

# 최적 연속 전해드레싱을 적용한 스테인레스 강의 연삭 특성에 관한 연구

이 은 상\*, 김 정 두\*\*

## A Study on the Grinding Characteristics of Stainless Steel with Optimum In-process Electrolytic Dressing

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

### Abstract

In recent years, grinding techniques for precision machining of stainless steel used in shaft, screw parts and clear value have been improved by using the superabrasive wheel and precision grinding machine. The completion of optimum dressing of superabrasive wheel makes possible the effective precision grinding of stainless steel. 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. Therefore, the optimum in-process electrolytic dressing is a good method to obtain the efficiency and mirror-like grinding of stainless steel (STS304).

Keywords : Superabrasive Wheel(초미립자 슛돌), Optimum In-process Electrolytic Dressing(최적 연속 전해드레싱), Oxide Layer(산화막), Cubic Boron Nitride Wheel(입방정질화붕소 슛돌)

### 1. 서 론

최근에 전자산업, 정보통신산업의 발달로 첨단산업분야 재료인 페라이트, 초경합금, 단결정 산화마그네슘, 금형강 등의 경면연삭이 요구되어지며, 이를 달성하기 위해서 연

속적인 드레싱이 매우 중요하게 되었다. 난삭재중 스테인레스 강 (STS304)은 내부식성 및 내마멸성이 우수하여 스크류 기계부품, 축류등에 적용되며, 내화학성에 의해서 유전자적용장치 부품, 화학용도의 밸브등에서 각광을 받고 있다. STS304는 Cr과 Ni의 함유량이 많아서 가공성이

\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

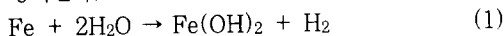
\*\* 한국과학기술원 기계공학과

매우 어려운 난삭재로 분류되며, 또한 STS304는 연질금속으로 연삭시 눈매움등 현상에 의해서 연삭이 매우 어렵다. 그러나, 고품위 제품의 완성을 위해서는 경면 연삭이 완성되어야 한다. 이러한 경면 연삭을 위해서는 초미립자(superabrasive)의 입방정질화붕소(CBN) 슷들의 적용이 필수 불가결 하다.<sup>(1)</sup> 초미립자 슷들을 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 호닝스틀을 공작물 측면에 같이 장착하여 연삭 가공중 연삭스테이블의 이동으로 드레싱이 되는 기계적인 드레싱이 있으며, 방전가공을 적용한 연삭 슷들의 드레싱 방법도 제안되었다.<sup>(3,4)</sup> 연속 드레싱의 한 방법으로 금속 결합제 슷들 주위에 전극을 설치하고, 슷들회전과 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 진행시 불안정한 산화막의 영향으로 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 전해드레싱 시스템<sup>(7)</sup>을 자체개발 하였으며, 본 최적 전해드레싱 시스템을 적용하여 난삭재인 스테인레스 강 (STS 304)의 가공효과를 분석 고찰하고자 한다.

## 2. 최적 연속 전해드레싱 이론

연속 전해드레싱은 전기분해작용에 의해서, 슷들의 마멸된 연삭입자가 제거되고 새로운 입자가 재생되어, 마멸되지 않은 연삭입자에 의해서 연삭을 가능케 하여 양호한 가공표면을 기대할 수 있다. 연삭스틀의 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 슷들 표면에 응착된다.<sup>(5)</sup>



양극에서 Fe가 전해용출하고, 음극에서는 수소가스가 발생된다.

Fig.1은 최적 연속 전해드레싱의 원리를 나타내고 있다. 일반 전해드레싱의 경우와 최적 전해드레싱의 경우는

1에서 3 단계까지의 상태는 거의 같으나 드레싱 안정화 상태인 4단계에서 차이가 난다. 일반 전해드레싱의 경우에는 산화물이 제거되고 또한 연삭입자도 마멸이 증가되어 표면에 나쁜 영향을 미칠 수 있는 상태에서도 전해작용에 의한 슷들의 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 들출함으로서 연삭표면에 나쁜영향을 미치지 않아서, 양호한 가공표면을 기대할 수 있다. 이 원인은 지속적인 일정한 전해작용에 의한 슷들결합제가 가공되어 산화막에 의해서 슷들입자의 지지력이 약화되고, 입자의 마멸에 따른 과도한 연삭력등에 의해서 마멸입자가 쉽게 제거되기 때문이다. 연속적인 전해드레싱에서 I (A)의 드레싱 전류가 t초간 흐름으로서 양극인 슷들의 메탈본드가 용출되는 량을 w라고 하면 다음과 같이 표현된다.

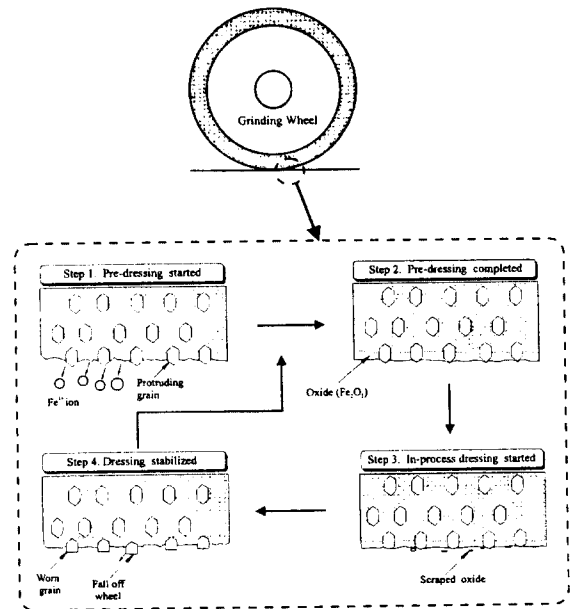


Fig. 1 Schematic diagram of the mechanism of optimum in-process electrolytic dressing<sup>(8)</sup>

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

n : 원자가 F : 패러데이 상수 M : 원자량

여기서 원소의 밀도를  $\rho$ 라고 하면, 실제의 체적제거량 ( $V_r$ )은 전류효율 ( $\eta$ )을 고려하여야 되어야 하며,

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

$V_0$  : 주철결합제의 이론 체적제거량

$V_s$  : 비가공체적 ( $M / n F \rho$ )

전해드레싱시 체적제거 속도는 재료의 원자량, 전해용출시 전기량, 양전극사이의 전류값에 영향을 받음을 알 수 있다. 재료 즉, 스톨결합제에 따른 비가공체적이 일정하다고 하였을 경우 전류값의 변화에 가공속도가 주로 영향을 받게 된다. 따라서, 양전극사이의 전류를 변화시키는 인자를 조절함으로써 가공속도를 조절할 수 있다.

Fig.2는 연속 전해드레싱에 의한 전기분해시 형성되는 작용을 나타낸 것이다. 전극과 스톨의 금속결합체 사이에는 양간극과 절연층인 산화막에 의한 드레싱 전류의 저항으로 도식화 될 수 있다. 이때의 드레싱 전류를 식으로 표현하면 다음과 같다.

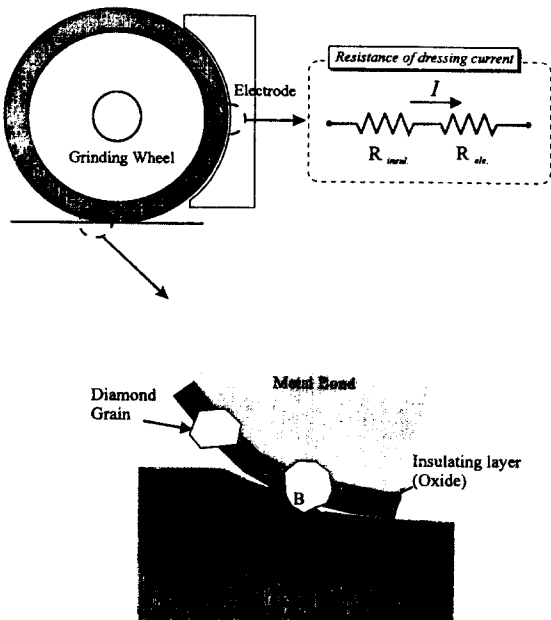


Fig. 2 Schematic diagram of grinding with in-process electrolytic dressing

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

양간극 사이의 전해액의 저항이 일정하다고 가정을 하면 산화 절연층의 저항에 의해서 드레싱 전류가 변화됨을

알 수 있다. 전해드레싱을 적용한 연삭가공시 스톨의 입자와 산화막등이 공작물에 작용하는 것을 도식한 것으로서, A면은 공작물의 마찰에 의해서 산화 피막이 조금씩 제거되어 지고, B면은 입자에 의해서 연삭작용을 하여 공작물이 제거되는 현상을 나타낸다.

Fig.3은 연삭길이에 따른 각각 산화막 두께의 변화를 나타낸 것으로서, 드레싱 전류를 제어하지 않은 일반 전해드레싱의 경우에는 드레싱 전류가 불안정하게 변화되며 또한 이에 따라서 산화막 두께도 변화된다. 산화막의 불안정된 변화에 의해서 드레싱 성능이 저하되는 현상을 나타내게 된다. 드레싱 전류를 제어한 최적 전해드레싱을 적용한 경우에는 산화막 두께가 일정한 값의 유지를 보이며, 이에 의해서 안정된 드레싱을 유지하여 연삭가공에 양호한 영향을 미치게 된다.

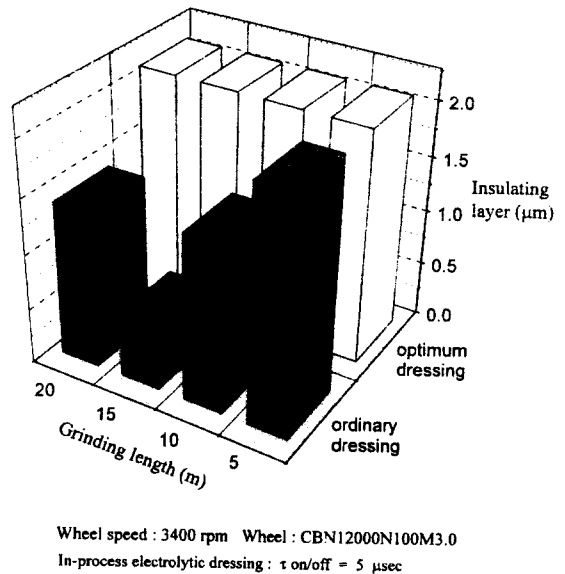


Fig. 3 Change of insulating layer according to grinding length

Fig.4는 최적 연속 전해드레싱 시스템을 적용하여 공작물을 연삭하기 위한 실험장치를 나타내고 있다. 마그네틱 척위에 공구동력계를 장착하여 연삭시 연삭력을 측정할 수 있게 설치를 하였다. 금속결합체 CBN 스톨은 전원장치의 양극과 연결하고, 스톨원주의 1/4정도의 전극은 전원장치의 음극과 연결하여 전해드레싱 전원을 공급하였다. 전극의 상단부에 전해액 공급노즐을 연결하여 스톨회전시 전해액이 원활하게 공급되도록 하였다.

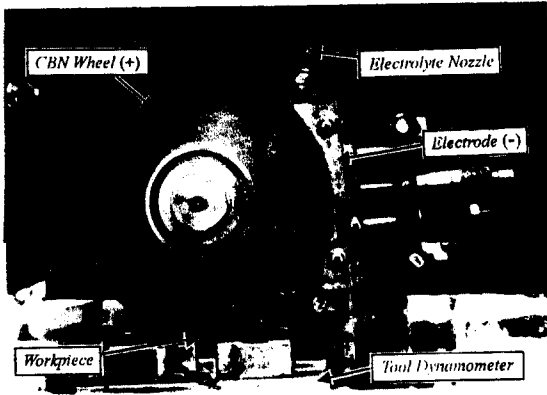


Fig. 4 Experimental setup for grinding with in-process electrolytic dressing

### 3. 최적 연속 전해드레싱 시스템

본 연구에서 금속결합체 스톨의 연속 전해드레싱 최적 유지를 위하여 개발한 시스템은 드레싱 전류 제어를 위한 컴퓨터가 내장되어 있으며 항상 최적 연속전해드레싱을 유지하도록 구성되어 있다.

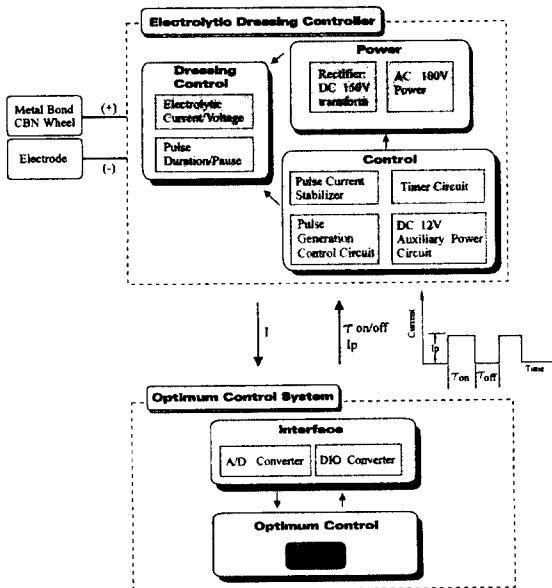


Fig. 5 Control mechanism of dressing current for optimum in-process electrolytic dressing

Fig.5는 최적 연속 전해드레싱 시스템의 구동 메카니즘을 나타낸 것이다. 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 연결하여 드레싱 시스템이 구성되어 진다. 위의 점선부분내 장치는 전해드레싱 조절기의 내부 구성도를 나타낸 것이고, 아래 점선부분의 장치는 최적 연속 전해드레싱 제어를 위한 시스템을 나타낸 것이다. 컴퓨터에 의한 자동조절을 위하여 조절기에서 측정된 전류, 전압값을 디지털 신호로 -5V에서 +5V 까지로 변환한 후 출력하여 컴퓨터에 입력시킴으로써, 컴퓨터에서 최적의 드레싱을 위한 자동조절 신호인 피크전류 및 펄스/휴지폭 조절값을 자동조절기에 디지털 신호로 입력하여 정격전류의 조정이 가능하다.

Fig.6은 최적 전해드레싱을 위한 정격전류 자동조절 컴퓨터 프로그램 흐름도로서, 스톨의 최적 드레싱을 위한 자동조절의 컴퓨터 프로그램의 동작은 초기 피크전류값과

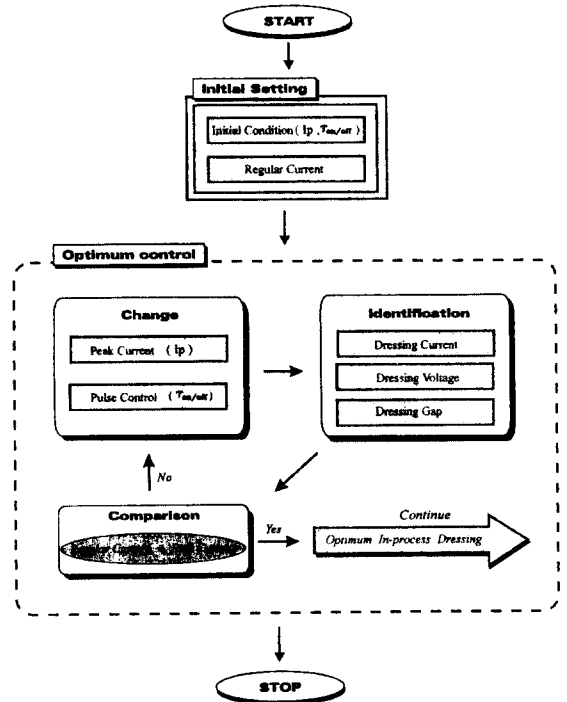


Fig. 6 Flow chart of regular current control for optimum dressing

펄스, 휴지폭을 설정하고, 드레싱시 전류값, 전압값을 컴퓨터 신호입력으로 하여 연속 전해드레싱 상태를 파악한다. 정격 조절 전류값을 설정하여 입력하면, 시스템에서 드레싱시 슷들과 전극사이에서 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 비교 한 후 최적의 전해 드레싱 유지를 위하여, 최적의 정격전류에 따른 피크전류 및 펄스폭, 휴지폭을 자동 변환한다.

#### 4. 실험장치 및 방법

Table 1은 최적 전해드레싱 시스템의 사양을 나타내고 있으며, Table 2는 본 실험에서 사용한 조건을 나타낸 표

Table 1 Specification of Optimum Electrolytic Dressing System

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 ControlFactor	Regular Current
Input/ Output Data Control Mode	A/D Converter, DIO

Table 2 Experimental conditions

Grinding Machine	Surface Grinding Machine
Wheel	CBN12000
Wheel Speed	3400 rpm
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	ST-3501 (Capacitance type) Iwatsu electric Co.
Tool dynamometer	Kistler 3-Component Dynamometer Type. 9257B

이다. 실험에서 사용한 슷들은 주철결합제로 되어있는 입방정질화붕소 (CBN) 슷들이며, 전해드레싱 시스템의 양극단자와 연결 되어있고, 전해드레싱을 위한 전해용 전극

(순동 99%)에 음극단자를 연결 구성하였다. 또한, 간극 센서를 이용하여 인프로세스(in-process)로 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. Table 3은 공작물인 STS304의 화학조성을 나타내고 있다.

Table 3 Chemical composition of STS304 (%)

Materials	Chemical composition (%)
Cr	18.0 ~ 20.0
Ni	8.0 ~ 11.0
Mn	2.0
Si	1.0
C	0.08
P	0.04
S	0.03

#### 5. 실험결과 및 고찰

Fig.7은 STS304를 입도 12000 CBN 슷들로 가공하

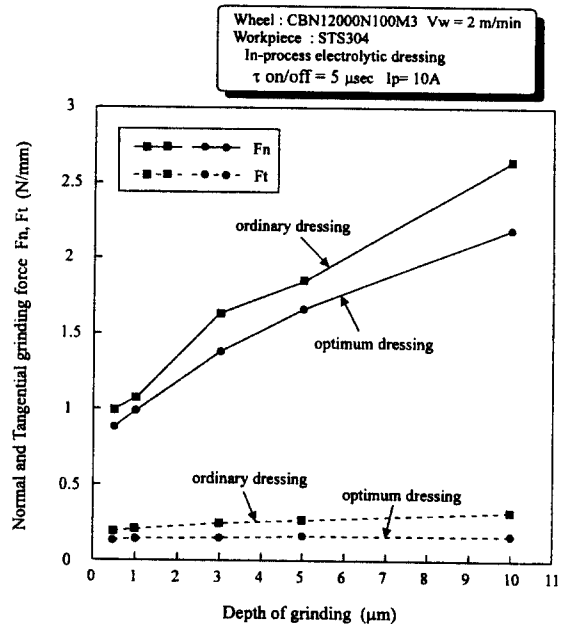


Fig. 7 Relationship between grinding force and depth of grinding

면서, 연삭깊이에 따라 수직 및 수평연삭력을 측정하는 것을 나타낸 것이다. 최적 전해드레싱을 적용한 경우와 일반 전해드레싱을 적용한 경우 2가지를 비교하여 나타낸 것이다. 수직연삭력이 1 N/mm인 경우는 전해드레싱 제어를 한 경우에는 연삭깊이 1 $\mu$ m에서 나타났으며, 제어를 하지 않은 경우는 보다 작은 연삭깊이인 0.5 $\mu$ m를 유지하여야만 가능하다. 연삭깊이의 증가에 따라 제어를 하지 않은 경우가 보다 크게 수직연삭력이 증가됨을 관찰할 수 있다. 최적 전해드레싱을 적용한 경우의 수평연삭력은 일정한 상태를 보이고 있으며, 일반 전해드레싱을 적용한 경우에는 증가되는 경향을 보이고 있다.

Fig.8은 연삭깊이를 1 $\mu$ m로 고정하고 테이블속도를 변화시키면서 수직 및 수평연삭력의 변화를 측정하였다. 최적 드레싱을 적용한 경우에는 테이블속도가 1 m/min에서 3 m/min까지 거의 일정한 수직연삭력을 나타내고 있으며, 테이블속도가 4~5 m/min에서 증가되는 경향을 보이고 있다. 따라서, 최적 전해드레싱을 적용하고 테이블속도 1 m/min에서 3 m/min까지로 유지하는 것이 수직연삭력에 양호한 효과를 보임을 알 수 있다. 최적 전해드레싱을 적용한 경우에는 테이블속도의 증가에 따라 약간 수평연삭력의 차이를 나타내고 있다. 이 현상은 최적 전해

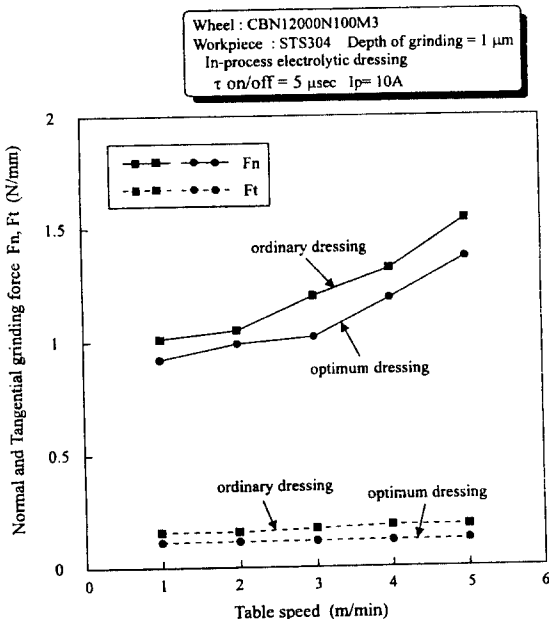


Fig. 8 Relationship between grinding force and speed

드레싱의 적용에 의해서 연삭입자가 마멸되지 않고 항상 새로운 입자에 의해서 공작물을 용이하게 가공하기 때문이다.

Fig.9는 연삭깊이의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸 것으로서 연삭깊이의 감소에 따라 표면거칠기값이 감소됨을 관찰할 수 있으며, 최적 전해드레싱을 적용한 경우에는 연삭깊이를 0.5 $\mu$ m 하였을 경우 표면거칠기값은 Ra 0.02 $\mu$ m 정도의 수준으로 나타냈다. 그러나, 전해 드레싱 전류를 제어하지 않은 일반 전해드레싱의 경우에는 표면거칠기값은 Ra 0.035 $\mu$ m 정도를 나타낸다. 모든 연삭깊이에서 최적 전해드레싱을 적용에 의한 연삭면의 표면거칠기가 양호하게 나타냄을 알 수 있다. 드레싱 성능을 일정하게 유지함에 따라 연삭표면에 마멸된 입자의 영향을 방지하여 공작물의 표면에 나쁜영향을 미치지 않게 된다.

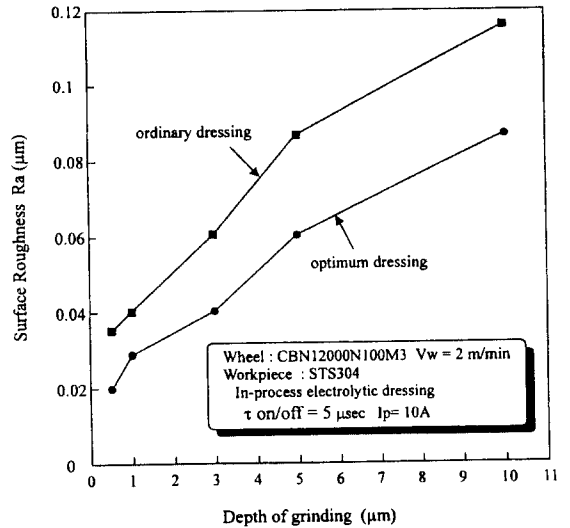


Fig. 9 Relationship between surface roughness and depth of grinding

Fig.10은 연삭깊이를 일정하게 유지하고, 테이블속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 측정하는 것으로서 드레싱전류를 일정하게 유지한 경우에는 테이블속도에 따라 표면거칠기의 상승이 보다 적게 됨을 관찰할 수 있다. 일반 전해드레싱의 경우에는 표면거칠기가 보다 크게 증가되며, 따라서 드레싱전류를 일정하게 유지하는 최적 전해드레싱을 적용하는 것이 표면거칠기에 양호한 현상을 보이게 된다.

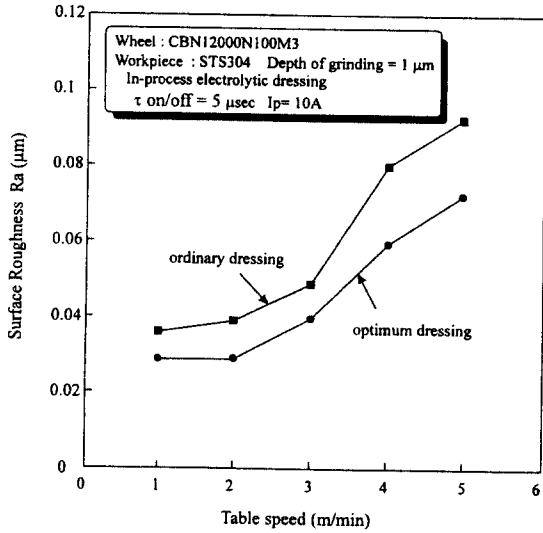
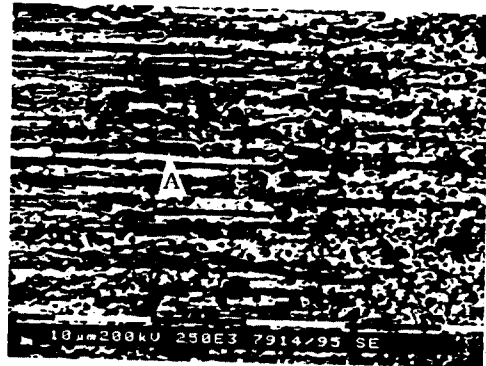


Fig. 10 Relationship between surface roughness and table speed

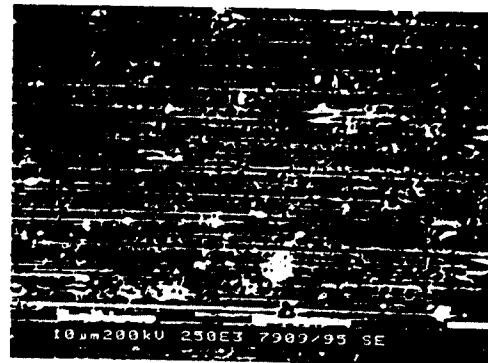
Fig.11은 STS304를 입도 12000 CBN 슛돌로 가공하면서, 연삭깊이를 5 $\mu$ m와 10 $\mu$ m로 고정하고서 연삭가공을 한 면을 전자주사현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)으로 관찰 한 것을 나타내고 있다. 최적 전해드레싱을 적용한 경우와 일반 전해드레싱을 적용한 경우 2가지를 비교하여 나타내고 있으며, 일반 전해드레싱 적용한 경우에는 A와 같은 가공 표면파손이 크게 나타남을 관찰 할 수 있다. 최적 전해드레싱을 적용한 경우에는 가공흔적이 크게 나타나지 않음을 볼 수 있다. 5 $\mu$ m의 연삭깊이를 적용한 경우에는 10  $\mu$ m의 연삭깊이 보다 우수한 표면거칠기 상태를 나타내고 있으며, 연삭깊이를 감소시켜도 최적 전해드레싱의 경우와 일반 전해드레싱 경우에는 가공면에 차이가 나타나고 있다. 드레싱전류의 제어 유무에 따라서 STS304 가공시 가공표면의 정도차이가 나타나게 된다. 따라서, 드레싱 전류를 제어한 최적 전해드레싱을 적용함으로써 드레싱효과의 저하를 방지하고 일정하게 유지하여서, STS304 가공표면에 양호한 현상을 나타내게 된다.



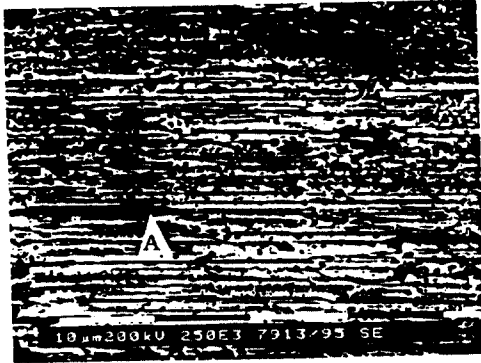
optimum dressing  
[Ra 0.09  $\mu$ m]



ordinary dressing  
[Ra 0.12  $\mu$ m]  
(a) depth of grinding : 10 $\mu$ m



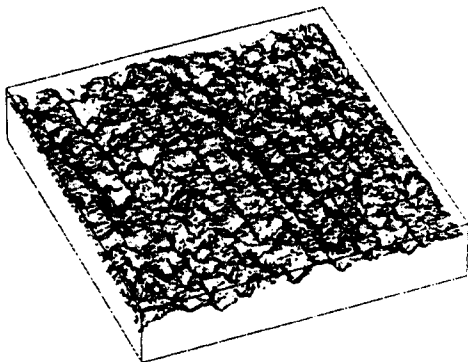
optimum dressing  
[Ra 0.06  $\mu$ m]



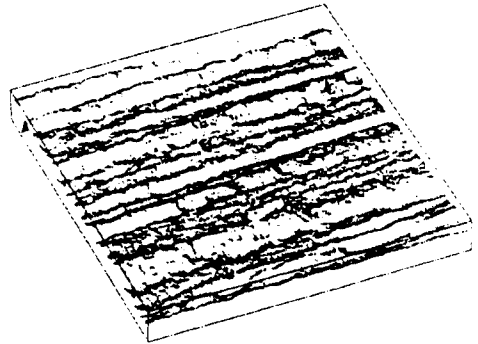
ordinary dressing  
 (Ra 0.08  $\mu\text{m}$ )  
 (b) depth of grinding : 5 $\mu\text{m}$   
 A : surface breakage

Fig. 11 SEM photograph of STS304 according to depth of grinding;  
 wheel : CBN1200N100M3 Workpiece : STS304

Fig.12는 백색광 (White Light)의 간섭무늬를 이용한 간섭계 (Phase Shift Measuring Equipment)를 적용하여 STS304의 가공 표면형상을 관찰 한 것으로서, 관찰한 범위는 256 x 256 pixel (1 pixel = 0.48  $\mu\text{m}$ ) 이며, Z축으로 3000배 확대하여 나타낸 것이다. (a)는 연삭을 수행한 가공표면을 관찰한 것으로서, 공작물을 연삭한 조건은 CBN12000숫돌을 사용하였으며, 연삭깊이는



Ra = 25nm  
 (a) ordinary electrolytic dressing



Ra = 14nm  
 (b) optimum electrolytic dressing  
 Fig. 12 View of surface profile of STS304 by Phase Shift Measuring Equipment ;  
 Wheel : CBN12000N100M3 Workpiece : STS304  
 Vw = 1.0 m/min Depth of grinding : 0.3  $\mu\text{m}$

0.3 $\mu\text{m}$ 로 하였으며, 드레싱은 전해드레싱을 적용하였으나 전해드레싱의 전류 제어를 하지 않았다. 이 가공조건에서 생성된 표면거칠기는 Ra 25 nm이고, 최적 전해드레싱을 적용한 표면인 (b)는 Ra 14 nm로 2배 정도의 표면 향상을 관찰 할 수 있었다. 따라서, STS304 표면의 양호한 가공면 생성을 위해서는 전해드레싱을 제어하는 최적 전해드레싱을 적용하는 것이 보다 양호한 현상을 나타낸다고 할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존의 전해드레싱 시스템은 드레싱 상태의 변화에 따라 제어가 불가능하여서 불안정 드레싱 전류의 영향에 의해서, 스테인레스 강 가공에 나쁜 영향을 미쳤으며, 최적 제어 프로그램에 의한 드레싱 전류 제어방식인 최적 연속 전해드레싱 시스템을 적용하여 항상 일정한 드레싱 성능을 유지 함으로서 스테인레스 강 (STS 304)의 안정된 연삭이 가능하였다.
2. 난삭재의 연삭시 최적 연속 전해드레싱에 의한 연삭기구 구성으로 양호한 드레싱 효과를 유지하여 스테인레스 강의 가공 연삭력 감소 효과를 보였다.
3. 최적 전해드레싱을 적용함으로써 일반적인 전해드레싱



보다 표면항상에 양호한 영향을 미쳤으며, 난삭재인 스테인레스 강의 경면연삭을 달성하였다.

### 참 고 문 헌

1. T.Matsuo and K.Okamura, "Wear Characteristic of General and Superhard Abrasive Grains against Various Hard Materials", Annals of the CIRP, Vol.30, pp.233-236, 1981
2. R. Komanduri and W.R.Reed, "A New Technique of Dressing and Conditioning Resin Bonded Superabrasive Grinding Wheel", Annals of the CIRP, Vol.29, pp.239-243, 1980
3. J.D.Kim, E.S.Lee and C.Y.Lee, "Crack generation and the effect of in-process electro-discharge dressing in grinding MgO", Int. Journal of Mechanical Sciences, Vol.37, No.6, pp.569-583, 1995
4. 김정두, 이은상, "연속 방전드레싱에 의한 경취재료의 경면연삭에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제3호, pp.785~792, 1994
5. H.Ohmori, "Electrolytic In-Process Dressing Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining", Int. JSPE, Vol.26, No.4, pp.273-278, 1992
6. 김정두, 이연종, "연속 전해드레싱의 연삭조건 변화에 의한 경면생성 및 시뮬레이션에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제17권 제12호, pp.2962-2969, 1993
7. 김정두, 이은상, "최적 연속 전해드레싱 시스템의 개발과 제어특성", 대한기계학회논문집, 제19권, 제3호, pp.680-687, 1995
8. E.S.Lee and J.D.Kim, "A Study on the Analysis of Grinding Mechanism and Development of Dressing System by using Optimum In-process Electrolytic Dressing", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.37, No.12, pp.1673-1689, 1997