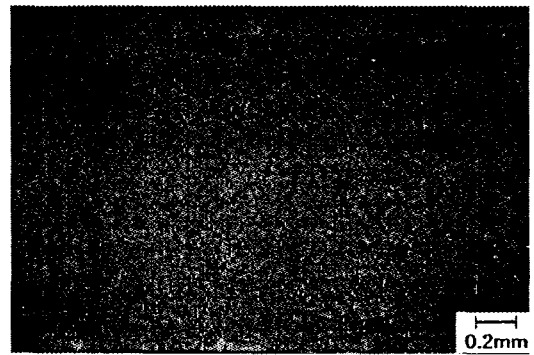


Fig. 3 Microstructure of specimen solution treated and aged (Solutioning at 1150°C for 2 hrs, rapid air cooling, aging at 800°C for 8 hrs, air cooling)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공정에 따른 소재특성의 변화

1차 시험편의 금속조직은 압연 후 풀립처리 된 조직을 그대로 갖고 있었으므로, 광학현미경 사진으로부터 쌍정(twin)과 같은 결정립의 미끄럼 변형을 관찰할 수가 있었다(Fig. 2 참조). 그러나 용체화처리와 시효경화처리를 하고 난 후의 2차 시험편에서는 재결정(recrystallization)과 결정립성장(grain growth)이 일어나 있었고, 석출물의 크기와 분포도 증대된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3참조).

경도비교에 있어서도 1차 시험편의 평균경도값은 HRC 21(10회 측정)인 반면, 용체화 및 시효화처리 후에는 HRC35(12회 측정)로 증가되어 있었다. 석출물의 경우 입자의 크기가 충분히 크다면 마이크로 경도값을 측정할 수 있으리라 기대하였으나, 시편의 전면적에 걸쳐

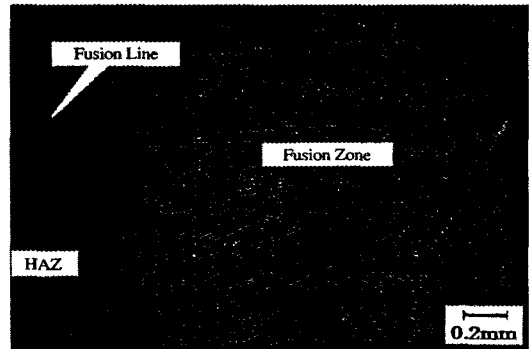


Fig. 4 Microstructure of weld region

고르게 분포되어 있는 반면, 크기가 충분히 크질 못해서 직접적인 측정은 곤란하였다.

3차 실험에서는 용접육성부 대한 조직검사와 절삭성 실험을 하였는데, Fig. 4에서 보는 바와 같이 용착금속에서 치밀한 주상조직을 갖는 반면, 열영향부로 판단되는 구역

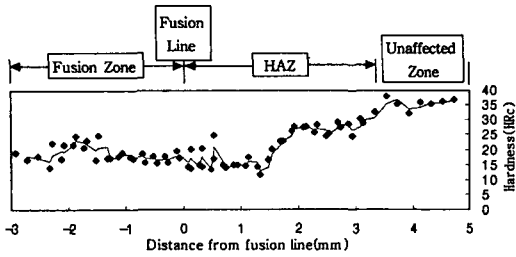


Fig. 5 Hardness distribution in weld region

에서는 쌍정이 눈에 띄었으며 결정경계가 흐려진 변화가 관찰되었다. 용착금속의 경도는 1차시험편의 것과 동일한 HRC21(41회 측정평균)로 측정되었으며, 열영향부에서는 낮아지다가 상승하는 경향을 보이고 있었다(Fig. 5 참조).

이러한 결과는 석출경화형 초내열합금의 용접부표면 선삭가공시에 흔히 겪게 되는 난삭특성이 용접부의 경화(hardening)에 의한 것만이 아니라는 점을 명백히 해준다.

용접부 표면절삭은 비이드(bead)의 높낮이가 다른 점 때문에 자연스럽게 단속절삭(interrupted cut)이 된다. 초기의 용접표면일수록 절삭공구와의 충돌횟수가 많을 것이고 절삭 깊이가 또한 일정하지 않다. 이 경향은 자동용접보다는 수동용접일 때 더욱 그러하다.

용접부 표면의 기하학적인 변화가 공구의 진동특성에 영향을 주어 절삭작업을 더욱 어렵게 하는 것으로 생각되나 그것이 용착금속의 경도와 강도변화에 따른 영향에 우선할 지는 이번 실험에서는 확인할 길이 없었다.

단지 절삭횟수가 많아지면서 용접층은 고른 두께를 갖게 되고 결국은 용접전 모재를 절삭할 때와 비슷한 공구 수명을 갖게 되는 것을 확인하였다.

3.2 공정별 공구의 마멸특성 및 수명비교

3.2.1 연속절삭(continuous cut)

시험편의 연속부에 대한 절삭실험은 1차(열처리전) 시험편과 2차(열처리후) 시험편에 대해 실시하였다. 실험에 사용된 절삭공구의 동일 절삭조건에서의 여유면마모량은 Fig. 6, Fig. 7과 같다.

피복초경공구(coated tungsten carbide insert)의 경우, ISO Grade의 M15와 K25계열 공구는 각각의 적정 절삭속도의 영역내에서는 모두 10분 이상의 수명을 얻을 수가 있었다.

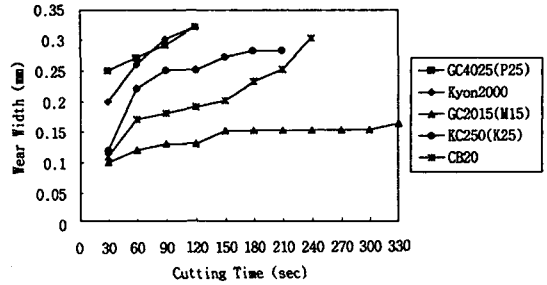


Fig. 6 Flank wear width with respect to cutting time in continuous cut with specimen solution annealed only (V=124~117m/min, d=0.1mm, f=0.15mm/rev, Dry)

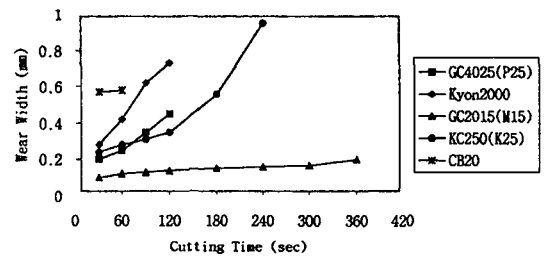


Fig. 7 Flank wear width with respect to cutting time in continuous cut with specimen solution annealed and aged (V=110m/min, d=0.1mm, f=0.15mm/rev, Dry)

M15계열 초경공구는 1, 2차 시험편의 연속절삭시 절삭속도 110m/min~120m/min부근에서 10분 이상의 수명을 보였으며 마모의 형태도 정상적이었다.

K25계열 초경공구는 동일한 절삭조건에서 5분이 경과 되면서부터 칩이 적열되면서 마모가 급속히 진행되는 특성을 보였다. 특히 유동형 칩이나 툽니모양의 전단형 칩과의 마찰에 의해 여유면이나 경사면에서 코팅층이 현저히 탈락되는 현상을 현미경을 통해 확인할 수 있었는데, 120m/min의 고속영역에서는 경사면의 코팅층이, 36m/min 이하의 속도에서는 여유면의 코팅층이 탈락되어 있었다. 이러한 경향은 이후의 2차 절삭실험에서도 관찰되었으며 단속부절삭에서도 동일한 결과를 확인하였다.

ISO P25계열의 초경공구는 초내열합금을 포함한 합금의 절삭가공에는 적용되지 않는다. 단지 그 성능을 확인해보고자 실험에 적용했었으나 예상대로 1차, 2차실험에서 2분 남짓의 수명을 보였을 뿐이다.

세라믹공구와 CBN공구의 결과는 의외였다. 취성이 크기는 하나 고온경도가 높은 Si-Al-O-N공구의 경우 절삭

을 개시한 30초를 전후해서 절입경계손상(depth of cut notch)이 일어나고, 약해진 인선의 대규모 파괴가 뒤따르게 되어 더 이상의 정상적인 절삭을 기대할 수 없게 되었다(Fig. 8). 이때 경사면의 크레이터 마모가 상당히 진행되어 있었다.

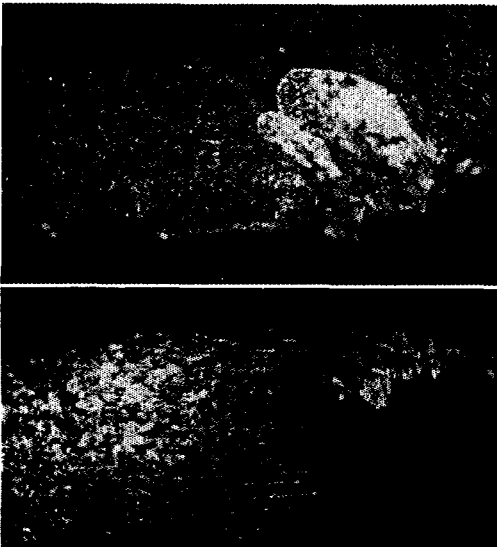


Fig. 8 Breakage of Si-Al-O-N insert in continuous cut (V=123m/min, T=90sec, D=0.1mm, f=0.15mm/rev, Dry)

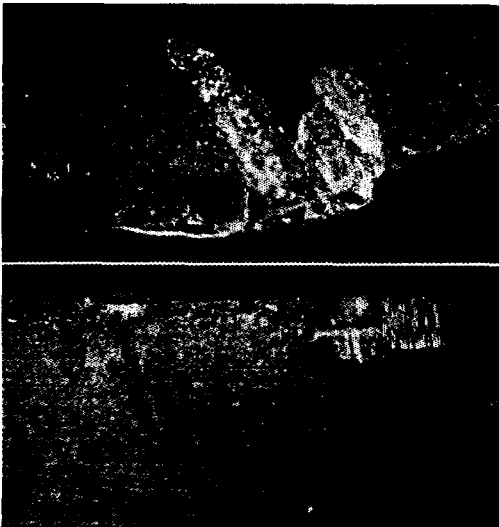


Fig. 9 Growth of crater wear and notch wear on CBN insert in continuous cut (V=117m/min, T=240sec, D=0.1mm, f=0.15mm/rev, Dry)

CBN공구의 절삭실험에서도 세라믹의 경우와 비슷한 결과를 얻었는데, 절삭개시 직후 칩과의 마찰에 의해서 인선의 미세파괴(minute chipping)가 선행되고, 절입경계마멸(depth of cut notch)이 빠른 속도로 발생하였다. 경사면에서는 칩 유동통로가 크레이터로 발달되어 공구의 파손을 촉진시켰다(Fig. 9).

세라믹공구와 CBN공구 어느 것이나 비정상적인 마멸 형태였으며, 피복초경공구와는 달리 경사면에 칩브레이커를 가지고 있지 않는 형태이므로 높은 칩 유동압력과 고열의 영향이 고스란히 경사면에 가해진 것으로 생각된다.

3.2.2 단속 절삭(interrupted cut)

단속절삭은 1차, 2차, 3차의 시험편에 대해 5개 영역의 절삭속도에서 실시하였는데, 그 결과로 나타나는 두드러진 경향은 단속부절삭시의 공구의 절삭능력이 연속부절삭시에 비해 현저히 떨어진다는 것이었다. 연속부 절삭시 절삭속도 120m/min 부근에서 10분 이상의 공구수명을 보였던 M15 계열의 초경공구가 1차 시험편의 단속부절삭시에는 30초를 전후해서 0.4mm의 여유면마모폭에 도달해 버렸고, 절삭속도가 낮아질수록 마모폭이 증가되는 것을 관찰할 수가 있었다(Fig. 10, Fig. 11 참조). 뿐만

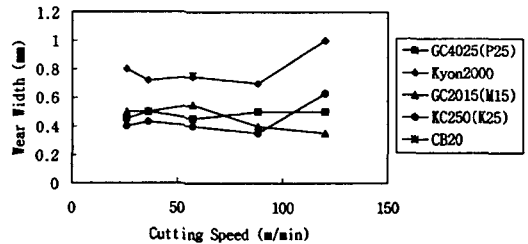


Fig. 10 Flank wear width with respect to cutting speed in 30 second interrupted cut with specimen solution annealed only(d=0.1mm, f=0.15mm/rev, Dry)

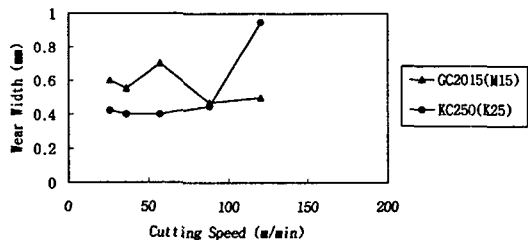


Fig. 11 Flank wear width with respect to cutting speed in 60 second interrupted cut with specimen solution annealed only(d=0.1mm, f=0.15mm/rev, Dry)

아니라 P25계열 공구와 세라믹공구의 경우에도 절삭속도의 고저에 따른 수명의 개선은 두드러지지 않고 있다.

반면 K25 계열 초경공구의 경우 120m/min의 고속영역에서는 취약함을 보이다가 절삭속도가 낮아질수록 그

성능이 개선되고 있음을 알 수 있었다. M15계열 공구와 P25계열 공구의 이러한 상반된 경향은 2차, 3차의 시험편에 대한 절삭실험에서도 관찰할 수가 있었다. M15계열 공구의 이러한 결과는 Taylor 공구수명방정식에 역행하는 것이다.

그러나 공구수명식은 실험적 관계이므로 실제 작용하는 변수를 고려하면 곡선이 직선으로 되지 않는 예가 많은 것으로 알려져 있으며, ⁽¹³⁾ 본 실험의 대상인 Nimonic 263보다 먼저 개발된 Nimonic 80A를 P30계열 공구로 절삭시에도 저속에서 수명이 감소되는 사례가 보고된 바 있다. ⁽¹⁴⁾

2차실험의 단속절삭에서는 M15계열 공구의 경우 저속에서는 마모형태가 인선파괴의 형태였고 그것도 초기의 단시간내에 이뤄지고 있었다(Fig. 12 참조). K25계열 역시 저속에서 인선이 깨어져 나가는 결함을 보였으나 M15계열에 비해서 양호한 편이었고, 고속에서는 칩과의 마찰에 의해 공구상면의 코팅층이 벗겨져 나가는 현상이 관찰되었으나 칩과 공구상면간의 접촉거리가 짧아지는 저속에서는 공구상면보다는 여유면의 코팅층이 심하게 손상되는 것이 관찰되었다(Fig. 13 참조).

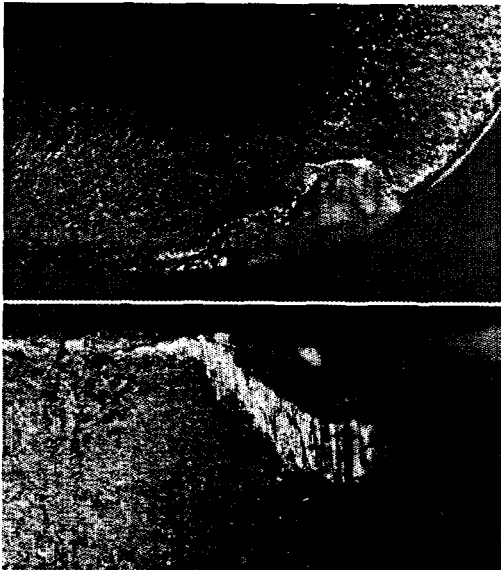


Fig. 12 Failure of M15 grade insert in interrupted cut (V=55mm/min, T=62sec, d=0.1mm, f=0.15mm/rev, Dry)

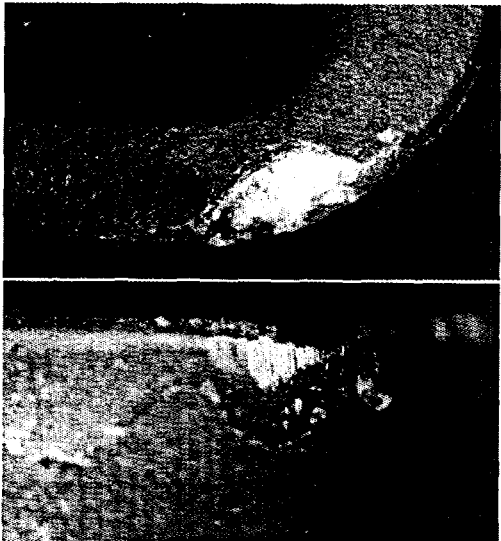


Fig. 13 Failure of K25 grade insert in interrupted cut (V=35mm/min, T=101sec, d=0.1mm, f=0.15mm/rev, Dry)

3.2.3 용접부 절삭

용착금속부(fusion zone)는 평균경도치가 HRC21정도(41회 측정 평균) 이므로 초기상태의 모재와 거의 비슷했고 열영향부(HAZ)에서는 낮아지다가 상승하는 경도분포를 보이고 있었다. 따라서 용착금속의 낮은 경도변화는 용접부 표면절삭시에 겪게 되는 난삭특성에 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 오히려 용접부표면의 요철이 공구에 불규칙적인 절삭저항과 충격을 유발하여 인선파괴에 이르게 하는 것으로 생각할 수 있다.

본 실험에서 용접표면의 요철부 절삭시의 공구마모 경향을 열처리후의 단속부 절삭시와 비교하였을 때, M15계열 피복초경공구는 120m/min에서 초기 30초 이내에 여유면마모폭이 0.4mm에 도달하였고 35m/min의 저속영역에서는 같은 시간내에 1mm를 초과할 정도로 악화된 반면, K25계열 피복초경공구는 35m/min이하의 영역에서 더 개선된 것으로 나타났다(Fig. 14). 이것은 곧 M15계열보다는 K25계열의 초경공구가 인성이 크기때문인 것으로 생각된다. KS규격에는 공구재 인성을 표현하기 위한 방법으로 항절력값을 규정하고 있는데, 비피복초경합금의 경우 M15계열은 최소 1030N/mm² 이상이 요구되고, K25계열은 최소 1420N/mm² 이상이 요구된

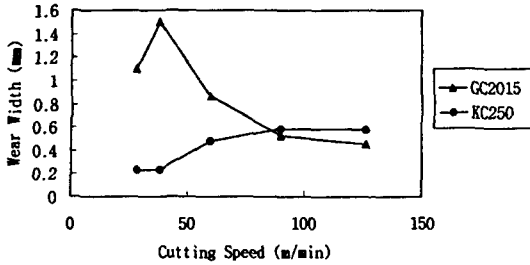


Fig. 14 Comparison of tool wear width with respect to cutting speed for 57mm length interrupted cut in weld region ($d=0.1mm$, $f=0.15mm/rev$, Dry)

다.⁽¹⁵⁾ 따라서 용접표면의 요철부를 절삭할 때는 내마모성이 높은 등급보다는 인성이 높은 등급의 초경공구를 사용하는 것이 유리하다.

용접부의 요철이 다 깎여나가고 용착금속의 두께가 크게 같아지면서 용접전 모재의 절삭시와 비슷한 마모경향으로 회복되었다.

3.3 표면거칠기 분석

2차실험의 연속부 절삭시 여유면 마모에 따른 가공면의 표면거칠기 변화를 관찰하였는데, 절삭성능이 상대적으로 나았던 M15계열과 K25계열 공구로 절삭한 표면을 측정하였다.

두 공구의 여유면 마모량이 수명기준인 0.4mm 이내일

Table 5 Surface roughness with respect to various cutting speeds (specimen solution annealed and aged)

Cutting Speed (m/min)	M15 Grade Insert			K25 Grade Insert		
	Wear Width(mm)	R _{max}	R _a	Wear Width(mm)	R _{max}	R _a
24	0.4	4.264	1.008	0.1	4.168	0.705
32	0.4	6.538	0.553	0.2	3.978	0.595
50	0.23	1.848	0.423	0.3	6.526	1.016
76	0.2	2.248	0.468	0.35	7.142	1.038
107	0.1	3.108	0.829	0.3	4.614	0.917

Table 6 Surface roughness with respect to flank wear width in two cutting speeds (specimen solution annealed and aged)

Cutting Speed	M15 Grade Insert			Cutting Speed	K25 Grade Insert		
	Wear Width (mm)	R _{max}	R _a		Wear Width (mm)	R _{max}	R _a
107m/min	0.1	4.74	0.941	32m/min	0.18	3.387	0.553
	0.3	4.652	1.212		0.28	3.048	0.600
	0.55	17.897	4.868		0.35	1.381	0.388
	0.62	10.870	2.218		0.56	8.253	1.728

때, 76m/min의 K25공구의 경우를 제외하고는 어느 절삭속도 영역에서도 표면거칠기가 R_{max} 6.3 μ m (Ra 1.6 μ m) 부근이었다(Table 5 참조).

또한 107m/min부근에서 절삭한 M15 계열공구와 32m/min 부근에서 절삭한 K25계열공구의 마모량과 표면거칠기의 관계를 보면 마모량이 0.5mm 이상 벗어나지 않은 한도내에서 표면거칠기의 수준이 R_{max} 6.3 μ m (Ra 1.6 μ m) 부근을 유지하고 있었다(Table 6 참조).

4. 결론

석출강화형 니켈기 초내열합금인 Nimonic 263을 P25 계열, M15계열, K25계열 피복초경합금공구와 Si-Al-O-N 공구, CBN공구를 이용하여 선삭가공함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] 연속절삭일 때와 단속절삭일 때의 공구수명은 공구재의 인성에 의해 크게 좌우되었다. 내마모성이 강화되어 있는 M15계열 공구는 120m/min의 높은 절삭속도에서, 인성이 큰 K25계열 공구는 35m/min부근의 저속에서 가장 낮은 마모율을 보였다.

[2] 용접으로 인한 용착금속의 경도상승은 일어나지 않았으나, 용접부 표면 절삭시의 공구수명은 열처리된 시험편의 단속절삭시보다 짧았다. 이 경우 항절력이 큰 등급인 K25계열 공구가 타공구에 비해, 특히 내마모성이 큰 등급인 M15계열보다 긴 수명을 보였다. 따라서 용접부 표면 절삭시에는 내마모성보다는 인성이 큰 등급의 공구를 사용하는 것이 유리하다.

[3] Si-Al-O-N공구와 CBN공구는 우수한 고온경도에도 불구하고, 높은 취성으로 인한 노오즈(nose)부 및 인선 파괴로 인하여 Nimonic 263 소재의 선삭(turning)에는 적합하지 않다.

[4] M15계열과 K25계열 공구의 여유면 마모량이 수명기준인 0.4mm 이내일 때, 76m/min의 K25공구의 경우를 제외하고는 어느 절삭속도 영역에서도 표면거칠기가 R_{max} 6.3 μ m (Ra 1.6 μ m) 부근이었고, 또한 107m/min부근에서 절삭한 M15공구와 32m/min 부근에서 절삭한 K25공구의 마모량이 0.5mm이내일 때 R_{max} 6.3 μ m (Ra 1.6 μ m) 부근을 유지하였다.

참고 문헌

1. P. W. Schilke, A. M. Beltran, A. D. Foster

- and J. J. Pepe, "Advanced Gas Turbine Materials and Coatings", 37th GE Turbine State-of-the-Art Technology Seminar, (5) p.3. 1993.
2. J. Vleugels and O. Van Der Biest, "Chemical Reactivity of Nickel and Nickel-based Alloys with a SiALON Ceramic", Journal of the American Ceramic Society, 78/11, pp.3002~3008. 1995.
 3. N. He, L. Pan and Y. Zhang, "Notch Wear of Machining Nickel-based Alloys with Ceramic Tools", Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 8/4, pp.262~266. 1995.
 4. A. R. Thangaraj and K. J. Weinmann, "On the Wear Mechanisms and Cutting Performance of Silicon Carbide Whisker-reinforced Alumina" Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, 114/3, pp.301~308. 1992.
 5. T. Ohtani, K. Fujise and H. Yokogawa, "Machining of Stellite Alloy with CBN and Carbide Tools", Reports of the Government Industrial Research Institute, No.30, pp.39~46. 1988.
 6. Y. Tasaki, T. Hata, S. Kume, H. Kajihara and M. Machida, "Cutting Test of Inconel 718 by CBN Tool", Reports of the Government Industrial Research Institute, 40/3, pp.173~179. 1991.
 7. 정경효, 정윤교, "초내열합금 Inconel의 가공성 평가", 한국정밀공학회 95년도 추계학 술대회논문지, pp.150~155.
 8. General Electric Commercial Engine, Standard Practice Manual, 1982.
 9. Technical Information - HAYNES Alloy 263, HAYNES International, Inc., 1990.
 10. Ibid.
 11. Turning Tools, SANDVIK COROMANT, pp.156~165. 1995.
 12. Kennametal Lathe Tooling, Catalog 4000, KENNAMETAL Inc., p.499.
 13. 竹山秀彦, 村田良司, 精密機械講演會前刷(昭38-4), p.123. quoted in 이용성, 절삭 및 연삭이론, 동명사, p.198. 1986.
 14. 狩野勝吉, 난삭재의 절삭가공기술, 편집부 옮김, (주)기술정보, p.197. 1989.
 15. 한국공업규격-기계 B 3248, 한국공업표준협회, 1990.