〈논 문〉

최적 연속 전해드레싱에 의한 연삭기구의 규명에 관한 연구

이 은 상* · 김 정 두**

(1996년 12월 13일 접수)

A Study on the Analysis of Grinding Mechanism by Using Optimum In-process Electrolytic Dressing

Eun-Sang Lee and Jeong-Du Kim

Key Words: Optimum In-process Electrolytic Dressing System(최적 연속 전해드레싱 시스템), Cast Iron Bond Wheel(주철결합제 숫돌), Grinding Mechanism(연삭기구), Dressing Current(드레싱전류), Insulating layer(절연층), A/D Converter(아날로그/디지털 변환기)

Abstract

In recent years, grinding techniques for precision machining of brittle materials used in electric, optical and magnetic parts have been improved by using superabrasive wheel and precision grinding machine. The completion of optimum dressing of superabrasive wheel makes possible the effective precision grinding of brittle materials. However, the present dressing system cannot have control of optimum dressing of the superabrasive wheel. In this study, a new system and the grinding mechanism of optimum in-process electrolytic dressing were proposed. This system can carry out optimum in-process dressing of superabrasive wheel, and give very effective control according to unstable current and gap increase. Therefore, the optimum in-process electrolytic dressing is a good method to obtain the efficiency and mirror-like grinding of brittle materials.

기호설명

I [A]	: 드레싱전류
t_0 [μm]	: 산화막 두께
w [g]	: 메탈본드 용출되는 량
n	: 원자가
F	: 패러데이상수
M	: 원자량
ρ [g/cm^3]	: 원소의 밀도
V_0 [cm^3]	: 이론적인 체적제거량
V_s [cm^3/g]	: 비가공체적
V_r [cm^3]	: 실제의 체적제거량
η	: 전류효율
v [cm^3/sec]	: 체적제거속도
F_{n1} [N]	: 연삭입자 1개의 수직분력
F_{nc} [N]	: 절삭수직분력
F_{ns} [N]	: 접촉수직분력
F_{t1} [N]	: 연삭입자 1개의 수평분력
F_{tc} [N]	: 절삭수평분력
F_{ts} [N]	: 접촉수평분력
V [V]	: 드레싱전압
Ip [A]	: 피크전류
t [sec]	: 드레싱 시간
τ_{on} [μsec]	: 펄스유지폭
τ_{off} [μsec]	: 펄스휴지폭

*한국과학기술원 대학원 기계공학과
**회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

최근에 전자산업, 정보통신산업의 발달로 첨단산업분야 재료인 자기헤드 페라이트, 초경합금, 단결정 산화마그네슘, 금형강, 실리콘웨이퍼 등의 경면연삭이 요구되어지며, 이를 달성하기 위해서 연속적인 드레싱이 매우 중요하게 되었다. 경취재료중 초경합금은 높은 압축강도 및 온도상승에 무관한 경도유지 등의 특성에 의해서, 공구 및 금형에 많이 사용되고 있으나 취성 및 강성에 의해서 일반숫돌로 가공이 매우 어려운 난삭재로 알려져 있다. 따라서, 다이아몬드숫돌에 의해서 가공이 이루어져야 한다.[1] 또한, 공구 및 금형재료로 사용하기 위해서 경면가공이 요구되어지며, 경면달성을 위해서는 초미립자(superabrasive) 숫돌이어야 가능하다. 초미립자 다이아몬드숫돌을 사용하여 연삭할 경우 눈메움(loading) 및 날무디어짐(glazing)에 의한 드레싱에 상당한 어려움이 있다.[2] 이러한 현상을 방지하기 위해서 연속적인 드레싱이 매우 중요하게 되었다. 스틱형태의 호닝숫돌을 공작물 측면에 같이 장착하여 연삭가공중 연삭테이블의 이동으로 드레싱이 되는 기계적인 드레싱이 있으며, 방전가공을 적용한 연삭숫돌의 드레싱방법도 제안되었다.[3,4]

연속 드레싱의 한 방법으로 금속결합제 숫돌 주위에 전극을 설치하고, 숫돌회전과 동시에 전해액을 그 사이에 통과하게 하여 펄스전원을 인가함으로서 전기분해작용에 의한 드레싱을 하는 인프로세스 전해드레싱기법[5~8]이 근년에 발표되어 우수한 성능을 나타내고 있으나, 전해드레싱 시간의 경과와 부수적으로 나타나는 불안정한 드레싱전류로 인한 문제점으로 항상 일정한 최적상태의 드레싱을 유지하는데 어려움이 있다. 연속 전해드레싱은 전기분해작용에 의해서 숫돌의 금속결합제가 이온용출되어 제거됨으로써, 연삭날이 결합지지력이 약해져서 무디어진 연삭날이 제거되는 공정을 반복하게 되어 간극의 증가 및 전해 산화물에 의한 전류값의 변화가 발생하여 전해드레싱의 효과가 감소하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하여 항상 최적상태의 드레싱을 유지하는 컴퓨터 인터페이스용 전해드레싱 시스템[9]을 자체개발하였으며, 연속 전해드레싱시 드레싱전류값의 변화에 따라 시스템의 입력값을 조절함으로써 최적의 전해드레싱을 능동적으로 유지하는 방법을 채택하여 불안정한 산화막 생성 및 간극변화 등에 대한 드레싱전류를 항상 일정하게 유지할 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 최적 전해드레싱 시스템을 적용하는 연삭기구를 분석하고, 그의 적용에 따른 난삭재 가공효과를 고찰하고자 한다.

2. 연속 전해드레싱을 적용한 연삭기구

연속 전해드레싱은 전기분해작용에 의해서, 숫돌의 마멸된 연삭입자가 제거되고 새로운 입자가 재생되어, 마멸되지 않은 연삭입자에 의해서 연삭을 가능하게 하여 양호한 가공표면을 기대할 수 있다. 연삭숫돌의 결합제는 주철결합제로 구성되어 있어서 통전이 가능하며, 전해드레싱 전원을 양극으로 공급하고, 전극(electrode)은 음극과 연결하고 두 전극사이에 전해액을 공급하면 전극의 작은 틈사이에서 전해작용이 일어나게 되어 연삭숫돌의 금속결합제가 전해작용에 의해 Fe^{2+}로 이온화되어 용출된다. 이온화된 Fe는 산화물인 $Fe(OH)_2$ 또는 $Fe(OH)_3$로 되고, 물의 전해작용에 의해 절연물인 Fe_2O_3 산화물로 변해 숫돌 표면에 응착된다.[5]

$$Fe+2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2+H_2 \quad (1)$$

양극에서 Fe가 전해용출하고, 음극에서는 수소가스가 발생된다.

Fig. 1은 연속 전해드레싱의 원리를 나타낸 그림으로서, 점선을 일반적인 전해드레싱의 원리[5]를 나타내고 있으며, 실선은 전해드레싱 제어에 의한 최적 전해드레싱 원리를 나타내고 있다. 전해드레싱 제어를 한 경우와 제어를 하지 않은 경우가 1에서 3단계까지의 상태는 거의 같으나 드레싱 안정화 상태인 4단계에서 차이가 난다. 제어를 하지 않은 경우에는 산화물이 제거되고 또한 연삭입자도 마멸이 증가되어 표면에 나쁜 영향을 미칠 수 있는 상태에서도 전해작용에 의한 숫돌의 결합제 제거가 미처 이루어지지 않아서, 연삭력의 증가 및 표면생성에 나쁜 작용을 하게 된다. 그러나, 최적 전해드레싱을 적용한 경우에는 마멸된 입자가 보다 빠르게 제거되어서 새로운 입자를 돌출함으로써 연삭표면에 나쁜영향을 미치지 않아서, 양호한 가공 표면을 기대할 수 있다. 이 원인은 지속적인 일정한 전해작용에 의한 숫돌결합제의 가공이 진행되어 산화

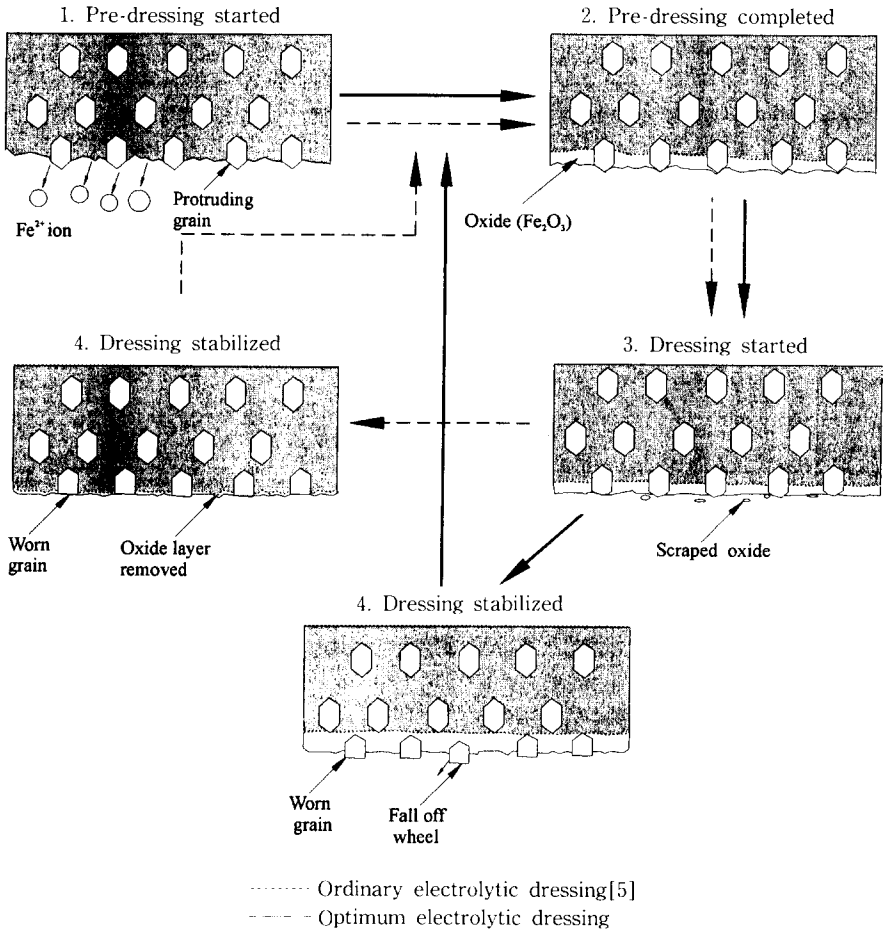


Fig. 1 Schematic diagram of the mechanism of in-process electrolytic dressing

막이 형성되어 숫돌입자의 지지력의 약화되어, 입자의 마멸에 따른 과도한 연삭력 등에 의해서 마멸입자가 쉽게 제거되기 때문이다. 연속적인 전해드레싱에서 I(A)의 드레싱전류가 t초간 흐름으로서 양극인 숫돌의 메탈본드가 용출되는 량을 w라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$It = wnF/M$$
$$w = MIt/nF \quad (2)$$

n : 원자가, F : 패러데이상수, M : 원자량

여기서, 원소의 밀도를 ρ라고 하면, 전해드레싱에 의한 주철결합제의 이론적인 체적제거량(V_0)은 다음과 같다.

$$V_0 = MIt/nF\rho = V_sIt \quad (3)$$

V_s : 비가공체적($M/nF\rho$)

실제의 체적제거량(V_r)은 전류효율(η)을 고려하여야 되며,

$$V_r = \eta V_0 = \eta MIt/nF\rho = \eta V_sIt \quad (4)$$

따라서, 단위시간당의 체적제거량인 체적제거속도(v)는 다음과 같이 표현된다.

$$v = dV_r/dt = \eta MI/nF\rho = \eta V_sI \quad (5)$$

전해드레싱시 체적제거속도는 재료의 원자량, 전해용출시 전기량, 양전극 사이의 전류값에 영향을 받음을 알 수 있다. 재료, 즉 숫돌결합제에 따른 비가공체적이 일정하다고 하였을 경우 전류값의 변화에 따라 전해드레싱에 의한 체적제거속도가 주로 영향을 받게 된다. 따라서, 양전극 사이에 전류를 변화시키는 인자를 조절함으로써 전해드레싱에 의한 체적제거속도를 조절할 수 있으며, 연속 드레싱

에 의한 전류의 변화에 의해서 전해가공성이 변화된다. Fig. 2는 연속 전해드레싱에 의한 전기분해시 형성되는 작용을 나타낸 것이다.

전극과 숫돌의 금속결합제 사이에는 전해액과 절연층인 산화막에 의한 드레싱전류의 저항으로 도식화 될 수 있다. 이때의 드레싱전류를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I=\frac{V}{R_{ele.}+R_{insul.}} \tag{6}$$

전해액의 저항이 일정하다고 가정을 하면 산화절연층의 저항에 의해서 드레싱전류가 변화됨을 알 수 있다. 따라서, 숫돌결합제의 가공성은 전류에 따라 조절되며, 드레싱전류는 절연층의 제약을 받게 된다. 사진(View A-A)은 숫돌표면에 산화막이 있는 경우와 산화막을 제거한 경우를 나타내고 있으며, 산화막은 약간의 다갈색을 띠고 있다. 산화막의 두께 측정을 위해서는 간극센서를 사용하였다.

Fig. 3은 최적 연속 전해드레싱 시스템을 적용한 드레싱전류 제어한 경우와 제어하지 않은 경우에 따른 연삭가공시 연삭숫돌의 상태를 도식화한 것으로서, 각각 산화막의 차이를 나타내게 된다. 연삭입자중 A와 C는 어느 정도 연삭가공을 진행하여 마멸된 입자로서 드레싱제어를 하지 않은 (a)의 경우에는 산화막이 얇게 형성되어 있고 금속결합제에 완벽하게 결합이 되어 있어서 공작물의 연삭가공에 작용을 하게 된다. 그러나, 드레싱제어를 한 경우에는 산화막(t_2)이 약간 두껍게 형성되어 있어서 '연삭가공시 마멸된 입자인' A, C는 연삭시 연삭저항에 의해서 제거되어 마멸된 입자가 공작물에 나쁜 영향을 미치는 것을 방지하게 된다. 드레싱제어를 하지 않은 경우에는 불안정된 산화막에 따른 전류의 변화 및 간극변화에 따른 드레싱전류의 불안정한 변화 등에 의해서 드레싱효과를 감소케

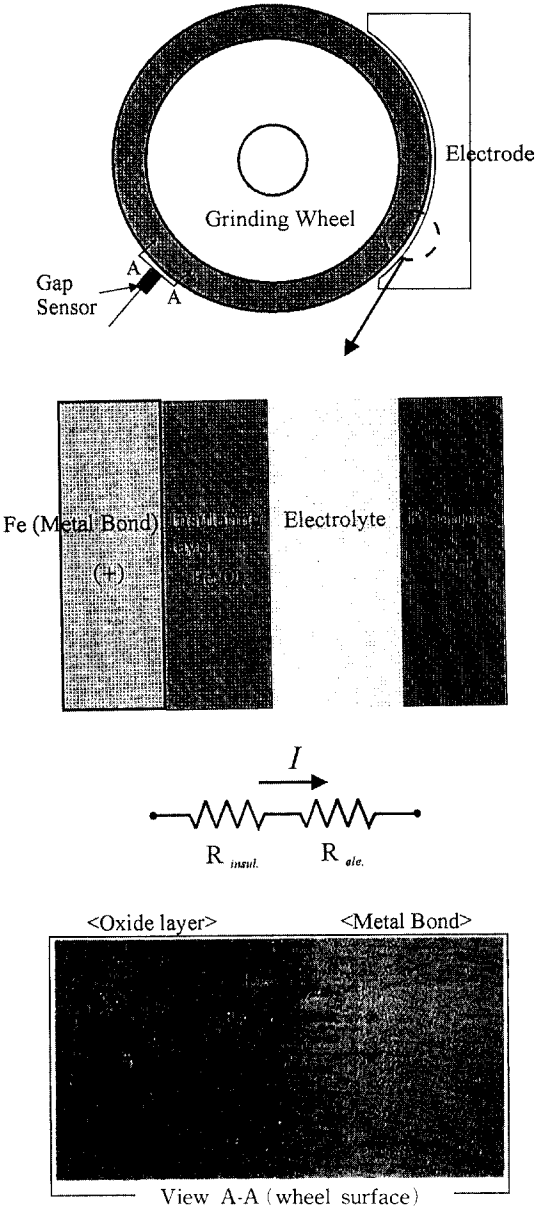
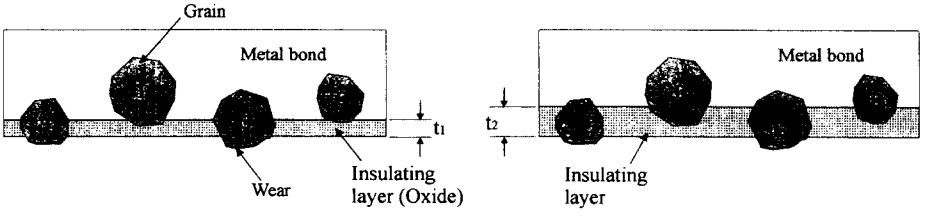


Fig. 2 Schematic of the resistance of dressing current



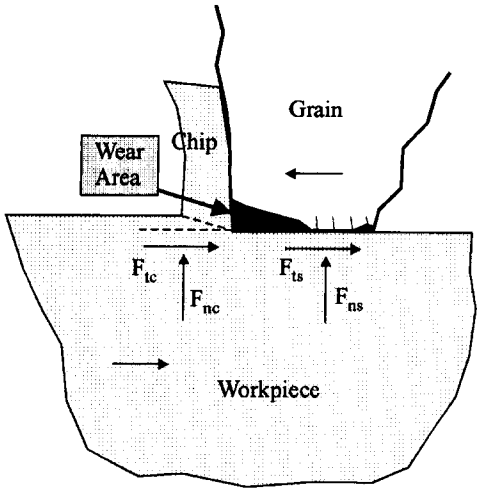
(a) Without dressing control (b) With dressing control

Fig. 3 Schematic of wheel condition with in-process electrolytic dressing

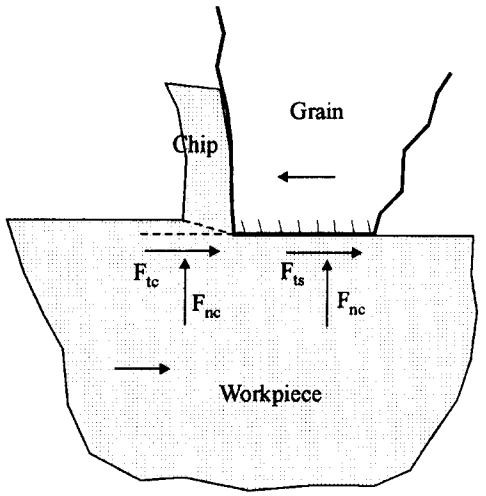
하여 마멸된 입자에 의한 연삭가공을 유발하게 된다. 따라서, 드레싱전류를 제어한 경우에는 산화막을 보다 일정하게 유지함으로서, 드레싱전류의 변화나 간극증가 등에 따른 드레싱효과가 저하되지 않아서 항상 새로운 연삭입자의 돌출이 가능하다.

드레싱의 성능은 마멸된 입자가 숫돌표면에 돌출되어 있느냐 하는 것으로 구분할 수 있으며, 마멸된 입자는 연삭력의 증가를 유발하고 가공 표면에 나쁜 영향을 미치게 된다.

Fig. 4는 연삭입자 1개가 연삭하는 것을 도식한 것으로서, 드레싱 제어를 수행한 경우와 수행하지 않은 경우를 나타내고 있다. 연삭입자 하나의 수직분력(F_{n1})은 연삭칩 생성의 절삭수직분력(F_{nc})과 접촉 공작물의 수직분력(F_{ns})으로 표현되어 진다.



(a) Without dressing control



(b) With dressing control

Fig. 4 Schematic diagram of the comparison of a grain in grinding

$$F_{n1}=F_{nc}+F_{ns} \tag{7}$$

연삭입자의 수평분력(F_{t1})은 절삭수평분력(F_{tc})과 접촉 공작물의 수평분력(F_{ts})으로 표현할 수 있으며,

$$F_{t1}=F_{tc}+F_{ts} \tag{8}$$

드레싱 제어를 하지 않는 입자는 마멸현상이 발생하여, 공작물의 절삭분력 및 접촉분력이 마멸되지 않은 입자와는 차이가 발생한다. 연삭입자 인선부분이 마멸되어 절삭분력을 상승하게 하며, 또한 마멸면적도 증가되고 공작물과의 마찰력이 상승되어 접촉분력의 상승을 유발하게 된다. 따라서, 최적 연속 전해드레싱 시스템의 적용에 의한 연삭기구가 마멸된 연삭입자를 제거하고 새로운 입자의 돌출에 의한 가공으로서 연삭가공에 보다 좋은 효과를 기대할 수 있다.

3. 최적 연속 전해드레싱 시스템

본 연구에서 금속결합체 숫돌의 연속 전해드레싱 최적유지를 위하여 개발한 시스템은 Fig. 5에 나타나 있으며, 정격전류 제어를 위한 컴퓨터가 내장되어 있으며, 항상 최적 연속 전해드레싱을 유지하도록 구성되어 있다.

Fig. 6는 경면연삭을 위한 최적 연속 전해드레싱 시스템의 구동메카니즘을 나타낸 것으로 금속결합체 다이아몬드숫돌을 전원장치의 양극과 연결하고, 숫돌 원주의 1/4정도 전극(동 99%)에 자동조절기의 음극과 연결하며, 간극의 거리를 측정하기 위하여 비접촉 간극센서(Gap Sensor)를 장착하고, 간극 변환기를 통하여 신호가 컴퓨터에 전달하게 된다. 정격전류 자동조절기에 양극, 음극을 연결하며, 간극의 전류 측정단자와 전해용 전원 펄스폭, 휴지폭, 피크전류 조절단자를 연결기관에 연결하고, 연결기판은 데이터 입출력을 위하여 아날로그/디지털(A/D) 및 디지털 입출력(DIO) 변환기와 연결하여, 변환기는 다시 데이터 자동조절을 위해서 컴퓨터와 연결함으로써 최적 드레싱 시스템이 구성되어 진다. 점선부분내 장치를 시스템화 구성한 것이 최적 연속 전해드레싱 시스템이다. 또한, 초정

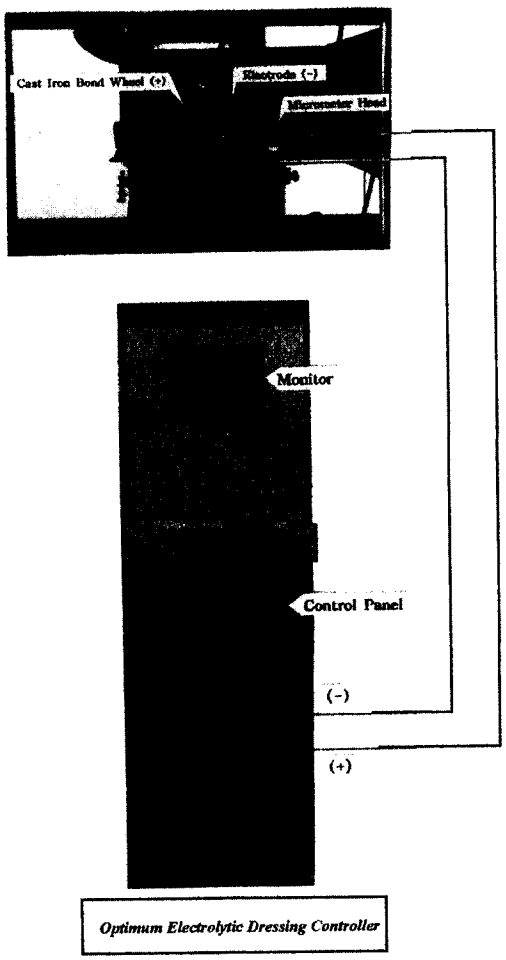


Fig. 5 Optimum in-process electrolytic dressing system

밀 경면연삭을 위하여 미소연삭깊이 조절용 압전구동장치를 공구동력계 아래에 설치하였다.

Fig. 7은 전해드레싱을 위한 정격전류 조절기의 내부 구성도로서, 전원공급은 교류 100 V로 하며, 정류기를 통하여 직류 150 V로 변환되어, 펄스 발생회로와 펄스파 안정기를 통하여 전해드레싱에 적합한 펄스 전원을 형성하게 되며, 양극단자를 숫돌에 연결하고, 음극단자를 전극에 연결하여 숫돌과 전극사이에 전해작용을 함으로써 드레싱을 하게 된다. 타이머와 펄스 발생회로는 직류 12 V 보조전원에 의해서 조절된다. 정격전류 조절을 위해서 전해전류/전압 조절회로에 컴퓨터 연결기판을 설치하여, 정격전류값과 펄스폭, 휴지폭, 피크전류를 조절하게 구성되어 있다. Table 1은 최적 전해드레싱 시스템의 사양을 나타내고 있다. 피크전류 (Ip)는 0A에서 40A까지 변경이 가능하며, 펄스폭과 휴지폭은 0 μsec에서 999 μsec까지 변경가능하다. 전해드레싱전류 및 전압값의 측정을 위한 아날로그 전류계/전압계 계기판이 구성되어 있으며, 전해드레싱 타이머 기능은 0분에서 120분까지 변경을 할 수 있다. 컴퓨터에 의한 자동조절을 위하여 조절기에서 측정된 전류, 전압값을 디지탈신호로 −5 V에서 +5 V까지도 변환한 후 출력하여 컴퓨터에 입력시킴으로써, 컴퓨터에서 최적의 드레싱을 위한 자동조절신호인 피크전류 및 펄스/휴지폭 조절값을 자동조절기에 디지털신호로 입력하여 정격전류의 조정이 가능하다.

Fig. 8은 최적 전해드레싱을 위한 정격전류 자동조절 컴퓨터 프로그램 흐름도로서, 숫돌의 최적 드레싱을 위한 자동조절의 컴퓨터 프로그램의 동작은 초기 피크전류값과 펄스, 휴지폭을 설정하고, 드레싱전류 및 전압값과 측정된 간극을 컴퓨터 신호입력으로 하여 연속 전해드레싱 상태를 파악하여, 일정한 정격전류 조절을 위하여 피크전류 등을 보다 신속하게 조절할 수 있다. 정격전류값을 설정하여 입력하면, 시스템에서 드레싱시 숫돌과 전극사이에

Table 1 Specification of KAIST-KSECS-1

Peak current	0~40A
Pulse duration/pause	τ on/off=0~999 μsec
Timer	0~120 min
Data for control	Input : Current, Voltage, Gap Output : Ip, τ_{on}, τ_{off}
Optimum control factor	Regular current
Input/output data control mode	A/D converter, DIO

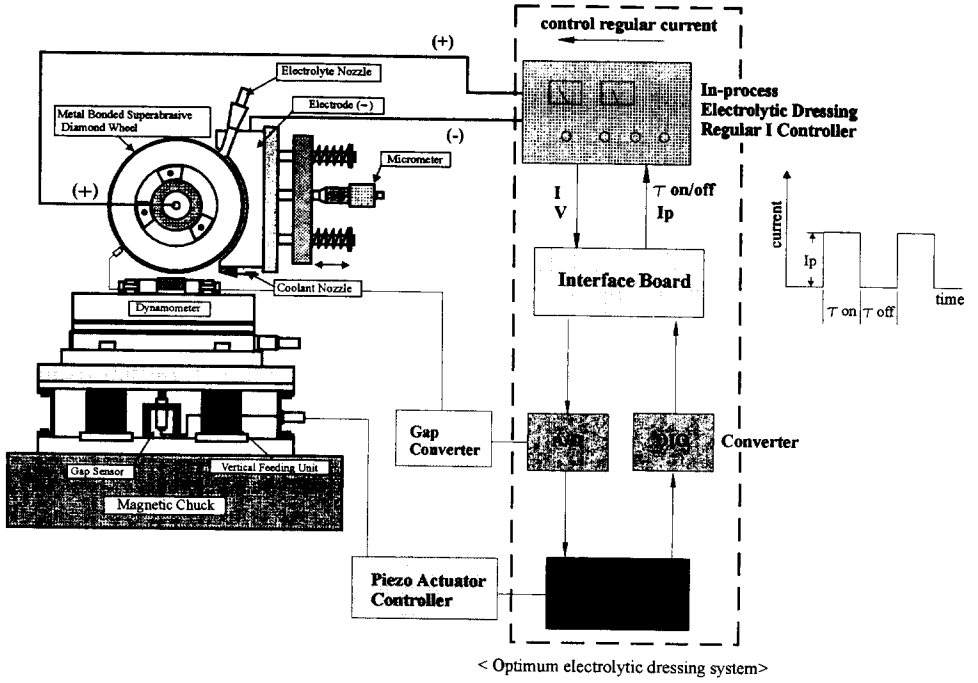


Fig. 6 Dressing control mechanism of regular current for in-process electrolytic dressing

서 변화되는 드레싱전류를 측정하여 아날로그/디지털 변환기를 통하여 컴퓨터에 신호를 주고, 그 값을 비교하여 최적 정격전류가 되도록 디지털 입출력기를 통하여 전해드레싱 시스템의 입력값을 계속하여서 변화시킨다. 즉, 실제의 측정값과 비교한후 최적의 전해드레싱 유지를 위하여, 최적의 정격전류에 따른 피크전류 및 펄스폭, 휴지폭을 자동변환한다. 드레싱전류값을 효과적으로 변화할 수 있는

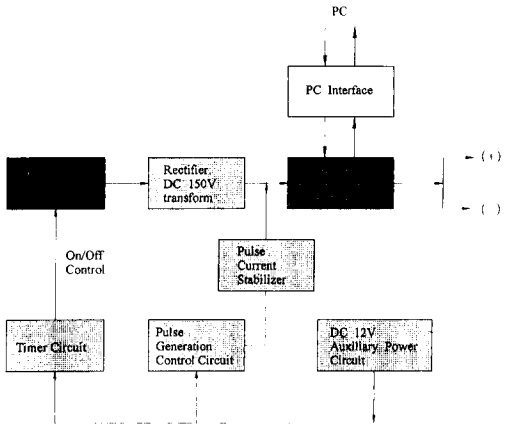


Fig. 7 Electrical schematic of electrolytic dressing current controller

피크전류값이 주로 조절되었다.

4. 실험장치 및 방법

Table 2는 본 실험에서 사용한 조건을 나타낸 표이다. 실험에서 사용한 숫돌은 주철결합제로 되어있는 다이아몬드숫돌(D12000N100M3)이며, 전해드레싱 시스템의 양극단자와 연결되어 있고, 전해드레싱을 위한 전해용 전극(순동 99%)에 음극단자를 연결 구성하였으며, 간극에 따른 초기의 드레싱전류가 영향을 받는 현상을 감소시키기 위해서 전극에 장착된 마이크로미터 헤드를 사용하여 초기간극을 설정하였다. 또한, 간극센서를 이용하여 인프로세스로 간극의 변화를 측정하였다. 전해액은 수용성 3종(50 : 1로 희석)을 사용하였다. 정격 드레싱전류의 데이터는 시스템의 전류측정기판을 통하여 아날로그/디지털 변환기를 거쳐 0.73초동안 100개를 받아서 평균을 취하는 방식을 사용하여, 순간적 외란(noise)에 대한 영향을 감소시켰다. 공작물의 연삭선에 숫돌의 전원을 얻기 위해서 GC180 숫돌을 이용하여 트루잉을 수행하였다. 연삭가공시 연삭력의 측정을 위해서 자기척위에 공구동력계를 설치하여 측정하였다. 또한, 연속 전해드

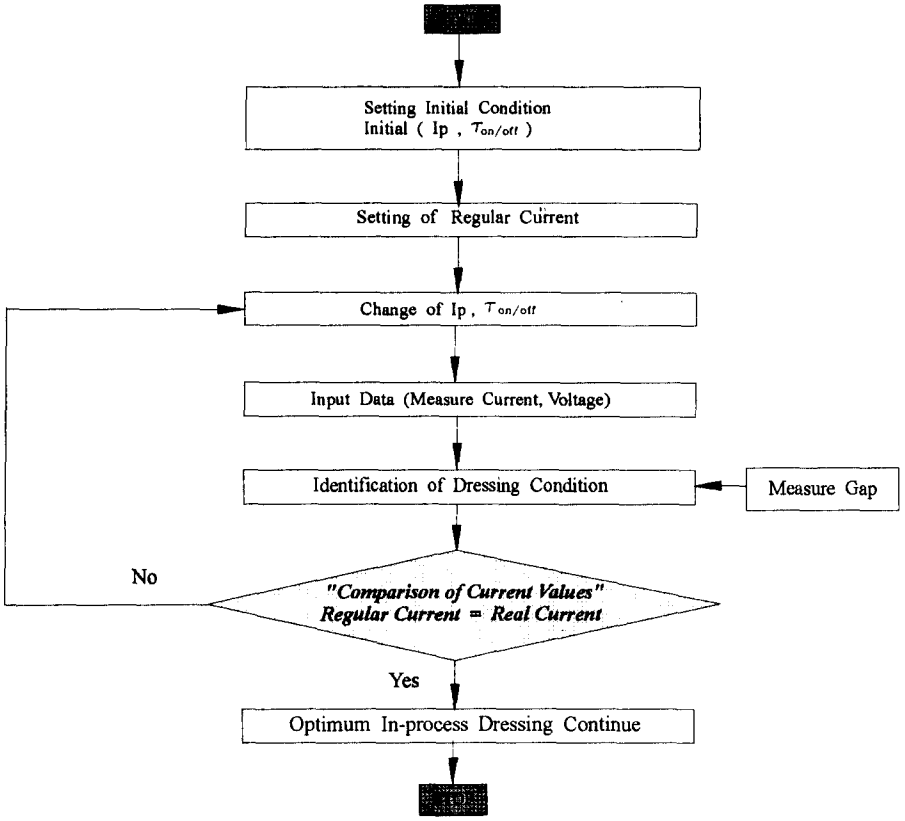


Fig. 8 Flow chart of control of regular current for optimum dressing

Table 2 Experimental conditions

Grinding machine	Surface grinding machine (Air spindle)
Wheel	D12000, D800
Wheel speed	3400 rpm
Dressing system	Optimum in-process electrolytic Dressing system (KAIST-KSECS-1)
Electrolytic fluid	Solution type (50 : 1)
Power source	Ip = 0 ~ 40 A $\tau_{on/off}$ = 1 ~ 10 μsec
Electrode	copper (1/4 of Wheel size)
Gap sensor	ST-3501 (Capacitance type) Iwatsu Electric Co.
Tool dynamometer	Kistler 3-component Dynamometer type. 9257B
White light scanning Interferometer	Non-contact 3-D Measurement type resolution : 1.2 nm Measurement speed : 10 sec (256 × 256 pixel)

Talbe 3 Mechanical properties of workpiece

Material	Hardness (H_RA)	Yield strength (kg/mm^2)	Composition
Sintered carbide tool (KTK20)	91.5	180	WC+Co

레싱을 적용한 가공면의 상태를 비교 및 평가하기 위해서, 백색광 주사 인터페로미터(white light scanning interferometer)로 관찰하였다. Table 3은 적용 공작물인 초경합금 공구(KTK20)의 기계적 성질을 나타내고 있다.

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 9은 시스템의 간극을 0.1 mm로 고정을 하고, 드레싱전류에 따른 산화 절연층의 두께변화를 간극센서를 이용하여 측정한 것으로서, 산화막이 증가됨으로서 드레싱전류는 감소함을 알 수 있다. 산화 절연층의 두께측정은 전해드레싱 실험후 산화막이 생성되면, 숫돌회전을 정지하여 측정숫돌 표면에 비접촉 간극센서를 설치하고, 산화막을 제거하여 산화막 유·무시 간극센서 데이터를 비교하여 산화층의 두께를 측정하였다. 산화막과 드레싱전류를 선형적이라고 가정하면, 산화막 두께를 t_0라 하였을 경우, 드레싱전류에 따른 실험식으로 표현하면 다음과 같다.

$$t_0 = 2.86 - 0.71I \tag{9}$$

이 2인자의 관계에서 드레싱전류를 일정하게 유지함으로서 산화막 두께를 일정하게 유지할 수 있다. 드레싱전류가 1A에서 평균적으로 약 2.2 μm의 산화막이 형성되어 있으며, 시간이 경과하여도 드레싱전류의 감소 및 산화막의 증가는 거의 일어나지 않는 안정화상태에 있었다.

Fig. 10은 간극의 변화에 따른 드레싱전류와 절연층의 두께변화를 측정한 것을 나타낸 것으로서, 간극이 증가될수록 산화막의 두께는 감소됨을 볼 수 있다. 산화막이 감소되면 연삭가공시 입자가 마멸되어도 마멸입자 탈락 등의 효과가 현저하게 떨어짐으로서 연속 드레싱 효율이 감소하게 된다. 드레싱 효율의 감소를 방지하기 위해서, 간극증가에 따라서 시스템의 입력치인 피크전류를 조절하여 절

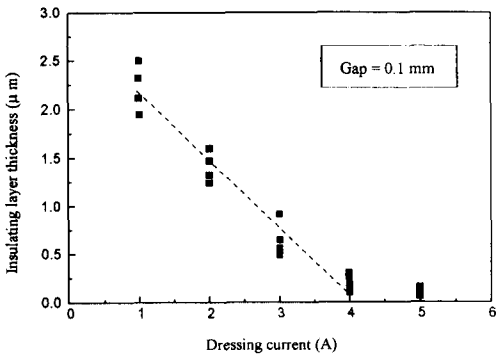


Fig. 9 Relationship between dressing current and insulating layer thickness

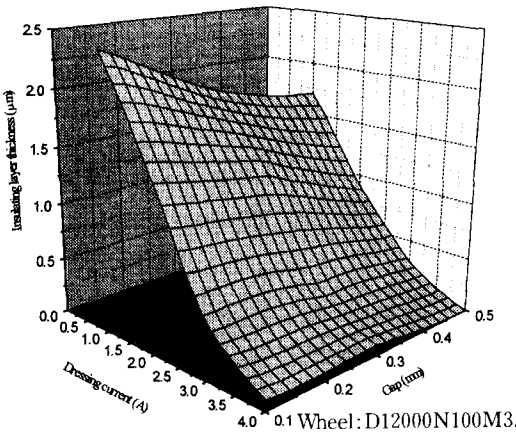


Fig. 10 Insulating layer thickness according to dressing current and gap

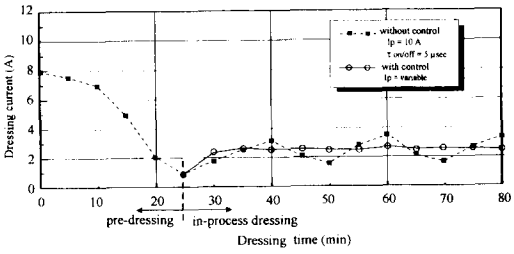
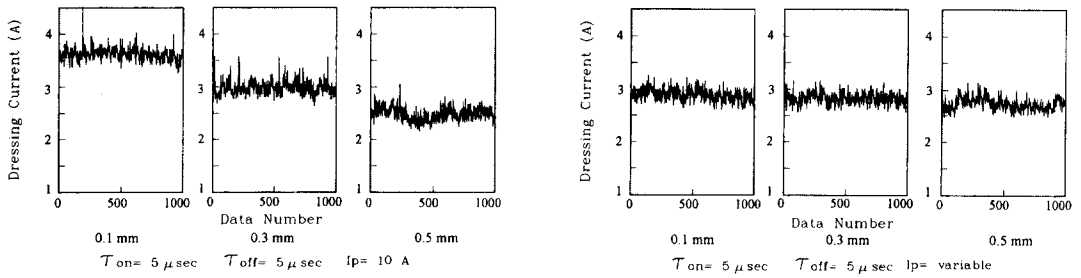


Fig. 11 Relationship between dressing current and dressing time

연층의 두께를 증가시킬 필요가 있다. 따라서, 연삭가공시 연속해서 드레싱제어를 하지 않은 경우에는 드레싱 성능의 감소에 따라 숫돌입자의 마멸현상을 발생시키게 되고 연삭력의 증가를 유발하는 요인으로 된다.

Fig. 11은 드레싱 시간에 따른 드레싱전류의 변화를 나타낸 것으로서, 25분까지는 숫돌을 트루잉 후 숫돌입자의 초기돌출을 위한 전드레싱(pre-dressing) 상태이다. 전드레싱 경과후 점선은 일반적인 전해드레싱으로 드레싱전류를 제어하지 않은 것을 나타내고 있으며, 실선은 드레싱전류를 제어한 것을 나타내고 있다. 드레싱 제어를 하지 않은 경우에는 연삭이 수행됨에 따라서 산화막의 제거가 진행되고, 산화막이 얇아짐에 따라 드레싱전



(a) Without control (b) With control

Fig. 12 The comparison of dressing current data according to gap

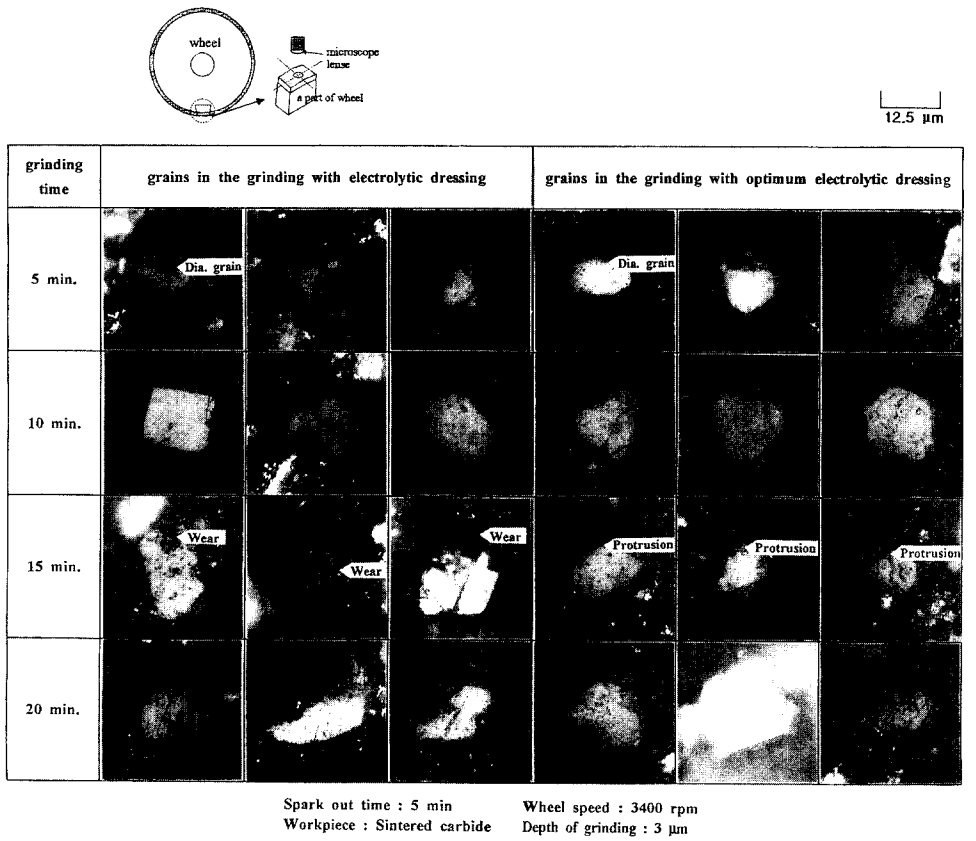


Fig. 13 View of grinding wheel surface with tool microscope

류값은 높아지게 되고, 다시 산화막의 생성이 증가되어 전류값은 감소하게 된다. 이러한 일반적인 전해드레싱 연삭가공에 의해서 드레싱의 전류값이 증가되고 감소되는 불안정성을 보이게 된다. 그러나, 드레싱전류를 제어하면 일정한 드레싱전류를 유지할 수 있어서, 드레싱전류의 불안정에 따른 드레싱 효과의 저하현상을 방지하게 된다.

Fig. 12는 전해드레싱시 드레싱전류의 데이터를 간극을 0.1, 0.3, 0.5 mm로 하였을 때 각각 1000개씩 받아서 표시한 것으로서, (a)는 컴퓨터 제어에 의한 정격전류를 제어하지 않은 상태의 데이터를 나타낸 것이고, (b)는 최적 정격전류 제어에 의한 데이터를 수집한 상태를 나타내고 있다. 정격전류를 제어하지 않은 경우는 간극을 증가시킴에 따라 드레싱전류 데이터값이 낮아짐을 관찰할 수 있으며, 이 현상은 전기분해작용시 간극증가에 따라 전해액의 저항상승에 따르는 현상이다. 초기전류를 2.7 A로 설정하고, 컴퓨터 제어에 의한 정격전류의 변동에 따라 피크전류를 변화시킴으로써 드레싱 정격전류를 제어하였을 때에는 거의 초기전류값 부근에서 유지됨을 볼 수 있다. 따라서, 컴퓨터 인터페이스에 의한 정격전류를 제어하는 것이 항상 일정한 드레싱전류를 유지하는 매우 양호한 효과를 나타냄을 볼 수 없다. 본 최적 연속 전해드레싱 시스템은 시간의 경과 및 간극의 증가 등 드레싱에 영향을 미치는 외부의 조건변화에 무관하게 항상 일정한 드레싱을 유지한다는 점에서 그 성능이 매우 우수하다고 하겠다.

Fig. 13은 다이아몬드숫돌(D800)로 연삭을 수행한 후 연삭숫돌(절단된 숫돌 시편)의 표면을 2000배로 확대하여 공구 현미경으로 관찰한 것을 나타내고 있다. 시간의 경과에 따른 숫돌상태변화를 고찰하기 위해서 각각 5, 10, 15, 20분 연삭 수행한 후 숫돌 표면에 있는 연삭입자들을 관찰하였다. 여기서 스파크아웃 시간은 5분으로 고정하였다. 전드레싱을 수행한 후 시간을 측정하였으며, 5분 연삭을 수행한 후 숫돌표면의 연삭입자를 보면 드레싱 제어하지 않은 경우와 제어한 경우가 동일하게 산화막이 벗겨지고 다이아몬드입자가 표면에 일부 돌출되어 있는 현상을 볼 수 있다. 10분 연삭 수행후 다이아몬드입자가 숫돌표면에 완전히 돌출되어 있는 같은 현상을 나타내었다. 15분 경과후에는 드레싱 제어를 하지 않은 경우에는 연삭입자의 일부가 마멸되어 있는 현상을 관찰할 수 있었으며, 드레싱

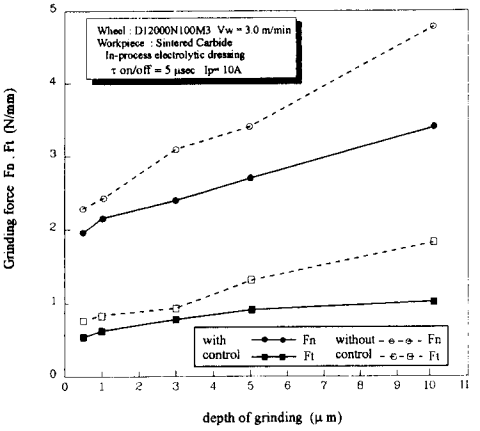


Fig. 14 Relationship between grinding force and depth of grinding

제어를 한 경우에는 20분 경과시 가공하던 입자는 탈락되고 새로운 입자가 새롭게 돌출되어 있음을 관찰할 수 있었다. 드레싱 제어를 하지 않은 경우는 산화막이 불안정하게 변화되며, 입자가 마멸되어도 충분한 산화막이 생성되어 있지 않아서 메탈본드에 의한 강한 지지력을 갖게 됨으로서 마멸된 입자가 제거되지 않으며 공작물에 나쁜 영향을 미치게 된다. 드레싱 제어를 한 경우에는 안정된 산화막에 의해서 마멸된 입자는 제거되고, 새로운 입자가 숫돌 표면에 돌출하게 된다.

Fig. 14는 연삭깊이에 따른 수직 및 수평 연삭력의 변화를 나타낸 것으로써, 전해드레싱 제어를 한 경우와 하지 않은 경우를 비교하였다. 숫돌은 D12000을 사용하였으며, 정격 드레싱 전류제어값은 3 A로 설정하였고 테이블속도는 3 m/min으로 고정하여 초경공구의 상면을 연삭가공하였다. 실선은 드레싱 제어를 수행한 것으로서 연삭깊이의 증가에 따라서 수직 및 수평 연삭력은 증가되나, 모든 연삭깊이에서 드레싱 제어를 수행하지 않은 것보다 적은 연삭력을 나타내고 있다. 이 현상은 마멸된 숫돌입자가 빠르게 제거되어, 새로운 입자에 의해서 연삭가공이 되기 때문이다. 따라서, 보다 적은 연삭력을 유지하기 위해서는 드레싱 제어를 계속 유지하는 것이 양호한 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

Fig. 15는 백색광의 간섭무늬를 이용한 백색광 주사 인터페로미터(white light scanning interfaerometer)를 적용하여 초경공구 상면의 표면형상을 관찰한 것으로서, (a)는 연삭을 하지 않은

초경공구의 표면을 나타내고 있다. 관찰한 표면의 범위(x, y축)는 300 μm×300 μm이며, 연삭가공을 하지 않은 공구의 표면이 매우 거칠어서 z축의 방향은 0.2배 정도로 줄여서 나타내었다. 매우 거친 표면을 관찰할 수 있고, 표면의 최저와 최고값의 편차는 21537.939 nm로서 매우 크게 나타남을 관찰할 수 있다. (b)는 연삭을 수행한 초경공구의 표면을 관찰한 것으로서, 초경공구를 연삭한 조건은 D12000 숫돌을 사용하였으며, 연삭깊이는 5 μm로 고정하였으며, 드레싱은 전해드레싱을 적용하였으나 전해드레싱의 전류제어를 하지 않았다. 이 가공조건에서 생성된 공구표면의 300 μm×300 μm에서 Z축의 최고와 최저차는 149.787 nm로서, 연삭을 수행하지 않은 면보다 매우 양호하게 나타남을 관찰할 수 있으며, Z축을 관찰할 수 있도록 100배 확대하여 나타내었다. (c)는 정적 드레싱전류를 3 A로 설정하고, 드레싱 제어를 적용하여 연삭한 초경공구의 표면을 관찰한 것으로서 Z축의 표면의 고저차는 131.749 nm로 나타내고 있다. 전해드레싱을 제어하지 않은 공구의 면(149.787 nm)보다 제어를 한 공구의 면(131.749 nm)이 약 18 nm정도 적게 나타났다. 따라서, 초경공구 표면의 양호한 생성을 위해서는 전해드레싱을 제어하는 것이 보다 양호한 현상을 나타낸다고 할 수 있다.

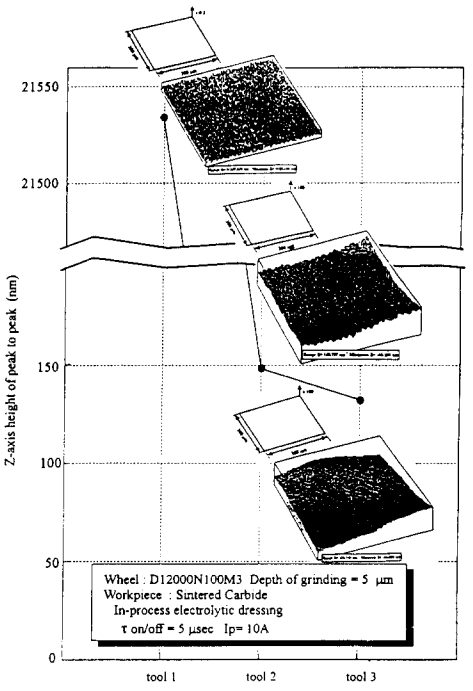


Fig. 15 Comparison of tool surfaces by using white light scanning interferometer ;
Tool 1 : Before grinding
Tool 2 : Grinding with electrolytic dressing (without control)
Tool 3 : Grinding with electroytic dressing (with control)

Fig. 16은 최적 전해드레싱 시스템을 적용하여 페라이트, 초경합금, 단결정 산화마그네슘, 금형강 및 실리콘웨이퍼 등의 경취재료 연삭가공한 면을 백색광주사 인터페로미터에 의한 표면현상을 나타낸 것이다. Z축으로 30배 확대하여 나타냈으며, 연삭깊이는 1 μm로 설정하였으며, 숫돌입도는 12000, 정격 드레싱전류 제어값은 3A로 적용하여 실험을 수행하였다. 측정된 표면형상을 이용하여 계산된 표면거칠기는 약 10 nm이내의 우수한 가공면을 나타내고 있으며, 드레싱 제어를 수행한 경우와 드레싱 제어를 수행하지 않은 경우를 비교하였다. 드레싱 제어를 수행하여 가공한 면이 모든 난삭재에서 약 2배정도 수준으로 보다 양호한 표면형상을 나타내고 있다. 따라서, 최적 연속 전해드레싱 시스템을 적용하여 드레싱 제어를 하면서 난삭

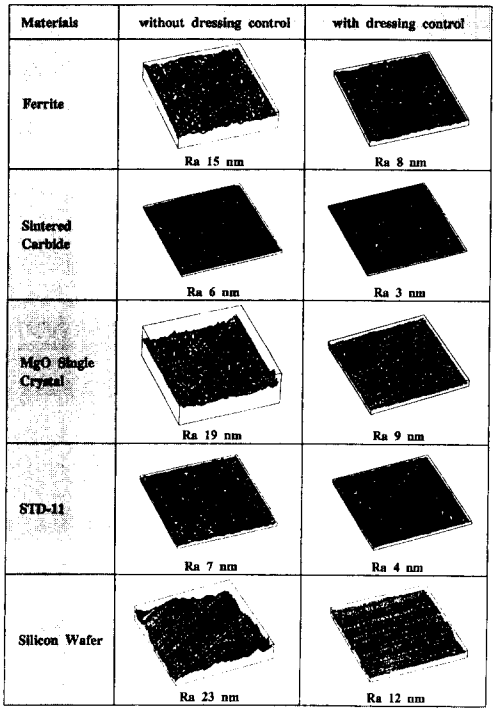


Fig. 16 View of ground surface profile of brittle materials

재를 가공하는 것이 드레싱효과를 일정하게 유지할 수 있으며, 가공 표면 향상에 양호한 결과를 얻을 수 있다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존의 전해드레싱 시스템은 드레싱상태의 변화에 따라 제어가 불가능하였으나, 최적 제어 소프트웨어에 의한 정격전류 제어방식인 최적 연속 전해드레싱 시스템을 개발하여 항상 일정한 드레싱 상태를 유지하는데 양호한 효과를 보였다.

(2) 기존의 드레싱을 하였을 경우에는 마멸된 다이아몬드 연삭입자가 표면에 도출되어 있는 현상을 보였으나, 최적 전해드레싱 시스템을 적용한 경우에는 표면에 마멸된 입자의 탈락되어 새로운 연삭입자에 의해서 안정된 연삭이 가능하였다.

(3) 난삭재의 연삭시 최적 연속 전해드레싱에 의한 연삭기구 구성으로 양호한 드레싱효과를 유지하여 연삭력 감소에 효과를 보였으며, 최적 전해드레싱을 적용함으로서 일반적인 전해드레싱보다 표면 향상에 양호한 영향을 미쳤으며, 각종 난삭재의 경면연삭을 달성하였다.

(4) 본 시스템은 드레싱 시간의 경과, 산화막의 변화 및 간극의 증가 등 드레싱에 영향을 미치는 외부의 조건변화와 무관하게 항상 일정한 정격전류를 유지하는 능동적인 제어특성을 갖고 있다.

참고문헌

(1) Matsuo, T. and Okamura, K. 1981, "War Characteristic of General and Superhard Abrsive Grains against Various Hard Materials," *Annals of the CIRP*, Vol. 30, pp. 233~236.

(2) Komanduri, R. and Reed, W. R., 1980, "A New Technique of Derssing and Conditioning Resin Bonded Superabrasive Grinding Wheel," *Annals ofthe CIRP*, Vol. 29. pp. 239~243.

(3) Kim, J. D., Lee E. S. and Lee, C. Y., 1995, "Crack Generation and the Effect on In-process Electro-discharge Dressing in Grinding Single Crystal MgO," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 37, No. 6, pp. 569~583.

(4) 김정두, 이은상, 1994, "연속 방전드레싱에 의한 경취재료의 경면연삭에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제3호, pp. 785~792.

(5) Ohmori, H. 1992, "Electrolytic In-process Dressing Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining," *Int. JSPE*, Vol. 26, No. 4, pp. 273~278.

(6) 大森整, 1991, Elid 鏡面研削記述, Elid 研削研究會, pp. 8~31.

(7) Ohmori, H. and Nakagawa, T., 1990, "Mirror Surface Grinding on Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, pp. 329~332.

(8) 김정두, 이연종, 1993, "연속 전해드레싱의 연삭조건 변화에 의한 경면생성 및 시뮬레이션에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제17권, 제12호, pp. 2962~2969.

(9) 김정두, 이은상, 1995, "최적 연속 전해드레싱 시스템의 개발과 제어 특성," 대한기계학회논문집, 제19권, 제3호, pp. 680~687.