한국정밀공학회지 제17권 제12호 (2000년 12월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 12, December 2000.

알루미늄 합금의 초정밀 선삭 가공에 있어서 PCD와 MCD 공구의 절삭 특성 비교

김형철*, 함승덕*, 홍우표**, 박영우***, 김기수****

The Comparison of Cutting Characteristics of PCD and MCD Tools in the Ultraprecision Turning of Aluminum Alloy

Hyeung Chul Kim*, Seung Duck Hahm*, Woo Pyo Hong**, Young Woo Park*** and Ki Soo Kim****

ABSTRACT

This paper presents the construction of an ultra-precision machining system and machining experiments using the developed system. The system is composed of air bearing system, granite bed, air pad, and linear feeding mechanism. The cutting conditions have great effect on the surface quality in ultra-precision machining. The ultra-precision machining is mainly processed by several ㎛ depth of cut and feed rate. For this, tools with sharper cutting edge and less tool wear are needed. To satisfy these requirements, diamond is generally used as a tool material for ultra-precision machining. In order to evaluate the cutting characteristics of the PCD and MCD tools on the aluminum alloy, the machining experiments performed using the developed system.

Key Words : ultra-precision machining(초정밀 가공), MCD(단결정 다이아몬드), PCD(다결정 다이아몬드), surface roughness(표면거칠기), micro turning(미소선삭), cutting edge radius(절삭 인선 반경), nose radius(선단반경)

1. 서 론

최근, 전자, 정보 및 항공 우주산업 등의 급속한 발전과 더불어 알루미늄 합금, 무산소 동, 플라스틱 등과 같은 연질 재료의 초정밀 가공에 대한 요구가 급증하고 있다. 연질 금속과 플라스틱 재료에 대한 초정밀 가공은 다이아몬드 공구와 초정밀 공작기계에 의하여 이루어진다. 1960년대 중반 미국의 POM A(Point One Micrometer Accuracy) 계획을 시작으로 초정밀 공작기계의 개발, 가공시스템 및 응용기술에 관한 연구들이 활발하게 진행되어 왔다[1~2].

초정밀 가공에서 치수정밀도는 공작기계 주축의 회전 정밀도 및 이송계의 직진성 및 위치 결정에 대한 성능이 중요하다. 따라서, 공작기계 주축의 회전 정밀도를 높이는 방법으로 공기 베어링을 사용하고, 이송계에는 유압 가이드나 공압 가이드를 사용하고 있다[3~4]. 또한, 초정밀 가공에서는 절삭조건에 따라 표면거칠기에 큰 영향을 주게 된다. 주로 수 ㎛ 단위의 절삭깊이와 이송률에 의한 미소절삭을 실시한다. 이를 위해서 절인반경을 작게 할 수 있고, 공구 마멸에 대응할 수 있는 공구가 요구된다. 이러한 요구를 충족시키는 초정밀 가공용 공구 재료로는 다이아몬드를 사용하는 것이 일반적이다[5~6].

* 도립 충북과학대학 기계과
** 충남대학교 기계공학과 대학원
*** 충남대학교 메카트로닉스공학과
**** 충남대학교 기술교육과

본 연구에서는 공기 베어링 스핀들, 화강암 베드, 공기 방진 장치 및 직선 이송장치로 구성된 간이형 초정밀 선삭가공 시스템을 설계 제작하였으며, PCD(poly-crystalline diamond)와 MCD(mono-crystalline diamond) 공구에 의한 알루미늄 합금(Al7075)의 초정밀 절삭실험을 수행하였다. 절삭속도 변화에 따른 표면거칠기를 조사하여 고속 초정밀 가공기의 한계 절삭속도를 구하였다. 또한 한계속도범위에서 이송률, 절삭깊이 등의 절삭조건과 공구재질이 표면거칠기에 미치는 영향을 조사하였으며, 또한 주사전자현미경(SEM)으로 절삭날 선단과 가공면 상태를 관찰하여 절삭특성을 비교하였다.

2. 초정밀 선삭 가공 시스템의 구성

초정밀 가공을 실현하기 위한 가공 시스템은 일반 공작기계에 비하여 외력에 충분히 견딜 수 있는 높은 강성과 외부로부터 들어오는 진동 또는 공작기계 자체에서 발생되는 진동을 신속히 흡수 소멸시킬 수 있는 우수한 감쇠 성능, 정밀한 위치 결정 기구등을 갖추고 있어야 하고, 가공에 직접적인 영향을 미치는 스핀들은 높은 회전 정밀도를 가져야 한다. 특히, 공작기계 스핀들의 경우 회전정도가 가공물의 표면거칠기에 많은 영향을 미치게 된다.

따라서, 본 초정밀 선삭 가공 시스템에서는 볼베어링을 사용하는 기존의 스핀들에서 발생하는 진동과 마찰열 문제를 해결하기 위하여, 공기압에 의하여 축이 부상하는 방식으로 회전 정밀도가 우수한 공기 베어링 스핀들을 설계 제작하여 사용하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 알루미늄 합금의 미소절삭 실험을 실시하기 위하여 구성한 초정밀 가공 시스템을 나타내고 있다. 이 시스템의 주요 구성은 공기 베어링 스핀들 시스템, 화강암 베드, 정밀 직선 운동 안내와 위치 결정 기구, 공기 방진 장치, 공기 공급 시스템, 전원부 등으로 이루어져 있으며, Table 1은 절삭실험을 수행하는데 사용된 초정밀 선삭용 공작 기계 시스템의 주요 구성 목록이다.

3. 초정밀 가공 실험 조건 및 방법

절삭실험에 사용된 시편의 재료는 Al7075를 사용하였으며, 시편의 직경은 Ø 60mm 이다. 실험에 사용된 공구는 PCD 공구와 MCD 공구를 사용하였다.

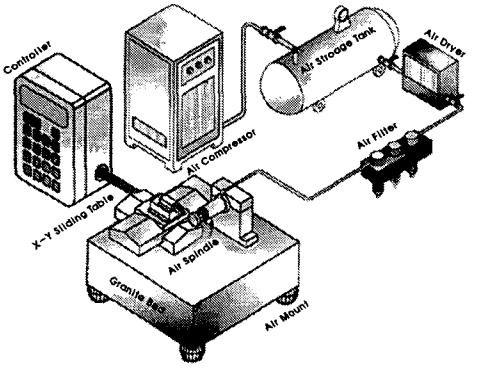


Fig. 1 The prototype ultra-precision lathe

Table 1 Specification of the experimental equipment

Name	Specification
Air spindle	0.4kw / 20,000rpm
Frequency converter	CIRM-22P3G3
Oilless scroll air compressor	AL-L5PAI
Linear motion guide	HSR15A
Position controller	Type PS-101A

PCD 공구는 선단 반경이 0.8㎜인 (주)대한중석의 CNMA120408를 사용하였고, MCD 공구는 국내 다이아몬드 공구 제작회사에 PCD 공구의 기하학적 형상과 동일하도록 주문 제작하여 사용하였다.

Table 2는 본 실험에서 선정된 절삭조건들을 나타낸 것이다. 먼저, PCD 공구의 절삭날 모서리 반경을 고려하여 이송률 2㎛/rev, 절삭깊이 3㎛로 일정하게 하고, 절삭속도를 100～2000m/min(약 530～10610rpm) 범위에서 단계적으로 변화시키어 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 확인하여 가공 한계 절삭속도 범위를 구하였다. 이후 한계절삭속도 범위 내에서 일정한 절삭속도를 일정하게 고정하고, 이송률은 1～5㎛/rev 범위에서 1㎛/rev 씩 5단계로 증가시키었고, 절삭깊이는 2～10㎛ 범위까지 2㎛ 씩 단계적으로 변화시키어 실험하였다. 절삭속도의 변화는 스핀들의 회전수를 주파수 변환기로 조절하였으며, 이송률 변화는 직선 이송 안내장치의 1축 위치 결정 제어기에 의해 제어하였다. 그리고 절삭깊이는 최소 측정 단위 1㎛의 다이얼게이지를 공구대에 부착하여 설정하였다.

Table 2 Cutting conditions

Items	Conditions
Cutting speed(m/min)	100, 300, 500, 700, 900 1200, 1500, 2000
Feed rate(㎛/rev)	1, 2, 3, 4, 5
Depth of cut(㎛)	2 ~ 10
Cutting environment	Dry

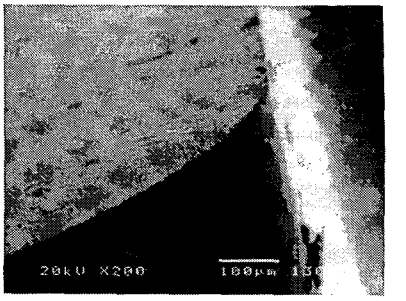
절삭실험은 시편을 콜릿 척으로 고정하였을 때 발생되는 편심을 제거하고, 시편의 표면에 대한 가공 초기상태를 동일하게 하기 위하여 매 시편마다 절삭속도 900m/min, 이송률 5㎛/rev의 조건으로 전가공(pre-cutting)을 하였으며, 절삭유를 사용하지 않은 건식절삭을 실시하였다.

가공면의 표면거칠기는 분해능 0.5nm의 촉침식 표면거칠기 측정기를 이용하여 기준길이 0.25mm, 컷-오프(cut-off) 0.8mm의 조건에서 시편의 중앙부의 이송방향에 대한 최대 표면거칠기(Rmax)와 중심선 평균 거칠기(Ra)를 측정하였으며, 측정장소를 달리하면서 10번의 측정 후 최대 값과 최소 값을 제외한 나머지 표면거칠기 값의 평균치를 취하였다. 그리고 공구인선과 가공면 상태는 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

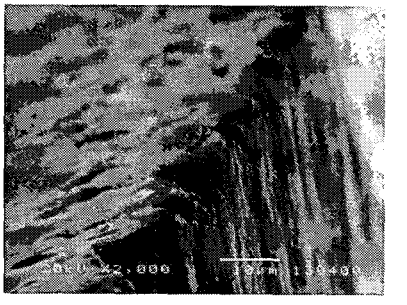
4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭 공구의 인선 상태

절삭에서의 기본현상은 전단영역에서의 전단, 경사면에서의 마찰, 절삭날 선단에서의 분리 작용으로 나눌 수 있다. 일반 절삭과 달리, 미크론 단위의 절삭깊이를 갖는 미소절삭에 있어서 가공면 형성에 큰 영향을 주는 분리 작용은 절삭날 선단의 형상이 중요한 인자로 작용하게 된다. 즉, 절삭깊이가 인선 반경보다 같거나 작을 경우, 절삭날은 국부적으로 선단에서 음의 경사각으로 절삭되며, 공작물의 일부가 공구의 여유면 쪽으로 밀려들어가 버니싱 작용과 같은 소성변형이 절삭작용보다 우세하게 된다. 이러한 절삭 공구의 인선 상태와 미소절삭조건과의 상관관계를 알아보기 위해서 Jeol 사의 JSM 5410 SEM을 이용하여 절삭 인선 상태를 관찰하였다.



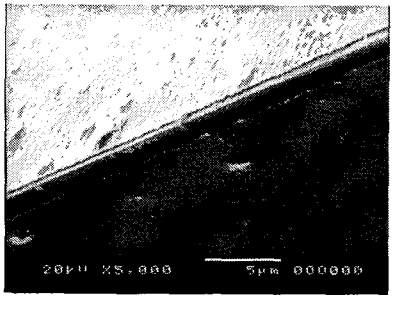
(a) × 200



(b) × 2000

Fig. 2 Photographs of the cutting edge of PCD tool

(a) × 35



(b) × 5000

Fig. 3 Photographs of the cutting edge of MCD tool

Fig. 2(a)와 (b)는 PCD 공구의 Fig. 3(a)과 (b)는 MCD 공구의 절삭날 부분과 인선부분의 확대사진이다. 실험에 사용된 두 종류의 공구에 대한 SEM 사진을 살펴보면, PCD 공구는 인조 다이아몬드 분말을 고온 고압 프레스로 성형하여 초경합금 인써트 등에 경납 땜 한 후 연삭하여 제작된다. 따라서 MCD 공구에 비하여 절삭날이 대단히 무디고 공구 연삭과정에서 많은 손상 층이 존재하고 있음을 알 수 있다. 그리고 공구 상면과 측면이 이루는 절삭인선 반경(cutting edge radius)을 정확히 측정하기가 불가능하나 육안으로 관찰하면 약 2~3㎛정도로 판단된다. 공작물이 절삭점에서 전단작용에 의해 분리되어 공구 경사면을 따라 칩으로 배출되기 위해서는 적어도 3㎛ 이상의 절삭깊이가 되도록 이송률과 절삭깊이를 선정하여야 한다.

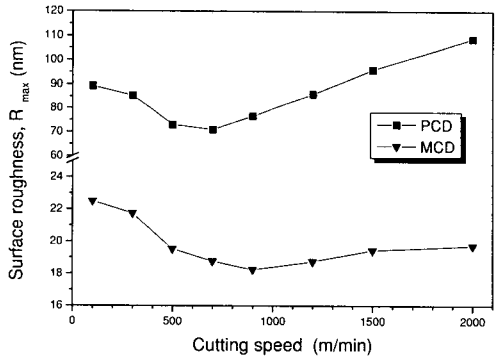
Fig. 3(b)의 MCD 공구 절삭 인선부분 확대사진의 경우, 투명한 MCD 공구가 SEM의 전극에서 방출된 전자를 반사시키지 못하는 특성 때문에 SEM에 의한 관찰에 어려움이 있어, 공구 상면과 측면 부분에 금으로 도금처리 하여 관찰한 것이다. 절삭날 모서리 반경은 육안으로 관찰할 수 없을 정도로 PCD 공구에 비하여 매우 예리한 상태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 절삭날 모서리 반경을 논한다면 약 0.5㎛ 이하라고 말할 수 있다. 이러한 절삭인선의 상태는 PCD 공구에 의한 가공시 절삭조건의 선정과는 달리 1㎛ 이하의 절삭깊이 조건에서도 버니싱 현상의 발생 없이 전단에 의한 절삭 상태를 나타낼 것으로 생각된다.

4.2 절삭속도 변화에 대한 표면거칠기 변화 특성

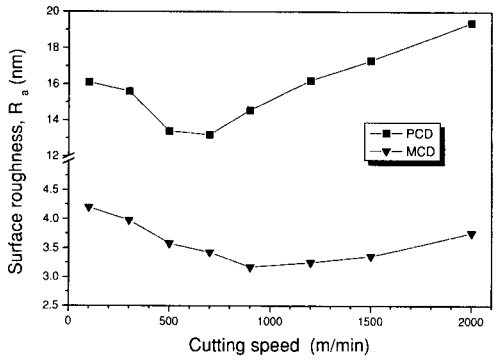
다이아몬드 공구에 의한 알루미늄 합금(Al7075)의 최적 절삭속도 범위와 실험에 이용된 초정밀 절삭가공 시스템의 가공성을 평가하기 위하여 일정한 이송률과 절삭깊이에서 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 조사하였다. Fig. 4는 이송률 2㎛/rev, 절삭깊이 3㎛ 일 때, 절삭속도 변화에 대한 표면거칠기를 나타낸 것이다.

MCD 공구에 의한 가공된 표면거칠기가 PCD 공구에 의한 가공에 비하여 약 1/4 수준의 표면거칠기를 나타내고 있으며, 또한 절삭속도의 증가에 따른 표면거칠기의 변화가 적게 나타나고 있다. 이러한 차이가 나타난 이유는 PCD 공구에 비하여 MCD 공구의 절삭 인선이 예리하며, 공구 경사면에 대한 형상 정밀도가 높고, 마찰계수가 작기 때문으로 판단된다. 따라서, MCD 공구가 PCD 공구에 비하여 고속 초정밀 절삭에 대하여 매우 안정된 가공상태를 나타내고 있다고 말할 수 있다.

그리고 절삭속도 변화와 표면거칠기의 관계를 살펴보면, 절삭속도 500m/min 까지는 절삭속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 감소하고 있으며, 특히 절삭속도가 낮은 영역에서 그 경향이 뚜렷하다. 이러한 이유는 알루미늄 합금과 같은 인성이 풍부한 재료가 저속가공에서 절삭날에 칩이 부착되는 빌트업 에지 현상의 발생과 절삭속도가 낮아질 수록 칩과 공구 경사면 사이의 접촉길이가 길어지고, 이에 따라 생성되는 칩의 두께도 두꺼워지면서 가공면의 표면거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다.



(a) maximum height roughness



(b) arithmetical average roughness

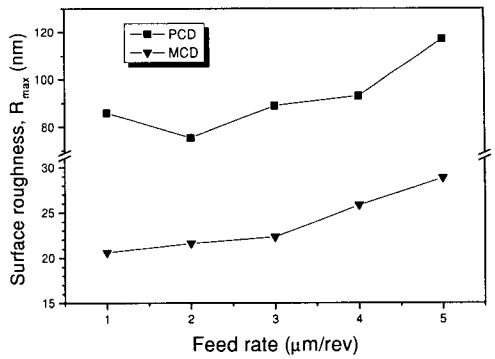
Fig. 4 The effect of cutting speed on the surface roughness(f=2㎛/rev, d=3㎛)

그러나, 정도의 차이는 있지만 MCD 공구와 PCD 공구에 의한 가공에 있어서 공통적으로 절삭속도가 900m/min 이상의 영역에서 절삭속도가 증가할 수록 표면거칠기의 증가가 발생하고 있다. 이것은 스핀들의 고속 회전에 의한 시스템 및 공구계의 진동의 영향으로 인한 가공 불안정 영역으로 생각된다. 표면거칠기는 MCD 공구에 의한 가공의 경우, 절삭속도 900m/min에서 약 18.2nm Rmax, 3.2nm Ra 수준이었으며, PCD 공구에 의한 가공의 경우, 절삭속도 700m/min에서 약 71.2nm Rmax, 13.2nm Ra 수준이었다. 따라서 본 연구에서 구축한 초정밀 선삭가공 시스템을 이용하여, MCD와 PCD 공구로 알루미늄 합금(Al7075)를 가공할 경우, 절삭현상과 시스템의 안정성을 고려한 최적의 절삭속도는 약 700~900m/min 범위였다.

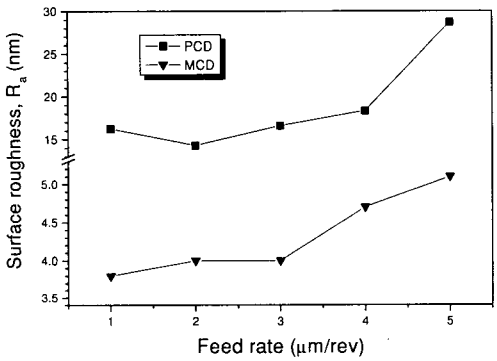
4.3 이송률 변화에 따른 표면거칠기 변화 특성

이송률의 변화가 표면거칠기에 미치는 영향을 조사하고자 절삭속도와 절삭깊이를 각각 900m/min, 3㎛로 일정하게 하고 이송률을 1~5㎛/rev 범위에서 1㎛씩 증가시키면서 절삭실험을 하였다. Fig. 5는 이송률 변화에 따른 표면거칠기를 나타낸 것이다. 표면거칠기는 이송률의 증가에 따라 커지는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 선삭가공에서 공구의 선단반경과 공작물의 1회전 당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면거칠기($Rmax=f^2/8R$)에 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 PCD 공구의 경우, 이송률이 작은 영역인 1 ㎛/rev에서 2㎛/rev으로 증가할 때 반대로 감소하다가 이송률 증가에 따라 다시 증가하고 있다. 이와 같은 현상을 보이는 이유는 공구인선의 기하학적 형상 즉, 절삭 인선 반경과 밀접한 관련이 있는 것으로 이송률의 감소에 따라 이송률에 의하여 결정되는 축 방향 절삭깊이가 작기 때문에 공구의 측면 인선으로 재료를 전단변형에 의해 제거시키기보다는 가공면에 버니싱(burnishing) 효과를 발생시키기 때문으로 생각된다. 이것은 미소 절삭조건의 선정에 있어서, 절삭 공구의 인선 상태와 절삭깊이 뿐만 아니라 이송률의 감소에 의한 축 방향 절삭깊이의 감소도 고려해야 한다.

이러한 현상은 표면거칠기 프로파일을 통하여 확인 할 수 있다. Fig. 6(a)와 (b)는 PCD 공구를 사용하



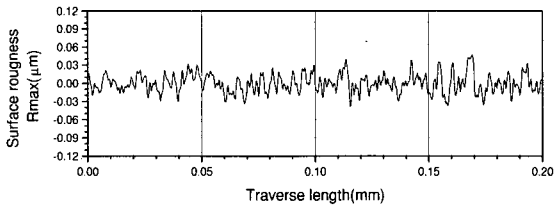
(a) maximum height roughness



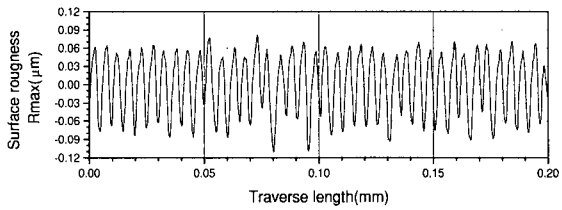
(b) arithmetical average roughness

Fig. 5 The effect of feed rate on the surface roughness(v=900m/min, d=3㎛)

여 절삭조건을 절삭속도 900m/min, 절삭깊이 3㎛로 일정하고 이송률만 각각 2㎛/rev과 5㎛/rev의 조건으로 가공된 가공면의 표면거칠기 곡선을 나타낸 것이다. 이송률 5㎛/rev인 (b)의 경우, 가공 표면의 형상은 2차원적으로 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송률만큼의 간격을 두고 규칙적이고, 반복적으로 전사되어 나타나고 있으므로 정상절삭 상태라고 생각할 수 있다. 그러나 이송률 2㎛/rev인 (a)의 경우, 수십 nm로 보고되는 절인 반경보다 작은 이송률 때문에 칩이 공구의 경사면을 따라 배출되지 못하고, 절삭날의 여유면 쪽으로 밀려들어가는 버니싱 효과가 절삭상태에 혼재하기 때문에 표면거칠기 곡선이 불규칙적으로 나타나고 있다.



(a) f = 2㎛/rev



(b) f = 5㎛/rev

Fig. 6 Surface roughness profiles (v=900m/min, d=3㎛, used PCD tool)

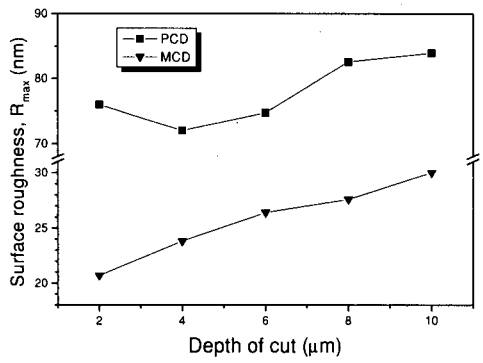
4.4 절삭깊이 변화에 따른 표면거칠기 변화 특성

절삭깊이의 변화가 표면거칠기에 미치는 영향을 조사하고자 절삭속도와 이송률을 각각 900m/min, 3 ㎛/rev의 조건으로 일정하게 하고 절삭깊이를 2~10㎛ 범위로 증가시키면서 절삭실험을 하였다. Fig. 7은 절삭깊이 변화에 따른 표면거칠기를 나타낸 것이다. 대체적으로 표면거칠기는 절삭깊이의 증가에 따라 증가하고 있다. 그러나 PCD 공구에 의한 가공의 경우, MCD 공구에 의한 가공 결과와는 달리 절삭깊이 2㎛ 조건이 오히려 4㎛ 조건에 비하여 표면거칠기가 약간 증가하고 있다. 이러한 결과를 보이는 이유는 앞에서도 설명하였던 절인 반경과 절삭메카니즘의 관계에 의한 것으로 절삭깊이가 작아지게 되면 가공면에 버니싱 현상이 나타나게 되어 일정구간 까지는 표면거칠기가 작아지다가 다시 증가하는 것으로 판단된다.

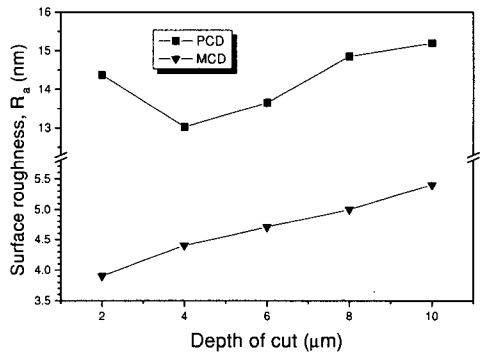
4.5 가공면 특성

Fig. 8(a)와 (b)는 PCD와 MCD 공구를 이용하여 절삭깊이 3㎛, 이송률 5㎛/rev, 절삭속도 900m/min의 조건으로 가공한 가공면을 Jeol 사의 JSM 5410을 이용하여 SEM 촬영 한 사진이다.

PCD 공구에 의한 가공면인 Fig. 8(a)에서는 공구 이송에 의한 피드 마크(feed mark)가 규칙적이고



(a) maximum height roughness

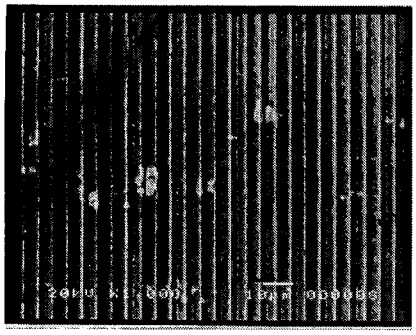


(b) arithmetical average roughness

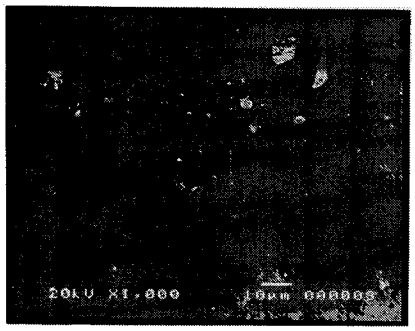
Fig. 7 The effect of depth of cut on the surface roughness(v=900m/min, f=3㎛/rev)

선명하게 나타나고 있다. 이것은 PCD 공구의 인선이 예리하지 못하여 절삭점에서 국부적인 소성변형을 발생시켜 커습(cusp)이 증대되기 때문이다. 그러나, MCD 공구에 의한 가공면인 Fig. 8(b)에서는 (a)와 같은 선명한 피드 마크가 나타나지 않고 있으나 재료적 결함이라고 판단되는 흰 반점과 검은 색의 기공들이 관찰되었다. 또한, 흰 반점에서 연결되어 생성된 스크레치들이 관찰되었다. 이러한 MCD 공구에 의한 가공면 결함 현상이 나타난 근본적인 원인을 파악하고자 SEM에 부착된 EDS(ISIS 300, oxford사)를 이용하여, 흰 반점 부분에 line scanning 방법에 의한 성분 분석을 하였다.

Fig. 9는 Fig. 8(b)의 우측 상부에 존재하고 있는 흰 반점 부분에 대한 성분 분석 결과를 나타낸 것이다. 주성분 Al-Mg-Zn으로 구성된 Al7075 합금 기



(a) used PCD



(b) used MCD

Fig. 8 SEM photographs of the machined surfaces of aluminum alloy(cutting speed:900m/min, feed rate:5㎛/rev)

지 성분 분포에 비하여 상대적으로 흰 반점 부분에서 Al과 Mg 성분이 감소하는 대신에 O와 Cu의 피크가 증가하고 있으며 Zn은 거의 변화가 없다. 이것은 Al7075 합금의 기지 보다 흰 반점 부분에서 성분 O와 Cu를 포함하는 합금 원소가 많아짐을 의미한다. 따라서, 가공면에 생긴 흰 반점들은 산소 원소를 포함하는 Al_2O_3 또는 CuO 등으로 추정되는 산화물로 생각된다.

이상의 가공면에 대한 SEM 관찰로부터 MCD 공구가 PCD 공구에 비하여 절삭점에서 국부적인 소성변형을 발생시켜 커습이 증대시키는 현상을 줄일 수 있으며, 결함의 성분 분석으로부터 초정밀 가공을 실현하기 위해서는 공작기계, 공구상태, 적절한 가공조건의 선정 못지 않게 재료적 결함을 줄일 수 있는 열처리 작업과 같은 전처리 과정이 중요하다고 생각된다.

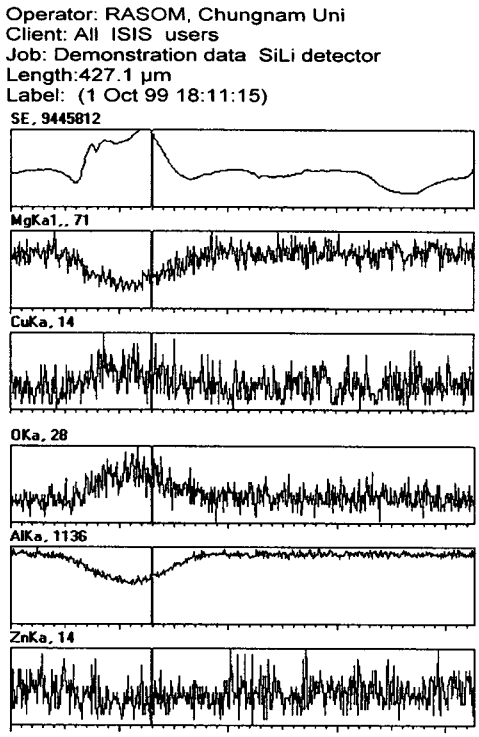


Fig. 9 Components analysis of particle on machined surface of aluminum alloy

5. 결 론

본 연구에서는 경량화 재료로 널리 이용되고 있는 알루미늄 합금(Al7075)에 대하여 MCD 공구와 PCD 공구에 의한 절삭실험을 수행하여 고속 초정밀 가공기의 한계 절삭속도, 이송률, 절삭깊이 등의 절삭조건과 공구재질이 표면거칠기에 미치는 영향을 조사하였으며, 또한 주사전자현미경(SEM)으로 절삭날 선단과 가공면 상태를 관찰하여 절삭특성을 비교하였다.

절삭실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 구성된 간이형 초정밀 선삭 가공시스템을 이용하여 MCD 공구에 의한 가공의 경우, 절삭속도 900m/min에서 약 18.2nm Rmax, 3.2nm Ra 수준을, PCD 공구에 의한 가공의 경우, 절삭속도 700m/min에서 약 71.2nm Rmax, 13.2nm Ra 수준의 표면거칠기 값을 얻을 수 있었다.

2) 표면거칠기는 이송률과 절삭깊이가 감소함

에 따라 작아지는 경향을 나타내지만 PCD 공구의 경우, 이송률 2㎛/rev, 절삭깊이 4㎛ 이하의 조건에서는 절삭날 선단의 버니싱 현상에 의하여 오히려 크게 된다.

3) 미소절삭을 위한 이송률과 절삭깊이의 선정은 절삭 인선 반경을 고려하여야 하며, PCD 공구에 의한 가공의 경우 이송률 2㎛/rev, 절삭깊이 4㎛ 정도에서 MCD 공구의 경우, 이송률 1㎛/rev, 절삭깊이 2㎛ 이하의 영역의 조건으로 가공하는 것이 유리하다.

4) 가공면의 SEM 관찰 결과, PCD 공구에 의한 가공면에서는 공구 이송에 의한 피드 마크(feed mark)가 규칙적이고 선명하게 나타나며, MCD 공구에 의한 가공면에서는 Al_2O_3 또는 CuO 등으로 추정되는 산화물에 의한 흰 반점 및 스크레치들이 관찰되었다.

참고문헌

1. L. G. Whitten, T. G. Lewis, "Machining and Measurement to Submicron Tolerances," Proc. M.T.D.R. Pergamon Press. p. 491, 1966.
2. N. Ikawa, R. R. Donaldson, etc., "Ultraprecision Metal cutting - The Past, the Present and the Future," Annals of the CIRP, Vol. 40. No. 2, pp. 587-594, 1991.
3. M. Weck, R. Hartel, K. Modemanm, "Performance Assessment in Ultra precision Micro machining," Annals of CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 499-502, 1988.
4. S. Nakamura, "High-speed Spindles for Machine Tools," Int. J. Japan Society Precision Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 291-294, 1996
5. T. Sugano, Y. Ihara, Y. Nakatsu, A. Shinohara, "Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror," Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 17-20, 1987.
6. T. Nishiguchi, Y. Maeda, M. Masuda, M. Sawa, "Mechanism of Micro Chip Formation in Diamond Turning of Al-Mg Alloy," Annals of the CIRP, Vol. 37. No. 1, pp. 117-120, 1988.