

# 최적 연속 전해드레싱에 의한 연삭기구의 규명 및 시스템 개발에 관한 연구 (A Study on the Analysis of Grinding Mechanism and Development of Dressing System by using Optimum In-process Electrolytic Dressing)

이은상\* · 김정두 (한국과학기술원 기계공학과)  
Eun-Sang Lee and Jeong-Du Kim (KAIST)

## ABSTRACTS

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 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.

### 1. 서론

최근에 전자산업, 정보통신산업의 발달로 첨단산업분야 재료인 자기헤드 페라이트, 초경합금, 단결정 산화마그네슘, 금형강, 실리콘 웨이퍼등의 경면연삭이 요구되어지며, 이를 달성하기 위해서 연속적인 드레싱이 매우 중요하게 되었다. 경취 재료중 초경합금은 높은 압축강도 및 온도 상승에 무관한 경도 유지 등의 특성에 의해서, 공구 및 금형에 많이 사용되고 있으나 취성 및 강성에 의해서 일반숫돌로 가공이 매우 어려운 난삭재로 알려져 있다. 따라서, 다이아몬드 숫돌에 의해서 가공이 이루어져야 한다.<sup>(1)</sup> 또한, 공구 및 금형재료로 사용하기 위해서 경면 가공이 요구되어지며 경면달성을 위해서는 초미립자(superabrasive) 숫돌이어야 가능하다. 초미립자 다이아몬드 숫돌을 사용하여 연삭할 경우 눈매움(loading) 및 날무디어짐(glazing)에 의한 드레싱에 상당한 어려움이 있다.<sup>(2)</sup> 이러한 현상을 방지하기 위해서 연속적인

드레싱이 매우 중요하게 되었다. 스틱형태의 호닝숫돌을 공작물 측면에 같이 장착하여 연삭가공 중 연삭테이블의 이동으로 드레싱이 되는 기계적인 드레싱이 있으며, 방전가공을 적용한 연삭 숫돌의 드레싱 방법도 제안되었다.<sup>(3,4)</sup> 연속 드레싱의 한 방법으로 금속결합제 숫돌 주위에 전극을 설치하고, 숫돌회전과 동시에 전해액을 그 사이에 통과하게 하여 펄스전원을 인가함으로써 전기분해 작용에 의한 드레싱을 하는 인프로세스 전해드레싱 기법<sup>(5,6)</sup>이 근년에 발표되어 우수한 성능을 나타내고 있으나, 전해 드레싱 시간의 경과와 부수적으로 나타나는 불안정한 드레싱 전류로 인한 문제점으로 항상 일정한 최적상태의 드레싱을 유지하는데 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하여 항상 최적상태의 드레싱을 유지하는 컴퓨터 인터페이스용 전해 드레싱 시스템<sup>(7)</sup>을 자체개발하였으며, 연속 전해드레싱시 드레싱 전류값의 변화에 따라 시스템의 입력값을 조절함으로써 최적의 전해 드레싱을 능동적으로 유지하는 방법을 채택하여 불안정한 산화막 생성 및 간극변화등에 대한 드레싱 전류를 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 가능케 하여 양호한 가공표면을 기대할 수 있다. 연삭숫돌의 금속결합제가 전해작용에 의해  $Fe^{2+}$ 로 이온화 되어 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.<sup>(5)</sup>

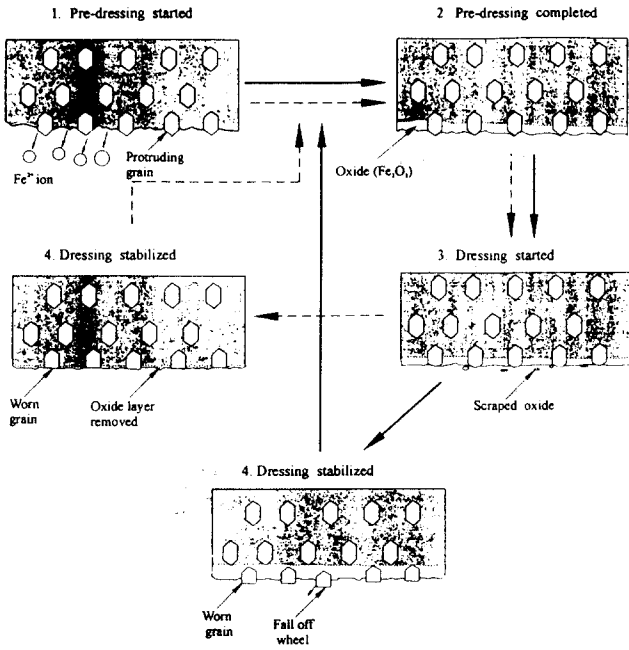


Fig.1 Schematic diagram of the mechanism

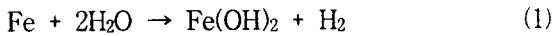


Fig.1은 연속 전해드레싱의 원리를 나타낸 그림으로서, 점선을 일반적인 전해드레싱의 원리<sup>(5)</sup>를 나타내고 있으며, 실선은 전해드레싱 제어에 의한 최적 전해드레싱 원리를 나타내고 있다. 전해드레싱 제어를 한 경우와 제어를 하지 않은 경우가 1에서 3 단계까지의 상태는 거의 같으나 드레싱 안정화 상태인 4단계에서 차이가 난다. 최적 전해드레싱을 적용한 경우에는 마멸된 입자가 보다 빠르게 제거되어서 새로운 입자를 돌출함으로서 연삭표면에 나쁜영향을 미치지 않아서, 양호한 가공표면을 기대할 수 있다. 연속적인 전해드레싱에서 I (A)의 드레싱 전류가 t초간 흐름으로서 양극인 스톨의 메탈본드가 용출되는 량을 w라고 하면 다음과 같이 표현된다.

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

n : 원자가 F : 패러데이 상수 M : 원자량 여기서 원소의 밀도를 ρ라고 하면, 실제의 체적 제거량(V<sub>r</sub>)은 전류효율(η)을 고려하여야 되어야 하며,

$$V_r = \eta V_0 = \eta M I t / n F \rho = \eta V_s I t \quad (3)$$

전해드레싱시 체적가공속도는 재료의 원자량, 전해용출시 전기량, 양전극사이의 전류값에 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig.2는 연속 전해드레싱에 의한 전기분해시 형성되는 작용을 나타낸 것이다. 전극과 스톨의 금속결합체 사이에는 전해액과 절연층인 산화막에 의한 드레싱 전류의 저항으로 도식화 될 수 있

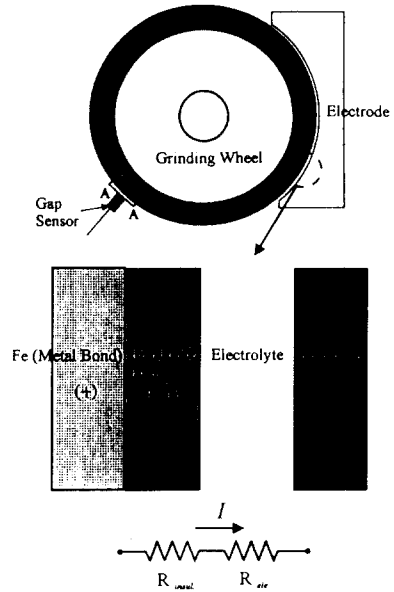


Fig.2 Schematic of the resistance of dressing current

다. 이때의 드레싱 전류를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I = \frac{V}{R_{ele.} + R_{insul.}} \quad (4)$$

전해액의 저항이 일정하다고 가정을 하면 산화절연층의 저항에 의해서 드레싱 전류가 변화됨을 알 수 있다.

Fig.3은 최적 연속 전해드레싱시스템을 적용한 드레싱전류 제어한 경우와 제어 하지 않은 경우에 따른 연삭가공시 연삭스톨의 상태를 도식화한 것으로서, 각각 산화막의 차이를 나타내게 된다. 연삭입자중 A와 C는 어느정도 연삭가공을 진행하여 마멸된 입자로서 드레싱제어를 하지 않은 (a)의 경우에는 산화막이 얇게 형성되어 있고 금속결합체에 완벽하게 결합이 되어 있어서 공작물의 연삭가공에 작용을 하게 된다. 그러나, 드레싱제어를 한 경우에는 산화막(t<sub>2</sub>)이 약간 두껍게 형성되어 있어서 연삭가공시 마멸된 입자인 A, C는 연삭시 연삭저항에 의해서 제거되어 마멸된 입자가 공작물에 나쁜영향을 미치는 것을 방지하게 된다.

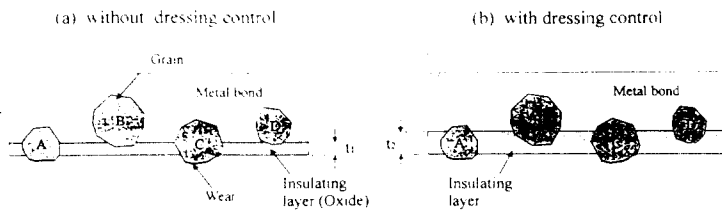


Fig.3 Schematic of wheel condition with in-process electrolytic dressing

Fig.4는 연삭입자 1개가 연삭하는 것을 도식한 것으로서, 드레싱제어를 수행한 경우와 수행하지 않은 경우를 나타내고 있다. 연삭입자 하나의 수직분력( $F_{n1}$ )은 연삭칩 생성의 절삭 수직분력( $F_{nc}$ ), 수평분력 ( $F_{t1}$ )과 접촉 공작물의 수직분력( $F_{ns}$ ), 수평분력( $F_{ts}$ )으로 표현되어 진다.

$$F_{n1} = F_{nc} + F_{ns} \quad (5)$$

$$F_{t1} = F_{tc} + F_{ts} \quad (6)$$

드레싱제어를 하지 않은 입자는 마멸 현상이 발생하여, 공작물의 절삭분력 및 접촉분력이 마멸되지 않은 입자와는 차이가 발생 한다.

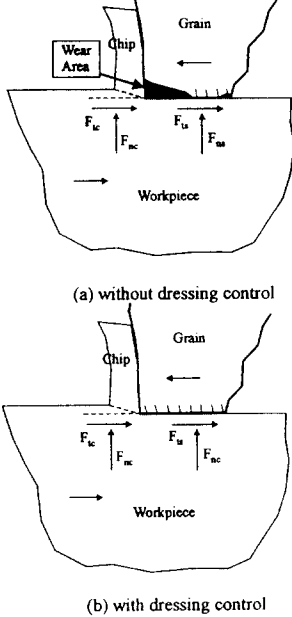


Fig.4 Schematic diagram of the comparison of a grain in grinding

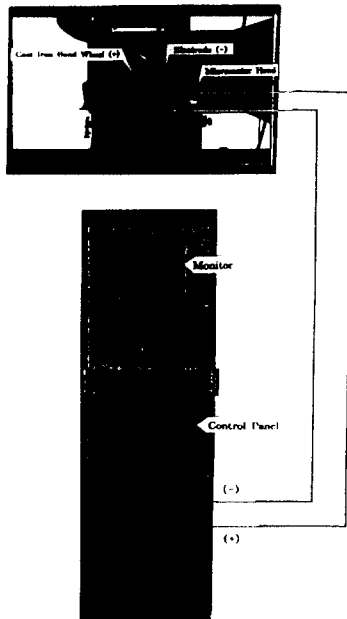


Fig.5 Optimum In-process Electrolytic Dressing System

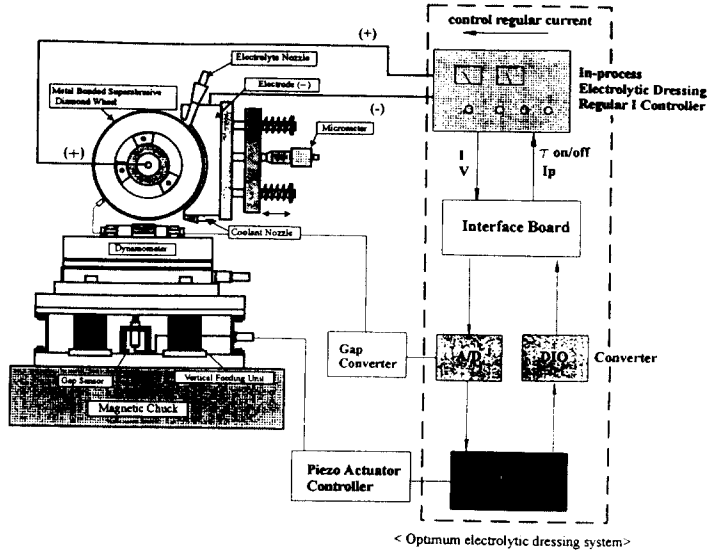


Fig.6 Dressing control mechanism of regular current for in-process electrolytic dressing

### 3. 최적 연속 전해드레싱 시스템

본 연구에서 금속결합제 슷돌의 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 경면 연삭을 위한 최적 연속 전해드레싱 시스템의 구동 메카니즘을 나타낸 것으로 금속결합제 다이아몬드 슷돌을 전원장치의 양극과 연결하고, 슷돌 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. 점선부분내 장치를 시스템화 구성한 것이 최적 연속 전해드레싱 시스템이다.

### 4. 실험장치 및 방법

Table.1은 최적 전해드레싱 시스템의 사양을 나타내고 있으며, Table.2는 본 실험에서 사용한 조건을 나타낸 표이다. 실험에서 사용한 슷돌은 주철결합제로 되어있는 다이아몬드 슷돌이며,

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 Control Mode	A/D Converter, DIO

**Table. 2 Experimental conditions**

Grinding Machine	Surface Grinding Machine
Wheel	D12000 , D800
Wheel Speed	3400 rpm
Electrolytic Fluid	Solution type (50:1)
Power Source	$I_p = 0 \sim 40$ A $\tau_{on/off} = 1 \sim 10$ $\mu$ sec
Electrode	Copper (1/4 of Wheel size)
Gap Sensor	ST-3501 (Capacitance type) Iwatsu electric Co.
Tool dynamometer	Kistler 3-Component Dynamometer Type. 9257B

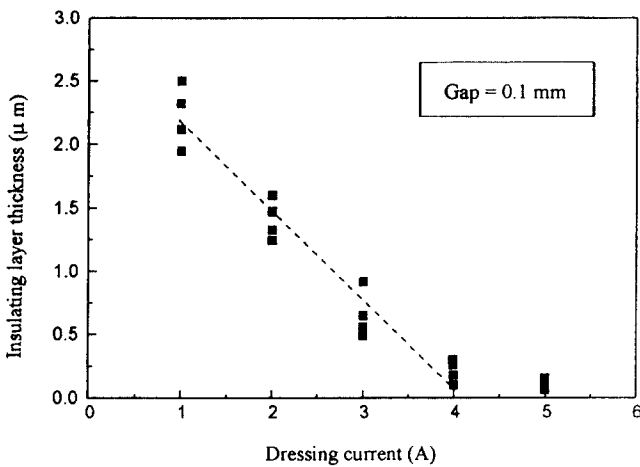
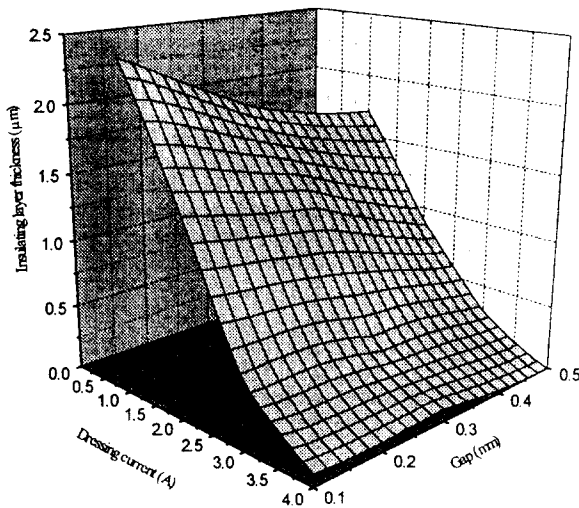


Fig.7 Relationship between dressing current and insulating layer thickness



Wheel : D12000N100M3.0

Fig.8 Insulating layer thickness according to dressing current and gap

전해드레싱 시스템의 양극단자와 연결되어 있고, 전해드레싱을 위한 전해용 전극 (순동 99%)에 음극단자를 연결 구성하였다. 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 사용하였다.

### 5. 실험결과 및 고찰

Fig.7은 시스템의 간극을 0.1mm로 고정을 하고, 드레싱 전류에 따른 산화 절연층의 두께 변화를 간극센서를 이용하여 측정한 것으로서, 산화막이 증가됨으로서 드레싱 전류는 감소함을 알 수 있다. 산화막과 드레싱 전류를 선형적이라고 가정하면, 산화막 두께를  $t_0$ 라 하였을 경우 드레싱전류에 따른 실험식으로 표현하면 다음과 같다.

$$t_0 = 2.86 - 0.71 I \quad (7)$$

이 2인자의 관계에서 드레싱 전류를 일정하게 유지함으로써 산화막 두께를 일정하게 유지 할 수 있다.

Fig.8은 간극의 변화에 따른 드레싱 전류와 절연층의 두께 변화를 측정한 것을 나타낸 것으로서, 간극이 증가 될수록 산화막의 두께는 감소됨을 볼 수 있다. 산화막이 감소되면 연삭가공시 입자가 마멸되어도 마멸입자 탈락등의 효과가 현저하게 떨어짐으로서 연속드레싱 효율이 감소하게 된다. 드레싱 효율의 감소를 방지하기 위해서, 간극증가에 따라서 시스템의 입력치인 피크전류를 조절하여 절연층의 두께를 증가시킬 필요가 있다.

Fig.9는 드레싱 시간에 따른 드레싱 전류의 변화를 나타낸 것으로서, 25분까지는 슛돌을 트루잉후 슛돌입자의 초기돌출을 위한 전드레싱 상태이다. 전드레싱 경과후 점선은 일반적인 전해드레싱으로 드레싱전류를 제어하지 않은 것을 나타내고 있으며, 실선은 드레싱 전류를 제어한 것을 나타내고 있다. 드레싱 제어를 하지 않은 경우에는 연삭이 수행됨에 따라서 산화막의 제거가 진행되고 산화막이 얇아짐에 따라 드레싱 전류값은 높아지게 되고, 다시 산화막의 생성이 증가되어

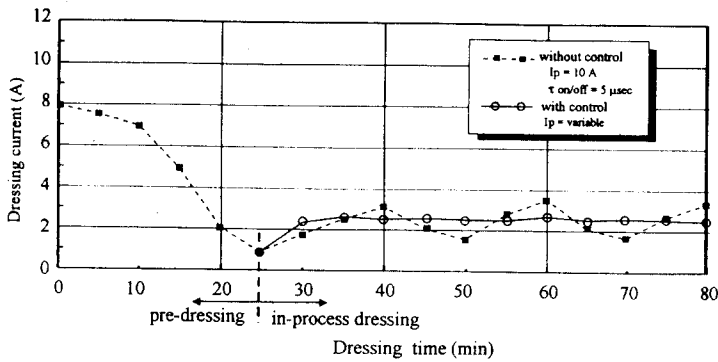


Fig.9 Relationship between dressing current and dressing time

전류값은 감소하게 된다.

Fig.10은 전해드레싱시 드레싱전류의 데이터를 간극을 0.1, 0.3, 0.5 mm로 하였을 때 각각 1000 개씩 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 증가시키에 따라 드레싱 전류 데이터값이 낮아짐을 관찰할 수 있으며, 이 현상은 전기분해 작용시 간극 증가에 따른 전해액의 저항상승에 따르는 현상이다. 초기전류를 2.7A로 설정하고, 컴퓨터 제어에 의한 정격전류의 변동에 따라 피크전류를 변화시킴으로서 드레싱 정격전류를 제어 하였을 때에는 거의 초기전류값 부근에서 유지됨을 볼 수 있다.

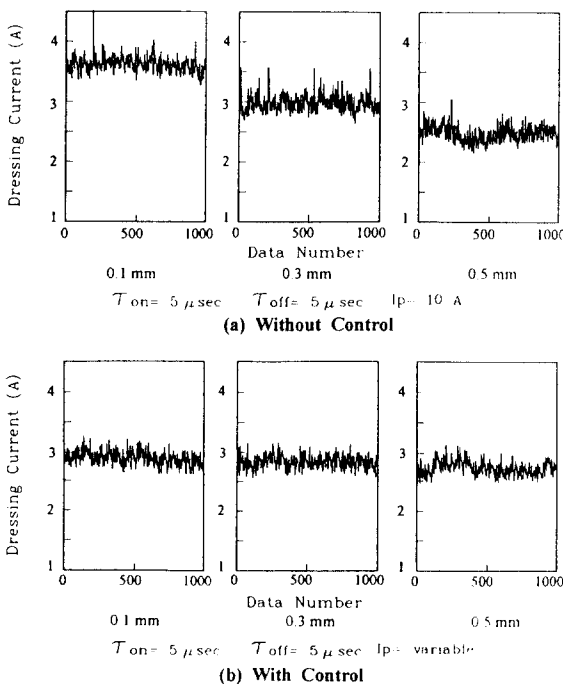


Fig.10 The comparison of dressing current data according to gap

Fig.11은 다이아몬드 슷돌(D800)로 연삭을 수행한 후 연삭스틀의 표면을 2000배로 확대하여 공구 현미경으로 관찰한 것을 나타내고 있다. 시간의 경과에 따른 슷돌상태 변화를 고찰하기 위해서 각각 5, 10, 15, 20분 연삭 수행한 후 슷돌 표면에 있는 연삭입자들을 관찰하였다. 여기서 스파크아웃 시간은 5분으로 고정하였다. 전드레싱을 수행한 후 시간을 측정하였으며, 5분 연삭을 수행한 후 슷돌표면의 연삭입자를 보면 드레싱 제어하지 않은 경우와 제어한 경우가 동일하게 산화막이 벗겨지고 다이아몬드 입자가 표면에 일부 돌출되어 있는 현상을 볼 수 있다. 10분 연삭 수행후 다이아몬드 입자가 슷돌표면에 완전히 돌출되어 있는 같은 현상을 나타 내었다. 15분 경과후에는 드레싱 제어를 하지 않은 경우에는 연삭입자의 일부가 마멸되어 있는 현상을 관찰 할 수 있었으며, 드레싱 제어를 한 경우에는 10분 경과시 가공하던 입자는 탈락되고 새로운 입자가 새롭게 돌출되어 있음을 관찰 할 수 있었다.

Fig.12는 연삭깊이에 따른 수직 및 수평연삭력의 변화를 나타낸 것으로서, 전해드레싱 제어를 한 경우와 하지 않은 경우를 비교하였다. 슷돌은 D12000을 사용하였으며, 테이블속도는 3 m/min으로 고정하여 초경공구의 상면을 연삭가공하였다. 실선은 드레싱제어를 수행한 것으로서 연삭 깊이의 증가에 따라서 수직 및 수평연삭력은 증가되나, 모든 연삭깊이에서 드레싱 제어를 수행하지 않은 것보다 적은 연삭력을 나타내고 있다. 이 현상은 마멸된 슷돌입자가 빠르게 제거되어, 새로운 입자에 의해서 연삭가공이 되기 때문이다.

## 6. 결론

- 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.
1. 기존의 전해드레싱 시스템은 드레싱 상태의 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 전해드레싱을 하였을 경우에는 마멸된 다이아몬드 연삭입자가 표면에 돌출되어 있

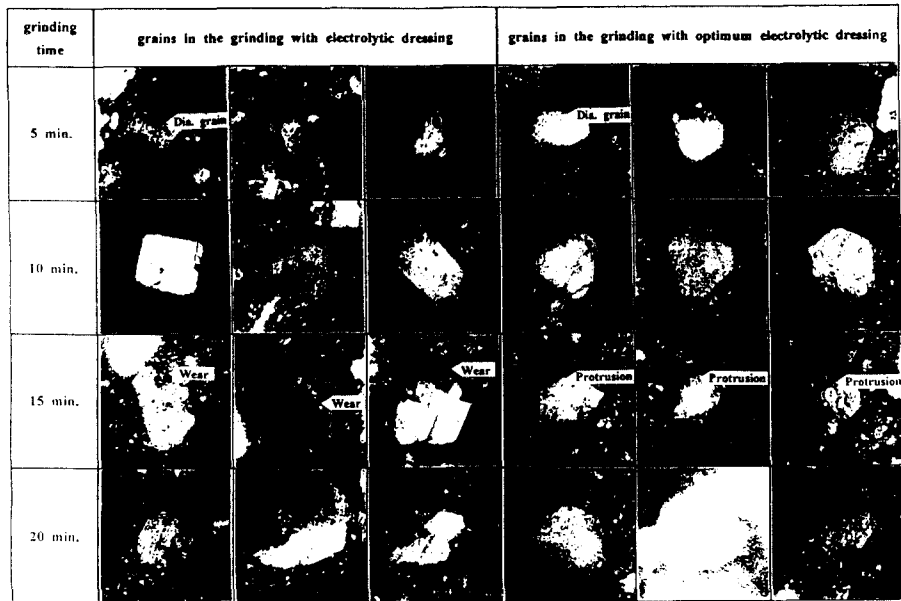


Fig.11 View of grinding wheel surface with tool microscope

는 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 드레싱 효과를 유지하여 연삭력 감소에 효과를 보였으며, 최적 전해드레싱을 적용함으로써 일반적인 전해드레싱보다 표면향상에 양호한 영향을 미쳤으며, 각종 난삭재의 경면연삭을 달성하였다.
4. 본 시스템은 드레싱 시간의 경과, 산화막의 변화 및 간극의 증가등 드레싱에 영향을 미치는 외부의 조건 변화와 무관하게 항상 일정한 정격전류를 유지하는 능동적인 제어 특성을 갖고 있다.

### 참고 문헌

- [1] T.Matsuo and K.Okamura, 1981, "Wear Characteristic of General and Superhard Abrasive Grains against Various Hard Materials", Annals of the CIRP, Vol.30, pp.233-236
- [2] R. Komanduri and W.R.Reed, 1980, "A New Technique of Dressing and Conditioning Resin Bonded Superabrasive Grinding Wheel", Annals of the CIRP, Vol.29, pp.239-243
- [3] J.D.Kim, E.S.Lee and C.Y.Lee, 1995, "Crack generation and the effect of in-process

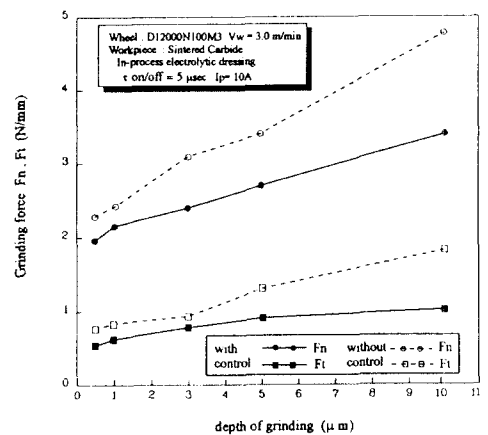


Fig.12 Relationship between grinding force and depth of grinding

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, 대한기계학회 논문집", 제18권, 제3호, pp.785~792
- [5] H.Ohmori, 1992, "Electrolytic In-Process Dressing Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining", Int. JSPE, Vol.26, No.4, pp.273-278
- [6] 김정두, 이연중, 1993, "연속 전해드레싱의 연삭조건 변화에 의한 경면생성 및 시뮬레이션에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제17권 제12호, pp.2962-2969
- [7] 김정두, 이은상, 1995, "최적 연속 전해드레싱 시스템의 개발과 제어 특성", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제3호, pp.680-687