한국정밀공학회지 제 18 권 제 5 호 (2001 년 5 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 5, May 2001.

평면연삭반에서 난삭재의 ELID 연삭

김경년*, Jun Qian**, Ohmori Hitoshi***

ELID Grinding of Hard-To-Machine Materials on Surface Grinder

Gyung Nyun Kim*, Jun Qian**, and Hitoshi Ohmori***

ABSTRACT

The grinding for hard-to-machine materials, such as ceramics, super alloys etc., has proven to be a very difficult and consuming process utilizing ordinary methods. In order to conduct high efficiency machining of such materials, grinding processes using metallic bond diamond wheels and applying electrolytic in-process dressing(ELID) have been attempted on a surface grinding machine. In this study, the effects of grinding parameters,and grit sizes have been evaluated in view of surface roughness, grinding force as well as step difference in simultaneous grinding of different materials. The study and experimental results are presented in this paper.

Key Words : ELID grinding(전해 인프로세스 드레싱), Normal grinding force(법선방향 연삭저항), Peak-to-Valley (P-V, 평탄도), Different material(이종재료), Step difference(단차)

1. 서론

최근, 신소재의 급속한 발전으로 세라믹, 합금강 등과 같은 새로운 재료가 정밀기계부품과 금형 등에 적용되고 있다. 이러한 경향에 따라서 세라믹 등의 난삭재에 대한 초정밀 경면가공의 요구가 증대되고 있다. 지금까지 자동차, 금형공업 등에 있어서 각종 구조부품의 경면가공은 주로 래핑 등의 유리입자가공에 의해서 실현되고 있지만, 그 가공면의 정밀도 및 가공능률이 제한되고 작업환경을 오염시킬 뿐 만 아니라 작업에 숙련이 필요하다는 문제점을 안고 있다. 그 대체기술로써 유망시 되고 있는 ELID 경면연삭법은 래핑법 보다 고능률, 고품질의 가공면을 기대할 수 있다. ELID 경면연삭법에는, 주로 초미세 입자를 가진 주철/철계 다이야몬드 숫돌을 이용한다. 특히, 입자의 돌출을 메탈본드의 전해 및 부도체 피막의 생성에 의해서 제어할 수 있다. 그 때문에 연성모드의 가공에 의한 난삭성 재료의 초정밀 연삭을 몇 개 조건의 적정화에 의해서 정상적으로 수행한다. 이 분야에서는 Ohmori 등에 의하여 표면거칠기, 연삭저항의 거동에 대하여 논문 및 보고서가 있고, 그 결과의 적용사례도 적지 않다[1-3]. 본 연구에서는 초경합금, 열처리 하지 않은 SKD11 그리고 Si_3N_4 세라믹에 대하여 실험을 행하고 연삭력 등 ELID 연삭특징을 검토하여 적정조건을 제시한다.

2. 실험장치 및 방법

* 거제대학 기계과
** NUAA, China
*** The Institute of Physical and Chemical Research, Japan

2.1 실험장치

기계부품 및 금형재 등에 이용되고 있는 재료의 ELID 연삭특징을 검토하기 위하여 사용한 실험장치 및 사양을 Table 1 에 나타내었다. 가공기는 전극과 급전 브라쉬를 부가한 평면 연삭반 개조형을 사용하였다. 절삭깊이 분해능은 특별장치를 부착해서 0.5μm 까지 조절할 수 있다. 숫돌바깥둘레 전체면적의 1/4 에 해당하는 황동전극과 급전 브라쉬가 숫돌표면의 정면과 하부에 설치되었다. 연삭숫돌은 주철본드 다이야몬드와 cBN 숫돌이며, 직경 150mm, 폭 10mm 이다.

Table 1 Specification of experimental system

Machine	Surface grinder(KURUDA SEIKO)	
Grinding wheel	SD600N100M SD1200N100M SD4000N100M	FUJI DAISU
	cBN4000N100FX3	SIN TO
Power supply	ELID power supply(SIN TO, EDP100A)	
Workpiece	Silicon nitride(Si_3N_4) WC-Co SKD11	
Coolant	AFG-M(2%diluted with tap water)	
Measuring equipment	Surftest-701 Laser metal microscope Dynamometer	

2.2 실험방법

본 연구에 사용한 피삭재는 Si_3N_4 세라믹, 초경합금 그리고 열처리하지 않은 SKD11 이다. 숫돌은 #600CIB-D, #1200CIB-D, #4000CIB-D(이하 SD600, 1200, 4000) 및 #4000CIB-cBN(이하 cBN4000)의 주철본드 다이야몬드 숫돌이다. 집중도는 각 100, 형상은 ø150×w10mm 의 스트레이트 숫돌이다. ELID 용 연삭액은 통상의 수용성 연삭액 AFG-M(㈜노리다케)의 50 배 수도수 희석액을 이용하였다. 각 입도의 숫돌은 GC600 숫돌에 의해서 트루잉 한 후, 약 30 분의 초기전해드레싱을 실시하였다. 전해조건은 최대전압 60V, 허용전류 10A 로 인가하였으며, 전해 시작시 15V, 4A 정도에서 약 15 분 정도 경과하면 55v, 0.8A 로 안정화 되었다. 초벌연삭에 SD600, 중간다듬질 연삭에 SD1200 그리고 Si_3N_4 세라믹 및 초경합금의 마무리 연삭에는 SD4000, SKD11 금형강에는 cBN4000 숫돌을 이용하였다. SKD11 금형강의 가공조건은 나머지 2 재료와 달리 선정하였다.

선정된 ELID 연삭조건에 기초하여, 각 피삭재의 ELID 연삭실험을 행하고 연삭저항, 표면거칠기 및 평탄도를 측정하고 AFM 상에 의해서 가공물 표면을 관찰하였다. 실험에서, 연삭저항을 인프로세스로 측정하기 위하여 공구동력계의 신호를 A/D 변환 포트를 통하여 컴퓨터(PC9801VX(NEC))로 읽고, 데이터처리 프로그램(코스모 디자인㈜)에 의해서 처리· 기록 및 해석을 행하였다. 데이터 측정 및 ELID 시스템의 개략도를 Fig.1 에 나타낸다.

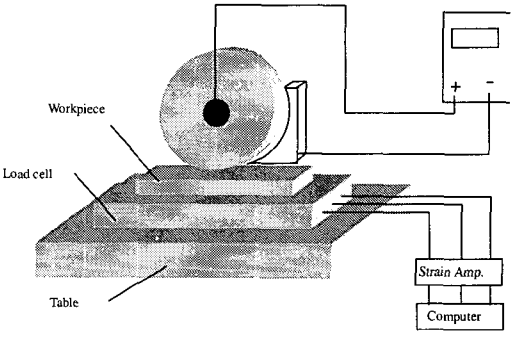

Fig. 1 The sketch of experimental set-up

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Si_3N_4 세라믹의 ELID 연삭면 성상

평면연삭반에서 Si_3N_4 를 연삭하였으며, 치수는 40x20mm 이다. 3 종류의 입도를 가진 CIB-D 숫돌을 사용하였으며, Table 2 에 본 실험의 작업조건을 나타낸다.

Table 2 Grinding condition of silicon nitride

	Wheel speed (rpm)	Feed (m/min)	Pitch (mm)	Depth of Cut(μm)
#600	1800	14.4	0.7	3
#1200	2200	14.4	0.7	2
#4000	1800	7.5	0.7	0.5

3.1.1 연삭조건에 대한 표면거칠기

Fig. 2 에 숫돌입도와 표면거칠기의 관계를 표시한다. 본 논문에서의 표면거칠기는 연삭직각방향

의 거칠기를 말한다. 연삭 중 0.6A~0.9A 의 실전류에서 안정 된 연삭이 가능하였고, 숫돌입도에 대한 영향이 명확하였다. #600 에서는 Ry1.04μm, #4000 에서 Ry0.035μm 전후의 경면을 얻을 수 있었다. Fig. 3 은 숫돌 회전수 등의 조건을 일정하게 하고 이송속도에 대한 영향을 시험한 결과이다. SD4000 숫돌에서 숫돌 회전수 1800rpm, 피치 0.7mm, 절삭깊이 0.5μm 로 하고 이송을 7.5, 10.4, 14.4, 16.8m/min 으로 하였다. 이송에 대한 표면거칠기는 Ra4nm 전후이었지만, 평탄도는 이송증가에 대하여 증가하고 있음을 알 수 있었다. 단, 이송 7.58m/min 에서는 피삭재의 표면에 연삭방향으로 약간의 가공흔적이 관찰되었다.

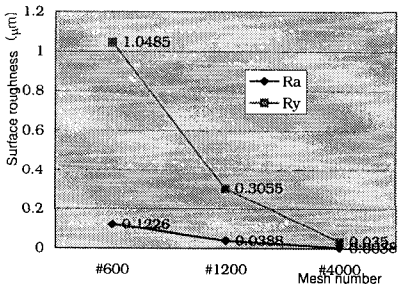

Fig. 2 Effects of grit size on a surface roughness

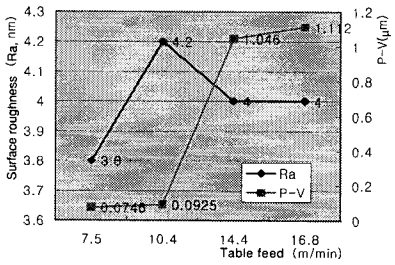

Fig. 3 Effects of table feed on surface roughness

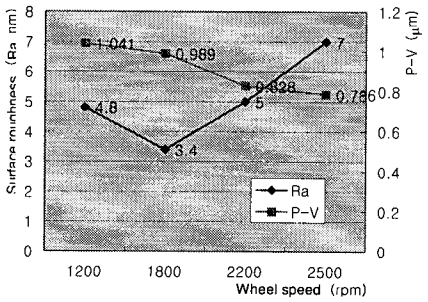

Fig. 4 Effects of wheel speed on surface roughness

Fig. 4 는 숫돌 회전수와 표면거칠기와의 관계를 나타낸다. 작업조건은 이송 7.5m/min, 피치 0.7mm 그리고 절삭깊이 0.5μm 에서 숫돌 회전수를 1200, 1800, 2200 그리고 2550rpm 으로 하였다. 숫돌 회전수의 증가에 대하여 1800rpm 부터 표면거칠기는 약간 증가하는 경향을 보이고, 평탄도는 감소하였다. 표면거칠기의 증가는 숫돌 회전수의 증가에 따라서 숫돌입자의 절삭성이 저하함에 따라 연삭잔량에 의한 영향으로 생각된다.

3.1.2 연삭저항 및 표면성상

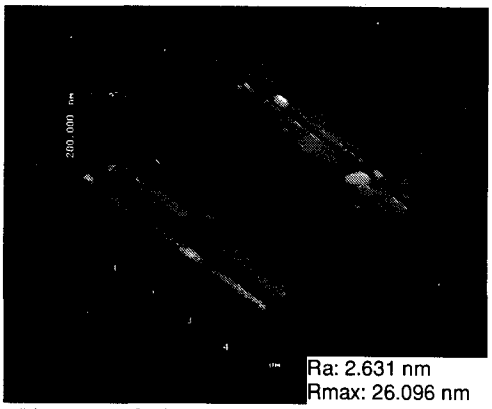

Photo. 1 AFM image of silicon nitride ground by a #4000 CIB-D wheel

SD4000 에서 총연삭량 30μm 를 연삭 한 경우의 ELID 연삭저항의 안정성을 검토한다. ELID 실전류는 1A 전후로 안정되어 있고, 연삭저항도 2.5Kgf 로 낮고 안정하였다. 특히, 숫돌 회전수 및 이송변화에 대한 연삭저항의 변화를 관찰하였다. 총연삭량은 각 조건 공히 35μm 이다. 이송의 증가에 대하여 실전류의 증가와 더불어 연삭저항도 약간 증가하는 경향이 있었지만, 어떤 조건에서도 연삭저항은 안정되어 있었다. 연삭저항의 증가는 이송의 증가에 대하여 숫돌입자의 연삭량이 크게 되기 때문에 칩이 두껍게 되는 결과로 생각된다. 그리고, 연삭저항의 안정화는 연삭 중에 연속하여 전해되기 때문에 절삭날 면적율의 증가가 억제되기 때문이다. 또, 숫돌회전수의 증가에 대하여는 실전류 1A 전후에서 안정되고 있다. 법선방향 연삭저항은 1200~2200rpm 에서는 8Kgf 이내에서 안정되었지만, 2550rpm 에서 5.5Kgf 정도로 감소하였다. 이것은 회전수 상승에 의해서 제거효율이 높아진 결과지만, ELID 경면연삭의 안정성은 약간 감소하였다.

연삭저항은 높은 회전수에 의한 제거효율의 상승으로 저하하지만 연삭액의 흩날림, 전해전류의 감소등에 의해서 ELID 의 효율은 저하하기 때문으로 생각된다.

Photo. 1 은 #4000 숫돌에 의하여 가공된 Si_3N_4 세라믹의 AFM 상을 나타낸 것이다. ELID 연삭에서 표면은 고정입자 선단에서 형성된 예리한 절삭흔적을 약간 나타내고 있고, 이러한 연삭방향의 절삭흔적이 방향에 따른 표면거칠기의 차이를 나타내는 원인이다.

3.2 초경합금의 ELID 연삭면 성상

3.2.1 연삭조건에 대한 표면거칠기

적정 ELID 연삭조건으로 가공된 피삭재의 숫돌입도에 대한 표면거칠기의 관계를 Fig. 5 에 나타내었다. #600, 1200 에서는 실전류 0.4~0.6A, #4000 에서는 0.8~1A 에서 안정된 연삭이 가능하였다.

#600 에서는 Ry0.7μm, Ra0.1μm, #1200 에서 Ry0.25μm, Ra0.03μm 그리고 #4000 에서 Ry0.06μm, Ra0.007μm 로써 거의 직선적으로 향상되었다. 특히, #4000 의 숫돌에서는 미세숫돌의 입자돌출 효과를 확인할 수 있었다.

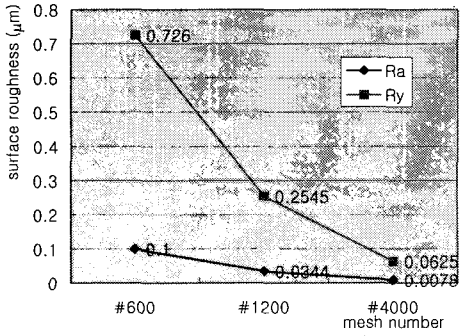

Fig. 5 Effects of mesh number on surface roughness

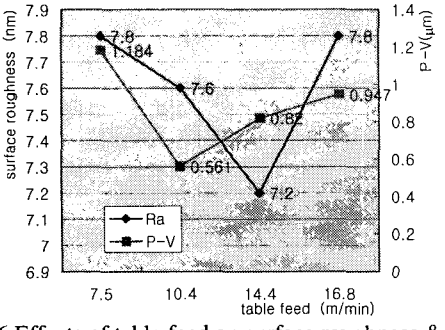

Fig. 6 Effects of table feed on surface roughness & P-V

Fig.6 은 #4000 에서 숫돌 회전수 2200rpm, 피치 0.7mm, 연삭깊이 0.5μm 그리고 이송을 7.5, 10.4, 14.4, 16.8m/min 에 대한 표면거칠기의 영향을 표시한 것이다. 이송에 대한 변화는 거의 없고, 평탄도는 이송 10.4m/min 이후부터 이송증가에 비례하여 약간 증가하는 현상을 나타내고 있다. 또 이송 7.5m/min 에서 가공면에 피치방향으로 가공흔적이 관찰되었다.

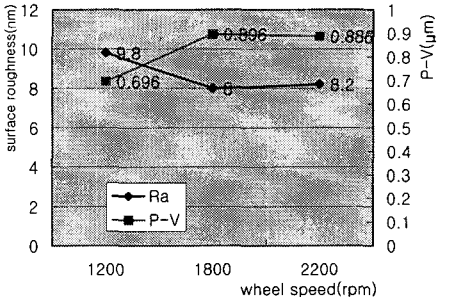

Fig. 7 Effects of wheel speed on surface roughness & P-V

한편, 숫돌 회전수와 표면거칠기의 관계를 Fig. 7 에 나타내었으며, 가공조건은 이송 10.4m/min, 피치 0.7mm, 연삭깊이 0.5μm 에서 숫돌 회전수 1200, 1800, 2200rpm 이다. 숫돌 회전수가 증가하여도 표면거칠기 및 평탄도는 거의 일정한 경향을 나타내었으며, 1200rpm 에서 피치방향으로 약간의 가공흔적이 발견되었다. 이송과 숫돌 회전수가 늦은 조건에서 가공흔적이 나타나는 현상은 경연삭일 수록 입자의 탈락보다 마모되어서 연삭되는 경향이 강하기 때문으로 생각된다.

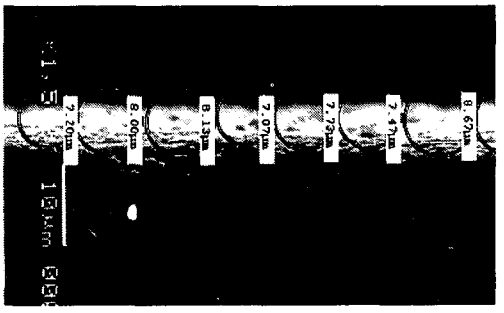

Photo. 2 Cross sectional SEM image of a ground Tungsten carbide

한편, photo. 2 는 #4000 숫돌에 의한 가공 변질층의 깊이를 나타내며 그 깊이는 약 8μm 으로 최

종 다듬질에서 충분히 제거할 수 있는 양으로 생각된다.

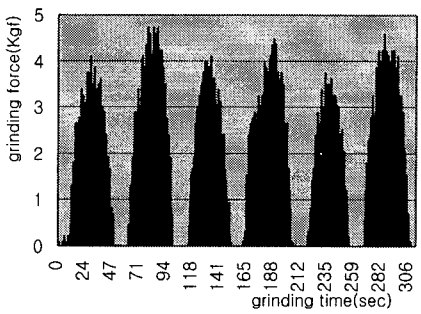

Fig. 8 Grinding force of tungsten carbide on grinding time

3.2.2 연삭저항 및 표면성상

Fig. 8 은 SD4000 숫돌로 총연삭량 50μm 를 연삭한 경우의 연삭저항을 표시한다. 입자직경에 맞는 연삭깊이로 가공하면 경면연삭의 안정성에는 어떠한 변화도 나타나지 않았으며, 연삭저항도 안정하였다. 또한, 숫돌 회전수 및 이송의 변화가 있어도 ELID 실전류 0.8~1.1A 에서 안정된 연삭이 가능하였다. Photo. 3 은 #4000 으로 연삭된 피삭재 표면의 AFM 상이다. 가공면 성상은 미세입자의 연삭흔적으로 형성되어 있으며, Si_3N_4 세라믹보다 다소 선명한 연삭흔적의 골과 유효입자수가 높기 때문에 높은 밀도의 연삭흔적을 남기고 있다.

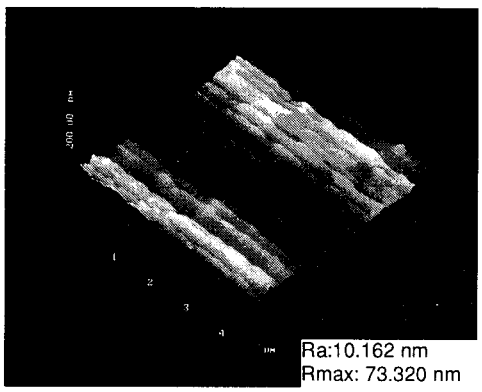

Photo. 3 AFM image of tungsten carbide ground by a #4000 CIB-D wheel

금속재료, 무기재료 등의 공업재료는 형상을 유지하고 외력, 전장 등에 응답하는 특성은 주로 원자의 결합상태이다. 본 연구에 사용한 재료들 중 Si_3N_4 세라믹은 응집에너지가 큰 이온결합을 이루고 있으며, WC-CO 는 CO 를 본드재로 소결된 상태이다. 3.1, 3.2 절의 결과를 비교하면 전체적으로 Si_3N_4 세라믹이 WC 보다 더 좋은 표면거칠기를 나타내고 있음은 전자가 질이 치밀한 이온결합을 하고 있고, ELID 에 의한 연성모드 전환으로 연삭입자의 절삭작용 동안 공동현상 그리고 가공홈(groove)의 생성깊이가 얕기 때문으로 사료된다.

3.3 SKD11 금형강의 ELID 연삭면 성상

3.3.1 연삭조건에 대한 표면거칠기

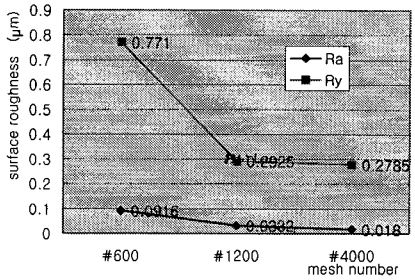

Fig. 9 Effects of mesh number on surface roughness

숫돌입도에 의한 표면거칠기의 상이에 대한 결과를 Fig. 9 에 표시하였다. 여기서 사용한 피삭재는 열처리하지 않은 SKD11 금형강이고, 각 입도에서의 연삭조건은 예비실험에 기초하였다. 전체적 경향은 전술의 재료처럼 숫돌입도에 대한 영향은 현저하지만, 숫돌입도가 #1200 에서 #4000 의 미세입자로 되어도 표면거칠기의 차는 크지 않았다. 또, 동일입도에서도 측정위치의 차에 따라 어느 정도의 산포가 확인되었다. 표면거칠기 곡선도 전체적으로는 양호하지만, 위치에 따라서 깊은 홈을 형성하는 경향이 있다.

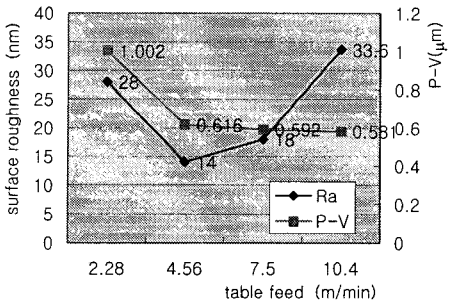

Fig. 10 Effects of table feed on surface roughness & P-V

한편, Fig. 10, 11 은 이송 및 숫돌 회전수에 대한 표면거칠기의 경향을 나타낸다. 적용한 연삭조

건은 cBN4000 숫돌에서 피치 0.5mm, 연삭깊이 0.5μm 이다. 숫돌 회전수와 표면거칠기의 관계에서는 명확한 경향을 나타내고 있지 않았다. 이것은 깊은 크랙성 결함에 기인한 표면거칠기의 산포와 관계가 있는 것으로 생각된다. 또, SKD11 과 같은 연한 재료에서는 스파크 아웃의 회수도 표면거칠기의 산포에 영향하는 것을 알았고, 기계의 정밀도, 숫돌의 표면상태의 영향을 받기 쉽다는 것도 알았다.

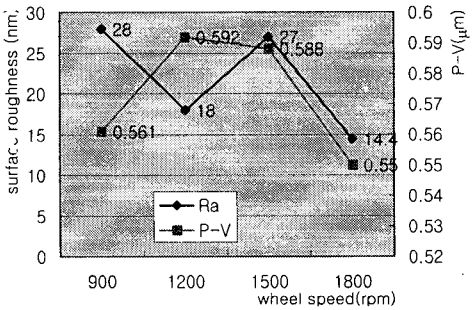

Fig. 11 Effects of wheel speed on surface roughness & P-V

3.3.2 연삭저항 및 표면성상

Fig. 12 는 cBN4000 숫돌로 총연삭량 30μm 를 연삭한 경우의 ELID 연삭저항에 대하여 표시한다. 연삭저항의 최고값이 3Kgf 정도에서 안정되고, 실전류도 1.2A 에서 일정하게 유지되었다. SKD11 에서는 각 입도에서 총연삭량이 일정량 이상으로 되면 눈메꿈이 발생하고 실전류 및 연삭저항이 상승하는 경향이 있었지만 ELID 경면연삭은 가능하였다. 경취성 재료에 비하여 약간 강한 연삭흔적, 백트랜스퍼 (back - transfer) 현상이 발견되었지만 육안으로는 가공흔적이 발견되기 어려운 고품질의 경면상태로 되었다.

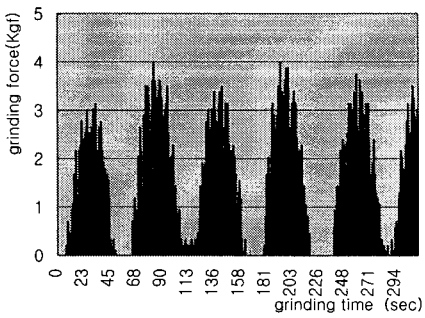

Fig. 12 Grinding force of SKD11 on grinding time

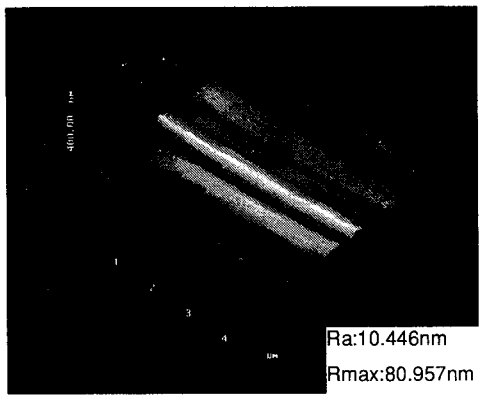

Photo. 4 AFM image of SKD11 ground by a #4000 CIB-cBN wheel

한편, 가공면에는 연삭흔적에 동반된 공동이 보이며, 이것은 재료의 불균일 혹은 재료를 형성하는 입자가 연삭저항을 끝까지 이겨내지 못하고 입계에서 취성파괴가 생긴 것으로 생각된다. Photo. 4 는 cBN4000 숫돌로 가공된 SKD11 의 표면성상을 나타낸다. 가공면 형상이 앞의 재료들과 다른 것은 이온결합과 소결상태의 것보다 응집에너지가 적을 뿐 아니라 금속친화로 숫돌에도 눈메꿈이 생긴 결과로 관측된다.

3.4 이종재료의 ELID 특징

신소재 등의 복합재료를 가공하는 상태로 하기 위하여 Si_3N_4 와 초경합금 및 초경합금과 SKD11 을 동시가공 하였다. 다이야몬드 입자를 사용해서 두 재료의 경계선에 수직 되는 방향으로 ELID 연삭을 실시하였다.

3.4.1 SI_3N_4 와 초경합금의 동시가공

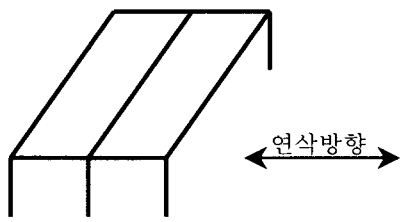

Fig. 13 Grinding direction of different material

SD4000 으로 Si_3N_4 와 초경합금을 Fig. 13 과

같이 고정구에 왁스로 접착하여 화살표 방향으로 총연삭량 40μm 를 동시에 연삭하여 별개로 가공한 상태와의 차이를 관찰하였다. 표면거칠기의 측면에서 별도 가공한 경우의 경향 및 값의 변화는 거의 보이지 않았다. 그러나, 초경합금에서는 가공흔적이 없는 완전한 경면이 얻어졌을 뿐 아니고 연삭방향과 직각방향의 표면거칠기의 상이 즉, 방향성도 거의 없어졌다. 이러한 현상은 Si_3N_4 를 연삭할 때 숫돌의 표면이 어느 정도 균일하게 되고, 균일화 된 숫돌에서 초경합금을 연삭하기 때문에 이러한 결과가 얻어진다고 생각된다.

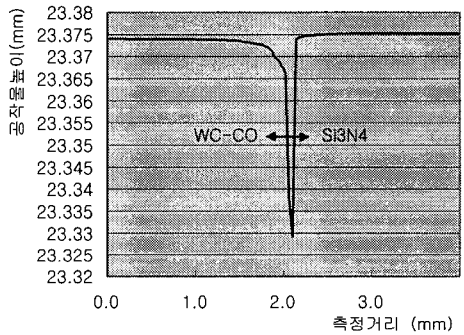

Fig. 14 Section view of tungsten carbide and silicon nitride

Fig. 14 는 Si_3N_4 와 초경합금의 피삭성의 차에 의한 재료간의 단차를 표시한다. Si_3N_4 에 비해서 상대적으로 무른 재료인 초경합금의 쪽이 약 1.4 μm 정도 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 2 재료의 경계역에서 초경합금의 쪽에 Si_3N_4 의 칩이 쌓이는 상태가 관찰되었다.

법선방향 연삭저항에서는 연삭저항의 상승과 하강이 있고 안정된 연삭에 어려움이 있었다. 이것은 Si_3N_4 가공시 본드재와 피삭재의 접촉에 의해서 연삭저항의 상승과 입자의 탈락에 의한 저항의 하강에 의한 것으로 생각된다. 그러나, ELID 전류는 0.6A 전후에서 안정되어 있었다.

3.4.2 초경합금과 SKD11 의 동시가공

SD4000 에서 총연삭량 30μm, 숫돌 회전수 1800rpm, 이송 10.4m/min, 피치 0.5mm 그리고 연삭깊이 0.5μm 으로 초경합금과 SKD11 을 동시 가공하였다. 표면거칠기는 두 재료 공히 별도 가공한 경우와의 차는 없었다. 그러나, 초경합금의 쪽에서 별로 가공할 때 보다 구름상태의 면이 육안으로 관찰되고, 방향성도 존재하고 있었다. 표면성상에서도 연삭가공 흔적의 증가가 보이고, 법선방향 연삭저항도 상승과 하강을 반복하면서 총연삭량의 증가에 따라 증가하고 있었다. 이러한 상태는 SKD11 의 칩이 숫돌표면에 부착하고 다이야몬드 숫돌과 SKD11 의 열적작용 등에 의한 결과로 생각된다. Fig.15 는 2 재료의 연삭단차를 나타내고, SKD11 쪽이 약 0.5μm 정도 낮음을 알았다.

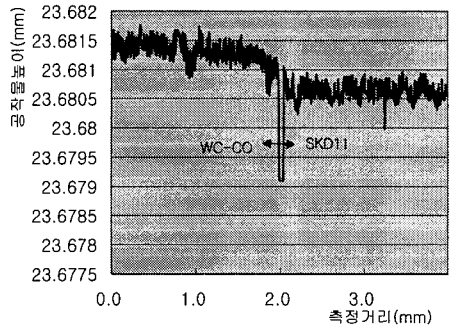

Fig. 15 Section view of tungsten carbide and SKD11

이러한 가공단차는 재료별 결합상태에 따른 응집에너지와 전단력의 크기가 피삭성의 차이를 발생시키는 주된 원인으로 생각된다. 그러나 본 논문에서 선택한 재료는 단결정 재료가 아니므로 전단력의 대소를 가공단차의 원인으로 생각하기는 어려울 뿐 아니라 가공 중에도 가공환경과 조건에 따라 가공단차의 크기는 계속 변화하고 있으리라 추측할 수 있다. 즉, 드레싱 직후에는 입자의 요철이 심하여 단차를 크게 하지만, 가공이 계속되면서 눈메꿈 등에 의하여 그 차는 감소할 수 있다. 또, 전해액 공급량이 많으면 입자의 세정효과로 단차는 커질 수 있으며 숫돌의 입도, 절삭깊이와 같은 연삭조건도 단차의 정도에 관여하리라 생각된다. 아울러, 공작물이 회전 또는 직선왕복과 같은 가공방법도 단차에 영향을 줄 수 있으리라 사료된다. 단차는 이종재료 등의 초정밀가공에서 중요한 문제로 대두되며 좀 더 깊은 연구가 필요하리라 생각된다.

4. 결론

#600, #1200, #4000CIB-D 그리고 #4000CIB-cBN 주철본드 다이야몬드 및 입방정 질화붕소 입자의 숫돌을 ELID 평면연삭에 적용해서 Si_3N_4 세라믹, 초경합금, 열처리 하지 않은 SKD11 의 연삭을 행

하였다. 가공중에 연삭저항을 측정하고 표면거칠기, 평탄도, 표면성상 등 가공특성에 대하여 관찰하였다. 또, 이종재료의 가공특성을 분석하기 위하여 Si_3N_4 와 초경합금 그리고 초경합금과 SKD11을 동시가공해서 가공특성 및 두 재료의 단차를 확인하였으며 그 결과는 아래와 같다.

1. 3 종류의 재료 공히, 이송 및 숫돌회전수 변화에 대하여 약간의 가공흔적이 관찰 되었고, 표면거칠기와 평탄도 향상을 위한 적정 조건을 선정할 수 있었다.
2. ELID 연삭저항은 재료와 연삭조건에 관계없이 가공 중 안정한 상태로 유지되고, 숫돌회전수의 증가에 대하여 법선방향 연삭저항은 약간 감소하는 경향이 있었다.
3. SKD11 에서는 숫돌의 눈메꿈 현상에 의하여 표면거칠기에 산포가 있고, 연삭저항의 안정성도 다소 떨어지며, 표면성상에 있어서도 가공흔적이 약간 강하게 관찰되었다.
4. #4000CIB-D 숫돌에 의한 초경합금의 가공변질층 깊이는 약 8 μm 임을 확인하였다.
5. 이종재료의 동시가공에서 Si_3N_4 와 초경합금에서는 초경합금쪽에서 가공흔적이 전혀 없는 경면가공을 할 수 있었지만, 재료의 결합상태와 가공조건에 기인한 가공 단차는 1.4μm 정도 형성되었다.
6. 초경합금과 SKD11 에서는 두 재료 공히 단일재료로 가공할 때 보다 약간 더 많은 구름상태가 관찰되고 가공 단차는 0.5μm 전후이었다.

금후, 이종재료의 가공방법, 특성 그리고 그 대책에 대하여는 계속해서 연구를 진행하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 大森 整, "各種材料の ELID 鏡面研削特性," ELID 研削會報, Vol. 20, pp. 71~85, 1998.
2. 大森 整, "ELID 加工機•システムの開發と實用化," ELID 研削會報, Vol. 21, pp. 135~144, 1998.
3. 大森 整 外 1 人, "鑄鐵フアイバボンド砥石による硬脆材料の鏡面研削加工," 昭和 63 年度精密工學會秋季大會學術講演論文集, pp.355~356, 1988.