

다이아몬드 공구의 절삭거리에 따른 정밀가공 특성 연구

유기현*, 정진용**

A Study on the Precision Cutting Characteristics by the Diamond Tool on the Cutting Distance

Ki Hyun Yu*, Chin Yong Cheong**

Abstract

This research intends to gain the sight for the qualitative characteristics of precision cutting by using the CNC lathe with a mono-crystal diamond(MCD) and a poly-crystal diamond(PCD) tool on the cutting distance.

In case of an MCD tool, as the cutting distance increases, the surface roughness becomes worse and the standard deviation of surface roughness is small. In case of a PCD tool, as the cutting distance increases, the surface roughness becomes stable with a large standard deviation. The cutting force ratio(F_t/F_n) decreases as the nose radius increases and the decreasing ratio becomes larger for small nose radius.

Keywords : Precision Cutting(정밀가공), Cutting Distance(절삭거리), Mono-Crystal Diamond(MCD, 단결정 다이아몬드), Poly-Crystal Diamond(PCD, 다결정다이아몬드)

1. 서론

기계의 발달은 산업발전의 큰 원동력이 되었으며 이에 따른 특징중의 하나는 생산시간을 단축시킴으로서 대량생산이 이루어졌다는 점이다. 그러나 정밀절삭가공 분야에서는 아직도 기존의 입자가공이 주류를 이루고 있어 대량생산의 관점에서 문제시 되고 있으며, 인성이 큰 재료의 입자가공시에는 표면의 질적인 문제가 대두되고 있다. 이에

따라 단인 다이아몬드 공구를 이용한 절삭가공 기술이 발달하게 되었으며 진척도, 진원도 등의 형상오차의 향상 뿐만 아니라 생산시간의 단축에도 큰 기여를 하게 되었다.

다이아몬드 공구를 이용한 정밀절삭 가공기술은 복사기 용 드럼, 컴퓨터의 메모리디스크, 현미경 렌즈 및 X선용 천체망원경 등을 비롯한 전기 전자, 광학 등 중요 기계부품을 생산하는 핵심기술로 부각되고 있으며 기술집약도가 높은 산업으로서 많은 연구와 발전이 기대되는 분야이다.

* 전북대학교 기계공학부 강사

** 군장대학 기계설계과

이미 미국을 비롯하여 여러 선진국에서는 1960년대 부터 이분야에 대한 연구를 시작하여 왔으며 1962년 미국의 Union Carbide사와 프랑스의 du Pont사와 협동으로 고정도의 기계를 개발하여 1966년 MTDR에 발표⁽¹⁾한 것을 시작으로 LLNL, Philips, CUPE, Toyota, Toshiba, Hitachi 등 여러 업체에서 관심을 가지고 연구중이며 우리나라에서도 1990년 초부터 이 분야에 관심을 보여 짧은 연구경력에도 불구하고 가공기술과 가공 시스템에 대해 많은연구⁽²⁻⁵⁾가 이루어지고 있지만 아직도 산업현장의 다이아몬드 공구를 이용한 정밀절삭 분야에서는 외국기계의 의존도가 높아 이분야의 연구의 필요성은 절실하다.

정밀가공을 위한 공구재료로서 현재 가장 많이 이용되는 것은 다이아몬드이며 이로서 얻어지는 가공물의 표면거칠기는 공구의 절인윤곽과 절삭조건 중의 공구이송에 의해 기하학적으로 얻어지는 이론표면거칠기와 직접적인 관련이 있으므로 다이아몬드 공구의 절인상태에 따라 가공물의 표면거칠기가 달라진다. 절삭도중 공구는 가공재와 계속적인 마찰을 통해 마모가 이루어지며 Wilks 등⁽⁶⁾은 다이아몬드 공구의 마모율은 공구면에 대한 마찰방향에 크게 의존한다고 하였으며, Casey 등⁽⁷⁾은 각각 방향성이 다른 6개의 공구를 가지고 다이아몬드 공구의 방향성에 대한 실험을 하였다. 또한 Keen 등⁽⁸⁾은 자동차 피스톤 재료인 Al-Si합금을 절삭가공할 때 다이아몬드 공구의 마모현상을 조사하였다. 공구재료와 그에 따른 제작비가 고가이고 범용공구가 아닌 국부적인 가공에 이용되기 때문에 일찍부터 다이아몬드 공구의 마모에 대한 연구가 수행되어 왔으나 정확한 마모특성은 확실히 밝혀지지 않고 있는 실정이며, 더 많은 실험과 연구가 이루어져야 하겠다.

본 연구에서는 CNC선반을 이용하여 천연 다이아몬드 공구로 Al합금을 절삭가공하는 도중 가공물의 절삭거리를 측정하여 이에따라 변화되는 절삭력 성분과 표면거칠기의 변화를 통하여 다이아몬드 공구의 수명을 판단할 수 있는 기초자료를 얻고자 한다.

2. 정밀절삭가공 배경

2-1 공작기계

공작기계에의해 공구와 피삭재의 상대운동이 제어되어 절삭현상이 이루어지므로 공작기계 운동의 정밀도는 정밀절삭가공을 하기 위한 매우 중요한 요소이다. 요구하는 가공형상을 높은 정밀도로 실현할 수 있는 요소의 구성과

절삭저항에 견딜 수 있는 강성, 진동의 안정성, 장기간의 치수 안정성 및 온도에 대한 안정성 등이 요구된다. 특히 주축은 회전 정밀도가 매우 높아야하고, 공구대의 정확한 위치제어 또한 반드시 갖추어야 할 사항이며, 각각의 운동요소들을 지지하는 기계 본체는 정적 및 동적인 강성과 열에 대한 강성이 커야 한다.

2-2 공 구

가공 정밀도의 한계를 결정하는 요인의 하나인 공구는 미세한 칩 생성과 매끄럽고 변질층이 작은 다듬질면을 생성할 수 있는 능력 및 내구성 등을 요한다. 천연다이아몬드가 정밀 절삭공구로서 가지는 장점으로는 경도와 열전도율이 커서 최고온도 저하 및 마찰계수가 작아 칩 유동을 원활하게 할 수 있다는 점 등이며, 특히 예리한 절인을 형성할 수 있다는 점이다. 정밀가공에 가장 필수적 요소인 절인반경은 정확하게 측정된 값은 없으나, 최근 그 측정값이 20~45nm의 범위라는 보고가 있다⁽⁹⁾. 절인반경이 작을수록 보다 작은 미세절삭이 가능하므로, 절인반경의 크기에 따라 절삭깊이를 결정하는 이송과 물림깊이의 설정에 제한을 받는다.

물림깊이와 이송을 작게 취함으로써 치수정밀도를 크게 하고 이송의 감소에 따라 기하학적 표면거칠기를 향상시키며, 절삭저항 감소에 따른 진동의 영향 및 절삭 후 표면층의 잔류응력을 최소화 시킬 수 있는 이점이 있다⁽¹⁰⁾. 한편, 천연 다이아몬드 공구는 벽개성이라는 단점과 결정면에 따라 강도의 차이가 현저하여 마모의 정도가 다르기 때문에 공구 제작시에는 세심한 주의를 필요로 한다.

2-3 기타 조건

이 외에도, 피삭재, 절삭조건, 절삭유제 및 가공시 주위환경에 대한 충분한 지식을 가져야 하며, 가공 후의 공구와 가공면을 정확히 측정할 수 있는 정밀측정법이 뒤따라야 한다.

위와 같은 이상적 조건을 구비한 상황에서만이 절대적 의미의 정밀절삭이 가능하나 본 연구에서는 상대적 의미의 정밀절삭에 대한 정성적 해석에 관점을 두어 다음과 같은 조건에서 실험을 수행 하였다.

3. 실험장치 및 방법

3-1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental apparatus

| | |
|--------------------------|-----------------------------|
| CNC Lathe | PUMA 6S turret type(DAEWOO) |
| Tool dynamometer | KISTLER 9257A |
| Charge amplifier | KISTLER 5001 |
| A/D converter | FPGA ASIC controller |
| 486 computer | CPU 80486 |
| Surface roughness tester | Mitutoyo Surftest-201 |
| SEM | HITACHI X-650 |
| Metal microscope | OLYMPUS MF-TR |

이 실험에 사용된 공구동력계와 공구를 설치하기 위해 지그(jig)를 설계, 제작하였으며, Fig. 1은 실험장치 구성을 보여주고 있다.

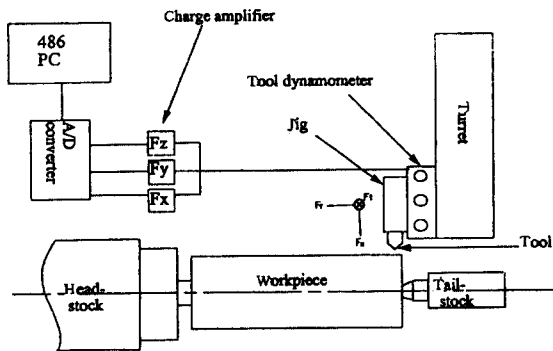


Fig. 1 Experimental device setup

3-2 공작물 재료 및 절삭공구

실험에 사용된 피삭재는 항공기 및 기타 기계부품에 많이 사용되는 알루미늄합금(Al 2024)을 선택하였으며, Table 2는 T4열처리된 피삭재의 화학적 조성성분을 보여 준다.

Table 2 Chemical compositions of Al alloy(Al2024)

| Cu | Mg | Si | Fe | Zn | Ti | Cr | Al |
|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
| 3.8 ~4.9 | 1.2 ~ 1.8 | 0.50 max | 0.50 max | 0.3 ~0.9 | 0.15 max | 0.10 max | rest |

공구는 천연 다이아몬드 공구와 인조다이아몬드 공구로서 기하학적 형상 및 크기는 경사각 0°, 여유각 5°, nose 반경은 각각 2, 3, 5mm이며, 국내 다이아몬드 공구 제작사에 의뢰하여 제작하였다.

3-3 실험방법

제작된 지그를 이용하여 공구동력계를 CNC선반의 터렛에 고정시키고 그 위에 다이아몬드공구를 고정할 수 있도록 하였으며, 피삭재는 CNC선반의 주축대와 심압대에 고정시킨 후, CNC선반에 Table 3과 같이 실험조건을 입력한 후 절삭을 시작하였다. 절삭도중 절삭력 측정은 공구동력계에서 나온 신호를 증폭시킨 다음 A/D컨버터를 통하여 컴퓨터에 저장할 수 있도록 하였으며 필요에 따라 모니터를 이용하여 확인하였다. 절삭이 끝나면 축침식 표면조도계를 이용하여 컷오프(cut-off) 0.8mm, 트레이빙(traversing) 길이 2.4mm의 조건에서 중심선 평균거칠기 Ra를 측정하였으며, 가공면을 약 10회정도 측정하여 평균값(\bar{x})과 표준편차(s)를 각각 식(1) 및 식(2)로부터 계산하였다.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (2)$$

이상의 방법으로 얻은 데이터를 각각의 절삭조건별로 그래프화하여 분석하였다.

Table 3 Cutting conditions

| | |
|--|---------------|
| Cutting speed (m/min) | 200, 400, 600 |
| Feed rate ($\mu\text{m}/\text{rev}$) | 17 |
| Depth of engagement(μm) | 17 |

4. 실험결과 및 고찰

4-1 절삭거리에 따른 표면거칠기

Fig. 2는 절삭속도 600m/min, 물립깊이 17 μ m, 이송 17 μ m/rev인 절삭조건에서 공구선단 반경이 5mm인 MCD공구의 초기마모에 따른 표면거칠기의 변화를 알아보기 위해 절삭거리60km이내에서 절삭거리에 따른 가공면의 표면거칠기를 나타내었다. 절삭거리 증가에 따라 표면거칠기가 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있으며 표준편차도 큰 값으로 나타나고 있다.

이러한 경향은 공구의 초기마모에 따라 일정한 표면거칠기가 나타나지 않고 공구의 상태에 따라 변하게 되는데, 공구의 큰 취성때문에 절삭도중 공구와 공작물의 상대진동 또는 절삭저항의 변동 등에 의한 충격으로 인하여 절삭초기에 예리한 절인끝의 일부가 미세하게 깨져 나가는 칩핑(chipping)발생에 기인되는 것으로 판단된다.

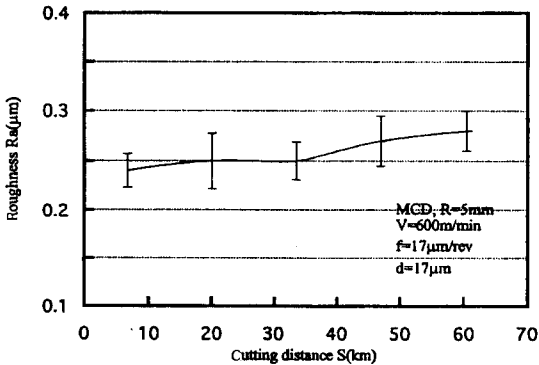


Fig. 2 The effect of cutting distance on the roughness (MCD, R=5mm)

Fig. 3은 Fig. 2와같은 조건에서 계속적인 절삭을 행하여 절삭거리가 1000km에 도달될 경우 계속적인 공구마모에 따른 가공물의 표면거칠기 변동특성을 표시하였다.

절삭거리가 약 100km이내에서는 공구의 초기마모에 의해 표면거칠기가 불안정하게 나타나 편차가 큰 값을 보이고 있으며 150km를 넘어 350km부분까지는 조금씩 표면거칠기가 양호해 지고 있다. 그러나 350km를 넘어서 다시 증가 경향을 보이고 있으며 400km부분을 지나면서부터 표면거칠기의 변화가 거의 일정한 증가추세를 보이고 그 편차 폭은 작게 나타나고 있다.

절삭거리가 100km를 넘어 초기마모가 끝나고 안정적인 절삭을 수행하면서부터 표면거칠기가 양호해진다. 이때 공구로서의 성능이 가장 안정적으로 수행되고 있음을 알 수 있다. 이 구간을 지나 계속적인 정상마모가 진행되며 마모량이 아주 미세하기 때문에 절삭거리가 350km를 넘어서도 안정적인 절삭을 행할 수 있지만 처음과 같은 양호한 표면거칠기는 얻지 못하게 된다. MCD 공구의 마모가 아주 미소하기 때문에 표면거칠기 값은 큰 차이는 보이지 않고 계속적으로 조금씩 증가하고 있음을 알 수 있다.

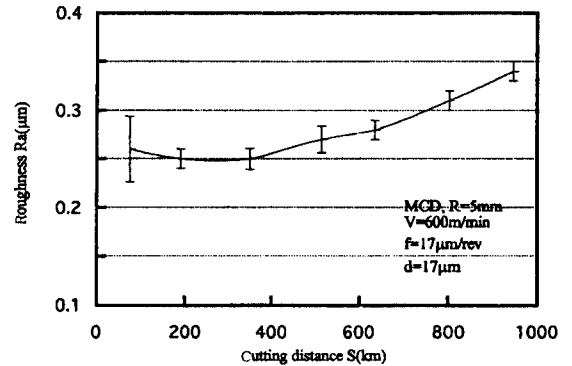


Fig. 3 The effect of cutting distance on the roughness(MCD, R=5mm)

Fig. 4는 절삭속도 600m/min, 이송 17 μ m/rev, 물립깊이 17 μ m의 상태에서 선단반경 2mm인 PCD 공구의 초기마모에 따른 가공면의 표면거칠기 변화를 조사하기 위해 절삭거리 60km 이내에서 절삭거리에 따른 가공면의

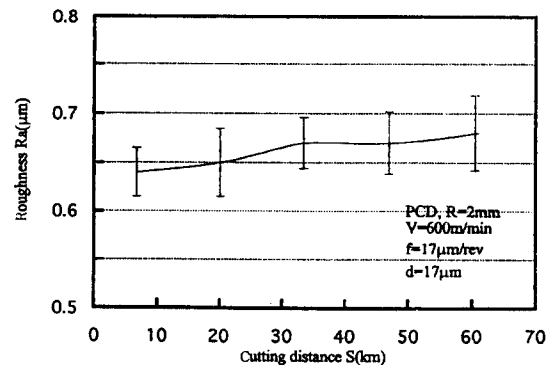


Fig. 4 The effect of cutting distance on the roughness(PCD, R=2mm)

표면거칠기를 표시하였다. 절삭거리 증가에 따라 역시 표면거칠기가 증가하고 있으며 표면거칠기의 편차폭도 크게 나타나고 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와같은 절삭조건에서 절삭거리를 1000km까지 증가시키면서 표면거칠기를 측정하였다. 공구의 초기마모 구간인 약 100km부근을 넘어서면서부터 표면거칠기 값이 계속적으로 증가추세를 보이고 있으나 큰 차이는 나타나지 않고 있다. 그러나 MCD 공구의 경우와는 달리 안정적인 절삭이 이루어지는 정상마모 구간에서도 표면거칠기의 편차폭이 계속하여 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

PCD 공구의 절인이 MCD 공구의 절인에 비해 예리도가 떨어지기 때문에 정상마모 구간에서도 상대적으로 안정적인 절삭이 이루어지지 않는 것으로 판단되며, 표면거칠기의 신뢰도가 MCD 공구에 비해 PCD 공구가 약간 떨어지고 있음을 알 수 있다.

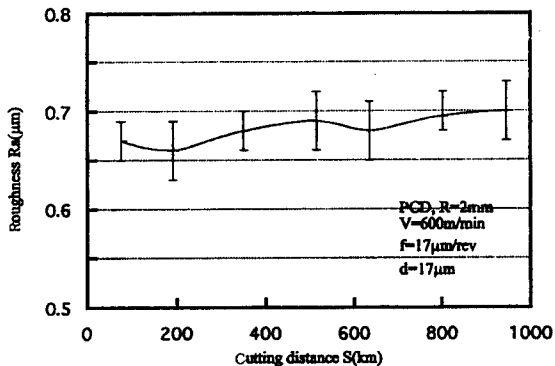


Fig. 5 The effect of cutting distance on the roughness(PCD, R=2mm)

4-2 절삭거리에 따른 절삭력 변동

절삭 도중 공구의 이상상태 유무에 따라 절삭력 변화가 발생되고 이러한 절삭력변화에 따라 공구 마모현상을 파악할 수 있으며, 공구의 종류와 형상에 따라서도 절삭력 변동특성이 서로 다르게 나타나게 된다.

Fig. 6은 절삭속도 600m/min, 물림깊이 17 μ m, 이송 17 μ m/rev의 상태에서 공구 선단반경이 5mm인 MCD 공구를 사용하여 절삭거리 증가에 따른 절삭력의 변동특성을 나타내었다. 절삭거리의 증가에 따라 주분력과 배분력

이 각각 증가하고 있으며, 주분력의 증가비율 보다 배분력의 증가비율이 약간 높게 나타나고 있다.

절삭이 진행됨에 따라 공구마모가 발생되면 절삭력의 상승 원인이 되고, 공작물과 공구 여유면의 접촉면적이 증가하게 되어 배분력의 상승비율이 높아지게 되는 것이 다이아몬드에 의한 정밀 절삭에서도 적용된다.

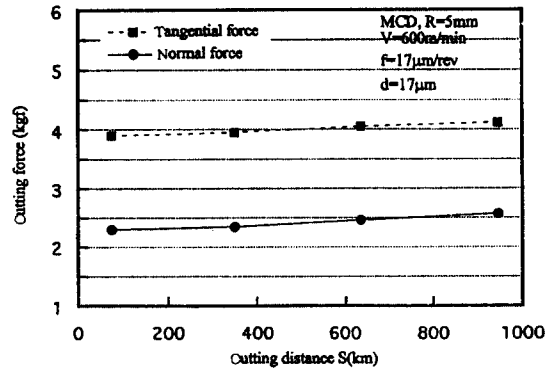


Fig. 6 The effect of cutting distance on the roughness(MCD, R=5mm)

Fig. 7은 절삭속도 600m/min, 물림깊이 17 μ m, 이송 17 μ m/rev의 절삭조건에서 선단반경 5mm인 PCD 공구의 절삭거리 증가에 따른 주분력과 배분력의 변동특성을 나타내었다. PCD 공구 역시 MCD 공구의 경우와 같이 절삭거리 증가에 따라 주분력과 배분력이 증가하고 있으며 배분력의 상승률이 더 크게 나타나 주분력과 배분력의 차이가 점점 작아지고 있다.

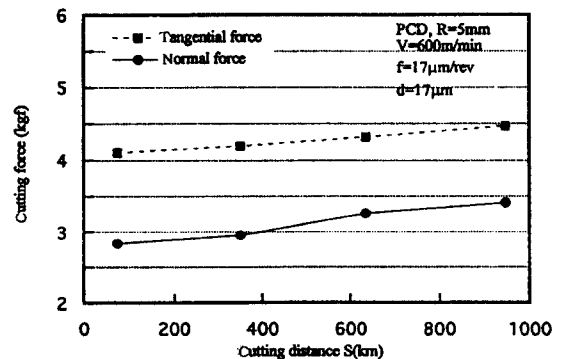


Fig. 7 The effect of cutting distance on the cutting force(PCD, R=5mm)

Fig. 8, 9는 절삭속도 600m/min, 물림깊이 17 μ m, 이송 17 μ m/rev의 상태에서 공구 선단반경이 변할 때 MCD 공구와 PCD 공구의 절삭거리 증가에 따른 주분력 변동특성을 나타내었다. 절삭거리 증가에 따라 주분력이 증가하고 공구 선단반경 증가에 따라서도 주분력이 크게 나타나고 있으며 상승비율도 높게 나타나고 있다.

절삭거리 증가에 따라 마모가 진행되어 절삭력의 증가 원인이 되며 공구 선단반경이 증가할수록 공작물과 공구 절연의 접촉길이가 증가됨으로써 절연에서의 이상상태가 상대적으로 많이 발생하게 되어 절삭력의 상승비율이 높게 나타나게 된다.

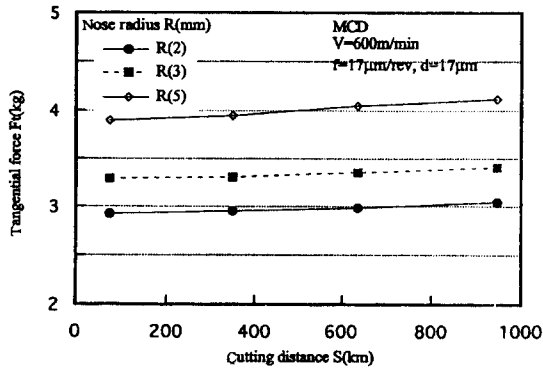


Fig. 8 The effect of nose radius and cutting distance on the tangential force(MCD)

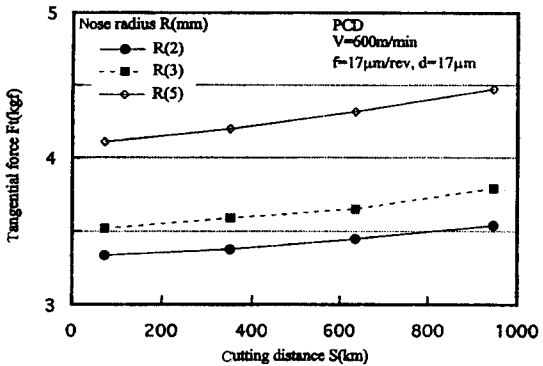


Fig. 9 The effect of nose radius and cutting distance on the tangential force(PCD)

Fig. 10, 11은 위와 같은 절삭조건하에서 절삭거리에 따른 배분력의 변동특성을 나타내었다. 주분력의 경우와

마찬가지로 절삭거리가 증가될수록 배분력이 증가하게 되고 선단반경 증가에 따라서도 배분력의 증가와 그 증가비율도 높게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

공구 선단반경 증가에 따라 공작물에 대한 공구의 접촉길이 증가로 인해 공작물에 공구의 여유면 접촉면적이 커지게 되며 공구의 이상현상 발생 가능성이 높아지게 되어 절삭거리가 증가함에 따라 배분력 상승비율이 높게 나타난 것으로 판단된다.

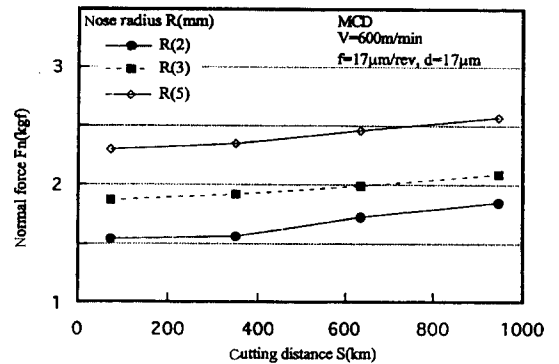


Fig. 10 The effect of nose radius and cutting distance on the normal force(MCD)

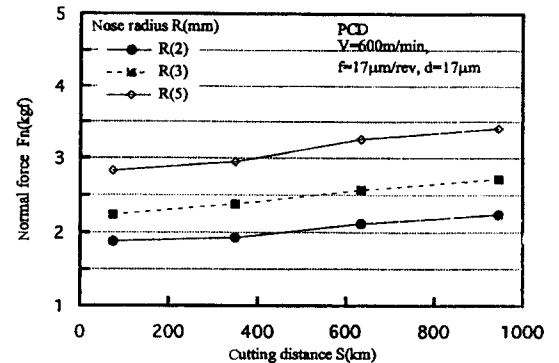


Fig. 11 The effect of nose radius and cutting distance on the normal force(PCD)

Fig. 12는 절삭속도 600m/min, 물림깊이 17 μ m, 이송 17 μ m/rev의 절삭조건에서 공구 선단반경이 변할 때 MCD 공구의 절삭거리에 따른 절삭력비(Ft/Fn)의 변동특성을 나타내었다. 절삭거리가 증가됨에 따라 배분력이 주분력보다 상대적으로 크게 증가되어 절삭력비가 점점

감소함을 알 수 있고 공구 선단반경이 작은 경우 절삭력 비가 크게 되며 절삭거리 증가에 따른 절삭력비의 감소가 상대적으로 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 공구 선단반경이 작은 경우에 절삭거리가 증가할수록 주분력의 증가비율보다 배분력의 증가가 더 높게 나타남을 알 수 있다.

공구 선단반경이 커짐으로써 공구와 공작물의 접촉길이 증가에 따라 배분력의 증가가 주분력의 증가량에 비해 상대적으로 커지기 때문이라 판단된다.

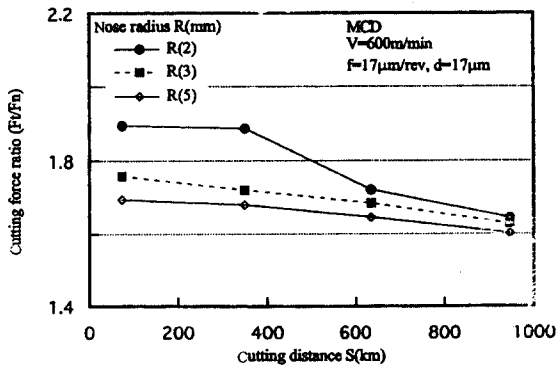


Fig. 12 The effect of nose radius and cutting distance on the cutting force ratio(MCD)

5. 결 론

정밀 절삭공구로 많이 사용되는 다이아몬드 공구를 이용하여 알루미늄 합금을 정밀 절삭가공 실험 한 후 절삭 거리에 따른 절삭특성을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MCD 공구의 경우 절삭거리가 증가할수록 표면거칠기는 악화되지만 표면거칠기의 표준편차는 작은 값을 보이고 있다.
2. PCD 공구는 절삭거리 증가에 따른 표면거칠기는 일정하지만 그 표준편차는 MCD공구의 경우보다 큰 값을 나타내고 있다.

3. 절삭력비(F_t/F_n)는 공구 선단반경이 큰 공구일수록 작고, 절삭거리가 증가함에 따라 주분력보다 배분력이 상대적으로 크게 증가하여 절삭력비가 감소하며, 선단반경이 작을수록 그 감소율은 커진다.

참 고 문 헌

1. Whitten.L.G, Lewis.T.G, "Machining and Measurement to Submicron Tolerances", Proc. M.T.D.R., Pergamon Press, pp.491, 1966.
2. 이후상, "초정밀 가공시스템", 한국정밀공학회지, 10권, 1호, pp.14~21, 1993.
3. 이재경 외, "초정밀 가공시의 공구마모", 초정밀 가공기술 심포지움, 1989.
4. 강철희 외, "초정밀가공 공작기계의 개발에 관한 연구 (I), (II)", 과기처 특정연구 보고서, 1990, 1991.
5. 김정두, "천연다이아몬드 인선형태에 의한 Al합금의 정밀절삭에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 14권, 6호, pp.1515~1522, 1990.
6. Wilks, E.M., Wilks, J., Phys. J., D: Appl. Phys. 5, 1902(1972).
7. Casey, M., Wilks, J., "Some experiments to study turning tools using the scanning electron microscope", Vol 16. pp 13-22. Pergamon Press 1976.
8. Keen, D., Grogan, A.F., "Wear of single point diamond tools in the machining of aluminium-silicon alloy pistons-a final report", Industrial Diamond Review, June 1971.
9. Asai, S., Taguchi, Y., Horio, K., Kasai, T., "Measuring the Very Small Cutting-Edge Radius for a Diamond Tool Using a New Kind of SEM Having Two Detectors", Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 85~88, 1990.
10. 서남섭, "新版 精密工作法", 大光書林, pp.503~528, 1996.