

금형용 WC-Co의 초정밀 연삭 가공 조건에 관한 연구

허성중*, 강재훈**, 김원일***

Study on Ultra-Precision Grinding Condition of WC-Co

S. J. Heo*, J. H. Kang**, W. I. Kim***

ABSTRACT

Recently, WC-Co have some excellent properties as the material for the mechanical component such as metallic moulding parts, ball dies parts, and punch parts. This paper describes the surface roughness and grinding force caused by experimental study on the surface grinding of WC-Co with ultra-precision like a mirror shape using diamond wheel. Also, some investigations are carried out using WA grinding wheel to increase improved ground surface roughness such as polishing, lapping effect. Some important results obtained here are summarized as follow. 1) Within this experimental grinding condition, we can be obtained R_{max} . $2\mu m$, R_a $0.3\mu m$ which are the most favourable ground surface roughness using #140 diamond wheel, and improved surface roughness values about 20~25% throughout 5 times sparkout grinding 2) The value of surface roughness is R_{max} . $0.49\mu m$, R_a $0.06\mu m$ using #600 diamond wheel. 3) The area of no rack zone is less than F_n $0.27N/mm$, F_t $0.009N/mm$

Key Words : WC-Co Material(초경합금재), Surface Grinding(평면연삭), Diamond Wheel(다이아몬드 연삭숫돌), WA Wheel(WA 연삭숫돌), Grinding Surface Roughness(표면거칠기), Grinding Efficiency(연삭효율), Spark-Out Grinding(공회전 연삭), Lapping(래핑)

1. 서론

연삭 가공은 모든 가공법 가운데 가장 오랜 역사를 지닌, 고정도의 기계 부품을 능률적으로 생산하기 위한 제거가공의 하나로서 금세기에 들어와서 경험적 기능에서 탈피하여 공업기술의 중요한 위치를 차지하여 고능률, 고품위 가공으로 그 중요성이 점차 높아지고 있으며¹⁾ 그중에서 고정도의 다듬질면 즉 거칠기가 작은 가

공면을 얻는 것도 중요한 목적의 하나이다²⁾.

특히, 최근에는 신 연삭 공구인 미세 입자의 다이아몬드 연삭 숫돌을 이용함으로써 고정도와 취성을 지니는 엔지니어링 세라믹서 등의 신소재 및 초경합금 등 난삭 재료를 대상으로 경면가공(鏡面加工)을 추구하는 노력이 진행중이다³⁻⁴⁾.

이는 래핑이나 폴리싱과 같이 유리연삭입자(遊離研削粒子)에 의한 경면 창성법에 비하여 가공 능률이나 정

* 경남대학교 대학원 기계공학과
 ** 한국기계연구원 자동화연구부 가공기술실(정회원)
 *** 경남대학교 공과대학 기계공학과(정회원)

도가 높고 곡면이나 홈 등의 복잡한 형상부의 가공에도 적용할 수 있다는 잇점이 있기 때문이다⁵⁾.

따라서 현재 이러한 신 연삭 가공법은 지금까지 연삭 가공 후에 연마 가공공정을 부가 함으로써 초정밀 효과를 지닐 수 있었던 각종 부품들에 대한 단일 최종 마무리 가공 공정으로서의 응용에 많은 기대를 걸고 있다.

그러나 고품위의 경면 창성을 위해서는 보통 수 미크론 이하의 연삭입자를 갖는 미세립 다이아몬드 연삭 스톨의 이용이 필수적이므로 그 연삭 거동은 일반적으로 매우 복잡하다고 할 수 있기 때문에 초정밀 생성기구와 그 품질, 스톨마멸 특성, 가공조건 등을 검토해야 하는 등 많은 문제점이 있다.

본 연구는 높은 압축 강도치, 고온 경도치와 내마모성, 강성 등을 지님으로써 외부압력에 대한 변형율이 극히 적어 금형 치수에 가까운 제품을 생산할 수 있다는 특성으로 근래 그 사용도가 급증하고 있는 초경 합금 금형재⁶⁻⁷⁾를 대상으로 하였다.

또한 그동안 난삭재에 대한 최적 가공조건 실정이 정립되어 있지 못했던 관계로 인하여 기존의 숙련자 경험에만 주로 의존할 수 밖에 없었던 단순한 다이아몬드 연삭공구의 활용 추세로부터 탈피하고 신 연삭공구 및 범용 연삭공구의 장점을 최대한 활용함으로써 연삭가공의 초정밀화를 달성하여 후가공을 생략할 수 있는 가공공정을 창출⁸⁾해 내기 위하여, 평면연삭에 영향을 주는 다양한 인자들에 대한 상관 관계를 연삭저항 및 가공표면 품질등의 측면으로 분석, 평가해 봄으로써 초정밀 가공 차원에서의 최적 가공조건 설정을 위한 지침을 명확히 규명하기 위하여 수행하게 되었다.

2. 연삭 가공면 거칠기⁹⁾

연삭 가공은 본래 정밀한 표면을 다듬질 할 목적으로 개발되어 발전된 가공법으로서 다른 가공법에 비하여 능률적으로 고정도의 다듬질 하는 것이다.

연삭 가공에 의한 표면 거칠기(ground surface roughness)는 각각의 연삭 조건에 따라 큰 폭으로 변화하지만, 보통 최대 표면 거칠기 R_{max} 가 0.2-1.5 μ m의 표면을 정밀 다듬질, 1.5-6 μ m를 보통 다듬질, 6 μ m 이상을 거친 다듬질이라 한다.

일반적으로 양호한 다듬질면을 얻기 위해서는 입도가 미세한 연삭 스톨을 사용하는 것이 원칙이지만 최근에는

특수한 가공법을 채용함에 따라 중간 정도의 입도(#46-#60)의 스톨로도 경면 다듬질이 비교적 용이하게 행하여 지고 있다.

2.1 표면 거칠기의 실험식

연삭 다듬질 가공면의 거칠기에는 대단히 많은 인자, 예를 들면 스톨의 절입 깊이와 속도등의 가공조건외에 스톨 종류 및 스톨의 표면상태, 드물게는 기계의 진동 등이 복잡하게 관계된다.

여기서, 먼저 연삭 표면 거칠기를 실험에 의해 확정하고, 거칠기와 각종 연삭 조건과의 관계를 실험식으로 나타내어 알 수 있게 하는 많은 시도가 있어 왔다.

Optiz는 차원 해석에 의한 실험식을 정립하였고 특히 渡邊등의 연구자는 연삭 표면 거칠기 R은 각종 연삭 조건의 거듭제곱 지수 함수형으로 나타낸 것으로 각각의 실험식을 구하였다.

그것을 정리하여 일반적으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$R = k \cdot t^a \cdot V^{-b} \cdot v^c \cdot s^d \cdot B^{-e}$$

식에 있어서 각 지수치를 나타낸 것이 Table.1이며 이에 따른 일반적 경향으로 스톨절입 깊이 t, 공작물 속도 v, 트레버스 이송 s의 증가는 모두 거칠기를 크게 하고, 스톨 주속도 V, 스톨 폭 B의 증대는 거칠기를 작게 하게 되는 것이다.

Table 1. Exponents for experimental formular of ground surface roughness

Researcher	a	b	c	d	e
Salje	0.15	1.0	0.18	0.47	0.47
Watanabe	0.25	0.5	0.5	0.38	0.38
Werner	0.26	0.51	0.51	-	-
Masslow	0.4	-	0.6	0.45	-

3. 실험장치 및 방법

주축 동력 1.25Kw의 횡축 평면 연삭반을 사용하였으며, 연삭 공구로는 국내의 제조기술상 공구성능의 신뢰도를 충분히 보장해 줄 수 있는 한도 내에서 그중 비교적 고입도라 할 수 있는 사양을 포함한 것들을 선정하여 주문 제작한 레진 본드계의 1A1 flat type 다이

Table 2. Grinding condition

Grinding wheel	SDC140N100RW-3.0 (D180×d37×W10mm)
	SDC140N125RW-3.0
	SDC600N100RW-3.0
	SDC600N125RW-3.0
	WA80K7V
	WA300K7V
Peripheral wheel speed V_w (m/min)	1,130, 1,700
Table speed T_f (m/min)	0.19, 0.38, 0.74, 1.5, 3.0, 6.0
Depth of cut (μ /pass)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0
Number of Spark-out	0, 5, 10
Cutting type	down-cut wet, type

아몬드 연삭 슷돌과 래핑등의 후가공을 생략할 수 있는 고품위 가공면을 창출할 수 있는가의 여부를 확인키 위해 범용 WA 연삭 슷돌을 이용하였다.

실험의 조건은 Table.2와 같으며 실험에 앞서 연삭 공구의 최적 조정을 위한 단계로 이미 제시한 바 있는 Table.2와 같은 방법과 조건으로 최적 트루잉, 드레싱을 실시하였다¹⁰⁾.

법선성분 F_n 과 접선성분 F_t 의 두 연삭 저항은 압전형 동력계 (KISTLER Co. 제 9257A형)를 사용하여 In-process 측정하고 charge amp.로 증폭한 후 repicorder로 기록하였다.

이와같은 실험장치의 개략도 및 실험 시스템을 각각 Fig. 1, 2에 나타내었으며 Fig. 3, 4는 연삭 공구의 트루잉, 드레싱 작업사진이다.

고정구를 제작하여 15×15×40mm 크기의 시편을 동력계 위에 장착하였으며, 시편의 자려 진동등을 억제하기 위하여 실리콘이나 아교를 사용하여 접착한 후 볼트로 체결하는 방식을 채택하였다.

시편은 모 국내 회사에 주문 제작한 것으로 WC 71%, TiTaC 20%, Co 9%의 성분 조성률과 HR_a 92.2, bending strength 50kgf/mm의 기계적 특성치를 가지는 것으로 가공후 표면의 품위를 비교하고자 축침식 표면 조도계 (MITHUTOYO Co. 제 Surfcorde 205)를 사용하여 표면 거칠기 값을, 3차원 표면조도 측정기를 사용하여 표면형상을 각각 구해보았다.

한편, 후가공이 따르지 않는 연삭 단일 가공공정만으로도 고정도의 치수 및 형상정도 뿐 아니라 경면에

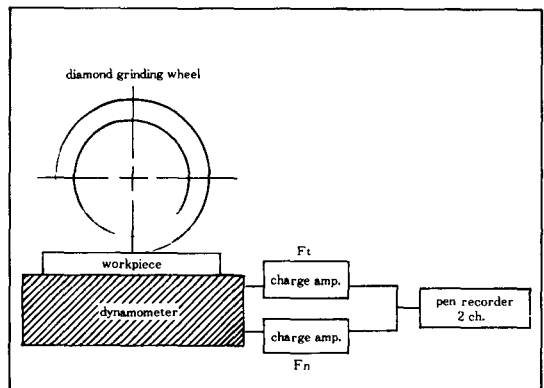


Fig.1 Diagram of surface grinding system

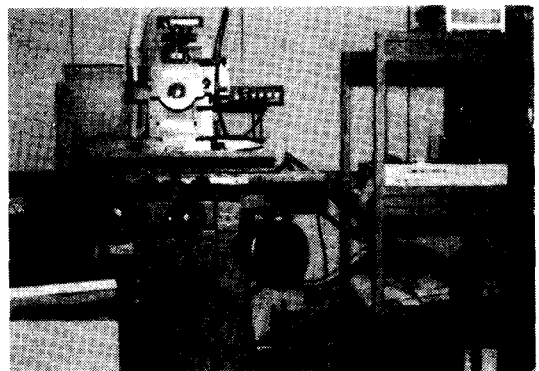


Fig.2 Photograph of experimental system

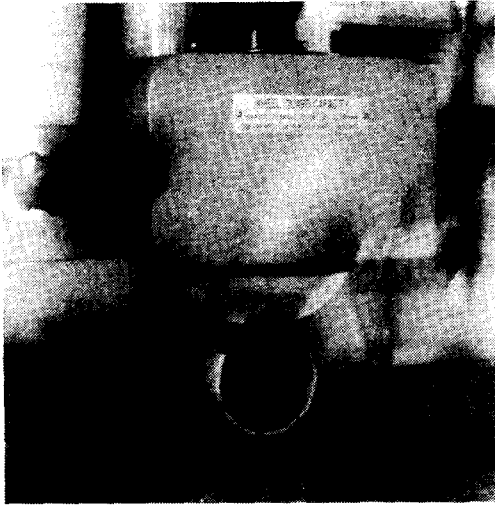


Fig. 3 Photograph of truing process

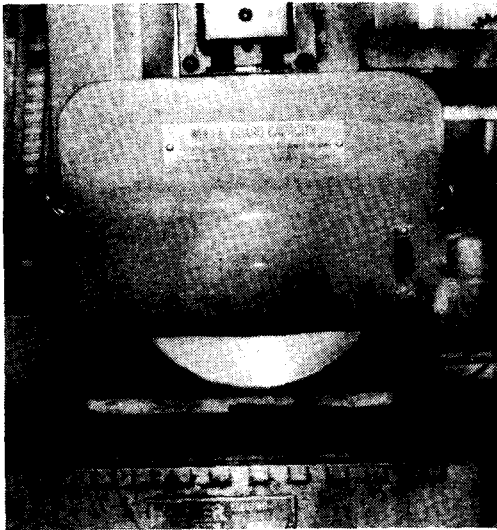


Fig. 4 Photograph of dressing process

가까운 초정밀 가공품위를 창출해 냄으로써 바로 제품화될 수 있도록 하기 위해 슷돌 사양, 절입량, spark-out, 테이블 이송 속도, cross-feed 등의 다양한 가공 조건들을 변화시켜가며 가공 표면 품위와 연삭 저항 등을 측정해 봄으로써 연삭 특성을 파악하여 그 가공조건 설정의 최적화를 정립하는데 기본적 지침이 되고자 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 다이아몬드 연삭 슷돌을 사용한 미세 절입형 가공

본 실험에 앞서 각 정량별 절입량에 따른 실제 제거 절입량을 알아 봄으로써 연삭반의 강성 및 고능률적 가공의 신뢰성 있는 절입량 범위를 설정하고자 측정한 것을 Fig. 5에 나타내었다.

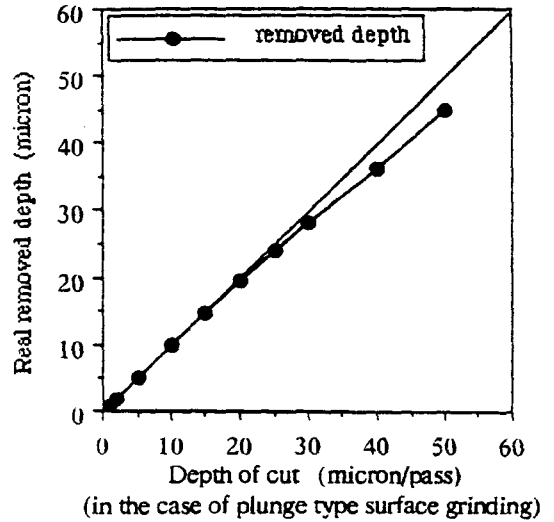


Fig. 5 Relation between depth of cut and real removed depth

이 결과로부터 10 μ m/pass 전후의 절입량까지는 비교적 두 값들이 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있었으며 절입량 등 실험의 조건들은 이 결과를 토대로 설정하였다.

성형, 소결 공정에 의해 제작된 초경재 시험편의 초기형상 결함을 제거하고 미세 절입량의 정확한 제어를 위한 기준면을 설정하기 위해서 우선 입도가 낮은 범용적 다이아몬드 슷돌을 사용하여 일반적인 범주의 절입량을 가해 보았는데 이는 가공 기준면의 품위를 우수하게 창성시킴으로써 미세 절입량의 총 절입량을 작게 하면서 고정도의 가공 기준면을 얻는 한편 표면 결함을 억제하기 위한 것이다.

Fig. 6, 7은 입도 140의 다이아몬드 연삭 슷돌을 사용하여 테이블 이송 속도와 cross-feed rate의 두 가공 조건을 다양하게 변화시켜가며 절입량을 5 μ m/pass 가

할 때 그 가공면의 표면 거칠기 변화 추이를 알아 본 것이다.

이 그림들로부터 알 수 있듯이 테이블 이송 속도가 빨라질수록, cross-feed량이 커질수록 R_{max} , R_a 값 모두 크며 표면 품질이 악화되었다.

이 결과치들은 spark-out을 각 5회씩 실시한 값들로 비실행시에 비하여 약 20~25% 정도의 개선치를 나타낸 것이다¹¹⁾.

이와같이 본 실험의 조건내에서 가공 기준면의 최고 표면 거칠기를 약 R_{max} 2 μ m, R_a 0.3 μ m까지 얻을 수 있었다.

Fig. 8, 9는 고신뢰도를 수반할 수 있는 미립형 고입도 연삭 공구 #600의 다이아몬드 슛돌을 사용하여 고정도의 가공면을 얻고자 할 때 그 최소 미세 절입량 설정치를 정하기 위해 절입량 0.5-2.0 μ m 범위에 대한 각각의 표면 거칠기값들과 연삭 저항값들의 표면 거칠기값 R_a 는 거의 일정하며 그 표준편차도 거의 작으나, R_{max} 의 경우엔 평균치들의 뚜렷한 경향은 찾아볼 수 없지만 표준편차의 범주로 파악컨대 이 절입량의 범위에서도 상대적으로 그 값이 커질수록 악화되어짐을 발견할 수 있었다.

그런데 절입량 0.5 μ m과 0.1 μ m의 경우를 비교할 때에는 그 평균치의 경우, 0.1 μ m의 절입량 일때가 오히려 약간 우수한 값을 보여 본 연구의 최소 미세 절입량을 0.1 μ m로 설정하기로 한 것이다.

이는 초미세 절입량의 실제 설정이 가능하도록 전용 기화한 완전 유압식의 고강성 연삭반이 아니라 어느 정도의 범위 내에서 고강도와 고경도를 상호 지니는 다이아몬드 연삭 공구와 초경 합금재 간에 있어서의 외부 요인들에 의한 상호 간섭 효과로 치핑발생의 정도가 실제로는 정성적으로 구별되기 힘들기 때문인 것으로 사료된다.

이와같은 현상은 Fig. 8에 나타낸 연삭 저항치 F_n , F_t 들의 변화 경향으로도 재 검토해 볼 수 있게된다. 즉 F_n , F_t 모두 절입량이 커질수록 함께 증가하게 되는데, 상대적으로 F_n 의 경우에는 그 폭이 두드러지게 나타나지만 F_t 의 경우, 그 변화 폭이 적으며 절입량이 0.5 μ m과 0.1 μ m 일때 그 평균치나 표준치가 대등 소이하게 나타나는 결과를 얻었다.

이것은 연삭 공구 진행 방향에 의한 연삭 저항값의 차이는 거의 없다는 것을 말한다.

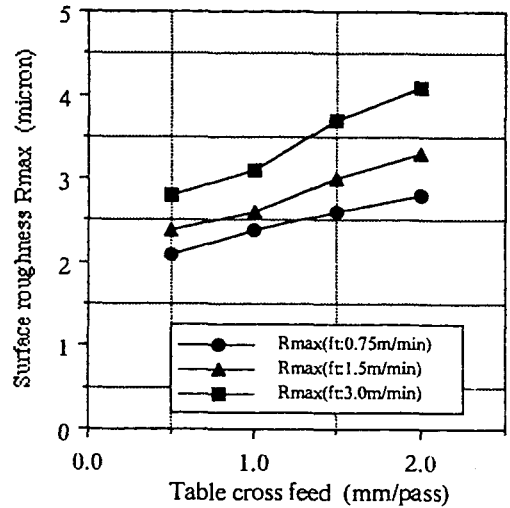


Fig. 6 Effect of table cross feed on the surface roughness R_{max}
(grinding speed : 1,700m/min)
(diamond wheel : #140)
(depth of cut : 5 micron/pass)

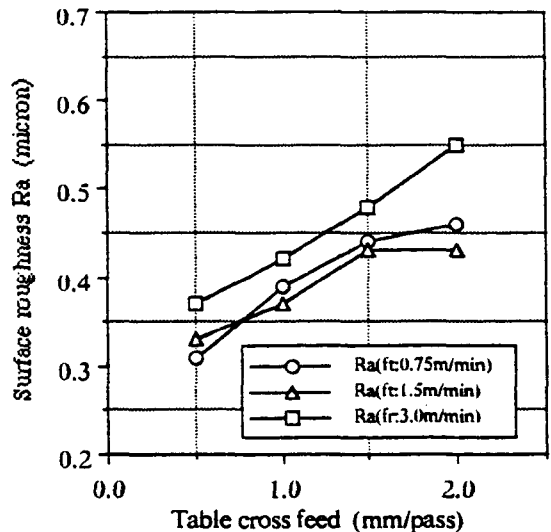


Fig. 7 Effects of table cross feed on the surface roughness R_a
(grinding speed : 1,700m/min)
(diamond wheel : #140)
(depth of cut : 5 micron/pass)

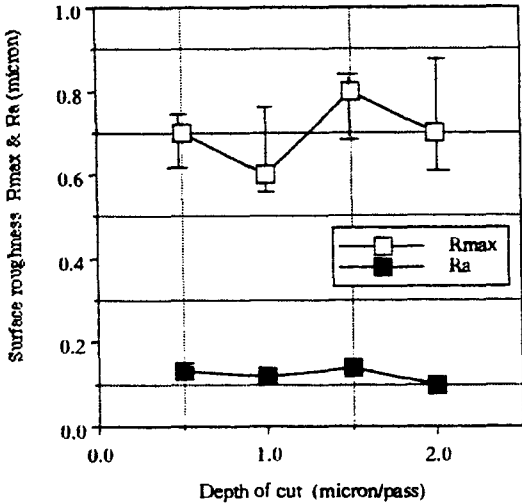


Fig. 8 Relation between depth of cut and surface roughness
 (grinding speed : 1,700m/min)
 (diamond wheel : #600)
 (table cross feed : 0.5mm/pass)
 (table speed : 0.75m/min)

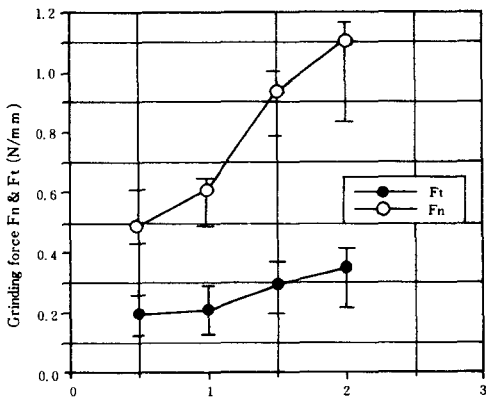


Fig. 9 Relation between depth of cut and grinding force F_n & F_t
 (grinding speed : 1,700m/min)
 (diamond wheel : #600)
 (table cross feed : 0.5mm/pass)
 (table speed : 0.75m/min)

Fig. 10은 #600의 미립형 다이아몬드 연삭 슷돌을 사용하여 테이블 이송 속도와 cross-feed rate 조건을 다양하게 변화시켜 미세 절입량 $1\mu\text{m}$ 을 가할 때 그 표면 품질을 구하여 본 결과를 나타낸 것이다. 테이블 이송 속도가 빨라지고 cross-feed rate가 커질수록 이에 따른 표면 거칠기 R_{max} 값이 악화되며 cross-feed rate 조건보다 테이블 이송 속도 조건에 더 민감한 반응을 나타냄도 알 수 있는 한편 표면조도 R_a 값은 두 조건의 변화에 큰 영향을 받지 않으며 거의 일정한 값을 나타낸다고 볼 수 있다.

이는 앞에서의 저입도 범용 다이아몬드 슷돌을 사용한 일반 범주의 가공조건에 의한 실험 결과와 거의 같은 양상을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

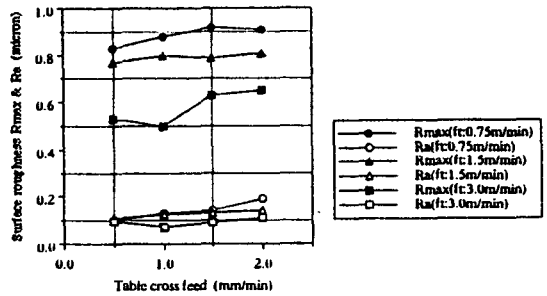


Fig. 10 Effects of table cross feed on the surface roughness R_{max} & R_a
 (grinding speed : 1,700m/min)
 (diamond wheel : #600)
 (depth of cut : micron/pass)

4.2 WA 연삭 슷돌을 사용한 초정밀 가공

Fig. 11, 12는 초저립 연삭 공구인 미립형 고입도의 다이아몬드 슷돌을 사용한 미세 절입형 가공 후 WA 일반 연삭 슷돌을 사용한 미세 절입형 가공을 추가 실행함으로써 래핑이나 폴리싱 공정으로부터 얻을 수 있는 가공효과를 과연 얻을 수 있는가에 대하여 알아 본 것이며 이때의 표면 거칠기의 형상을 나타낸 것이 Fig. 13이다.

즉, 절입량, 테이블 이송 속도, cross-feed rate 등의 가공조건을 다양하게 변화시켜가며 연삭 가공한 후 그 가공면의 표면 거칠기 R_{max} , R_a 들을 구해본 것이다.

WA 300 연삭 슷돌을 사용하여 동일 절입량 1.0 μ m 을 가할 때에는 그 차이가 매우 현저하다고는 볼 수 없으나 cross-feed rate를 작게하고 테이블 이송 속도를 빠르게 할수록 R_{max} 값이 양호해짐을 알 수 있으며, 동일 cross-feed rate를 가할 때는 절입량 1.0 μ m 일 경우 1.5 μ m 보다 테이블 이송 속도를 빠르게 할수록 약간 양호해짐도 알 수 있다.

반면, 동일 절입량 1.0 μ m, 동일 cross-feed rate 0.5 μ m/pass의 조건일 때는 WA 80 슷돌의 경우에 WA 300 슷돌의 경우 보다 훨씬 가공면 품질이 저하되어짐도 알 수 있다.

이상과 같이 #600 다이아몬드 슷돌로 연삭 후, #300의 일반 WA 연삭 슷돌로 추가 연삭 작업을 실시한 결과, R_{max} . 0.25 μ m, R_a . 0.04 μ m까지의 양호한 표면을 얻을 수 있었다.

한편, 카보랜덤 램재를 사용하여 50min. 동안 정도의 래핑을 할때 R_{max} . 0.2 μ m 보다 높은 거칠기를 얻을 수 있으므로¹²⁾ 피삭재의 기계적 특성치를 감안하여 적절한 가공조건만을 선택한다면 WA 슷돌 가공이 래핑이나 폴리싱과 같은 후 가공의 효과를 기대할 수 있는 것은 주목할 만한 사항이라고 할 수 있을 것이다.

그러나 WA 연삭 슷돌은 그 기계적 특성치의 부족으로 초경재의 능률적인 제거 가공을 기대하기란 불가능하며, 특히 절입량 설정 등의 가공조건 선택 여하에 따라 연마의 효과보다는 역지누름 현상으로 인한 크랙 등이 다량 발생함으로써 가공의 의미가 부여되지 못할 수도 있다.

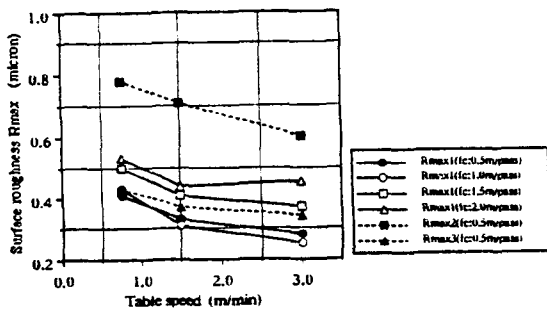


Fig. 11 Effects of table speed & cross-feed on the surface roughness R_{max} (grinding speed : 1,700m/min)

*notation 1 : depth of cut 1.0micron/pass, WA 300
 2 : depth of cut 1.0micron/pass, WA 80
 3 : depth of cut 1.5micron/pass, WA 300

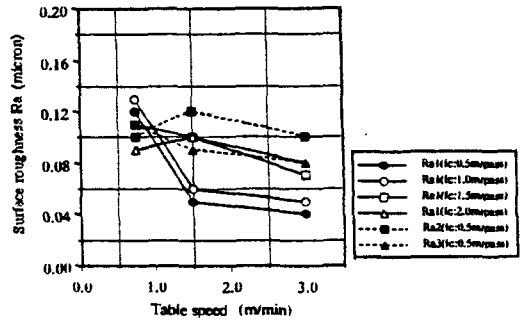


Fig. 12 Effects of table speed & cross-feed on the surface roughness R_a (grinding speed : 1,700m/min)

*notation 1 : depth of cut 1.0micron/pass, WA 300
 2 : depth of cut 1.0micron/pass, WA 80
 3 : depth of cut 1.5micron/pass, WA 300

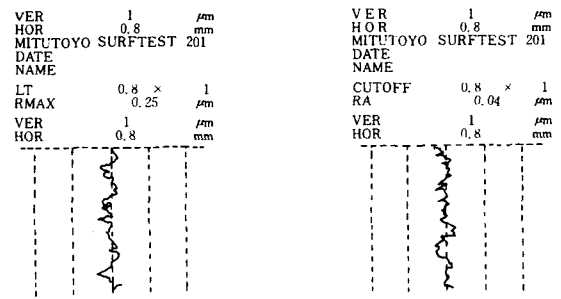


Fig. 13 Profile of ground surface roughness

Fig. 14는 고입도의 WA 연삭 슷돌과 다이아몬드 슷돌을 사용한 미세 절입형의 평면 연삭 가공시 가공면에 크랙이 발생되지 않는 연삭 저항 F_n 및 F_t 의 임계값들을 구해 봄으로써 그 최적 가공조건을 설정하기 위하여 실험해 본 결과를 나타낸 것이다.

연삭 저항 F_n 의 경우 최대 약 0.27N/mm, F_t 의 경우 최대 약 0.095N/mm의 범위 이하를 발생할 수 있는 조건내에서의 마무리 가공용 WA 연삭 슷돌을 사용함이 바람직 함을 알 수 있다.

Fig. 15는 WA 연삭 휠을 채택하여 미세 절입형 초경 밀 가공을 추진할 때 그 가공 조건의 최적 적용 여부에 따라 초경면상에 크랙이 발생할 수 있다는 것을 SEM 촬영을 통해서 나타낸 것이다.

미립형 고입도 다이아몬드 휠을 사용한 미세 절입가공에 의한 피삭재 가공면과 이에 고입도 WA 연삭 휠

을 사용한 미세 절입가공을 부가한 피삭재 가공면의 표면 품질을 비교해 보고자 3차원 표면조도 측정기를 사용하여 가공면의 wave form 구해본 것을 Fig.16에 나타내 보았다.

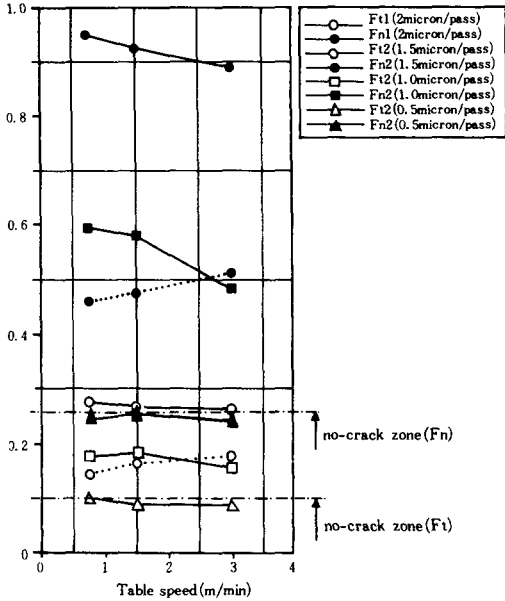


Fig.14 Effect of depth of cut on the micro crack behavior

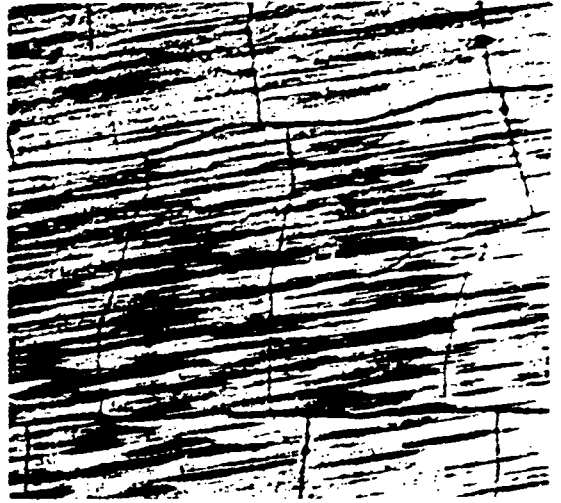
(grinding speed : 1,700m/min)

*:otation 1 : diamond wheel #600

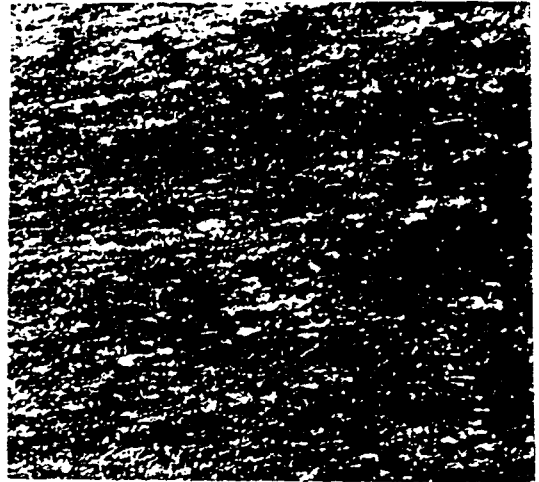
2 : WA wheel #300



(a) ground surface condition (in the case of using #600 diamond wheel)



(b) high precision ground surface condition with micro-crack (in the case of using WA 800 K7 V wheel)

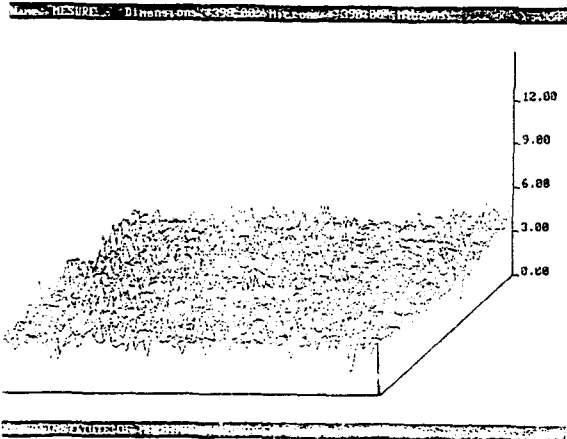


(c) high precision ground surface condition without crack (in the case of using Wa 300K7 wheel)

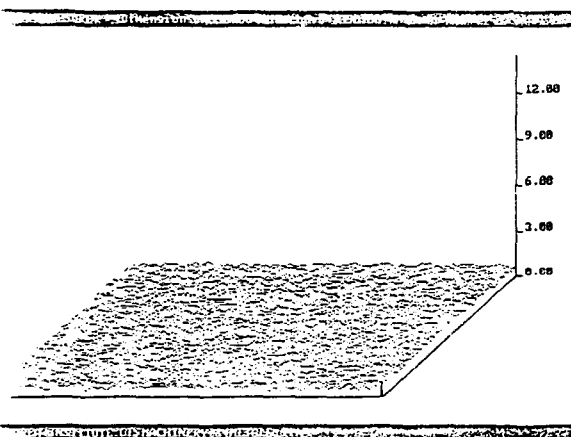
Fig.15 SEM micrographs of ground surface

역시 후자의 경우에 경면과 같은 가공면 효과를 얻을 수 있음을 확인해 볼 수 있었으며, 이를 Fig.17과 같이 형상의 반사율을 사진으로 촬영하여 나타내 보았다. 왼쪽은 #140의 다이아몬드 스톨로 가공한 후의 가공면이며 가운데는 #600의 다이아몬드, 오른쪽은 no-crack zone에서 WA 스톨을 사용하여 가공한 표면이다.

4. 결론



(a) ground surface by using #600 diamond wheel



(b) finished ground surface by using WA 300 K7V wheel

Fig.16 Examples of surface wave forms after grinding machining

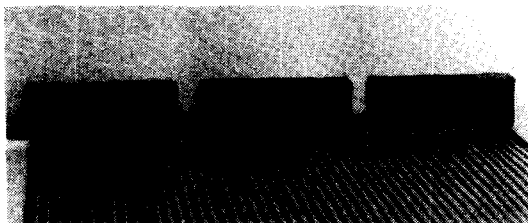


Fig.17 Finished ground surface with ultra-precision of WC-Co workpiece

초정밀 금형용 초경 합금재인 P10계를 대상으로 하여 고신뢰도를 지니는 미립형 고입도의 다이아몬드 연삭 슷돌을 이용한 고정도의 평면 연삭 가공을 실행함에 있어 후 가공이 필요없는 가공면을 단일 가공 공정으로 얻을 수 있는 방법을 모색하고자, 고입도의 WA 연삭 슷돌을 이용한 미세 절입형 연삭 가공을 도입할 수 있도록 하며, 초정밀 평면 연삭 가공기술의 기초적이고 체계적인 지식을 얻기 위해 본 실험적 연구를 수행한 결과, 그 가공조건을 설정할 수 있도록 하는데 있어 중요한 기준이 될 수 있는 결과치들을 얻게 되었다.

몇가지 중요한 사항들을 선정하여 항목별로 나타내 보면 다음과 같다.

1) 본 실험의 조건내에서 #140의 다이아몬드 연삭 슷돌을 사용하여 시험편 가공 기준면의 표면 거칠기 값을 최고 $R_{max} 2\mu m$, $R_a 0.3\mu m$ 까지 얻을 수 있었다.

이때 테이블 이송 속도와 cross-feed rate 양이 증가할수록 표면 품위가 악화되었으며, spark-out 5회 실시함으로써 약 20~25%를 개선시킬 수 있었다.

2) #600의 다이아몬드 연삭 슷돌을 사용한 미세 절입형 가공의 최소 절입량은 가공 신뢰성을 감안하여 $1.0\mu m/pass$ 로 설정하였으며, 테이블 이송 속도가 증가하고 cross-feed rate가 적어질수록 가공면 표면 품위가 향상되어 가장 양호한 표면 거칠기 값을 $R_{max} 0.49\mu m$, $R_a 0.06\mu m$ 까지 얻을 수 있었다.

3) WA 연삭 슷돌을 사용한 미세 절입형의 초정밀 가공 수행을 위해서는 #300 이상의 고입도와 절입량 $1.0\mu m/pass$ 이하의 미세 절입이 필요하며, 가공면상의 크랙 발생을 최대한 억제하기 위해서는 연삭저항이 F_n 의 경우 최대 약 $0.27N/mm$, F_t 의 경우 최대 약 $0.009N/mm$ 의 범위내로 발생되어질 수 있는 조건 내에서의 마무리 가공용 WA 연삭 슷돌을 사용함이 바람직함을 알 수 있었다.

4) 다이아몬드 슷돌을 사용한 연삭 가공 후, WA 일반 연삭 슷돌로 미세 절입형 가공을 추가 실행한 결과 $R_{max} 0.25\mu m$, $R_a 0.04\mu m$ 까지 얻을 수 있었으므로 크랙이 발생하지 않은 적절한 연삭조건을 선택할 경우 래핑이나 폴리싱과 같은 후 가공의 효과를 얻을 수도 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 岡村健二郎, 1984, “研削加工”, 精密機械, Vol. 50, p. 69
2. 小野浩二, “研削仕上”, 眞書店, p. 60, 1977
3. 松永博之 外 1人, “ダイヤモンド工具を用いた硬
せい材料の精密加工”, 日本機械學會紙, Vol. 52,
No. 12, pp. 2020-2027
4. 中川減雄, 鈴木 清, “鑄鐵ボンダイヤモンド砥
石によるセラミックスの高効率研削加工,
セラミックス加工 研究會 例會資料(第4會) pp. 10-
15, 1987
5. 西原 徳彦 外 2人, “平面研削における形状精度
に関する研究” 日本精密工學會紙 Vol. 54,
No. 12, pp. 2283-2
6. 프레스 금형에 있어서의 초경합금 재료의 선택방법,
프레스 몰드, Vol. 4, No. 8, pp. 18-29, 1991
7. 平井 健 “金型の超精密切削研削”, 日本精密工學
會紙, Vol. 52, No. 12
8. 繁坂敏郎, “焼結せい材料の加工損傷に関する研究
(第1會), 日本精密工學會紙, Vol. 56, No. 3,
pp. 139-134, 1990
9. 小野浩二, 河村末久, 北野昌則, 島完 勉, “理論
切削工學”, 現代工業社, pp. 192-194
10. 강재훈, 이재경, “초지립 연삭공구의 최적 조정법
에 관한 연구”, '90 한국정밀공학회 춘계학술대회
논문 초록집, pp. 58-67
11. 허성중, 강재훈, 김원일, “초경합금재의 고능률적
연삭가공에 관한 연구”, '91 한국기계학회 춘계학술
대회 논문집, pp. 202-207
12. 岡野修一 外 11인, “精密仕上と特殊加工”, 明現
社, pp. 62-65, 1982