

인코넬 690 합금의 절삭성에 관한 연구

황경충*, 윤종호**, 최재하***, 김성청***

Machinability Characteristics of Inconel 690 Alloys

Kyung-Choong Hwang*, Jong-Ho Yoon**, Jae-Ha Choi***, Sung-Chung Kim***

Abstract

In domestic industry, there is no manufacturers specialized in the production of cutting tools for the difficult cutting materials. Then, we have few data about them. In this study, the gear driving high speed lathe on which is mounted by a tool dynamometer and high speed CCTV were used to measure the various machining characteristics. Relations among the cutting speed, feed rate per revolution, cutting depth, cutting forces and surface roughness were graphically analyzed under 64 cutting conditions. The process of chip, i.e., generation, development and falling-off also were visualized for the characterization of chip shapes of the difficult-to-cut materials using the CCTV.

Key Words : Difficult-to-cut Materials(난삭재), Machinability(절삭성), TiN Coating(TiN박막 코팅), Cutting Force(절삭력), Surface Roughness(표면조도)

1. 서론

원자력발전소에서 사용되는 터빈 소재는 전량 수입에 의존하여 사용했으나 울진원자력발전소 제 4 호기의 핵심부품인 터빈의 소재는 순수한 우리 기술력으로 개발한 오스테나이트(austenite)계열이며 난삭재인 인코넬 690 합금이 다⁽¹⁾. 이 피삭재를 기존의 초경공구로는 가공이 불가능하며,

국내에는 난삭재를 전문으로 절삭하는 산업현장이 많이 없는 관계로 공구생산 업체에서도 공구를 대량으로 생산하지 않으므로 난삭재의 절삭에 필요한 데이터도 많이 없는 실정이다.

본 연구에서는 인코넬 690 합금에 대한 절삭 가공성에 대하여 기어구동식인 고속선반으로 각종 측정장치와 고속 카메라를 부착하여 4단계의 절삭속도 (18, 22, 32, 35m/min),

* (주)은일
(황경충 kchwang@lycos.co.kr)

** 경일대학교

*** 충북대학교

4단계의 회전당 이송속도(0.067, 0.123, 0.234, 0.345mm/rev)와 4단계의 절삭깊이(0.2, 0.3, 0.5, 1.0mm)들이 조합되어 총 64가지의 절삭조건으로 절삭실험을 하여 절삭력과 표면조도를 비교 검토하였으며 선삭 칩의 생성, 발달 및 탈락 과정을 고속카메라로 촬영하였다.

2. 실험 및 실험방법

2.1 사용기기 및 실험장치도

본 연구에서 활용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같고, 각 계측장비들의 모델 및 사양은 Table 1과 같다.

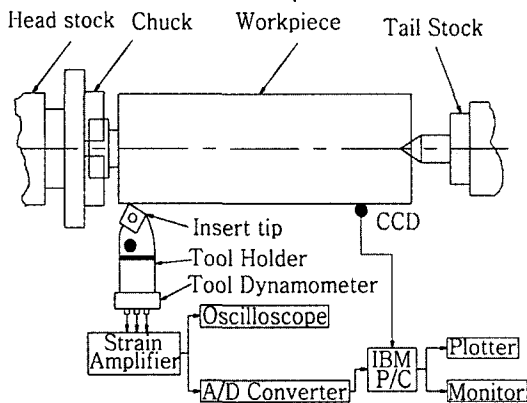


Fig. 1 Schematic diagram of cutting test set-up

Table 1 Specification of experimental apparatus

| No. | Apparatus | Manufacturer | Model |
|-----|--------------------------|------------------|-----------------|
| 1 | Lathe | HwaCheon | H380 x W750 |
| 2 | Tool dynamometer | Kistler | 9257A |
| 3 | Data recorder | TEAC | RD-135T |
| 4 | FFT Analyzer | A & D | AD-3525 |
| 5 | Oscilloscope | Lecroy | 9314A |
| 6 | Stroboscope | Suwagara | DS-2 |
| 7 | CCD | Monarch | PULNIX TMC-7RGB |
| 8 | A/D Converter | Data Translation | DT3831-G |
| 9 | Pre-Amplifier | Kistler | 5807A |
| 10 | Surface Roughness Tester | Mistutoyo | SURFTEST-500 |

2.2 피삭재 및 절삭공구

선삭의 피삭재인 인코넬 690 합금은 내열합금으로 오스테나이트계열이다^(2,3). 절삭실험에 사용한 선반은 국내 H사에서 제작된 기어구동식 고속정밀 선반이며 피삭재 가공에 사용된 절삭공구는 홈형 칩포머(groove type chip former)가 형성되어 있는 인서트 팁(SNMG 120404)의 절삭공구를 사용하였으며, 공구홀더(tool holder)로는 PSBNR 2525-M12를 사용하였다.

2.3 화학적 성분 및 기계적 성질

본 연구에 사용한 재료는 오스테나이트계열의 인코넬 690 합금을 선택하였으며 시험편의 화학적 성분 및 기계적 특성을 Table 2 및 Table 3에 나타내었다⁽¹⁾.

Table 2 Chemical composition of Inconel 690 Alloys (wt.%)

| Cr | Ni | Fe | C | Mn | Si | Al | Ti | S | O | N |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|--------|--------|
| 30.8 | 62.6 | 1.05 | 0.010 | 47ppm | 61ppm | 0.06 | 71ppm | 0.001 | 0.0055 | 0.0037 |

Table 3 Mechanical property of Inconel 690 Alloys

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

2.4 인코넬 690 합금의 절삭조건

절삭실험은 고속정밀선반에서 절삭속도(V)를 18, 22, 32, 35m/min로 하고, 회전당 이송속도(F)는 0.067, 0.123, 0.234, 0.345mm/rev의 4단계로 하였다. 또한, 절삭깊이(D)는 0.2, 0.3, 0.5, 1.0mm의 4단계로 하고 절삭 중에 냉각수는 사용하지 않았으며, 실험에 사용된 선반의 절삭조건을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Cutting conditions

| | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Cutting speed (4 steps) | 18, 22, 32, 35 (m/min) |
| Feed rate (4 steps) | 0.067, 0.123, 0.234, 0.345 (mm/rev) |
| Depth of cut | 0.2, 0.3, 0.5, 1.0 (mm) |
| Tool holder | PSBNR 2525-M12 |
| Insert | SNMG 120404 |
| Nose radius | 0.4 (mm) |
| Cutting fluid | none |

2.5 실험방법

본 연구에서는 전기한 실험장비, 피삭재를 활용하여 Table 4에 언급한 절삭조건들에 따라서 절삭실험을 하였다. 공구동력계를 활용하여 절삭력들을 측정하고, 피가공된 절삭면들의 표면조도를 측정한다. 또한 고속카메라를 이용하여 칩의 형성에서 탈락되기까지 진행되는 모습을 관찰한다. 그리고 절삭이 끝난후에 얻어진 칩들의 형상을 절삭특성들에 따라 비교 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭력 측정치와 고찰

절삭실험은 선삭하기 전에 피삭재의 흑피를 제거하고 길이 230mm, 외경 35mm의 환봉으로 1차 가공한 후 외경 선삭을 행함으로써 3차원 절삭이 이루어지도록 절삭실험을 행하였다. Table 3에서 나타낸 바와 같이 절삭속도, 절삭깊이 및 이송속도 등의 절삭조건들을 적용하였다. 피삭재 가공에 사용된 절삭공구는 초경합금 톱을 사용하였다. 절삭력측정에 사용된 공구동력계는 변형율식이며, 공구 동력계에서 검출된 절삭력신호를 증폭시킨 후 모니터링하면서 A/D 변환기로 디지털화 하였다. 저장된 데이터는 소프트웨어식 신호 해석시스템(Global Lab)을 사용하여 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 함으로써 진동수영역의 신호로 변환하였다. 절삭력의 시간영역 신호는 메모리 오실로스코프로 관찰하였다. 디지털 절삭력신호를 얻는 과정에서 왜곡되는 고주파성분을 제거하기 위하여 저역통과 필터도 사용하였다.

데이터 취득시 샘플링 주파수는 1024Hz로 취하였으며 5초 동안의 절삭력 신호를 저장하여 신호 해석시 사용하였다. 절삭의 세 분력중에서 주분력 신호에 대하여 푸리에 스펙트럼분석을 하였으며, 스펙트럼 분석시 사용한 샘플의 수는 1초간의 절삭력 신호에 해당되는 1024개로 하였다.

선삭실험의 절삭조건에 의한 3분력의 힘이 발생하고 있으나 그 3분력의 힘의 세기 중에서 제일 큰 힘인 주분력을 여러 가지 절삭조건들에 대하여 측정한 결과치들을 Table 5에 정리하였다. 표에서 인코넬 690 합금은 네가지의 절삭속도 (18, 22, 32 및 35m/min)중에서 절삭속도, 22m/min에서 다른 절삭속도들의 경우보다 절삭력이 제일 적게 나타났고, 절삭속도, 18m/min에서 절삭깊이에 관계없이 절삭력이 전반적으로 높게 나타남을 확인할 수 있다. 주분력의 평균값들의 절삭조건들에 따른 변화추세를 선도로 나타내면 Fig. 2에서 보는 것과 같다.

Table 5 Cutting force of Inconel 690 Alloy(N)

| V (m/min) | F (mm/rev) | D (mm) | | | |
|-----------|------------|---------|---------|---------|----------|
| | | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 1.0 |
| 18 | 0.067 | 816.29 | 918.22 | 1527.71 | 3124.78 |
| | 0.123 | 1130.21 | 1508.97 | 2443.87 | 5127.49 |
| | 0.234 | 1879.11 | 2635.85 | 4163.56 | 8299.65 |
| | 0.345 | 2855.79 | 3813.54 | 5510.67 | 10891.45 |
| 22 | 0.067 | 316.08 | 619.99 | 907.72 | 872.89 |
| | 0.123 | 765.18 | 1156.70 | 1867.63 | 1885.19 |
| | 0.234 | 1390.37 | 2068.93 | 3477.35 | 3464.50 |
| | 0.345 | 1765.70 | 2875.41 | 4428.92 | 5161.83 |
| 32 | 0.067 | 623.03 | 830.51 | 1363.69 | 2259.44 |
| | 0.123 | 942.35 | 1360.25 | 2107.09 | 3813.54 |
| | 0.234 | 1557.53 | 2380.20 | 3792.06 | 5942.90 |
| | 0.345 | 2623.29 | 3507.86 | 5372.05 | 8315.05 |
| 35 | 0.067 | 422.32 | 449.10 | 699.75 | 2592.49 |
| | 0.123 | 842.68 | 942.35 | 1416.66 | 4263.92 |
| | 0.234 | 1499.16 | 1655.83 | 2722.57 | 7122.26 |
| | 0.345 | 2443.87 | 2709.52 | 3476.57 | 9535.03 |

3.2 칩 형상과 고찰

절삭과정은 칩 생성과정이며 대부분의 금속 절삭시 칩 생성은 전단역이라 불리는 극히 한정된 영역에서 매우 좁은 간격을 두고 잇달아 일어나는 집중된 전단 소성변형에 의해 이루어진다. 생성된 칩은 공구 경사면과 심한 마찰을 일으키면서 외부로 배출된다. 절삭상태는 전단소성 변형의 크기, 속도 및 저항과 칩-공구경사면의 마찰계수, 마찰속도 및 마찰저항 등에 따라 크게 달라지며, 이를 절삭변수에 따라 특징을 갖는 전단과정과 마찰과정은 독립적으로 일어나지 않으며 상호 영향을 미치면서 절삭과정의 근간을 이룬다^(4,5,6).

따라서, 금속절삭연구에 있어 가장 기초적인 문제는 전단 소성변형 거동과 칩-공구경사면의 마찰거동에 미치는 절삭조건, 피삭재에 따른 공구의 재질 및 형상 등의 절삭입력조건들이 미치는 영향을 밝히는 것이다. 칩의 생성상태는 피삭재의 재질, 공구의 기하학적인 형상, 절삭속도, 절삭깊이 및 절삭폭 등의 절삭조건에 따라 달라진다. 칩의 대표적인 유형으로는 유동형(flow type), 전단형(shear type), 균열형(crack type) 및 열단형(pluck type)으로 구분할 수 있다^(7,8).

선삭을 하면 칩이 생기는데, 그 칩의 모양과 종류를 보고 표면조도나 공구의 진동 및 마멸을 대략적으로 짐작할 수 있다. 특히 난삭재인 인코넬 690 합금을 절삭할 때는 톱니

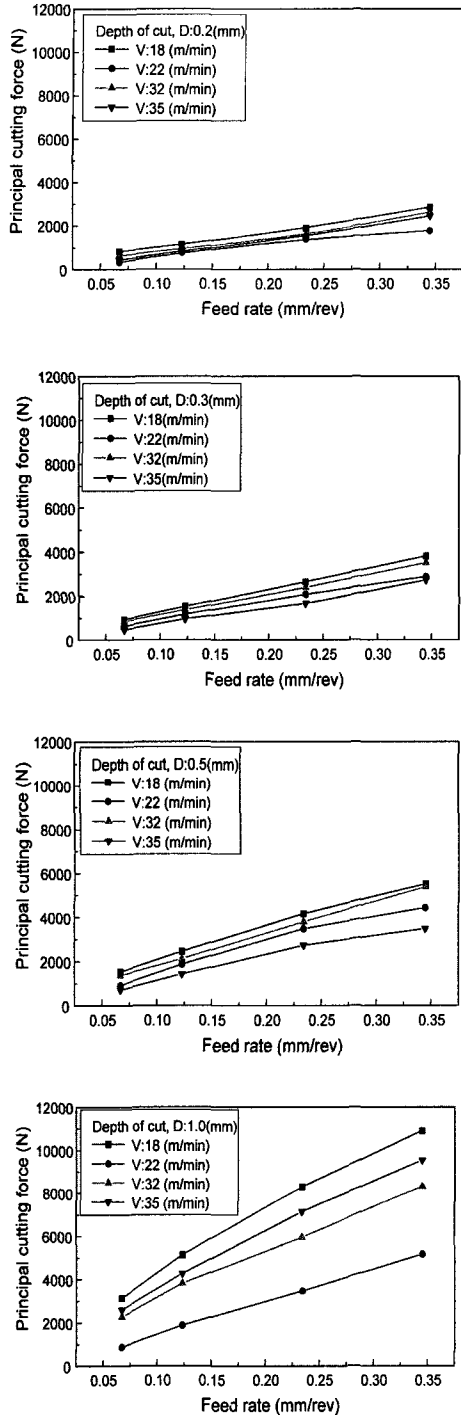


Fig. 2 Principal Cutting Forces

형의 날카로운 칩이 생겼다. 선삭에서 절삭조건에 따라 절삭할 때, 칩이 생성되는 전 과정을 동적으로 볼 수 있게 선반의 베드 위에 고속카메라(CCD, PULNIX TMC-7RGB)를 설치하였다. 고속카메라의 초점은 절삭공구와 피삭재의 절삭되는 부분에 고정하였고, 조명을 위하여 스트로브스코프는 회전수에 비례하여 절삭속도가 높으면 빠르게 램프가 작동하고, 반대로 절삭속도가 낮으면 늦게 작동하도록 연동시켜 피삭재가 10회전할 때마다 플래시(flash)가 작동하도록 설정하였다. 고속카메라의 플래시 작동과 동시에 절삭시에 칩이 발생하는 칩의 생성 단계에서 탈락까지의 전 과정에서 여러 장의 촬영된 사진은 PC에 자동 저장시켰고, 그 중에서 칩이 칩브레이커를 따라 칩이 배출될 때의 비선각(배출각)을 PC를 이용해 모니터링하였다. 이때 고속카메라를 이용하여 칩이 배출되는 과정을 단계별로 촬영후에 이를 디지털화하여 컴퓨터에 저장하였다. 이들 사진중에서 열단형 칩들이 최종 탈락될 때의 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 난삭재인 인코넬 690 합금을 절삭속도 18~35m/min로 절삭하였을 때는 난삭절삭을 보였고, 절삭속도가 커질수록 칩의

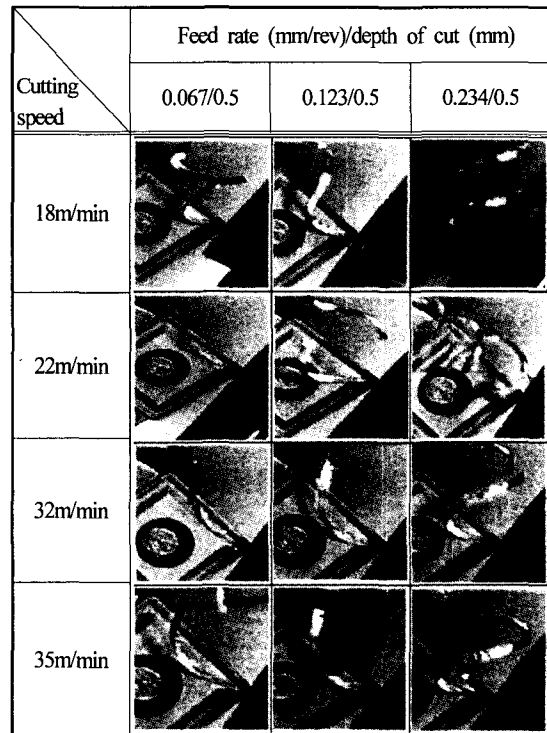


Fig. 3 Chip cycle-generation, development, and drops

| V | F | 0.067 | 0.123 | 0.234 | 0.345 |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | mm/rev | mm/rev | mm/rev | mm/rev |
| 18 | m/min | | | | |
| 22 | m/min | | | | |
| 32 | m/min | | | | |
| 35 | m/min | | | | |

Fig. 4 Chips of Inconel 690 Alloy (D = 0.2mm)

| V | F | 0.067 | 0.123 | 0.234 | 0.345 |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | mm/rev | mm/rev | mm/rev | mm/rev |
| 18 | m/min | | | | |
| 22 | m/min | | | | |
| 32 | m/min | | | | |
| 35 | m/min | | | | |

Fig. 5 Chips of Inconel 690 Alloy (D = 0.3mm)

| V | F | 0.067 | 0.123 | 0.234 | 0.345 |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | mm/rev | mm/rev | mm/rev | mm/rev |
| 18 | m/min | | | | |
| 22 | m/min | | | | |
| 32 | m/min | | | | |
| 35 | m/min | | | | |

Fig. 6 Chips of Inconel 690 Alloy (D = 0.5mm)

| V | F | 0.067 | 0.123 | 0.234 | 0.345 |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | mm/rev | mm/rev | mm/rev | mm/rev |
| 18 | m/min | | | | |
| 22 | m/min | | | | |
| 32 | m/min | | | | |
| 35 | m/min | | | | |

Fig. 7 Chips of Inconel 690 Alloy (D = 1.0mm)

모양은 열단형(pluck type)으로 뚜렷하게 나타났다. 절삭속도 18~35m/min 및 이송속도 0.123~0.234mm/rev의 조건하에서 절삭깊이가 0.3mm 이하인 경우는 대체적으로 전단형의 칩이 발생되었다. 절삭깊이가 0.5mm 이상인 경우는 주로 열단형 칩이 생겼으며, 그 요인은 인성이 크기 때문이라고 생각된다. 이때 각 절삭조건별로 얻어진 칩의 모양을 Fig. 4~Fig. 7에 보였다. 최적 절삭조건에서는 전단형의 칩들이 얻어지므로, 이 사진들로 이루어진 표에서 전단형의 칩들이 나타난 절삭조건을 선정하면 난삭재인 Inconel 690

합금에서 최적 절삭조건을 찾는 데 활용할 수 있다.

3.3 표면조도

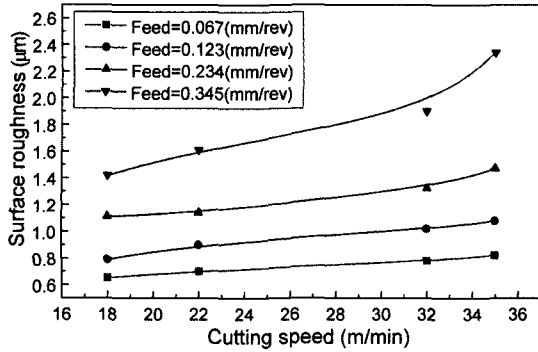
표면조도측정에 사용된 시험편은 절삭력 측정시 사용된 피삭재와 동일하다. 표면조도계(surface roughness tester)는 측정테이블과 촉침(stylus tip)이 수평을 유지해야 측정 오차값을 줄일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 자동 수평조절장치를 장착한 계측기를 활용함으로써 정확한 측정이 가능하도록 하였다.

Table 6 Surface roughness

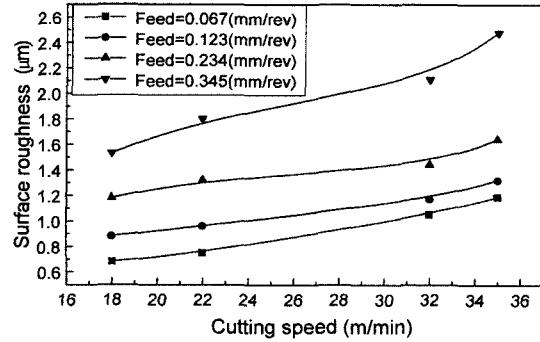
| Cutting speed (m/min) | Feed rate (mm/rev) | Depth of cut (mm) | Surface roughness Ra (μm) | Cutting speed (m/min) | Feed rate (mm/rev) | Depth of cut (mm) | Surface roughness Ra (μm) |
|-----------------------|--------------------|-------------------|--|-----------------------|--------------------|-------------------|--|
| 18 | 0.067 | 0.2 | 0.65 | 32 | 0.067 | 0.2 | 0.78 |
| | | 0.3 | 0.68 | | | 0.3 | 1.05 |
| | | 0.5 | 1.61 | | | 0.5 | 2.0 |
| | | 1.0 | 3.0 | | | 1.0 | 3.81 |
| | 0.123 | 0.2 | 0.79 | | 0.123 | 0.2 | 1.02 |
| | | 0.3 | 0.88 | | | 0.3 | 1.17 |
| | | 0.5 | 2.11 | | | 0.5 | 2.9 |
| | | 1.0 | 3.5 | | | 1.0 | 5.25 |
| | 0.234 | 0.2 | 1.11 | | 0.234 | 0.2 | 1.32 |
| | | 0.3 | 1.18 | | | 0.3 | 1.44 |
| | | 0.5 | 2.43 | | | 0.5 | 3.28 |
| | | 1.0 | 4.7 | | | 1.0 | 6.11 |
| | 0.345 | 0.2 | 1.42 | | 0.345 | 0.2 | 1.9 |
| | | 0.3 | 1.53 | | | 0.3 | 2.11 |
| | | 0.5 | 3.4 | | | 0.5 | 4.4 |
| | | 1.0 | 6.01 | | | 1.0 | 7.88 |
| 22 | 0.067 | 0.2 | 0.7 | 35 | 0.067 | 0.2 | 0.82 |
| | | 0.3 | 0.75 | | | 0.3 | 1.19 |
| | | 0.5 | 1.83 | | | 0.5 | 2.39 |
| | | 1.0 | 3.4 | | | 1.0 | 4.3 |
| | 0.123 | 0.2 | 0.9 | | 0.123 | 0.2 | 1.08 |
| | | 0.3 | 0.96 | | | 0.3 | 1.32 |
| | | 0.5 | 2.6 | | | 0.5 | 3.1 |
| | | 1.0 | 4.4 | | | 1.0 | 5.81 |
| | 0.234 | 0.2 | 1.14 | | 0.234 | 0.2 | 1.47 |
| | | 0.3 | 1.32 | | | 0.3 | 1.64 |
| | | 0.5 | 2.93 | | | 0.5 | 3.38 |
| | | 1.0 | 5.4 | | | 1.0 | 6.74 |
| | 0.345 | 0.2 | 1.61 | | 0.345 | 0.2 | 2.34 |
| | | 0.3 | 1.8 | | | 0.3 | 2.48 |
| | | 0.5 | 3.75 | | | 0.5 | 4.9 |
| | | 1.0 | 6.81 | | | 1.0 | 8.67 |

표면조도 측정대 위에 피측정물을 올려놓고 표면조도의 측침을 피측정물과 접촉 이송시킨다. 측침의 변위량에 비례

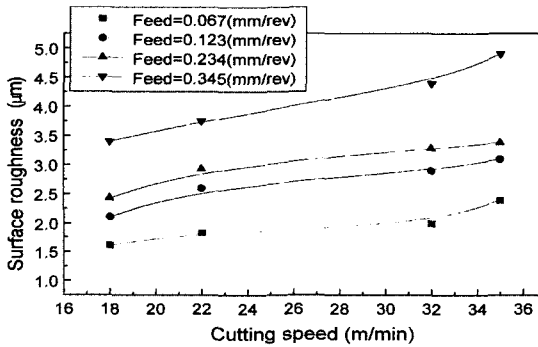
하여 나타나는 전압은 증폭기에서 증폭된 후 A/D 변환기에 서 샘플링속도 2kHz로 1024개의 표면조도 값들을 받아 디



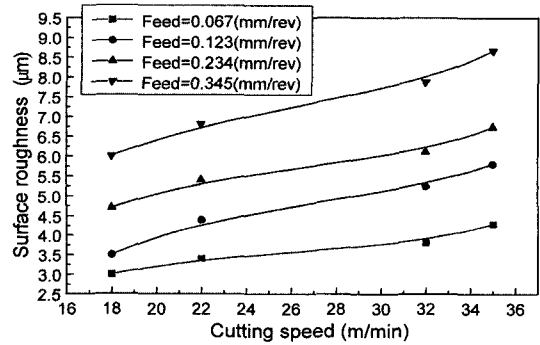
(a) D : 0.2 mm



(b) D : 0.3 mm



(c) D : 0.5 mm



(d) D : 1.0 mm

Fig. 8 Surface roughness according to cutting conditions

스크에 저장한다. 이때 표면조도의 작동설정 조건은 트레이싱 속도가 0.3mm/sec 이므로 1.536mm의 표면거리에서 조도 값들을 읽게되며 0.8mm의 cut off 값들을 설정하였다. 표면조도의 측정값은 표면조도계와 컴퓨터를 연결하여 받은 출력 데이터를 표준시편(Rmax 6.3 μ m 및 10.5 μ m)에 대한 상대적인 값으로 환산하여 μ m 단위로 나타내었다. 표면조도는 오차를 줄이기 위하여 3번 이상 측정하여 산술적 평균 값을 구하였다.

오스테나이트 계열의 난삭재인 인코넬 690 합금을 절삭하였을 때, 각 절삭조건별로 얻어진 표면조도값들을 Table 6 에 나타내었으며, 표면조도의 종합적인 그래프를 Fig. 8 에 나타내었다. 이상의 결과들에서 볼 수 있듯이 인코넬 690 합금을 절삭하였을 때, 회전당 이송속도와 절삭깊이가 작을수록 표면조도는 대체적으로 양호하게 나타났다.

5. 결론

난삭재로 알려진 오스테나이트계열의 인코넬 690 합금이 개발되어 활용되기 시작한지 얼마 되지 않아 원활한 절삭을 위한 절삭데이터가 많이 없다. 따라서 본 연구에서는 난삭재인 인코넬 690합금의 최적 절삭조건을 찾기위해 TiN코팅된 절삭공구를 이용하여 절삭력, 칩 형상, 표면조도 및 고속카메라를 이용한 칩의 배출과정을 관찰함으로써 열단형의 칩들이 배출되는 것을 확인하였으며, 일련의 실험연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주분력을 여러 가지 절삭조건들에 대하여 측정할 결과 인코넬 690 합금은 네가지의 절삭속도(18, 22, 32 및 35m/min)중에서 절삭속도, 22m/min에서 다른 절삭속도들의 경우보다 절삭력들이 제일 적게 나타났고, 절삭속도, 18m/min 에서 절삭깊이에 관계없이 절삭력

이 전반적으로 높게 나타났다.

- (2) 고속카메라에서 촬영된 칩으로는 동일 절삭조건에서 절삭깊이와 회전당 이송량이 클수록 열단형 칩이 발생함을 알 수 있다.
- (3) 표면조도는 동일 절삭조건에서 절삭깊이가 커질수록 불량하게 나타나는 양상을 보인다.
- (4) 배출된 칩들의 형상사진을 절삭조건들에 따라 도표화함으로써 최적 절삭조건을 찾을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 한국원자력기술원, 인코넬 690 합금의 기계적 특성평가(인코넬 합금개발)-한국원자력기술원, 1994.
- (2) W.F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys," p. 466, McGraw-Hill, U.S.A., 1981.
- (3) ASM, "Corrosion of Nickel Base Alloys", Metal's Handbook, 9th ed., pp. 641, ASM International, U. S.A., 1987.
- (4) M.C. Shaw, "Metal Cutting Principles," Oxford Univ. Press, London, 1984.

- (5) D.A. Stephenson, J.S. Agapiou, "Metal Cutting Theory and Practice," Marcel Dekker, Inc., 1997.
- (6) Geoffrey Boothroyd, "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools," Scripts Book Company, Washington, D.C., 1975.
- (7) 황경충, 정을섭, 최재하, 김성철, "인코넬 690 합금의 절삭특성에 관한 연구," 한국공작기계학회 추계학술대회논문집, pp. 315~319, 1999.
- (8) 윤종호, 최원식, 이영문, "절삭력에 의한 칩의 형상분류와 칩형상예측," 한국공작기계학회지, 제7권, 제2호, pp. 40~46, 1998.
- (9) 황경충, "CNC선삭에서 절삭조건이 공구수명 및 표면조도에 미치는 영향," 경일대학교 대학원 석사논문, 1993.
- (10) 윤종호, 황경충, 최원식, "CNC에 의한 SM45C 선삭시 절삭성능 평가," 한국공작기계학회지, 제7권, 제4호, pp. 104~116, 1998.
- (11) 이명재, 이수용, 사승윤, 김광래, 유봉환, "TiN피복 세라믹 공구의 절삭저항에 관한 실험적 연구," 한국공작기계학회 추계학술대회논문집, pp. 307~314, 1999.