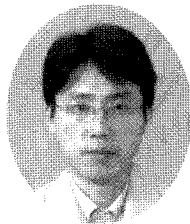


# 기계식 원진동발생기구를 이용한 타원진동절삭가공기의 개발



송영찬  
한국기계연구원,  
지능기계연구센터



박천홍  
한국기계연구원,  
지능기계연구센터

## 1. 서 론

최근, 공작기계, 공구 및 가공기술의 진보에 따라, 엔드 밀링에 의한 열처리강의 금형가공이 넓게 보급되어 있다. 이 가공법은 금형의 저가격화에 크게 공헌하고 있지만, 모든 금형제작에 완전히 적용되고 있지는 못하고, 고정도의 표면거칠기를 요구하는 경우에는 대부분 연삭가공에 의한 마무리가공을 행하고 있는 현실이다.

한편, 샤모토, 모리와키 등에 의해 공구에 타원진동궤적의 진동을 부과하여 가공을 행하는 타원진동절삭가공법이 제안되어, 이 가공법에 의해 절삭칩 두께, 절삭력, 절삭에너지 등이 보통의 절삭가공법에 비해 극단적으로 감소되는 것 등의 기본특성을 확인하였다. 또한, 약 20kHz의 초음파 타원진동공구를 개발하여, 보통의 절삭가공법으로는 심한 공구마모로 인하여 적용할 수 없었던 금형용 열처리강의 초정밀 다이아몬드절삭가공을 실현했다. 그러나, 이 연구로 개발한 초음파 타원진동절삭공구는 공진현상을 이용

하고 있기 때문에, 절삭부하가 매우 작은 초정밀절삭가공에 한정되어 적용되고 있다.

본 연구에서는, 이상과 같이 금형용 열처리강의 고정도 가공에 적합한 타원진동절삭가공법을 비교적 큰 절삭부하에도 견딜 수 있는 기계식 원진동장치를 새롭게 개발하였다. 그리고 이 장치를 이용하여 타원진동절삭가공기를 개발하고, 그 정도와 강성 등의 기본특성을 검토한 후에, 금형용 열처리강의 정밀절삭가공을 시도하였다.

## 2. 기계식 원진동발생기구와 가공방법

절삭부하가 비교적 큰 타원진동절삭가공을 실현하기 위하여 그림 1에 제시하는 기구에 의해 기계적으로 원진동을 발생시키는 방법을 제안한다. 이 진동기구는 그림에서 제시하고 있는 것처럼 2개의 동력원을 가지고 있고, 공구진동용 동력으로는 빌트인모터, 공구회전용 동력으로는 AC

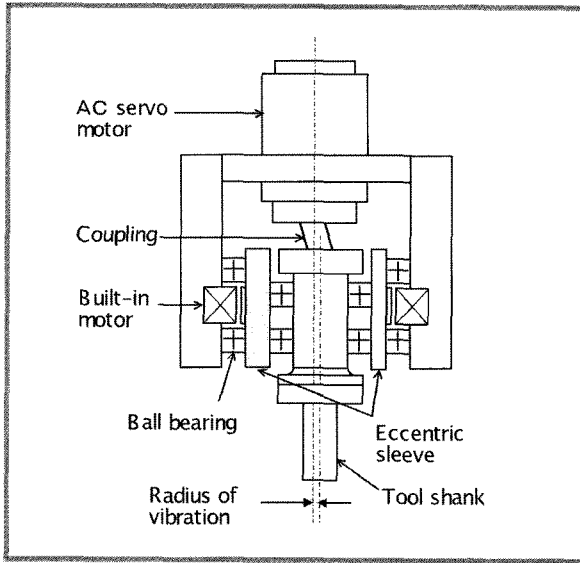
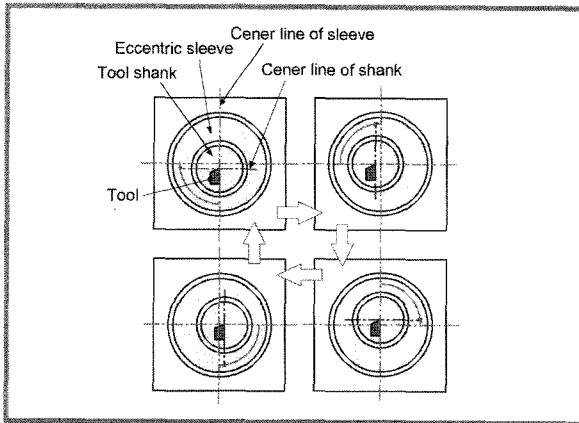


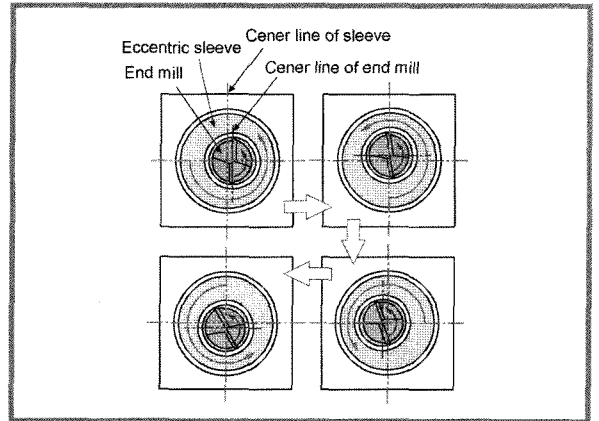
Fig. 1 Mechanism of mechanical vibration spindle

서보모터를 사용한다. 공구회전축은 편심슬리브의 내측을 통과하고, 그 편심량을 허용하는 탄성커플링을 사용하여 AC서보모터와 체결되어 있다. 빌트인모터에 의해 편심슬리브를 회전시키면, 내측의 공구회전축에 편심량을 진폭으로 하는 원진동을 발생시키게 된다. 이 원진동은 내측의 공구회전축이 회전하고 있는 상태에서도 부과할 수 있다. 또한, 2개의 구동축 각각에 클램프기구를 내장하고 있어, 이하에 설명하는 4가지의 가공법으로 가공을 수행할 수가 있다.

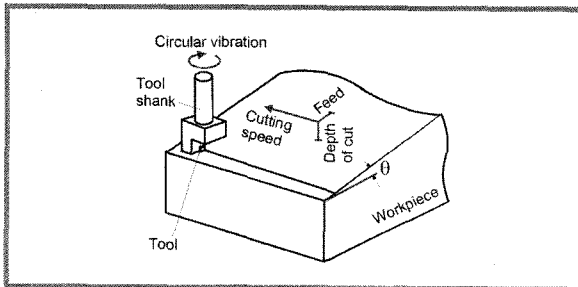
첫째로 그림 2에 제시하고 있는 것처럼 공구회전축은 고정시키고 공구진동축을 구동하여 편심슬리브를 회전시킨 상태에서, 공작물에 이송운동을 가함으로 타원진동 Planning을 행할 수 있다. 그림 2(a)는 그림 1에서 제시한 공구진동기구를 아래에서 본 그림으로 타원진동 Planning의 1주기를 설명하고 있다. 그림에서 설명하고 있는 것처럼 편심슬리브만 회전함으로 인해 공구회전축에 고정된 공구



(a) 1 cycle of tool vibration

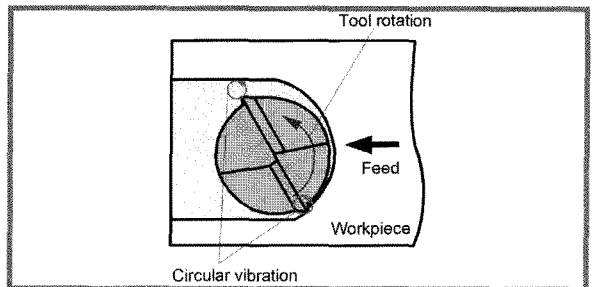


(a) 1 cycle of tool vibration



(b) Cutting process

Fig. 2 Elliptical vibration planing process



(b) Cutting process

Fig. 3 Elliptical vibration milling process

는 회전하지 않고 원진동만 발생하게 된다. 이러한 상태에서 그림 2(b)와 같이 공작물에 이송운동을 가함으로 타원진동Planning을 행하게 된다. 여기에서, 공구회전축과 공구진동축과의 편심량이 공구진동의 진폭이 되고, 편심슬리브의 회전수가 진동주파수가 된다. 이때, 단속적인 절삭가공이 될 수 있도록, 공구진동속도를 공작물의 이송속도에 비해 충분히 크게 설정해야 한다. 그리고 절삭저항에 의해 공구회전축이 받는 토크를 최소화시키기 위하여 공구인선을 회전축중심에 위치시키는 것도 중요하다.

다음으로 그림 3에 제시하고 있는 것과 같이 양축을 모두 회전시킴으로 타원진동밀링을 행할 수 있다. 이 경우도 공구에 원진동을 가하는 방법은 타원진동Planning의 경우와 동일하다. 단 이 경우는 공구회전축에 엔드밀을 고정시키고, 편심슬리브를 회전시켜 엔드밀에 원진동을 가함과 동시에 내측의 공구진동축을 회전시킨다. 그림 3(a)는 엔드밀 공구날의 진동1주기를 나타내고 있다. 이때 단속적인 절삭가공이 될 수 있도록 공구진동축의 회전수와 진동진폭이 공구회전축의 회전수와 공구경에 대하여 충분히 크도록 설정해야 한다. 그림 3(a)에서 엔드밀이 진동 1주기 동안 조금밖에 회전하지 않고 있는 것은 이 때문이다. 이처럼 양축을 회전시킨 상태에서 그림 3(b)와 같이 공작물에 이송운동을 가함으로, 각각의 엔드밀 날이 타원진동절삭을 행하게 된다.

그리고 양축 모두를 고정시키고 공작물만을 이송시킴으로

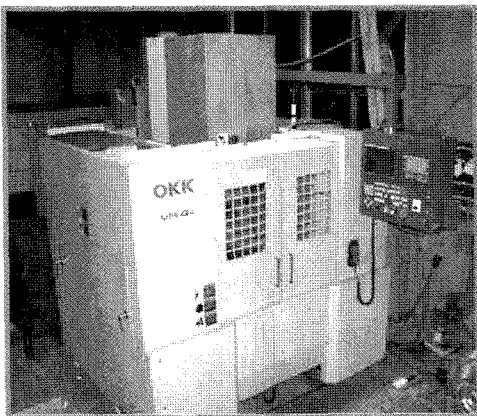
로 보통의 Planning을 행할 수도 있으며, 공구진동축을 고정시키고 공구회전축만을 구동시킨 상태에서 공작물에 이송운동을 가함으로 보통의 엔드밀링도 행할 수 있다.

### 3. 타원진동절삭가공기의 개발

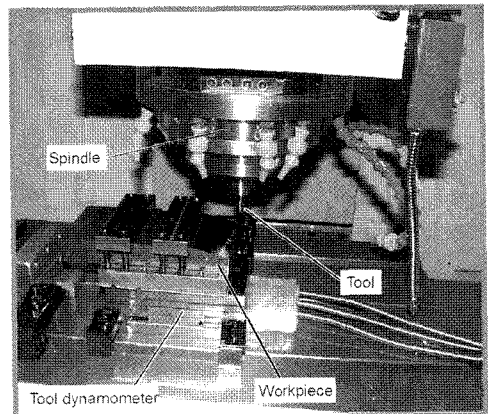
제2장에서 제안한 기계식 원진동발생기구를 이용하여, 그림 4에 제시하고 있는 타원진동절삭가공기를 개발하였다. 이 가공기는 소형 머시닝센터(오사카기공(주)제품 VM4II)의 주축부분을 개조하였다. 공구진동축과 회전축에는 각각의 클램핑기능과 양축의 회전수를 동기시키는 기능을 구비하고 있다. 한편, 제4장의 가공실험에서는 그림 4(b)와 같이 설치된 공구동력계를 사용하여 절삭력을 측정하였다.

Table 1. Specifications of developed elliptical vibration cutting machine

Rotational speed of spindle ( $\text{min}^{-1}$ )	0 - 1500
Rotational speed of eccentric sleeve ( $\text{mm}^{-1}$ )	0 - 10,000
Frequency of circular vibration (Hz)	0 - 167
Radius of circular vibration (mm)	0.5
Feed speed of tables ( $\text{mm}/\text{min}^{-1}$ )	0 - 5000
Feeding resolution (mm)	0.001
Full stroke of tables (mm)	X630, Y410, Z460
Table size ( $\text{mm}^2$ )	X800 x Y410



(a) Whole view of elliptical vibration cutting machine



(b) Experiment setup

Fig. 4 Elliptical vibration cutting machine developed in the present research

Table 2. Stiffness and accuracy of developed machine

Static stiffness of tool spindle in radial direction	1.7 N/mm
Repeatability (NRRO) of circular vibration at 10000 min <sup>-1</sup>	X : 1.4 mm p-p Y : 4.4 mm p-p
Rotational accuracy (TIR) of tool spindle in radial direction at 6 min <sup>-1</sup>	2.8 mm
Backlash in torsional direction	<0.023 deg
Static stiffness of tool spindle in torsional direction	8.3 Nm/deg
Positioning accuracy of feed tables	2.5 mm/ full stroke
Positioning repeatability of feed tables	1.5 mm/ full stroke

### 3.1 가공기의 사양

가공기의 주된 사양은 표 1과 같다. 빌트인모터 최대회전수는 10,000min<sup>-1</sup>으로, 167Hz의 원진동을 발생할 수 있다. 편심슬리브의 편심량은 0.5mm로 설정하여, 최대 31.4m/min의 진동속도를 낼 수 있도록 하였다. 본 가공법에서는 단속적인 절삭을 행하기 위해 절삭속도는 이 진동속도의 수분에 1 이하로 설정할 필요가 있다. 이를 기준으로 테이블의 최대 이송속도를 5m/min, 공구회전축의 최대 회전수를 1,500min<sup>-1</sup> (공구경  $\phi$ 1mm의 경우, 최대 절삭속도가 4.71m/min)로 제작하였다. 또한 절삭유 공급장치와 오일미스트장치를 구비하여 절삭분위기를 바꿀 수 있도록 하였고, 절삭유 공급밸브를 잠금으로 Air blow에 의한 Dry가공을 수행할 수도 있도록 하였다.

### 3.2 가공기의 성능

본 가공기는 시판의 머시닝센터를 개조하였으므로 성능 테스트는 개조한 주축부분만 수행하였으며, 그 주된 결과는 표 2에 제시한 바와 같다.

공구회전축의 반경방향 정강성 측정은 공구회전축에 직경 15mm의 테스트 바를 체결한 후, 주축 선단에서부터 75mm 아래 위치에서 하중을 가하고, 그 변위를 테이블에 고정된 정전용량형 변위계를 사용하여 측정하였다. 측정결과는 1.7 N/ $\mu$ m의 정강성을 나타내었으며, 이 값은 보통의 가공기에 비해 약간 낮은 값이다.

다음으로 공구회전축을 고정시키고 공구진동축을 최대 회전수 10,000min<sup>-1</sup>으로 회전시킨 상태에서 원진동의 재현성(NRRO)을 측정한 결과, X방향(그림 4(b)에서 좌우방향)에 대하여 1.4 $\mu$ mmmp-p, Y방향(그림 4(b)에서 전후방향)에 대하여 4.4 $\mu$ mp-p를 나타내었다. 그리고 공구진동축을 고정시키고 내축의 공구회전축만을 회전수 6min<sup>-1</sup>으로 회전시킨 상태에서 반경방향 회전정도(TIR)를 측정한 결과 2.8 $\mu$ m을 나타내었다. 이상의 회전정도는 본 연구에서 목표로 하는 정밀가공을 실현하기에 충분한 값이라고 말할 수는 없는 값이지만, 추후 전용 진동주축을 설계하는 것으로 개선 가능할 것으로 기대되어진다.

공구회전축을 고정시키고 Planning가공을 행하기 위해서는 공구회전축의 회전방향 백래쉬와 강성도 중요하다. 이 값들의 측정을 위하여 T자형의 치구를 공구 대신에 체결한 후 공구회전축을 고정시킨 상태에서 치구의 한쪽 끝에서 토크를 가하고 반대쪽 끝에서 변위를 측정하였다. 치구에 가하는 토크의 방향을 반전시킬 때의 불감영역, 즉 회전방향 백래쉬는 0.023° 미만을 나타내었고, 토크 증가에 대한 변위 증가의 기울기, 즉 정강성은 8.3Nm/deg.를 나타내었다. 공구체결오차가 0.1mm이고 회전방향오차가 0.3° 발생했다고 가정할 때, 공구선단의 위치이동량은 0.05 $\mu$ m 정도이다. 이를 고려해 볼 때 이상의 백래쉬와 정강성 값들은 타원진동Planning을 실현하기에 충분한 값으로 판단되어진다.

## 4. 시작기에 의한 절삭가공실험

개발한 가공기를 사용하여 본 연구에서 제안한 가공법 중 타원진동Planning에 의해 금형용 스텐레스강(SUS420J2, HRC50)의 정밀가공을 시도하였다. 이의 비교대상으로 고경도재료의 금형가공에 널리 사용되는 보통의 볼엔드밀링도 함께 행하였다. 타원진동Planning의 경우는 소결cBN 공구(Nose radius: 1mm, Rake angle: 0°)를, 볼엔드밀링의 경우는 (Al, Ti)N코팅 초경 볼엔드밀(MMC코베르코(주)제품, 미라클 볼엔드밀, Endmill radius: 3mm, 2 flutes)을 각각 사용하였다. 또한 예비실험을 통하여 소결

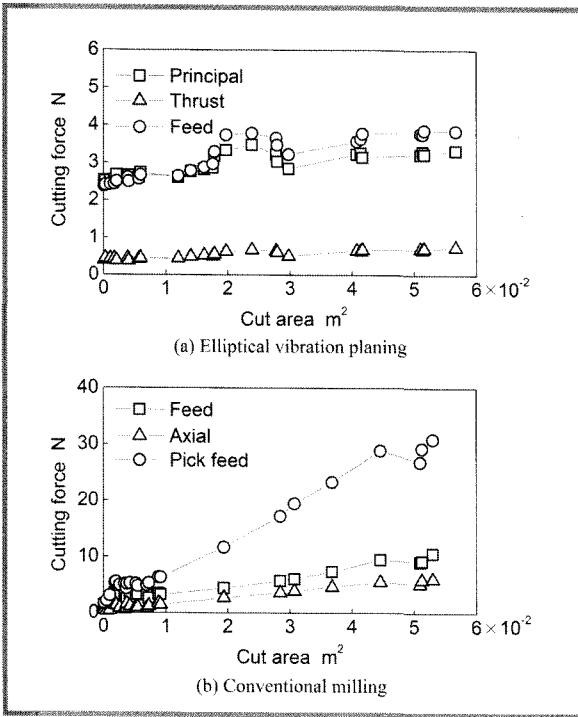


Fig. 5 Measured average cutting force and cut area

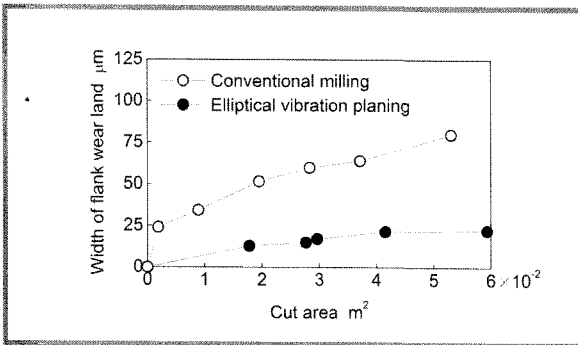


Fig. 6 Flank wear and cut area

cBN공구를 사용하여 가공할 경우에 있어서는, 절삭유를 사용할 때보다 Air blow로 가공할 때가 공구수명이 길어지는 것이 확인되었으므로, 소결cBN공구를 사용하는 Planning가공의 경우는 절삭분위기를 Air blow 상태에서, 보통 볼엔드밀링의 경우는 불수용성 절삭유를 공급하면서 가공을 수행 하였다.

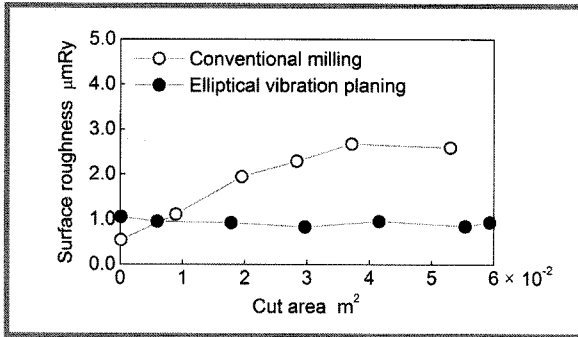
기계의 XY평면에 대한 경사각 약 $8.1^\circ$ 의 경사면을 가공면으로 하여 각각의 가공법에 의한 가공실험을 수행하였다.(그림 3(b)참조) 이처럼 가공면을 기울이는 것은 타원진동Planning과 볼엔드밀링에 있어서 이하와 같은 점에서 이점을 가지기 때문이다. 타원진동Planning의 경우에는, 공구진동에 의해 Rake face가 절삭칩과 분리될 때에도 Flank face가 신생면과 계속 접촉하고 있음으로 인해 Flank 마모가 촉진되는 것을 막을 수 있다. 볼엔드밀링의 경우에는 절삭속도가 0이 되는 공구중심에서 가공하는 것을 막음으로 양호한 가공상태와 가공면 성상을 유지할 수 있게 된다.

절삭조건에 있어서는 이론 표면거칠기가  $4\mu m$ 정도가 되도록 설정하였다. 그리고 타원진동Planning의 경우 가공법의 원리상 공구진동궤적의 일부가 가공면에 남기 때문에 절삭방향에 대한 이론 표면거칠기도 고려하여야 하며, 이에 대해서도  $4\mu m$ 이하가 되도록 절삭조건을 설정하였다.

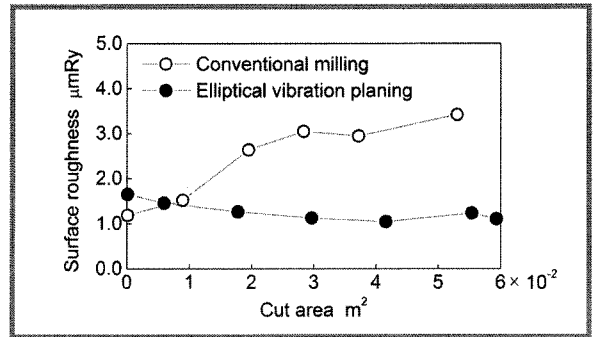
가공면적에 따른 평균 절삭력의 추이를 그림 6에 나타내고 있다. 본 실험의 절삭조건에 있어서 보통 볼엔드밀링의 실제 절입두께가 타원진동Planning에 비해 약 6분의 1정도밖에 되지 않기 때문에, 가공초기에는 보통 엔드밀가공이 더 낮은 절삭력 값을 나타내고 있다. 그러나 가공을 계속함에 따라 보통 볼엔드밀링의 경우 절삭력의 3성분 모두가 크게 증가하고 있는데 비하여 타원진동Planning의 경우에는 큰 증가를 보이지 않아, 공구의 초기마모 이후의 모든 가공영역에 있어서 타원진동Planning이 매우 작은 절삭력 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

그림 6은 가공도중의 공구 Flank 마모 폭을 측정한 결과를 제시하고 있다. 가공면적에 따른 공구 Flank 마모의 증가량에 있어서도 타원진동Planning이 보통 엔드밀링에 비하여 현저히 작음을 알 수 있다. 이러한 공구마모량의 증가가 그림 5에 제시되어진 절삭력의 증가의 주된 원인의 하나가 된다고 판단되어진다.

그림 7은 가공면적에 따른 가공면 표면거칠기의 추이를 제시하고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 보통 엔드밀링의 경우는 가공면적이 증가함에 따라 표면거칠기도 함께 커지고 있는데 비해 타원진동Planning의 경우에는 양호한 표면거칠기가 유지되고 있다. 이 가공실험에 있어서,

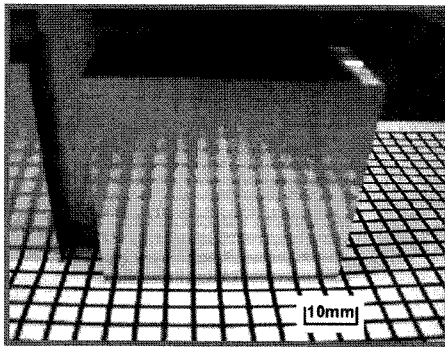


(a) Cutting direction

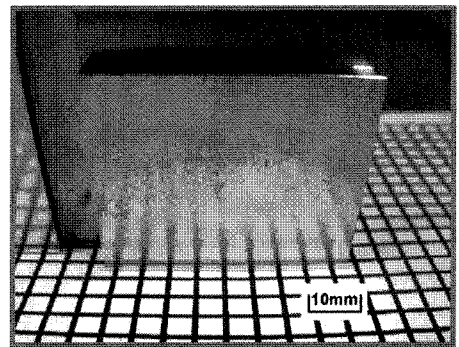


(b) Feed direction

Fig. 7 Roughness of finished surface



(a) After elliptical vibration planing of  $6 \times 10^{-2} \text{m}^2$



(b) After conventional milling of  $5.3 \times 10^{-2} \text{m}^2$

Fig. 8 Photographs of finished surfaces machined hardened steel

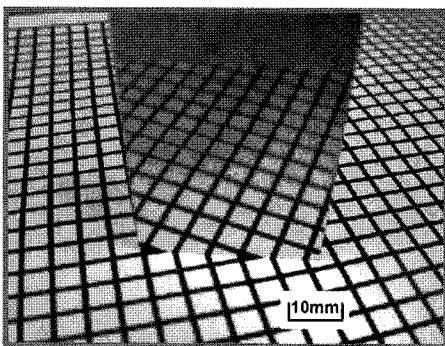


Fig. 9 Finished surfaces of hardened steel machined by elliptical vibration planning with single crystal diamond tool

양 가공법에 의해 최종 가공된 가공면의 사진을 그림 8에 제시하고 있으며, 이 사진으로 부터도 가공결과의 차이를 명확히 확인할 수 있다.

더욱이 본실험의 조건에 있어서 동일 면적을 가공하기 위해 소요되었던 시간을 비교해 보면, 타원진동Planning의 경우가 보통 엔드밀링에 비해 약 1/9이 소요되었다. 이를 통하여 가공효율의 면에 있어서도 타원진동Planning이 보통 엔드밀링에 비해 압도적으로 고능률적인 가공방법이라는 것이 설명되어진다.

마지막으로 이상의 결과를 바탕으로 단결정 다이아몬드 공구를 사용하여 동일 피삭재에 대하여 더욱 고정밀한 가공을 시도하였다. 본 가공에서는 Rake angle 0°, Nose radius 1mm의 단결정 다이아몬드공구를 사용하여, 불수용성 절삭유를 공급하면서 타원진동Planning을 수행하였다. 절삭조건은 절삭속도를 523mm/min, 절입량을 10μm, 이송량을 57μm, 공구진동수를 167Hz로 각각 설정하고, 가공면의 경사각 θ는 3°로 설정하였다.(그림 2(b) 참조) 이

상의 조건으로 크기  $30 \times 34 \text{mm}^2$ 의 가공면(절삭거리 약18)을 가공한 결과, 그림 9에 제시한 것과 같은 경면가공을 달성하였다. 이 가공면의 표면거칠기를 측정한 결과  $0.108 \mu \text{mRa}$ 를 얻었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 타원진동절삭가공법에 의한 정밀가공을 목적으로 기계식 원진동발생기구를 제안하고, 이를 사용하여 타원진동절삭가공기를 개발하였다. 본가공기는 타원진동 Planning가공, 타원진동 밀링가공, 그리고 보통 Planning가공과 보통 밀링가공이 가능하게 설계·제작하였다. 개발한 가공기의 성능을 검토한 결과 강성과 회전정도 등에 약간의 개선해야 할 과제가 남아있기는 하지만, 목표로 한 4가지 가공방법이 구현 가능함과, 정밀가공에 사용하기에 충분한 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 고경도강의 정밀가공에 있어서, 시작기에 의해 소결cBN공구를 사용한 타원진동Planning을 실현함으로써, 종래의 보통 엔드밀링에 비교하여 절삭력, 공구수명, 가공면 정밀도, 가공능률 등의 모든 관점에서 가공성능이 크게 향상되는 성과를 얻었다. 이와 함께 절삭유를 사용하지 않는 Dry가공에도 유효함을 확인하였다. 마지막으로 단결정다이아몬드 공구를 사용하여 약 $0.1 \mu \text{mRa}$ 의 경면가공을 달성하였다.

이상의 결과로 본 연구에서 제안한 기계식 타원진동절삭가공장치 및 타원진동Planning 가공법에 대하여 고경도재료의 정밀가공을 위한 새로운 가능성이 기대되어진다.

## 참 고

1. Zhao, X., Tsutsumi, M., Koreta, N., Ge, D., 1997, Determination of Optimum Tilting Angle of Ball-End Mill in 5-Axis Control Machining, Journal of JSPE, 63/7: 992-996
2. Shamoto, E., Moriwaki, T., 1994, Study on Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, 43/1: 35-38.
3. Moriwaki, T., Shamoto, E., 1995, Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, 44/1: 31-34.
4. Shamoto, E., Moriwaki, T., 1999, Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, 48/1: 441-444.
5. Shamoto, E., Suzuki, N., Moriwaki, T., Naoi, Y., 2002, Development of Ultrasonic Elliptical Vibration Controller for Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, 51/1: 327-330.