

인코넬 합금의 절삭특성에 관한 연구 A Study on the Cutting Characteristics of Inconel 690 Alloy

황경충*, 정을섭(충북대 대학원), 최재하, 김성청(충북대학교)

K.C. Hwang*, E.S. Jung, J.H. Choi, S.C. Kim(Chungbuk National Univ.),

Key Words : Inconel 690 Alloy, TiN coating, chip formation, Surface Roughness.

ABSTRACT : This paper has been considered on the cutting characteristics such as chip formation and surface roughness for Inconel 690 alloy with difficult-to-cut because of high toughness and strength. We have made efforts solving the problem to difficult-to-cut of Inconel by imorovement of tool with TiN coating and the selection of optimum cutting condition. We used the CCD camera and the surface roughness tester to observe the chip formation and the state of machined surface by using the improved tool with diamond coating and various cutting condions. We have found that the chip formation showed the tooth shape of tooth blade and the surface roughness was very poor, but it can be better by selection of optimum cutting condition.

1. 서론

본 실험은 환경공해의 주범과 지하자원의 고갈로 화력발전소를 멀리하고 우리 나라 전력 산업의 절반⁽¹⁾ 이상을 찾아 하고 앞으로 많은 추가건설이 예상되는 원자력발전소는 원자로의 열을 냉각시키는 냉각 재에 따라 경수형원자로(LWR)와 가압 경수형 원자로(PHWR)로 구분할 수 있다. 경수형 원자로는 다시 가압경수형(PWR)과 비 등경수형(BWR)으로 구분된다. 우리 나라는 1978년에 고리원자력 1호 발전소가 건설 된지 20년이 넘었지만 원자력 발전소의 핵심부품은⁽²⁾ 대부분 외국에서 원자재와 기술 이전을 받아 건설되었다. 그러나 현재 경상북도 울진군 북면에 위치한 울진 원자력 4호 발전소의 기술력과 원자재는 순수한 우리 기술로 개발되어 그 기술력을 외국의 전문기관으로부터 공인 받아 앞으로 국내에서 건설되는 원자력 발전소는 울진 원자력 4호기를 표본으로 건설 될 것이며 또한 북한의 개포 지구에 건설되는 경수로 원자력 발전소는 울진 원전4호 발전소의 기술이전으로 현재 많은 건설 진전을 보이고있으며 현재 11기의 경수형 원자로와 3기의 중수형 원자로가 운전 중에 있고 각각 5기와 1기가 현재 건설 중에 있다. 그래서 우리 나라 원자력의 기술 축적과 가장 핵심적인 터빈 소재인 Inconel 690 Alloys⁽³⁻⁵⁾ 소재를 순수한 우리 기술력으로 개발한 것으로서 본 연구 논문에서 Inconel 690 Alloys의 화학분석과 기계적 성질로 알 수 있듯이 인성과 강도를 많이 동반하는 오스테나이트계의 난삭재로 분류된다. 이러한 난삭재를 전분으로 절삭하는 산업현장이 국내에는 많이 없는 관계로 절삭 공구생산 업체에서도 공구를 대량으로 생산하지 않는다. 그래서 본 Inconel 690 Alloys의 난삭재를 절삭할 경우 효율적인 공구의 선택이 중요하다고 생각하는 바이며 또한 절삭시에 피삭재가 절삭되어 칩이

연속으로 순간적으로 배출되는 관계를 초 고속카메라를 이용하여 관찰하였으며 피삭재의 표면 거칠기를 측정하여 인코넬 690의 특징을 규명하기로 하였다.

2. 공구의 물리 진공증착법

2-1. PVD 방법

공구를 TiN 코팅할 경우 코팅의 진공계를 사용했으며 이때 코팅 설정 조건은 Table 1와 같으며 균등하게 TiN 코팅이 되도록 기판 하부에는 고열에 견딜 수 있도록 오일 링과 베벨기어를 장착하여 기판이 일정한 방향으로 지속적이고 저속으로 공전과 자전으로 회전하며 균일하게 TiN 코팅이 되게 하였으며 또 진공로의 주위에는 고열이 발생하는 것을 방지하기 위해 냉각수를 통하게 하여로의 보호와 초경합금과 기 판에 냉각효과를 주어 TiN 코팅의 안착이 잘되게 하였다. 코팅의 밀착성이 절삭공구에 미치는 영향은 매우 중요하다. 코팅 층이 너무 낮으면 코팅의 효력이 떨어지고 너무 높아도 생산원가 면에서 적절하지 못하다. 그러므로 코팅의 밀착력이 장신구, 의료기기 각종 절삭공구 등에 매우 중요하며 앞으로 이러한 코팅법이 실 산업사회에 많이 이용될 것으로 생각한

Table 1 Setting conditions of coating

	Setting conditions
Pressure	0.8×10^{-3} mbar
Power	65 KVA
Voltage	3×400 V
Temp	450℃
Time	6 hour
Gas flux	N=1.2 bar, Ar=1.2 bar

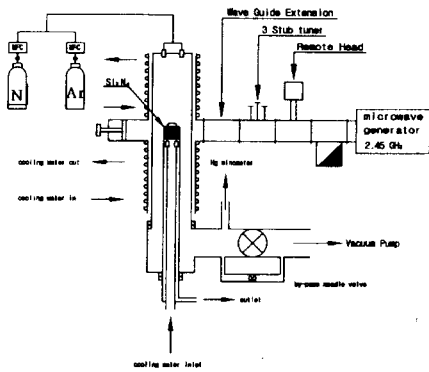


Fig.1 Schematic diagram of coating apparatus

다. 실험에 사용되는 가스의 종류는 N, Ar으로 사용했으며 가스 공급의 유량조절은 MFC의 자동 유량 조절기로 제어했으며 반응관내의 진공압력은 수은 마노메타와 디지털 진공계를 사용하였으며 실험장치의 개략도는 Fig.1과 같다.

2-2. TiN 코팅

Inconel 690 Alloys를 절삭하는데 있어서 기존의 절삭공구를 사용하면 난삭재를 가공할 수 없으므로 제품의 생산성 향상과 원가절감 및 품질향상을 고려하면 기존의 절삭공구가 아닌 대체 절삭공구가 시급한 실정이다. 환경공해를 유발하는 도금법(맥기)이 아닌 생산원가 면에서 1.5~2배 정도의 경비가 더 투자되는 무공해 코팅인 물리 진공 증착법으로 시중에서 판매하는 절삭공구를 약 450℃ 저온에서 성분원소를 분자 상으로 가스화하여 화학반응을 일으켜 절삭공구 모재의 표면에 피막을 형성하는 방법으로 의료기구, 광학기기, 장식용품 및 각종 절삭공구 등에 광범위하게 이용되며 공업적으로도 많은 이용 되는⁽⁶⁻⁷⁾ 물리 진공 증착법(PVD)⁽⁸⁾으로 비 코팅 절삭공구(SNMG 120408)에 코팅을 약 10 μ m 두께의 TiN을 코팅하여 난삭재인 Inconel 690 합금에 대하여 절삭 시험을 행하였다.

2-3. 밀착도 시험

일반적으로 산업현장에는 강이나 비철금속 등을 절삭하는데 P(Steel), M(Stainless), K(Cost Iron)계열의 초경합금 공구를 많이 사용한다. 한편 Inconel 690 Alloys를 정밀 절삭하는데 강도와 인성을 많이 동반하므로 시중에서 판매하는 비 코팅 절삭공구는 난삭재를 가공하기에 매우 어려운 실정이다. 한편으로 단속인 밀링 절삭에는 코팅 층이 낮아도 절삭이 가능하나 선삭에는 코팅 층이 낮으면 고온에 의해 빨리 마멸되어 코팅의 역할을 다 하지 못하며 또한 반대로 코팅 층이 필요이상 너무 높으면 좋게는 보이나 선삭은 연속적인 절삭

인 관계로 고온에 의하여 코팅 층이 벗겨지는(박리) 현상도 있다. 따라서 선삭의 경우에는 코팅 층의 밀착성에 역점을 두어야 한다.

3. 실험 및 실험방법

3-1. Inconel 690 Alloys의 주조

본 실험에 이용한 로(爐)는 국내에서 제작한 진공 고주파 유도로 로써 Champ 내의 진공도는 용해 시작 전에는 약 10²bar 정도를 유지하였으며 발열 Riser로는 Al, Mn, SiO₂ 등으로 이루어진 sleeve 형태의 발열(exothermic) riser를 사용하였고 이형 재료는 BN Spray(L type)를 사용하였다. 초기의 일부 용해 실험에서는 장입한 금속이 용해된 다음 후반부에 탄소를 용탕에 첨가하는 방법을 취하여 탈산이 충분히 일어나지 않아 탄소와 잔존 산소 함량이 다소 높은 경우도 있었으나 대부분의 경우에는 탄소를 니켈, 전해 철과 함께 초기 장입 시에 함께 장입하여 충분한 탈산 작용과 더불어 잉고트로 주조한 것을 Fig.2에 보였다. 진공 고주파 유도 로에서 주조한 Inconel 690 Alloys인 피삭재의 규격은 240×100×45(가로×세로×높이)으로 되었으며 본 실험에 임하기 전에 사각봉을 35mm의 환봉으로 예비 가공한 후 본 실험을 수행하였으며 형상은 Fig.3에 나타내었다.

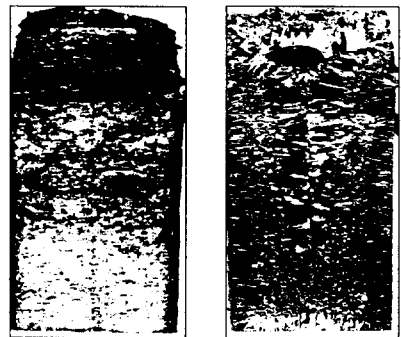


Fig.2 Foundry of Inconel 690 Alloys

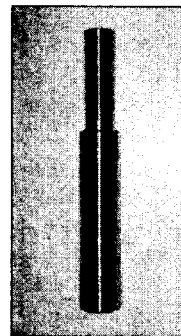


Fig.3 Specimen of Inconel 690 Alloys

3-2. 화학적 성분 및 기계적 성질

본 실험에 사용한 Inconel 690 시편의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 2과 Table 3에 나타내었다.

Table 2 Chemical compositions of specimen

Cr	Ni	Fe	C	Mn	Si	Al	Ti	S	O	N
30.8	62.6	1.05	0.01	47ppm	61ppm	0.06	71ppm	0.001	0.0055	0.0037

Table 3 Mechanical properties of specimen

YS(MPa)	UTS(MPa)	E.L.%(MPa)
1109	1198	6.3

3-3. 절삭 조건 및 사용기기

피삭재는 순수 국산 기술로 개발한 소재이며 이 소재를 국산 기계를 사용하여 Fig.4의 개략도 처럼 측정장비를 장착하였으며 강도와 인성이 많은 피삭재가 고열이 발생하여 절삭공구와 기계에 진동 및 열적 손상을 주므로 본 실험에서는 그 간접적인 요인을 제거하기 위해 습식으로 절삭하였으며 본 실험에 사용한 기계는 Table 5와 같으며 피삭재의 떨림 현상이 생기는 것을 우려하여 회전심압대를 사용하였으며 이때 Inconel 690 Alloys의 절삭조건은 오스테나이트 계열인 난삭재이므로 저속으로 절삭하기 위하여 Table 4과 같은 절삭조건을 설정하였다.

Table 4 Cutting condition

Cutting speed (m/min)	18, 22, 32, 35
Feed rate (mm/rev)	0.06, 0.12, 0.24
Depth of cut (mm)	0.2, 0.3, 0.5

3-4. 공구의 피복시험

인스트립에 코팅을 원활하게 하기 위해서는 표면에 산화 막과 질화처리 및 부식이나 페인트 등의 이 물질이 없어야 되므로 초음파 세척기에 증류수를 넣은 후 비 코팅 절삭공구를 침전시켜 약 30분간 세척한 후 다시 30°C의 아세톤으로 약 20분 동안 세척한 후 건조시켜 10 μ m의 코팅층이 되도록 코팅하였다. 코팅 인스트립의 화학적 성분은 Table 6에 팁의 형상은 Fig.5에 나타내었다.

3-5. 표면 거칠기

절삭조건에 따라서 절삭한 피삭재의 표면 거칠기를 측정하기 위해 일본의 Mitutoyo사의 디지털 계측기를 사용하였고 이때 표면 거칠기의

Cutoff의 값을 0.8mm로 설정하였으며 동일조건에서 5회 측정하여 산술평균 거칠기 값으로 하여 그 오차 값을 최소한으로 줄이기 위해 노력했다.

Table 5 Specification of machine and measuring equipment

	Appatatus	Manufacturer	Model
1	Lathe	Hwa-cheon	H380×W750
2	CCD	MONARCH	PULNIX TM C-7RGB
3	Stroboscops	SUWAGARA	DS-2
4	IBM/PC	TriGem	80586-300
5	Surface roughness test	Mitutoyo	SURFTEST 301

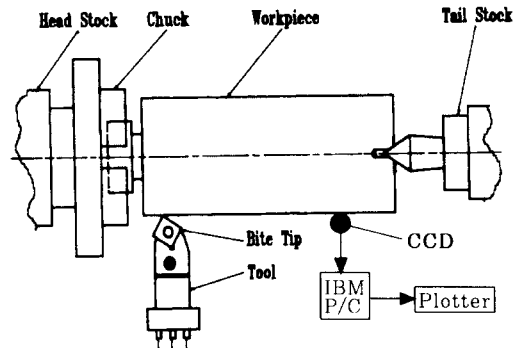


Fig.4 Schematic diagram of cutting test set-up

Table 6 Chemical composition of cutting tool

Element	Line	Weight%	K-Ration	Cnts/s	Atomic %
Co	Ka	34.38	0.05568	8.67	12.50
W	La	65.62	0.9411	24.8	87.50
Total		100.00			

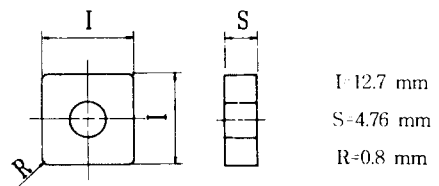


Fig.5 Shape of tool tip used on the experiment

3-6. 칩 형성

칩의 형상은 보통 4종으로 구별되는데 유동형 칩(flow type chip)은 연강, 구리 등의 연한 재

료에서 화이트 날의 경사면과 경사각이 크고 절삭 깊이를 작게 하여 고속 절삭할 때 절삭 칩이 연속으로 발생한다. 전단형 칩(shear type chip)은 유동형 칩의 일종이지만 압축전단이 반복되어 칩이 단편으로 되며 연재를 고속 절삭하고 절삭깊이가 클 때 흔히 생긴다. 균열형 칩(tear type chip)은 주철과 같이 취성이 큰 재료는 압력을 가하여도 거의 변하지 않으며 절삭 저항의 변동이 매우 크고 절삭이라기 보다는 파괴에 의해 생긴 것이므로 양호한 절삭을 얻기 어렵다. 한편 열단형 칩(crack type chip)은 가공 면에 균열이 일어나고 뜯어낸 것 처럼 보이고 연한 재질이나 큰 재료의 절삭에 생기며 칩 생성시 절삭력의 변동이 심하며 공구의 진동이 발생하게되고 가공 면이 매우 거칠다. 한편 고속 카메라는 선반의 베드 위에 설치하여 화이트 톱에 카메라 렌즈의 초점을 고정하고 명암 밝기를 위하여 스트로브 스톱프는 회전수에 비례하여 램프(후레쉬)가 작동하도록 맞추어서 칩이 공구의 칩 브레이크를 따라서 배출되는 것을 고속 카메라를 이용하여 볼수 있었다. 이때 고속 카메라는 공작물의 10회전 당 램프가 1회 작동하며 이때 절삭되는 칩의 형상을 1장의 사진으로 촬영되어 PC에 자동 저장하였다.

0.5mm에서는 표면 거칠기가 아주 불량하게 나타났으며 Table 7과 Fig.7에 나타내었다

Table 7 Surface roughness by cutting conditions

Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Surface roughness Ra(μm)
18	0.06	0.2	0.67
		0.3	0.71
		0.5	1.17
	0.12	0.2	0.66
		0.3	0.96
		0.5	1.03
	0.24	0.2	1.60
		0.3	2.10
		0.5	2.45
22	0.06	0.2	0.7
		0.3	0.9
		0.5	1.35
	0.12	0.2	0.74
		0.3	0.99
		0.5	1.04
	0.24	0.2	1.85
		0.3	2.69
		0.5	3.17
32	0.06	0.2	1.05
		0.3	1.06
		0.5	1.43
	0.12	0.2	0.78
		0.3	1.01
		0.5	1.04
	0.24	0.2	2.09
		0.3	2.94
		0.5	3.26
35	0.06	0.2	1.18
		0.3	1.29
		0.5	1.62
	0.12	0.2	0.83
		0.3	1.06
		0.5	1.62
	0.24	0.2	2.38
		0.3	3.11
		0.5	3.36

4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 밀착도

비 코팅 절삭공구를 TiN 코팅을 할 경우 코팅의 밀착성을 확인하는 방법으로는 비커스 경도기, 록크웰 경도기, 기타 코팅부분을 직접 끊어보는 방법이 있으나 본 실험에서는 간편하게 확인할 수 있는 록크웰 경도기의 HRA type(60kg)으로 하중을 가하기 시작해서 약 1분 후에 록크웰 경도기의 볼 압입 자욱 주위에 코팅 층의 표면이 갈라지는 여러 형상을 보고 코팅 부착 유무를 확인하였는데 대체적으로 양호한 코팅이 되었던 것을 Fig. 6에 나타내었다.

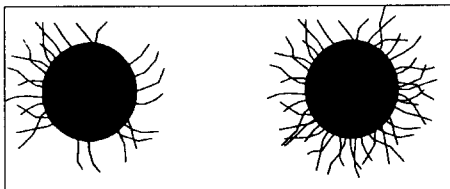


Fig.6 Adherence measurement of cutting tool

4-2. 표면 거칠기

Inconel 690 Alloys는 오스테나이트계의 난삭재에 속하며 같은 조건에서도 회전당 이송을 작게 하고 절삭깊이가 0.2mm, 0.3mm에서는 표면조도는 대체적으로 양호한 양상을 보이고 있으나

4-3. 칩 형성

절삭을 하게되면 반듯이 칩이 생기게 되는데 그 칩의 모양과 종류를 보아도 표면 거칠기나 공구의 진동 및 마멸을 대략적으로 짐작할 수 있겠으나 특히 난삭재인 Inconel 690 Alloys를 절삭할 때 톱날형의 날카로운 칩이 생긴다. 한편 본 실험에서는 톱날형의 칩이 생기게 되는 요인은 인성이 있는 소재인 관계로 열단형의 칩이 생겼다고 사료되며 이때 칩의 모양을 Fig.8에 나타내었다.

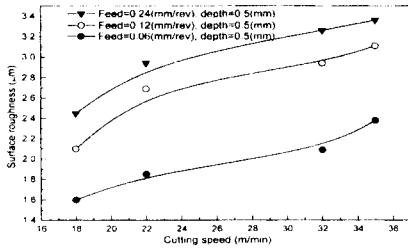
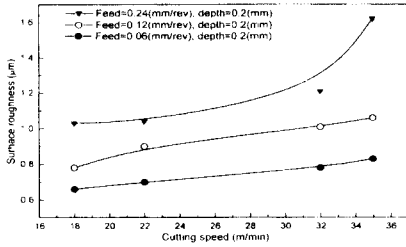
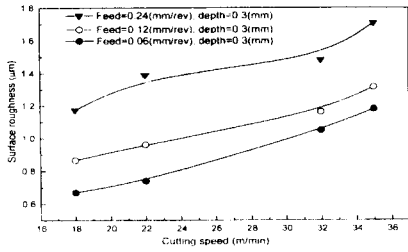


Fig.7 Surface roughness according cutting conditions

5. 결론

Inconel 690 Alloys의 난삭재를 기존의 비 코팅 절삭공구로는 절삭이 어려우므로 물리 진공증착법(PVD)으로 TiN 코팅 절삭공구를 제작하여 난삭재인 Inconel 690 Alloys을 가공하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제작 단가가 비교적 저렴한 물리 진공증착법인 TiN 코팅 절삭 공구로도 난삭재 가공을 할 수 있음을 보여 주었다.
2. Inconel 690 Alloys를 절삭하였을 때 절삭 속도, 이송속도, 절삭깊이가 낮을수록 피삭재의 표면 거칠기가 양호하게 나타났다.
3. 고속카메라를 이용하여 오스테나이트의 난삭재를 가공하였을 때 절삭조건에 관계없이 열단형 칩이 발생한다는 것을 확인할 수 있었다..

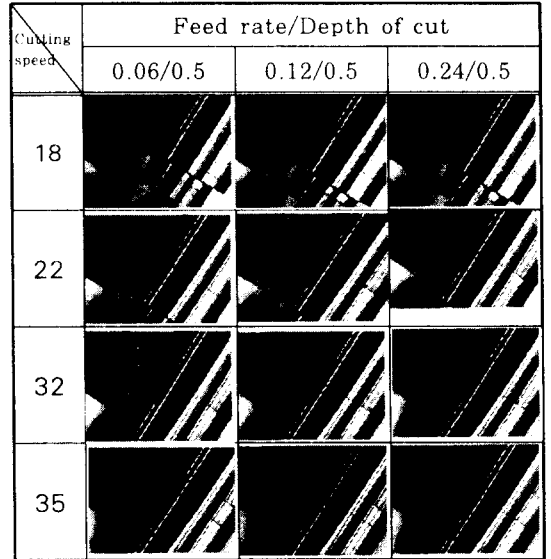


Fig.8 Photos of chip for Inconel 690

참고문헌

1. 원자력산업, KAIF News Letter, No. 582, 1998.
2. 김창효외, 핵 공학 개론, P. 2, 한국원자력학회, 1989.
3. P.H. Berge and J.R. Donati, Nuc. Tech., 55 (1981) 88
4. G.P. Airey, A.R. Vaia and R.G. Aspden, Nuc. Tech., 55 (1981) 436
5. R.A. Page and A. McMinn, Metall. Trans. A, 17A (1986) 877
6. 塩澤和章, 韓 玲 PVD法によるTiN被覆炭素鋼の低サイクル疲労強度, 日本機械學會論文集 (A編) 59卷 559號, pp. 733~740, 1993.
7. L. Cunha, M. Andritschky, L. Rebouta and R. Silva, "Corrosion on TiN, (TiAl)N and CrN Hard Coatings Produced by Magnetron Sputtering", Thin Solid Films, 317, pp. 351~355, 1998
8. 武井 厚, "氣相蒸着(PVD, CVD)によるの製作法", 材料科學, Vol., 30, No. 2, pp. 53~60, 1992..X