

**초정밀 연삭용 최적 연속 전해드레싱 시스템의 개발에 관한 연구**

---

**Development of Optimum In-process Electrolytic Dressing System  
in the Ultraprecision Grinding**

이은상\* , 김정두 (KAIST)

Eun-Sang Lee\* , Jeong-Du Kim,

**Key Words : Optimum In-process Electrolytic Dressing System (최적 연속 전해 드레싱 시스템), Regular Current (정격전류) , Cast Iron Bond Wheel (주철결합제숫돌), Gap Sensor (간극센서), A/D Converter (아날로그디지털 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. But the present dressing system cannot have control of optimum dressing of the superabrasive wheel. This study has proposed a new optimum in-process electrolytic dressing system. This system can carry out optimum in-process dressing of superabrasive wheel, and give very effective control according to gap increase.

## 1. 서론

최근에 전자산업, 정보통신산업의 발달로 첨단산업분야 재료인 파인세라믹, 실리콘 웨이퍼, 자기헤드 페라이트, 광학유리등의 초정밀 정면연삭이 요구되어지며, 이를 달성하기 위해서 연속적인 드레싱이 매우 중요하게 되었다. 연속 드레싱으로 금속결합제 스톨 주위에 전극을 설치하고 그 사이에 펄스전원을 인가하는 전기분해 작용에 의한 인프로세스 전해드레싱 기법<sup>[1]-[3]</sup>이 근년에 발표되어 우수한 성능을 나타내고 있으나, 전해 드레싱 시간의 경과와 부수적으로 나타나는 불안정한 전류로 인한 문제점으로 항상 일정한 최적의 드레싱을 유지하는데 어려움이 있다. 연속 전해드레싱 진행시 간극의 증가에 따른 전류값의 변화가 발생하며, 간극의 증가량이 적은 초기에는 전해 드레싱의 성능에 미치는 문제는 매우 적으나, 연속적인 드레싱과 연삭가공에 따른 간극의 증가, 즉 간극 전류값의 감소로 인하여 전해 드레싱의 효과가 감소하게 된다. 드레싱 시간의 증가로 인한 금속결합제가 전기분해에 의해서 제거되는 양이 증가됨으로서 양전극사이에 드레싱 상태가 변화되어 지속적인 최적 드레싱 상태를 유지하지 못하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하여 항상 최적상태의 드레싱을 유지하는 컴퓨터 인터페이스용 전해 드레싱 시스템을 자체개발 하였으며, 시스템을 제어하고 성능을 평가하였다. 이 방식은 간극의 증가에 따른 전해 드레싱의 성능 보상을 위한 전극을 이동시키는 기존의 복잡한 장치<sup>[4]</sup>가 아닌 간극의 증가에 따른 전류값의 변화를 컴퓨터 인터페이스에 의한 조절로 최적의 전해 드레싱을 능동적으로 유지하는 방법을 채택하여 연속 드레싱 제어를 단순화하여, 드레싱 시간 경과의 간극변화에 대한 전류가 항상 일정하게 유지될 수 있는 시스템을 개발제작 하였으며, 가공성이 어려운 파인세라믹을 연삭실험을 통하여 본 시스템의 초정밀 연삭의 적용성을 고찰하였다.

## 2. 이론적 고찰

연속 전해드레싱은 전기분해작용에 의해서, 지석의 마멸된 연삭입자가 제거되고 새로운 입자가 재생되어 마멸되지 않은 연삭입자에 의해서 연삭이 가능하여 양호한 가공표면을 기대할 수 있다. 연삭 지석의 결합제는 금속결합제(주철본드)로 구성되어 있어서 통전이 가능하며, 전해드레싱 전원을 양극으로 공급하고, 전극(electrode)은 음극과 연결하고 두전극사이에 전해액을 공급하면 전극의 작은 틈사이에서 전해작용이 일어나

게 되어 연삭지석의 금속결합체가 전해작용에 의해  $Fe^{2+}$ 로 이온화 되어 용출된다. 이  
 온화된 Fe는 산화물 인  $Fe(OH)_2$  또는  $Fe(OH)_3$ 로 되고, 물의 전해작용에 의해 절연물  
 인  $Fe_2O_3$ 산화물로 변해 슷들 표면에 응착된다.



양극에서 Fe가 전해용출하고, 음극에서는 수소가스가 발생된다. 이 절연물로 인하여  
 전해용출이 감소하게 되어 일정한 입자만 들출을 생성시키게 된다. 계속하여 연삭이  
 진행됨에 따라 다이아몬드 지석의 산화피막이 조금씩 제거되어 전기가 반복하여 통전  
 하게 되면 전해용출이 회복된다. 마멸된 슷들입자는 금속결합체의 지지력이 약해짐에  
 따라 방출되고 새로운 입자를 생성되어 연삭입자의 날 무디어짐 현상을 방지하게 되  
 어 공작물의 연속적인 연삭이 가능하게 된다. 이러한 미시적 드레싱 사이클에 의해  
 연속적인 전해드레싱이 진행된다.

연속적인 전해드레싱에서  $I(A)$ 의 전류가  $t$ 초간 흐름으로서 양극인 지석의 메탈본드가  
 용출되는 량을  $w$ 라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$I t = w n F / M \quad (2)$$

$$w = M I t / n F \quad (3)$$

$n$  : 원자가

$F$  : 패러데이 상수

$M$  : 원자량

여기서 원소의 밀도를  $\rho$ 라고 하면, 전해드레싱에 의한 주철결합체의 이론적인 체적제  
 거량 ( $V_0$ )는 다음과 같다.

$$V_0 = M I t / n F \rho = V_s I t \quad (4)$$

$V_s$  : 비가공체적 ( $M / n F \rho$ )

실제의 체적제거량( $V$ )은 전류효율( $\eta$ )을 고려하여야 되어야 하며,

$$V = \eta V_0 = \eta M I t / n F \rho = \eta V_s I t \quad (5)$$

따라서, 단위 시간당의 체적제거량인 체적이공속도( $v$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$v = dV/dt = \eta M I / n F \rho = \eta V_s I \quad (6)$$

전해드레싱시 체적이공속도는 재료의 원자량, 전해용출시 전기량, 양전극사이의 전류  
 값에 영향을 받음을 알 수 있다. 재료 즉 지석결합체에 따른 비가공체적이 일정하다고

하였을 경우 전류값의 변화에 가공속도가 주로 영향을 받게 된다. 따라서, 양전극사이에 전류를 변화시키는 인자를 조절함으로써 가공속도를 조절할 수 있다.

단위시간당의 연삭지식 결합제 가공깊이의 증가량인 깊이 가공속도 ( $v_l$ ) 를 표현하면 다음과 같다.

$$v_l = dl/dt = (l/S)(dV/dt) = \eta MI / nF\rho S = \eta V_s i \quad (7)$$

S : 가공면적

l : 가공깊이

i : 전류밀도 ( I / S )

결합제의 깊이가공속도가 전류밀도에 관계 됨으로서 전류의 변화에 큰영향을 받게 되며, 연속 드레싱에 의한 간극의 증가등에 의해서 전해가공의 성능의 감소가 된다. 따라서, 간극사이의 전류를 증가시킴으로서 일정한 가공속도를 유지할 수 있어서 최적의 전해드레싱을 완성 할 수 있다.

### 3. 개발된 최적 연속 전해드레싱 시스템

#### 3.1 최적 연속 전해드레싱 시스템

본 연구에서 금속결합제 슷들의 연속 전해드레싱 최적유지를 위하여 개발한 시스템은 Fig.1에 나타나 있으며, 정격전류 제어를 위한 컴퓨터가 내장되어 있으며 항상 최적 연속 전해드레싱을 유지하도록 구성되어 있다.

Fig.2는 초정밀 연삭을 위한 최적 연속 전해드레싱 시스템의 구동 메카니즘을 나타낸 것으로 금속결합제 다이아몬드 슷들을 전원장치의 양극과 연결하고, 슷들 원주의 1/4정도 전극(동99%)에 자동조절기의 음극과 연결하며, 간극의 거리를 측정하기 위하여 비접촉 간극 센서(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 연결기판에 연결하고, 연결기판은 아날로그/디지털(A/D) 및 디지털 입출력(DIO) 변환기와 연결하며, 변환기는 다시 데이터 입출력에 의한 자동조절을 위해서 컴퓨터와 연결함으로써 최적 드레싱 시스템이 구성되어 진다. 점선부분내 장치를 시스템화 구성한 것이 최적 연속 전해드레싱 시스템이다. 또한, 초정밀 연삭을 위하여 압전구동 미소 연삭깊이 조절장치를 공구동력계 아래에 설치하였다.

Fig.3은 전해드레싱을 위한 정격전류 조절기의 내부 구성도로서, 전원 공급은 교류 100V

로 하며, 정류기를 통하여 직류 150V로 변환되어, 펄스 발생회로와 펄스파 안정기를 통하여 전해 드레싱에 적합한 펄스 전원을 형성하게 되며, 양극단자를 슷돌에 연결하고, 음극단자를 전극에 연결하여 슷돌과 전극사이에 전해작용을 함으로서 드레싱을 하게 된다. 타이머와 펄스 발생회로는 직류 12V 보조전원에 의해서 조절된다. 정격전류 조절을 위해서 전해 전류/전압 조절회로에 컴퓨터 연결기판을 설치하여, 정격전류값과 펄스폭, 휴지폭, 피크전류를 조절하게 구성되어 있다.

본 시스템의 구동 원리는 아날로그/디지털 변환기(A/D Converter)를 통하여 전해 드레싱 상태인 간극 전류값 및 간극을 측정하여 그 상태에 따라 컴퓨터 프로그램으로 처리하여, 최적 조절신호를 디지털 입출력 변환기(DIO Converter)를 통하여 전해용 자동조절 전원장치에 보냄으로써 간극의 증가에 따른 전류값을 조절하여 최적의 일정한 전해 드레싱이 되게 한다. 따라서, 정격전류 자동조절 시스템의 적용이 드레싱 효과를 일정하게 유지하여, 기존의 방법의 단점이었던 전해 드레싱 진행시간 경과에 따른 정격전류의 불안정등 현상을 방지하게 되어, 간극변화에 관계없이 실리콘, 페라이트, 세라믹등 경취재료의 경면연삭을 위한 드레싱을 항상 일정하게 유지 가능하다. Table.1은 최적 전해드레싱 시스템의 사양을 나타내고 있다. 피크전류 ( $I_p$ )는 0A에서 40A 까지 변경이 가능하며, 펄스폭 과 휴지폭 은  $0\mu\text{sec}$  에서  $999\mu\text{sec}$ 까지 변경 가능하다. 전해 드레싱 전류 및 전압값의 측정을 위한 아날로그 전류계/전압계 계기판이 구성되어 있으며, 전해 드레싱 타이머 기능은 0분에서 120분까지 변경을 할 수 있다. 컴퓨터에 의한 자동조절을 위하여 조절기에서 측정된 전류값을 디지털 신호로 -5V에서 +5V 까지로 변환한후 출력하여 컴퓨터에 입력시킴으로써, 컴퓨터에서 최적의 드레싱을 위한 자동조절 신호인 피크전류 및 펄스/휴지폭 조절값을 자동조절기에 디지털 신호 ( 0V ~ +5V)로 입력하여 정격전류의 조절이 가능하다. 그러므로, 간극증가에 따른 전해 드레싱 성능 저하를 방지하게 된다.

### 3.2 최적제어 소프트웨어

Fig.4는 간극변화에 따른 정격전류 자동조절 컴퓨터 프로그램 흐름도로서, 슷돌의 최적 드레싱을 위한 자동조절의 컴퓨터 프로그램의 동작은 초기 피크전류값과 펄스, 휴지폭을 설정하고, 간극의 전류값과 측정된 간극을 컴퓨터 신호입력으로 하여 연속 전해드레싱 상태를 파악한다. 정격 전류값을 설정하여 입력하면, 시스템에서 드레싱시 슷돌과 전극사이에서 변화되는 드레싱전류를 측정하여 아날로그/디지털 변환기를 통하여 컴퓨터에 신호를 주고, 그 값을 비교하여 최적 정격전류가 되도록 디지털 입출력기를 통하여 전해드

래싱 시스템의 입력값을 계속하여서 변화시킨다. 즉, 실제의 측정값과 비교한 후 최적의 전해 드래싱 유지를 위하여, 최적의 정격전류에 따른 피크전류 및 펄스폭, 휴지폭을 자동 변환되어 진다. 최적의 정격전류일 경우는 연속 전해드래싱이 계속되고, 변화되는 전해 드래싱 상태를 측정하여, 최적의 정격전류에서 오차가 발생할 경우 다시 자동조절함으로써 금속결합제 슷들의 최적의 인프로세스 전해 드래싱이 되게 한다.

#### 4. 실험방법

Table.2는 본 실험에서 사용한 조건을 나타낸 표이다. 실험에서 사용한 슷들은 주철결합제로 되어있는 초미립자 다이아몬드 슷돌 (superabrasive diamond wheel) 이며, 전해 드래싱 시스템의 양극단자와 연결되어 있고, 전해용 전극 (동 99%)에 음극단자를 연결 구성 하였으며, 전극에 장착된 마이크로미터 헤드를 이동함으로써 간극변화에 따른 전해 드래싱 조절 실험을 하였다. 또한, 간극센서 (정밀도:  $0.5\mu\text{m}$ )를 이용하여 인프로세스로 간극의 변화를 측정하였다. 전해액은 수용성 3종 (50:1로 희석)을 사용하였다. 정격 드래싱전류의 데이터는 시스템의 전류측정기판을 통하여 아날로그/디지털 변환기를 거쳐 0.73초동안 100개를 받아서 평균을 취하는 방식을 사용하여, 순간적 외란(noise)에 대한 영향을 감소 시켰다. Fig.5은 전극장치의 구성도를 나타낸 것으로, 전극에 마이크로미터 헤드(정밀도: $10\mu\text{m}$ )를 설치하여 간극유지를 정확히 조절 하였고, 2개의 스프링에 의해서 간극의 균형을 유지하게 하였다. 슷돌 및 전극의 전기분해 작용을 원활하게 하기 위해서 전극 상단에 장착한 전해액 노즐을 설치 하였다. 또한, 초정밀 경면 연삭을 위하여 나노미터(nm)급 미소한 연삭깊이 조절이 가능한 압전소자(piezo actuator)를 이용한 장치를 구성하여 실험을 하였다. Table.3은 본 시스템의 초정밀 연삭 실험을 위한 세라믹재료의 특성을 나타내고 있다.

#### 5. 실험결과 및 고찰

Fig.6은 펄스폭과 휴지폭의 변화에 따른 최적 연속 전해드래싱 시스템의 드래싱 전류 변화추이를 나타낸 것으로, 펄스폭( $\tau_{on}$ )/휴지폭( $\tau_{off}$ ) 변화에 따라 거의 변화가 적음을 알 수 있다. ( $\tau_{on}=1$ )/( $\tau_{off}=10$ )인 경우만 드래싱 전류가 약간 낮고, 1/1, 5/5, 10/10, 10/1이 거의 같은 수준의 값을 갖게됨으로서 펄스폭의 변화가 드래싱 전류의 변화에 크게 영향을 미치지 않는다. 이 현상은 펄스폭이 변화하더라도 단위시간당 전기분해작용에 의해서 드래싱되는 양은 거의 같게 되기 때문이다.

Fig.7은 최적 연속 전해드레싱 시스템의 펄스폭, 휴지폭 및 간극을 일정하게 고정하고, 피크전류를 변화시킴으로서 전극과 스톤사이의 드레싱 전류, 전압의 변화를 측정하여 나타낸 것으로서, 피크전류의 증가에 따라 실제 전해드레싱에 적용되는 전류값은 거의 선형적으로 변화되며 전압값은 20A까지는 경사가 신속하게 상승되고 그 이후에는 완만한 상승을 나타낸다. 수치적으로는 피크전류가 10A에서 40A까지 상승하였을 때, 전류는 6.5A에서 25A까지 상승되고, 전압은 14V에서 34V까지 상승하였다. 따라서, 피크전류의 변화와 간극의 드레싱 전류와는 거의 선형적으로 변화됨을 볼 수 있으며, 피크전류의 범위는 0A에서 40A까지로 1A간격으로 변화가 가능하여 시스템의 피크전류의 자동조절을 통하여 드레싱전류를 최적 상태로 일정하게 조절이 가능하다.

Fig.8은 전해드레싱시 드레싱전류의 데이터를 1, 10, 20분에 지난 후 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 시간의 경과에 따라 드레싱 전류 데이터값이 낮아짐을 관찰 할 수 있으며, 이 현상은 전기분해 작용에 의한 수산화철등의 방출을 통해서 절연층의 생성 및 간극의 증가등에 의해서 발생하는 현상이다. 초기전류를 8.6A로 설정하고, 컴퓨터 제어에 의한 정격전류의 변동에 따라 피크전류를 변화시킴으로서 드레싱 정격전류를 제어 하였을때에는 거의 8.6A 부근에서 유지됨을 볼 수 있다. 따라서, 컴퓨터 인터페이스에 의한 정격전류를 제어하는 것이 항상 일정한 드레싱 전류를 유지하는 매우 양호한 효과를 나타냄을 볼 수 있다.

Fig.9는 드레싱 시간의 경과에 따른 드레싱 전류의 변화추이를 나타낸 것으로서 점선은 기존의 시스템을 사용한 것을 나타낸 것이고, 실선은 본 연구에서 자체 개발한 최적 연속 전해드레싱 시스템을 사용한 것을 나타내고 있다.

기존 전해드레싱 시스템은 드레싱상태의 변화에 따라 제어가 불가능하여 피크전류 (24A)를 고정함으로서 정격전류의 변화에 수동적인 반면, 최적 전해드레싱 시스템은 정격전류의 변화를 측정하여 적당한 피크전류로 자동변경되는 능동적인 대응에 따라 항상 일정한 정격 드레싱 전류값을 유지할 수 있다. 이러한 능동적인 제어를 통하여, 우리가 요구하는 정격전류를 자유자재로 조절이 가능하게 되어 최적의 드레싱 조건을 유지할 수 있다.

Fig.10은 간극의 증가에 따른 드레싱전류의 변화추이를 나타낸 것으로서 간극의 증가는

마이크로미터 헤드에 의해서 정확하게 조절되었다. 정격전류의 변화에 따라 피크전류를 제어하지 않은 경우에는 간극의 증가에 따라 정격전류값이 감소됨을 관찰 할 수 있고, 정격전류를 일정하게 유지하기 위하여 피크전류를 컴퓨터 프로그램에 의하여 변화시킨 것은 정격전류가 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 따라서, 전해드레싱을 이용한 연삭시 간극의 증가에 따른 정격전류의 변화를 방지하여 항상 일정한 드레싱 전류에 의해서 연삭하는 효과를 볼 수 있다.

Fig.11은 연삭깊이에 파인세라믹 재료의 수직연삭력의 변화추이를 나타낸 것으로서, 연삭깊이가 감소될수록 수직연삭력이 감소됨을 관찰할 수 있다. 정격전류값을 조절한 연삭력과 조절하지 않은 연삭력사이에 큰차이가 나타남을 볼 수 있다. 정격전류의 조절에 의한 수직연삭력값의 분포가 조절에 의하지 않은 경우보다 매우 양호하게 나타냈다.

Fig.12는 연삭깊이 변화에 따른 수평연삭력의 추이를 나타낸 것으로서, 정격전류를 컴퓨터 프로그램에 의해서 조절한 수평연삭력의 값이 모든 연삭깊이 범위에서 양호하게 나타남을 볼 수 있다. 따라서, 본 개발 시스템을 적용하여 파인세라믹을 연삭수행한 결과를 고찰 할 때 연삭시간의 경과 및 간극의 증가등 드레싱에 영향을 미치는 외부의 조건 변화에 무관하게 항상 일정한 드레싱을 유지한다는 점과 연삭력의 증가를 방지하여 경면연삭을 위한 안정성 면에서 그 성능이 매우 우수하다고 하겠다.

최적 전해드레싱 시스템을 적용하고, D12000지석을 이용하여 경취재료를 경면연삭(mirror-like grinding)을 달성하였다. Fig.13은 경면연삭된 파인세라믹, 페라이트, 초경합금의 반사사진을 나타낸 것으로, 표면의 크랙이 없고 반사성이 좋은 면을 보이고 있다. 본 재료를 경면가공하는 경우 기존에는 폴리싱의 가공공정등을 사용하여 왔으나, 생산성이 매우 떨어지는 작업으로 본 시스템을 적용함으로써 폴리싱공정을 생략하는 공정개선 효과도 볼 수 있게 되었다. 최근 경취재료중 단결정 산화 마그네슘(MgO single crystal)은 내열성이 매우 뛰어나 고온재료(용점 2800°C)의 용도로 많이 사용되며, 고온 초전도용, 인공적자박판의 기판, 각종광학 및 레이저 부품등에 사용되어지나, 재료의 특성상 벽개성이 있으며 매우 적은 연삭력의 작용에 의해서도 크랙이 발생된다.<sup>[5]</sup> 따라서, 연삭가공이 거의 불가능한 매우 어려운 난삭재로 알려져 있다. 그러나, Fig.14에서와 같이 본 연구에서 자체 개발한 최적 연속 전해드레싱 시스템을 사용하여, 단결정 산화 마그네슘 연삭을 수행하여 경면연삭(mirror-like grinding)을 달성하였으며, 전자주사현미경



(Scanning Electron Microscope)으로 가공면을 관찰 한 것으로서 전혀 크랙이 없고, 연삭에서 일반적으로 나타나는 연삭흔적도 없는 매우 양호한 경면을 나타내고 있다.

## 6. 결론

본 시스템의 개발 및 제어를 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 최적의 드레싱 상태를 유지 하는데 양호한 효과를 보였다.
2. 시스템의 입력값인 피크전류와 드레싱 전류의 관계는 거의 선형적으로 연속 전해 드레싱시 일정한 드레싱 전류를 유지하기 위하여 피크전류를 제어하는 것이 보다 효과적이다.
3. 본 시스템은 드레싱 시간의 경과 및 간극의 증가등 드레싱에 영향을 미치는 외부의 조건 변화와 무관하게 항상 일정한 정격전류를 유지하는 능동적인 제어 특성을 갖고 있다. 또한, 실제 연삭시 연삭력 안정성에도 우수한 효과를 보였다.
4. 본 시스템을 개발하고 제어특성을 밝혀 최적 드레싱 제어를 수행 함으로서 매우 가공이 어려운 파인세라믹, 페라이트, 초경합금, 단결정 산화마그네슘의 초정밀 경면 연삭을 달성하게 되었고, 실제 현장적용시 우수한 결과를 얻을 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] H.Ohmori, 1992, " Electrolytic In-Process Dressing Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining", Int.JSPE, Vol.26, No.4, pp.273-278
- [2] 大森整, 1991, Elid 鏡面研削技術, Elid 研削研究會, pp.8-31
- [3] H.Ohmori and T.Nakagawa, 1990, "Mirror Surface Grinding on Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing", Annals of the CIRP Vol.39, pp.329-332
- [4] K.Suzuki and T.Uematsu, 1987, "On-Machine Trueing/Dressing of Metal Bond Grinding Wheels by Electro-Discharge Machining", Annals of the CIRP, Vol.36, pp.115-118
- [5] J.D.Kim and E.S.Lee, 1995, "Crack generation and the effect of in-process electro-discharge dressing in the grinding of MgO single crystal," International Journal of Mechanical Sciences, In press

Table. 1 Specification of KAIST-KSECS-1

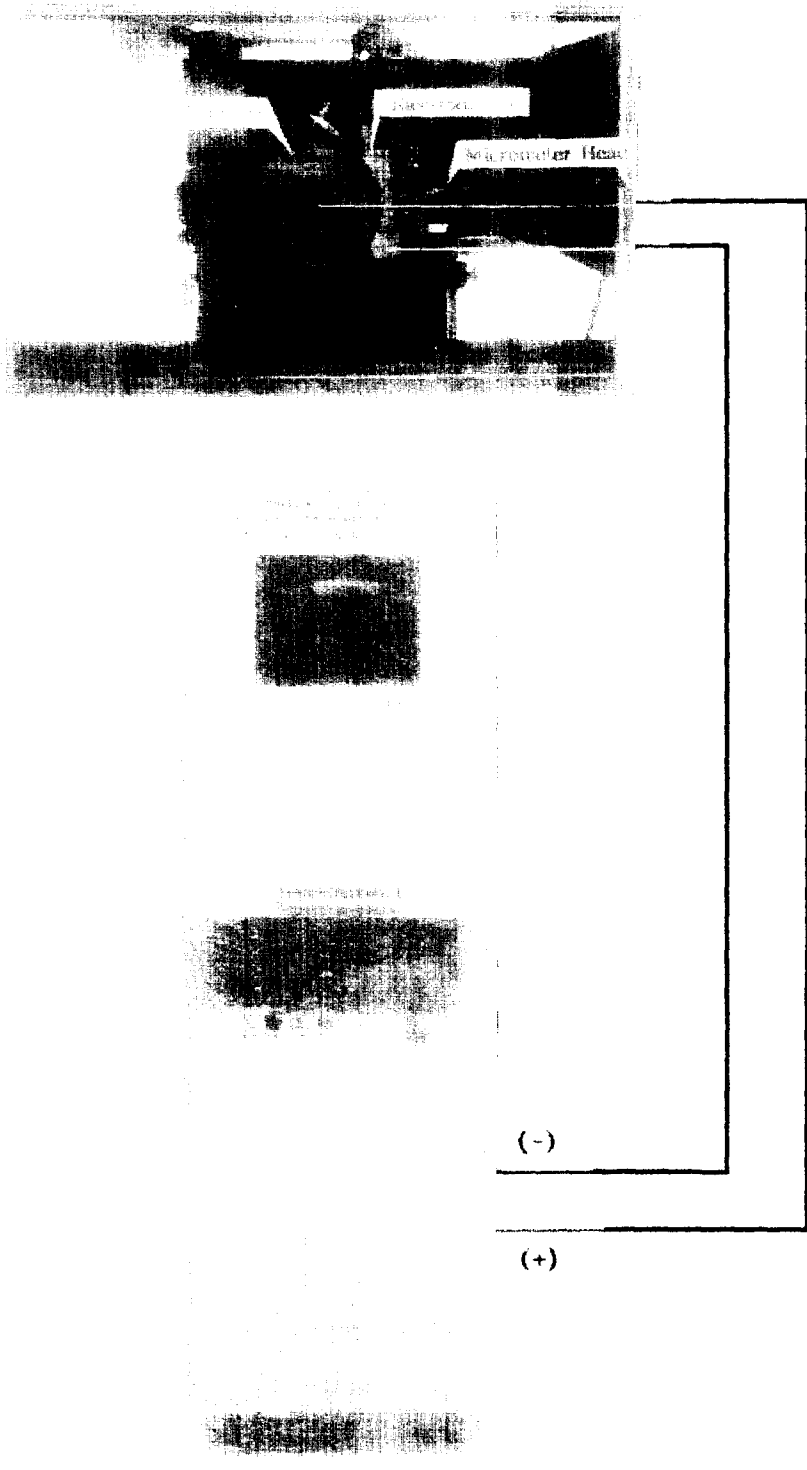
Peak Current	0 ~ 40 A
Pulse Duration / Pause	$\tau$ on/off = 0 ~ 999 $\mu$ sec
Timer	0 ~ 120 min
Data for Control	Input : Current, Voltage, Gap Output : $I_p$ , $\tau$ on, $\tau$ off
Optimum Control Factor	Regular Current
Input/ Output Data Type	A/D Converter, DIO

Table. 2 Experimental conditions

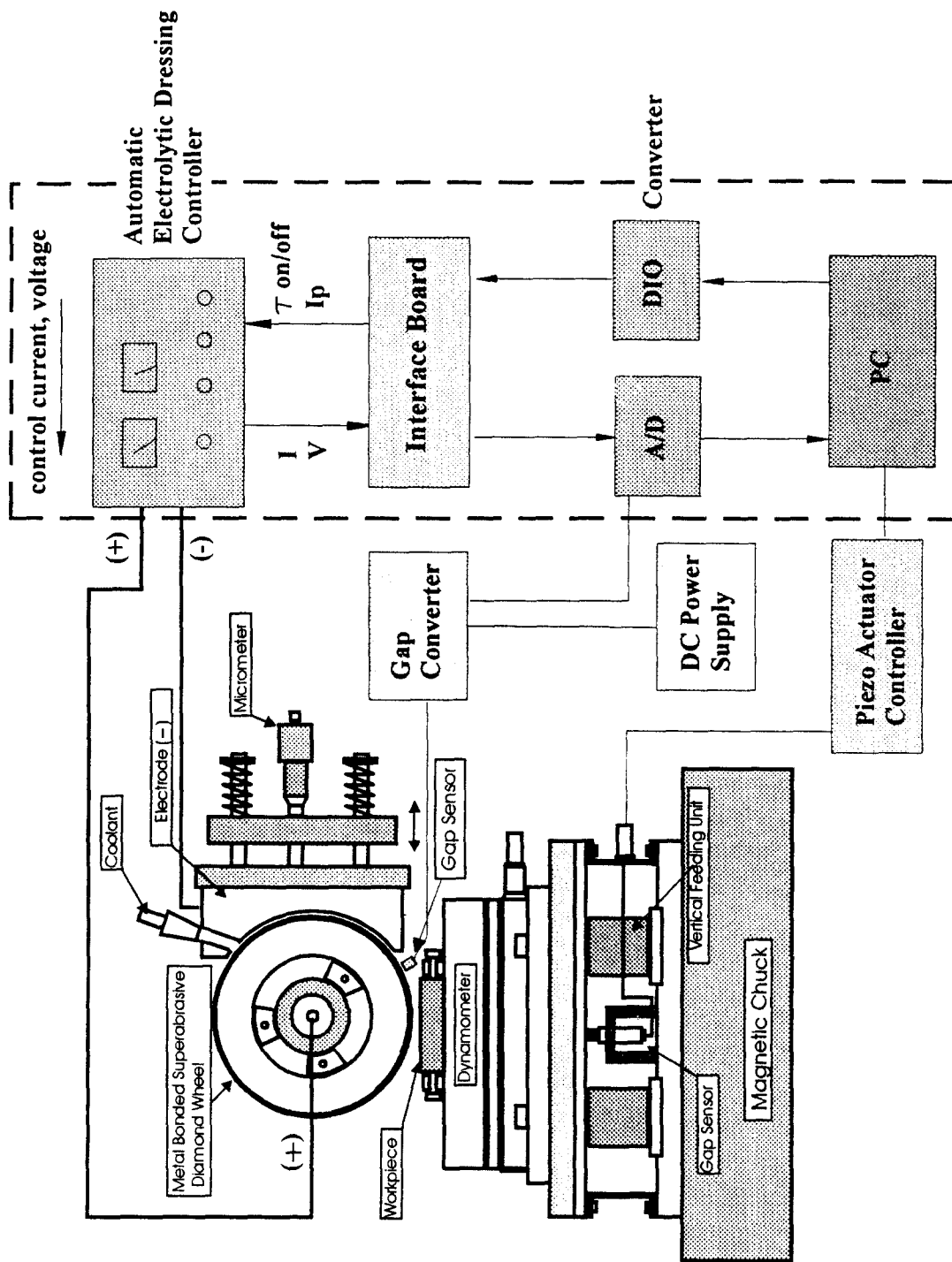
Grinding Machine	Surface Grinding Machine ( Air Spindle )
Wheel	D12000 ( D12000N100M3 )
Wheel Speed	3400 rpm
Dressing System	Optimum In-process Electrolytic Dressing system (KAIST-KSECS-1)
Electrolytic Fluid	Solution type (50:1)
Power Source	$I_p$ = 0 ~ 40 A $\tau$ on/off=1 ~ 10 $\mu$ sec
Electrode	Copper (1/4 of Wheel size)
Gap Sensor	Model AEC 5505 Photonics Co. Resolution : 0.5 $\mu$ m
Tool Dynamometer	Kistler 3-Component Dyanmmometer Type. 9257B

Table.3 Characteristics features of Workpiece

Hardness (Vickers)	1800 Kg/mm <sup>2</sup>
Specific Gravity	3.9 gf/cm <sup>3</sup>
Young's Modulus	4.0x10 <sup>4</sup> kgf/mm <sup>2</sup>
Specific Heat	0.19 Cal/g °C
Heat Conductivity	0.07 Cal/cm s °C
Fracture Toughness	4 kgf/mm <sup>3/2</sup>



**Fig.1 Optimum in-process electrolytic dressing system  
(KAIST-KSECS-1)**



**Fig.2 Optimum control mechanism of in-process electrolytic dressing for ultraprecision grinding**

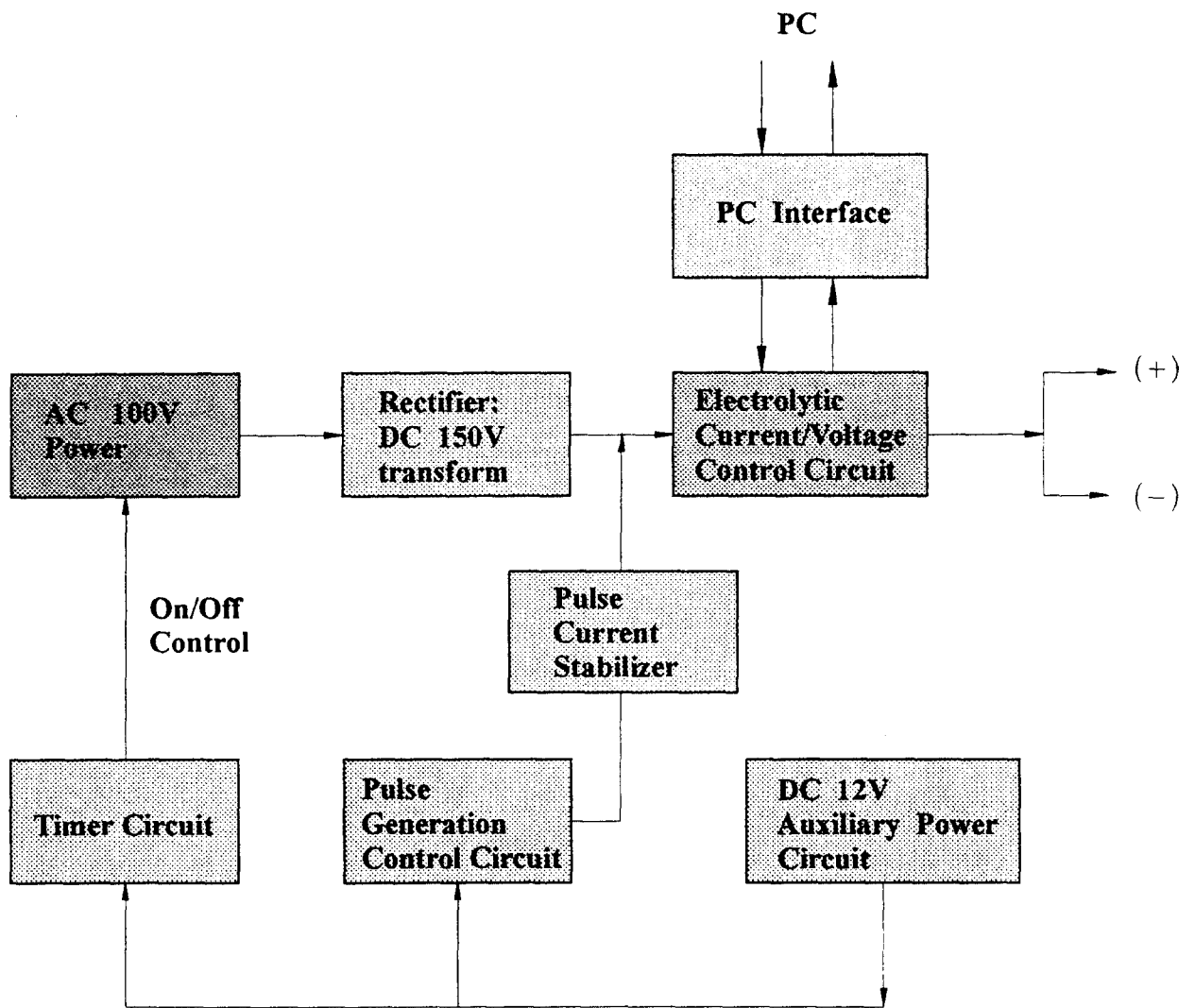


Fig.3 Electrical schematic of automatic electrolytic dressing regular current controller

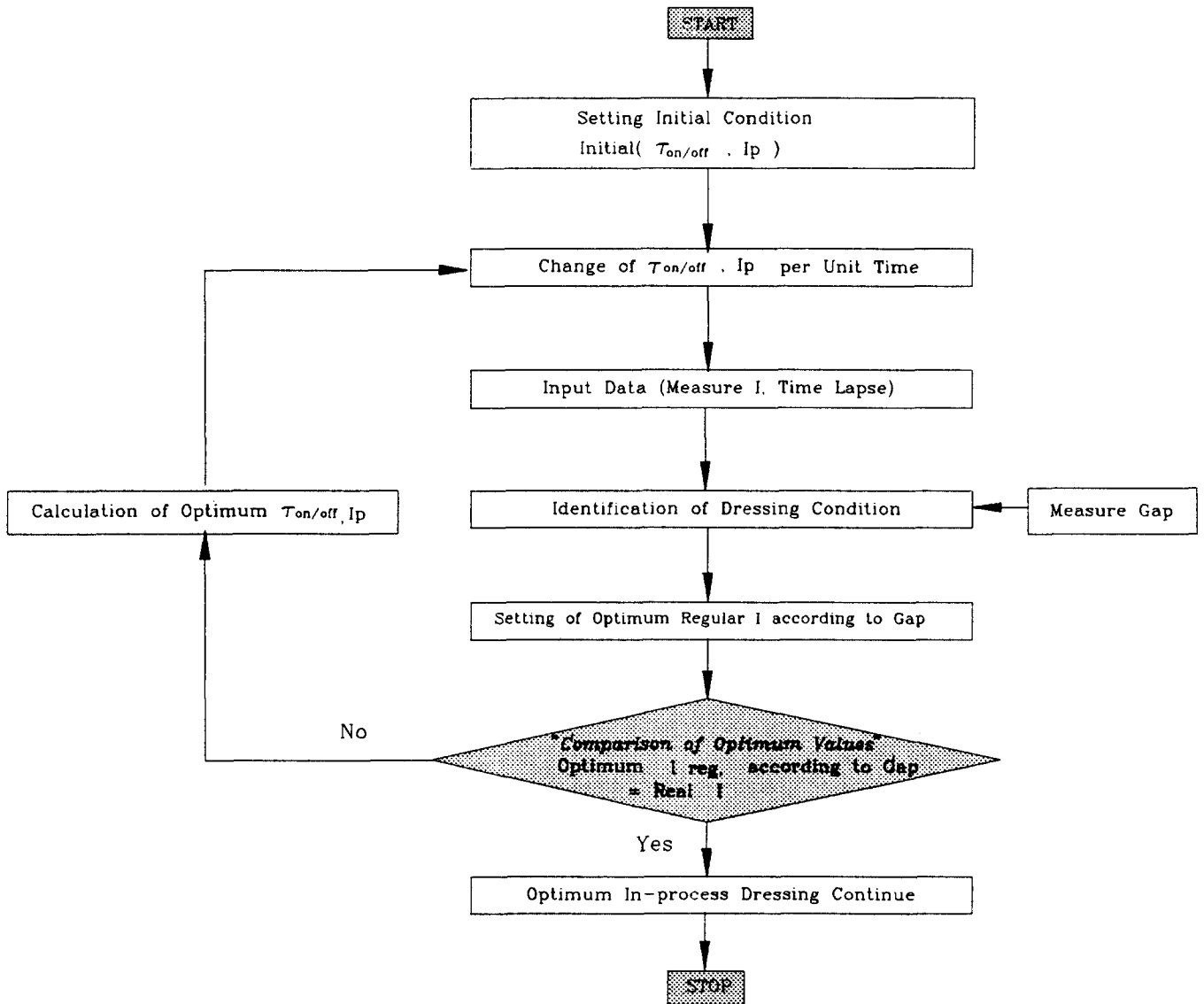


Fig.4 Flow chart of optimum control of regular current for optimum dressing

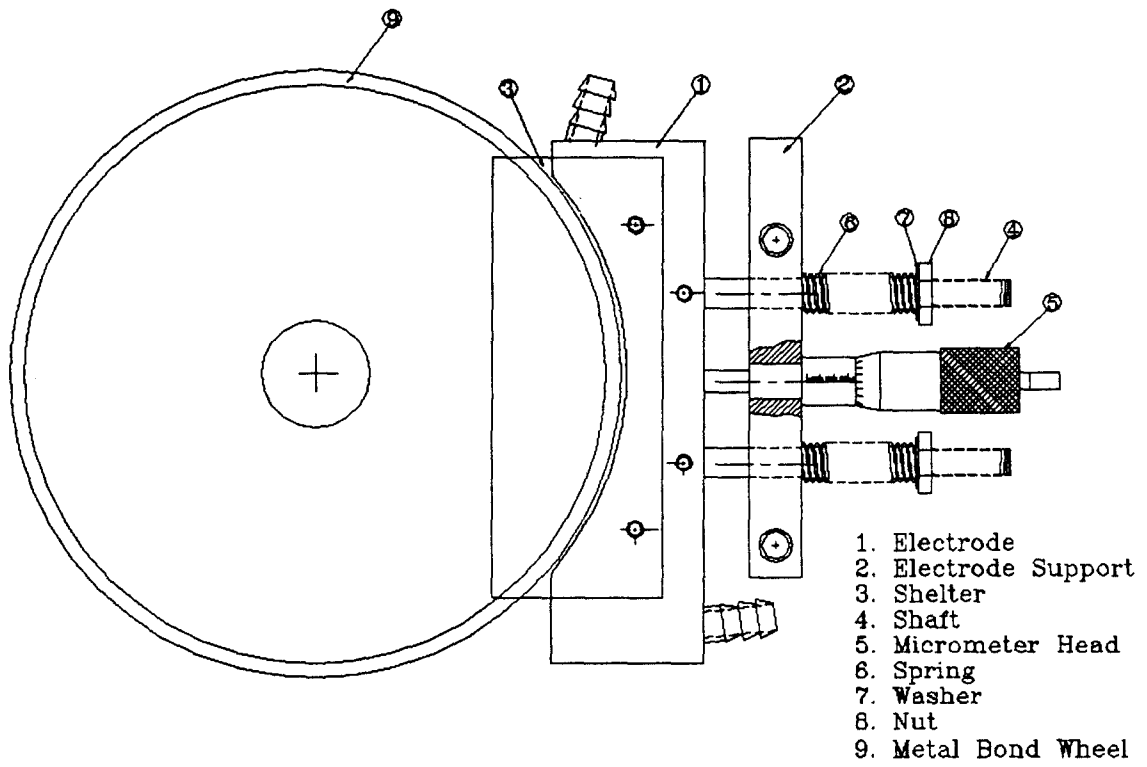


Fig.5 Electrode equipment for optimum dressing

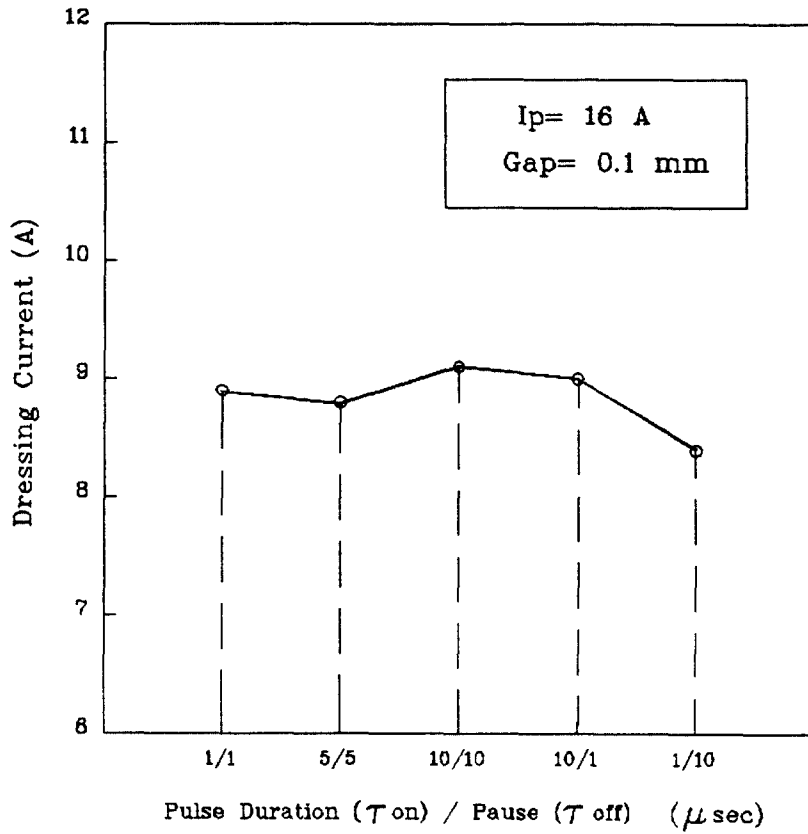


Fig.6 Electrical Behavior of Optimum System (KAIST-KSECS-1) according to Pulse

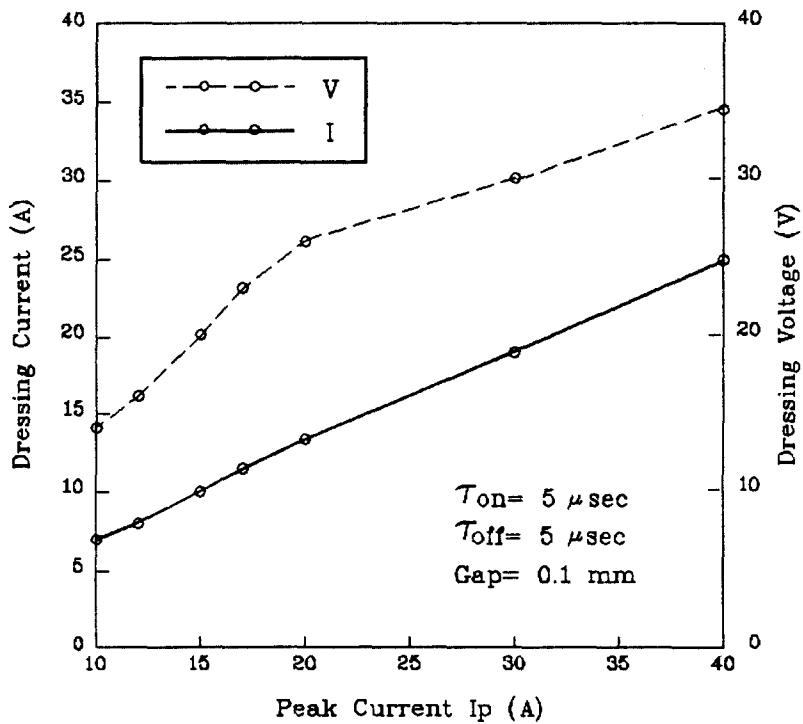
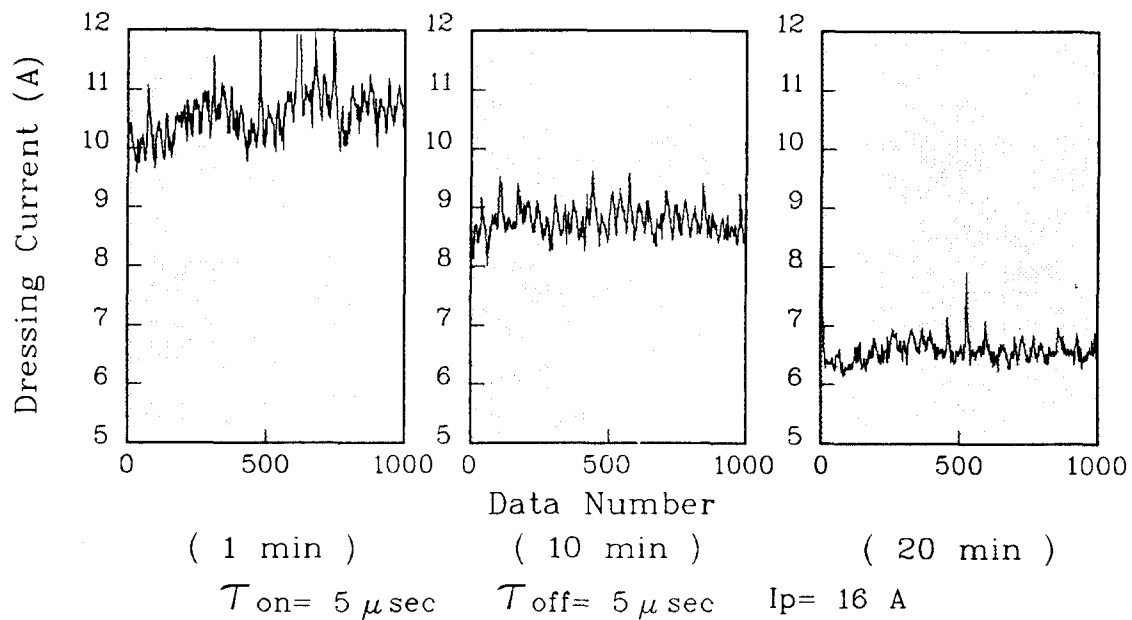
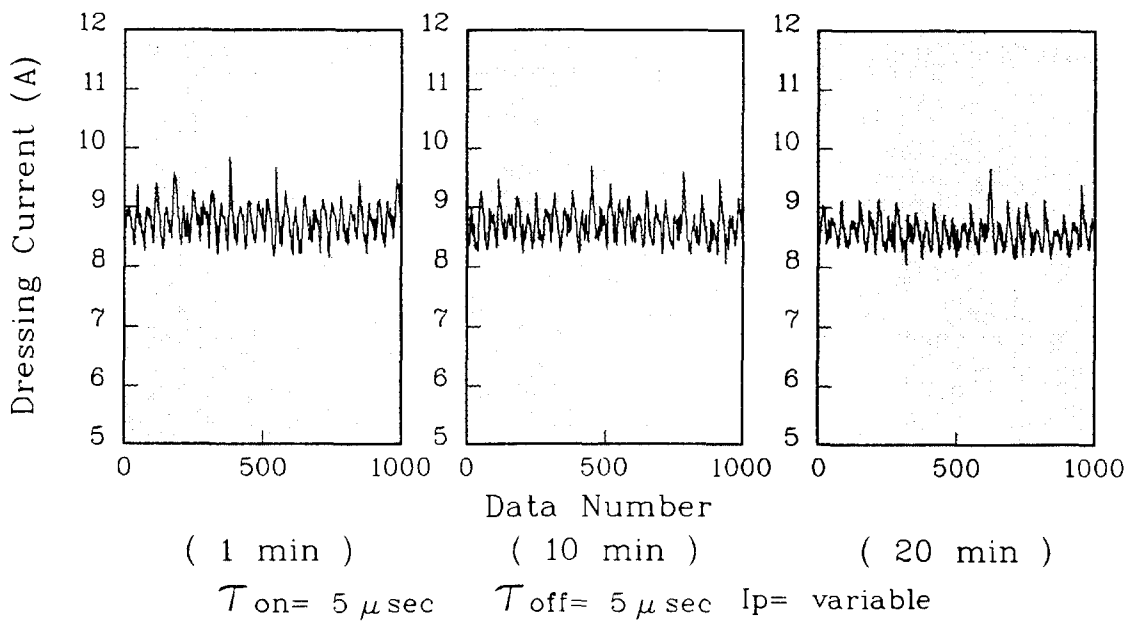


Fig.7 Electrical Behavior of Optimum System (KAIST-KSECS-1) according to Peak Current





**(a) Without Control**



**(b) Optimum Control**

**Fig.8 The comparison of current data with dressing optimum control**

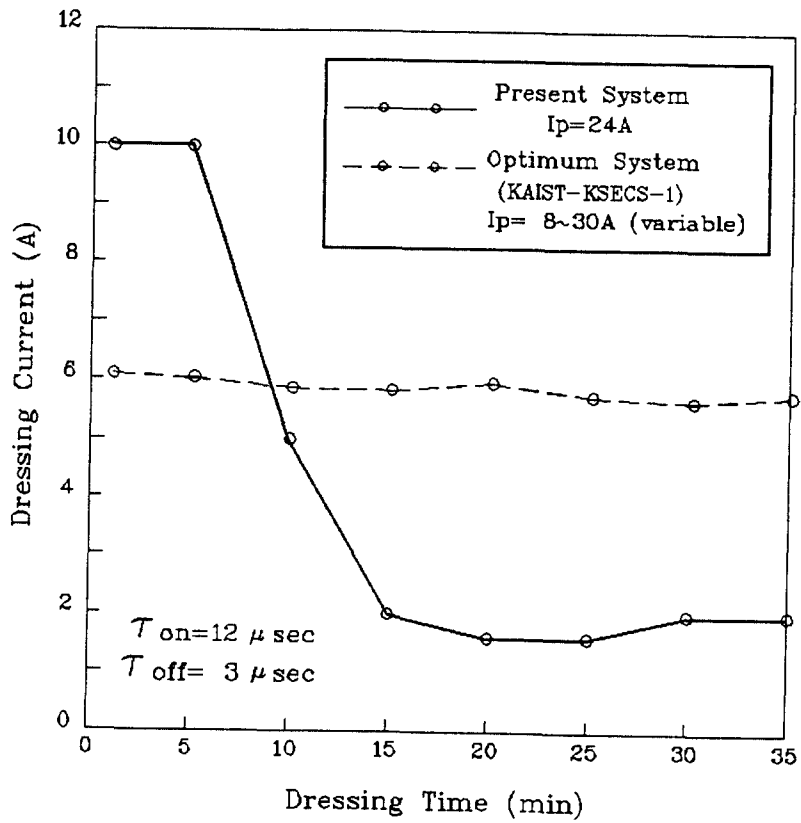


Fig.9 Relationship between dressing current and dressing time

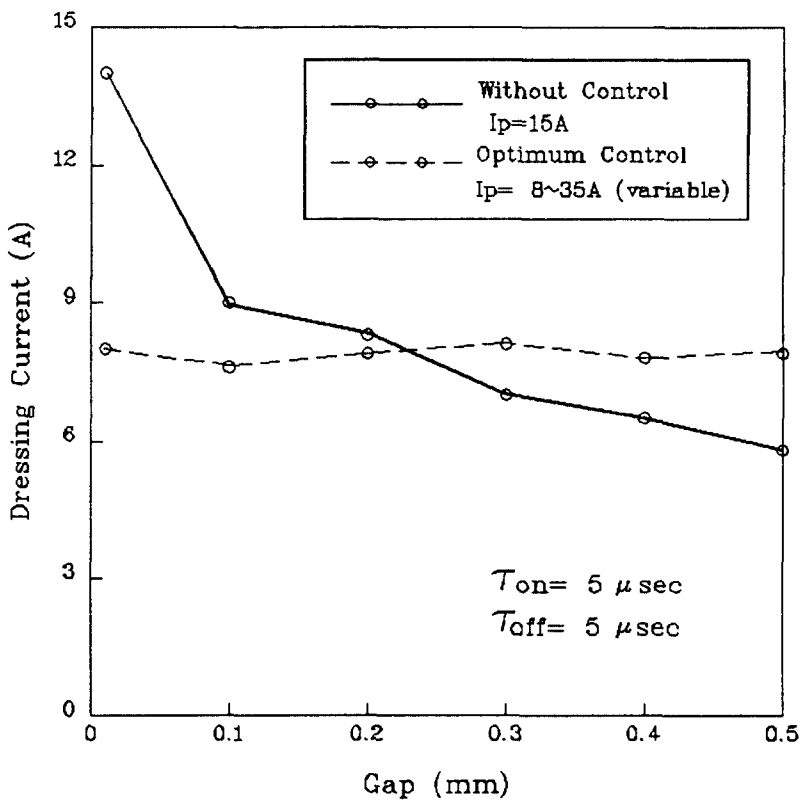
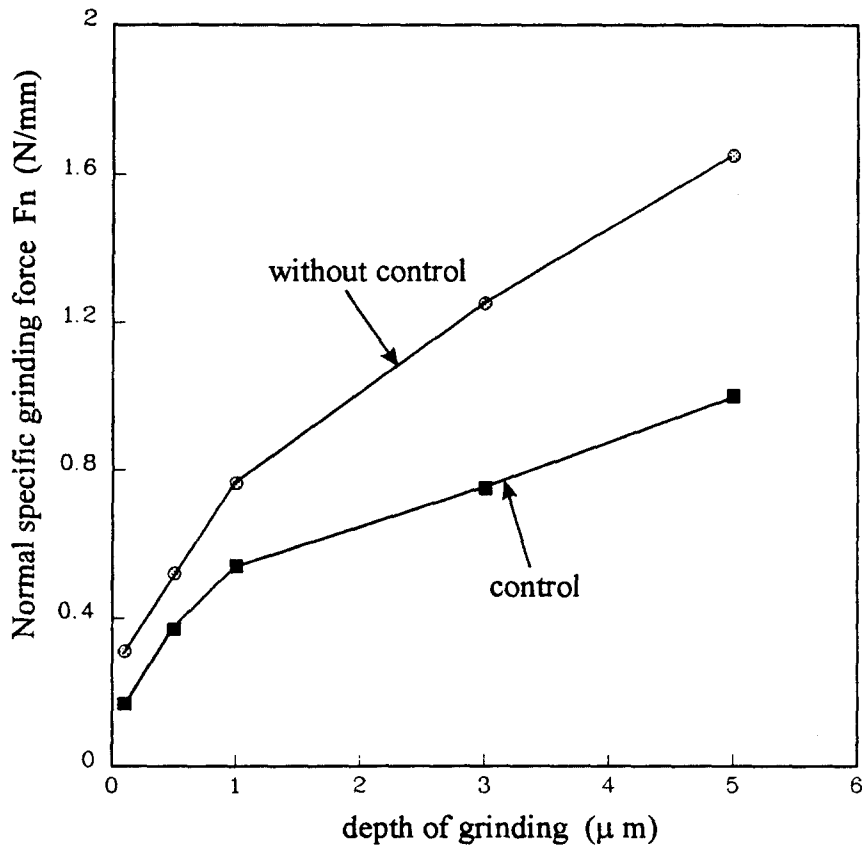
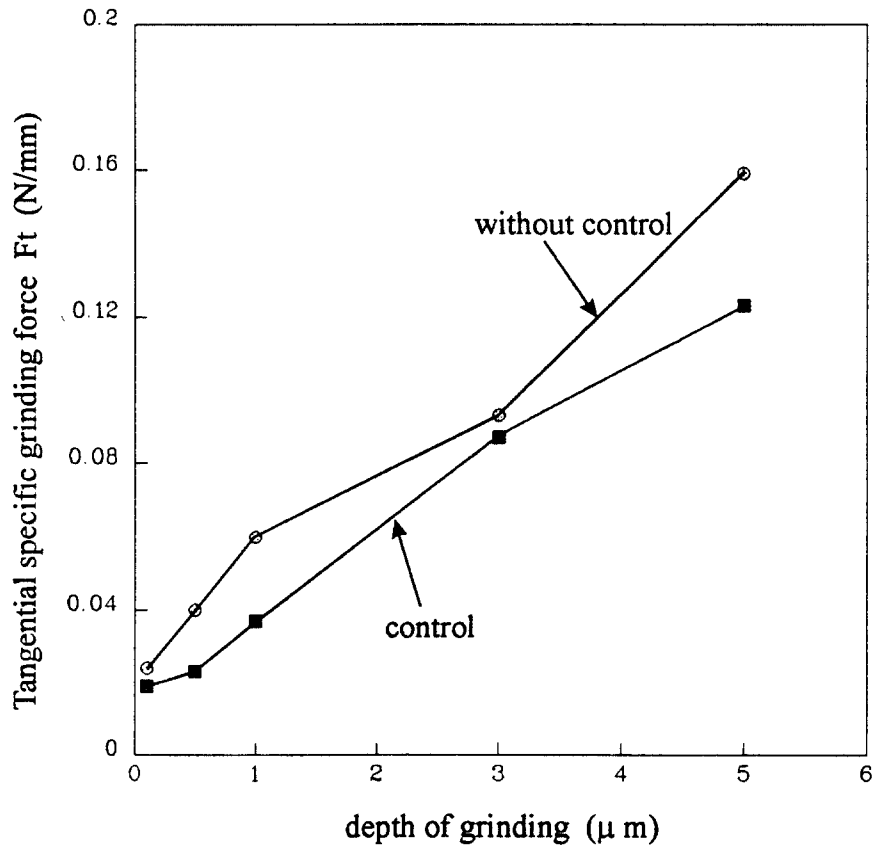


Fig.10 relationship between dressing current and gap



Wheel : D12000N100M3 Wheel speed : 3400rpm  
 $V_w = 1.0 \text{ m/min}$  Workpiece :  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
 Dressing condition:  
 In-process electrolytic dressing  
 $\tau_{\text{on/off}} = 5 \mu\text{sec}$   $I_p = 10\text{A}$

Fig.11 Relationship between normal specific grinding force and depth of grinding



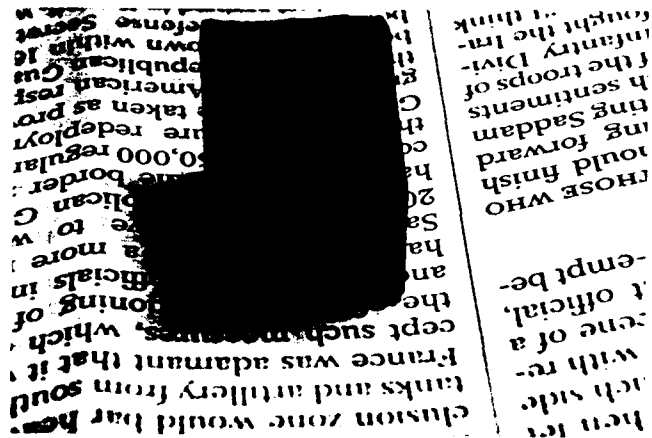
Wheel : D12000N100M3 Wheel speed : 3400rpm  
 $V_w = 1.0 \text{ m/min}$  Workpiece :  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
 Dressing condition:  
 In-process electrolytic dressing  
 $\tau_{\text{on/off}} = 5 \mu\text{sec}$   $I_p = 10\text{A}$

Fig.12 Relationship between tangential specific grinding force and depth of grinding

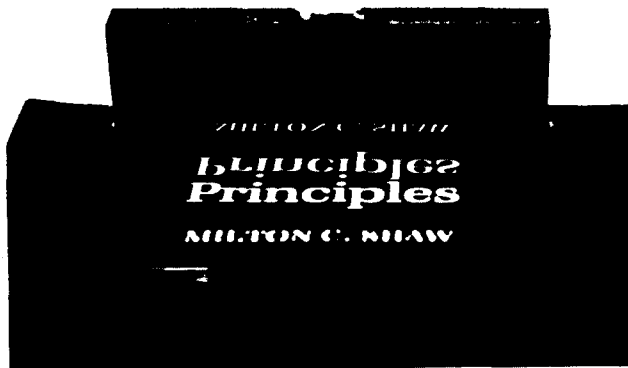
  


**ditional Editions**

(a)  $Al_2O_3$



(b) Ferrite



(c) Sintered Carbide

Wheel : D12000N100M3     $V_w = 1.0$  m/min  
Depth of grinding :  $1.0 \mu\text{m}$   
Optimum in-process electrolytic dressing

Fig.13 View of ground mirror-like surface



Wheel : D15000N100M3      Wheel speed : 3400 rpm  
V<sub>w</sub> = 1.0 m/min      Depth of grinding : 0.3 μm  
Workpiece : MgO single crystal

**Fig.14 SEM photograph of mirror-like grinding surface**