

전해 드레싱을 이용한 초정밀 경면 연삭 가공 기술

이응숙*, 강재훈*, 제태진*

High Precision Grinding Technology Using Electrolytic Dressing Method

Lee Eung Sug*, Kang Jae Hoon*, Je Tae Jin*



1. 서론

초정밀 부품 생산에 필요한 표면 형상 가공기술은 나노미터 수준의 가공면 거칠기를 기초로 한 평면가공, 비구면 복잡형상의 가공, 미세형상의 가공 등 초정밀화, 초평활화, 초미세화를 요구하며 가공의 극한화를 요구하고 있다. 따라서 이러한 초정밀의 표면거칠기와 형상정밀도를 요구하는 요소부품의 가공을 위한 기반기술 및 응용기술확보를 위한 일환으로써 초정밀 경면 연삭과 관련한 연구를 수행하고 있다.

연삭 가공은 기계적인 제거 가공중 다듬질 공정에 적용되는 방식으로써 대부분의 부품 생산 공정에 도입되고 있는 바, 래핑 및 폴리싱 등의 후가공에 의하여 얻을 수 있는 고품위의 최종 경면을 획득할 수 있다면 공정 단축에 의한 생산성 향상 측면을 동시에 만족시킬 수 있는 큰 효과를 얻을 수 있을 것이다.

이를 위해서는 미세 지립형의 연삭 휠을 효율적으로 적용하는 것이 바람직하겠으나 기존에는 적절한 드레싱 방법이 제시되지 않아 가공면 품위를 향상시킬 수 있는 사용 한도의 입도가 제한되었던 것이 사실이다.

연삭 가공 공정 중에 있어서 연속적으로 드레싱을 수행함으로써 지립의 질삭 날끝이 항상 유지되도록 하거나 특히, 고입도형 연삭 휠의 경우에 있어서 미세한 지립의 돌출 높이를 신뢰성과 재현성있도록 제어하기 위하여 초지립형의 연삭 휠에 대한 전해 연속 드레싱(Electrolytic In-process Dressing: ELID)기법이 제안되어 최근 적용중에 있다.

ELID 기법에 의한 연삭 방법은 복합 연삭이 아니라 특수한 분해 작용을 이용한 인프로세스 드레싱 방식에 의하여 연삭 슷들의 연삭 성능을 일정하게 유지하는 연삭 기술이다. 이러한 특수한 전해 현상은 연삭 휠을 연속적으로 용출하여 드레싱을 하는 것이 아니라 연삭 휠의 마멸에

* 한국기계연구원 자동화연구부

대응하여 순응적으로 진행되도록 작용하는 것이라고 할 수 있다.

전해 연속 드레싱 기법의 적용을 위해서는 극성의 부여를 위하여 연삭 휠 측에 대한 전극의 도입이 필요하며 평면 연삭 가공이나 외경 원통 연삭 가공에 있어서는 일반적으로 연삭 휠의 외경에 대한 약1/4-1/3 정도 크기의 전극을 장착하는데 별다른 문제점이 제기되지 않는다.

그러나 내경 원통 연삭의 경우에 있어서는 연삭 휠과 전극이 동시에 공작물의 내경으로 트래버스 오실레이션 운동을 하기 위해서는 특수한 유닛트화 되도록 제작하여 적용할 수 있겠으나 그 크기에 따라 내경 가공의 한계가 제한될 수 있으므로 범용성에 있어서 제약을 받을 수 있다.

따라서 전해 인프로서스 드레싱법에 의한 외경 및 내경의 초정밀 경면 연삭 시스템을 구축하고, 다양한 외경 연삭 실험을 수행하는 한편, 간헐적으로 전해 드레싱이 이뤄지도록 하여 미세립형의 초지립 연삭 휠을 충분히 신뢰성 있게 사용함으로써, 고품위의 내경 원통 연삭 가공을 수행할 수 있도록 할 수 있는 효율적인 방식을 제안, 실험하여 그 적용 효과를 검증하고자 하였으며, 본 문에서는 개발 시스템의 특성 실험 및 각종 재료의 가공실험을 수행한 결과와 산업화 및 실용화 적용 연구를 수행한 결과 등을 중심으로 소개하고자 한다.

2. ELID 연삭의 구성 요소

ELID 연삭의 3대 구성 요소는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 전해 전원 공급용 장치, 연삭 휠 및 전해 연삭액 등으로 분류할 수 있으며, 전해 작용을 위한 전극이 필요하고 가공 시스템으로는 가공 조건이 신뢰성과 재현성있도록 작용할 수 있는 일반 연삭기 등으로도 충분히 적용할 수 있다.

2.1 전해 전원 공급용 장치

일본 이화학 연구소의 연구에 의하여 ELID 기법에 의한 연삭 가공에 적용할 수 있는 전해 작용용 전원의 모델이 개발되었으며, 일본 新東프레이터(株) 등에서 상품화 제작되고 있다.

ELID 조건은 무부하 전압, 최대 설정 전류, 펄스 폭, 파형, Duty factor 등에 의하여 설정되며, 특히 난삭재를 대상으로 하는 경우에는 부도체 피막을 강화하기 위하여 리플 파형이 요구된다.

한편, 교류 전해 작용에 의해서는 부도체 피막이 취약해 지므로 연삭 스톨의 결합제와 공작물간의 간섭이 발생되

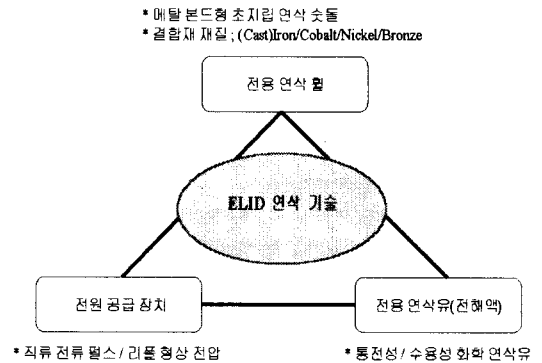


Fig. 1 ELID 연삭의 3대 구성 요소

기 쉬워져 연삭 가공면이 악화되기도 한다.

2.2 연삭 스톨

초기에는 일본의 후지 다이스(株) 등에서 제작한 주철 화이버 본드형 연삭 스톨(CIFB)이 주로 이용되었으나 최근에는 주철 본드형 연삭 스톨(CIB), 철계 본드형 연삭 스톨(IB), 코발트 본드형 연삭 스톨(CB) 등의 다양한 연삭 스톨이 적용되고 있다.

참고로 후지 다이스(株)에서 제조 생산하는 ELID 연삭 전용 연삭 스톨의 사양과 종류를 비교하여 나타내면 Table 1과 같다.

CIFB와 CIB에 의한 가공면의 품질은 큰 차이가 없으나 CIB는 지립의 집중도가 CIFB에 비하여 높게 제조될 수 있으므로 상대적으로 높은 가공 능력 효과를 획득할 수 있으며, IB도 역시 고집중도화될 수 있어 가공 능률이

Table 1 ELID 연삭 전용 연삭 스톨의 시판 종류

연삭 스톨의 종류	결합제의 종류	지립의 사양	용도
Cast Iron Bond Wheels (FCI)	주철계	Diamond/CBN #80-30,000	고능률의 거친연삭/ 고품위의 경면연삭
Special Metal Bond Wheels (FSI-X)	코발트 성분이 함유된 메탈계	Diamond/CBN #60-325	고능률의 거친연삭
Hybrid-bond Wheels (KFSI-2)	레진-메탈 복합계	Diamond #30,000-3,000,000	레핑대체형 정밀연삭

CIB와 거의 동등할 수 있다.

한편, CB는 높은 전해 성능으로 인하여 가공 능률 차원에 있어서 CIB, IB에 비하여 유리하나 가공면의 품위는 악화된다.

전해 작용 전후에 있어서의 연삭 스톨 직경에 대한 증가분을 부도체 피막 두께라고 하며, 초기 전해 드레싱이 시작한 후 서서히 포화하는 경향이 나타나기 시작하다가 임의 시간이 경과하면 포화 상태(가장 두터운 부도체 피막층 두께를 형성)가 된 후 시간이 더 이상 증가하면 오히려 그 상태가 무너지므로 최적 전해 드레싱 시간을 설정할 필요가 있다. 한편, CIBF의 경우에는 일반적으로 약 40 μm 정도의 부도체 피막 두께를 형성할 수 있다.

일반적으로 부도체 피막의 두께는 CIBF > CB > BB(청동 본드형 연삭 스톨) 순서가 되며, CIBF는 황갈색, CB는 짙은 핑크색, BB는 회청색의 부도체 피막 색상을 지닌다.

2.3 연삭액

최근에 있어서 ELID용 연삭액에 대한 상세한 연구가 집중적으로 이뤄지고 있다. 부도체 피막을 얇게 생성하는 연삭액은 높은 절연성을 지니지 않게 되기 때문에 ELID 사이클이 빠르게 반복되도록 하여 예리하게 돌출된 지립들이 공작물을 제거하는 경우가 높아지게 되므로 결과적으로는 가공면의 품위가 저하된다.

일본 노리다케(株)에서 생산하는 통전성 연삭액을 물과 약 50배로 희석하여 사용하는 경우가 가장 바람직하며, 염수와 물이 밸런싱됨으로써 양, 음 이온화되어 구성된다.

3. 초정밀 경면 외경 연삭

전해 연속 드레싱(ELID: Electrolytic In-process Dressing) 법에 의한 초정밀 경면 외경(원통) 연삭 시스템의 개략적 원리는 Fig. 2와 같다. Fig. 3에는 본 연구를 위하여 구성된 초정밀 ELID 경면 원통 연삭 시스템의 사진을 나타내었고, 개략적인 시스템의 특성 및 실험 조건을 Table 2에 나타내었다. ELID 연삭 가공을 위해서는 연삭 휠의 초기 형상 정도 보정을 위한 트루잉(Truing) 작업 후 연삭 휠 가공면에 부도체 피막 형성을 위한 초기 드레싱 공정을 수행한다. 초기 드레싱 시에는 두께 30~40μm의 안정된 부도체 피막을 얻기 위하여 연삭 휠을 상대적으로 저속 회전시킨다. 본 실험에서는 연삭 휠의 크기를 고려하여 가공시 주축 회전 속도의 약 1/6수준인 10Hz(236rpm, 260m/min)의 조건을 적용하여 드레싱 작업을 수행하였다.

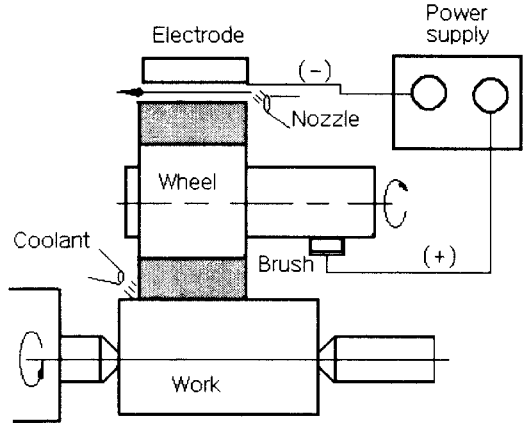


Fig. 2 ELID 원통연삭시스템 원리

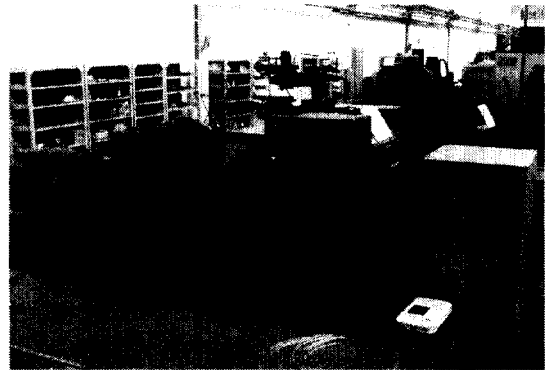


Fig. 4 ELID용 연삭반 및 전원 장치

Table 2 ELID 연삭 시스템의 사양 및 가공 조건

가공시스템	초정밀만능원통연삭기	Toyoda GUX100, 3.75kw 절삭 깊이량 최소 0.5μm 제어 가능
ELID 장치	연삭 휠	FCI Diamond 휠: 350×W10 입도 # 325, 2000, 4000, 8000
	전원 공급 장치	TRUELID 630, PULSER Power On-Off Time Min. 2μs
	전극장치	전극: SUS, 연삭 휠 외주의 1/4크기 브러쉬: 그래파이트
	전해액(연삭유)	Noritake AFG-M, CEM 50배 희석 사용
	인버터	LG SV075-IS3, 연삭 휠의 주속도 변경용

Fig. 4와 Fig. 5에는 초기 드레싱에 있어서 시간 경과에 따른 전류와 전압의 변화에 대하여 입도 #325, #2000, #4000의 연삭 휠을 대상으로 측정한 결과를 각각 나타내었다.

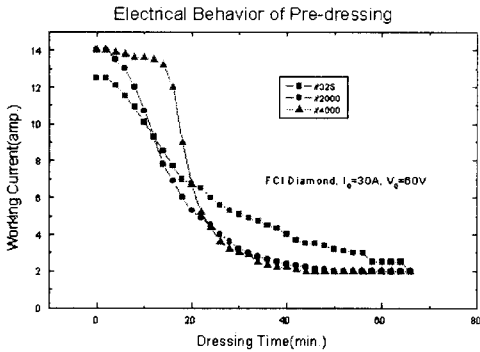


Fig. 4 초기드레싱중의 전류변화

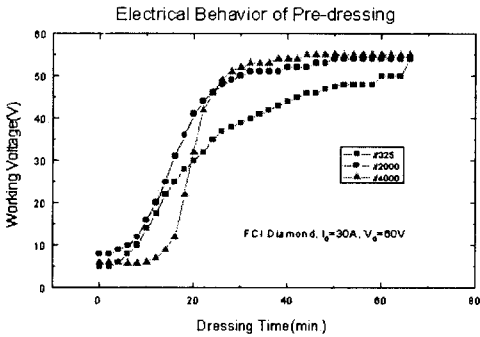


Fig. 5 초기드레싱중의 전압변화

Fig. 6과 같이 대표적인 난삭재라고 할 수 있는 고경도의 초경 합금에 대하여 적용함으로써 #325, 2000, 4000의 연삭 휠을 사용한 경우에 각각 Ra 0.11 μ m, 11.9nm, 6.0nm의 가공면 거칠기와 최소 0.1 μ m의 초정밀 진원도를 획득하였다.

Fig. 7과 Fig. 8에 절삭 깊이량은 2 μ m/pass으로 고정하되 공작물의 트레이스 이송 속도와 회전 속도가 변화하는 경우에 있어서 연삭 휠의 입도가 가공면 거칠기에 미치는 영향을 각각 나타내었다.

Fig. 9와 같이 경도 HRC62인 SCM22H 강재에 대하여

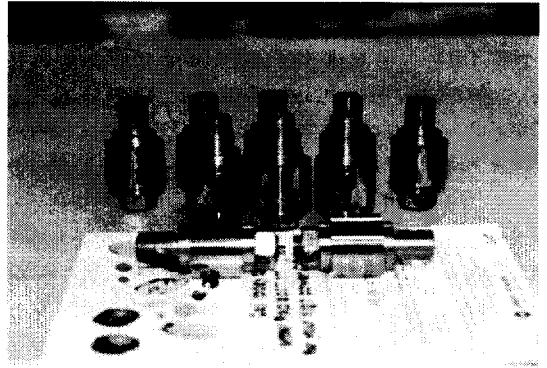


Fig. 6 초경 합금의 경면 연삭가공예

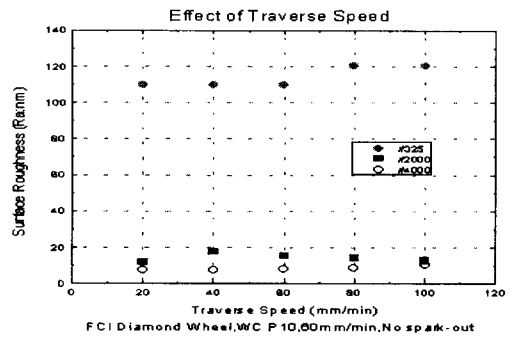


Fig. 7 트레이스 이송 속도 변화에 따른 가공면 거칠기의 변화

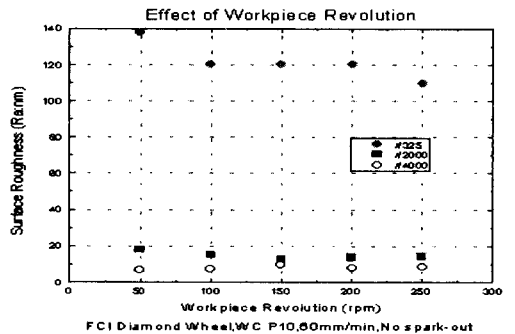


Fig. 8 공작물 회전 속도 변화에 따른 가공면 거칠기의 변화

#4000의 연삭 휠을 사용하여 적용함으로써 Fig. 10과 같이 Ra 10nm의 가공면 거칠기를 지니는 고정도 경면 품위

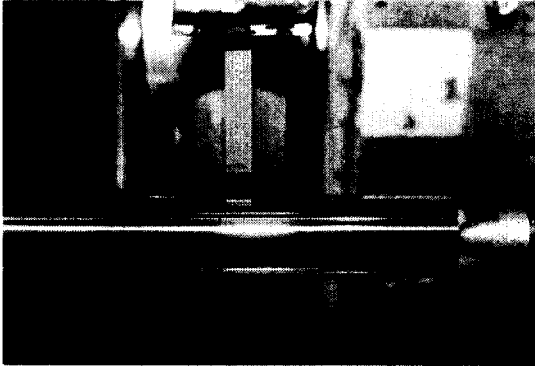


Fig. 9 SCM 강재의 경면 연삭 가공 사진



Fig. 10 SCM 강재의 경면 연삭 가공 예

를 획득한 바, 기계 구조용 강재의 경우에도 nm급의 고품위 초정밀 가공이 가능함을 확인할 수 있었다.

Fig. 11~13에 공작물의 트래버스 이송 속도, 절삭 깊이량의 가공 조건, 공작물의 회전수가 가공면 거칠기에 미치는 영향을 각각 나타내었다. 공작물의 트래버스 이송 속도의 영향은 명확하지 않으며 공작물의 회전수와 절삭 깊이량의 영향은 입도가 높은 연삭 휠을 사용하는 고운 연삭의 경우에 거의 없으나 입도가 낮은 연삭 휠을 사용하는 거친 연삭의 경우에 상대적으로 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 14와 같이 Al_2O_3 , Si_3N_4 , ZrO_2 3종류의 세라믹스에 대하여 #2000의 연삭 휠을 사용하고 연삭 휠 회전수 950rpm, 공작물 회전수 100rpm, 공작물 트래버스 이송

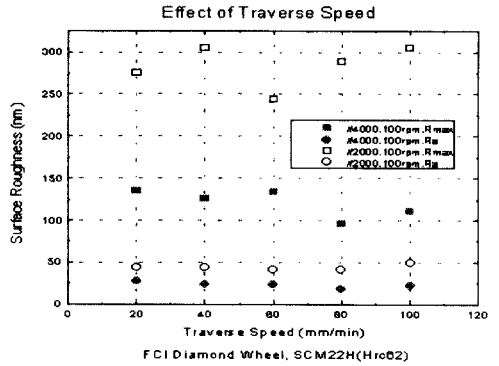


Fig. 11 트래버스 이송 속도의 변화에 따른 가공면 거칠기의 영향

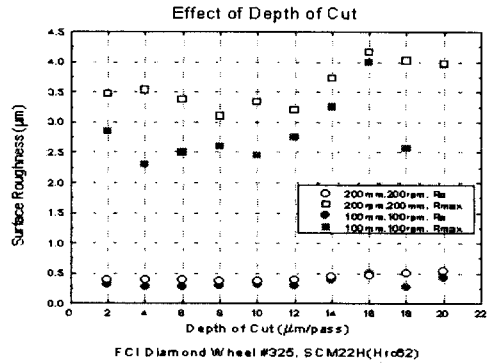


Fig. 12 절삭 깊이량의 변화에 따른 가공면 거칠기의 영향

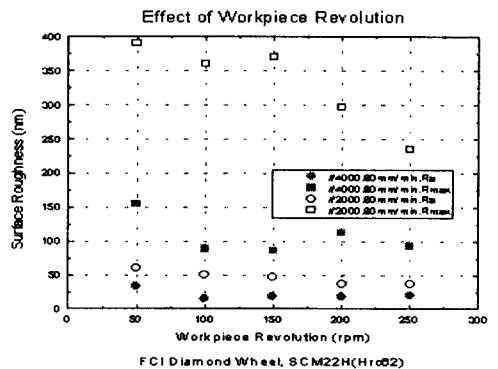


Fig. 13 공작물의 회전수 변화에 따른 가공면 거칠기의 영향

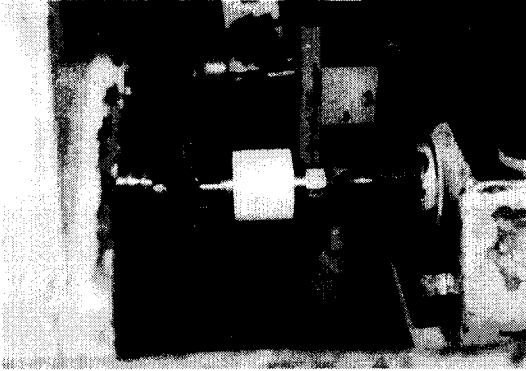


Fig. 14 세라믹스의 경면 연삭가공 사진

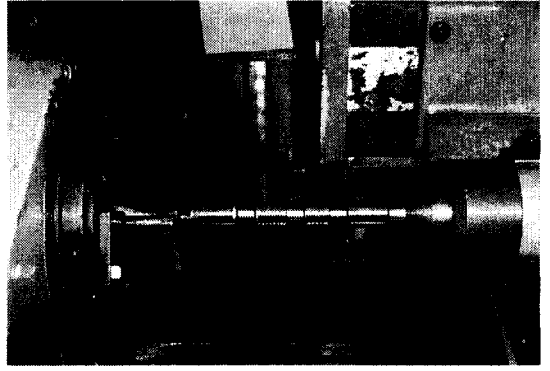


Fig. 16 Manual Valve의 연삭가공 사진

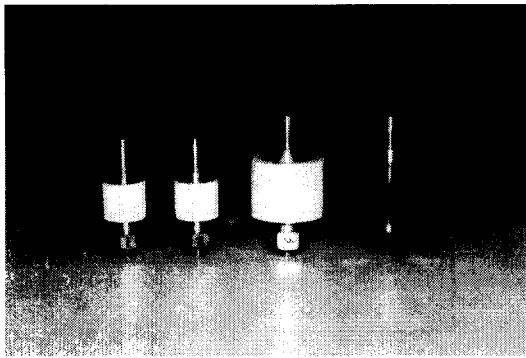


Fig. 15 세라믹스의 경면 연삭가공 예

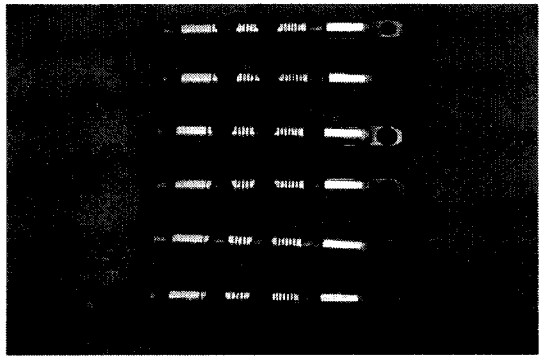


Fig. 17 Manual Valve의 경면 연삭가공 예

속도 60mm/min, 절삭 깊이량 1 μ m/pass(양단 절입)의 조건을 적용함으로써 Fig. 15과 같이 ZrO₂ 세라믹스 경우에 있어서 Ra 6nm의 가공면 거칠기를 지니는 고정도 경면 품위를 획득하였다.

Fig. 16과 같이 경도 HRC57로 열처리한 SCM415재의 유량 및 방향제어용 Manual Valve에 대하여 #2000의 연삭 휠을 사용하여 적용함으로써 Fig. 17과 같이 Ra 45nm의 가공면 거칠기와 약 2 μ m의 진원도를 지니는 고정도 경면 품위를 획득하였다.

Fig. 18과 같이 DVD Pick-up Base용 초경 합금재(P10) Die Casting 금형 Core에 대하여 #4000의 연삭 휠을 사용하여 적용함으로써 Fig. 19과 같이 Ra 22nm의 가공면 거칠기와 약 2 μ m의 진원도를 지니는 고정도 경면 품위를 획득하였다.

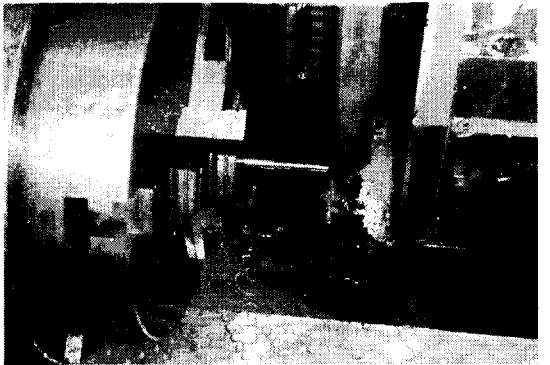


Fig. 18 금형 코어부품의 연삭가공 사진



Fig. 19 금형 코어부품의 경면 연삭가공 예

4. 초정밀 경면 내경 연삭 기술

전해 연속 드레싱 기법의 적용을 위해서는 극성의 부어를 위하여 연삭 휠 측에 대한 전극의 도입이 필요하며 평면 연삭가공이나 외경 원통 연삭 가공에 있어서는 일반적으로 연삭 휠의 외경에 대한 약1/4-1/3 정도 크기의 전극을 장착하는데 별다른 문제점이 제기되지 않는다.

그러나 내경 원통 연삭의 경우에 있어서는 연삭 휠과 전극이 동시에 공작물의 내경으로 트래버스 오실레이션 운동을 하기 위해서는 특수한 유닛트화 되도록 제작하여 적용할 수 있겠으나 그 크기에 따라 내경 가공의 한계가 제한될 수 있으므로 범용성에 있어서 제약을 받을 수 있다.

따라서 간헐적으로 전해 드레싱이 이뤄지도록 하여 미세립형의 초지립 연삭 휠을 충분히 신뢰성있게 사용함으로써, 고품위의 내경 원통 연삭 가공을 수행할 수 있도록 할 수 있는 방식을 도입, 실험하여 그 적용 효과를 검증하고자 하였다.

Fig. 20에는 주철 본드형 다이아몬드 연삭 휠에 대한 간

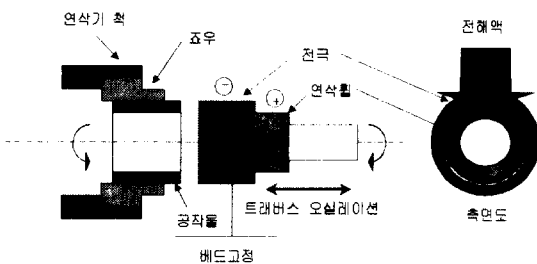


Fig. 20 간헐식 드레싱의 기본 원리도

헐식 전해 드레싱의 기본 원리를 나타내었다.

연삭 휠은 내경 연삭용 어태치먼트의 중심부에 원할하게 접촉하는 급전체(브러쉬)에 의하여 양극이 되고 베드 위에 장착한 고정부에 위치한 전극은 음극이 된다.

양극간에 약 0.1 mm 정도의 극간을 유지시켜 통전성의 연삭액을 공급함으로써 양극간에 전압이 인가되어 전기적인 분해 작용이 이뤄지게 된다.

구리 전극은 전해액의 공급이 원할하게 이뤄지도록 상부가 열린 파이프 형상을 지니며, 이 때 전극의 너비는 연삭 휠의 너비와 동일한 치수가 되도록 한다.

간헐식 전해 드레싱에 의한 내경 연삭 가공 시스템의 사진을 Fig. 21에 나타내었다.



Fig. 21 간헐식 전해 드레싱에 의한 연삭가공실험시스템사진

본 실험에서 사용한 연삭기는 일본 미쯔이 정공사의 원통 연삭기(모델 MS210)이며, 전해 전원 공급 장치는 일본 Fine Sodick사의 Power supply unit(모델 SUE-87, 90V/36A, τ_{on}/τ_{off} 1-100 μ s)이다.

연삭 휠은 직경 30mm, 너비 20mm를 지니는 일본 후지 다이샤사의 주철 본드형 다이아몬드 연삭 휠로써, #325/600,2000,4000 입도형의 4종류를 채택하였다.

공작물은 99.7%의 고치밀도형 알루미늄 세라믹스와 베어링강, SKH11, SKD59의 4종을 대상으로 하였다.

전해액은 일본 노리다케사의 AFM20을 증류수에 40배로 희석하여 사용하였다.

연삭 휠의 초기 트루잉은 직경 80mm, 너비 5mm를 지니는 카본 휠을 아베에 장착하여 트루어로 사용하면서 방전 작용에 의한 트루잉이 이뤄지도록 하였다.

가공 실험은 연삭 휠과 공작물의 속도, 연삭 휠의 트래버스 이송 속도, 절삭 깊이량 및 pulse on/off time(작동/휴지 시간) 등을 변화하며 수행하였으며, 가공 조건을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 가공 조건

○ 연삭 휠 주속도	600m/min
○ 공작물 회전 속도	100-400rpm
○ 트래버스 이송 속도	20-100mm/min
○ 절삭 깊이량	1-10 μ m/pass
○ Pulse on/off time(τ_{on}/τ_{off})	1-4 μ s
○ 전해액 공급량	0.8-1.2 l/min
○ 최종 스파크 아웃수	2회
○ 절삭 깊이량 부가 방식	양단 절입 방식

충분한 전해 작용에 의한 연삭 휠의 부동태 피막층이 안정되게 형성되어 신뢰성있는 가공을 수행하기 위해서는 비가공 초기시의 전류치 변화에 대한 거동을 파악할 필요가 있다.

Fig. 22에는 입도 2000의 연삭 휠을 대상으로 초기 드레싱을 수행하는 경우에 있어서 시간의 변화에 따른 전류치의 변화를 측정하여 나타내었다.

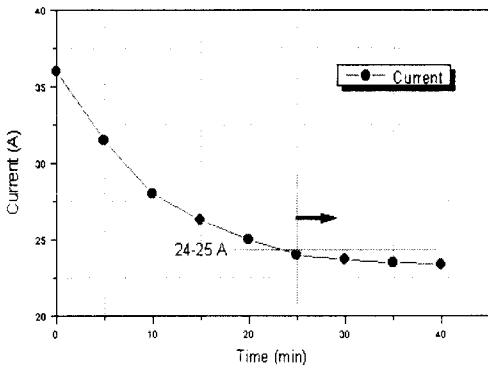


Fig. 22 시간 경과에 따른 전류치의 변화

그림으로부터 초기 36A의 전류치는 시간의 경과에 따라 점차 감소하다가 약 20-25분후 부터는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 초기 드레싱시의 용출에 의한

지립 돌출 과정을 거쳐 부동태 피막층이 형성되어 안정된 연삭 휠 가공면 상태를 갖추게 되었음을 확인할 수 있다.

동일한 베어링 강을 대상으로하여 연삭 휠의 입도를 변화하며 가공을 수행한 경우에 있어서의 가공면 품질을 측정, 비교하여 Fig. 23에 나타내었다.

입도 325, 600, 2000, 4000 연삭 휠의 경우에 대하여 각각 절삭 깊이량은 10, 4, 2, 1 μ m/pass, 트래버스 이송 속도는 100, 60, 40, 20mm/min, 공작물 회전 속도는 100, 150, 300, 400rpm으로 하여 순차적인 가공 공정으로 수행하였다.

그림으로부터 입도 325의 연삭 휠로만 가공한 경우에 있어서의 가공면 거칠기는 일반 연삭의 경우와 거의 차이가 나지 않는다는 것을 알 수 있어 적용의 의미가 거의 없다고 할 수 있다.

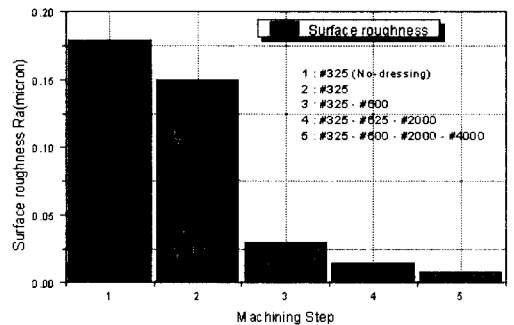


Fig. 23 가공 조건과 가공면 거칠기와의 관계

또한, 그림으로부터 입도 4000의 연삭 휠을 최종적으로 사용한 경우에 있어서 가공면 거칠기가 약 Ra 8nm 정도로 나타나 고품위의 경면에 가까운 상태를 획득할 수 있음을 알 수 있다.

알루미나 세라믹스 및 베어링 강과 SKD, SKH 등의 금속재를 대상으로 하여 최종적으로 입도 4000의 연삭 휠을 사용한 가공후 가공면 거칠기를 측정하여 Fig. 24에 나타내었다.

그림으로부터 입도 4000의 연삭 휠에 의한 가공면 거칠기는 약 Ra 7-13 nm 정도로 고품위의 가공면 상태를 획득할 수 있음을 알 수 있으며, 경도가 높은 금속재일수록 다소 가공면 거칠기가 상대적으로 더욱 양호하다는 것도 확인할 수 있다.

Fig. 25와 Fig. 26에는 SKH-11강과 알루미나 세라믹스

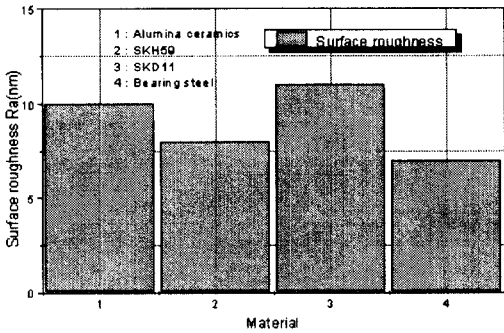


Fig. 24 각 가공물의 가공면 거칠기 비교



Fig. 25 SKH-11강의 경면연삭가공 예

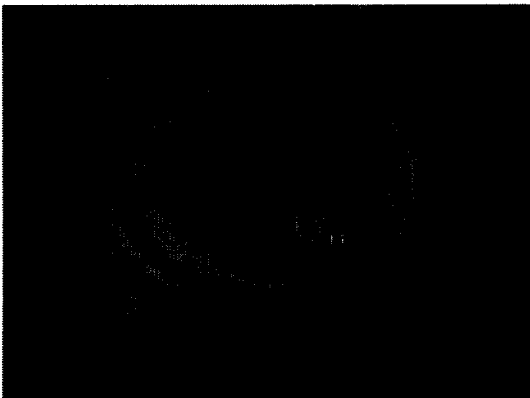


Fig. 26 알루미나 세라믹스의 경면연삭가공 예

재에 대한 경면 품위의 내경 연삭 가공 예를 각각 나타내었다.

5. 결론

외경/내경 원통 연삭의 경우에 대하여 고품위의 경면 가공을 실현하기 위하여 연속 및 간헐식 전해 드레싱 기법을 채택한 가공 실험 시스템을 구축하고 경취성 세라믹스, 초경 합금 및 일반 강재 등의 다양한 소재를 대상으로 한 실험을 수행하였다.

실험 결과들로부터 세라믹스와 금속재의 경우에 대하여 모두 나노미터급의 고품위 경면 가공 품위를 획득할 수 있어 후가공을 생략한 고정도의 가공으로 적용할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

향후 정밀 기계 요소 부품 및 광학, 메카트로닉스 부품, 의료 기기, 반도체 관련 부품 등과 각종 초소형 정밀 금형 등을 비롯한 첨단 산업 분야의 핵심 부품에 대한 실용화 및 응용 연구를 체계적으로 수행함으로써 국내의 생산 가공 현장에 관련 기술을 폭넓게 보급할 예정이다.

참고 문헌

- (1) H. Ohmori, K. Toyama and T. Nakagawa, "Grinding of Silicon using Cast Iron Fiber Bonded Wheel", Preprint for Autumn Conference of JSPE, pp. 715~716, 1988.
- (2) H. Ohmori, "In-process Dressing Grinding Technique for Ultra-precision Mirror Surface Machining", Int'l Journal of JSPE, Vol.26, No.4, pp. 273~277, 1992.
- (3) H. Ohmori, "Influence of Electrical Conditions on Ultra-precision Mirror Surface Grinding with Electrolytic In-process Dressing", 1st Int'l ABTEC Conf., pp. 68~73, 1993.
- (4) F. Yasuchika, T. Miyazawa, "Cast Iron Bonded Diamond Wheel and Electrolytic In-process Grinding", Journal of the Society of Grinding Engineers, Vol.40, No.6, pp. 20~21, 1996.