한국공작기계기술학회 '95년도 추계학술대회 논문집 pp 76~81

최적 전해드레싱을 적용한 단결정 산화마그네슘(MgO)의 경면가공에 관한 연구

A Study on the Mirror-like Machining of MgO Single Crystal with Optimum In-process Electrolytic Dressing System

김 정 두 · 이 은 상* (한국과학기술원)
305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 기계공학과 정밀가공 및 공작기계 연구실

Jeong-Du Kim and Eun-Sang Lee* (KAIST)
Lab. for Precision Machining & Machine Tools, Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Taejon, 305-701

Abstract

MgO single crystal is widely used as a the material of high temperature resistance, but is difficult to grind because of brittleness and crack generation. Therefore, superabrasive diamond wheel is required for mirror -like grinding of this material.

This study describes a newly proposed optimum in-process electrolytic dressing system for carrying out effective dressing of superabrasive diamond wheel. Using this system the grinding surface of MgO single crystal was improved, the grinding force was very low and crack was removed. In conclusion, this system is good to obtain the efficient grinding and mirror-like grinding without crack of MgO single crystal.

1. 서 론

최근 경취재료중 단결정 산화 마그네슘 (MgO single crystal)은 내열성이 매우 뛰어나 고온재료의 용도로 많이 사용되고 있으며, 고온 초전도용, 인공격자박판의 기판, 각종광학 및 레이저 부품등에 사용되어지나, 재료의 특성상 벽개성이 있으며 가공시 크랙이 생기기 쉽다.[1] 단결정 산화 마그네슘를 경면으로 가공하는 경우 종전에는 폴리싱의 가공공정을 사용하여 왔으나, 생산성 향상, 가공환경 개선등을 목적으로 폴리싱 공정을 경면 연삭가공으로 대체시키는 방법이 연구되고 있다.[2] 또한, 최근에 들어서는 초미립자(superabrasive) 다이아몬드와 입방결정 질화붕소(CBN)숫돌을 통한 종래의 지석으로는 연삭이 곤란한 페라이트, 광학유리등과 같은 경취재료의 연삭등이 가능할 수 있었으나 경취재료의 경면연삭에 적용 가능한 숫돌의 입도는 #1000이상의 초미립자 숫돌이어야 가능하다. 그러나, #1000이상의 초미립자 다이아몬드 숫돌을 사용하여 연삭할 경우 눈메움(loading) 또는 연삭날 무디어짐(glazing)현상에 의한 드레싱에 상당한 어려움이 있다.[3] 연속 드레싱으로 금속결합제 숫돌 주위에 전극을 설치하고, 숫돌회전과 동시에 전해액을 그 사이에 통과하게 하여 펄스전원을 인가함으로서 전기분해 작용[4]에 의한 드레싱을 하는 인프로세스 전해드레싱 기법이 근년에 발표되어 양호한 성능을 나타내고 있으나[5], 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 드레싱 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 시스템[6]을 적용하여 단결정 산화 마그네슘(MgO single crystal)을 연삭가공을 수행하였다. 단결정 산화 마그네슘은 재료의 특성상 연삭시 크랙이 쉽게 발생하며, 벽개성이 크랙의 전파가 용이하여 연삭가공이 불가능한 것으로 알려져 왔으나 최적 전해드레싱 시스템, 주철결합제의 초미립자 다이아몬드 지석과 압전소자를 이용한 미소연삭깊이조절장치를 이용하여 경면연삭을 실현하였다.

2. 최적 연속 전해드레싱 시스템의 개발

2.1 전해드레싱의 이론

연속 전해드레싱은 전기분해작용에 의해서, 지석의 마멸된 연삭입자가 제거되고 새로운 입자가 재생되어, 마멸되지 않은 연식입자에 의해서 연삭을 가능케 하여 양호한 가공표면을 기대할 수 있다. 연삭 지석의 결합제는 주철결합제로 구성되어 있어서 통전이 가능하며, 전해드레싱 전원을 양극으로 공급하고, 전극(electrode)은 음극과 연결하고 두전극사이에 전해액을 공급하면 전극의 작은 틈사이에서 전해작용이 일어나게 되어 연삭지석의 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_3산화물로 변해 지석 표면에 융착된다.

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

양극에서 Fe가 전해용출하고, 음극에서는 수소가스가 발생된다. Fig.1은 연속 전해드레싱의 원리를 나타낸 그림으로서, 점선을 일반적인 전해드레싱의 원리[2]를 나타내고 있으며, 실선은 전해드레싱 제어에 의한 최적 전해드레싱 원리를 나타내고 있다. 전해드레싱 제어를 한 경우와 제어를 하지 않은 경우가 1 에서 3 단계까지의 상태는 거의 같

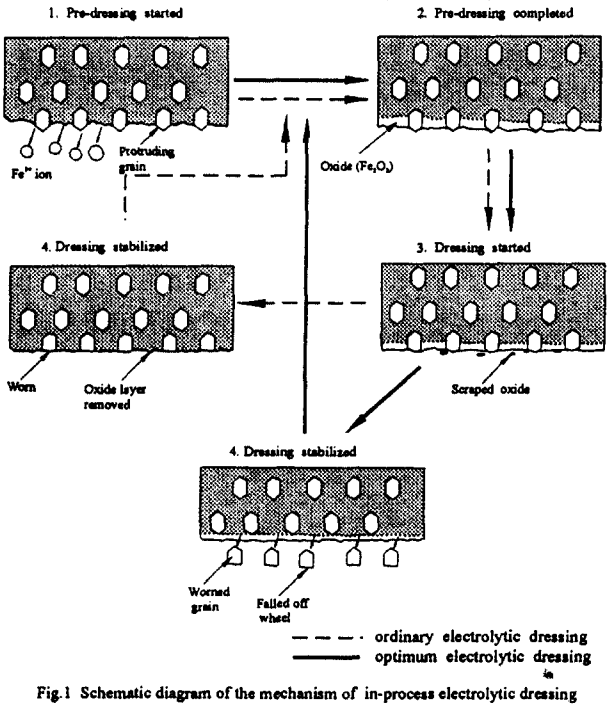
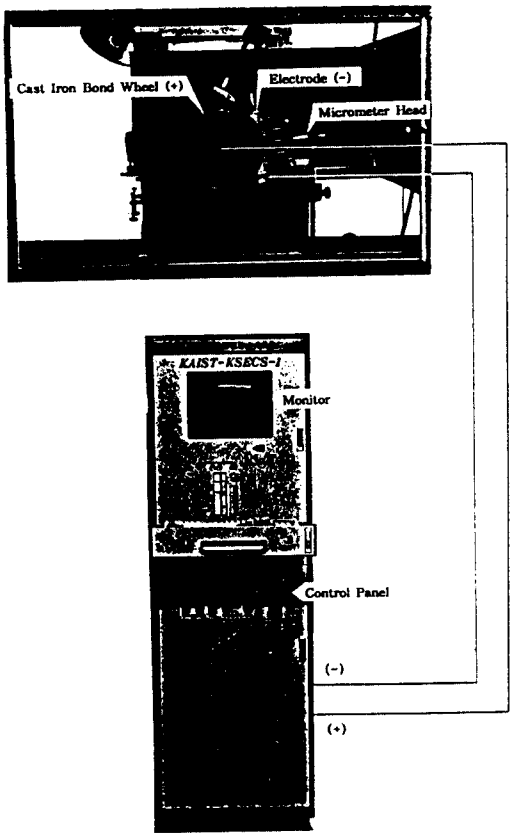


Fig.1 Schematic diagram of the mechanism of in-process electrolytic dressing



Optimum Electrolytic Dressing Controller

Fig.2 Optimum in-process electrolytic dressing system

으나 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 지석의 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 돌출함으로서 연삭표면에 나쁜영향을 미치지 않아서, 양호한 가공표면을 기대할 수 있다. 이 원인은 지속적인 일정한 전해작용에 의한 지석결합제의 가공되어 지석입자의 지지력의 약화되고, 입자의 마멸에 따른 과도한 연삭력등에 의해서 마멸입자가 쉽게 제거되기 때문이다.

연속적인 전해드레싱에서 I (A)의 전류가 t초간 흐름으로서 양극인 지석의 메탈본드가 용출되는 량을 w라고 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 ρ라고 하면, 전해드레싱에 의한 주철결합제의 이론적인 체적제거량 (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 ρ)

실제의 체적제거량(V)은 전류효율(η)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 체적가공속도(v)는 다음과 같이 표현된다.

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

전해드레싱시 체적가공속도는 재료의 원자량, 전해용출시 전기량, 양전극사이의 전류값에 영향을 받음을 알 수 있다. 재료 즉 지석결합제에 따른 비가공체적이 일정하다고 하였을 경우 전류값의 변화에 가공속도가 주로 영향을 받게 된다. 따라서, 양전극사이에 전류를 변화시키는 인자를 조절

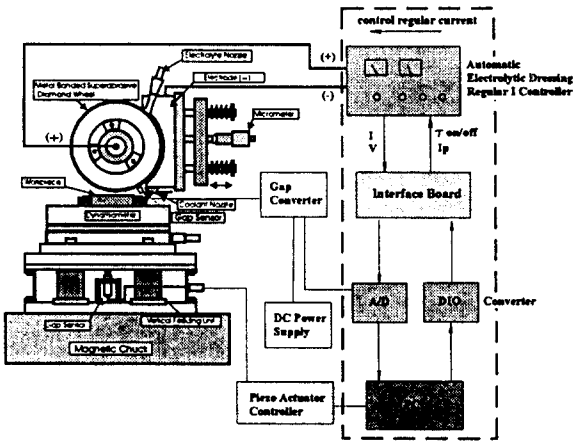


Fig.3 Optimum control mechanism of regular current for in-process electrolytic dressing and micro positioning control system

함으로서 가공속도를 조절할 수 있다.

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

$$\upsilon_l = dl/dt = (1/S)(dV/dt) = \eta V_s i \quad (7)$$

S : 가공면적　l : 가공깊이　i : 전류밀도 (I/S)

결합제의 깊이가공속도가 전류밀도에 관계됨으로서 전류의 변화에 큰 영향을 받게 되며, 연속 드레싱에 의한 전류의 감소등에 의해서 전해가공의 성능의 감소가 된다. 따라서, 간극사이의 전류를 증가시킴으로서 일정한 가공속도를 유지할 수 있어서 최적의 전해드레싱을 완성 할 수 있다.

2.2 최적 연속 전해드레싱 시스템의 개발

본 연구에서 금속결합제 지석의 연속 전해드레싱 최적 유지를 위하여 개발한 시스템은 Fig.2에 나타나 있으며, 정격전류 제어를 위한 컴퓨터가 내장되어 있으며 항상 최적 연속 전해드레싱을 유지하도록 구성되어 있다. Fig.3은 최적 연속 전해드레싱 시스템의 구성을 나타낸 것으로 금속결합제 다이아몬드 숫돌을 전원장치의 양극과 연결하고, 숫돌 원주의 1/4정도에 해당하는 전극(동99%)에 자동조절기의 음극과 연결하며, 간극의 거리를 측정하기 위하여 비접촉 간극 센서(Gap Sensor)를 장착하고, 간극센서 변환기를 통하여 신호가 컴퓨터에 전달하게 된다. 정격전류 자동조절기에 양극, 음극을 연결하며, 간극의 전류 측정단자와 전해용 전원 펄스폭, 휴지폭, 피크전류 조절단자를 연결기판에 연결하고, 연결기판은 아날로그/디지탈 (A/D) 및 디지탈 입출력(DIO,12bit) 변환기와 연결하며, 변환기는 다시 데이타 입출력에 의한 자동조절을 위해서 컴퓨터와 연결함으로서 최적 드레싱 시스템이 구성되어 진다. 점선부분내 장치를 시스템화 구성한 것이 최적 연속 전해드레싱 시스

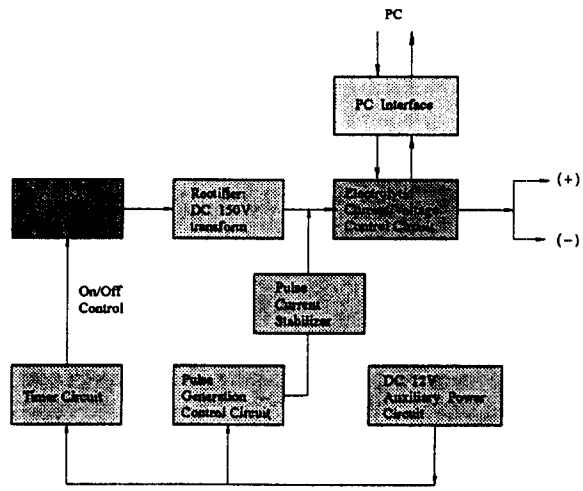


Fig.4 Electrical schematic of automatic electrolytic dressing regular current controller

템이다. 또한, 초정밀 경면연삭을 위하여 압전구동 미소 연삭깊이 조절장치를 공구동력계 아래에 설치하였다.

Fig.4는 전해드레싱을 위한 정격전류 조절기의 내부 구성도로서, 전원 공급은 교류 100V로 하며, 정류기를 통하여 직류 150V로 변환되어, 펄스 발생회로와 펄스파 안정기를 통하여 전해 드레싱에 적합한 펄스 전원을 형성하게 되며, 양극단자를 숫돌에 연결하고, 음극단자를 전극에 연결하여 숫돌과 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.

Table.1은 최적 전해드레싱 시스템의 사양을 나타내고 있다. 피크전류 (Ip)는 0A에서 40A 까지 변경이 가능하며, 펄스폭 과 휴지폭 은 0μsec 에서 999μsec까지 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 디지탈 신호로 -5V에서 +5V 까지로 변환한 후 출력하여 컴퓨터에 입력시킴으로써, 컴퓨터에서 최적의 드레싱을 위한 자동조절 신호인 피크전류 및 펄스/휴지폭 조절값을 자동조절기에 디지탈 신호로 입력하여 정격전류의 조정이 가능하다. 그러므로, 간극증가에 따른 전해 드레싱 성능 저하를 방지하게 된다. Fig.5는 최적 전해드레싱을 위한 정격전류 자동조절 컴퓨터 프로그램 흐름도로서, 숫돌의 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, 시스

Table.1 Specification of KAIST-KSECS-1

Peak Current	0 ~ 40 A
Pulse Duration / Pause	τ on/off = 0 ~ 999 μ sec
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

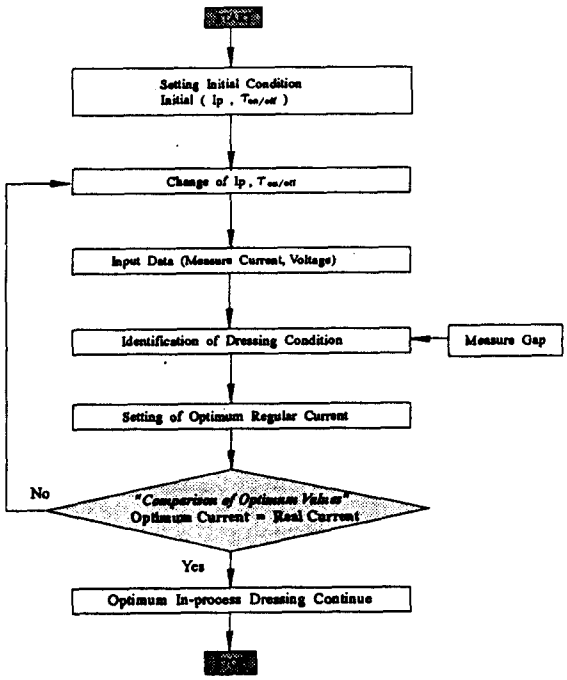
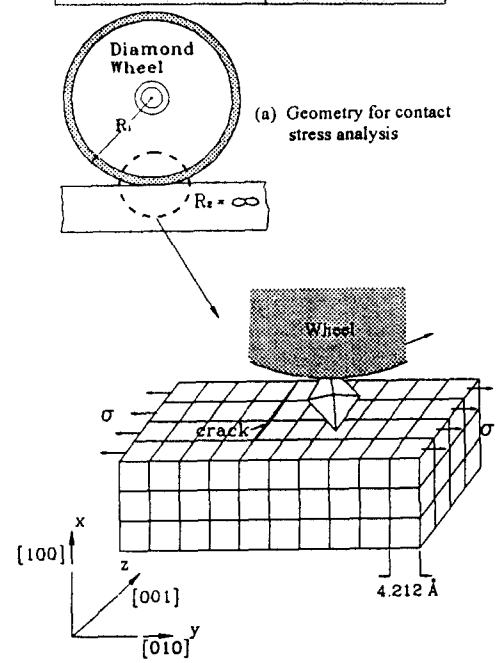


Fig.5 Flow chart of optimum control of regular current for optimum dressing

Table.2 Chemical composition (WT%)

MgO	99.14
CaO	0.4
SiO_2	0.2
Al_2O_3	0.06
Fe_2O_3	0.1
B_2O_3(ppm)	120



(b) Model of MgO crack generation

Fig.6 Surface grinding model of MgO single crystal for analysis of crack

템에서 드레싱시 숫돌과 전극사이에서 변화되는 드레싱전류를 측정하여 아날로그/디지탈 변환기를 통하여 컴퓨터에 신호를 주고, 그 값을 비교하여 최적 정격전류가 되도록 디지탈 입출력기를 통하여 전해드레싱 시스템의 입력값을 계속하여서 변화시킨다. 즉, 실제의 측정값과 비교한후 최적의 전해 드레싱 유지를 위하여, 최적의 정격전류에 따른 피크전류 및 펄스폭, 휴지폭을 자동 변환한다. 드레싱 전류값을 효과적으로 변화할 수 있는 피크전류값이 주로 조절되었으며, 정격전류의 일정한 값이 5% 이내 수준을 유지하면 드레싱 성능에 거의 영향을 미치지 않아서 정격전류의 변동을 5%수준에서 조절하였다. 측정된 정격전류에서 5% 이상 오차가 발생할 경우 다시 자동조절함으로서 금속결합제 지석의 최적 인프로세스 전해 드레싱이 되게 하였다.

3. 실험장치 및 방법

최근 경취재료중 단결정 산화 마그네슘(MgO single crystal)은 내열성이 매우 뛰어나 고온재료(융점 2800°c)의 용도로 많이 사용되며, 고온 초전도용, 인공격자박판의 기판, 각종광학 및 레이저 부품등에 사용되어지나, 재료의 특성상 벽개성이 있으며 크랙이 생기기 쉽다. 실험에서 사용한 재료는 단결정 산화 마그네슘으로 결정구조는 NaCl 형이며, (100), (010), (001)면으로 벽개성을 갖고 있으며[7], 재료의 경도는 900 (Vikers) 이고, 화학성분은 Table.2과 같다. 단결정 산화 마그네슘 시편의 방향성을 측정하기 위해서, X선에 의해서 회절상태를 측정하는 디플렉토미터 (diffractometer)를 사용하였으며, 파장(λ=1.5418)은 $\lambda = 2d \sin\theta$ 이다. 측정한 시편의 면간거리(d)와 회절각(2θ)은 각각 2.097과 43.1에서 최대치를 갖음으로서 단결정 산화 마그네슘의 {100}방향을 갖는다.[8] 실험에서 사용한 숫돌은 주철결합제로 되어있는 초미립자 다이아몬드 숫돌 (superabrasive diamond wheel) 이며, 전해드레싱 시스템

Table.3 Experimental conditions

Grinding Machine	Surface Grinding Machine
Wheel	D4000, D15000
Wheel Speed	1700 rpm, 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 τ on/off=1 ~ 10 μ sec
Electrode	Copper (1/4 of Wheel size)
Device of Depth of Grinding	Micro Positioning Grinding Table using Piezoelectric Actuator (Resolution : 0.1 μ m)
Gap Sensor	Model AEC 5505 Photonics Co. Resolution : 0.1 μ m
Tool Dynamometer	Kistler 3-Component Dynamometer Type. 9257B

의 양극단자와 연결되어 있고, 전해용 전극 (동 99%)에 음극단자를 연결 구성 하였으며, 전극에 장착된 마이크로미터 헤드를 사용하여서 초기간극을 조절하였다. 숫돌과 전극사이 간극은 초기에 (0.1 mm)로 고정하고서, 연속 전해드레싱을 이용한 연삭가공을 수행한다. 공작물의 연삭전에 숫돌의 진원을 얻기 위해서 GC180 지석을 이용하여 트루잉을 수행하였다. 전해액은 수용성 3종 (50:1로 희석)을 사용하였다. 정격 드레싱전류의 데이타는 시스템의 전류측정기판을 통하여 아날로그/디지탈 변환기를 거쳐 0.73초동안 100개를 받아서 평균을 취하는 방식을 사용하였다. 또한 연속 전해드레싱 및 연삭깊이의 영향을 고찰하기 위해서 연삭가공후 공작물의 표면을 전자주사현미경(SEM)으로 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 단결정 산화마그네슘의 크랙생성

단결정 산화 마그네슘은 재료의 특성상 가공시 크랙이 쉽게 발생되며, Fig.6은 크랙현상을 분석하기 위한 평면 연삭 모델을 나타낸 그림으로서 (a)는 다이아몬드 숫돌로 산화 마그네슘을 연삭시 발생되는 접촉응력을 분석하기 위한

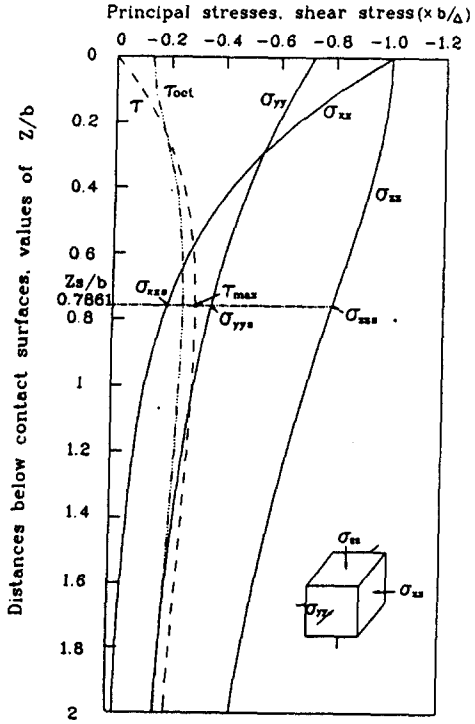


Fig.7 Relation of principal stresses and maximum shearing stress in distance below MgO surface

형상도로서, 숫돌을 원통 형상으로 가정하여 반경은 R_1로 설정하고, 산화 마그네슘 표면은 직선이므로 반경(R_2)이 무한대가 된다. 숫돌이 산화 마그네슘 표면에 작용하는 주응력[9] (σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}) 은 다음과 같다.

$$\sigma_{xx}=-\left\{\frac{(\sqrt{1+(z/b)^2}-z/b)^2}{\sqrt{1+(z/b)^2}}\right\}\frac{b}{\triangle} \quad (8)$$

$$\sigma_{yy}=-2\nu\left\{(\sqrt{1+(\frac{z}{b})^2}-\frac{z}{b}\right\}\frac{b}{\triangle} \quad (9)$$

$$\sigma_{zz}=-\left\{\frac{1}{\sqrt{1+(\frac{z}{b})^2}}\right\}\frac{b}{\triangle} \quad (10)$$

숫돌이 접촉면적의 단위길이당 w의 하중이 산화 마그네슘 표면에 가해 진다면 b는 다음과 같이 표현된다.

$$b=\sqrt{2w\triangle/\pi} \quad (11)$$

여기서 △는 다음과 같다.

$$\triangle=\frac{1}{(1/2R_1)+(1/2R_2)}\left\{\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right\} \quad (12)$$

연삭력에 의한 탄성 변형력과 연삭깊이(d)를 고려하여, 숫돌과 공작물의 접촉길이[10]를 표현하면 다음과 같다.

$$lc=[\ 16\ F_n\ /\ B\ (K_1+K_2)\ R_1\ +\ 2d\ R_1]^{0.5} \quad (13)$$

$K_1 = (1-\nu_1^2)/(\pi E_1)$ $K_2 = (1-\nu_2^2)/(\pi E_2)$

여기서 F_n은 연삭력이고, B(=2b)는 연삭숫돌의 폭을 나타내며, (11)와 (13)식에서 미소한 연삭깊이를 고려하며, 다음과 같은 식으로 표현 된다.

$$b=[\ \frac{8\ \triangle}{\pi}\ ]^{1/3}\ F_n^{1/3}=SF_n^{1/3} \quad (14)$$

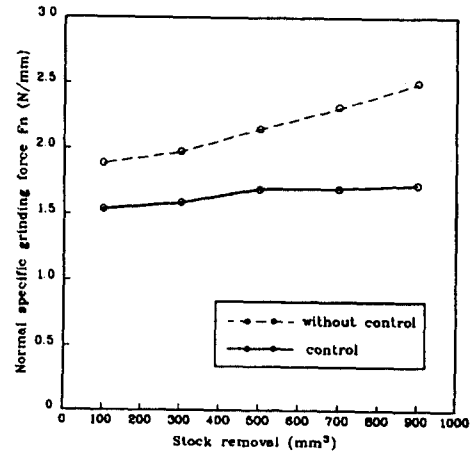
최대전단응력(maximum shear stress)은 최대와 최소 주응력차의 1/2이고, 이것은 최대주응력과 최소주응력이 작용하는 면과 45° 경사진 면에서 발생하며, 최대전단응력은 인장시험시 항복이 일어날 때 갖는 전단응력으로 다음과 같이 표시되며

$$\tau_{max}=1/2(\sigma_{max}-\sigma_{min}) \quad (15)$$

최초 크랙발생은 최대전단응력이 작용되는 점에서 발생되어질 가능성이 크다고 사료된다. 또한, 미세스의 항복조건식 (Mises yield criterion)에서 팔면체전단응력 (octahedral shear stress)을 표시하면 다음과 같다.

$$\tau_{oct}=\frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2+(\sigma_{yy}-\sigma_{zz})^2+(\sigma_{zz}-\sigma_{xx})^2} \quad (16)$$

Fig.7은 가정한 모델에서 연삭숫돌의 작용에 의한 z축에서 산화 마그네슘 표면 아래의 거리(z/b)에 따른 주응력과 전단응력값을 계산하여 나타낸 것으로, σ_{zz} 곡선은 공작물 밑면으로 갈수록 완만하게 감소되며, σ_{zz}곡선은 공작물 바로 밑면에서 급격한 감소를 나타냄으로서 그림에 표시된 표면 아래 z_s/b = 0.7861에서 최대전단응력 (τ_{max} = 1/2($\sigma_{zz}-\sigma_{xx}$) = 0.300 b/△)이 발생하게 된다. 따라서, 최대전단응력이 공작물의 바로 밑면에 생기며, 이에 따라 내부크랙이



Wheel : D4000N100M3 Wheel Speed : 1700rpm
Vw = 5 m/min Workpiece : MgO single crystal
Dressing Condition:
In-process Electrolytic Dressing
Ton/off = 5μsec Ip= 10A

Fig.8 Normal specific grinding force according to stock removal after grinding for 2 hours (depth of grinding : 10 μm)

단결정 산화 마그네슘 표면 아래쪽에 먼저 발생되며 이 크랙이 전파되어 표면에 이르러 표면크랙이 발생된다. 또한, 최대의 팔면체전단응력도 표면 아래쪽에서 생성되어 내부 크랙 생성이 먼저 이루어짐을 알 수 있으며, b는 연삭력의 함수이므로 적은 연삭력에 의해서 주응력 및 전단응력의 크기를 적게 되므로서 크랙 생성의 감소에 영향을 미치게 된다. Fig.6(b)는 단결정 산화 마그네슘의 크랙 생성 모델을 나타낸 것으로, 다이아몬드 입자가 단결정으로 구성되어 있는 산화 마그네슘 표면을 연삭가공시 그림에서 처럼 [010] 방향으로 인장력을 받게 된다. 단결정 산화 마그네슘은 압축강도가 6300 Kg/cm^2 이고, 인장강도가 120 Kg/cm^2 으로서 인장력에 의해서 매우 약하여 그림에서와 같이 크랙이 생성된다고 하겠다. 또한, {100}면에 벽개성이 존재함으로서 벽개면을 따라 크랙이 전파된다. 그러므로, 전단응력이 최대가 되는 산화 마그네슘 내부에서 크랙이 최초로 발생되고, 인장강도의 취약과 벽개성에 의해서 크랙전파가 이루어 진다고 하겠다.

4.2 최적 연속 전해드레싱 시스템의 적용 실험

Fig.8은 연삭깊이를 10μm로 고정하고 연삭제거량 증가에 따른 연삭력 변화 추이를 측정하여 나타낸 것으로서, 드레싱 전류를 제어한 것과 제어하지 않은 것과 비교하였다. 드레싱 전류를 제어하지 않은 것은 제어한 연삭력 값보다 크게 나타났으며, 연삭제거량의 증가됨에 따라 제어하지 않은 것은 약간의 연삭력 증가 추세를 나타내고 있다. 그러나, 드레싱 전류를 제어한 경우에는 연삭제거량 증가에 따른 연삭력은 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이 현상은 누적 연삭량이 증가할수록 드레싱 전류를 제어하지 않을 경우에는 전해 드레싱 성능의 저하에 의해서 단결정 산화 마그네슘(MgO)의 연삭력에 나쁜영향을 미치게 됨을 알 수 있다. Fig.9는 연삭깊이를 20μm로 고정하고 다이아몬드 숫돌이 단결정 산화마그네슘의 표면을 지나간 횟수에 따른 연삭력을 측정한 것으로서, 드레싱 전류값을 제어한 경우와 제어하지 않은 경우와 비교하여 나타내었다. 지나간 횟수의 증가에 따라 연삭력의 값이 감소됨을 볼 수 있으며, 드레싱 전류를 제어하지 않은 경우에는 5번째 가공시 연삭력이 제어한 경우의 3번째 가공 연삭력과 같게 나타난다. 따라서, 산화마그네슘 가공시 드레싱전류를 제어하는 것이 연삭가공 횟수에 따른 연삭력에 양호한 영향을 미침을 알 수 있다. Fig.10은 단결정 산화 마그네슘을 입도 D4000의 지석으로 가공하면서, 연삭깊이에 따라 수평 비연삭력 (tangential specific grinding force)을 측정한 것을 나타낸 것이다. 약 2시간정도 전해드레싱에 의한 연삭을 수행한 후 피크전류값을 제어한 경우와 제어하지 않은 경우를 나타낸 것으로서 피크전류값을 제어한 것이 수평 비연삭력이 적게 작용됨을 볼 수 있다. 이는 드레싱 시간 경과 후 드레싱효과의 저하에 의해서 나타나는 현상이라고 할 수 있다. Fig.11은 단결정 산화 마그네슘을 입도 D4000의 지석으로 가공하면서, 연삭깊이에 따라 수직 비연삭력 (normal specific grinding force)을 측정한 것으로 드레싱 전류를 제어한 것이 모든 연삭깊이에서 적게 나타남을 볼 수 있다. 이는 드레싱 시간의 경과에 따라 드레싱 성능이

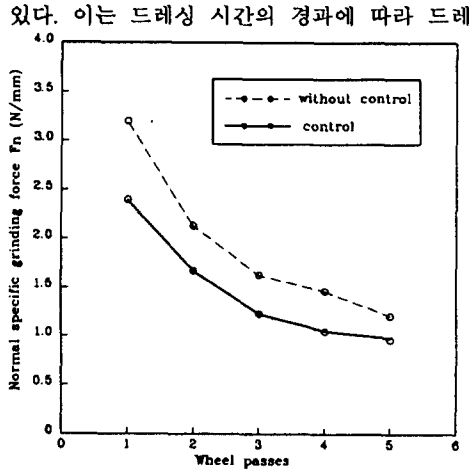
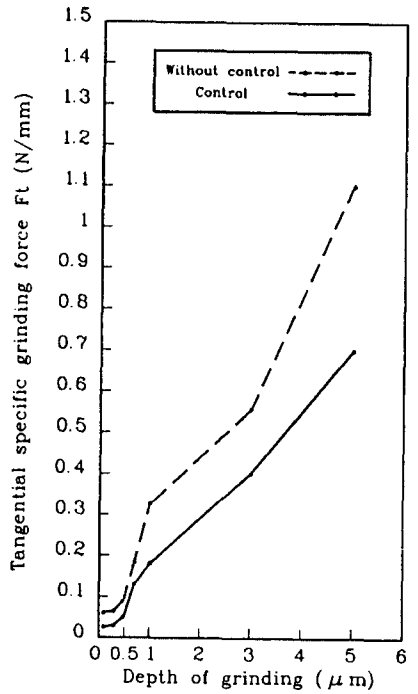


Fig.9 Normal specific grinding force according to wheel passes after grinding for 2 hours (depth of grinding : 20 μm)



Wheel : D4000N100M3 Wheel Speed : 1700rpm
Vw = 5 m/min Workpiece : MgO single crystal
Dressing Condition:
In-process Electrolytic Dressing
Ton/off = 5μsec Ip= 10A

Fig.10 The relationship between tangential specific grinding force and depth of grinding after grinding for 2 hours

감소되는 현상을 나타낸 것으로 산화 마그네슘(MgO) 가공시 크랙생성을 유발하고, 표면생성에 나쁜 영향을 미치게 된다. Fig.12는 연삭깊이에 따른 크랙생성을 나타낸 것이다. 연삭력의 변화에 따라 산화마그네슘(MgO)의 표면에 크랙의 영향을 주게 되며, 연삭깊이가 1μm인 경우 드레싱 전류를 제어한 경우에는 전자주사현미경 관찰시 표면크랙이 전혀 나타나지 않음을 볼 수 있으며, 드레싱 전류를 제어하지 않은 경우에는 표면크랙의 발생을 볼 수 있다. 이는 드레싱시간 경과에 따라 드레싱효과의 감소로 연삭력의 증가에 의한 현상이다. 그러나, 드레싱전류를 제어한 경우에도 1μm 연삭깊이에서는 내부크랙이 존재하였다. 연삭깊이를 0.4μm로 낮춘 경우에는 드레싱 전류를 제어한 경우에

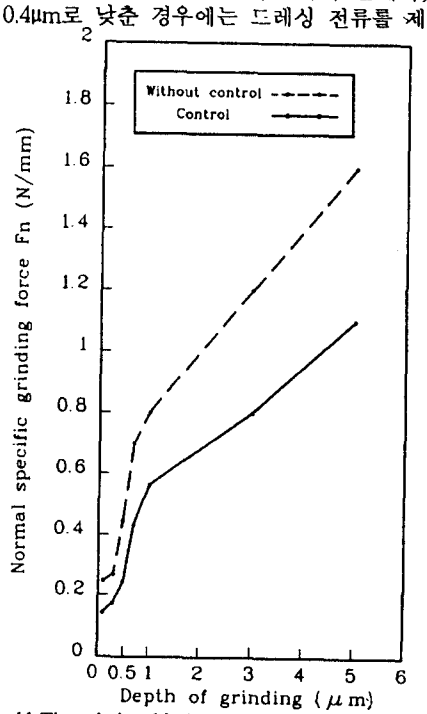


Fig.11 The relationship between normal specific grinding force and depth of grinding after grinding for 2 hours

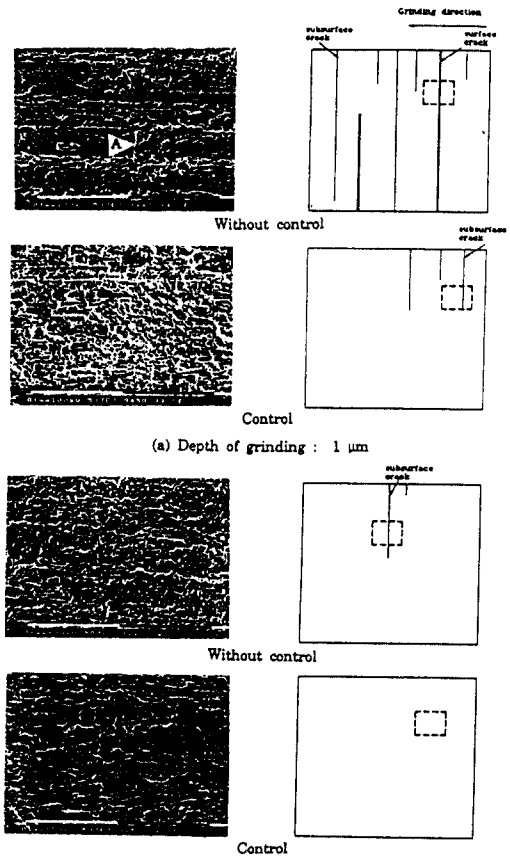


Fig.12 Schematic of surface and subsurface crack according to optimum dressing control

는 내부 및 표면 크랙이 전혀 나타나지 않았으며, 제어를 하지 않은 경우에도 표면크랙 현상은 나타나지 않았으나 미세한 내부크랙이 발생하였다. Fig.13은 미소한 연삭깊이(0.3μm)로 산화 마그네슘(MgO)의 방향에 따른 각면을 연삭후 표면을 전자주사현미경으로 관찰 한 것을 나타낸 것으로, (100) (010) (001) 각 모든면에서 내부 및 표면크랙등이 전혀 없음을 관찰 할 수 있었다. 따라서, 전해드레싱 전류를 제어하고 임계연삭깊이(0.4μm)이하에서 연삭하는 것이 크랙생성을 방지하는데 양호한 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서, 드레싱 전류를 제어하면서 산화 마그네슘을 가공하는 것이 수평 수직 연삭력, 표면생성, 크랙생성억제에 좋은 효과를 나타낸다고 할 수 있다. Fig.14는 D15000 입자의 다이아몬드 지석을 이용하여 미소 연삭깊이 0.3μm에서 연삭을 수행한 면을 전자주사 현미경으로 관찰한 것으로 크랙이 전혀 관찰되지 않고, 연삭가공 자국도 없는 경면을 생성함을 관찰 할 수 있었다.

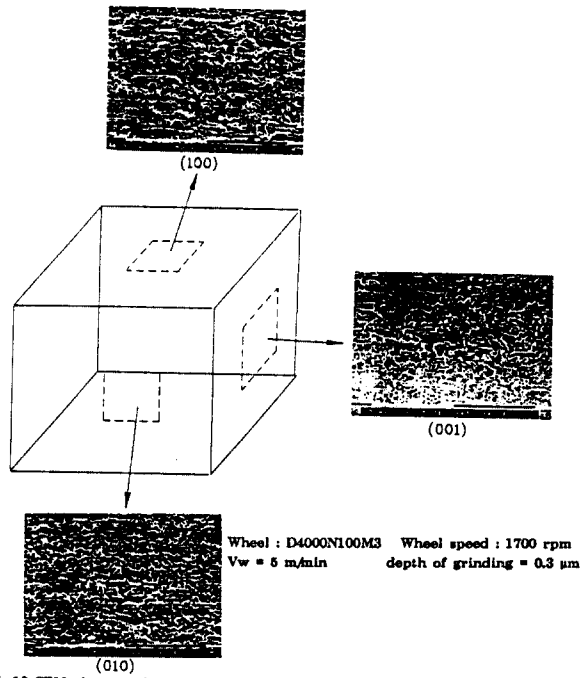


Fig.13 SEM photograph of MgO surface of direction according to micro depth of grinding

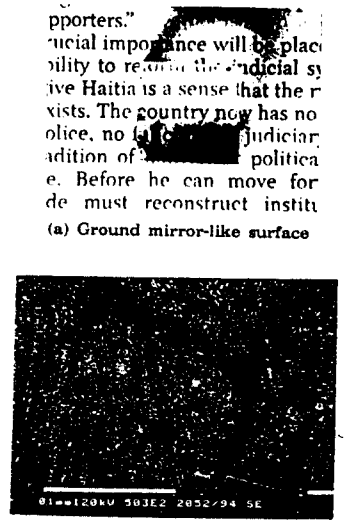


Fig.14 View of ground mirror-like surface of MgO single crystal

5. 결 론

1. 외부의 조건 변화와 무관하게 항상 일정한 정격전류를 유지하는 능동적인 제어을 갖는 최적 전해드레싱 시스템을 개발하고 최적 드레싱 제어를 수행 함으로서 매우 가공이 어려운 단결정 산화 마그네슘의 경면연삭을 달성하게 되었다.
2. 연삭깊이의 증가에 따라 전단응력이 최대가 되는 위치에서 내부크랙이 최초로 발생되고, 내부크랙이 전파되어 표면크랙으로 되며, 연삭깊이가 보다 증가되면 연삭력의 증가 및 벽개성에 의해서 크랙이 전파된다.
3. 단결정 산화 마그네슘의 연삭시 내부 및 표면크랙을 제거하려면 미소한 연삭깊이를 유지해야 하며, 압전소자를 이용한 미소연삭깊이 조절장치를 제작하여 적용하고 최적 연속 전해드레싱 시스템 및 주철결합제 다이아몬드 지석을 이용하여 단결정 산화마그네슘의 크랙없는 양호한 면을 얻었다.
4. 최적 연속전해드레싱 시스템을 적용함으로서 산화마그네슘 가공에서 연삭력의 감소효과를 나타내고, 표면 및 내부크랙을 제거하는데 양호한 효과를 나타냈다.

참고문헌

[1] Y.S.Boyarskaya,D.Z.Grabko, M.S.Kats,1990,"Regularities of MgO single-crystal failure in microindentation" J.Materials Science, Vol.25, pp.3611-3614
[2] 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
[3] 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
[4] K.Suzuki and T.Uematsu, 1991, "Development of a Simlified Electrochemical Dressing Method with Twin Electrodes",Annals of the CIRP, Vol.40, pp.363-366
[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,이은상,1995, 최적 연속 전해드레싱의 개발과 제어특성,대한기계학회논문집,Vol.19, No.3, pp.680~687
[7]Z.L.Wang,J.Bentley,E.A.Kenik,L.L.Horton and R.A.McKee, 1992, "In-situ Formation of MgO_2 Thin Films on MgO Single-Crystal Surfaces at High Temperatures",Surface Science,271,pp.88-108
[8]Joint Committe on Powder Diffration Standards (JCPDS), SET30 of the Powder Diffraction File, International Centre for Diffraction Data 1980, 30-794
[9]A.P.Boresi,O.M.Sidebottom,1985,"Advanced Mechanics of Materials", John Wiley&Sons,pp.599-613
[10]W.B.Rowe,M.N.Morgan,1993, "The Effect of Deformation on the Contact Area in Grinding" Annals of the CIRP,Vol.42, pp.409-412