

철강재료의 다이아몬드절삭에 있어서 단속절삭가공법의 적용에 의한 공구마모억제

송영찬[#], 根津健太郎^{*}, 박천홍^{**}, 森脇俊道^{***}

Control of Tool Wear in Diamond Cutting of Steels by Intermittent Cutting Method

Song Young Chan[#], Nezu Kentaro^{*}, Park Chun Hong^{**} and Moriwaki Toshimichi^{***}

ABSTRACT

Ultraprecision cutting of steels with geometrically defined single crystal diamond tools is handicapped by excessive tool wear. This paper presents a new approach to suppress the wear of single crystal diamond tool in cutting of steels. In general, it is said that the wear of diamond tool is caused by chemically reactive wear under high temperature and high pressure conditions. In order to suppress such chemical reactions, the time of contact between the diamond tool and the steel work in cutting was controlled by employing the intermittent cutting method such as fly-cutting. Series of intermittent cutting experiments have been carried out to control the tool-work contact time by changing one cycle of cutting length and cutting speed. The experimental results were shown that the tool wear was much dependent on the contact time regardless of the cutting speed, and that the wear was much suppressed by reducing the tool-work contact time. It is expected that the steels can be successfully cut with a single crystal diamond tool by controlling the contact time.

Key Words : Intermittent cutting method (단속절삭가공법), Ultraprecision diamond cutting (초정밀다이아몬드절삭), Steel (철), Tool wear (공구마모)

1. 서론

반도체 및 광·정보통신용 플라스틱 부품의 양산은 일반적으로 높은 형상정도와 표면정도를 가지도록 가공되어진 고경도 금형에 의한 사출·성형가공에 의해 이루어지며, 금형재료로는 소결 스테인

레스강이 주로 이용되고 있다. 이 소결 스테인레스강의 금형은 주로 초정밀 연삭·연마에 의해 가공되어져 왔다. 하지만 산업이 고도로 성장함에 따라 미세하고 복잡한 형상의 부품이 급격히 요구되어지고 있으며, 이에 따라 초정밀 연삭·연마에 의한 금형 가공이 곤란한 경우도 많아지고 있다.

접수일: 2008년 1월 31일, 게재승인일: 2008년 3월 9일

교신저자: 한국기계연구원

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

* Sekisui Chemical Co., LTD

** 한국기계연구원

*** Setsunan university

최근 이러한 경우에 있어, 가장 높은 경도를 가지고 있으며, 가장 예리한 공구날이 형성 가능한 단결정다이아몬드에 의한 초정밀절삭가공이 많이 시도되고 있다.

한편 알루미늄합금, 동, 니켈 등의 연질 금속의 경우에 대해서는 단결정다이아몬드공구를 사용한 초정밀절삭가공에 의해 표면거칠기 수 nmRa 이하의 경면가공이 실현가능하며, 오래 전부터 폭 넓게 적용되어 왔다.^{1,3} 하지만, 철강재료의 경우 다이아몬드공구와의 높은 화학적 친화성에 의한 극심한 공구마모^{4,6} 때문에 초정밀절삭가공이 불가능한 것으로 되어 있었다. 이러한 중에 Shamoto 등에 의해 고안된 초음파타원진동절삭가공법을 적용하므로 철강재료의 초정밀 다이아몬드절삭이 실현된 연구성과^{7,8} 등이 보고되었다. 이 중 한 연구결과⁷에 의하면, HRC 31의 소결 스테인레스강에 대해 절삭거리 약 3 km 까지 0.1 μmRz 이하의 표면거칠기를 달성하였다. 또한 이 논문에서 의하면 단축진동방식인 초음파진동절삭의 경우도 이축진동방식인 초음파타원진동절삭에는 뒤지지만 초정밀절삭가공이 가능하다는 사실이 보고되어 있다. 이 초음파진동절삭의 경우, 단속절삭이라는 점 이외에는 일반절삭가공법과 절삭메커니즘이 동일하다⁹는 사실이 가공실험을 통하여 알려져 있다. 이러한 점들로부터 철강재료의 초정밀 다이아몬드절삭이 실현 가능했던 가장 큰 요인이 초음파레벨의 공구진동에 의한 초 단속적인 절삭메커니즘이었음을 추론할 수 있다.

본 논문에서는 단속절삭가공법을 적용하여 철강재료의 다이아몬드절삭을 행함에 있어서, 공구마모기구의 확립을 목적으로 연구를 수행하였다. 다이아몬드 절삭가공에 있어서 공구날의 온도를 직접 측정하는 것은 매우 어려우므로 실제의 가공실험을 수행하여 가공후의 공구의 마모상태를 비교하였으며 그 결과를 기술한다.

2. 단속절삭가공법에 있어서의 단결정다이아몬드공구의 마모억제 메커니즘

다이아몬드공구로 철강재료를 가공할 경우에 있어서의 극심한 공구마모의 주된 원인⁶은 공구와 피삭재와의 마찰에 의한 기계적인 마모가 아니라, 절삭이라는 고온, 고압의 조건에서 다이아몬드의 그래파이드화, 다이아몬드의 철에 직접확산 등의

열화학적 반응에 의한 마모이다. 이 중에서도 특히 철에 직접확산이 공구마모의 가장 큰 요인으로 알려져 있다. 즉, 철강재료의 절삭가공에 있어서 다이아몬드공구의 마모량은 다이아몬드공구와 철이 얼마나 높은 온도에서 얼마나 긴 시간동안 접촉하느냐에 의해 결정된다고 표현할 수 있을 것이다.

Fig. 1은 단속절삭에 있어서 공구날 온도변화 곡선¹⁰을 나타내고 있다. 이 그림은 실험 또는 이론해석에 의한 신뢰있는 데이터는 아니며 단순한 추론 그래프이지만, 실제 공구날의 온도변화도와 유사한 프로파일을 나타내리라 추측되어진다. 그림에서 나타내는 바와 같이 공구와 피삭재가 접촉하여 절삭작용 즉, 마찰 및 전단작용을 시작하면 공구날의 온도는 매우 빠른 속도로 상승하여 정상온도에 도달한다. 절삭작용을 끝내고 공구가 피삭재와 분리됨과 동시에 공구날은 매우 빠른 속도로 저온 상태로 되돌아오게 되며, 다시 절삭작용을 시작할 때까지 이 상태를 유지하게 된다. 이러한 과정을 1 주기로 하여 단속절삭이 이루어진다. 여기에서 절삭작용을 수행하는 구간 즉, 다이아몬드공구와 철의 접촉시간(이하, 1 주기당 접촉시간)을 극단적으로 단축시키면, 다이아몬드공구의 공구날이 보통의 연속적인 절삭의 경우에 도달하게 되는 정상온도 상태에 도달하기 전에 절삭작용을 끝내고 철과 분리될 수 있을 것으로 생각되어진다. 이 경우에 공구날이 연속절삭에 있어서의 정상온도까지 도달하더라도 그 짧은 시간만이 다이아몬드공구가 철과 화학적 반응을 일으키는 시간이 되므로, 화학반응을 일으키기 전에 철과 분

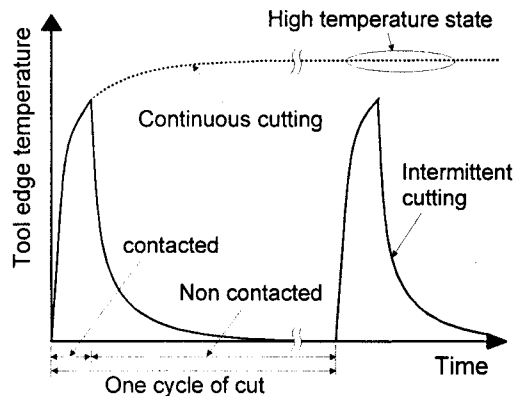


Fig. 1 Temperature profile of tool edge in a ultra intermittent cutting

리되어 진다면 다이아몬드공구의 마모를 크게 억제할 수 있을 것으로 생각되어진다. 초음파진동 및 초음파타원진동절삭가공법으로 철강재료에 대해 다이아몬드공구의 마모를 크게 억제하여, 실용적인 초정밀절삭가공을 수행 가능할 수 있었던 것도 이상과 같이 설명한 단속절삭 메커니즘 때문이라 생각되어진다.

단속절삭의 접촉시간을 단축하는 방법으로 1 주기당의 절삭거리를 줄이고, 절삭속도를 높이는 것을 생각할 수 있다. 여기에서 1 주기당 절삭거리만 줄여 1 주기당 접촉시간을 단축시키는 것은 Fig. 1 을 사용하여 설명한 메커니즘이 그대로 적용 가능하다고 판단되어진다. 한편, 절삭속도를 높이는 것은 단위 시간당의 일량을 증가시키는 것이 되므로 다이아몬드공구의 온도상승의 원인이 되고, 이는 다이아몬드공구의 마모를 촉진하는 원인이 될 수도 있다. 따라서 절삭속도를 높여 1 주기당 접촉시간을 단축시키는 경우, 절삭속도 증가에 의한 영향과 1 주기당 접촉시간의 단축에 의한 영향과의 관계를 명확히 할 필요가 있다.

그 외에도 1 주기당 가공량, 공구형상 등도 공구날의 온도 상승 즉 다이아몬드공구의 마모와 관계가 있을 것으로 생각되어진다.

3. 실험방법 및 조건

Fig. 2 와 3 에 가공실험의 개관사진과 가공영역의 상세그림을 각각 제시하고 있다. 가공방식은 일반 단면 선삭가공과 동일하며, Fig. 3 에서 나타내는 바와 같이 주축이 1 회전하는 동안 산 부분만 가공되어지도록 절삭깊이를 설정하였다. 즉 산의 폭을 1 회전당 또는 1 주기당 절삭거리로 하는 단속절삭이 행하여지도록 하였다. Table 1 에 주요 실험조건을 제시하고 있으며, 절삭속도와 1 주기당 절삭거리 즉 산의 폭 이외의 모든 절삭조건은 동일하게 설정하고 총절삭거리 100 mm 를 가공한 후의 공구날 마모 상태를 비교하였다. 여기에서 1 주기당 접촉시간은 절삭속도와 산의 폭 즉, 1 주기당 절삭거리에 의해 결정되어지며, 식 (1)을 사용하여 계산되어진 값이다.

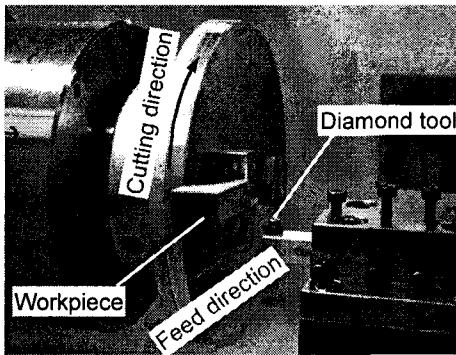


Fig. 2 Experimental setup

$$\text{Contact time in a cycle} = \frac{\text{Length of cut in a cycle}}{\text{Cutting speed}} \quad (1)$$

Fig. 4 에 가공실험 전 공구의 미분간섭현미경 사진을 제시하고 있으며, 모든 가공실험은 공구가 이러한 형상을 잘 유지하고 있음을 반드시 확인한 후 수행하였다. 미분간섭현미경이란 빛의 간섭을

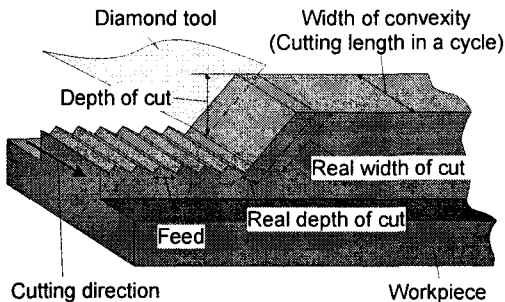


Fig. 3 Detail of cutting region

Table 1 Experimental conditions

Tool	Single point diamond, Edge angle 117°, Rake angle 0°, Clearance angle 15°
Workpiece	Stainless steel, JIS(SUS304)
Depth of cut	5 μm
Feed	0.58 μm
Set length of cut in a cycle	10 - 100 μm
Cutting speed	2 - 20 m/min
Set contact time in a cycle	0.06 - 1.5 msec
Cumulative cutting length	100 mm
Cooling condition	Dry

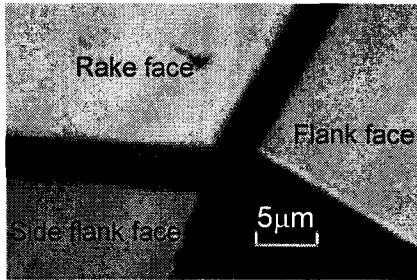
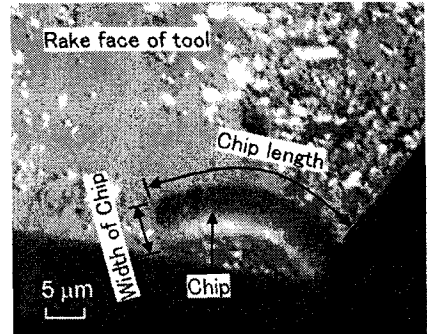
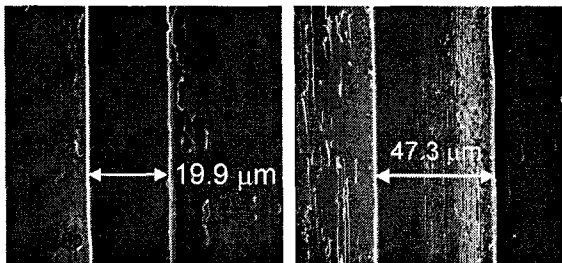


Fig. 4 Micro photograph of diamond tool before cutting



(a) the case of convexity set to width of 20 μm



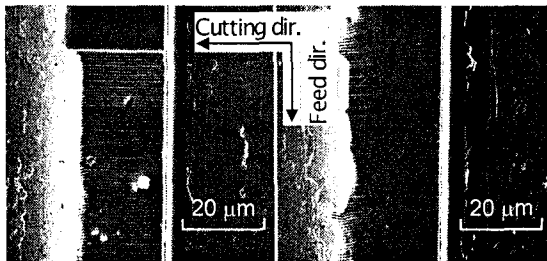
(a) set to width of 20 μm (b) set to width of 50 μm

Fig. 5 Formed convexities for cutting experiment



(b) the case of convexity set to width of 100 μm

Fig. 7 Tool and chip formed by intermittent cutting



(a) start region of cut (b) end region of cut

Fig. 6 Convexity after intermittent cutting

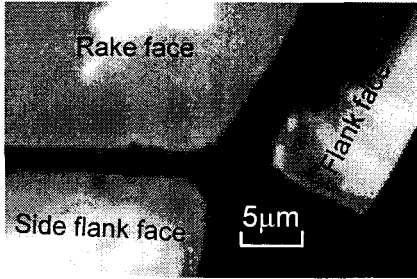
4. 실험결과 및 고찰

우선, 가공실험이 정상적으로 이루어졌는지를 판단하기 위하여 가공실험 후의 산의 형상과 가공에 의해 생성된 칩의 상태를 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 6 과 7에 제시하고 있다.

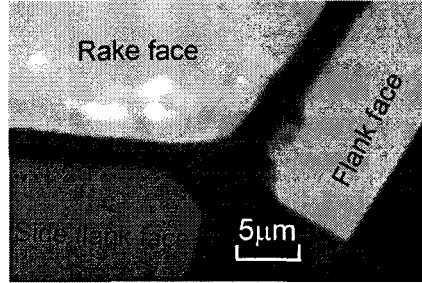
이용하여 물체표면에 입체감을 주어 물체표면의 미세한 높이 변화를 보다 명확히 확인 할 수 있도록 고안된 현미경이다. 또한 1 주기의 절삭거리 즉, Fig. 3 에서 나타낸 산 형상의 폭이 100 μm 이하이며, 절삭 깊이가 5 μm 인 매우 미세한 조건에서 가공실험을 행하기 때문에, 보다 신뢰성 있는 실험을 데이터를 얻기 위하여 실험을 수행하는 가공기에서 직접 산 형상을 제작하여 실험을 수행하였다. Fig. 5 는 폭의 목표치를 각각 20 μm 와 50 μm 로 하여 제작한 산 형상의 예이며, SEM 으로 촬영한 사진이다. Fig. 5 를 통하여 단속가공실험을 수행하기에 충분한 산 형상이 제작되어졌다고 판단된다.

Fig. 6 은 폭 20 μm 의 산 형상에 대해 절삭속도 20 m/min 의 조건으로 단속절삭가공실험을 수행한 후의 가공면의 SEM 사진을 제시하고 있다. Fig. 6 (a)의 가공초기의 가공면에는 공구이송주기 마크가 선명하게 확인되어지는 반면, Fig. 6 (b)의 총절삭거리 100 mm 를 가공한 후의 가공면에서는 공구이송주기 마크가 희미해졌으며 Burr 가 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 공구날의 마모가 진전됨에 따라 가공성이 나빠졌기 때문으로 분석되어진다. 하지만 Fig. 6 (b)의 경우에도 산 형상이 잘 유지되고 있음을 볼 수 있다.

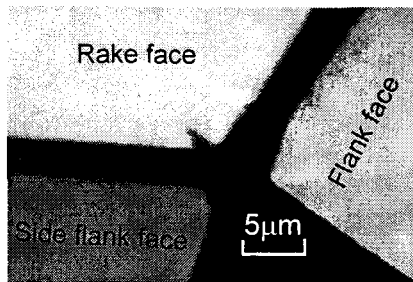
한편, Fig. 7 에 단속절삭가공실험을 수행한 후



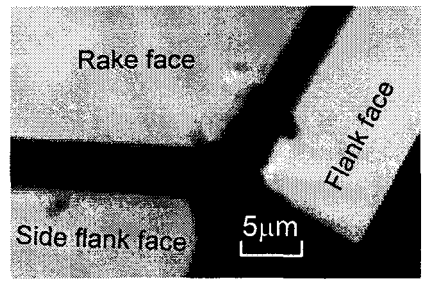
(a) the case of convexity set to width of 50 μm



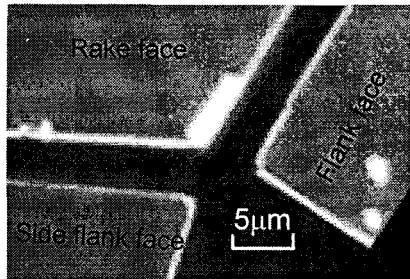
(a) the case of convexity set to width of 50 μm



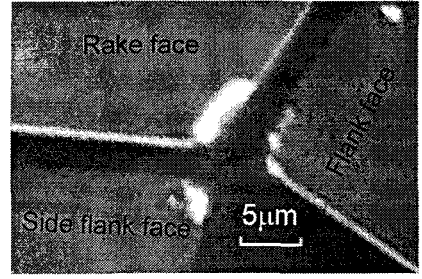
(b) the case of convexity set to width of 20 μm



(b) the case of convexity set to width of 20 μm



(c) the case of convexity set to width of 10 μm



(c) the case of convexity set to width of 10 μm

Fig. 8 Diamond tools after cutting convexities at cutting speed of 10 m/min

Fig. 9 Diamond tools after cutting convexities at cutting speed of 2 m/min

아무런 세척을 하지 않은 공구경사면의 미분간섭 현미경사진을 나타내고 있다. 공구날 끝에 그대로 남아 있는 칩의 형상을 볼 때 안정된 절삭공정이 이루어졌음을 쉽게 판단할 수 있다. 특히 폭 20 μm 의 산 형상에 대해 가공을 수행한 Fig. 7 (a)의 경우, 생성된 칩의 길이가 약 20 μm 전후로 산 형상의 폭과 거의 일치하고 있으며, 칩의 폭이 6 μm 전후로 설정 절삭깊이와 거의 일치하고 있다. 이상의 Fig. 6 과 7 을 통하여 단속절삭가공실험이 안정되게 수행되었다고 판단되어진다.

4.1 주기당 절삭거리의 영향

본 절에서는 제 2 장에서 제시한 단속절삭 메커니즘의 타당성을 일차적으로 검토하는 것을 목적으로, 우선 절삭속도를 포함한 모든 조건이 동일한 상태에서, 산 형상의 폭, 즉 1 주기당 절삭거리만 달리하여 1 주기당 접촉시간을 변경시키는 것이 공구마모에 미치는 영향을 평가하였다.

Fig. 8 은 절삭속도 10 m/min 의 동일한 조건에서 산 형상의 폭 즉, 1 주기당 절삭거리를 달리하여 총절삭거리 100 mm 를 가공한 후의 공구날의 미분간섭현미경 사진들을 나타내고 있다. 1 주기당 절삭거리는 Fig. 8 (a), (b), (c)가 각각 50, 20, 10 μm 의 순이며, 1 주기당 절삭거리와 절삭속도로부터

계산되어지는 1 주기당 접촉시간은 각각 0.3, 0.12, 0.06 msec 의 순이다. 사진들로부터 1 주기당 절삭거리가 짧아질수록 즉, 1 주기당 접촉시간이 짧아질수록 공구마모량이 적어지는 경향을 나타내고 있다. 또한 Fig. 9 는 절삭속도 2 m/min 의 경우에 대해 동일한 실험을 수행한 결과이며, Fig. 8 과 동일한 경향을 나타내고 있음을 쉽게 알 수 있다. 한편, Fig. 9 에서 1 주기당 절삭거리와 절삭속도로부터 계산되어지는 1 주기당 접촉시간은 Fig. 9 (a), (b), (c)가 각각 1.5, 0.6, 0.3 msec 의 순이다. 이 결과들로부터, 본 가공실험과 같이 미세절삭 그리고 동일 절삭속도의 조건에서는 제 2 장에서 제안한 초단속절삭에 의한 다이아몬드공구 마모억제 메커니즘이 타당하고 판단되어진다.

4.2 절삭속도의 영향

절삭속도를 달리하여 1 주기당 접촉시간을 변화시키는 경우, 제 2 장에서도 언급한 바와 같이 절삭속도가 빨라지는 것은 공구날 온도상승의 원인이 되고, 이는 다이아몬드공구 마모촉진의 원인이 될 수도 있다. 반면 1 주기당 접촉시간을 단축하는 것은 앞 절에서 제시한 실험결과에서도 입증되었듯이 다이아몬드공구 마모억제의 한 방법이 될 수 있다. 이러한 상반된 두 파라미터 중 어느쪽이 공구마모에 영향을 미치는 지배적인 요소인지를 명확히 하기 위하여, 산 형상의 폭 즉, 1 주기당 절삭거리가 동일한 조건에서 절삭속도를 달리하여 1 주기당 접촉시간을 변화시킴에 따른 공구마모의 영향을 평가하였다.

앞 절에서 제시한 가공실험 후의 공구 사진들을 1 주기당 절삭거리가 같은 조건끼리 재분류하면, Fig. 8 (a)와 Fig. 9 (a), Fig. 8 (b)와 Fig. 9 (b), Fig. 8 (c)와 Fig. 9 (c)로 나누어진다. 이들 세 경우를 각각 비교하여 볼 때, 세 경우 모두 가공후의 공구날 마모량은 절삭속도가 빨라질수록 적어지고 있음을 명확히 확인할 수 있다. 이러한 결과는 선삭가공과 같은 일반적인 절삭의 경우에 대해 역행하는 결과이다. 또한, 이 결과들로부터 본 가공실험과 같이 미세절삭 그리고 초단속절삭 조건에서는 절삭속도보다 1 주기당 접촉시간이 공구마모에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단되어진다.

4.3 주기당 접촉시간의 영향

본 절에서는 절삭속도와 1 주기당 절삭거리가

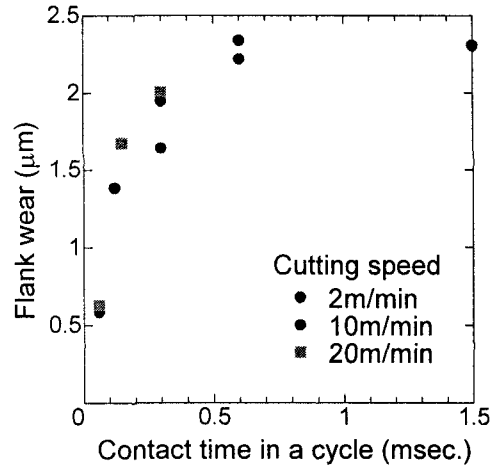


Fig. 10 Flank wear of diamond tool on tool-work contact time in one cycle

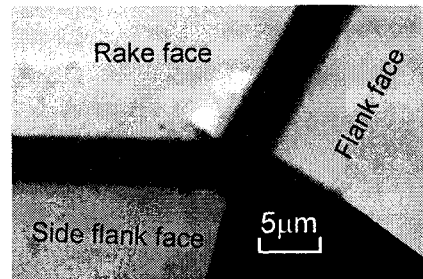


Fig. 11 Diamond tool after cutting convexity set to width of 20 μm, at cutting speed of 20 m/min

다른 여러 조건의 단속절삭가공 실험결과들을 1 주기당 접촉시간을 기준으로 평가하였다.

Fig. 10 은 1 주기당 접촉시간에 따른 공구여유면의 마모량을 나타낸 그래프이다. 공구여유면의 마모량은 Fig. 8 과 Fig. 9 의 공구사진들 그리고 추가실험을 수행하여 얻는 가공후의 공구사진들을 사용하여, 원래의 형상 라인에 비해 변형된 양을 평가하였다. Fig. 10 에서, 1 주기당 접촉시간이 0.5 msec 이상인 영역에서는 접촉시간 길이의 변화에 따른 공구마모량의 차가 적으나, 1 주기당 접촉시간이 0.3 msec 이하인 영역에서는 접촉시간이 긴 영역과는 달리 접촉시간의 길이의 변화에 따른 공구마모량의 차가 매우 크게 나타나고 있다. 특히 이 영역에서는 절삭속도보다 1 주기당 접촉시간이 공구마모에 대한 지배적인 요인이 되고있음을 명확히 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 11 은 절삭속도 20 m/min, 1 주기 당 절삭거리 20 μm 의 조건으로 가공한 결과이다. 이 두 가공조건으로부터 계산되어지는 1 주기당 접촉시간은 0.06 msec 이며, 이는 Fig. 9 (c)와 동일한 조건이다. 그리고 Fig. 10 에 제시한 절삭속도 20 m/min 에 1 주기당 접촉시간 0.06 msec 의 데이터도 이 사진을 사용하여 평가한 것이다. Fig. 9 (c)와 Fig. 11 을 비교할 때 공구여유면 마모량이 거의 동일한 것을 알 수 있으며, 이 결과로부터 1 주기당 접촉시간이 공구마모에 대한 지배적인 요인이 되고있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 철강재료의 절삭가공에 있어서 다이아몬드공구의 마모억제를 위한 방법으로 단속 절삭 프로세스를 선택하여, 본 가공방법에 의한 공구마모 메카니즘을 고찰하였으며, 공구마모에 영향을 주는 주요 파라메타로 절삭속도와 함께, 피삭재료인 철과 다이아몬드공구와의 1 주기당 접촉시간을 선정하였다.

그 후 실제 검증실험을 통하여, 1 주기당 접촉시간을 단축시키므로 공구마모를 억제할 수 있음을 확인하였다. 특히, 본 논문에서와 같이 미세절삭조건에서, 1 주기당 접촉시간이 0.3 msec 이하로 극히 짧은 경우에는 절삭속도보다 1 주기당 접촉시간의 길이가 공구마모에 대한 지배적인 요인이 된다는 것이 판명되었다.

본 논문의 검증실험을 통하여 확인된, 철강재료의 절삭가공에 있어서 1 주기당 접촉시간 단축에 의한 다이아몬드공구의 마모억제효과를 엔드밀링, 플라이컷 등과 같은 실용적인 단속절삭가공법에 적용한다면 다이아몬드 공구의 마모를 크게 억제할 수 있을 것으로 기대되어진다.

참고문헌

1. Kim, G. H., Hong, K. H., Kim, S. S. and Won, J. H., "Nano-turning Technology Using Ultraprecision Machining System," Journal of KSPE, Vol. 19, No. 1, pp. 18-24, 2002.
2. Ko, J. B., Kim, G. H. and Won, J. H., "Cutting Characteristics of Oxygen-Free Using the Ultra Precision Machining," Journal of KSPE, Vol. 19, No.

- 12, pp. 120-126, 2002.
3. Yang, S. H., Kook, M. H. and Won, J. H., "Machining Technology of Micro Lens Array using Fast Tool Servo," Journal of KSPE, Vol. 24, No. 10, pp. 19-24, 2007.
4. Paul, E., Evans, C., Mangamelli, A., McGlaufflin, M. and Polvani, R., "Chemical Aspects of Tool Wear in Single Point Diamond Turning," Precision Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 4-19, 1999.
5. Brinksmeier, E. and Gläbe, R., "Advances in Precision Machining of Steel," Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 1, pp. 385-388, 2001.
6. Shimada, S., Tanaka, H., Higuchi, M., Yamaguchi, T., Honda, S. and Obata, K., "Thermo-Chemical Wear Mechanism of Diamond Tool in Machining of Ferrous Metals," Annals of the CIRP, Vol. 53, No. 1, pp. 57-60, 2004.
7. 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.
8. Shamoto, E., Suzuki, N. and Moriwaki, T., "Development of Ultrasonic Elliptical Vibration Controller for Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 51, No. 1, pp. 327-330, 2002.
9. Shamoto, E., Morimoto, Y. and Moriwaki, T., "Elliptical Vibration Cutting(1st Report) – Cutting Principle and Basic Performance," Journal of JSPE, Vol. 62, No. 8, pp. 1127-1131, 1996.
10. Tanabe, K., "The effect of cutting conditions on cutting temperature in eco-friendly manufacturing," Mechanical engineering Master's thesis of Kobe University, pp. 34-36, 2003.