

CBN 연삭숫돌의 초음파 인프로세스 드레싱 기법

이석우*, 정해도**, 최헌종***

A Study on the Ultrasonic In-Process Dressing Method of CBN Grinding Wheel

Seok Woo Lee*, Hae Do Jeong**, Hon Zong Choi***

ABSTRACT

A CBN wheel was used for the highly efficient and precision grinding of the mold material(STD11). The grinding form accuracy by a CBN wheel is very excellent due to its low wheel wear, but grinding fragments resemble fine powders rather chips. A fine powders by this fragmentation can easily get attached to the wheel surface and therefore causing a loading. In order to prevent this fragmentation phenomena, the alumina stick is use to processing. Because the dressing with alumina stick should be interrupted for a processing, the automation of the processing and high productivity was very difficult.

The investigation on the effect of Ultrasonic In-Process Dressing(ULID) on the grinding characteristics focuses in this paper. This ULID method is that ultrasonic vibration in any position of wheel is used to remove impurities on the wheel surface. Finally, the rate of surface roughness change in grinding by the ULID method was less than grinding without ultrasonic vibration. Loading phenomena by the ULID method were more prevented than grinding without ultrasonic vibration.

Key Words : Ultrasonic In-Process Dressing(초음파인프로세스드레싱), ultrasonic vibration(초음파진동), loading(눈막힘현상), CBN wheel(CBN 숫돌), surface roughness(표면거칠기)

1. 서론

최근 금형 가공 등의 분야에서는 생산성과 가공 표면의 품위를 향상시키기 위한 고능률, 고정밀 가공기술이 요구되어지고 있다. 이러한 가공기술을 실현하기 위해서 초정밀 가공기계와 고능률·고정밀 가공을 수행할 수 있는 고강성의 숫돌이 개발되

고 있다. 일반적으로 고품위·고정밀 연삭 가공을 위해서는 가공 목적에 적합한 연삭 숫돌을 선택하여야 하며, 연삭 숫돌의 연삭 특성이 항상 일정하게 유지되어야 한다¹⁾. 알루미늄 연삭 숫돌은 가격이 싸고 드레싱이 쉬워서 많이 사용되고 있으나, 가공이 진행됨에 따라 숫돌 입자의 마멸과 탈락에 의해서 정확한 형상정밀도와 고품위 가공면을 얻기

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

*** 한국생산기술연구원

가 어려운 단점이 있다. 슷들의 마멸은 접선방향의 저항력을 증가시키고 접촉점에서의 열부하가 증가하여 가공물 표면의 열응력을 증가시킨다^{[2],[3]}. 이러한 알루미늄 슷들의 단점들을 보완하기 위하여 최근에는 레이저 드레싱(laser dressing)과 연속 드레싱(continuous dressing) 기법 등이 개발되어 사용되고 있다^{[4],[5],[6]}.

알루미늄 슷들의 단점인 슷들 형상의 정밀도 유지 및 고능력· 고품위 연삭가공의 요구에 의해 개발되어진 슷들이 다이아몬드와 CBN 슷들로서 이러한 슷들을 이용한 연구가 많이 진행되고 있다^[7]. 이러한 슷들은 마멸이 적어 형상 유지 면에서는 좋으나 가공이 진행됨에 따라 슷들입자 사이에 칩이 늘어붙는 슷들의 눈막힘 현상(loading)이 발생하여 연삭 성능을 떨어뜨리며 가공 면에서의 burning 현상도 유발시킨다. 이를 방지하기 위해서 슷들을 드레싱 하는데, 이러한 작업은 슷들 수명에 있어서 손실을 유발 할 뿐만 아니라, 드레싱 하는 동안 생산을 중단해야 한다는 단점을 가지고 있기 때문에 생산성을 높이거나 자동화하기에는 문제가 있다. 다이아몬드 슷들을 이용하여 고품위 연삭면을 얻는 방법중의 하나로 초음파 진동을 이용하여 다이아몬드 입자를 파쇄시켜 연삭성과 표면품위를 향상시키는 초음파 트루잉에 대한 연구도 진행되고 있다^{[8],[9],[10]}.

본 연구에서는 고능력· 고품위 연삭가공을 위하여 개발된 슷들의 하나인 CBN 슷들을 이용하여 진공 열처리 된 금형강인 STD11(H_{RC} 56~58)을 연삭 가공할 경우에 발생하는 슷들의 눈막힘 현상을 방지하기 위한 방법으로 초음파 인프로세스 드레싱(Ultrasonic In-Process Dressing, ULID) 기법을 제시하여 가공물의 형상정밀도를 향상시키고 고품위 가공면을 얻고자 한다. 초음파 인프로세스 드레싱 기법은 연삭가공을 하면서 가공점 이외의 위치에서 초음파 진동을 이용하여 슷들 입자사이에 늘어붙은 칩들을 제거하는 드레싱 방법이다. 이것은 일정한 거리를 유지하고 있는 공구와 슷들 사이에 연삭유를 공급하여 연삭유 층을 형성시킨 후 20kHz의 공진 주파수를 갖고 30 μ m의 진폭으로 상· 하 운동을 하는 공구에 의해서 발생하는 연삭유 내의 캐비테이션(cavitation)의 폭발력과 진동 충격력으로 슷들입자 사이의 칩들을 제거하는 비접촉식 드레싱 방법이다.

ULID의 적용 유· 무를 실험조건으로 하여

STD11을 V_w'=20,000mm³/mm까지 가공한 후 슷들의 표면을 관찰함으로써 ULID가 슷들의 눈막힘 현상을 제거하는데 효과적인 방법임을 밝히고자 한다. 또한 ULID를 이용하지 않고 STD11을 V_w'=20,000 mm³/mm까지 가공하여 눈막힘 현상이 발생한 슷들을 이용하여 초음파 드레싱의 시간에 따른 눈막힘의 제거 효과도 관찰한다.

이상의 실험을 통하여 초음파 인프로세스 드레싱 기법이 CBN 슷들의 눈막힘 현상을 방지하여 항상 일정한 상태의 슷들 상태를 유지함으로써 고품위 연삭 가공이 가능함을 밝히고자 한다.

2. 초음파 드레싱 원리

2.1 Exponential 혼의 설계

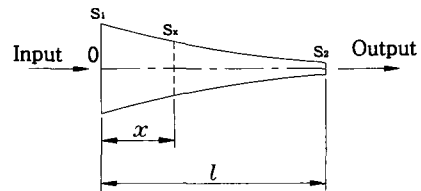
Fig. 1과 같은 익스포넬셜 혼에 있어서 혼의 대단면의 면적을 S₁, 소단면의 면적을 S₂라 하고 대단면에서부터 거리 x의 단면적을 S_x라 하면 혼의 형태는 일반적으로

$$S_x = S_1 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1)$$

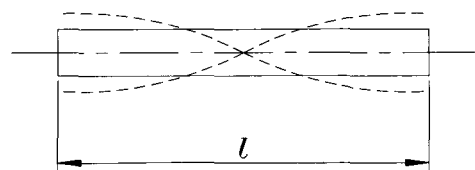
로 된다. 또한 혼의 Young 율을 E 라 하면 운동방정식은 아래와 같다.

$$\rho S_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left(S_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \quad (2)$$

단, ρ : 혼 재료의 밀도, u_x : 변위, t : 시간



(a) Exponential horn



(b) Amplitude distribution in exponential horn

Fig. 1 Exponential horn and amplitude distribution

이때 봉의 단면적이 일정한 경우에는

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (3)$$

이 되어 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 가 된다. 이를 식 (2)에 대입하면

$$S_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \quad (4)$$

이다. 여기서 경계조건

$$x=0 \rightarrow \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0, \quad x=l \rightarrow \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$$

을 이용하면 다음과 같은 공진 조건을 얻을 수 있다.

$$l_n = n \frac{c}{2f_n} \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_n} \quad n=1, 2.. \quad (5)$$

여기서

$$\tan \varphi_n = \frac{1}{2n\pi} \log_e \left(\frac{S_2}{S_1} \right) = \frac{\gamma l_n}{2\pi n} \quad n=1, 2.. \quad (6)$$

이고 n 은 제 n 차의 공진을 나타낸다. 강력 초음파 발생용 혼에 있어서는 통상 제 1차 공진을 이용하기 때문에 이때는

$$l = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_n} = \frac{c}{4\pi f} \sqrt{4\pi^2 + \gamma^2 l^2} \quad (7)$$

또는

$$l = \frac{c}{4\pi f} \sqrt{4\pi^2 + \left\{ \log_e \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \right\}^2} \quad (8)$$

가 된다. 이와 같이 혼 양단면의 직경 또는 단면적 및 공진주파수가 정해지면, 길이 l 이 구해진다.

2.2 혼 내의 진폭분포 및 진폭확대율

S_1 에서 거리 x 만큼 떨어져 있는 곳의 진폭을 \dot{u}_x (\dot{u}_x 는 진동변위의 위상을 고려한 진폭), 대단면에서의 진폭을 \dot{u}_1 , 소단면에서의 진폭을 \dot{u}_2 이라 하면, 혼 내부의 진폭분포는 다음과 같다.

$$\frac{\dot{u}_x}{\dot{u}_1} = e^{-\frac{\gamma}{2} \left(\frac{x}{l} \right)} \times \left\{ \cos \left(\frac{x}{l} \pi \right) + \tan \varphi \cdot \sin \left(\frac{x}{l} \pi \right) \right\} \quad (9)$$

여기서 $\frac{\dot{u}_x}{\dot{u}_1}$ 의 값은 $\frac{x}{l}$ 에 따라 변화하는데 이 값이 "0"이 되는, 즉 진폭이 "0"이 되는 위치가 진동절로서 이곳에 플런지 등을 설치하여 진동 유닛을 지지한다.

진폭 위상차가 없는 경우의 대단면과 소단면의

진동확대율 (M)을 알기 위해서 식 (9)에 $x=l$ 을 대입하여 정리하면

$$M = \left| \frac{\dot{u}_2}{\dot{u}_1} \right| = e^{-\frac{\gamma l}{2}} = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad (10)$$

와 같이 된다. 이 식에서 알 수 있듯이 진폭확대율은 단면적에 비례한다.

2.3 초음파 드레싱의 원리

초음파 인프로세스 드레싱은 슛돌과 일정 거리를 유지하고 있는 공구에 초음파 진동(20kHz)을 주어 연삭유를 매체로 하여 슛돌 입자 사이의 침을 제거함으로써 슛돌의 눈막힘 현상을 방지하는 드레싱 방법이다.

Fig. 2는 실험에 사용한 초음파 유닛과 진동 모드를 나타낸 것으로서 발전 Amp.에서 진동자에 고압을 가하면 진동자는 약 2~3 μ m의 진폭을 가지고 진동을 하는데 이 진폭이 중간 매개체(콘, 혼)에 의하여 증폭된다. 이러한 콘과 혼의 크기와 모양을 적절히 설계하여 공구 끝단에서 요구되어지는 진폭을 얻을 수 있는데, 본 실험에서는 공구 끝단의 진폭이 30 μ m가 되도록 설계하여 사용하였다.

Fig. 3은 초음파 드레싱 원리를 나타낸 것이다. 실험에 사용한 초음파 유닛은 공진 주파수가 20 kHz이기 때문에 공구는 1초당 20,000번의 상하운동을 하게 된다. 이때 공구와 슛돌 사이에는 연삭유가 있어서 공구의 상·하 운동에 의한 충격력과 연

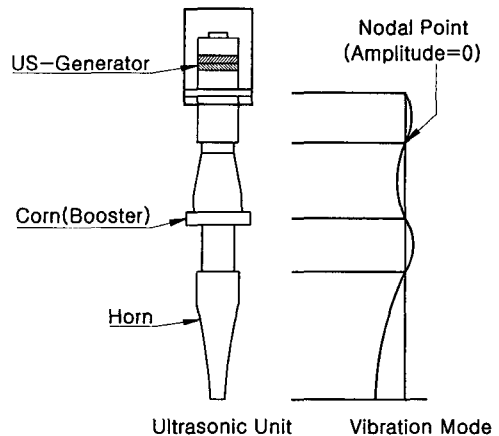


Fig. 2 Schematic of ultrasonic unit and vibration mode

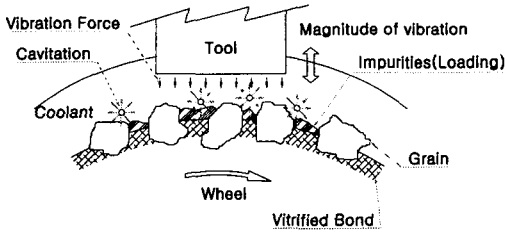


Fig. 3 Mechanism of Ultrasonic In-Process Dressing (ULID) method

삭유 내에서 발생하는 캐비테이션의 폭발력이 슷들의 표면에 전달되어 슷돌입자 사이의 칩을 제거하는 것이다. 공구 1회당의 충격력은 아주 작으나 공구가 20kHz로 진동을 하기 때문에 슷돌입자 사이의 칩들을 제거하기에 충분한 역할을 하게 된다. 이러한 작용에 의하여 초음파 인프로세스 드레싱은 슷들의 눈막힘 현상을 제거하므로 가공이 진행되어도 슷돌 표면 상태와 가공물의 표면품위를 일정하게 유지하는 것이 가능하다.

3. 실험장치 및 결과

CBN 슷돌을 이용하여 진공 열처리된 금형 재질인 STD11을 실험변수들을 변화하면서 실험하여 결과들을 비교· 분석하였다. 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

| Machine | Surface Grinding Machine | |
|-----------------|---|------------------|
| Wheel | Vitrified Bond CBN Wheel (B120H150V3, $\phi 300 \times 11 \times 127$) | |
| Dresser | Rotary Diamond Dresser ($\phi 100$, 2,500rpm) | |
| Workpiece | STD11 (Heat Treatment, $H_{RC} 56 \sim 58$) | |
| Depth of Cut(a) | 10, 15, 20 μm | |
| Gap(ℓ) | 0.05, 0.1, 0.15mm | |
| Coolant | Emulsion 4% | |
| Ultrasonic unit | Power | 1,500W |
| | Frequency | 20KHz |
| | Amplitude | 30 μm |
| | Cooling | Air cooling |
| | Horn Material | Al 7075 |

3.1 실험장치 및 방법

3.1.1 실험장치

본 실험에서는 초음파 드레싱 유니트를 평면 연삭기의 주축대 상면에 부착하여 사용하였으며 실험 장치의 구성도는 Fig. 4에 나타내었다. 초음파 진동자의 발열을 방지하기 위해서 압축공기를 이용하였으며, 공구와 슷돌 사이의 연삭유 층을 유지하기 위하여 초음파 공구 끝단에 연삭유를 공급하였다. 또한 초음파 유니트에 height gauge를 설치하여 슷돌과 공구 사이의 거리를 미세 조정이 가능하도록 하였으며 공구의 끝단은 슷돌의 원주형상과 동일하도록 가공하였다.

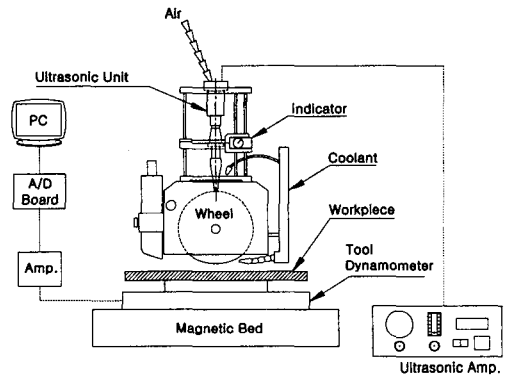


Fig. 4 Schematic diagram of experimental equipment

3.1.2 실험방법

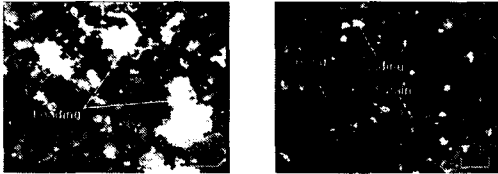
CBN 슷돌로 가공 중에 드레싱을 하지 않고 연삭깊이(a)를 10 μm 로 하여 열처리된 금형강을 슷돌 단위 폭당 제거량(V_w)이 20,000 mm^3/mm 될 때까지 가공을 한 후, 슷돌 표면을 관찰하였으며, 눈막힘 현상이 발생한 슷돌을 회전시키면서 초음파 드레싱 하여 초음파 드레싱 시간에 따른 슷돌 표면의 눈막힘 현상의 제거효과를 실험하였다. 또한 연삭 가공 중에 $V_w=400\text{mm}^3/\text{mm}$ 마다 2분씩 초음파 드레싱을 하면서 $V_w=20,000\text{mm}^3/\text{mm}$ 까지 가공을 하여 V_w 에 따른 슷돌의 눈막힘 현상과 가공면의 표면거칠기 및 잔류응력 등을 측정하여 초음파 드레싱을 하지 않은 경우와 비교· 분석하였다.

3.2 실험결과

3.2.1 슷돌 표면 사진

초음파 드레싱의 효과를 파악하기 위해

PULNIX camera를 이용하여 25배로 숫돌 표면을 관찰하였다. 숫돌 끝단의 한 면에 기준 점을 정하여 항상 동일한 지점을 관찰하였으며, 숫돌 표면의 눈막힘 현상도 관찰하였다.

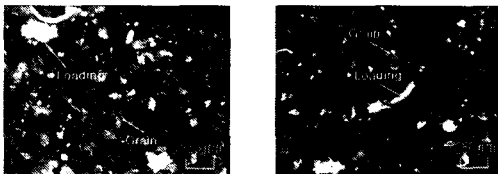


(a) Without ULID (b) With ULID

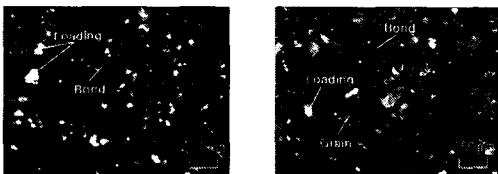
Fig. 5 Photograph of CBN wheel surface ($V_w=20,000\text{mm}^3/\text{mm}$)

Fig. 5의 (a)는 드레싱을 하지 않고 $V_w=20,000\text{mm}^3/\text{mm}$ 까지 가공하였을 때의 숫돌 표면의 사진으로서 가공물의 칩에 의한 눈막힘 현상이 발생한 것을 알 수 있다. 사진에 하얗게 나타나는 부분은 눈막힘 현상이 발생한 부분이다.

(b)는 $V_w=400\text{mm}^3/\text{mm}$ 마다 2분씩 초음파 인프로세스 드레싱을 하면서 $V_w=20,000\text{mm}^3/\text{mm}$ 까지 가공한 숫돌 표면의 사진이다. 숫돌의 표면을 살펴보면 약간의 눈막힘 현상은 있으나 초음파 드레싱을 하지 않은 경우와 비교를 하면 크기나 양이 거의 무시할 정도이다.



(a) Dressing time = 1min (b) Dressing time = 2min



(c) Dressing time = 5min (d) Dressing time = 10min

Fig. 6 Effects of Ultrasonic In-Process Dressing

Fig. 6은 초음파 드레싱을 하지 않고 $V_w=20,000\text{mm}^3/\text{mm}$ 까지 가공하여 눈막힘 현상이 발생한 숫돌 (Fig. 4(a))을 이용하여 초음파 드레싱의 시간에 따른 숫돌의 눈막힘을 제거하는 효과를 알기 위한 실험 결과로서 1, 2, 5, 10분간 초음파 드레싱을 한 경우의 숫돌 표면 사진이다. 초음파 드레싱 시간이 길어질수록 눈막힘 현상이 줄어드는 것을 알 수 있다. 2분 정도 초음파 드레싱을 하면 숫돌의 눈막힘 현상이 거의 없어짐을 알 수 있었다. 그러나 10분 이상 초음파 드레싱을 하여도 제거되지 않는 것들도 있는데 이는 가공 중 발생한 열경화로 숫돌 표면에 늘어붙는 힘이 커서 초음파 드레싱만으로는 완전히 제거가 힘든 부분으로 생각된다.

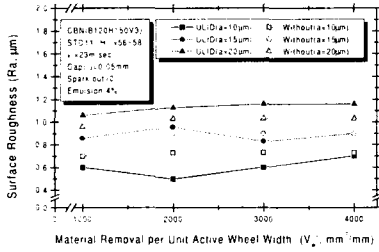
3.2.2 표면거칠기

Fig. 7은 CBN 숫돌을 이용하여 연삭깊이(a), 초음파 공구와 숫돌 사이의 거리(ℓ) 및 숫돌 단위 폭당 제거량(V_w)을 실험 변수로 하여 금형강을 가공할 때 초음파 인프로세스 드레싱(ULID)의 유·무에 따른 표면거칠기를 나타낸 그래프이다.

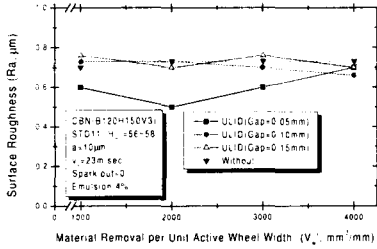
(a)는 연삭깊이를 10, 15, 20 μm 로 하여 $V_w=4,000\text{mm}^3/\text{mm}$ 까지 가공하였을 경우의 표면거칠기로서 연삭깊이가 10 μm 인 경우에는 초음파 드레싱을 한 경우가 표면거칠기 값이 낮았으나 연삭깊이가 20 μm 인 경우에는 오히려 표면거칠기 값이 큰 것을 알 수 있다. 이는 연삭깊이가 깊을수록 초음파 드레싱을 하지 않는 경우가 ULID를 이용하는 경우보다 눈막힘 현상이 빨리 발생하여 숫돌입자에 의한 정상적인 연삭이 이루어지지 않아서 표면거칠기 값이 낮아지는 것이다.

(b)는 초음파 공구와 숫돌 사이의 거리(ℓ)에 따른 초음파 드레싱의 효과를 알기 위하여 연삭깊이를 10 μm 으로 하고, 공구와 숫돌 사이의 거리를 0.05, 0.1, 0.15mm로 변화하면서 실험한 결과이다. 거리(ℓ)가 0.05mm 일 경우의 표면거칠기가 가장 좋았으며, 거리(ℓ)가 0.1, 0.15mm인 경우와 초음파 드레싱을 하지 않은 경우의 표면거칠기는 큰 차이가 없었다. 이것은 초음파 드레싱이 공구의 진동에 의한 충격력과 연삭유 내에 발생하는 캐비테이션의 폭발력에 의해 숫돌입자사이의 칩들을 제거하는 간접적인 드레싱 방법이기 때문에 숫돌과 공구 사이의 거리(ℓ)가 클 경우에는 이러한 힘의 전달이 미약하여 초음파 드레싱의 효과가 없어지기 때문이다.

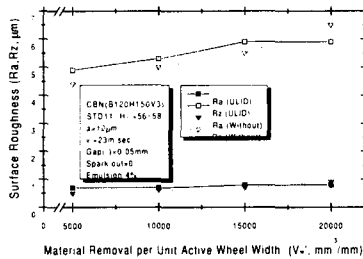
(c)는 초음파 인프로세스 드레싱을 하지 않고



(a) Surface roughness for different depth of cut(a)



(b) Surface roughness for different gap(ℓ)



(c) Influence of Ultrasonic In-Process Dressing on surface roughness

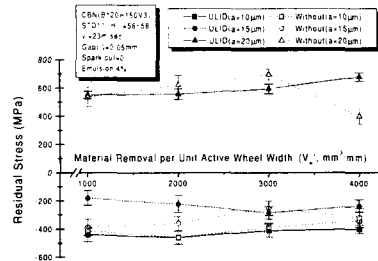
Fig. 7 Influence of ULID on surface roughness according to a, ℓ and V_w'

가공한 가공물과 $V_w'=400\text{mm}^3/\text{mm}$ 마다 2분씩 초음파 드레싱을 하면서 $V_w'=20,000\text{mm}^3/\text{mm}$ 까지 가공한 가공물의 슛돌 단위 폭 당 제거량(V_w')에 따른 표면거칠기를 나타낸 그래프로서 V_w' 이 증가할수록 표면거칠기도 나빠짐을 알 수 있다. 초음파 인프로세스 드레싱을 하지 않는 경우에는 Ra값의 변화는

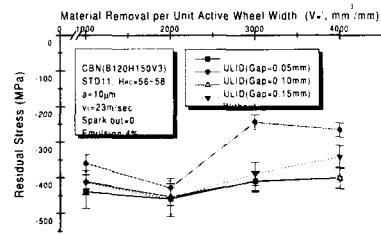
$0.4\mu\text{m}$, Rz값의 변화는 $2.1\mu\text{m}$ 이었으나, 초음파 인프로세스 드레싱을 하는 경우의 표면거칠기 변화는 Ra가 $0.1\mu\text{m}$, Rz의 변화가 $1.0\mu\text{m}$ 정도였다. 이 결과에서 알 수 있듯이 드레싱을 하지 않는 경우보다 초음파 인프로세스 드레싱을 하는 경우에 안정된 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

3.2.3 잔류응력

Fig. 8은 CBN 슛돌을 이용하여 금형강을 가공할 때 슛돌 단위 폭당 제거량(V_w')과 초음파 인프로세스 드레싱(ULID)의 유·무에 따른 잔류응력을 나타낸 그래프이다.



(a) Residual stress for different depth of cut(a)



(b) Residual stress for different gap(ℓ)

Fig. 8 Influence of ULID on surface roughness and residual stress according to a and ℓ

(a)는 연삭깊이를 10, 15, $20\mu\text{m}$ 로 하여 $V_w'=4,000\text{mm}^3/\text{mm}$ 까지 가공하였을 경우의 잔류응력으로서 연삭깊이가 $15\mu\text{m}$ 까지는 압축응력을 보이고 있으나, $20\mu\text{m}$ 에서는 인장응력을 나타내고 있다. 이것은 가공점에서의 물리적인 압축응력보다 가공물이 제거되면서 발생하는 열부하에 의한 인장응력이 크기 때문이다. 초음파 드레싱의 유·무에는 관계없이

V_w 에 따라 비슷한 잔류응력값을 나타내고 있으나, 초음파 드레싱을 하지 않고 연삭깊이를 $20\mu\text{m}$ 으로 하였을 경우에는 V_w 값이 $3,000\sim 4,000\text{mm}^3/\text{mm}$ 사이에서 갑자기 압축응력값이 증가함을 알 수 있다. 이것은 슷들의 눈막힘에 의해 정상적인 연삭이 이루어지지 못하여 가공물이 물리적인 압축력을 받기 때문에 나타나는 현상으로 생각되어진다.

(b)는 초음파 공구와 슷들 사이의 거리(ℓ)에 따른 잔류응력을 측정한 그래프이다. 초음파 드레싱의 유·무나 초음파 공구와 슷들 사이의 거리에 관계없이 V_w 값에 따른 잔류응력은 비슷한 경향을 나타내고 있다.

이상의 결과에서 초음파 인프로세스 드레싱은 슷들의 눈막힘을 방지하여 항상 깨끗한 슷들 표면을 유지함으로써 가공량이 증가하여도 표면거칠기의 변화가 적은 것을 알 수 있었다. 또한, 초음파 드레싱은 직접적으로 슷들에 힘을 가하는 것이 아니라 공구가 초음파 진동을 할 때 연삭유와의 진동 충격력과 연삭유 내에서 발생하는 캐비테이션의 폭발력으로 슷들입자 사이의 칩을 제거하는 간접적인 드레싱 방법이다. 그러므로 칩이 슷들입자 사이에 강하게 들어 붙기 전에 초음파 드레싱을 이용하여 칩을 제거하는 것이 슷들의 눈막힘 현상을 제거하는데 효과적이었다. 또한 가공 중에 연속적인 초음파 드레싱을 하지 않고 간헐적으로 하여도 슷들의 눈막힘 현상을 제거하는 충분한 효과가 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

초음파 인프로세스 드레싱을 이용하여 STD11 연삭 실험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 초음파 진동은 슷들입자 사이의 칩을 제거하여 슷들의 눈막힘 현상을 방지하는데 효과적이었다.
2. 초음파 인프로세스 드레싱(ULID)은 가공 중에 가공면 이외의 위치에서 드레싱을 함으로서 드레싱을 위해 가공을 중단할 필요가 없고 항상 일정한 슷들의 표면을 얻을 수 있었다.
3. 초음파 공구와 슷들 사이의 거리(ℓ)가 0.05mm 일 때 가장 초음파 드레싱의 효과가 좋았으며, 슷들의 눈막힘 현상($V_w=20,000\text{mm}^3/\text{mm}$)이 발생한 슷들을 이용하여 초음파 드레싱의 효과를 관찰

한 결과 약 2분 후에는 슷들의 눈막힘 현상이 거의 제거되었다.

4. $V_w=20,000\text{mm}^3/\text{mm}$ 까지 가공을 하였을 때, 초음파 진동을 이용하지 않는 경우에는 표면거칠기값(Ra)의 변화가 $0.4\mu\text{m}$ 정도이었으나, 초음파 인프로세스 드레싱(ULID)을 이용한 경우에는 Ra의 변화가 $0.1\mu\text{m}$ 로 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

5. V_w 값에 따른 잔류응력값은 초음파 인프로세스 드레싱(ULID)의 적용 유·무나 초음파 공구와 슷들 사이의 거리(ℓ)에 관계없이 비슷한 경향을 나타내고 있다.

참고문헌

1. Komanduri, R., "A New Technique of Dressing and Conditioning Resin Bonded Superabrasive Grinding Wheel," *Annal of CIRP*, Vol.29, pp. 239~243, 1980.
2. Tönshoff, H. K., Brinksmeier, E. Choi, H. Z., "Abrasive and their influence on force, temperatures and surface," *International grinding conference, SME Technical paper MR86-626*, June, 1986.
3. Choi, H. Z., "Temperaturmessung beim Schleifen," *Industrie Anzeiger*, 107, 79/80, pp. 44~45, 1985.
4. Ramesh Babu, N., Radhakrishnan V. and Murti, Y. V. G. S., "Investigations on laser dressing of grinding wheels-part I: a preliminary study," *ASME J. Engng Ind.* 111, pp. 244~251, 1989.
5. Ramesh Babu, N., Radhakrishnan V., "Investigations on laser dressing of grinding wheels-part II: performance of laser dressed aluminium oxide wheel," *ASME J. Engng Ind.* 111, pp. 253~261, 1989.
6. Ramesh Babu, N., Radhakrishnan V., and Murti, Y. V. G. S., "Performance of laser dressed grinding wheels," *Proc. 6th Intl. Conf. on Prod. Engrs*, Osaka, pp. 371~376, 1987.
7. Choi, H. Z., Lee, S. W., and Park, S. I., "A Study the Grinding Technologies for Manufacturing Ball Screws," *CIRP International Seminar on Improving Machine-Tool Performance*,

- pp. 475~486, 1998.
8. Yasushi Ikuse, Takeshi Nonokawa, Noritugu Kawabata, Takehiko Kamo, Yoshihiko Yuzawa and Kuniaki Unno, "Development of New Ultrasonic Dressing Equipment," J. of JSPE, Vol. 61, No. 7, pp. 986~990, 1995.
 9. Yeiji Iasui, Hiroshi Nakazono, Hideo Tsuwa, "Improvement of Grinding Performance by Ultrasonic Dressing," J. of JSME, Vol. 39, No. 10, pp. 54~59, 1973.
 10. BerlyaeV et al, B. V., "The Effect of Ultrasonic Wheel Dressing on the Grinding Process," Machines & Tooling, Vol. 49, No. 11, pp. 53~54, 1978.