

〈論 文〉

전해드레싱에 의한 경취재료의 초정밀 연삭에 관한 연구

김정두* · 이연종** · 이창열***

(1993년 1월 28일 접수)

A Study on the Ultraprecision Grinding for Brittle Materials with Electrolytic Dressing

Jeong-Du Kim, Youn-Jong Lee and Chang-Youl Lee

Key Words : Mirror-Like Surface Grinding(경면연삭), Superabrasive Diamond Wheel(초미립자 다이아몬드 슷돌), Electrolytic Dressing(전해드레싱), Cast Iron Fiber Bonded Wheel(주철본드 슷돌), Brittle Material(경취재료), Ferrite(훼라이트)

Abstract

The diamond wheel with superabrasive is required for mirror-like surface grinding of brittle materials. But the conventional dressing method can not apply to the diamond wheel with superabrasive. Recently electrolytic dressing method was developed for cast-iron bonded diamond wheel with superabrasive. This technique can take replace of lapping and polishing. Using the electrolytic dressing, the surface roughness of workpiece was improved largely and grinding force was very low and the continuity of the grinding force was also very improved. In this study, the purpose is the realization of mirror-like surface grinding of ferrite with electrolytic dressing of metal bonded diamond wheel. For application of ultraprecision grinding for brittle material, superabrasive wheel, air spindle and inprocess electrolytic dressing were used. In addition, the effects of pick current and pulse width on ground surface were investigated, and the suitable dressing conditions for ferrite were found out.

1. 서 론

최근 반도체 및 광학산업 등의 발전과 함께 훼라이트, 실리콘, 세라믹 등 경취재료의 경면가공이 요구되고 있다. 특히 훼라이트는 자기헤드재료로서 전자산업에서 중요한 위치를 차지하고 있으며 재질적으로는 미세크랙 및 칩핑이 생기기 쉽다.⁽¹⁾ 이러한 재료를 경면으로 가공하는 경우 종전에는 래핑, 폴리싱의 가공공정을 사용하여 왔으나, 생산성 향

상, 가공환경개선 등을 목적으로 래핑 및 폴리싱 공정을 초정밀 연삭가공으로 대체시키는 방법이 활발히 연구되고 있다.⁽²⁾

최근에 들어서는 초미립자(superabrasive) 다이아몬드 또는 입방결정 질화붕소(CBN) 슷돌을 경제적으로 제작할 수 있게 되어 종래의 슷돌로는 연삭이 곤란한 훼라이트, 세라믹, 실리콘 및 광학유리 등과 같은 경취재료의 일반연삭 등이 가능할 수 있었으나 경취재료의 경면연삭은 가공면 거칠기가 200nm이하의 범위에서 실현되므로 적용 가능한 슷돌의 입도는 #1000 이상의 초미립자 슷돌이어야 가능하다.⁽³⁾ 그러나 #1000 이상의 초미립자 다이아몬드 슷돌을 사용하여 연삭할 경우 눈메움(loading) 또

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

**한국과학기술원 정밀공학과 대학원

***중소기업진흥공단 연수원 교수부

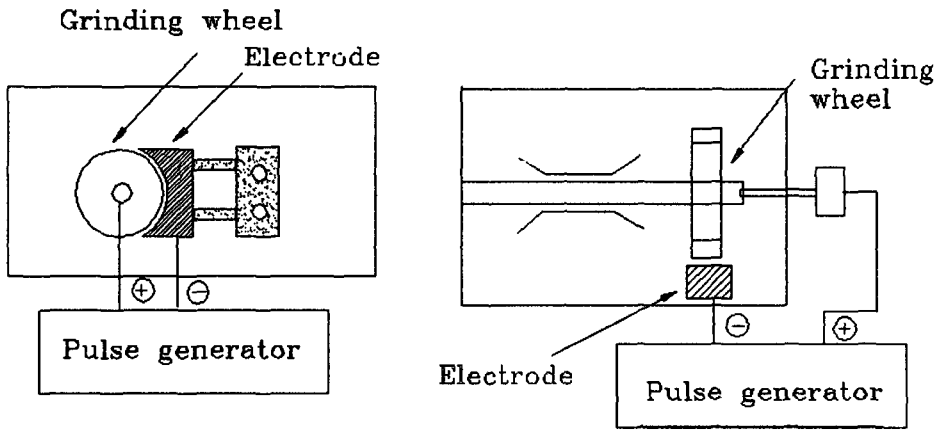
는 입자마멸(glazing)에 대비한 드레싱 등의 문제점으로 인하여 적용이 제한되어 왔다.⁽⁴⁾ 근래 이러한 문제해결에 대한 한 방법으로 슷돌입도에 대한 적용성을 고려한 약전도성 연삭액에 의한 미약한 전기분해에 기반을 둔 드레싱법이 알려져 있다.⁽⁵⁾ 종전의 관용드레싱이 기계적 제거, 방전드레싱이 전기적 제거에 기반을 둔 반면, 메탈본드 초미립자 슷돌에 적합한 새로운 전해드레싱은 적절한 전기화학적 가공원리에 기반을 두고 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 새로운 연속 전해드레싱 시스템을

구축하고 현재 전자재료로 널리 사용되고 있는 웨라이트에 대하여, 경면연삭을 실현하기 위한 제반 연삭조건 즉, 전해액의 영향, 피크전류와 펄스폭의 영향, 전해드레싱과 취성파괴와의 관계 등을 규명하였다.

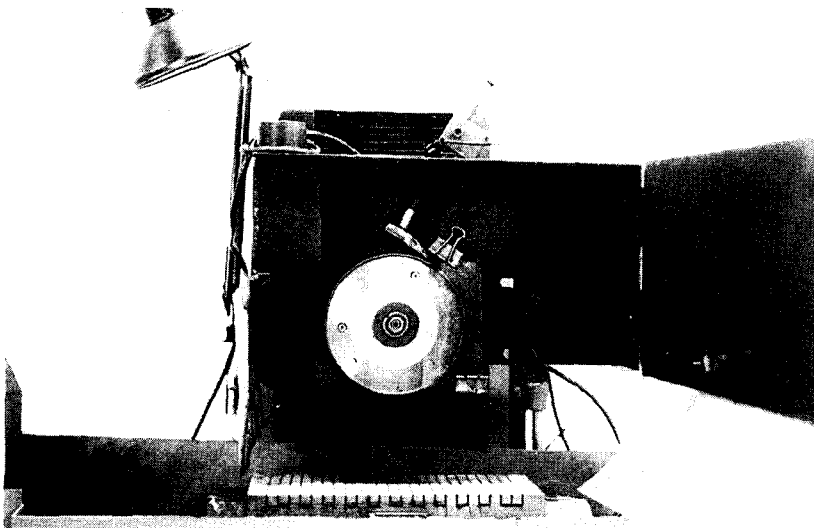
2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 전해드레싱 시스템장치를 나타낸 것으로서, 전해드레싱 전극은 99% 순동을 사용하여 슷



* Gap between wheel and electrode = 0.1mm

(a) Schematic diagram



(b) Photograph of experimental apparatus

Fig. 1 View of the grinding experimental apparatus with electrolytic dressing system

돌 외주에 제작 조립하였고, 다이아몬드 연삭숫돌의 직경 외주면에 대하여 0.1mm의 틈새(thickness)를 두어 가공한 후 조립하였다. 연삭기는 회전축에 공기 베어링을 사용한 평면연삭기를 사용하였으며 여기에 전극과 부속장치를 부착하였다. 전해작업을 위한 전원공급 장치는 출력방식이 DC 펄스이며 τ_{on} (펄스폭), τ_{off} (휴지시간) 값이 5, 50, 100, 200 μsec 로 다양한 변화를 공급할 수가 있고 드레싱 전류와 전압을 측정할 수 있는 전압계과 전류계가 부착되어 있다. 연삭기의 에어베어링은 공급하는 공기를 정화하고 수분을 제거하기 위하여 공기 건조제 Hankinson Air Dryer 8010을 사용하였다. 전해드레싱을 위한 전해액은 수용성 연삭유 제만을 사용하였고 숫돌의 진원을 얻기 위한 과정으로서 경취재료의 경면연삭에 큰 영향을 미치는 트루잉은 GC숫돌을 이용하여 수행하였다. Fig. 2는 연삭력 측정을 위한 시스템으로 스트레인 게이지를 부착시켜 제작한 공구동력계 및 A/D변환기와 퍼스널 컴퓨터를 이용하였고, 연삭경면의 표면 거칠기 측정은 3차원 비접촉 측정기(WYKO)를 사용하였다. 본 실험에 사용된 장비와 그 제원은 Table 1과 같다. Fig. 3은 전해드레싱의 개략도를 나타낸 것으로서⁽⁵⁾ 연삭숫돌의 결합제는 양극으로 공급하고, 전극은 음극 시스템으로 전기와 전해액

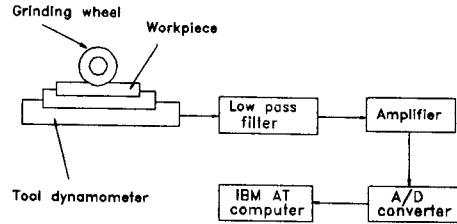


Fig. 2 Schematic diagram of force measurement system

Table 1 Grinding experimental conditions

Grinding machine	Surface grinding machine (KGS-600H)
Wheel	SD8000, SD4000
Wheel for truing	GC60K7VG
Workpiece	Ferrite
Power source	EPD-3A($I_p=5\sim 20\text{A}$, $\tau_{on}=5\sim 200\mu\text{s}$)
Electrode	Overlapped area : 1/3 of the wheel Material : pure copper
Electrolytic fluid	Solution type 3
Surface roughness testerg	Non-contact surface roughness measurement system WYKO

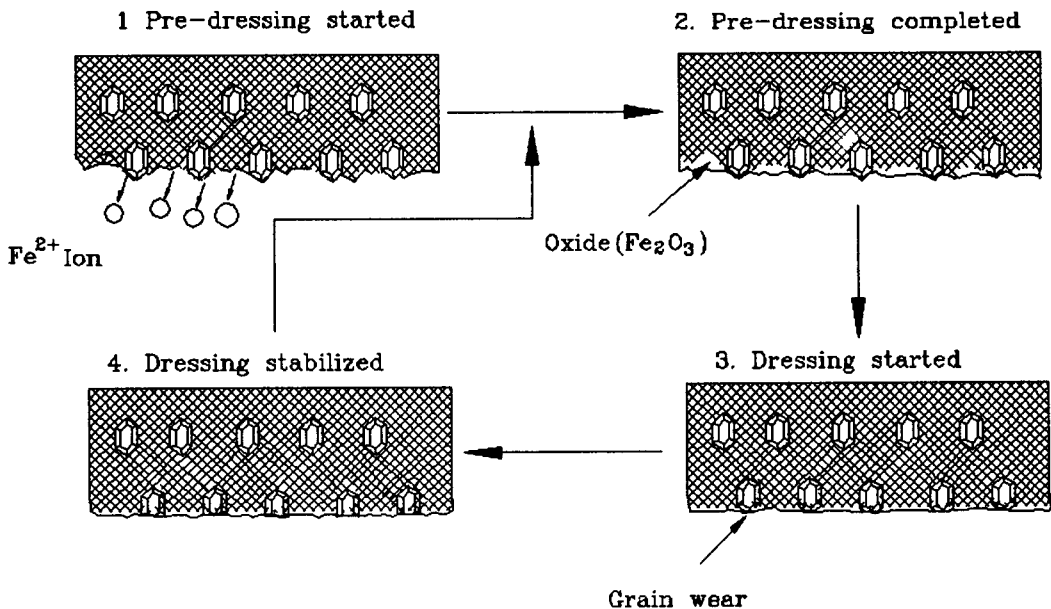


Fig. 3 Schematic illustration of the mechanism of the electrolytic dressing

를 공급하면 두 전극의 작은 틈사이에서 전해작용이 일어나게 되어 연삭숫들의 주철본드(cast-iron bond)가 전해작용에 의해 Fe^{2+} 로 이온화되어 용출된다. 이온화된 Fe는 물의 전해작용에 의해 절연물인 Fe_2O_3 산화물로 변해 숫들 표면에 응착된다. 이 절연물로 인하여 전해용출이 정지하게 되어 일정한 입자출출을 생성시키게 된다. 계속하여 연삭이 진행됨에 따라 다이아몬드 숫들이 피막이 조금씩 제거되어 전기가 반복하여 통전하게 되면 전해용출이 재개된다. 이러한 미시적 드레싱 사이클에 의해 마멸된 숫들입자는 새로운 입자를 생성시키게 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전해액이 드레싱이 미치는 영향

Fig. 4는 전해액에 따른 드레싱 효과를 분석하기 위하여 각각 전해액 1종(WD-301N) 2종(S-20) 3종(N-30)을 사용했을 경우 각각의 경우에서 드레싱전류와 전압을 측정하여 나타낸 것이다. 가공조건은 절입깊이 $5 \mu m$, 피크전류 20A이다. 그림에서 전해액 1종의 경우 드레싱전압이 125V로 가장 크고 드레싱전류는 0.9A로 가장 작게 나타난 것으로 볼 때 전기저항이 가장 크게 나타났으며, 전해액 2, 3종의 경우는 드레싱전류, 전압이 유사함을 알 수 있다. 전해액에 대하여 전기저항이 크면 전극의 소모가 커지고⁽⁶⁾ 전해드레싱 시스템에 일정한 전류를 공급하기 위하여 전기저항이 작은 전해액을 사용할 경우에 비하여 큰 전원 공급을 필요로 하기 때문에 바람직하지 못하다. 따라서 적절한 전해액은 전기저항이 작은 전해액 2종 또는 3종이 전해액 1종에 비하여 유용한 전해액으로 판단된다.

3.2 전해드레싱의 전기적 특성

Fig. 5는 전해드레싱의 전기적 특성을 나타낸 것이다. 초기드레싱(pre-dressing)이 시작될 때에는 트루잉후의 숫들은 좋은 전도성을 갖기 때문에 전류는 높고 두 전극사이의 전압은 작았다. 시간이 경과함에 따라 용출된 철이온 중의 일부분이 수산화철, 산화철 등의 생성물로 변하여 드레싱된 숫들 표면에 축적되므로써, 이들 물질은 전기적으로 절연성이 있기 때문에 극간의 전도성 저하를 초래하여 시간이 경과함에 따라 두 전극사이의 전압은 증

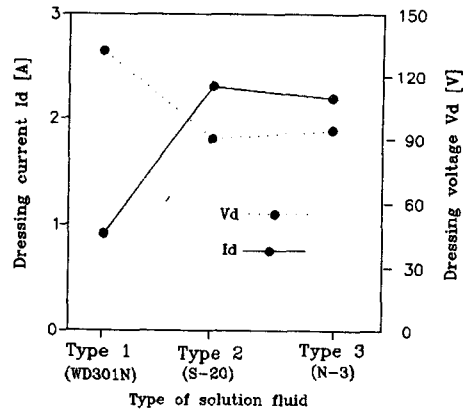


Fig. 4 Relationship between dressing current and voltage in electrolytic fluid

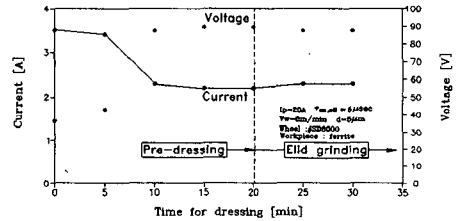
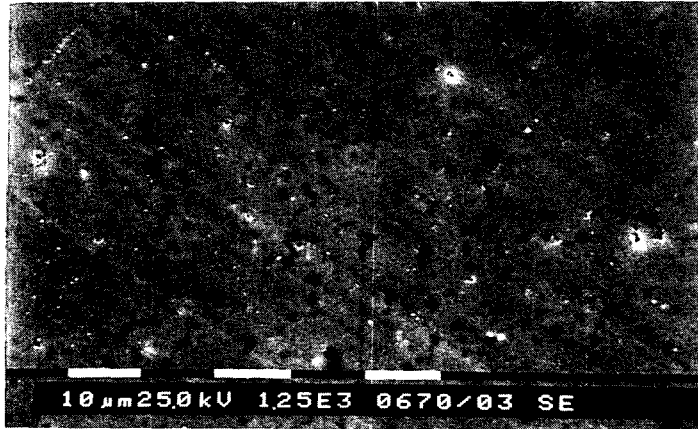


Fig. 5 Electrical behavior of the electrolytic dressing

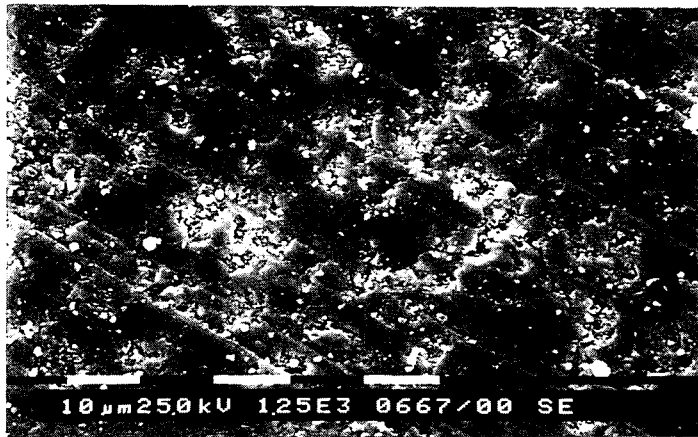
가하게 되고 전류는 감소하게 된다. 초기 드레싱 이후 연삭이 진행되면 절연 피막이 조금씩 제거되어 극간의 전도성 회복이 이루어지고 또한 전해드레싱이 재개된다.

3.3 표면거칠기의 향상 및 안정성

Fig. 6(a)는 연속 전해드레싱에 의한 연삭가공면의 경면현상 SEM사진이고, (b)는 전해드레싱을 사용하지 않았을 경우의 가공면 SEM사진으로 연삭량 430 cm^3 후의 가공표면 결과이다. 여기에서 (a)의 연삭표면은 전반적인 표면상태에서 안정적인 경면상태가 유지된 반면, (b)연삭조건에서는 전 표면에 걸쳐 취성파괴가 발생되었다. 그 원인으로 연삭이 진행되면 다이아몬드 숫들의 일부 입자는 마찰마멸 (attritious wear)에 의하여 입자끝이 무디어져 그레이징되고, 연삭이 계속하여 진행됨에 따라 숫들의 그레이징된 부분은 점차 성장하고 그레이징된 입자에 작용하는 연삭하중도 무디어진 면적에 비례하여 증가한다.⁽⁷⁾ 또한 크랙의 발생은 연삭입자에 걸리는 연삭력과 재료의 경도에 비



(a) Electrolytic dressing



(b) Non-electrolytic dressing

Fig. 6 SEM photograph of ground ferrite surface produced by #SD 8000 wheel

레하여 증가하므로⁽⁶⁾ 그레이징된 입자와 작용하는 공작물 표면에서는 크랙이 발생하게 된다. 따라서 전해드레싱을 연속적으로 공급하지 않았을 때에는 마찰마멸에 의하여 과도하게 무디어진 부분을 갖고 있는 입자가 많으므로 크랙전파에 의한 크래킹 (cracking)과 칩핑(chipping)이 발생하게 되어 취성파괴가 증가한다. 반면 전해드레싱을 연속적으로 공급하였을 경우에는 연삭시간이 경과함에 따라 이온용출에 의하여 연삭입자를 지지하고 있는 본드의 두께가 감소하여 연삭입자를 지지하는 힘이 작아진다. 그러므로 연삭입자가 마찰마멸에 의하여 입자 끝이 무디어져 입자에 걸리는 힘이 임계값에 도달하면 그레이징 입자는 쉽게 탈락됨으로 인하여 과도하게 마찰마멸된 입자의 발생이 방지된다. 따라

서 전해드레싱을 이용하였을 경우, 과도하게 마찰마멸된 연삭입자가 없는 양호한 절삭날을 기대할 수 있어 각각의 연삭입자에 걸리는 하중은 크랙이

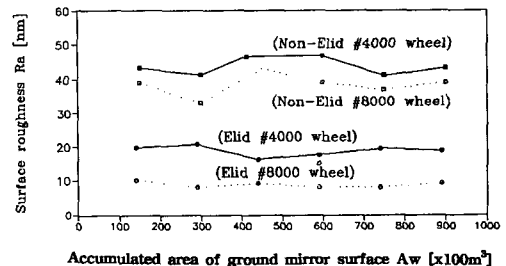


Fig. 7 Surface roughness of ground mirror surface of ferrite by Elid-grinding

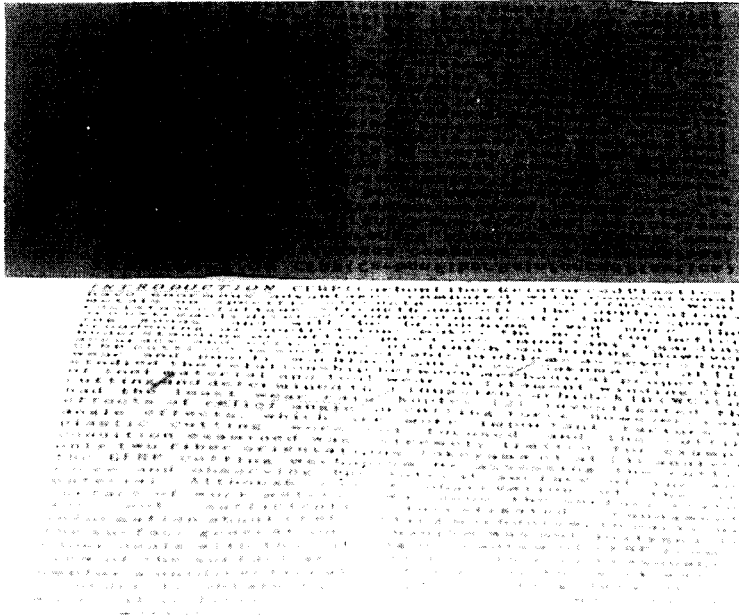
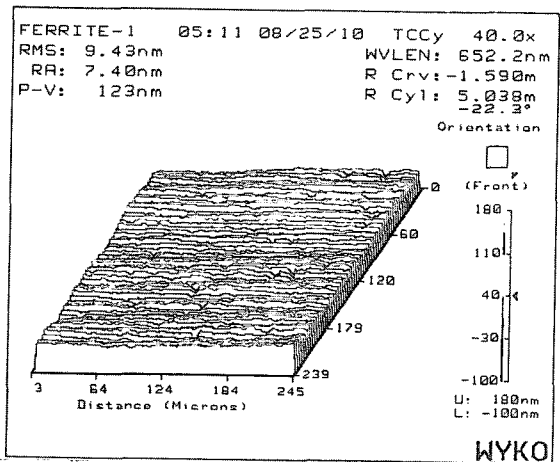


Fig. 8 View of ground mirror surface of ferrite by #SD 8000 wheel using the electrolytic dressing

발생하기 시작하는 임계치보다 작아 크랙발생이 억제되고 취성파괴없이 연성모드에 의하여 연삭이 이루어진다.

Fig. 7은 연속 전해드레싱에 의한 연삭량 430 cm³ 경과시 표면거칠기의 안정성을 나타낸 것으로서 전해드레싱을 이용했을 경우 표면거칠기 변화는 종래의 연삭법으로 가공한 경우와 비교하여 매우 작고 연삭량이 증가하여도 표면거칠기의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 연삭중 드레싱이 수반되지 않을 경우 다이아몬드 입자는 마멸에 의하여 불균일한 입자형태로 변모하고 가공 표면은 매우 나빠지나 전해드레싱을 적용한 경우는 연삭입자의 생성이 항상 균일하게 되어 연삭량이 증가하여도 표면거칠기



(a) Example of non-contact surface roughness measurement

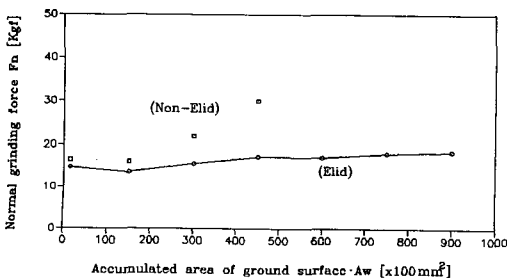
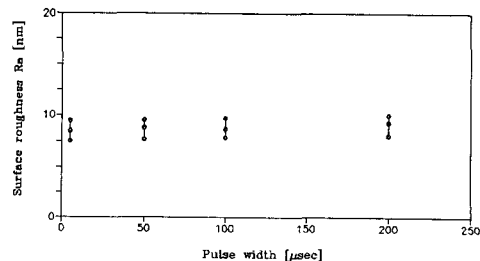
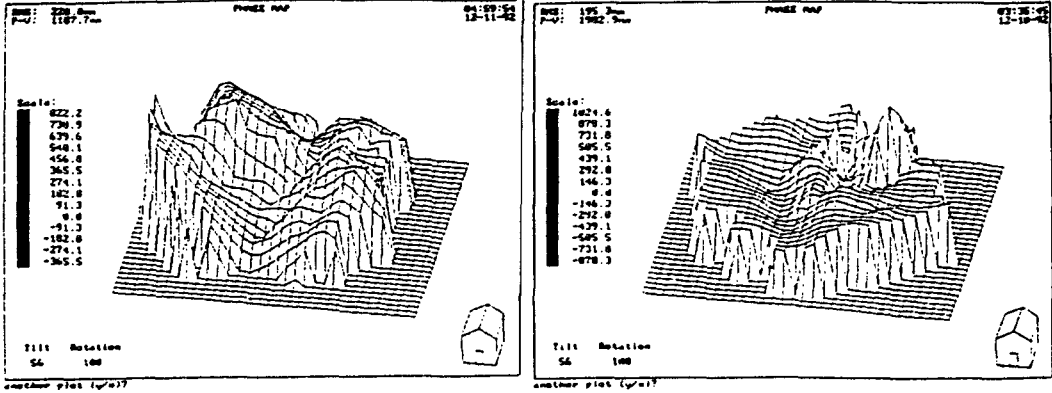


Fig. 9 Result of normal grinding force by the Elid



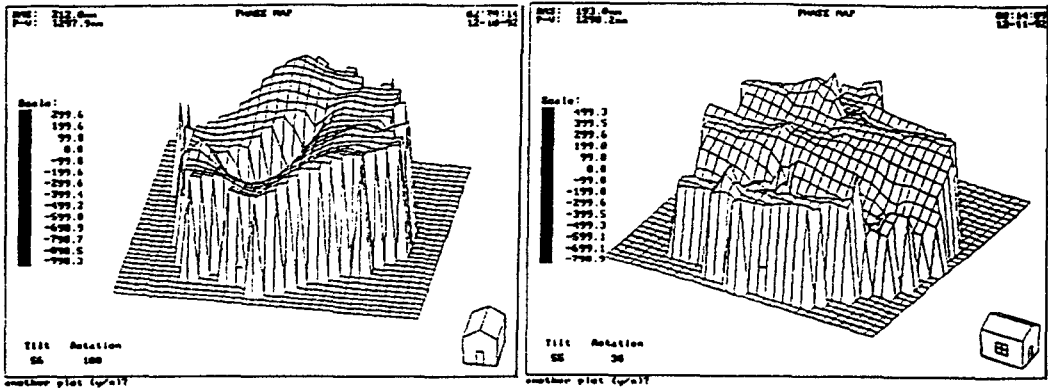
(b) Result of non-contact surface roughness measurement

Fig. 10 Influence of pulse width on surface roughness



(a) $\tau_{on,off} = 5\mu sec$

(b) $\tau_{on,off} = 50\mu sec$



(c) $\tau_{on,off} = 100\mu sec$

(d) $\tau_{on,off} = 200\mu sec$

Fig. 11 Influence of pulse width on flatness

의 변화는 크지않다. 연삭조건외의 공작물 테이블 속도 $V_w = 6\text{ m/min}$, 절입깊이 $d = 5\mu\text{m}$ 다이아몬드 슷돌 #4000을 이용하여 웨라이트를 연삭하였을 때 표면거칠기 Ra 18 nm를 얻은 반면, #8000 슷돌을 이용하면 7 nm정도의 경면을 얻을 수 있으며, Fig. 8은 경면연삭된 웨라이트의 경면 반사현상을 나타낸 것이다.

2.1 연삭저항

Fig. 9는 전해드레싱이 연삭력에 미치는 영향에 대하여 실험한 결과로서, 전해드레싱의 공급이 없을 경우 연삭량 A_w 가 430 cm^3 에 이르면 연삭력이 급격히 증가하여 전해연삭을 이용했을 경우에 비하여 2배정도 커진다. 이는 연삭입자의 입자마멸과

눈메움현상에 의한 연삭력의 증가라 사료된다. 전해드레싱을 이용했을 때에는 새로운 입자들출이 재생되기 때문에 양호한 절삭날을 기대할 수 있고 절

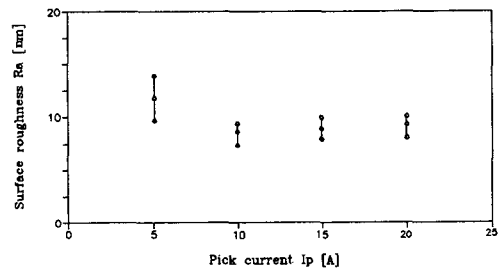


Fig. 12 Influence of pick current on surface roughness (ferrite)

연피막이 눈매움현상을 방지해주기 때문에 전해드레싱 이용시 일반 연삭에 비하여 상당한 하중감소와 저하중의 장기적 유지효과가 있음을 알 수 있다.

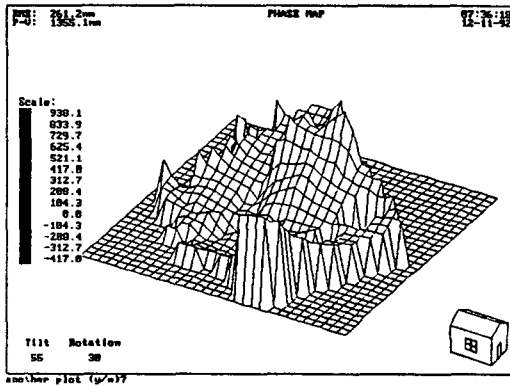
3.5 가공표면에 대한 전해드레싱 조건의 영향

(a) 펄스폭의 영향

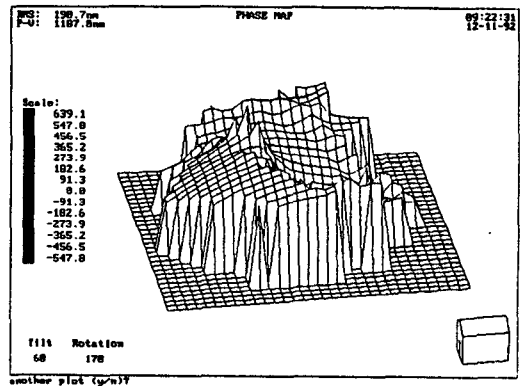
Fig. 10은 펄스폭 변화가 가공면의 표면거칠기에 미치는 영향에 대하여 실험한 결과를 나타낸 것이고, Fig. 11은 레이저 인터페로미터 (laser interferometer)로 각각의 펄스조건에 대한 가공표면의 편평도를 측정할 결과이다. 웨라이트를 초미립자 스톨(#SD 8000)로 가공하였을 때, 모든 펄스폭 조건에서 표면거칠기 Ra 는 7.4~10.5 nm 범위내에

분포하였고 레이저 인터페로미터에 의한 가공면의 편평도 RMS는 193~228.8 nm 범위내에 분포하였다. 측정편차와 오차에 의한 약간의 측정값의 분포 차이를 무시하면 가공면의 표면거칠기에 대한 펄스폭의 큰 영향은 없는 것으로 분석되었으며, 이 결과는 K. Suzuki⁽⁶⁾의 결과와도 일치한다. 그 결과를 이론적으로 해석하면, 펄스폭과 휴지시간이 동일할 때 펄스폭이 변하더라도 단위시간당 드레싱 장치에 공급되는 전류(I_d)는 같게되고 식(1)에 나타난 바와 같이 이온화에 의하여 용출되는 양(M)⁽⁹⁾이 일정하여 전해드레싱의 상태에는 변화가 없다. 즉 전해드레싱의 상태가 동일하면 펄스폭을 변화시키더라도 표면거칠기의 변화는 없게된다.

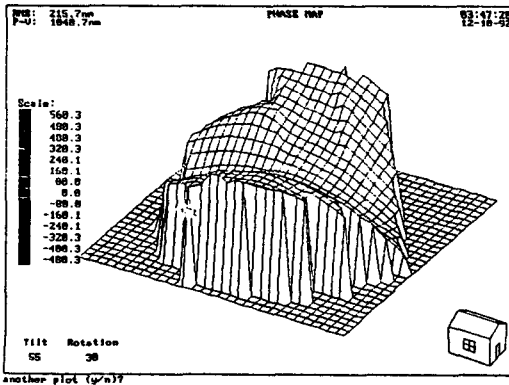
$$M = k \cdot I_d \cdot t \tag{1}$$



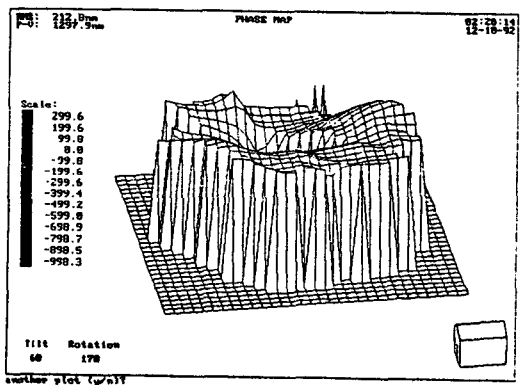
(a) $I_p=5A$



(b) $I_p=10A$



(c) $I_p=15A$



(d) $I_p=20A$

Fig. 13 Influence of pick current on flatness

여기서 M 은 슷들의 전해 용출되는 양, k 는 전기화학 당량, I_a 는 드레싱전류, t 는 통전시간이다.

(b) 피크전류(I_p)의 영향

Fig. 12는 피크전류가 가공물 표면거칠기에 미치는 영향에 대한 결과는 나타낸 것이고 Fig. 13은 각 피크전류에 대한 가공표면의 편평도를 레이저 인터페로미터로 측정된 결과이다. 피크전류를 5, 10, 15, 20A로 증가시키면서 실험을 하였을 때 표면거칠기 R_a 는 피크전류 5A에서 9~14 nm값으로서 큰 값을 나타내고, 10, 15, 20A일 경우, R_a 는 7~10 nm 내에 분포하고 있으며, 인터페로미터에 의한 가공면의 편평도 RMS는 피크전류 5A에서 261.2 nm값으로서 큰 값을 나타내고 10A이상에서

는 190.7~215.7 nm내에 분포하였다. 측정편차와 오차에 의한 측정값의 분포차이를 무시하면 피크전류 10A이상에서는 표면거칠기의 변화가 거의 없으므로 10A보다 큰 전류를 공급할 경우 표면거칠기의 향상은 없고 슷들의 과도한 용출만 있게 된다. 따라서 웨라이트에 대한 적정한 피크전류는 10~15A라 사료된다. Fig. 14, 15는 피크전류 5A일 때 가공표면의 편평도를 연삭방향과 연삭 직각방향에 대하여 인터페로미터로 측정된 것으로서 연삭방향보다 연삭직각 방향으로의 편평도가 더 양호하다. 이는 연성모드에서 잘 나타나는 현상으로서 웨라이트의 연삭가공이 연성모드에 의하여 이루어졌음을 나타내는 증거이다.

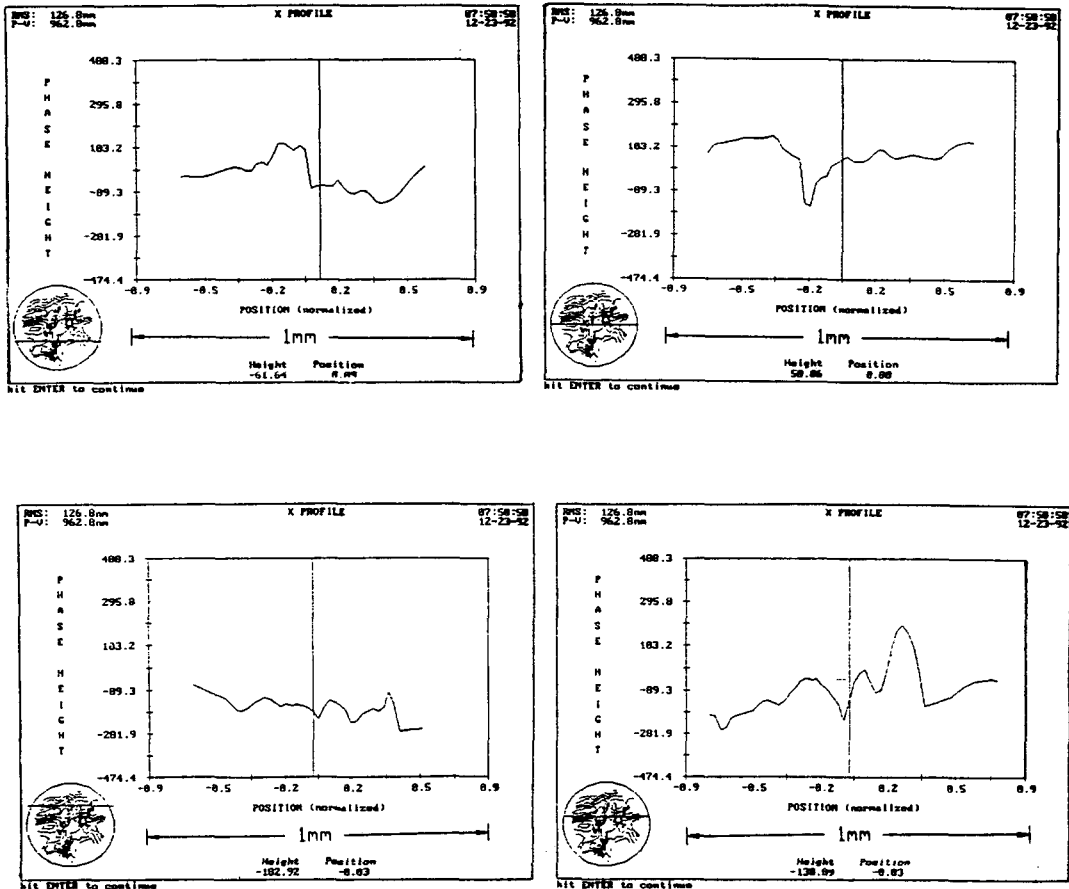


Fig. 14 Flatness of grinding surface perpendicular to grinding direction

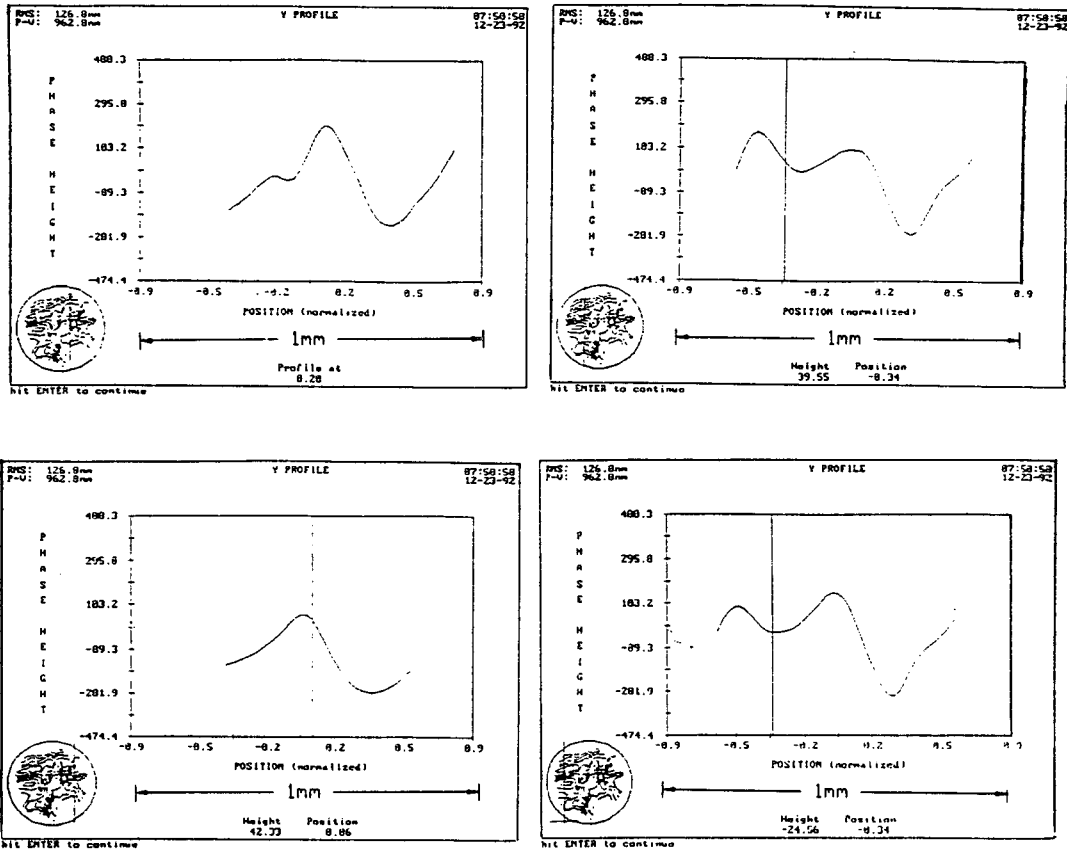


Fig. 15 Flatness of grinding surface for grinding direction

5. 결론

본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전해드레싱을 이용하여 웨라이트의 경면연삭을 실현하였다.
- (2) 전해드레싱을 이용하여 웨라이트를 가공할 경우 양호한 연삭날의 생성으로 인하여 일반 연삭시에 비하여 1/2정도의 연삭하중 감소효과가 있음을 알 수 있었고 하중감소로 인하여 취성파괴가 거의 발생하지 않았다.
- (3) 전원의 펄스폭은 이온 용출되는 양에 영향을 미치지 않으므로 웨라이트의 표면거칠기에 거의 영향이 없음을 알 수 있었다.
- (4) 웨라이트 재료의 초정밀 연삭에 대한 적정한 공급 전류는 $I_p=10\sim15$ A이다.
- (5) 전해드레싱과 주철본드 다이아몬드 슛돌(#

8000)을 적용하여, 웨라이트를 연삭했을 때 표면거칠기 $Ra=7.4$ nm, 평면도 $RMS=190.7$ nm을 얻었다.

- (6) 웨라이트의 전해드레싱시 전해액 2, 3종은 전해액 1종보다 적합한 전해액임을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Groenou, A. B. and Veldkamp, J. D. B. 1979, "Grinding Brittle Materials," Philips Technical Review, Vol. 38, pp. 131~144.
- (2) 大森整, 1991, Elid 鏡面研削技術, Elid 研削研究會, pp. 8~31.
- (3) N. N., 1991, "鏡面研削の最新技術動向, 理化學研究所, pp. 147~148.
- (4) Komanduri, R. and Reed, W. R. 1980, "A New Technique of Dressing and Conditioning Resin

- Bonded Superabrasive Grinding Wheel," *Annals of the CIRP*, Vol. 29, pp. 239~243.
- (5) 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.
- (6) Suzuki, K. and Uematsu, T. 1991, "Development of a Simplified Electrochemical Dressing Method with Twin Electrodes," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 363~366.
- (7) Malkin, S. 1971, "The Wear of Grinding Wheels Part 1-Attritious Wear," *Transactions of the ASME*, pp. 1120~1128, *Journal of Mechanical Engineering Laboratory* Vol. 42, No. 3, pp. 97~106.
- (8) Thomas G. Bifano, 1984, "Ductile-Regime Grinding of Brittle Materials," *Precision Engineering Center North Carolina State University*, NG 27695~7918, pp. 325~338.
- (9) Keisaku Okano, Chisato Tsutsumi, 1988, "Machining of Ceramics (part 2)," *Journal of Mechanical Engineering Laboratory* Vol. 142, No. 3, pp. 239~243.