한국정밀공학회지 제 22 권 제 9 호 (2005 년 9 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 22, No. 9, September 2005

마이크로 V홈 연삭가공을 위한 다이아몬드숫돌의 V형상 트루잉에 관한 연구

이주상#

A Study on the Truing of Diamond Wheel for Micro V-shaped Groove Grinding

Joo Sang Lee#

ABSTRACT

This study deals with the truing of diamond wheel for the manufacture of micro v-shaped grooves with fine sharp edges in the grinding. Fine micro v-shaped grooves are key components to fabricate LGP(light guide plate), optical fiber connector and so on. Conventional v-shaped groove methods such as etching and lithography are difficult to make grooves with accuracy and cutting by lathe is difficult to select target materials. Therefore, as a preliminary stage to developing the grinding technology that will be expected fabrications for micro 3-dimensional structure of high effectivity and accuracy and freed up the restrictions of machinability to the materials for micro v-shaped grooves, truing is carried out with resin bond diamond wheel and electroforming diamond wheel using a cup-type truer. From the experimental results, it is found that the effects according to working direction of the cup-type truer and the restrainable methods of plastic deformation that is generated at wheel edge are examined. As a result, fine micro v-shaped diamond wheel was obtained, which are applicable to micro grinding for optical devices.

Key Words : Truing (트루잉), V-shaped groove (v형상 홈), LGP (도광판), Electroforming wheel (전주 숫돌), Cup-type truer (컵형 트루어), Working direction (작용 방향)

1. 서론

최근, 전자기기분야와 의료기기분야를 시작으로 실생활에 광학부품을 필요로 하는 제품들의 사용이 증가하면서 디지털 비디오 및 카메라 등 광학제품의 수요가 증가하고 있다. 또한 광응용 기술의 급속한 발전에 따라 이제까지 사용범위가 특정 분야에 한정되어 왔던 광학부품의 소형화, 고정밀도화에 대한 요구가 더욱 높아짐에 따라 광산업이 주목을 받고 있다. 특히, 마이크로 광학소자에 이용되는 3차원 형상 중에서도 마이크로 V홈, 도광판, 광섬유 컨넥터, 마이크로 프라렐렌즈 그리고 마이크

접수일: 2005년 2월 24일; 게재승인일: 2005년 6월 29일
교신저자: 남부대학교 자동차기계공학부
E-mail ljsang@nambu.ac.kr Tel. (062) 970-0109

로 비구면렌즈 등은 그 응용범위가 매우 넓다.

현재, 초정밀 영역의 형상정밀도와 표면거칠기가 요구되는 마이크로 광학소자와 마이크로 머신에 이용되는 마이크로 부품은 가공품의 형상과 재질에 따라 여러 가지 방법들이 제시되고 있으나 크게 2가지 방법에 의하여 제작되고 있다.[1-3] 첫번째는 리소그래피 등의 반도체 제조기술을 이용한 실리콘 프로세스이고 두 번째는 절삭가공, 연삭가공, 방전가공 그리고 전해가공 등에 의한 초정밀 마이크로 기계가공이다.[4,5] 먼저, 실리콘 프로세스는 미세 가공성이 좋고 전사 가공에 의한 대량 생산이 가능하며 가공변질층이 발생하지 않는 등의 장점이 있어 마스크 패턴 제작 등에 널리 사용되고 있으나 가공재질의 선택에 제한이 있고 3차원 구조물 제작에 어려움이 있다.[5] 두번째로 초정밀 마이크로 기계가공은 가공재질의 선택의 폭이 넓고 밀리미터 오더(mm-order) 크기의 가공이 가능하며 가공능률이 좋고 3차원 형상의 가공이 용이하다. 그러나 가공정밀도와 가공면의 품위가 우수한 장점이 있지만 모성원리에 의한 공구전사 의존도가 높기 때문에 고정밀도를 갖는 공구를 필요로 하며 그 제작이 어려운 단점이 있다. 미세가공법을 가공치수의 관점에서 구별하면 Fig. 1과 같다. 기계가공의 관점에서 미세가공 영역은 기존의 범용 가공기술과 실리콘 프로세스기술의 중간단계로써 통칭 메소(Meso)라고 부르는 밀리미터 오더(mm-order)에서 서브 밀리미터 오더(sub mm-order)의 치수영역이며 이와 같은 메소(Meso)영역에서의 기계적 미세가공기술의 확립이 중요하다.[6]

마이크로 V홈이 도광판, 광섬유접속용 콘넥터 및 마이크로 회절격자 등 마이크로 광학소자에 필수적인 요소로서 산업적으로 매우 큰 의미가 있음에 주목하였다.[7] 현재, 액정 디스플레이에 사용되는 도광판의 제작에는 마이크로 V홈 가공된 금형을 이용한 플라스틱 사출성형에 중점을 두고 있고 연질재료에 대한 절삭가공이 주류를 이루고 있으나, 재료선택의 한계와 낮은 가공정밀도를 극복하고자 하는 노력이 요구되고 있다.[8-10] 따라서, 내환경성이 우수한 광학유리 및 금형용 초경합금 등 경질재질에 대하여 가공성의 제약이 적고 고정밀도 및 고능률의 마이크로 3차원 가공이 기대되는 연삭가공에 의한 마이크로 V홈 가공은 매우 중요하다. 본 연구는 이제까지 마이크로 V홈 연삭에 중요한 변수로 작용하는 숫돌의 V형상 트루잉에 대한 연구보고가

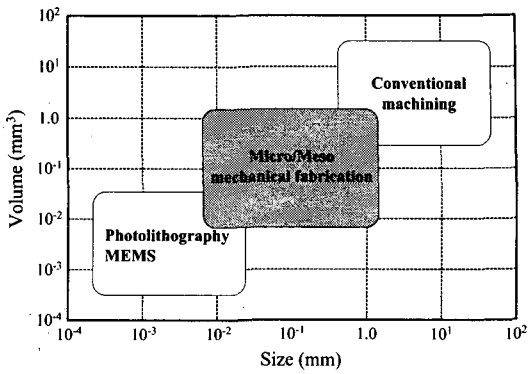
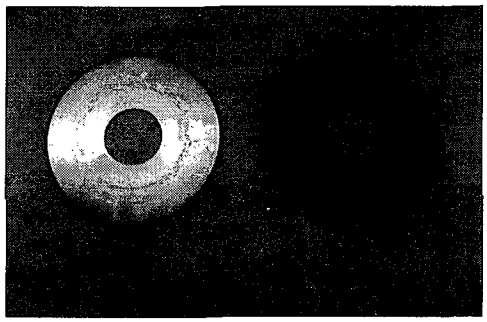


Fig. 1 Applied range of different manufacturing processes



(a) Resin diamond wheel (b) Electroforming wheel

Fig. 2 Two types of the wheels

없다는 점에 착안하였다. 장치가 비교적 간단하고 높은 가공정밀도가 얻어지는 컵트루어를 이용한 마이크로 V홈 가공용 숫돌의 V형상 트루잉을 실시하고 선단부의 소성변형, 누적절삭깊이량의 영향 등을 고려한 최적조건을 제시하였다.

2. 숫돌제작 및 실험장치

초정밀 연삭가공에서 사용되는 숫돌은 높은 형상정밀도과 우수한 가공면 거칠기를 얻기 위하여 높은 강성과 탄성이 동시에 요구된다. 특히 마이크로 연삭가공의 경우에는 트루잉에 의해 창성되는 숫돌의 형상이 작고, 가공에 직접적으로 관여하는 숫돌입자의 유효절삭날 수가 적기 때문에 숫돌의 형상유지와 더불어 많은 유효절삭날 수의 확보가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 마이크로 V홈의 연삭가공에 적합한 숫돌을 선정하기 위하여 Fig. 2

와 같이 2가지 종류의 숫돌을 제작하였다.

현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 레진본드 다이아몬드숫돌은 탄성이 풍부하기 때문에 양호한 가공면의 표면거칠기가 얻어지는 반면 숫돌입자의 지지력이 약하여 가공 중에 입자의 탈락이 발생하는 등 유효절삭날의 감소와 함께 숫돌 형상의 유지에 어려움이 있다. 따라서 높은 형상정밀도가 요구되는 마이크로 V홈 가공에 사용하기 위하여 첨가제(filler)로써 GC#2000와 GC#6000의 입자를 혼합시켜 숫돌강성 즉, 숫돌의 형상 유지능력을 높인 레진본드 다이아몬드숫돌 SD4000R200LB를 제작하였다.(Fig. 2(a))

다음으로는 내마모성이 우수하고 숫돌 형상을 장시간 유지할 수 있는 메탈본드를 사용하여 전주(electroforming) 다이아몬드숫돌을 제작하였다. 기존의 일반 메탈본드 다이아몬드숫돌은 고경도이며 숫돌입자 지지력이 우수하기 때문에 숫돌반경방향의 마모량이 적고 숫돌입자의 탈락이 억제되나, 가공 후 표면거칠기를 증가시켜 가공면의 품위를 저하시키는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하고 표면거칠기를 향상시키기 위하여 숫돌의 입자를 작게 하고 집중도를 높인 전주 다이아몬드숫돌 SD4000R5PW를 제작하였다.(Fig. 2(b))

Fig. 3에 본 실험에 사용한 초정밀 슬라이서(USM-10A, Toshiba Machine Co., Ltd)를 나타내었다. Fig. 3(a)는 초정밀 슬리이서의 원통형 공기정압 스핀들에 숫돌을 장착하고 xy 이송테이블에 경사지게 설치한 컵트루어로 트루잉을 실시하는 모습을 나타낸 것이다.

3. V형상 트루잉

모성원리를 기초로 하는 기계가공에서는 목표로 하는 형상정밀도 이상으로 사용하는 공구를 정밀하게 제작하지 않으면 안된다. 연삭가공도 마찬가지로 요구되는 가공물의 형상이 미세하고 정밀할수록 사용하는 숫돌을 더욱 미세하고 정밀하게 창성시키지 않으면 안된다. 특히, 마이크로 V홈 가공에서는 높은 정밀도의 V홈 각도와 선단부의 곡률반경을 얻기 위해서 사용하는 숫돌의 트루잉이 매우 중요하다.

본 연구에서는 제작한 레진본드 다이아몬드숫돌과 전주 다이아몬드숫돌을 대상으로 입도 #600를 갖는 컵트루어 GC600을 사용하여 Fig. 4와 같은

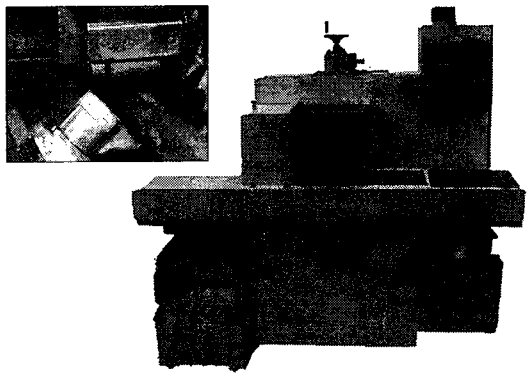


Fig. 3 A photograph of an experimental apparatus and view of truing in part (a) of the machine

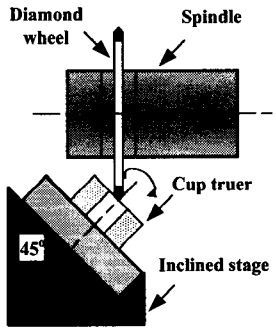


Fig. 4 Schematic of the truing method for a V-shaped diamond wheel by cup-truer

Table 1 Truing conditions

Wheel type	SD4000R200LB SD4000R5PW
Rotational speed of a wheel	1100 rpm
Truer (cup type)	GC600M7V GC1500M7V
Rotational speed of a truer	500 rpm
Feed rate	0.015 mm/min
Depth of cut	0.1, 0.25, 0.5 μ m
Total depth of cut	400 μ m

방법으로 트루잉 하였다. 숫돌의 V형상의 목표 각도를 90°로 하기 위하여 45°의 기울기를 갖는 경사대를 제작하고, 그 경사대 위에 트루어를 고정시켜

숫돌의 한쪽면씩을 45°로 성형하여 숫돌의 V형상의 선단각도를 90°로 트루잉 하였다. Table 1에 실험조건을 나타내었다. 트루잉 후의 숫돌형상의 측정은 Fig. 5와 같이 트루잉된 숫돌형상을 카본시편에 전사시키고 비접촉 3차원측정기(NH-3T, Mitaka Co., Ltd.)를 이용하여 카본 시편에 전사된 숫돌형상을 측정하고 숫돌 선단의 각도 및 곡률반경을 구하였다. Fig. 6은 트루잉 후에 숫돌의 선단부 형상을 측정한 것으로 레진본드 다이아몬드숫돌의 V형상 각도는89.90°, 전주 다이아몬드숫돌의 V형상의 각도는 89.60°이었다. 그리고 레진본드 다이아몬드숫돌의 선단부 곡률반경은 6.62μ m였으나, 전주 다이아몬드숫돌에서는 선단부에 소성변형이 발생하였다. 이러한 원인으로는 레진본드 다이아몬드숫돌은 수지계의 레진을 결합제로 사용한 숫돌로서 소성변형이 발생하기 어렵지만, 전주 다이아몬드숫돌은 다이어몬드입자를 전착한 후 니켈코팅한 금속계의 숫돌로써 소성변형이 발생하기 쉽기 때문이라고 생각되며 숫돌선단부에 발생하는 소성변형은 대단히 큰 문제로서 완전하게 억제하기 위한 대책이 필요하다.

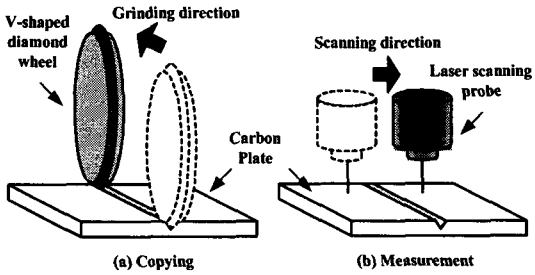


Fig. 5 Schematic of copying and measurement method of V-shaped diamond wheel on carbon plate

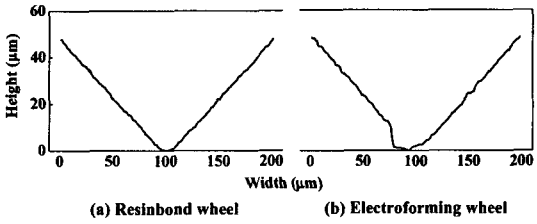


Fig. 6 Comparison of two type wheels after truing

3.1 전주 숫돌에서의 선단부 소성변형

전주 다이아몬드숫돌의 선단부를 V형상으로 트루잉 할 때 숫돌선단부에 미세한 소성변형이 발생하는 원인으로는 숫돌에 접촉하는 트루어의 작용방향과 숫돌에 가해지는 트루어의 작용힘이 너무 크기 때문이라고 생각된다.

트루잉시 숫돌에 작용하는 트루어의 작용방향의 영향에 대하여 실험하였다. 숫돌이 회전하고 있는 컵트루어를 통과하는 영역에 따라 숫돌에 가해지는 트루어의 작용방향은 달라지는데 Fig. 7(a)와 같이 숫돌이 컵트루어의 왼쪽부분을 통과할 때를 업커팅, 오른쪽부분을 통과할 때를 다운커팅이라고 정의한다. Fig. 7(b)와 같은 업커팅의 경우는 숫돌에 가해지는 힘이 45° 윗방향으로 발생하기 때문에 연삭력은 숫돌의 반경방향을 향하고 있으며 Fig. 7(c)는 다운커팅의 경우로써 숫돌에 가해지는 힘이 45° 아랫방향으로 발생하기 때문에 연삭력은 숫돌의 폭방향을 향하고 있다. 따라서 다운커팅은 숫돌의 폭방향에 연삭력이 가해지면서 숫돌선단부에 소성변형을 일으키기 쉽다. 본 실험을 통하여 컵트루어를 이용하여 숫돌 선단부를 V형상으로 트루잉할 때는 업커팅을 실시하여 트루잉시 발생하는 연삭력을 숫돌의 반경방향으로 작용하게 하는 것이 선단부의 소성변형을 억제하는 효과가 있는 것을 알 수 있었다.

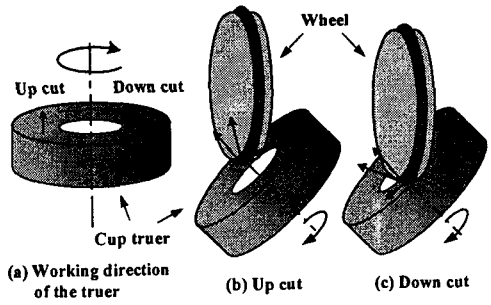
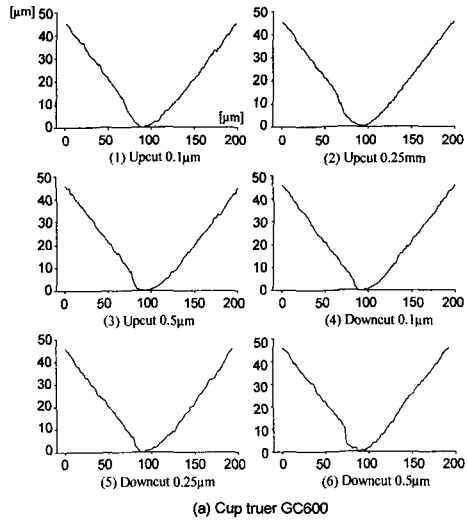


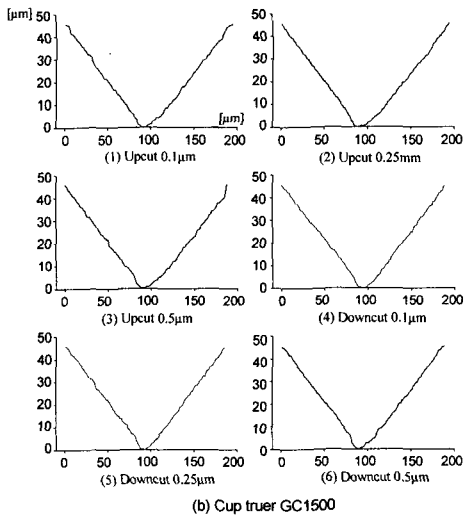
Fig. 7 A change of working direction of the truer

다음으로 트루잉시 숫돌의 선단부에 가해지는 힘을 작게 하여 소성변형을 억제시키는 방법을 제안한다. 트루잉 효율을 높이기 위해서 컵트루어의 입도와 1pass당 절삭깊이량을 크게하는 경우에는 숫돌의 제거량이 많아 성형성은 좋아지나 숫돌에 걸리는 힘이 커지게 된다. 따라서 컵트루어의 입자와 1pass당 절삭깊이량을 작게 하여 트루잉시 발생

하는 힘을 감소시킬 수 있다. 숫돌입자의 크기가 서로 다른 2개의 컵트루어를 사용하여 업커팅, 다운커팅에 대하여 각각 1pass당 절삭깊이를 변화시켜가면서 실험을 실시하였다. 숫돌선단부의 소성변형량의 측정은 Fig. 9 (a)와 같이 최대 소성변형부로부터 V형상의 직선부까지의 거리를 측정하여 선단부의 소성변형량으로 하였다.

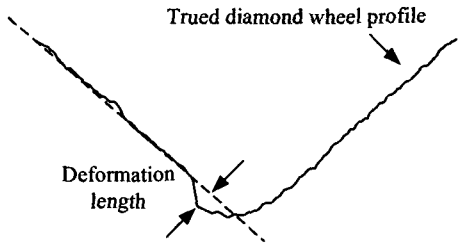


(a) Cup truer GC600

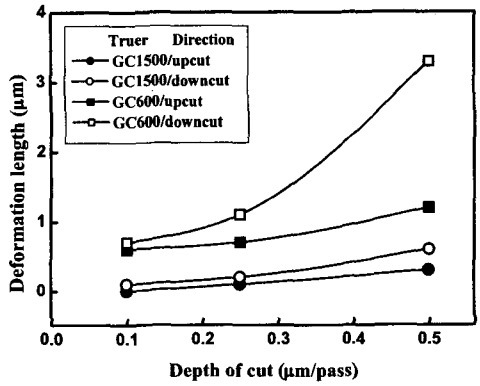


(b) Cup truer GC1500

Fig. 8 V-shaped grooves of the electroforming diamond wheel after truing



(a) Measurement method of plastic deformation



(b) Results of plastic deformation at edge

Fig. 9 Deformation of electroforming diamond wheel after truing

트루잉된 숫돌의 선단부 형상을 비접촉식 측정기로 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8 (a)는 컵트루어 GC600 사용하였고 Fig. 8 (b)는 GC1500을 사용하여 각각 트루잉 방향과 1pass당 절삭깊이를 변화시키면서 트루잉한 후의 숫돌선단부의 형상이다. 실험결과를 보면 트루잉 방향이 다운커팅 보다 업커팅인 경우가 선단부의 소성변형량이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 컵트루어 GC1500을 사용한 경우가 GC600에서 얻어진 숫돌단면형상과 비교하여 선단부가 예리하게 성형되고 소성변형도 감소된 것을 알 수 있고 1pass당 절삭깊이가 가장 작은 0.1 μ m/pass인 조건에서는 숫돌선단부의 소성변형이 거의 발생하지 않고 있음을 알 수 있다.

트루잉된 전주 다이아몬드숫돌 선단부의 소성변형량을 측정한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 전주 다이아몬드숫돌의 트루잉시 발생하는 선단부의 소성변형을 완전하게 억제하기 위해서는 업커팅방식

으로 컵트루어 GC1500을 사용하여 1pass당 절삭깊이를 0.1μ m/pass이하로 설정하는 것이 좋은 것을 알 수 있었다.

3.2 반경방향 누적 절삭깊이량의 영향

V형상으로 트루잉된 다이아몬드숫돌 선단부의 곡률반경을 보다 작게 하기 위하여 반경방향의 누적 절삭깊이량의 변화가 숫돌의 선단부에 미치는 영향에 대하여 실험하였다.

컵트루어를 사용한 트루잉은 숫돌의 반경방향에 절삭깊이를 주는 것에 의하여 숫돌과 컵트루어의 사이에 상호간섭이 발생한다. 이때 탈락한 입자가 연삭액과 혼합되어 슬러리가 되고, 그 슬러리에 의한 연마작용에 의하여 숫돌의 결합제가 제거되어 목적하는 V형상이 창성되고 또한 드레싱효과도 얻을 수 있다. 트루잉에 의해 숫돌의 결합제가 제거되어 입자의 지지력이 저하되면 또다시 숫돌입자가 탈락되어 새로운 슬러리를 생성하는 이러한 일련의 과정이 반복된다. 이와 같이 결합제의 제거와 숫돌입자의 탈락이 반복되면서 트루잉이 실시되기 때문에 트루잉의 진행에 따라 숫돌반경방향의 누적 절삭깊이량이 증가하고 숫돌의 선단부 형상은 서서히 미세화 되어간다. 따라서 숫돌선단부의 최소 곡률반경을 얻기 위하여 최적의 트루잉 조건을 선정하여야 한다.

먼저, 숫돌의 한쪽면을 45°로 트루잉한 후에 이것을 기준면으로 하고, 반대면에 트루어를 설치하여 트루어와 숫돌이 접촉하는 시점을 누적절삭량 0으로 설정하였다. 숫돌반경방향의 누적절삭량을 증가시키면서 트루잉을 실시한 후에 숫돌선단부의 곡률반경의 변화를 측정하였다. Fig. 10에 그 결과를 나타내었다. 트루잉을 개시하여 누적절삭깊이량이 50μ m에 이르는 영역에서 숫돌선단부에서의 곡률반경의 감소가 눈에 띄게 나타나고 있지만, 그 후에는 누적절삭깊이량이 증가하여도 숫돌선단부의 곡률반경은 변화하지 않는 것을 알 수 있었다. 이와 같이, 숫돌선단부의 곡률반경은 트루잉 초기에 최소치에 도달하게 되면 그 후에는 변화하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 숫돌선단부의 최소곡률반경을 얻기 위해서는 트루잉 초기의 숫돌의 진원도 조정을 고려하여도 누적절삭깊이량은 100 μ m를 넘지않게 설정하는 것이 최적조건임을 알 수 있었다.

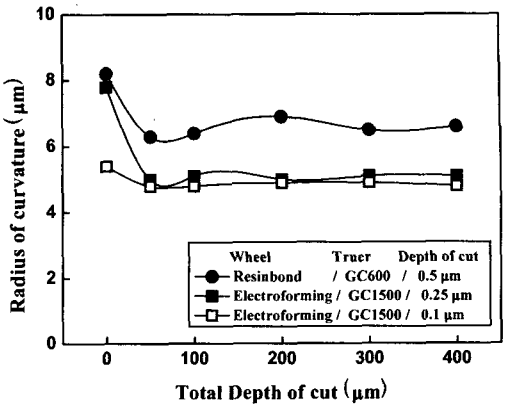


Fig. 10 Radius of curvature at wheel edge according to total depth of cut

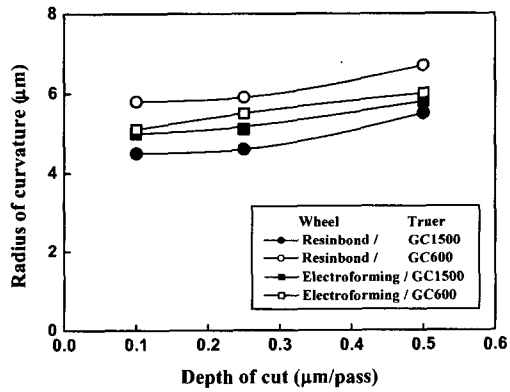


Fig. 11 Comparison of minimal radius of curvature according to depth of cut

3.3 숫돌선단부 곡률반경의 미소화

컵트루어를 사용하는 트루잉에서는 사용된 트루어의 입자크기, 반경방향 절삭깊이량 및 트루잉 방향에 의해 성형되는 숫돌선단부의 곡률반경은 달라지기 때문에 이러한 조건을 변화시키면서 변화되는 숫돌선단부의 곡률반경을 측정하였다. 곡률반경이 작은 것은 숫돌선단부가 예리하게 트루잉 되었다는 것을 의미한다. 따라서 작은 숫돌선단부의 곡률반경을 얻기 위한 최적의 트루잉 조건을 규명하고자 하였다. Fig. 11에 숫돌선단 반경의 측정결과를 나타내었다. 단, 전주 다이아몬드숫돌에서 소성변형이 일어나는 조건에 대해서는 소성변형을 포함한 선단부의 곡률반경을 측정하였다.

측정결과를 보면 레진본드 다이아몬드숫돌과 전주 다이아몬드숫돌의 양쪽 모두의 경우 컵트루어 GC600 보다 GC1500를 사용해서 실시한 트루잉 결과가 숫돌선단부의 곡률반경이 작은 것을 알 수 있다. 그리고 1pass당 절삭깊이량의 변화에 대한 실험결과에서도 절삭깊이량을 작게 하는 것이 v형상 숫돌선단부의 곡률반경을 작게 하는 것을 알 수 있었다. 그러나 절삭깊이량 0.25μ m와 0.1μ m의 경우에서는 변화가 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서 트루잉효율을 고려하면 1회 절삭깊이량은 0.25μ m가 적당하다고 생각된다. 또한 본 실험에 사용된 다이아몬드 숫돌입자의 평균크기는 3μ m정도로서 트루잉된 숫돌의 선단부 곡률반경을 숫돌의 입자크기보다 작게 하는 것은 가공에 사용되는 유효입자의 수를 감소시켜 가공성을 저하시키는 원인이 되기 때문에 숫돌선단부의 곡률반경이 4.5- 5μ m가 되도록 트루잉 하였다.

4. 결론

본 연구는 컵트루잉법을 이용하여 창성 가능한 v형상 다이아몬드숫돌의 선단부의 곡률반경과 각도에 대하여 검토하고 트루잉조건을 변화시켜 실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 트루잉 후 숫돌 선단부의 v형상 각도를 레진본드 다이아몬드숫돌에서 89.9°, 전주 다이아몬드숫돌에서 89.3°로 트루잉 하였다

2. 다이아몬드숫돌 입자의 크기를 고려하여 숫돌선단부의 최소곡률반경을 4.5- 5μ m로 트루잉 하였다.

3. GC1500의 컵트루어를 사용하여 업커팅 방향으로 절삭깊이량 0.25μ m의 조건에서 누적절삭깊이량 100μ m까지 트루잉하는 것이 최적의 조건임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Friedrich, C. R., Coane, P. J. and Vasile, M. J., "Micromilling development and applications for microfabrication," Microelectronic Engineering, Vol. 35, No.1-4, pp. 367-372, 1997.
2. Lee, D. G., Lee, H. G., Kim, P. J. and Bang, K. G., "Micro-drilling of alumina green bodies with diamond grit abrasive micro-drills," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 63, No. 6, pp. 551-558, 2003.
3. Chung, S. G., Park, S. J., Lee, I. H., Jeong, H. D. and Cho, D. W., "A Study on a Microreplication Process for Real 3D Structures Using a Soft Lithography," J. of KSPE, Vol. 21, No. 12, pp. 29-36, 2004.
4. Kim, Y. T., Park, S. J. and Lee, S. J., "Machining of Micro-scale Shapes using Micro-EDM Process," J. of KSPE, Vol. 20, No. 9, pp. 109-117, 2003.
5. Park, J. W., Ryu, S. H. and Chu, C. N., "Microfabrication by Localized Electrochemical Deposition Using Ultra Short Pulses," J. of KSPE, Vol. 21, No. 11, pp. 186-194, 2004.
6. Bae, Y. H., Kim, H. S. and Ko, T. J., "Micro Machine Tools and Micro Machining," J. of KSPE, Vol. 19, No. 10, pp 23-30, 2002.
7. Sawada, K., Kawai, T., Takeuchi, Y. and Sata, T., "Development of Ultraprecision Micro Grooving-Manufacture of V-Shaped Groove-," J. of JSME, Vol. 64, No. 627, C, pp. 332-338, 1998.
8. Sornsuwit, N., Takeuchi, Y., Sawada, K. and Sata, T., "Metal Mod Manufacturing of Fresnel Lens by Use of Micro Grooving Technology," J. of JSME, Vol. 64, No. 628, C, pp. 357-362, 1998.
9. Maeda, S., Takeuchi, Y., Sawada, K., Kawai, T. and Sata, T., "Creation of Ultraprecision Microgrooves Using Non-Rotational Cutting Tools," J. of JSPE, Vol. 66, No. 9, pp. 1456-1460, 2000.
10. Lee, J. H., Shin, D. S., Suh, J. and Kim, T. H., "Excimer Laser Ablation of Polymer for Electroformed Mold," J. of KSPE, Vol. 21, No. 12, pp. 13-20, 2004.