

수정유리와 SF-5 유리의 ELID 연삭특성 비교

박상후*(한국과학기술원 대학원, 기계공학과), 양동열(한국과학기술원, 기계공학과),
곽태수(RIKEN, 소형재연구실), 오오모리 히토시(RIKEN, 소형재연구실)

Comparative Study on the Grinded Surface Characteristics of Quartz Glass and SF-5 Glass using ELID(Electrolytic In-Process Dressing) Grinding

S. H. Park*(Graduate School, KAIST), D. Y. Yang(Mechanical Eng. Dept., KAIST),
T. S. Kwak(Material Fabrication Lab., RIKEN), H. Ohmori(Material Fabrication Lab., RIKEN)

ABSTRACT

A precise fabrication technology of glass is increasingly demanded for the latest industrial applications of spherical lenses, micro-optical components, laser applications and so on. Most of cases, the surface roughness of glass is required to be minute for improving the optical characteristics. Then, the machining characteristics of SF-5 glass and quartz glass were studied by using the ELID grinding process to get mirror surface and productivity compared with a general lapping process. A rotary type grinder with ELID generator was used to make the mirror surface of glass and a Mitutoyo surface tester and a nano-hardness tester were also used to measure the grinded surface of glass. As the results of experiments, they showed that the surface roughness(Ra) of SF-5 glass was under 7.8 nm and that of quartz glass was under 3.0 nm using the # 8000 grinder. So, the possibility of highly efficient and accurate surface for optical components can be achieved by the ELID grinding process.

Key Words : ELID Grinding(전해 연속 드레싱), Quartz Glass(수정유리), SF-5 Glass(SF-5 유리), Nano-hardness Tester(나노 표면 경도측정기)

1. 서론

최근 기능성 부품과 제품들이 점차 소형화, 경량화, 또는 집적화가 되면서 고정밀도의 미소 부품 가공기술에 대한 새로운 요구가 급증하고 있다. 특히, 정보통신 기술의 발달과 더불어 광통신 부품, 정보저장기기 등에 필요한 초정밀 부품의 제조방법에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 그 중에서도 유리를 이용한 가공기술은 지금까지는 주로 연마 공정(lapping process)에 의존하였지만 많은 공정시간이 요구되어 생산성에 문제가 되거나 형상에 제한을 받는 경우가 많다. 또한 공정자체를 엄밀하게 제어하기 어려운 단점과 연마공정에 사용되는 슬러리의 환경오염 문제로 유리 재료에 대한 새로운 가공기술의 연구가 진행되었다^(1,2).

본 연구에서는 유리재료 중에서 고정밀도의 부

품가공에 많이 사용되는 SF-5 유리와 수정유리(quartz glass)에 대하여 정밀한 표면조도를 가지기 위한 ELID 평면 연삭 특성에 관하여 연구해 보았다. ELID(Electrolytic In-Process Dressing) 연삭은 전해 연속 드레싱의 영문 약자로 CBN 또는 다이아몬드와 같은 초경질 입자를 갖는 스톨을 가공공정 중에 전해방식으로 드레싱(dressing)하는 기법이다. 일반적인 연삭 드레싱은 가공 전에 한번 행하고 가공 중에 드레싱이 필요할 때에는 공정을 정지하고 드레싱을 재작업하는 어려움이 있었다. 그러나 연속 드레싱에서는 공정 중에도 연속적으로 드레싱을 행하여 연삭을 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 ELID 연삭법은 메탈본드 스톨을 이용하여 연속적으로 전해 드레싱을 하면서 연삭이 가능한 고효율, 고정밀도의 연삭 가공 방법이다⁽³⁾. 그리고 최근에는 ELID 연삭법의 고정밀도를 이용한 초소형 부품 가공에

대한 다양한 연구와 ELID 연삭법의 공정 최적화에 대한 연구 등이 진행되고 있다⁽⁴⁻⁷⁾.

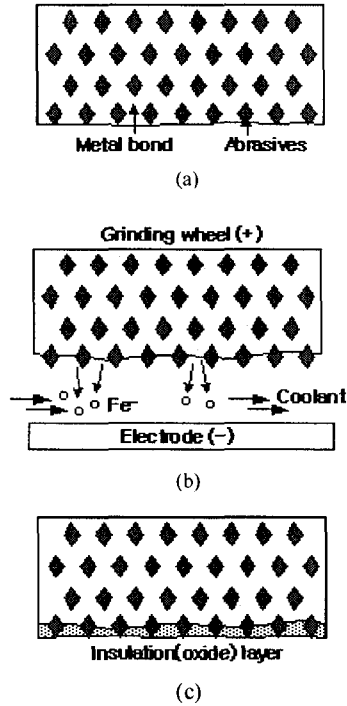


Fig. 1 Schematic mechanism of electrolytic in-process dressing ; (a) after truing, (b) dressing start, (c) after dressing

Fig. 1 에는 연속 전해 드레싱에 대한 개략적인 메커니즘을 나타낸 것인데, Fig. 1 (a)의 트루잉(truing) 공정은 연삭 스톨의 표면을 균일하게 하는 작업을 나타낸 것이고, (b)와 (c)는 드레싱이 진행되면서 연삭 스톨의 표면 금속 이온이 빠져 나오면서 스톨의 다이아몬드 형상이 스톨의 외면에 원활하게 뚫출되고 스톨의 표면에는 수산화물 또는 산화물 등의 부도체 피막이 형성되는 것을 나타낸 것이다. 이러한 산화물은 연삭시 쉽게 스톨 표면에서 박리되어 스톨의 다이아몬드 형상이 항상 예리하게 유지시켜줌으로써 난삭재 등의 가공에 도움을 준다. 또한 산화물의 두께는 가공 조건에 따라 전류 및 전압의 변동으로 조절이 가능하며 연삭 공정 중에서도 피막층의 박리와 재생을 통하여 일정한 두께를 유지할 수 있다.

2. 실험 및 평가방법

2.1 실험장치의 구성

ELID 연삭 장비는 일본 이화학연구소(RIKEN) 소형재연구실의 로타리 타입의 연삭 기기를 사용하였으며 실험장비의 규격은 Table. 1 에 나타내었다. 그리고 Fig. 2 는 개략적인 시스템 구성도를 나타낸 것이다.

Table 1 Specification of experimental equipments

Machine tool	Rotary type surface grinder (NACHI model)
Grinding wheel	SD325N100M, SD1200N100M
	SD4000N100M, SD8000N100M
Power supply	FUJI ELIDER 910 (Fuji die Co.)
Fluid	NX-VD-normal + tap water
Workpiece	SF-5 glass, Quartz glass

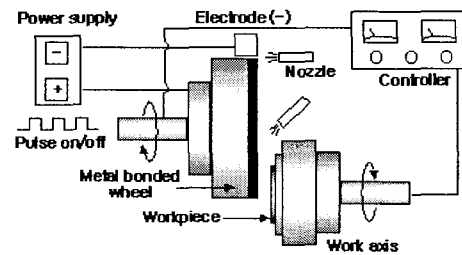


Fig. 2 Schematic diagram of rotary type surface grinder

연삭 가공기의 분해능은 축 방향으로 0.5 μm 까지 조절이 가능하다. 그리고 연삭 스톨은 직경이 150 mm, 폭이 10 mm 이다. 시편의 규격으로는 SF-5 유리 및 수정유리 모두 원형 형태로 직경과 두께가 각각 100 mm, 40 mm 이며 소프트 왁스로 시편을 원판 지그에 고정하여 사용하였다.

가공된 표면의 조도(surface roughness)를 측정하기 위해서 접촉식 표면측정기(Mitutoyo surftest-701)를 이용하여 시편의 중심부와 가장자리의 표면조도(R_a , R_{max})를 측정하여 비교하였다. 측정속도는 0.1 mm/s 이고 측정길이는 2.05 mm 이다. 스톨 #8000 으로 연마가 완료되었을 때 시편표면의 표면층 정도를 측정하기 위하여 나노 표면경도 측정기(CSM Nano-hardness Tester, Micro Photonics Inc.)⁽⁸⁾를 사용하였다.

2.2 실험방법 및 가공조건

연삭 작업은 일반적으로 스톨의 다이아몬드의 크기가 큰 것부터 조밀한 순서로 진행하여 경면 가공을 하게 되는데 본 연구에서는 스톨의 번호가 #325 부터 시작하여 #1200, #4000, #8000 까지 연삭을 실시하였다. 또한 모든 스톨은 연삭 작업이 시작되기 전에 트루잉과 초기 드레싱과정을 거치게 된다.

트루잉 공정 후에는 슛돌의 표면이 메탈본드 부분과 다이아몬드 부분이 균일하게 나타났으며 초기 드레싱 후에는 표면에 산화층이 형성됨을 확인할 수 있었다. 전해 드레싱 시 시간에 따른 출력 전압과 전류를 비교해 보면, 전해 드레싱 시작점에는 전압과 전류가 25V, 3A 로 나타났지만 시작점 30 초가 될 때까지 급격히 전류가 줄어들게 되고 3 분이 될 때 전압과 전류가 각각 54V, 0.7A 로 떨어짐을 알 수 있다. 이것은 슛돌의 표면에 산화층이 절연피막으로 작용하기 때문이며 3 분 이후로는 전압과 전류가 거의 일정한 값으로 안정되게 유지된다. 일반적으로 트루잉과 드레싱에 대한 평가는 육안으로 확인을 하여 실시한다. 트루잉과 초기 드레싱 공정에 대한 실험조건은 Table 2 에 기술하였다.

Table 2 Experimental conditions for truing and dressing

Truing	
Truing wheel	200 rpm
Grinding wheel	1500 rpm
Truing time	20 minutes
Dressing	
Current / Voltage input	10A / 60V (2 μ s in/out)
Dressing time	20 minutes
Grinding wheel	1500 rpm
Electrolytic gap / fluid	0.1 mm / NX-VD-normal

트루잉과 드레싱이 끝나게 되면 연삭 공정으로 들어가게 되는데 연삭 작업 조건은 Table 3 에 나타내었다. 연삭 조건에서 전해 연속 드레싱을 위한 전압과 전류의 조건은 모든 경우에 60V, 10A(2 μ s in/out pulse type)로 두었다. 또한 각 공정에서 연삭이 끝난 뒤에 30 초간 슛돌을 공회전(spark out)시켜 연삭면이 균일하게 하였다.

Table 3 Grinding conditions of SF-5 and quartz glass

	Depth of Cut (μ m)	Grinder wheel (rpm)	Workpiece Wheel (rpm)	Feed (μ m/min)	Spark out(sec)
#325	50	2000	300	5	30
#1200	30	2000	300	2	30
#4000	20	2000	300	1	30
#8000	20	2000	300	1	30

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연삭스uttle 입도에 따른 표면조도 변화

Fig. 3 와 Fig. 4 에는 실전류가 0.2~0.4A 수준의 적절한 ELID 연삭조건으로 구한 SF-5 유리 와 수정 유리의 슛돌입도와 표면조도의 관계를 시편의 중심

부에서 측정한 R_a , R_{max} 값으로 비교해 보았다.

실험 결과에서 슛돌입도가 미세할수록 표면조도는 급격히 좋아짐을 알 수 있으며, R_{max} 기준으로 50 nm 수준 이하가 되기 위해서는 SF-5 유리의 경우 슛돌입도 번호가 #8000 이상이 되어야 하고 수정 유리의 경우에는 #4000 정도에서도 충분한 것으로 나타났다. 또한 이러한 경우에 표면조도의 평균 값을 의미하는 R_a 는 수 nm 수준으로 매우 정밀하게 나타났다. 그리고 수정유리의 경우는 SF-5 유리에 비하여 ELID 연삭성이 더 우수한 것으로 판단되며 슛돌입도 번호가 #4000 이상에서는 표면조도의 변화가 거의 완만하게 나타났다. 그러므로 ELID 연삭가공에서 보다 정밀도가 높은 제품을 얻기 위해서는 수정유리가 SF-5 유리에 비하여 더 유리한 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

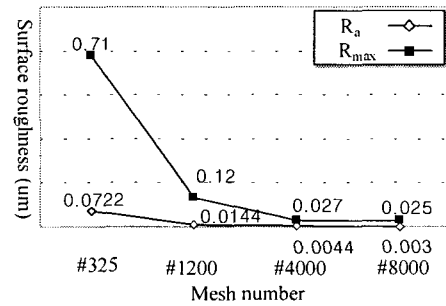


Fig. 3 Effects of mesh number on the surface roughness of SF-5 glass

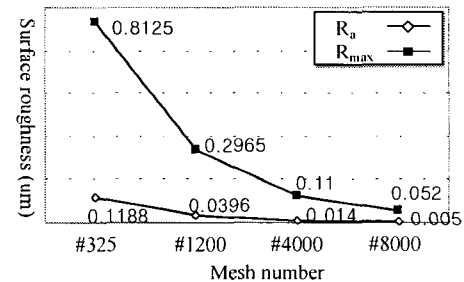


Fig. 4 Effects of mesh number on the surface roughness of quartz glass

3.2 SF-5 유리 와 수정유리의 표면경도 측정

SF-5 유리 와 수정유리의 연삭성 차이를 알아보기 위하여 경도를 최근 나노 관련기술의 발달로 얇은 재료 또는 피막층에 대한 경도를 측정할 수 있는 나노 표면경도 측정기를 이용하여 측정해 보았다. 본 연구에 사용된 나노 표면경도 측정기는 연성인 재료에서 취성이 강한 재료까지 다양한 재료

에 적용이 가능하고 최대하중은 300 mN 까지이며 하중에 대한 분해능은 1 uN 이다. 또한 눌림자국 (indentation mark)의 깊이는 최대 20 μm 이며, 깊이에 대한 분해능은 0.03 nm 이다. 따라서 유리와 같은 취성 재료도 표면에 거시적인 균열을 남기지 않고 경도, 탄성계수 등의 기계적 특성을 구할 수 있다⁽⁸⁾. 측정은 오차를 줄이기 위해 시편의 10 군데에서 측정하여 평균치로 계산하였다. 실험결과 SF-5 유리의 경우 비커스 경도(Vickers hardness) 평균값으로 555.758 Hv 로 나타났으며 수정유리의 경우에는 409.22 Hv 로 나타났다. 따라서, 수정유리는 표면경도의 차이에 의하여 ELID 연삭에 대하여 유리한 조건을 가지고 있기 때문에 판단된다. 그러므로 동일한 조건의 ELID 연삭가공에서 보다 정밀도가 높은 제품을 얻기 위해서는 수정유리가 더 유리함을 알 수 있었다.

Table 4 에는 표면경도 측정에 사용된 주요 실험인자를 나타내었으며, Fig. 5 에는 나노 표면경도 측정기를 이용한 측정과정을 나타낸 것이다.

Table 4 Parameters for measurement on surface hardness

Indenter type	Berkovich (B-E64)
Indenter material	Diamond
Max. load	10.0 mN
Loading/Unloading rate	20.0 mN/min

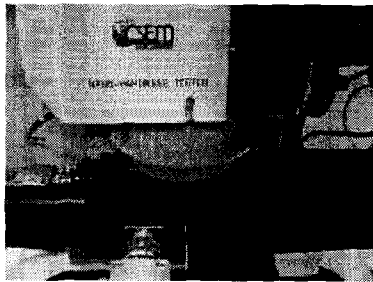


Fig. 5 Surface hardness test

4. 결론

렌즈 등의 초정밀 광학부품 제작에 적용이 가능한 SF-5 유리와 수정유리에 대한 ELID 연삭성을 연구한 결과 다음과 같은 결과를 확인하였다.

- 1) ELID 연삭법을 적용하여 슷돌입도가 #8000 에서 수정유리의 경우에는 R_{max} 가 25 nm 그리고 SF-5 유리의 경우에는 52 nm 로 나타났다.
- 2) 수정유리의 경우 슷돌입도가 #4000 수준에서

R_{max} 가 27 nm 수준의 정밀한 표면조도를 얻을 수 있었다.

- 3) 동일 연삭조건에서 수정유리는 SF-5 유리에 비하여 연삭성이 우수하며 정밀한 부품제작에 더 유리함을 알 수 있었다.
- 4) ELID 연삭법을 적용하여 유리소재에서도 나노급의 표면조도를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Ohmori H., Lin W., Moriyasu S., and Yamagata Y., "Microspherical Lens Fabrication by Cup Grinding Wheels applying ELID Grinding," RIKEN Reivew, No. 34(April, 2001), pp. 3-5, 2001.
2. 김정년, 김영태, 박철우, 이용철, 오오모리, 이상조, "HDD 용 Glass Disk 의 ELID 연삭 성능 평가," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 2 호, pp. 161-168, 2000.
3. Ohmori H. and Nakagawa T., "Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Material by ELID Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels," Annals of the CIRP, Vol. 44, pp. 287-290, 1995.
4. 최재영, 이현우, 최현종, 이석우, 정해도, "전해 연속 드레싱을 이용한 마이크로 공구제작 기술," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 508-511, 2002.
5. Uehara Y., Ohmori H., Moriyasu S., Yamagata Y., Lin W., and Anzai M., "Microfabriaction using Linear Motor Profiler with Main Spindle of Ultrahigh Rotation Speed of 300,000 rpm," RIKEN Review, No. 34(April, 2001), pp.19-24, 2001.
6. Ohmori H., Lin L., Lin W., Kasai T., and Itoh N., "Super Smooth Surface Finishing of X-ray mirror Materials by ELID-lap Grinding and Metal-Resin Bonded Wheel," Int. Workshop on Extreme Optics and Sensors, Tokyo, Japan, pp. 47-50, 2003
7. Lim H.S., Fathima K., Kumar A.S., and Rahman M., "A Fundamental Study on the Mechanism of Electrolytic In-process Dressing(ELID) Grinding," Int. J. of Machine Tools & Manufacture, No. 42, Vol. 8, pp.935-943, 2002.
8. "Introduction on the CSM Nano-hardness Tester," <http://www.microphotonics.com/nht.html>