

## 초음파타원진동절삭가공법에 의한 Co-Cr-Mo 합금의 경면가공

송영찬#, 田中健一\*, 森脇俊道\*\*

### Mirror Finishing of Co-Cr-Mo Alloy by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting Method

Young Chan Song#, Kenichi Tanaka\* and Toshimichi Moriwaki\*\*

#### ABSTRACT

The biocompatibility and the fatigue strength of Co-Cr-Mo alloy are excellent, so it is used well for the material of artificial joints. The head of artificial joint needs mirror surface for reduction of abrasive resistance. Mirror finishing of Co-Cr-Mo alloy with geometrically defined single crystal diamond cutting tools is handicapped by micro chipping of tool edge. In general, it is said that the micro chipping of diamond tool is caused by work hardening of Co-Cr-Mo alloy for the cut. In the present research, mirror finishing of Co-Cr-Mo alloy by applying ultrasonic elliptical vibration cutting was carried out. The experimental results show that the micro chipping of diamond tool was suppressed and the tool wear was remarkably reduced as compared with the ordinary diamond cutting without elliptical vibration motion. It was confirmed that the good mirror surface of maximum surface roughness of 25 nmP-V was obtained for the cutting length of about 14 m. It is expected that mirror finishing of Co-Cr-Mo alloy can be achieved by applying ultrasonic elliptical vibration cutting practically.

**Key Words :** Ultrasonic elliptical vibration cutting (초음파타원진동절삭가공법), Co-Cr-Mo alloy (Co-Cr-Mo 합금), Single crystal diamond tool (단결정다이아몬드공구), Mirror finishing (경면가공)

#### 1. 서론

인공관절 치환술은 관절염에 의해 손상된 인체의 관절부위를 제거하고 인공 금속물질로 바꿔주는 것으로, 사용되는 재료로는 과거엔 스테인레스가 주종이었으나 근래에는 Co-Cr-Mo 합금이나 티타늄합금 그리고 세라믹 또는 의료용 플라스틱 등

으로 다양하고 눈부신 발전을 거듭하고 있다.<sup>1</sup> 스테인레스는 가공성은 우수하나 생체적합성이 떨어지며, 티타늄은 내부식성이 강하지만 내마모성과 피로특성이 떨어진다. 한편, Co-Cr-Mo 합금은 생체적합성이 우수하며, 피로특성이 티타늄보다 우수하여 많이 사용되고 있다. 또한, 관절면은 높은 경도의 재료가 서로 접촉하게 되므로 마모되기 쉬우

접수일: 2007년 9월 6일, 게재승인일: 2008년 1월 9일

# 교신저자: 한국기계연구원

E-mail ycsong@kimm.re.kr, Tel. (042) 868-7104

\* Shin caterpillar mitsubishi LTD.

\*\* Setsunan university

며, 인공관절 환자 중에는 수년 후 마모로 인해 재 치환수술을 하게 되는 경우가 발생한다. 인공관절의 내마모성을 향상시키기 위하여 높은 표면정도가 필요하며, 따라서 인공관절 접동면의 경면가공이 요구되고 있다.

Co-Cr-Mo 합금을 다이아몬드공구에 의한 초정밀절삭을 할 경우 공구날의 마이크로 칩핑현상이 발생하기 때문에 안정된 경면가공이 곤란하여 일반적으로 연삭가공이 이용되고 있다. 이 공구날 칩핑현상의 주된 원인은 Co-Cr-Mo 합금이 가공경화성이 높은 재료<sup>2</sup>이기 때문으로 알려져 있다.

한편 Eiji Shamoto 등<sup>3-11</sup>이 타원진동절삭가공법을 고안하여, 가공법의 기본특성을 밝힘과 함께 다이아몬드와 화학적 친화성이 높아 불가능하였던 철강재료의 경면가공 실현, 대표적인 취성재료인 광학유리의 연삭가공 실현 등 각종 연구성과들을 발표해왔다. 가공경화는 소성변형에 의한 가공응력과 관계가 있으며, 따라서 타원진동절삭법의 큰 특징인 가공력 억제효과와 특히 가공칩 유출축진 효과는 가공경화성이 높은 Co-Cr-Mo 합금의 초정밀 다이아몬드 절삭가공에 있어 가공경화를 억제할 수 있을 것으로 예상되어진다. 이는 다이아몬드 공구의 마이크로 칩핑을 억제하는데도 기여할 수 있을 것으로 기대되어지며, 경면가공을 실현할 수 있을 것으로 생각되어진다.

본 논문에서는 초음파타원진동절삭가공법에 의한 Co-Cr-Mo 합금의 기초 가공실험을 통하여, 공구의 마이크로 칩핑 억제와 실용적인 경면가공의 실현 가능성 등을 검토하였다. 공구에 진동을 가하지 않는 보통절삭도 함께 행함으로 본 가공법에 의한 효과를 명확히 하였다.

## 2. 초음파타원진동절삭가공법

### 2.1 가공법의 원리 및 효과

타원진동절삭가공법<sup>3-5,11</sup>은 Fig. 1에 제시한 것처럼 공구인선에 원 또는 타원진동을 부가하여 단속적으로 절삭을 행한다. 공구진동 1주기에 있어서, 칩 생성시에는 공구가 주로 칩 유출방향 속도를 가지며 순간적으로는 공구진동속도가 칩 유출속도보다 빠르게 되므로, 마찰력의 방향이 반전되어 칩을 유출방향으로 끌어당기며 가공을 행하게 된다. 보통의 절삭가공에서는 절삭유 사용 등의 방법에 의해 공구경사면의 마찰력을 감소시키고자 하

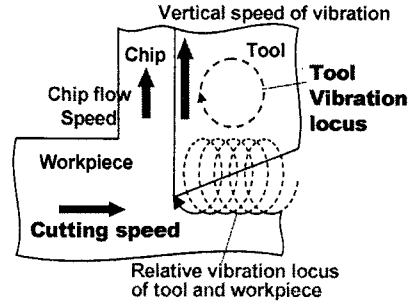


Fig. 1 Elliptical vibration cutting processes

지만, 본 가공법은 이 마찰력을 역으로 이용하는 적극적인 절삭가공 방법이다. 그 결과 전단각이 증가하며, 절삭저항, 칩 두께, 버 등이 크게 감소된다. 이로 인해 취성재료의 연삭가공<sup>6</sup>을 위한 최대 절삭깊이가 커지게 되며, 플라스틱과 같은 점탄성재료의 가공에 있어서 탄성변형량이 크게 억제<sup>7</sup>되어 가공정도의 향상에 크게 기여하게 된다. 이 절삭저항의 감소 및 전단각의 증가는 피삭재료의 가공경화 및 공구의 결손을 억제하는데도 효과를 기대할 수 있을 것으로 생각되어진다.

또한 타원진동절삭가공법에 있어 공구의 진동 주기를 초음파영역으로 설정한 것이 초음파타원진동절삭법<sup>6-10</sup>이며, 이 가공법은 절삭과정에 있어서의 공구날의 냉각효과를 크게 기대할 수 있게 된다. 이로 인해 구성인선의 발생을 크게 억제<sup>9</sup>할 수 있으며, 특히 이전까지는 불가능했던 다이아몬드공구에 의한 철강재료의 경면가공<sup>8</sup>을 실현하였다.

### 2.2 초음파타원진동공구

본 가공실험에 사용한 초음파타원진동공구를

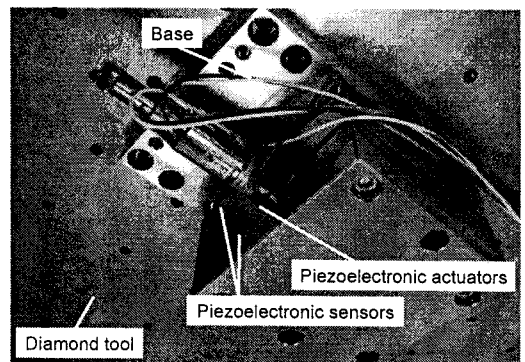


Fig. 2 Ultrasonic elliptical vibrator

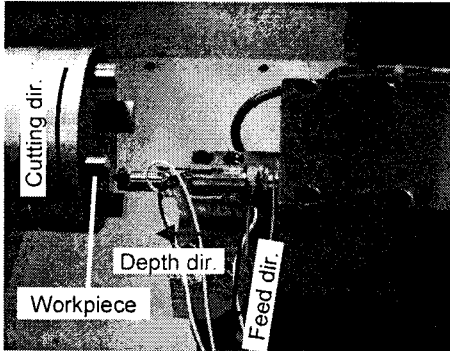


Fig. 3 Photograph of experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Tool	Material	Single crystal diamond
	Nose radius	1.0 mm
	Rake angle	0°
	Clearance angle	15°
Workpiece		Co-Cr-Mo Alloy
Vibration conditions	Ordinary cutting	No vibration
	Elliptical vibration cutting	Locus: circle Frequency: 15.1 kHz Amplitude: 2×2 μm <sup>2</sup>
Cutting conditions	Cutting speed	190, 569 mm/min
	Depth of cut	5 μm
	Feed	10 μm
Cutting fluid		Dry

Fig. 2 에 제시하고 있다. 이 Vibrator 에는 2 쌍의 BLT 형식 압전소자가 체결되어있어, 압전소자에 정현파 전압을 가하면, 각각 신축진동과 휨진동을 발생한다. 이때 두 방향의 진동에 위상차를 가함으로써, 진동자 끝에 고정되어진 공구의 날에 원 또는 타원체적의 진동이 부과되어진다. 또한 평판 형태의 압전소자를 진동자에 접촉하여 이 압전소자로부터 발생하는 전하량을 감지함으로써 공구진동상태를 체크할 수 있도록 하였다. 이 Vibrator 는 공진을 이용하고 있으며, 사용 주파수는 15.1 kHz 이다.

### 3. 실험방법 및 조건

가공실험은 Toshiba Co., Ltd.제 초정밀 5 축가공기 ULC-100C(H3)를 사용하였으며, Fig. 3 에 가공실험의 개관사진을 제시하고 있다. 주축의 회전방향을 절삭방향으로 하였지만, 타원진동절삭가공의 경우 공구진동속도와 절삭속도와의 관계가 중요한

Table 2 Material properties of Co-Cr-Mo alloy

Chemical composition	Co	55 %
	Cr	30 %
	Mo	7 %
	etc	8 %
Mechanical properties	Yield strength (0.2 % offset)	827 MPa
	Tensile strength	1172 MPa
	Elongation	12 %
	Vickers hardness	350 Hv

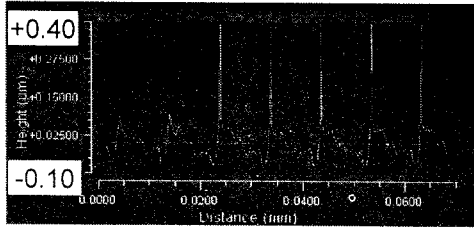
가공조건이므로 절삭속도를 일정하게 유지하기 위하여 주축을 회전수 제어방식이 아닌 각도 제어방식으로 제어하였다. 즉 가공방식이 선삭가공이 아닌 셰이퍼 가공방식으로 평면가공을 행하였다. 가공실험은 초음파타원진동절삭의 효과를 알아보기 위하여 공구에 진동을 가하지 않는 보통절삭도 함께 행하였다. 보통절삭의 경우 공구에 진동을 가하지 않고, 그 외의 모든 가공조건은 초음파타원진동절삭과 동일하게 설정하였다. 또한 예비실험을 통하여 다이아몬드공구에 의한 Co-Cr-Mo 합금의 절삭가공에 있어서 냉각유의 사용이 마모억제에 효과적이지 못한 사실이 확인되었으므로 본 실험에서는 냉각유를 사용하지 않았다. 가공조건을 Table 1 에 정리하여 나타내고 있다. 또한 Table 2 에 본 가공실험에 사용된 Co-Cr-Mo 합금의 재료 특성을 나타내고 있다.

### 4. 실험결과 및 고찰

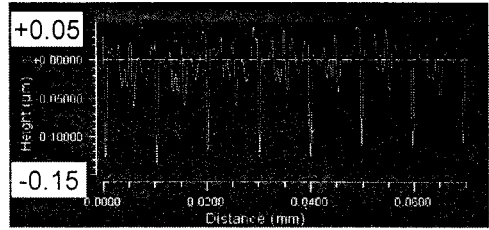
#### 4.1 가공정도 및 공구마모에 관해 보통절삭과 비교

먼저 절삭속도 569 mm/min 조건에서 보통절삭과 초음파타원진동절삭에 의한 가공정도와 공구마모의 차이를 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 4 ~ 7 에 나타내고 있다.

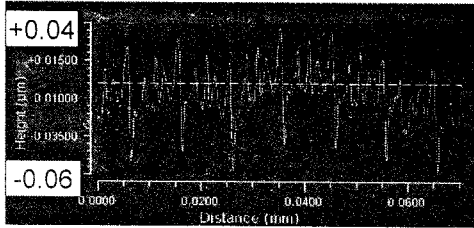
Fig. 4 와 5 는 각각 보통절삭과 초음파타원진동절삭에 의한 가공면의 이송방향 단면곡선을 나타내고 있으며, 백색광 간섭방식의 표면정도측정기를 사용하여 측정한 결과이다. Fig. 4 의 보통절삭에 의한 가공면 단면곡선의 경우, 절삭거리에 따른 가공면 단면곡선의 변동이 극심하다. 특히, 본 가공실험이 공구 여유면 표면거칠기 10 nm 이하, 공구 곡률반경 1.0mm 의 공구를 사용하여, 이송주



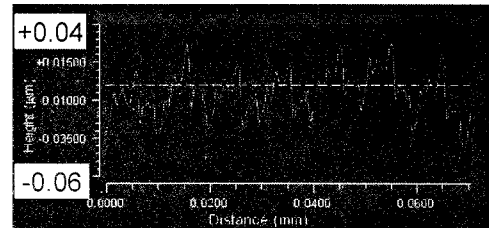
(a) at cutting length of about 0.1 m



(b) at cutting length of about 2.5 m

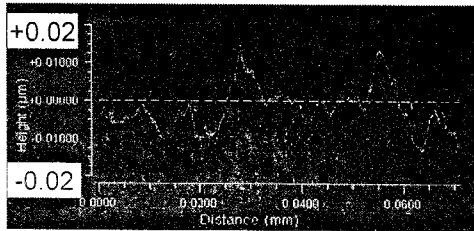


(c) at cutting length of about 8 m

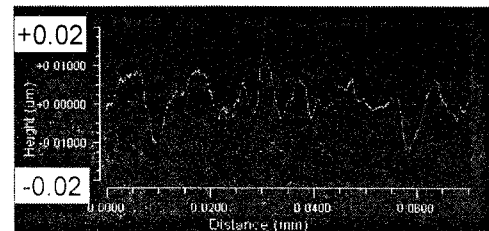


(d) at cutting length of about 13 m

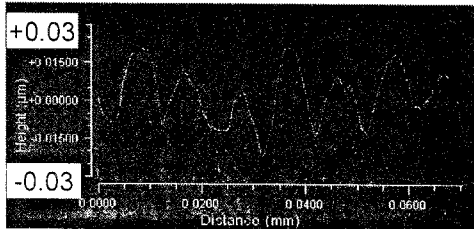
Fig. 4 Profiles of finished surface machined by conventional cutting



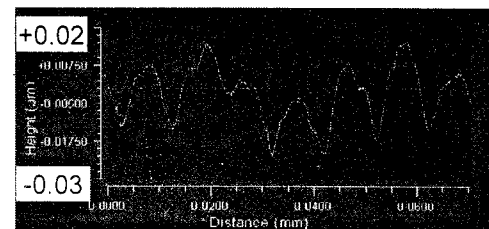
(a) at cutting length of about 0.1 m



(b) at cutting length of about 2.5 m



(c) at cutting length of about 8 m



(d) at cutting length of about 13 m

Fig. 5 Profiles of finished surface machined by elliptical vibration cutting

기  $10 \mu\text{m}$  의 조건에서 가공되었으나, 이송주기에 따른 부드러운 곡선형상(이하, 이송마크)이 형성되지 못하였으며 그 형상도 절삭거리에 따라 심하게 변동되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 공구 날 끝의 마모 및 미세한 칩핑이 계속해서 일어나고 있기 때문으로 생각되어진다.

Fig. 5의 타원진동절삭에 의한 가공면 단면곡선의 경우, Fig. 4의 보통절삭에 의한 결과와 같은 극심한 표면정도의 변화는 확인되지 않으며 전체적

으로 안정된 가공이 이루어지고 있다고 판단되어진다. 또한 Fig. 5(c)의 절삭거리 약 8 m 가공후의 가공면 단면곡선에서는 Fig. 5(a)에서는 잘 확인되지 않던 이송마크가 명확히 확인되어지며, 이는 공구의 초기마모가 진행되어 가공표면의 공구형상 전사성이 약간 악화되었기 때문으로 생각되어진다. 또한, Fig. 5(d)의 절삭거리 약 13 m 가공후의 가공면 단면곡선에 있어서도 Fig. 4의 경우와 달리 이송주기와 동기하여 부드러운 곡선형상을 나타내고

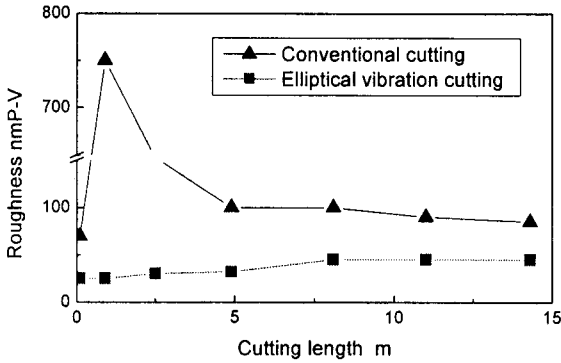


Fig. 6 Surface roughness and cutting length

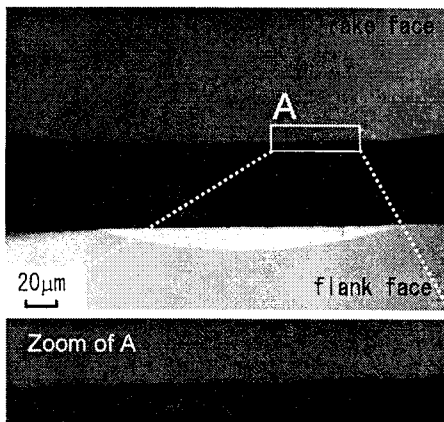
있으며, 이는 보통절삭과 같이 공구날 끝의 미세한 칩핑현상이 발생되지 않았기 때문으로 생각되어진다.

Fig. 6 은 절삭거리에 따른 최대 표면거칠기를 나타내고 있으며, 각각의 값은 Fig. 4, Fig. 5 와 같은 방법에 의해 측정된 값이다. 보통절삭의 경우 가공 초기 표면거칠기가 급격히 악화되었다가 절삭거리 5 m 이후에 100 nm 전후의 표면거칠기를 유지하고 있다. 이러한 현상은 절삭가공의 탄성복귀현상과 관계가 있는 것으로 판단된다. 가공초기에는 공구날이 날카로운 상태이므로 가공면의 탄성 복귀량이 적어 공구날 형상이 가공표면에 전사되는 공구 전사성이 매우 우수하다. 따라서 공구날에 마이크로 칩핑과 같은 돌발적이며 미세한 변화가 가공표면에 심하게 나타난다고 생각되어진다. 한편, 공구 마모가 진전됨에 따라 탄성복귀량이 커지고 여유

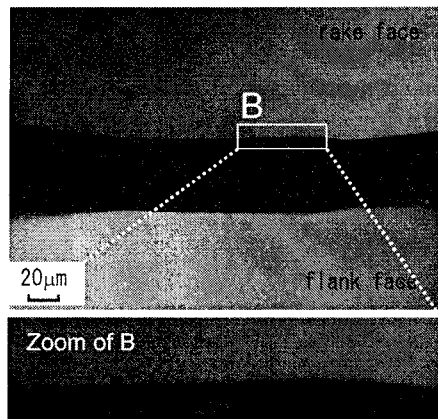
면의 간섭면적이 넓어지므로, 공구 전사성이 나빠짐과 함께 여유면이 가공표면에 미치는 영향이 커지게 되며, 따라서 가공면의 표면형상은 어느 정도 평균화된 형상으로 나타나게 된다고 생각되어진다. 하지만 이 경우 공구 날의 정도가 가공전의 연마정도에는 이를 수 없으므로 표면정도는 초기의 상태에는 이를 수 없을 것으로 생각되어진다. 또한 공구 칩핑은 돌발적인 현상이므로 안정된 가공면을 얻기는 곤란하리라 판단되어진다.

반면, 타원진동절삭의 경우는 공구의 초기마모로 인해 절삭거리 약 8 m 까지는 절삭거리의 증가에 따른 최대 표면거칠기의 변화가 매우 완만한 슬로프를 가지고 증가하고 있으며 그 이후는 50 nm 이하의 안정된 표면정도를 유지하고 있다.

Fig. 7 은 절삭거리 약 14 m 를 가공한 후의 다이아몬드공구 날의 미분간섭현미경 사진이다. Fig. 7(a)의 보통절삭 후의 공구 날의 경우, 여유면의 심한 마모가 확인되어지며, 특히 경사면의 확대사진을 통해 날 끝에 마이크로 칩핑이 발생한 것을 확인할 수 있다. 여유면 마모는 다이아몬드가 열에 취약하므로 절삭열이 주된 원인으로 판단되어진다. 날 끝의 마이크로 칩핑은 다이아몬드가 취성이 강한 재료이므로 피삭재료의 경도를 이기지 못해 발생한 것으로 생각되어진다. 반면, Fig. 7(b)의 초음파타원진동절삭 후의 공구 날에서는, 보통절삭 후의 공구에서와 같은 여유면의 마모와 마이크로 칩핑이 현저히 억제되어 현미경사진으로는 확인되어지지 않는다. 이의 주된 원인은 초음파타원진동절삭의 경우 제 2.1 절의 가공원리에서 설명

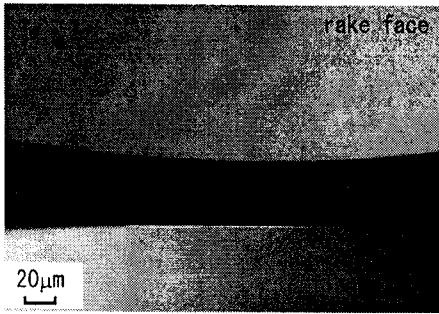


(a) used in ordinary cutting

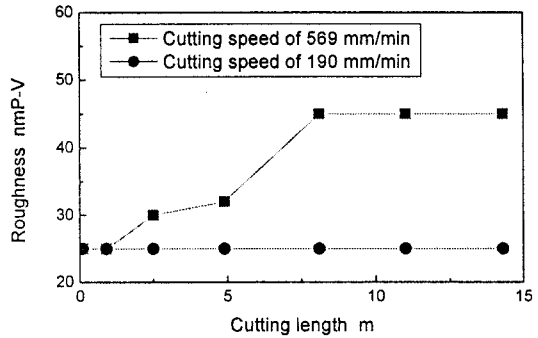


(b) used in elliptical vibration cutting

Fig. 7 Diamond tool edges after cut about 14 m at the cutting speed of 569 mm/min (velocity ratio of 10)



(a) diamond tool edge after cut about 14 m



(b) surface roughness and cutting length

Fig. 8 The result of elliptical vibration cutting at the cutting speed of 190 mm/min (velocity ratio of 30)

한 절삭부하의 억제효과와 냉각효과로 판단되어진다. 단, 타원진동절삭의 경우에 있어서도 공구형상이 초기의 원호형상으로부터 변형된 것을 명확히 확인할 수 있을 정도로 공구날에 적지않은 마모가 발생하고 있으며, 이로 인해 Fig. 5에서 절삭거리가 증가함에 따라 표면거칠기가 서서히 악화되고 있는 것으로 판단되어진다. 초음파타원진동절삭에 있어서 더욱 양호한 가공면을 유지하기 위해서는 이러한 공구마모를 더욱 억제할 필요가 있다.

#### 4.2 초음파타원진동절삭에 있어서 공구마모 억제

타원진동절삭의 경우, 공구진동의 절삭방향 최대속도와 절삭속도와의 비(이하, 속도비)가 중요한 가공조건인 하나이다. 속도비가 커질 수록, 진동 1 주기 당 제거량이 적어지며, 칩을 유출방향으로 끌어당기는 효과가 커지게 된다. 따라서 속도비가 커질 수록 평균절삭부하가 작아지게 된다. 이는 절삭열의 억제효과와 직결되며, 공구마모 억제효과도 함께 기대할 수 있게 된다.

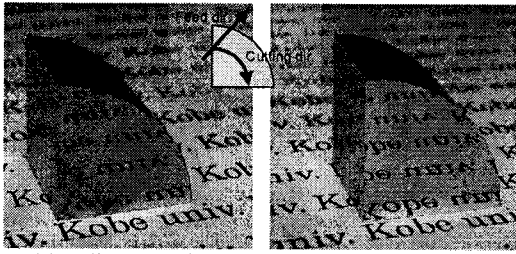
한편 타원진동절삭의 경우에 제시하는 절삭거리는 이해를 쉽게 하기 위하여 공구진동을 무시하고 보통절삭과 동일하게 생각하였을 때에 나타내어지는 절삭거리이다. 실제 공구와 피삭재가 접촉하는 거리는 속도비가 커질 수록 길어지게 되며, 속도비를 지나치게 크게 할 경우 이에 의한 역효과도 생각할 수 있다. 과거의 타원진동절삭에 대한 이론해석과 여러 가공실험들을 통한 결과<sup>3,5</sup> 들을 바탕으로 할 때, 속도비 30 전후가 가장 효과적인 조건이었다. 4.1 절에서는 타원진동절삭의 속도비가 10이었으므로, 이 값을 조정하는 것으로 공구마모

억제와 가공정도 향상을 기대할 수 있을 것으로 생각되어진다.

타원진동절삭가공법에 있어서 속도비를 바꾸는 방법은 공구진동 주파수를 바꾸는 방법, 공구진동 진폭을 바꾸는 방법, 그리고 절삭속도를 바꾸는 방법의 세 가지가 있다. 여기에서 타원진동절삭의 경우에 제시하는 절삭속도는 공구진동을 무시하고 보통절삭과 동일하게 생각하였을 때에 나타내어지는 공칭 절삭속도이다. 다른 2 방법의 경우는 타원진동절삭에 있어서의 실제 가공속도 즉 공구진동 선속도가 함께 변하게 된다. 하지만, 절삭속도만을 바꾸는 방법은 실제 가공속도가 변하지 않으므로, 속도비 변화에 따른 효과를 평가하기에 가장 적절한 방법으로 생각되어진다.

따라서 본 실험에서는 공구의 진동조건은 4.1 절의 타원진동절삭가공실험과 동일하게 하고, 절삭속도만 190 mm/min 으로 낮춤으로 속도비를 10에서 30으로 조정하였다. 그리고 4.1 절의 경우와 동일한 절삭거리를 가공하였다.

Fig. 8은 속도비 30의 조건에서 타원진동절삭가공을 수행한 결과이다. Fig. 8(a)의 공구날의 현미경사진을 통해, Fig. 7(b)의 속도비 10의 경우에 비해 공구마모가 매우 억제되었음을 명확히 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8(b)는 절삭거리에 따라 가공면의 최대표면거칠기를 측정된 결과이며, Fig. 5에 제시하였던 속도비 10의 경우를 함께 나타내어 가공정도를 비교하였다. 4.1 절에서도 설명하였던 바와 같이 속도비 10의 경우는 가공초기는 속도비 30의 경우와 거의 동일한 표면정도를 나타내고 있으나, 절삭거리가 증가함에 따라 표면거칠기가 약간씩 악화되고 있는 것을 볼 수 있다. 반면, 속



(a) ordinary cutting (b) elliptical vibration cutting  
Fig. 9 Photographs of machined surface

## 참고문헌

도비 30의 경우는 절삭거리 약 14 m까지 표면거칠기가 거의 변하지 않고 안정되게 가공되어지고 있음을 확인할 수 있으며, 최대 표면거칠기 약 25 nmP-V의 결과를 얻었다. 이와 같이 공구마모를 억제할 수 있었던 것은 앞서서도 설명한 바와 같이 속도비를 조정함에 따라 타원진동절삭에 있어서의 칩 유출촉진 효과가 더욱 커졌기 때문으로 판단되어진다.

마지막으로 Co-Cr-Mo 합금에 대해 보통절삭과 속도비 30의 초음파타원진동절삭에 의해 경면가공을 수행한 가공표면의 사진을 Fig. 9에 나타내고 있다. Fig. 9(b)의 초음파타원진동절삭에 의한 가공표면이 Fig. 9(a)의 보통절삭에 의한 가공표면에 비해 양호한 경면가공이 실현되었음을 명확히 확인할 수 있다.

## 5. 결론

이상으로, 의료용 재료인 Co-Cr-Mo 합금에 대해 단결정다이아몬드공구를 사용한 초음파타원진동절삭을 적용함으로써, 보통절삭에 비해 공구날의 마이크로 칩핑현상, 공구마모 등이 현저히 억제됨과 절삭거리 약 14 m까지 최대표면거칠기 약 25 nmP-V의 안정된 경면가공이 실현되었음을 확인하였다. 이 결과들로부터, 보통의 다이아몬드절삭으로는 실현이 곤란한 Co-Cr-Mo 합금의 실용적인 경면가공이 초음파타원진동절삭가공법을 적용함에 의해 실현 가능하다고 판단되어진다.

## 후 기

Co-Cr-Mo 합금을 제공하여 주시고 본 연구에 협력하여주신 Nakashima Propeller Co., Ltd.에 감사드립니다.

1. Park, M. S., <http://www.oskorea.com/plasty.html>
2. Yoden, H., Yoshikawa, M., Yokomizo, S., Kuramoto, K., Fujiwara, K. and Kaneeda, T., "New Finishing Process of Co-Cr-Mo Alloy Head for Artificial Hip Joints - Using Ultra-precision Cutting and Large Area Electron Beam Machining," Conference proceedings of Euspen, pp. 308-311, 2007.
3. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 43, No. 1, pp. 35-38, 1994.
4. Shamoto, E., Morimoto, Y. and Moriwaki, T., "Elliptical Vibration Cutting (1nd Report)," Journals of the JSPE, Vol. 62, No. 8, pp. 1127-1130, 1996.
5. Shamoto, E., Morimoto, Y. and Moriwaki, T., "Elliptical Vibration Cutting (2nd Report)," Journals of the JSPE, Vol. 65, No. 3, pp. 411-417, 1999.
6. Shamoto, E., Ma, C. and Moriwaki, T., "Ultra-precision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting," Conference proceedings of Euspen, pp. 408-411, 1999.
7. Song, Y. C., Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Ultra-precision Cutting of Plastic for Optical Components by Elliptical Vibration Cutting," Proceeding of KSPE Autumn Conference, pp. 34-37, 2004.
8. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 48, No. 1, pp. 441-444, 1999.
9. Shamoto, E., Ma, C. and Moriwaki, T., "Elliptical Vibration Cutting (3nd Report)," Journals of the JSPE, Vol. 65, No. 4, pp. 586-590, 1999.
10. Shamoto, E., Song, Y. C., Yoshida, H., Suzuki, N., Moriwaki, T., Kohda, S. and Yamanishi, T., "Development of Elliptical Vibration Cutting Machine Utilizing Mechanical Vibrator," Journals of the JSPE, Vol. 69, No. 4, pp. 542-548, 2003.
11. Shamoto, E., Song, Y. C., Sassa, K., Yoshida, H., Hino, R. and Moriwaki, T., "Proposal of Oblique Type of Elliptical Vibration Cutting and Its Basic Performance," Journals of the JSPE, Vol. 69, No. 7, pp. 970-976, 2003.