

전해 인프로세스 드레싱을 이용한 Optical glass계의 경면연삭에 관한 연구

조주현*, 원종호⁺, 박원규⁺⁺, 이진오⁺⁺, 김민수⁺⁺, 김성수⁺⁺

A Study on the Mirror Surface Grinding of Optical Glass Utilizing Electrolytic In-Process Dressing

Cho Ju-Hyun*, Won Jong-Ho⁺, Park won-kyu⁺⁺, Lee Jin-oh⁺⁺, Kim Min-Su⁺⁺, Kim Sung-Su⁺⁺

Abstract

Electrolytic In-process Dressing (ELID) technique for metal bonded diamond grinding wheel has been developed for mirror surface grinding of hard and brittle materials. This study process optical glass in using Electrolytic In-process Dressing. In using to main variable wheel speed(400 rpm ~ 2000 rpm), feed rate(5 $\mu\text{m}/\text{min}$ ~ 25 $\mu\text{m}/\text{min}$), depth of cut (3 μm ~ 15 μm), dressing and spray. we measured surface roughness by Form Talysurf series2.

we find optimum grinding condition to obtain confident surface roughness in representative brittle materials.

Key Words : ELID(Electrolytic In-Process Dressing, 전해 인프로세스 드레싱), Surface Roughness(표면거칠기), Knoop Hardness(경도), Brittle material(취성재료), Optical glass (광학유리),

1. 서론

연삭가공은 기계가공에서 주로 최종 마무리 가공을 하는 경우에 사용되어지며, 최근 산업의 발달과 함께 제품의 고정도화, 다양화, 생산성 향상 등의 요구에 의해 가공에 있어서 고능률과 고정도 가공이 동시에 요구되고 있다. 기존의 랩핑과 같은 연마방법은 가공정도와 가공능률에 한계가 있으며 환경문제까지 대두되고 있다.

최근 이러한 문제를 개선하기 위해 연삭가공으로 연마 가공을 대체할 수 있는 Electrolytic in-process dressing을 이용한 고능률 초정밀 연삭기술개발이 활발하다.^{1~2)}

전해 인프로세스 드레싱 연삭법은 슛들의 금속결합제를 전기분해에 의하여 필요최적량을 제거하여 연삭입자를 연속적으로 돌출시켜 안정된 가공을 유지시키는 연삭법으로

서 경면가공은 물론 경취성 재료의 고능률 가공이 가능하다.

이러한 경취성 재료의 경면연삭에는 당초, 지립이 가공물에 숨겨져 작용하는 레진 다이아몬드 슛들이 사용되어 왔다. 자기해드용의 페라이트 경면연삭에는 내열성 레진본드 다이아몬드 슛들의 사용으로 좋은 결과를 얻고 있으나 결합제가 유기물이므로 슛들의 마멸이 일정하지 않고 탄성변형으로 정밀도가 떨어지기 쉽다. 이에 비해 메탈 본드 슛들은 금속을 결합제로 하는 주철 혹은 강 분말을 사용하면 강성이 높고 슛들입자 지지력도 훨씬 견고한 슛들이 된다.

경면연삭을 하기 위한 이러한 미세지립의 메탈본드 다이아몬드 슛들은 강도가 높아 트루잉/드레싱이 힘들고, 기계적 방법에 의한 드레싱에 의해 지립이 탈락하기 쉬운

*충남대학교 기계공학과 대학원 (zoochien@hanmail.net)

주소: 대전광역시 유성구 궁동 충남대학교 기계공학과 대학원

+ 충남대 기계공학과

++ 충남대학교 기계공학과 대학원

문제가 있어 입자의 미세화에는 한계가 있었다. 따라서, 이들 연삭숫돌의 트루잉/드레싱기술 개발과 더불어 가공의 정밀도와 생산성의 극대화를 위해 고효율 연삭 가공기술 개발 및 전용 가공시스템의 개발에 적극적이다.

연삭가공에서 고능률·고정도 가공의 한가지 방법으로 ELID 연삭법이 개발되어 고강도 메탈본드숫돌을 이용하여 초경합금, 광학 유리, 세라믹 재료등의 고품위 가공을 실현하고 있다.³⁻⁴⁾

광학용 유리는 현대 광학분야에서 중요한 부분을 차지하고 있으며, 광학 재료들은 높은 취성을 가지므로 우수한 품질의 광학 표면을 얻기가 곤란하다 따라서, 본 연구에서는 ELID 연삭을 이용하여 광학용으로 많이 사용하는 Optical glass계 중 5종류를 선택하여 실험을 통해서 초정밀 경면 연삭가공의 최적조건을 찾아 랩핑과 동일한 가공면을 획득하여 가공시간과 공정을 단축하므로 생산성 향상을 크게 도모 하고자 한다.

2. 관련이론 및 실험방법

2.1 전해 인프로세스 드레싱의 원리

전해 인프로세스 드레싱은 약도전성 연삭액에 의한 전해 드레싱에 연속성을 부여함으로써 초입자 숫돌을 안정적으로 가공에 이용할 수 있는 드레싱 방법이다.

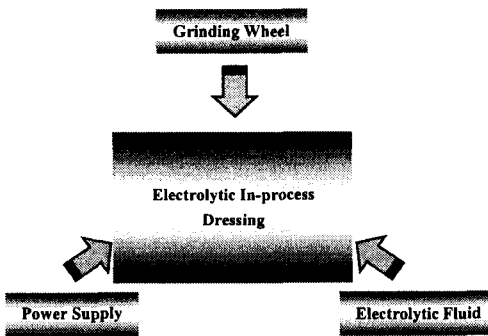


Fig. 1 Essential factor for electrolytic in-process dressing

최근 초미립자 숫돌을 적용한 경면연삭이 초정밀 연삭기술로 주목받고 있으며, 이러한 경면연삭을 달성하기 위해서는 연속 전해드레싱이 필수적이다.

Fig. 1은 전해 인프로세스 드레싱(ELID)의 필수요소를

나타낸 것으로서, 주철, 코발트, 니켈, 황동 등과 같은 금속 결합제로 이루어진 메탈 본드형의 다이아몬드 연삭휠 (Grinding wheel), 화학 용제형의 전해액(Electrolytic fluid), 사각 파형 펄스형의 직류 전원을 공급하는 전원 공급 장치(Power supply)등으로 크게 3가지로 구분되어 진다. 연삭휠은 전해드레싱시 양극전원과 연결됨으로서 숫돌의 결합제는 금속결합제(Metal bond)로 구성되어 있어야 하며, 현재까지의 연구결과로 주철 결합제를 적용한 휠이 가장 양호한 효과를 나타내고 있다.

또한, 전해액의 영향에 따라 전기분해 작용이 변화되고, 공작물의 가공에 영향을 미치게 되므로 보다 정확한 선정이 요구되어 진다. 필수요소중 전해용 전원은 휠과 전극사이에 전원을 원활히 공급하여 전기분해에 의한 드레싱을 가능하게 한다.

Fig. 2에는 전해 인프로세스 드레싱의 메커니즘을 도식적으로 나타내었다.⁵⁾

미세한 다이아몬드 연마재를 가진 메탈본드 숫돌은 트루잉 작업 후에는 연마재와 결합제는 평탄화 되어 연마성이 떨어지게 되지만 여기에 초기 전해 드레싱을 통하여 결합제가 용출되고, 연마재를 돌출 시킨다.

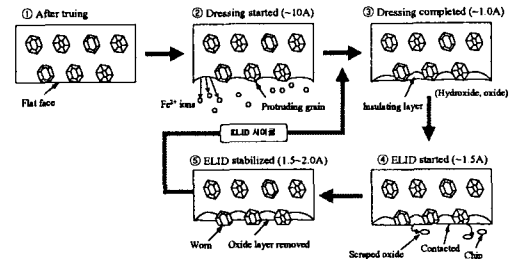


Fig. 2 Schematic diagram of the mechanism of electrolytic in-process dressing

이 전해현상에서는 숫돌의 결합제가 수 μm 용출한 후 빠르게 부도체 피막(수산화철, 산화철 등)에 의한 절연층이 숫돌 표면에 형성되고 과도한 용출을 방지한다. 그리고 연삭을 시작하면 공작물이 이 부도체 피막과 접촉하여 연마재가 마멸된 분량만큼 피막이 벗겨진다. 이렇게 되면 피막에 의한 절연이 저하되고 또다시 결합제가 필요한 양만큼 용출되어 연마재의 돌출이 유지된다.

이 천이상태(Electrolytic in-process dressing cycle)에 의해 다시 새로운 연마재가 돌출 되어져 안정된 가공이 진행된다. 이러한 전해 인프로세스 드레싱 연삭의 자율적인

제어 기능에 의해 초정밀의 가공이 유지될 수 있다.

2.2 실험장치 및 방법

전체 시스템의 개략적인 구성은 Fig. 3에 나타내었다. ELID를 이용한 연삭 실험을 위해서는 기본적인 연삭기에 메탈본드 연삭숫돌, 전원공급장치, 전극, 연삭액 등의 실험장치를 갖추어야 한다. 본 실험에서는 전해 인프로세스 드레싱을 이용해 초정밀 경면가공이 가능한 ELID 연삭시스템을 구성하였다.

본 실험에 사용된 ELID 연삭시스템은 전해드레싱 전용 숫돌은 양극으로 전해드레싱 전용 전극은 음극에 연결되어 있고 전해액과 연삭액이 동시에 분무되며 숫돌의 회전수, 이송속도, 절입깊이의 조절이 가능하고 공작물을 진공척(Vacuum chuck)으로 고정되어 410rpm으로 회전한다. 또한 냉각장치(Chiller controller)가 있어 전해액 및 연삭액의 온도상승을 방지하기 위해 온도를 조절할 수 있으며 IP, ON TIME, OFF TIME이 조절이 가능한 전해드레싱 장치로 구성되어 있다.

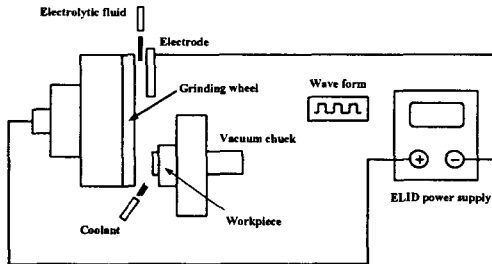


Fig. 3 Diagram of electrolytic in-process dressing system

ELID 연삭에서 초기 드레싱과 주가공시의 숫돌회전속도가 달라야 하기 때문에 숫돌회전수의 조절을 위해 주축모터 회전수를 자유롭게 조절할 수 있도록 인버터가 부착되어 있다. 연삭유는 범우화학의 전해액(MN-3)을 수돗물에 50배로 희석하여 사용하였고 진공척을 사용하므로 원활한 진공을 유지하기 위하여 대우 전기(주)의 2.2kw, 3HP, 4P의 단상 유도전동기(컨덴서기동형) 공기압축기(Compressor)를 사용하였다.

본 실험에서는 주철본드 다이아몬드 휠을 사용했으며 숫돌 입도는 #200 #800 #12000의 3가지 mesh를 사용하였다. 숫돌의 크기는 $\varnothing 150 \times 20$, 중심홀(Center hole)은 $\varnothing 30$, 폭은 5mm 동일하다. 전극(Electrode)은 Copper

99%, 전해 드레싱의 음극을 사용하였고 전극 지지대(Electrode Support)는 절연 기능의엔지니어링 플라스틱 전극지지대가 장착되어 있으며 냉각액 분리기(Separator of Coolant)는 전해액과 연삭액으로 분리되어 나오게 되어있다. 미세조절장치(Micrometer Head)는 전해드레싱에 적절한 간극을 조절하기 위해서 전극에 장착하여 전극을 미소이송시켜 적절한 전기가 흐르도록 하였다.

위와 같은 전극장치에 관한 내용을 Fig 4에 나타내었다.

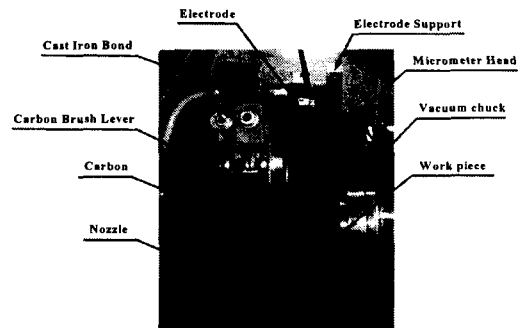


Fig. 4 Shape of electrode device

공작물은 현재 광학용 산업용으로 많이 사용되고 있는 광학유리 중 대표적으로 SK16, SF5, BK7, F2, FD13의 5종을 선택하였으며, 각 재질의 Knoop 경도(H_k)는 Table 1과 같다. 광학유리계의 재료를 진공척에 부착하기 위해 지그를 $\varnothing 60 \times 20$ 으로 제작하였다. 지그의 재질은 알루미늄계인 AL6061을 사용하였고 각각의 재료를 지그에 본드를 녹여 부착하였다.

Table 1. Mechanical properties of specimens

	SK16	SF5	BK7	F2	FD13
Knoop Hardness (H_k)	575	410	595	425	410

트루잉에 사용된 숫돌은 지그형태로 공작물측인 진공척에 쉽게 부착이 가능한 형태로 되어 있다. 사용된 숫돌은 일반숫돌로 많이 사용되는 청자색 지석인 GC 220 숫돌로서 트루잉 하였다. 트루잉 작업시 주축 숫돌 회전수는 1000 rpm 정도로 고속으로 하고 전체면의 고른 연마를 위해 실제 연삭작업과 같이 1초당 $1 \mu m$ 이송을 시키면서 수행하였다. 본 실험에서의 거칠기 측정은 한국기초과학지원연구소

에 있는 접촉식 표면조도 측정기인 Talyer Hobson사의 Form Talysurf series 2로 측정하였다. 실험한 지그의 표면 거칠기를 측정하는 모습을 Fig. 5에 나타내었다.



Fig. 5 Form Talysurf Series2

가공실험은 주축회전속도, 공작물의 이송속도, 절입깊이, 연삭휠을 변화하여 수행하였으며 실험을 위해 적용된 각종 실험조건들의 개략적인 내용을 Table. 2에 나타내었다

Table 2. Specifications of experimental equipments

Grinding machine	HORIZONTAL HRG-150
Wheel	Metal bonded diamond wheel Kind : #200 #800 #12000 D150×d26×W5 mm
Wheel for truing	GC 220
Dressing system	Electrolytic dressing system
Workpiece	Optical glass SK16 : Ø35.1×4.8mm SF5 : Ø31×4.15mm BK7 : Ø25.9×7.4mm F2 : Ø21.9×5.7mm FD13 : Ø19.3×5.7mm
Transport device	OUTPUT 25W, 220V, 60Hz
Electrode	Copper 99%
Electrolytic fluid	Buhmwoo chemical MN-3 50:1 Dilution
Surface roughness tester	Form Talysurf Series2

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 주축회전속도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 6은 #12000 주철다아아몬드휠로 전해조건 $E_o = 40V$, $I_p = 4A$ 로 광학유리 5종류를 이송속도 $15 \mu\text{m}/\text{min}$, 절입깊이 $9 \mu\text{m}$ 에서 주축회전속도 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 광학유리 5종류 모두 주축회전수가 증가함에 따라 표면 거칠기가 양호해지는 경향이 나타나고 있다. 특히 SK16과 BK7은 주축회전수의 영향을 많이 받았으며 $1600 \text{ rpm}(100.5 \text{ m}/\text{min})$ 이상에서는 양호하였다.

주축회전수 $1600 \text{ rpm}(100.5 \text{ m}/\text{min})$ 이상의 속도에서 5종류 모두 정상적인 연삭이 이루어져 표면 거칠기가 양호하게 나타난다고 판단된다. 따라서 $1600 \text{ rpm}(100.5 \text{ m}/\text{min})$ 이상의 속도로 공작물을 가공하는 것이 표면 거칠기의 향상에 도움을 준다.

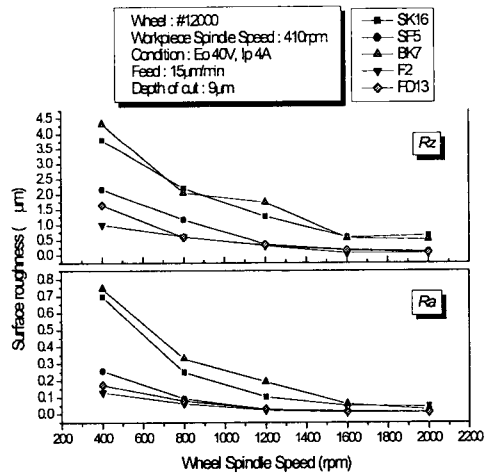


Fig. 6 Relationship between surface roughness and wheel spindle speed

3. 2 이송속도 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 7은 광학유리 5종류를 주축회전속도 $1200 \text{ rpm}(75.4 \text{ m}/\text{min})$, 절입깊이 $9 \mu\text{m}$ 에서 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 광학유리 모두 이송속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 나빠지는 것을 볼 수 있다. 이송속도 $15 \mu\text{m}/\text{min}$ 이하의 속도에서 정상적인 연삭이 이루어져 표면 거칠기가 양호하게 나타났으나 반면 이송속도 $15 \mu\text{m}/\text{min}$ 이상에서는 표면거칠기가 급격히 나빠지는 경향을 보

인다. 특히 SK16, BK7이 다른 SF5, F2, FD13보다 급격히 나빠짐을 볼 수 있다. 이는 높은 경도를 갖는 재료가 높은 전단각도를 가져 표면거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 사료된다

이송속도 변화에 따른 표면거칠기는 연삭면 거칠기에 큰 영향을 보였는데, 이는 이송속도가 클수록 연삭 슷돌 날의 높이가 불규칙적으로 분포되고, 이에 따라 연삭면이 거칠어졌기 때문으로 사료된다.

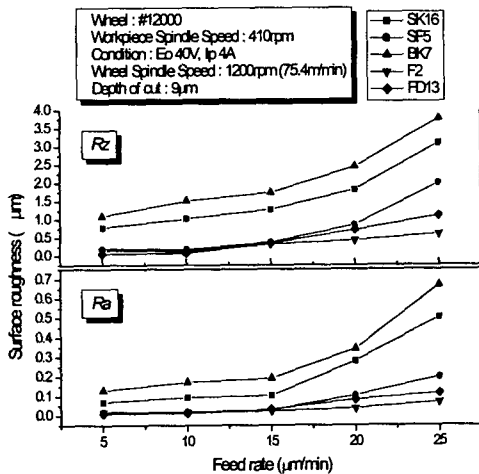


Fig. 7 Relationship between surface roughness and feed rate

3. 3 절입깊이 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 8은 광학유리 5종류를 주축회전속도 1200 rpm(75.4 m/min), 이송속도 15 μm/min에서 절입깊이 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 동일한 이송속도에서 절입깊이의 증가에 따라 비례적으로 표면 거칠기가 증가하고 있다. 이를 보면 절입깊이가 작을수록 가공면이 좋아짐을 보이고 있는데 이는 절입깊이가 작을수록 연삭 저항이 작아지고 연삭입자의 크기와 관련되는 것으로 판단되며 사용된 입자의 입경이 작을수록 연삭깊이가 작아져야 효율적인 경면가공을 행할 수 있다고 판단된다. 이는 실험에 사용한 #12000 경우 6 μm이하의 절입으로 공작물을 가공하는 것이 표면 거칠기의 향상에 도움을 준다. 결국 사용된 입경에 맞는 연삭깊이를 설정하여야 한다. 절입깊이가 9 μm 이상일 때는 거칠기(Ra)가 나빠짐을 볼 수 있는데 이는 연속된 가공 중에서 전해현상에 의한 본드재의 용출이 가속한 절입에 의해 마모된 지립의 탈락에 충분히 미치지 못함에 기인하는 것

로 사료된다.

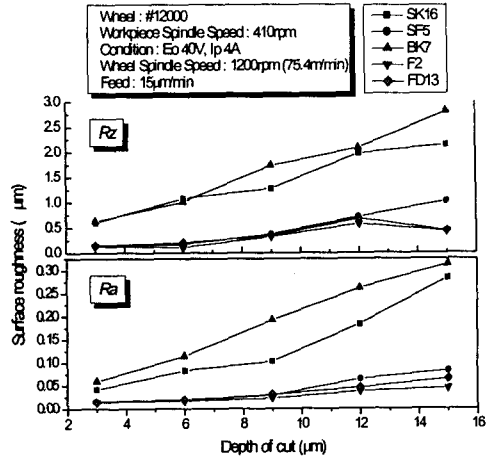


Fig. 8 Relationship between surface roughness and depth of cut

3. 4 휠 입도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 9는 광학유리 5종류를 주축회전속도 1200 rpm(100.5 m/min), 이송속도 15 μm/min, 절입깊이 9 μm에서 입도의 변화에 따른 표면거칠기를 측정된 결과이다.

동일한 조건하에서 입도 #200, #200-#800, #200-#800-#12000 으로 순차적 가공 공정으로 수행하였다. 그래프에서 나타난 것처럼 다른 변수보다 슷돌 입자의 사이즈에 따라서 뚜렷하게 표면조도에 차이가 크게 나는 것을 볼 수 있다. 이와같은 슷돌입자의 의존성은 ELID 연삭에서 특히 뚜렷하게 나타났다. 따라서 슷돌입자 사이즈가 작은 슷돌을 사용할 경우 더욱 정밀한 표면을 가공할 수 있게 된다.

3. 5 연삭액 분무 유무의 비교

Fig. 10은 광학유리 5종류를 주축회전속도 1600 rpm(100.5 m/min), 이송속도 15 μm/min, 절입깊이 9 μm, #12000의 휠을 사용하여 Eo = 40V, Ip = 4A의 동일한 조건에서 연삭액을 고압으로 분사한 경우와 사용하지 않은 경우에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다.

연삭액을 사용하지 않은 경우 SK16은 0.0732 μm, SF5 = 0.023 μm, BK7 = 0.0624, F2 = 0.032 μm, FD13 = 0.0334 μm의 Ra 값을 나타내었고 고압으로 연삭액을 분사

한 경우는 SK16은 0.0421 μm , SF5 = 0.009 μm , BK7 = 0.0408, F2 = 0.0116 μm , FD13 = 0.011 μm 의 양호한 Ra 거칠기값을 얻을 수 있었다.

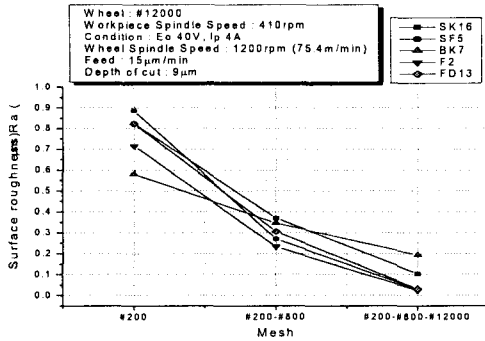


Fig. 9 Relationship between surface roughness and wheel mesh

고압으로 연삭액을 분사한 경우가 사용하지 않은 경우보다 약 2배 정도 좋은 표면 거칠기값을 얻었다. 이는 탈락된 칩이 굽힘현상을 일으키는 것을 방지하여 주기때문으로 생각된다. 따라서 이 부분에도 고압의 연삭액을 분무해야 할 것이다.

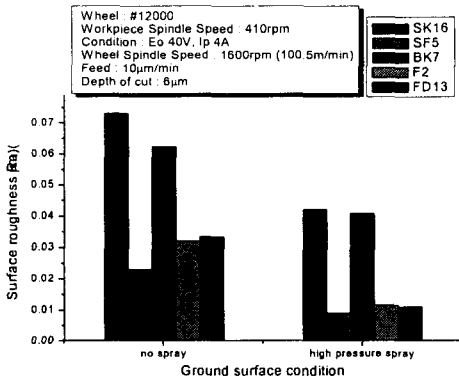


Fig. 10 Relationship between surface roughness and ground surface condition (No spray and high pressure spray)

4. 결론

1. 광학유리 5종류는 주축회전속도 1600 rpm(100.5 m/min)이상, 이송속도 15 $\mu\text{m}/\text{min}$ 이하, 절입깊이 6 μm 이하에서 정상적인 연삭이 이루어지며 고능률, 고정도의 경면을 얻을 수 있었다.

2. 전해 인프로세스 드레싱(ELID)의 연삭시스템을 이용해 #12000 주철본드 다이아몬드휠을 사용하여 공작물회전속도 410rpm, 주축회전속도 2000rpm(125.6 m/min), 이송속도 5 $\mu\text{m}/\text{min}$, 절입깊이 3 μm 가공조건에서 광학 유리 SK16 \Rightarrow Ra=26 nm, SF5 \Rightarrow Ra= 8.5 nm, BK7 \Rightarrow Ra=23.8 nm, F2 \Rightarrow Ra=7.8 nm, FD13 \Rightarrow Ra=4.7 nm의 초정밀 경면을 얻을 수 있어 후가공을 생략한 고정도의 가공으로 적용 할 수 있음을 확인하였다.

3. 경면가공에 있어서 탈락된 입자에 의한 굽힘현상을 방지하기 위해서 가공부분에 고압의 연삭액을 분사시켜 주어야 한다.

4. 광학유리는 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 가공에서 재료 경도(H_k)의 영향을 크게 받고 있음을 알았다.

참고문헌

- 1) H. Ohmori "Electrolytic In-process Dressing(ELID) Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining", *International Journal of JSPE*, Vol. 26, No.4, pp. 273, 1992.
- 2) D.W.Lee, H.Ohmori, I.Takahashi, T.Nakagawa "Highly Efficient and Highly Accurate Cylindrical Grinding of Steel Materials Using ELID Method", ABTEC'94 Conference, pp. 59, 1994.
- 3) P.Lindsay and S.Hahn, "On the Basic Relationships between Grinding Parameters," *Annals of the CIRP*, Vol. X VI V, pp. 657~671, 1971.
- 4) H. Ohmori, "Electrolytic In-Process Dressing (ELID) Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining", *JSPE* 59-09, pp. 1415~1457, 1993.
- 5) H.Ohmori and T.Nakagawa, "Mirror Surface Grinding on Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing", *Annals of the CIRP* Vol. 39, pp. 329~332, 1990