

평면연삭에서 연삭력 변화와 슷돌수명

최성삼*, 구 양**, 곽재섭**, 하만경**, 박노광***

Variation of Grinding Force and Wheel Life in Surface Grinding

Choi Soung Sam*, Koo Yang**, Kwak Jae Seob**, Ha Man Kyong** and Park No Kwang***

ABSTRACT

In the grinding process, the degree of the sharpness in wheel grain affects the surface roughness and the dimensional accuracy. If a wheel with dull grains is used, the grinding force will be increased and the surface roughness deteriorated. To produce a precision component, the magnitude of parameters related to the wear amount of a grinding wheel has to be limited. In this study, a variation of the grinding force and the surface roughness were measured to seek the machining characteristics of the WA and CBN wheels. From the wear amount of the grinding wheel and the removal rate of workpiece, the grinding ratio was calculated. And also the wheel life was determined at a rapid decreasing point of the grinding ratio. The difference between the surface of wheel-workpiece before grinding and after wheel life was clearly verified with a microscopic photo.

Key Words : Grinding Force (연삭력), Surface Roughness (표면거칠기), Wear Amount (마모량), Wheel Life (연삭수명)

1. 서론

최근 기계산업에서는 고정밀 고속가공으로 인하여 항공, 의료산업과 같은 각종 산업분야에서는 고정도, 고품질을 요구하는 부품이 증가하고 있다. 따라서, 기계가공의 마무리 공정에 속하고 고정도의 표면과 치수정밀도를 얻을 수 있는 연삭가공의 중요성이 더욱 부각되고 있다.

연삭가공(Grinding operation)은 입자(Grain)에 의한 고속절삭으로 초경합금, 티타늄, 텅스텐 등과 같은 고경도강에서 경질고무, 알루미늄, 동합금, 등과 같은 비교적 연질의 재료까지 다양한 종류의 공작물을 가공할 수 있는 절삭가공으로 아주 적은 양의

절입깊이를 사용하므로 형상 및 가공정도가 높고, 가공품위와 표면거칠기가 양호한 반면 공정에 관여하는 변수가 다양하고, 절삭조건 사이의 상관성이 비선형적이고, 과다한 열 발생과 형상오차가 발생하기 때문에 숙련자의 경험과 감각에 의존해야 하는 단점이 있다.⁽¹⁾

연삭가공에서 실제로 연삭작용을 하는 것은 슷돌작업면상에 돌출되어 있는 다수의 연삭입자의 절삭날이다. 그러므로 절삭날의 끝모양이 연삭성능에 지대한 영향을 줄뿐만 아니라 다듬질면의 거친기 및 치수 정밀도에도 크게 영향을 주게 된다.⁽²⁾ 그러므로 슷돌의 종류와 연삭재료에 따른 여러 가지 절삭조건이 연삭입자에 미치는 영향을 분석하여 정량

* 2001년 6월 8일 접수
* 부경대학교 기계공학과 대학원
** 부경대학교 기계공학부
*** 한국기계연구원 재료공정연구부

화된 파라메타를 만들 수 있다면 품위가 우수한 제품을 생산 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 여러 가지 재료를 WA숫돌과 CBN숫돌을 사용하여 연삭깊이, 공작물의 이송속도에 변화를 주었을 때의 연삭력과 표면거칠기(R_a), 숫돌마모량을 측정하였다. 그리고 공작물과 숫돌의 표면을 금속현미경(Microscope)으로 촬영하여 표면 거칠기와 연관한 미시적 관찰을 실시하였다. 또한 가공횟수에 따른 숫돌의 마모량을 측정하고 연삭비(Grinding Ratio)를 구하였고, 이에 따른 연삭력을 구함으로써 숫돌의 연삭수명을 예측하고자 하였다. 이 실험은 절삭조건과 휠의 종류 및 재료의 종류가 다양하지 못하지만 연삭가공의 정량화된 파라메타를 만들기 위한 기초연구가 되었으면 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 연삭력

연삭가공 중에 연삭숫돌에 작용하는 힘을 연삭력 또는 연삭저항이라 한다. 연삭숫돌은 공작물에 접촉하므로, 숫돌에 가해지는 연삭력과 크기는 같고 방향이 반대인 힘이 공작물에 작용한다. 따라서 연삭력의 크기는 공작물에 작용하는 힘을 공구동력계 등을 이용하여 측정하여 나타내고 있다. 특히 다른 가공에서와는 달리 연삭가공에서의 절삭력은 법선분력(F_n)이 가장 크게 나타난다고 하는 것이 중요한 사항이다. 법선분력을 구하는 일반화된 이론식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

$$F_n = m \cdot n_s = \lambda \cdot k_s \cdot f \cdot t \cdot \frac{v_s}{v_w} \quad (1)$$

여기서, n_s 는 연삭입자 한 개의 법선방향의 연삭력이고, λ 는 접선방향과 법선방향의 연삭력 비를 나타낸다. 또한 k_s 는 비연삭저항을 나타내며, f 는 이송, t 는 연삭깊이, v_s 와 v_w 는 연삭숫돌의 주 속도와 공작물의 속도를 나타낸 것이다. 한편 Fig. 1에 나타난 것과 같이 평면연삭에서 동시 연삭날의 수 m 은 다음과 같이 표현가능하다. 여기서 l 은

$$m = \frac{l \cdot f}{\mu^2} \quad (2)$$

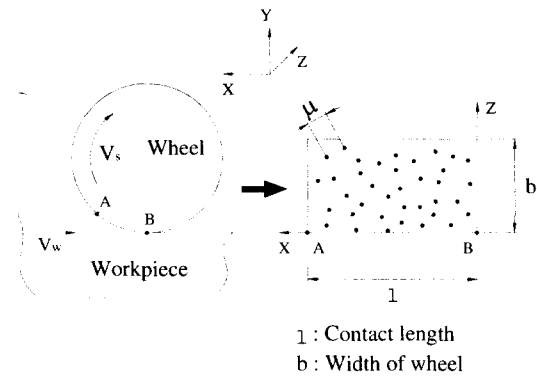


Fig. 1 Two dimensional dispatch for contact area of wheel

연삭가공 중에 공작물과 숫돌이 접하는 접촉호의 길이를 나타낸 것이며, μ 는 절삭날의 평면적 평균거리를 나타낸 것이다. 따라서 접촉호의 길이가 커지면 이론적 연삭력은 증가하고, 이송과 연삭숫돌의 주속도가 빠를수록 법선 연삭력은 증가하는 것을 알 수 있다.

2.2 연삭비

연삭가공에서 연삭의 경제성을 현실적으로 평가하기 위해서는 얼마나 휠이 제 성능을 발휘하는가를 알아야한다. 이 휠 성능의 유용한 지표가 되는 것이 연삭비(G)이다.⁽⁶⁾

연삭비는 주어진 시간에 제거된 공작물의 체적을 일정한 조건 하에서 같은 시간에 소모된 휠의 체적으로 나누어 구할 수 있다. 알맞은 속도로 가공중인 작업에 알맞은 휠의 사용에서도 다양한 재료 제거율이 가능하다. 낮은 재료 제거율은 생산성은 떨어지나 휠의 수명을 연장시키고, 높은 재료 제거율은 약간의 휠 수명의 희생으로 생산성을 향상시킨다. 대부분의 가공현장에서 재료 제거율은 제품당 최소 총연삭비용에 기초하여 선택된다. 일반적으로 최소 총연삭비용점은 제품당 휠비용과 제품당 인건비, 간접비가 거의 같은 점에서 구해진다. 연삭비를 구하는 일반화된 이론식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_w = b \cdot \Delta t \cdot l \quad (3)$$

$$V_s = 2 \pi \cdot b \cdot \Delta r \quad (4)$$

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (5)$$

여기서 V_w 는 공작물의 제거된 체적을 V_s 는 휠의 제거된 체적을 나타낸다. 또한 b 는 공작물과 슷들의 폭을 나타내고, l 은 공작물의 길이, Δt 는 공작물의 제거된 두께, Δr 은 슷들의 마모된 휠의 반지름을 나타낸다. 이 식에서 알 수 있듯이 연삭비가 높을수록 휠의 수명이 길어진다. 그러므로 같은 조건 하에서 연삭비가 증가하다가 다시 감소하는 시점을 연삭 수명점으로 볼 수가 있다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾

3. 실험조건 및 방법

본 실험에서는 연삭력을 측정하기 위해 Table 1 과 같은 조건으로 실험을 하였다. 슷들은 입도가 #80, #100인 WA 슷들과 CBN 슷들을 사용하였고, 가공조건으로는 주축의 속도를 1800rpm으로 일정하게 유지하고, 공작물의 이송속도를 2m/min, 4m/min 으로 하였으며, 절입깊이는 5~20 μ m까지 변화를 주어 가공하였고, 공작물의 화학적 성분은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

Grinding machine	Horizontal spindle surface grinder
Workpiece	STD11, SUS304, STB2, Al ₂ O ₃
Wheel	WA100, WA80, CBN
Conditions	Wheel speed : 1,800rpm
	Table speed : 2, 4m/min
	Depth of cut(t) : 5,10,15,20 μ m
	Up & Plunge & Wet
Fluids	Shell lubricant (soluble type, 10:1)
Dressing conditions	Dressing stick : WA
	Depth of cut : 10~50 μ m

Table 2 Chemical composition of specimens(%)

	C	Cr	Mn	Ni	Si	P	S
SUS304	0.08	19.0	2.0	9.25	1.0	0.045	0.03
STB2	1.1	0.25	0.5	0.25	0.25	0.025	0.025
STD11	1.5	12	0.6	0.5	0.4	0.03	0.03

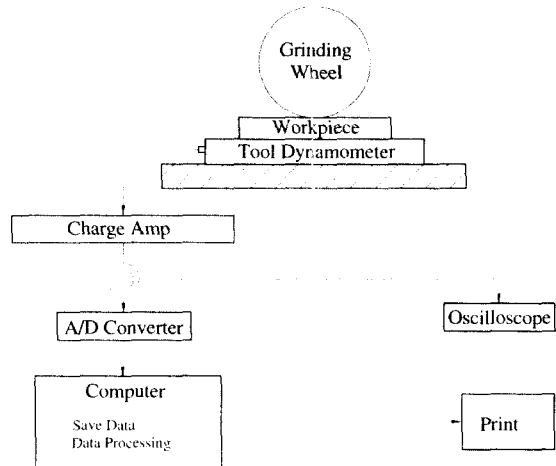


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

Fig. 2는 장치 개략도를 나타내었다. 연삭 저항력을 측정하기 위해 공구 동력계를 연삭기 베드위에 설치하고, 공구 동력계에서 발생된 신호는 AMP를 통해서 증폭시킨 후 12비트의 분해능력을 갖는 A/D변환기를 통해 디지털화 시켜 PC로 저장하였다. 공작물과 슷들의 표면사진은 금속 현미경(Microscope)으로 확대하여 디지털 카메라로 촬영하였고, 표면거칠기는 축침식 표면조도기를 사용하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 연삭력

Fig. 3은 SUS304, STD11, STB2, Al₂O₃을 CBN 슷들을 사용하여 공작물의 이송속도를 각각 2m/min, 4m/min으로 하고 절입깊이를 5~20 μ m으로 변화를 주었고, Fig. 4는 입도가 #100인 WA 슷들을 사용하여 같은 조건으로 절입깊이에 따른 연삭력을 비교한 것이다. 절입깊이가 깊어질수록 연삭력은 증가하였고, 보

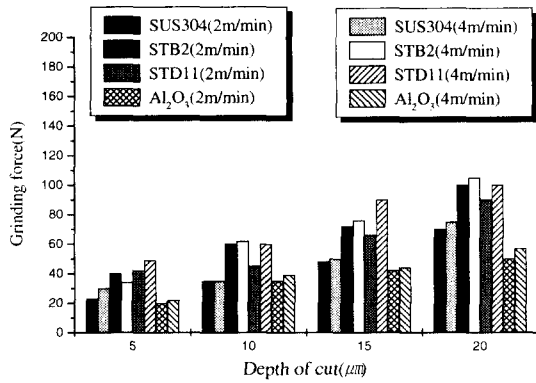


Fig. 3 Grinding force of SUS304, STD11, STB2, and Al₂O₃ by CBN wheel

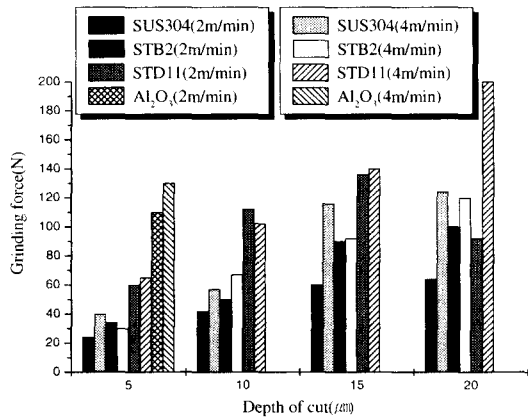


Fig. 4 Grinding force of SUS304, STD11, STB2, and Al₂O₃ by WA (#100) wheel

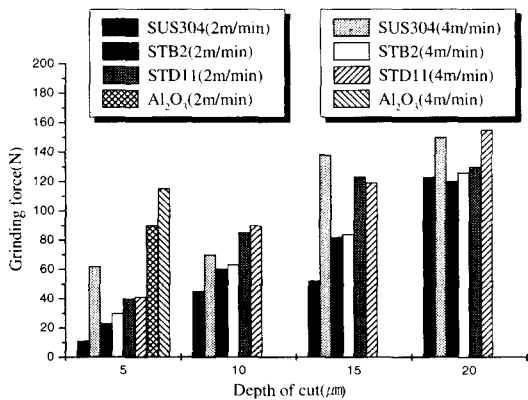


Fig. 5 Grinding force of SUS304, STD11, STB2, and Al₂O₃ by WA (#80) wheel

편적으로 이송속도가 빠를수록 연삭력이 더 크게 나타났다. 또한 WA(#100)숫돌에 비해 CBN 숫돌을 사용한 경우 연삭력이 더 작게 나타난 것을 볼 수 있다. Al₂O₃의 경우 경도가 아주 크고 취성이 강한 성질 때문에 WA숫돌로는 5μm 이상 절입깊이를 줄 수가 없었다. Fig. 5는 WA숫돌의 입도를 #80으로 낮추고 동일조건으로 연삭했을 때 연삭력을 나타낸 것이다. Fig. 4에 비해 Fig. 5에서 연삭력이 작게 나타난 것을 볼 수 있다. 이 결과에 의해 입자의 입도가 작은 숫돌은 거친가공에 적합함을 알 수 있다. 또한 세 개의 그림에서 알 수 있듯이 보편적으로 재료의 성질이 경할수록 연삭력은 크게 나타났지만, Fig. 4와 Fig. 5에서 SUS304는 이송속도 4m/min으로 연삭했을 경우 연삭력이 더 크게 나타났다. 이것으로 알 수 있듯이 SUS304는 재료의 질긴 성질 때문에 절입깊이와 이송속도를 적게 주는 것이 적은 연삭력으로 원활한 가공을 할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 표면거칠기와 숫돌수명

연삭수명은 드레싱을 시작해서 더 이상 요구하는 치수정밀도와 표면조도를 유지할 수 없어 재드레싱할 때 까지의 시간으로 나타내는 것이 일반적이다. Fig. 6은 STD11 공작물을 사용하여 절입깊이를 10μm로 일정하게 유지하고 이송속도를 4m/min로 하여 가공횟수에 따른 숫돌의 표면거칠기를 측정한 것이다. 가공횟수가 10회씩 증가할수록 표면 거칠기 값이 감소하다가 50~60회 사이에서 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 연삭횟수가 증가할수록 숫돌입자의 절삭날이 마모되어 표면거칠기 값이 낮아지다가 50~60회 사이에서 숫돌입자와 공작물사이의 연삭력이 한계에 달해 불규칙한 자생작용을 일으켜 표면거칠기 값이 높아짐을 알 수 있다.

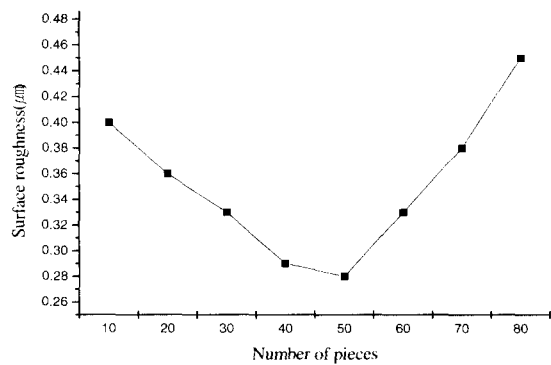


Fig. 6 Surface roughness versus number of pieces

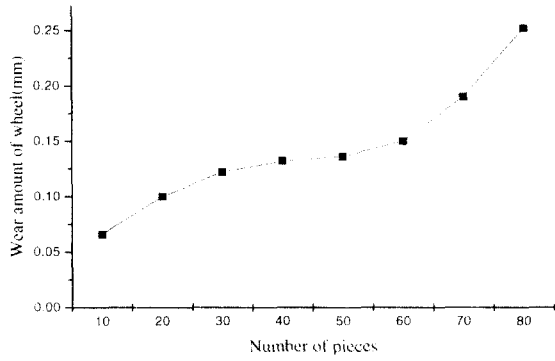


Fig. 7 Wear amount of wheel versus number of pieces

따라서 본 실험조건에서 STD11을 연삭 할 때의 연삭수명은 연삭횟수가 50~60회 정도로 생각할 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6과 같은 조건으로 실험했을 때 가공횟수에 따른 숫돌의 마모량을 측정된 것이다. 이 실험에서도 숫돌의 마모량이 처음 30회까지는 급속히 증가하다가 30~50회까지는 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있고, 역시 50~60회 사이에서 마모량이 급격히 증가하는 것을 볼 수가 있었다.

Fig. 8에서는 가공횟수에 따른 연삭비(G)를 나타내었는데, 여기서도 가공횟수 60에서부터 연삭비가 떨어짐을 알 수 있다.

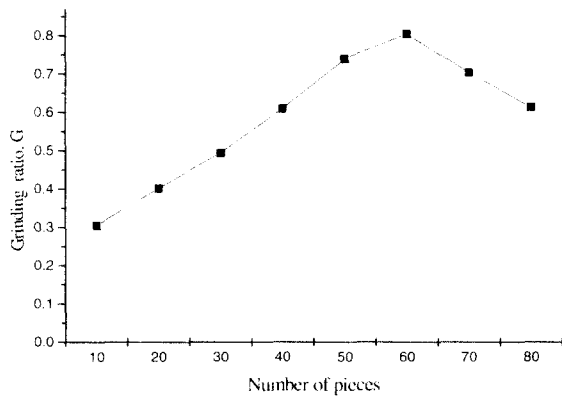


Fig. 8 Grinding ratio(G) for the number of pieces

Fig. 9는 숫돌의 체적 감소량과 공작물의 체적 감소량을 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서도 마찬가지로 공작물 체적 감소량 1500~1800(mm³) 사이에서부터 기울기 값이 증가하는 것을 볼 수가 있다.

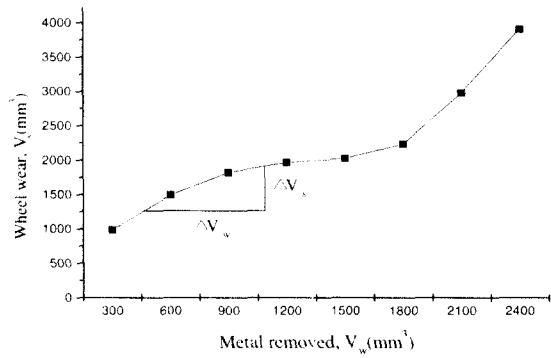


Fig. 9 Volumetric wheel wear versus accumulated metal removed for the surface grinding

Fig. 10은 STD11 공작물을 사용하여 절입깊이를 10μm로 일정하게 유지하고 이송속도를 4m/min로 하여 가공횟수에 따른 연삭력을 나타낸 것이다. 이 그림에서도 연삭력이 점차적으로 증가하다가 50~60회 사이에서 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 위의 모든 그래프의 수치가 일치하는 것으로 알 수 있듯이 본 실험조건에서 STD11을 연삭 할 때의 연삭수명은 절삭횟수가 50~60회에 있음이 분명해졌다.

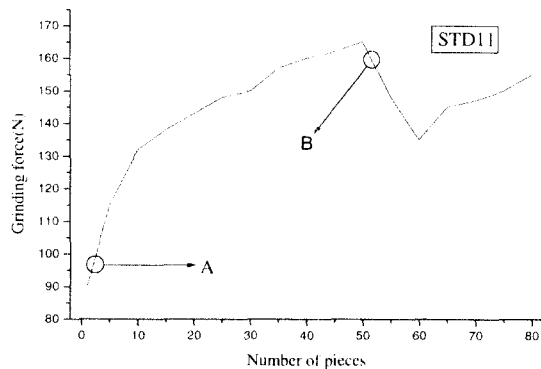


Fig. 10 Grinding force variation (STD11)

Fig. 11은 Fig. 10에서 드레싱을 한 직후의 연삭 날이 살아있는 A부분의 시간에 따른 연삭력의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 12는 Fig. 10에서 연삭수명점을 지난 B부분의 시간에 따른 연삭력의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11과 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 A부분에서는 연삭력 값의 편차가 거의 일정하고 작게 나타났지만, B부분에서는 불규칙하고 많은 편차가 생김을 알 수 있다.

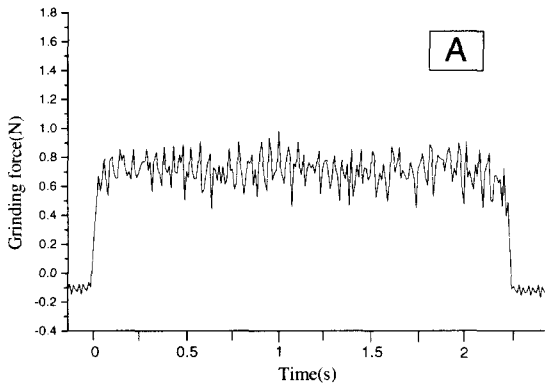


Fig. 11 Grinding force pointed on A

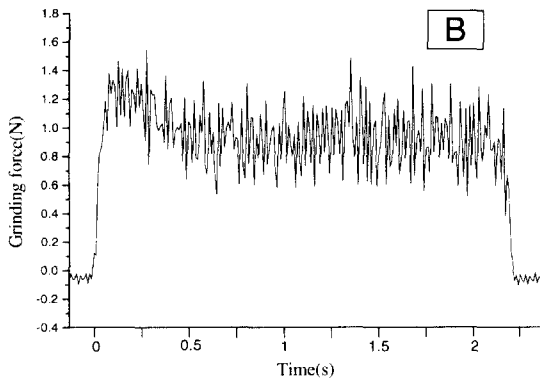


Fig. 12 Grinding force pointed on B

이것으로 연삭수명점을 지난 B부분에서는 슷돌입자의 불규칙한 부분탈락으로 인해 원활한 연삭가공이 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 6에서 처음 드레싱을 했을 때보다 50~60회 사이에서 표면거칠기가 더 좋게 나타났다. 이것은 슷돌입자가 마모되어 슷돌입자와 공작물 표면과의 접촉면적이 많아져 표면거칠기는 좋아졌지만, 연삭력과 표면온도가 아주 커지게 되어 이점으로부터 슷돌입자의 부분탈락이 일어나는 점이기 때문이다. 따라서 이점 이후 몇회 가공까지는 처음 드레싱했을 때보다 표면거칠기는 좋지만 연삭력과 표면온도에 의해 공작물의 표면에 열 자국이 생기게 되며 치수정밀도도 떨어지게 된다. 그러므로 연삭수명점이 되면 원활한 가공을 위해 재 드레싱을 하여야 한다.

Fig. 13은 STB2 공작물을 사용하여 절입깊이를 $10\mu\text{m}$ 로 일정하게 유지하고 이송속도를 $4\text{m}/\text{min}$ 로

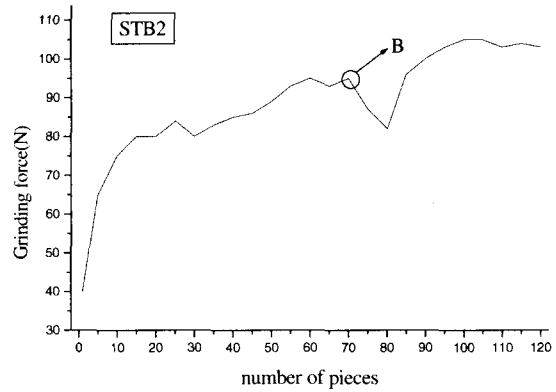


Fig. 13 Grinding force variation (STB2)



Fig. 14 Grinding force variation (SUS304)

하여 가공횟수에 따른 연삭력을 측정된 것이다. 실험에서 알 수 있듯이 STB2의 경우 그림의 B점, 70~80회 사이를 연삭수명점 이라고 볼 수 있다.

Fig. 14는 SUS304 공작물을 사용하여 다른 공작물과 같은 조건에서 가공횟수에 따른 연삭력을 측정된 것이다. SUS304의 경우는 그림의 B점을 연삭수명점으로 볼 수 있다. SUS304는 다른 재료보다 연질이지만 재료의 절길 성질 때문에 다른 재료보다 눈메움(Loading) 현상이 현저하게 많이 나타나 연삭수명점이 더 낮아진 것으로 판단된다. 그러므로 SUS304의 경우에는 절입깊이와 이송속도를 더 작게해서 연삭을 하는 것이 연삭수명을 높일 수 있음을 알 수 있다. STB2와 SUS304의 경우에는 표면조도와 공작물과 슷돌의 마모량, 연삭비 등이 횟수에 따른 연삭력과 상응하게 나타났기 때문에 그림으로는 나타내지 않았다.

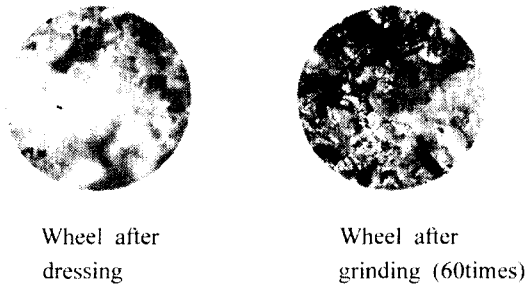


Fig. 15 Microscopic photo of wheel by WA(#100)

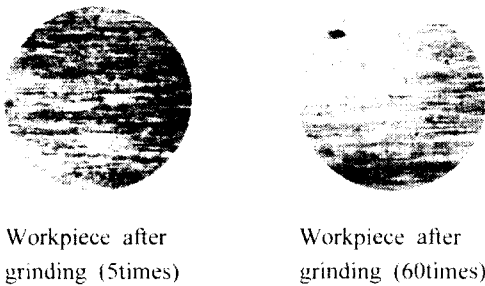


Fig. 16 Microscopic photo of workpiece by STD11

Fig. 15에서는 STD11 공작물을 연삭시 드레싱 후와 60회 가공후의 스톨표면사진을 나타냈는데, 드레싱후의 스톨에서는 입자날이 살아있고 불순물이 없는 반면 60회 가공후의 스톨에서는 입자날이 무더져 있었으며, 심한 눈베움>Loading>현상을 볼 수 있었다.

Fig. 16에서는 STD11 공작물의 드레싱 후 5회 가공후의 사진과 60회 가공후의 사진을 비교한 것이다. 그림에서 나타난 것과 같이 확연한 조도 차이를 볼 수가 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 연삭저항력과 스톨에 수명을 알아보기 위해 SUS304, STD11, STB2, Al₂O₃의 공작물을 CBN, WA(#100), WA(#80)의 스톨로 가공하여 값을 비교, 고찰하여 본 결론을 얻을 수 있었다.

(1) SUS304, STD11, STB2, Al₂O₃의 연삭력에서는 절삭깊이와 이송속도가 증가 할수록 연삭력이 증가하였고, WA스톨보다는 CBN스톨의 연삭력

이 작게 나타났다. 또한 스톨입자의 배시와 재료의 경도가 클수록 연삭력은 크게 나타났다.
 (2) SUS304 공작물의 경우 재료의 절긴성질 때문에 절입깊이와 이송속도를 크게했을 때 다른 공작물에 비해 눈베움>Loading>현상이 두드러지게 나타났으며 연삭력 또한 크게 나타났다.
 (3) STD11 공작물의 경우 가공횟수에 따른 스톨의 표면 거칠기는 가공횟수가 증가함에 따라 감소하다가 56~60회부터 증가하였다. 스톨의 마모량도 가공횟수에 따라 마모량이 점점 감소하다가 50~60회부터 증가하였다. 이것은 가공횟수 50~60사이에서 스톨의 자생작용으로 스톨입자가 불규칙적이게 탈락했기 때문이다.
 (4) STB2 공작물의 경우에는 연삭수명점이 70~80회 사이에서 나타났으며, SUS304의 경우는 20~30회 사이에서 연삭수명점이 나타났다.

참고문헌

1. 손명환, 절삭가공론, 문운당, pp. 300-412, 1996.
2. 이종찬, 초연마재를 이용한 연삭, 절삭가공, 문운당, pp. 41-160, 1998.
3. Sangback Ha, "A Study on the Surface Integrity of Grinding of Ceramics," Journal of Applied Mechanics, pp. 337-342, 2000.
4. S. Malkin, Grinding Technology-Theory and Applications of Machining with Abrasives, pp. 187-200, 1989.
5. 김정년, Jun Qian, Ohmori Hitoshi, "평면연삭에서 탄식재의 ELID 연삭," 한국정밀공학회 논문집, 제 18권 5호, pp. 157-164, 2001.
6. Chander Bhateja, Richard Lindsay, Grinding-Theory, Techniques and Troubleshooting, pp. 75-145, 1982.
7. J. C. Lee, et al, "A Study on the Grinding Parameters Affecting the Surface Integrity of Ceramics," fifth International conference on Deburring and Surface Finishing, pp. 235-242, 1998.
8. 임종고, 하상백, 최환, 이종찬, "Quartz의 연삭특성에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 870-873, 2000.