

다기공 연속숫돌의 단속비에 의한 표면특성 분석에 관한 연구

김정두*, 강윤희**

A Study on the Analysis of Surface Characteristics According to Intermittent Ratio of Discontinuous Grinding Wheel with Multi-Porous Grooves

Jeong-Du Kim*, Youn-Hee Kang**

ABSTRACT

Grinding of stainless steel, aluminium alloy, copper alloy, and titanium alloy are difficult to obtain the high quality finish, because they have the mechanical properties such as low hardness, high toughness. The low hardness and the high toughness result in the loading of wheel and the poor surface finish. In order to perform the grinding operations for these sorts of materials easily, the discontinuous grinding wheel with multi-porous grooves has been newly developed. The multi-porous grooves in the discontinuous grinding wheel were formed during grinding wheel manufacturing process.

In this paper, discontinuous grinding wheels having intermittent ratio 0.66, 0.81 and number of grooves 18, 32 have been manufactured and grinding surface characteristics of these grinding wheels for SUS304 have been analyzed. Discontinuous grinding temperature according to intermittent ratio has been also estimated by simulation. The discontinuous grinding wheels increase the grinding performance considerably. It is desirable to use the discontinuous grinding wheel in grinding the materials with high efficiency and accuracy.

Key Words: Discontinuous Grinding Wheel(단속 연속숫돌), Multi-porous Grooves(다기공홈), Intermittent Ratio(단속비), Surface Roughness(표면거칠기), Grinding Accumulative Quantity(연삭누적량), Grinding burr(연삭버)

1. 서론

최근 항공우주, 자동차 산업 등에 널리 사용되는 스테인레스강, 알루미늄합금, 동합금, 티타늄 등의 고인성 재료는 현존하는 범용연삭숫돌(홈을 형성시키지 않은 연속연삭숫돌)으로 연삭하면 연삭숫돌의 눈메움(loading) 현

상과 공작물 표면상의 연삭누름(grinding burn) 현상이 발생하여 가공성이 대단히 나쁜 것으로 알려지고 있다. 절연성이 낮은 강이나 열처리강의 고능률 연삭시 공작물의 연삭누름 현상과 균열 현상을 없애기 위한 방법으로 연삭숫돌의 작업표면에 홈을 형성시킨 단속 연속숫돌을 이용하면 매우 효과적인 것으로 보고되고 있다.^(1,2,3)

* 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과

** 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 대학원

본 연구에서는 연삭숫돌 제작단계에서 홈을 형성하고 홈에 기공을 형성시키는 결합재를 채워 성형시킨 정체형 다기공홈형 단속 연삭숫돌을 이용하여 스테인레스강 (SUS304)의 연삭표면 특성 및 다기공홈형 단속 연삭숫돌의 연삭성능을 실험연구하고 연삭온도 해석 시뮬레이션을 수행하여 다기공홈형 단속연삭숫돌의 연삭기구를 고찰하였다.

2. 다기공홈형 단속 연삭숫돌의 구조

Fig.1 a)는 연삭숫돌표면에 센터의 방향과 평행 되게 직선홈을 형성시킨 구조의 직선형 단속 연삭숫돌(STG : Straight Type Discontinuous Grinding Wheel)을 나타낸 것이다. 단속 연삭숫돌에 의한 연삭가공은 홈부분이 가공에 거의 영향을 주지 않기 때문에 연삭가공이 단속적으로 이루어지며 각각의 홈 모서리와 인접한 숫돌앞날 (Leading edge)의 마멸은 연삭이 끝나는 숫돌뒷날 (Trailing edge)의 마멸보다 크게 발생하게 된다. 이러한 부분적 마멸상태를 개선하기 위하여 홈을 숫돌의 측면에서 숫돌센터와 일정한 각도(γ)로 형성시켜 연삭 시작부분의 모서리 각도를 둔각으로 설정하였다. 또한 다기공홈층을 숫돌이 이용할 수 있는 깊이까지 형성시켜 숫돌의 이용률을 범용 연삭숫돌과 동일하게 하였다.

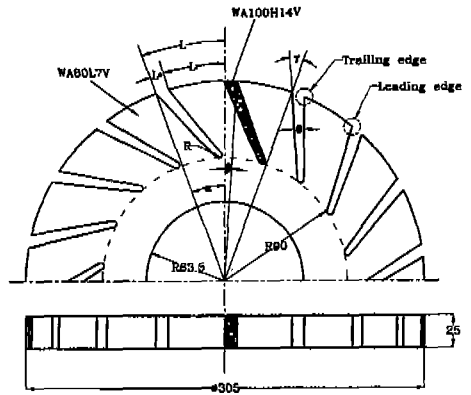
단속연삭에서 연삭작업에 참여하는 숫돌부분과 홈부분에 대한 길이 비례는 연삭공정에 매우 큰 영향을 미치는 파라미터이다. 숫돌이 연삭에 참여하는 비율을 단속비 (η)라고 할때 단속비 값은 식(1)과 같다.

$$\eta = \frac{L_1}{L_0 + L_1} \quad (1)$$

여기서 L_0 은 숫돌 작업면에서의 홈 길이 (mm), L_1 은 숫돌 작업면에서 연삭에 참여하는 숫돌의 길이(mm)를 각각 나타내며 단속비를 연삭숫돌의 마멸에 관계없이 일정하게 보장하기 위해 홈을 θ 각으로 형성시켜 두께를 깊

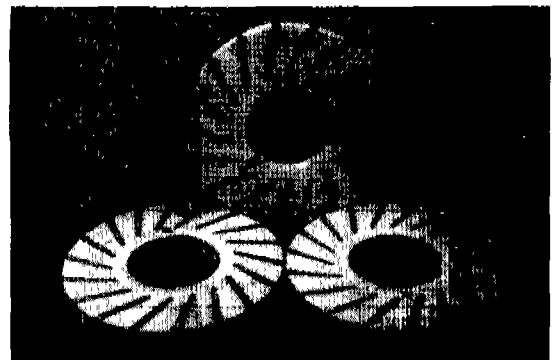
이에 따라 변화하게 하였다.

Table 1은 제작한 단속 연삭숫돌의 사양으로써 단속비를 0.66과 0.81, 홈수는 32와 18로 선정하였으며, 기호 STG32-8, STG18-8로 직선형 홈수와 단속비 10배의 정수로 각각 표시하였다. 숫돌의 규격은 치수가 305×127×25 인 평형숫돌으로 숫돌본체는 WA60L7V로 제작하고, 홈부분은 숫돌입자의 입도가 본체의 숫돌입자의 입도보다 높은 것으로 결합도가 연하며 조적이 가장 거친 WA100H14V의 숫돌으로 65%이상의 기공율을 갖춘 구조로 제작하였다. 본 숫돌에서 홈부분은 연삭시 연삭력을 받게 되면 숫돌본체부분보다 매우 쉽게 마멸되어 거의 연삭작업에 영향을 미치지 않는 단속연삭을 실현하게 된다.



L: Maximum length of groove L1: Effective grinding wheel length
 R: Radius of groove alpha: Angle of maximum length of groove
 theta: Angle of groove gamma: Rake angle
 delta: Dividing angle

a) Schematic diagram of the discontinuous grinding wheel



b) Photograph of the discontinuous grinding wheel

Fig. 1 Straight type discontinuous grinding wheel(STG) with multi-porous grooves

Table 1 The specifications of discontinuous grinding wheels

Grinding wheel	Number of groove	Dividing angle α	Maximum length of groove L_0 (mm)	Effective grinding wheel length L_1 (mm)	$L=L_0+L_1$ (mm)	Intermittent ratio $\eta = L_1/(L_0+L_1)$
STG18-6	18	20	18	37.2	55.2	0.66
STG18-8	18	20	10	43.2	53.2	0.81
STG32-8	32	12	6	23.9	29.9	0.81

Fig.1 b)는 제작된 단속 연삭숫돌을 나타낸 것으로서 대기공흡 부분은 다음과 같은 2종류의 구조로 제작하였다.

1) 본체의 숫돌입자 입도보다 높은 숫돌입자로 결합도가 연하며 조적이 가장 거친 WA100H14V의 숫돌으로 65%이상의 기공율을 갖춘 구조로 제작하였으며, 본문에서는 기호 STG18-8(LN)으로 표시한다. 이러한 숫돌의 홈 부분은 연삭시 연삭력을 받게 되면 숫돌 본체 부분보다 매우 쉽게 마멸되어 거의 연삭 작업에 참여하지 않는 공간이 형성됨으로서 단속 연삭을 실현할 수 있다.

2) 고체 윤활제가 코팅된 스티로폼과 접착제를 홈에 채우고 응고시킨 구조로 제작하였으며, 기호 STGs18-8, STGs18-6, STGs32-8로 표시한다. 이러한 숫돌의 홈 부분은 연삭시 마찰과 연삭력에 의해 쉽게 마멸되어 단속 연삭을 실현하며 고체 윤활제가 코팅된 스티로폼은 윤활 작용을 하게 된다.

3. 대기공흡형 단속 연삭숫돌의 연삭성능

대기공흡형 단속 연삭숫돌의 연삭성능 및 연삭표면특성 평가실험은 평면연삭으로 수행하였으며 공작물로는 난삭 재료 알려진 SUS304가 이용되었다. Table 2와 Table 3은 각각 SUS304의 화학적 성분과 기계적 특성을 나타낸 것이다. 또한 실험조건은 Table 4와 같다.

Fig.2는 연삭깊이를 10 m/pass로 설정하고 SUS304를 플런지 연삭(plunge grinding)을 할 경우의 숫돌이동량과 가공물의 실제 제거량과의 관계를 나타낸 것이다. 연삭누적량(grinding accumulative quantity)이 존재하기 때문에 숫돌이동량과 가공물 실제 연삭제거량은 같지 않다. 범용숫돌의 경우 숫돌이동량이 증가함에 따라

Table 2 Chemical components of SUS304

component	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
%	<0.08	<1.00	<2.00	<0.045	<0.030	8.00~10.50	18.00~20.00

Table 3 Mechanical properties of SUS304

yield strength Mpa	ultimate strength Mpa	% elongation	HB	HRC	HV
>276	>568	>40	<187	<90	<200

Table 4 Grinding conditions

Grinding wheel	conventional wheel(G) WA60L7V(ϕ 305×25×127) STG18-8(LY)(solid lubricant) STG18-8(LN) STGs18-8, STGs18-6, STGs32-8
Workpiece	SUS304, 100×50×10mm
Dressing condition	dressing depth 20 μ m, 10 μ m, 5 μ m dressing speed 60mm/min
Grinding speed	24m/s(1800rpm)
Table speed	9.0m/min
Cross feed	1.25mm/2pass

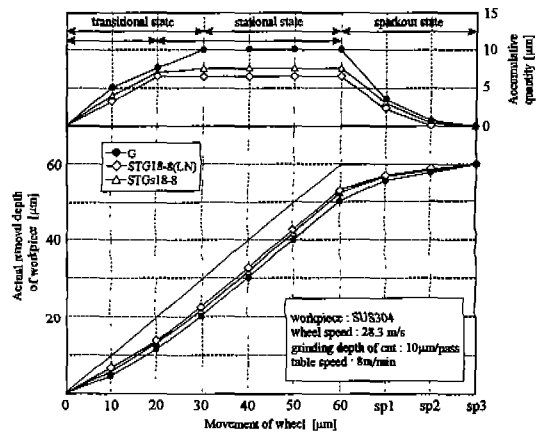


Fig. 2 Grinding accumulative quantity of SUS304

연삭누적량이 점차 증가하는 과도연삭상태(transitional grinding state)를 거쳐 숫돌이동량이 30 m에 도달하면 연삭누적량이 10 m으로 일정한 정상연삭상태(stational grinding state)로 나타났다. 그리고 숫돌을 이동하지 않은 상태로 연삭을 계속하면 연삭누적량이 점차 줄어들면서 스파크아웃상태(sparkout state)의 연삭이 이루어졌다. 대기공흡형 단속 연삭숫돌의 정상연삭상태는 숫돌이동량이 범용숫돌의 경우보다 작은 20 m에서 나타났으며 연삭누적량도 STG18-8(LN) 숫돌이 8 m, STGs18-8 숫돌이 7 m으로 범용숫돌보다 적게 나타났다. 연삭공정에서 연삭저항에 의한 연삭시스템의 변형 및 공작물 표면의 소성변형등의 원인으로 일반 호칭연삭깊이와 실제연삭깊이는 같지 않다. 실선은 연삭누적량이 없는 이상적인 연삭깊이를 나타내며 숫돌의 연삭누적량이 적을수록 연삭성능이 좋은 것을 의미한다.

Fig.3은 SUS304를 플런지연삭할 경우, 숫돌의 이동

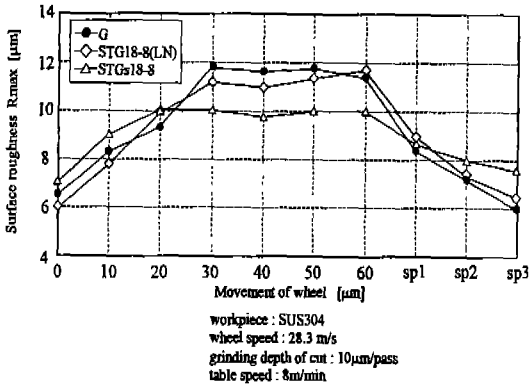


Fig. 3 Variation of surface roughness in plunger grinding process for SUS304

량에 따른 가공물 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 과도연삭상태에서는 표면거칠기가 슷들이동량의 증가에 따라 점차 커지며 정상연삭상태에서는 일정한 크기로 지속되어 스파크아웃상태에서 급속히 감소되는 형태로 연삭누적량의 변화와 같은 형태로 나타났다. 다기공흡형 단속 연삭스톨에 의한 연삭 표면거칠기는 범용스톨에 의한 연삭표면에 비해 전체적으로 작았다. 이러한 현상은 연삭누적량이 주로 가공물 표면의 소성변형에 의한 표면거칠기에 의해 좌우되고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 SUS304의 연삭깊이와 연삭비의 관계를 나타낸 것이다. 연삭비는 연삭깊이가 20 m에서 급속히 감소되는 추세를 나타내고 있으며, STGs18-8스톨의 연삭비는 범용스톨의 연삭비보다 1.1~1.2배 높고, STG18-8(LN)스톨은 범용스톨과 비슷한 연삭비를 나타내었다. 연삭깊이가 30 m로 크면 범용스톨으로 연삭한 가공물 표면에는 연삭누름(grinding burn)이 발생하지만 단속 연삭스톨에 의한 연삭에서는 나타나지 않았다. 이것은 다기공흡형 단속연삭스톨에 의한 연삭온도가 범용스톨에 의한 연삭온도보다 작게 발생하기 때문으로 사료된다.

Fig. 5는 SUS304를 20µm의 연삭깊이로 연삭할 때, 연삭깊이의 증가에 따른 가공물 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 범용스톨의 경우는 연삭깊이가 6m 정도에 달하면 표면거칠기가 급격히 증가하는 급속 마멸단계에 진입하지만, 단속 연삭스톨 STG18-8 (LN)의 경우는 여전히 일정한 크기의 표면거칠기를 유지하는 정상마멸단계에 있었다. 이러한 현상은 다기공흡형 단속 연삭스톨의 단속연삭효과에 의해 칩배출영역이 넓어지기 때문에 범

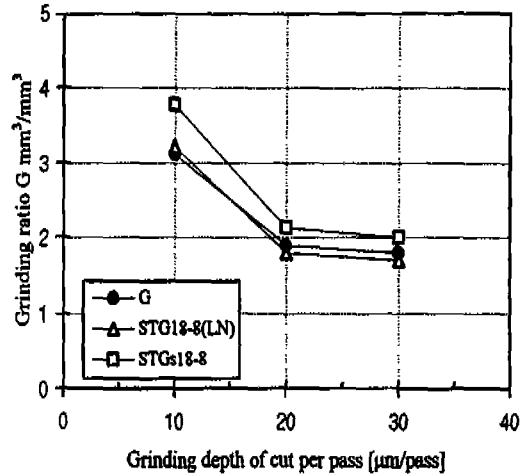


Fig. 4 Relationship between grinding ratio and grinding depth of cut for SUS304

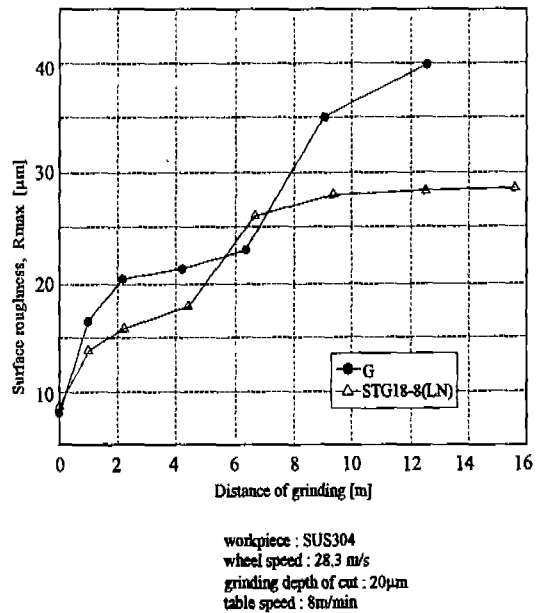
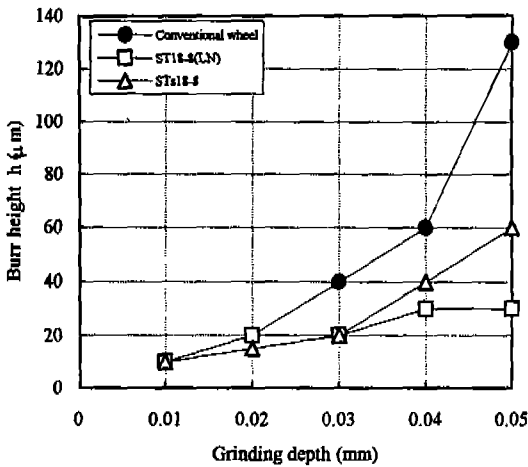


Fig. 5 Relationship between surface roughness and distance of grinding for SUS304

용숫돌에 비해 눈베움현상이 적게 나타나기 때문이다.

폭이 8mm인 가공물을 일정한 연삭깊이로 1pass 평면 연삭을 한 후, 가공물의 측면버(side burr)와 연삭 아웃(grinding out)측의 끝면버(end burr)의 높이를 측정하여 버에 미치는 단속연삭효과를 실험 분석하였다.

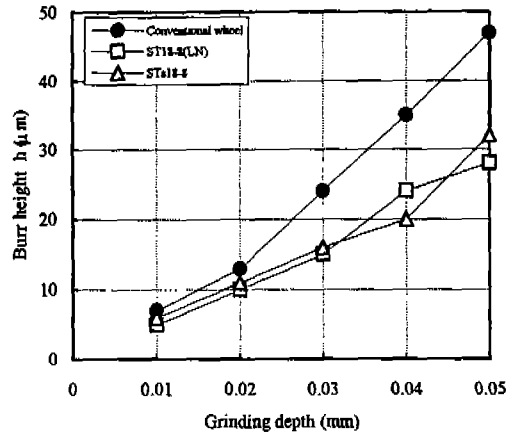
Fig.6은 SUS304의 연삭깊이에 따른 끝면버 높이의 변화를 나타낸 것이다. 단속 연삭숫돌에 의한 단속연삭효과로 버의 높이가 범용숫돌에 의한 연삭버에 비해 SUS304는 2배정도 감소되었으며, 연삭깊이가 클수록 단속연삭효과가 크게 나타났다.



grinding wheel : WA60L7V
grinding speed : 24m/s (1800rpm)
table speed : 9.0m/min
grinding width : 8mm, cross feed : 0

Fig.6 Effect of the sort of grinding wheel on the end burr height for SUS304

Fig.7은 SUS304의 연삭깊이에 따른 측면버 높이의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 단속 연삭숫돌에 의한 연삭 측면버의 높이는 범용숫돌에 의한 연삭버에 비해 1.5배정도 감소되는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 다기 공함형 단속 연삭숫돌에 의해 버의 크기가 감소하는 현상은 단속연삭에 의한 냉각 및 윤활 효과에 의해 가공물 표면의 소성변형이 감소되기 때문이라고 사료된다. 이와 같은 결과는 앞에서 언급된 연삭누적량으로도 설명될 수 있다.

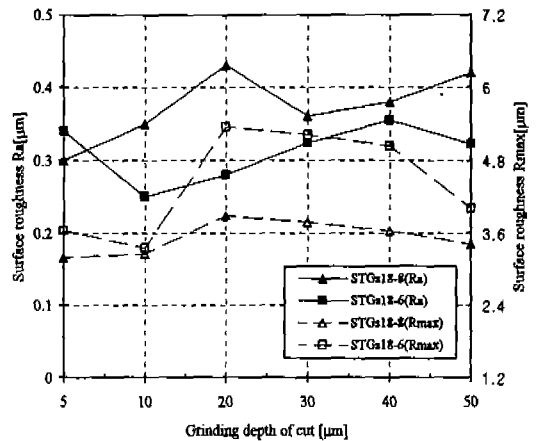


grinding wheel : WA60L7V
grinding speed : 24m/s (1800rpm)
table speed : 9.0m/min
grinding width : 8mm, cross feed : 0

Fig.7 Effect of the sort of grinding wheel on the side burr height for SUS304

4. 다기공함형 단속 연삭숫돌에 의한 연삭표면 특성

Fig.8은 연삭 표면거칠기에 미치는 다기공함형 단속연삭숫돌의 단속비의 영향을 나타낸 것이다. 단속 연삭숫돌



grinding wheel : WA60L7V, workpiece : SUS304
grinding speed : 24m/s (1800rpm)
table speed : 9.0m/min, feed : 1.25mm/2pass

Fig.8 Effect of intermittent ratio on surface roughness for SUS304

의 단속비는 각각 0.66과 0.81이며 홈의 수는 모두 18개이다. 표면거칠기 Ra에 대해서는 단속비가 작은 단속 연삭숫돌의 경우가 단속비가 큰 단속 연삭숫돌의 경우보다 작은 표면거칠기를 나타내었으나, 표면거칠기 Rmax에 대해서는 단속비가 큰 단속 연삭숫돌의 경우가 더 작은 표면거칠기를 나타내었다. 같은 홈의 수를 갖는 숫돌의 경우 단속비가 작은 단속 연삭숫돌은 홈의 길이가 큰 단속 연삭숫돌이므로 냉각효과가 더 크다. 따라서 표면거칠기 Ra의 경우는 단속비가 작은 숫돌이 작은 표면거칠기를 갖는다고 사료되고 단속비가 작은숫돌은 연삭에 참여하는 연삭숫돌부분이 더 많은 부분을 연삭해야하므로 표면거칠기 Rmax에 대해서는 큰 단속비의 숫돌이 작은 표면거칠기를 갖는 것으로 사료된다.

Fig.9는 연삭표면거칠기에 미치는 다기공홈의 개수의 영향을 나타낸 것이다. 홈의 수는 18과 32이며 단속비는 모두 0.81이다. 홈의 수가 많을수록 더 양호한 표면을 얻을 수 있었다. 이것은 같은 단속비의 경우 홈이 많이 형성된 단속 연삭숫돌이 홈의 수가 적은 경우보다 주기적인 냉각 및 가열의 빈도수가 더 많아지게 때문으로 사료된다.

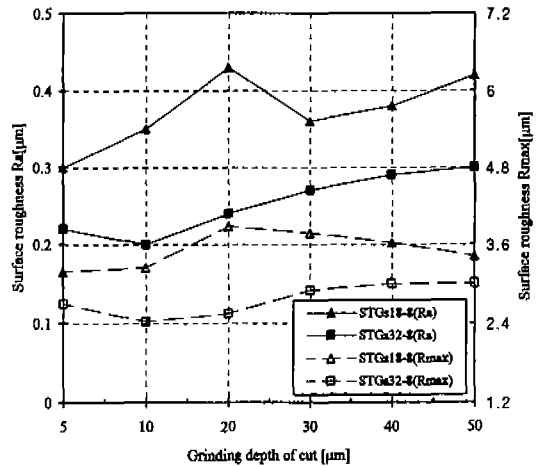
Fig.10은 연삭가공된 SUS304의 표면 사진을 나타낸 것이다. 범용숫돌로 가공된 표면에 깊은 연삭스크래치가 발생하였음을 알 수 있다. 반면 다기공홈형 단속 연삭숫돌 STG18-8(LN), STGs18-8, STGs32-8에 의한 가공표면에는 범용숫돌에서 나타났던 깊은 연삭스크래치가 거의 발생하지 않았다. 다기공 단속 연삭숫돌의 이와 같은 연삭효과는 연삭공정에서 다기공홈이 연삭력을 받아 홈층의 일부 재료가 탈락하여 커다란 공간을 형성함으로써 단속연삭이 이루어지며 연삭액이 충분히 가공구역까지 공급되고 연삭칩 배출공간이 커지기 때문이라고 사료된다.

5. 단속연삭의 연삭온도 해석 시뮬레이션

실험에서 증명된 우수한 연삭성능을 갖는 다기공홈형 단속 연삭숫돌의 연삭기구를 알아보기 위하여 단속연삭의 연삭온도 해석 시뮬레이션을 수행하였다.

5.1 단속연삭의 열전도

식 (2)는 단속 연삭숫돌에 적합한 열전도 방정식이다. 여기에서 T 는 온도, ρ 는 밀도, c 는 비열, k 는 열전달계수이며, x, y, z 는 각각 직각좌표축을 나타낸 것이다.



grinding wheel : WA60L7V, workpiece : SUS304
grinding speed : 24m/s (1800rpm)
table speed : 9.0m/min, feed : 1.25mm/2pass

Fig.9 Effect of the number of grooves on surface roughness for SUS304

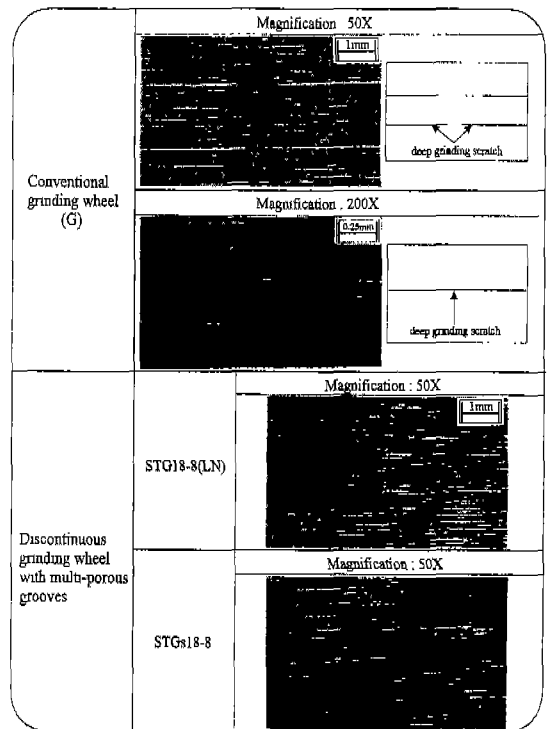


Fig.10 Photograph of the ground surface of SUS304

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

여기에서 열전달계수(thermal conductivity:k)는 상수로 가정하고 연삭숫돌 폭방향의 열의이동을 무시하면 2차원으로 해석할 수 있다. 식 (3)은 식 (2)를 테일러 급수전개하고 미소영역의 x, y 분할이 같은 경우의 2차원 열전도방정식이다. 여기에서 내부 열발생 (\dot{q})은 없다.

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + \left[1 - \frac{4\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \right] T_{m,n}^p \quad (3)$$

5.2 단속연삭의 열 경계조건

Fig.11은 단속 연삭숫돌의 열원의 모델과 열경계조건을 나타낸 것이다. 여기에서 ①은 연삭숫돌과 공작물의 접촉부분이며 균일열원으로 가정하였다. ②, ③, ④와 ⑤의 열 경계조건은 연삭유에 의한 균일한 냉각조건으로 가

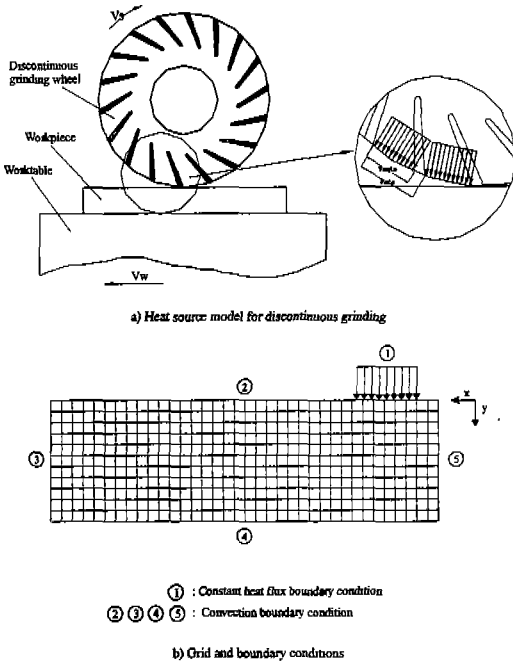


Fig.11 Heat source model and boundary conditions for simulation of grinding surface temperature

정하였다. 일반 연삭가공은 연삭숫돌과 공작물의 접촉부분이 일정한 속도로 이동하지만 단속 연삭숫돌은 균일 열전달과 단속에 의한 냉각이 주기적으로 반복되면서 이동된다. 연삭숫돌의 원주면상의 길이(l_g), 단속되는 원주길이(l_b)와 열원의 단속주기(f_w)는 식 (4)와 같이 단속비(η), 단속 잇수(n), 연삭숫돌의 회전속도(N), 연삭깊이(d), 이송속도(v_w)의 함수로 나타낸다.

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{Dd} \\ l_g &= \frac{\pi D}{n} \cdot \eta \\ l_b &= \frac{\pi D}{n} \cdot (1 - \eta) \\ f_w &= N \cdot n \end{aligned} \quad (4)$$

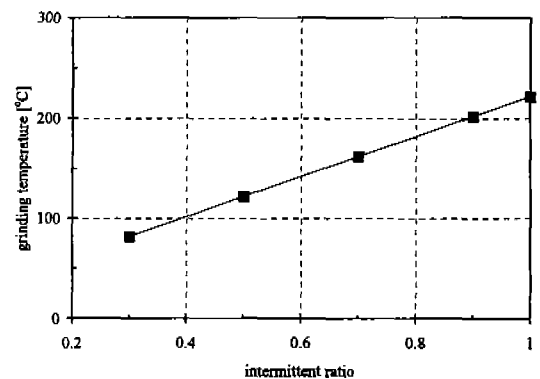
여기에서 l 은 연삭숫돌과 피삭재의 접촉길이이며 단속 연삭숫돌의 열 해석에 사용한 가정은 다음과 같다.

- ① 피삭재의 폭방향은 반 무한대이다.
- ② 연삭열원은 폭방향으로 반 무한대이다.
- ③ 열원의 크기는 체적제거량에 비례한다.

위와 같은 가정을 이용하면 연삭면의 온도해석을 2차원으로 해석할 수 있으며 유한차분법에 의한 해석이 간편해진다.

5.3 단속연삭 온도의 시뮬레이션 결과

Fig.12는 단속비에 따른 연삭온도를 시뮬레이션한 결



grinding wheel : WA60L7V, workpiece : SUS304
grinding speed : 1700rpm, grinding depth of cut : 15 μ m
table speed : 5m/min, grinding fluid : emulsion type

Fig.12 Relationship between grinding temperature and intermittent ratio

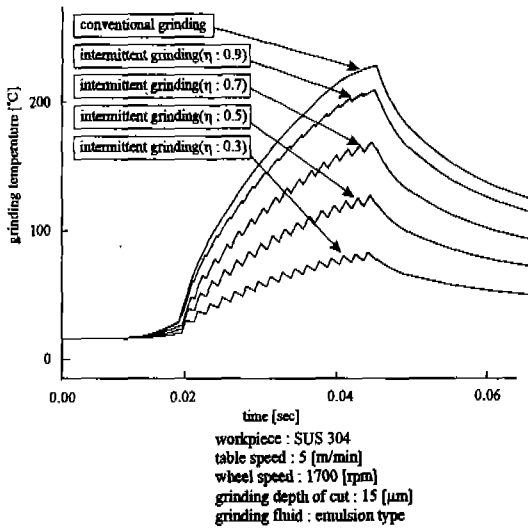


Fig.13 Comparison of grinding temperature between intermittent and conventional grinding by simulation

과이다. 연삭온도는 단속비가 증가함에 따라 증가하였다. 이는 단속비가 증가하면 열원의 유지시간이 증가하고 냉각시간이 짧아지기 때문이다.

Fig.13은 시간에 대한 연삭온도의 증가곡선을 나타낸 것이다. 일반 연삭가공의 온도는 연속적으로 상승하지만 단속 연삭가공의 경우는 단속의 영향에 의하여 연삭온도가 상승과 하강을 반복하면서 증가하기 때문에 연삭온도가 낮은 것으로 분석되었다. 온도변동의 폭은 단속비가 증가함에 따라 감소하며 연삭온도는 단속비가 증가함에 따라 일반 연삭숫들의 연삭온도로 수렴한다. 단속 연삭가공은 주기적인 냉각작용으로 연삭온도가 감소하지만 단속비가 증가하면 냉각효과가 감소하여 연삭온도가 증가하게 된다.

6. 결론

다기공흡형 단속 연삭숫들을 개발하고 스테인레스강의 연삭실험과 단속비에 따른 연삭온도 해석 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 65%이상의 기공으로 구성되어 있는 다기공흡형은 연삭공정에서 쉽게 탈락되어 단속연삭을 실현할 수 있었다.

2. 시뮬레이션을 수행한 결과 단속 연삭숫들에 의한 연삭온도는 주기적인 상승과 하강을 반복하기 때문에 범용숫들에 비해 상대적으로 낮은 연삭 온도를 나타내었다.
3. 단속 연삭숫들에 의한 연삭가공은 연삭액이 충분히 가공영역까지 공급되어 냉각 및 윤활효과가 높기 때문에 가공 표면거칠기가 작고 연삭비도 범용숫들에 비해 1/2정도로 작게 발생하였다.
4. 다기공흡형 단속 연삭숫들은 연삭누적량이 적고 숫돌수명이 길며 연삭부름 현상을 억제시키며, 특히 스테인레스강과 같은 고인성 재료의 연삭과 연삭깊이가 큰 고능률 연삭에서 다기공흡형 단속 연삭숫들은 더욱 우수한 연삭성능을 나타내었다.

참고 문헌

1. K. Nakayama, J. Takaji and T. Abe, "Grinding Wheel with Helical Grooves-An Attempt to Improve the Grinding Performance", CIRP Annals, Vol.25, No.1, pp.133-138, 1977.
2. Tetsuya Suto, Tohru Waida, Hosei Noguchi and Hideo Inoue, "High Performance Creep Feed Grinding of Difficult-to-Machine Material with New-type Wheels", Japan Soc. of Prec. Eng., Vol.24, No.1, pp.39-45, 1990.
3. 김정두, 김동섭, 강윤희, 이영서, "다기공흡형 단속 지석의 개발에 관한 연구(I)", 한국정밀공학회지, 제13권, 제8호, pp.52-59, 1996.
4. H.W.Zheng, H. Gao, "A General Thermal Model for Grinding with Slotted or Segmented Wheel", CIRP Annals, Vol.43, No.1, pp.287-290, 1994.
5. T.Suto, T.Waida, H.Noguchi and M.Rezaei, "Creep Feed Grinding of Ceramic-Matrix Composites with a Segmented & Perforated Wheel", Bull. Japan Soc. of Prec. Eng. Vol.24, No.3, pp.227-228, 1990.