

나노 표면거칠기를 위한 SF-5 유리와 수정유리의 ELID 연삭 특성에 관한 연구

곽태수*, 박상후**, 오오모리 히토시*, 배원병***, 양동열#

A Study on the ELID Grinding Characteristics of SF-5 Glass and Quartz Glass for the Nano Surface Roughness

Tae Soo Kwak*, Sang Hu Park**, Ohmori Hitoshi*, Won Byong Bae*** and Dong-Yol Yang#

ABSTRACT

The precision fabrication of glass is increasingly demanded for the latest industrial applications of spherical lenses, micro-optical components, and so on. In many cases, the surface roughness of glass is required to be minute for improving the optical characteristics. In this paper, machining characteristics of SF-5 glass and quartz glass are studied by using the ELID grinding process to get mirror surface and productivity compared with a general lapping process. A rotary type grinder with air spindle was used for the experiments. Mitutoyo surface tester and AFM 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), Surface Roughness (표면거칠기)

1. 서론

최근 전자 디바이스, 자기헤드 등의 전자부품과 렌즈, 광화이버 등의 광학부품의 고품질에 대한 수요가 크게 늘면서 실리콘, 유리, 세라믹 등 난삭재의 초정밀 가공이 요구되고 있다. 이러한 재료들은 가공성이 나쁘므로 초정밀 미세 가공에 어려움을 겪고 있으며, 주로 연마제를 이용한 랩핑(lapping) 또는 폴리싱(polishing) 공정으로 이들

재료의 가공에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 가공방법은 슬러리의 비산으로 작업환경이 나빠지고, 슬러리 내의 입자가 작업자의 폐에 축적되어 건강에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 수작업으로 인한 가공효율이 나쁜 단점을 가지고 있다¹. 따라서 난삭재를 대상으로 보다 안전하고 가공효율이 높은 초정밀 부품의 제조방법에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

유리는 난삭재에 속하는 대표적인 재료로서

* 접수일: 2003년 3월 17일; 게재승인일: 2003년 4월 25일

* The Institute of Physical and Chemical Research(RIKEN), Japan

** 한국과학기술원 기계공학과 대학원

*** 부산대학교 기계공학부

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

Email: dyyang@kaist.ac.kr, Tel: (042) 869-3214

이를 이용한 가공기술은 주로 랩핑 공정에 의존하고 있으므로 많은 공정시간이 요구되며 형상에 제한을 받는 경우가 많다. 또한 공정자체를 엄밀하게 제어하기 어려운 단점과 랩핑에 사용되는 슬러리의 환경오염 문제로 유리 재료에 대한 새로운 연삭 가공기술의 연구가 진행되고 있다^{2,3}.

본 연구에서는 수정유리(quartz glass)와 다이오드 레이저용 이중렌즈의 재료로 알려져 있는 SF-5 유리에 대하여 수십 나노의 표면거칠기 정밀도를 가지기 위한 ELID 평면 연삭 특성에 관하여 연구하였다.

ELID(Electrolytic In-Process Dressing) 연삭은 전해 연속 드레싱의 영문 약자로 CBN 또는 다이아몬드와 같은 초경질 입자를 갖는 슷돌을 연삭 가공 중에 전해방식으로 드레싱(dressing)하는 기법이다. 일반적인 연삭 드레싱은 가공 전에 한번 행하고 가공 중에 드레싱이 필요할 때에는 공정을 정지

하고 드레싱을 재작업하는 번거로움이 있었다.

그러나 ELID 연삭법에 의한 연속 드레싱에서는 연삭과 드레싱이 병행되므로 연삭 슷돌의 눈매움 현상을 방지할 수 있는 장점이 있다. 이러한 ELID 연삭법은 메탈본드 슷돌을 이용하여 연속적으로 전해 드레싱을 하면서 연삭하는 고효율, 고정밀도의 연삭법으로 알려져 있다⁴. 최근에는 ELID 연삭법의 고정밀도를 이용한 초소형 부품 가공에 대한 다양한 연구와 ELID 연삭법의 공정 최적화에 대한 연구 등이 진행되고 있다⁵⁻⁸.

Fig. 1 은 연속 전해드레싱에 대한 개략적인 메커니즘을 나타낸 것이다. Fig. 1 (a)는 트루잉(truing) 공정을 통한 연삭 슷돌의 표면을 균일하게 하는 작업을 나타낸 것이고, (b)는 드레싱시 금속성 본드재의 금속 이온이 빠져 나오면서 다이아몬드 입자가 슷돌의 외면에 원활하게 돌출되는 과정을 보여주고 있으며, (c)는 슷돌의 표면에 수산화물 또는 산화물 등의 부도체 피막이 형성되어 다이아몬드 입자를 적절한 힘으로 고정하게 되는 과정을 단계적으로 보여주고 있다. 이러한 산화물은 연삭시 슷돌 표면에서 쉽게 박리되어 슷돌의 눈매움 현상을 방지해 준다. 따라서 다이아몬드 입자가 피삭재를 쉽게 가공할 수 있게 해주므로 난삭재의 경우에도 가공성이 좋아지는 장점이 있다. 또한 산화물의 두께는 가공 조건에 따라 전류 및 전압의 변동으로 조절이 가능하며 연삭 중에도 산화 피막층의 박리와 재생을 통하여 일정한 두께를 유지할 수 있다.

2. 실험 및 평가방법

2.1 ELID 연삭 실험장치의 구성

ELID 연삭 장비는 일본 이화학연구소(RIKEN)의 횡형 로타리 평면 연삭반을 사용하였으며 실험 장비의 규격은 Table 1 에 나타내었다.

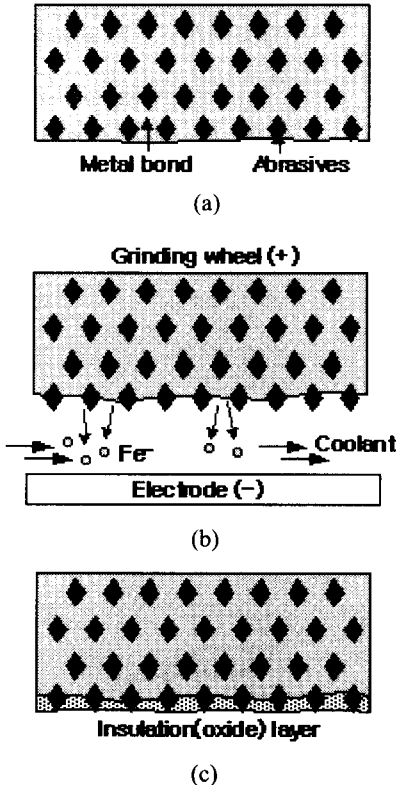


Fig. 1 Schematic mechanism of electrolytic in-process dressing ; (a) after truing, (b) dressing start, (c) after dressing

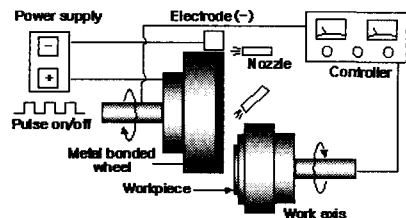


Fig. 2 Schematic diagram of rotary type surface grinder

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

또한 Fig. 2 는 개략적인 시스템 구성도이다. 연삭 가공기의 분해능은 축 방향으로 0.5 μm 까지 조절이 가능하다. 그리고 연삭 슷돌은 직경이 150 mm, 폭이 10 mm 이다. 시편의 규격으로는 SF-5 유리 와 수정유리 모두 원형으로 직경과 두께가 각각 100 mm, 4 mm 이며 소프트 왁스로 시편을 원형 지그에 고정하여 사용하였다. Fig. 3 은 ELID 연삭 가공이 시작되기 전의 사진이다.

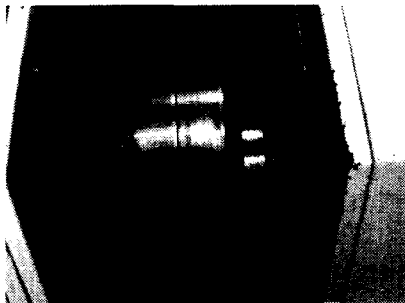


Fig. 3 Photograph of ELID grinding setup

2.2 표면거칠기 측정 및 평가

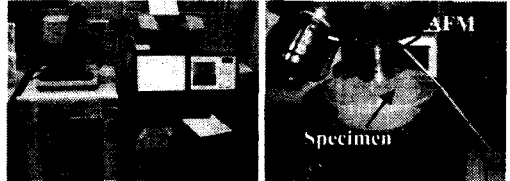
가공 표면거칠기(surface roughness)를 측정하기 위해서 Fig. 4(a)의 접촉식 표면거칠기 측정기 (Mitutoyo surfest-701)를 이용하여 시편의 중심부와 가장자리에서 표면거칠기(R_a , R_{max})를 각각 측정하였으며, 측정속도는 0.1 mm/s 이고 측정길이는 2.05 mm 이다. 슷돌 #8000 으로 연삭이 완료되었을 때 시편의 표면을 보다 자세히 관찰하기 위하여 나노 표면경도 측정기(CSM Nano-hardness Tester, Micro Photonics Inc.)⁸와 AFM 장치를 이용하여 가공 표면의 상태를 관찰하였다. Fig. 4(b)는 표면경도와 표면 상태 측정에 사용된 장비의 사진이다.

2.3 실험방법 및 가공조건

연삭 작업은 일반적으로 슷돌내 다이아몬드입



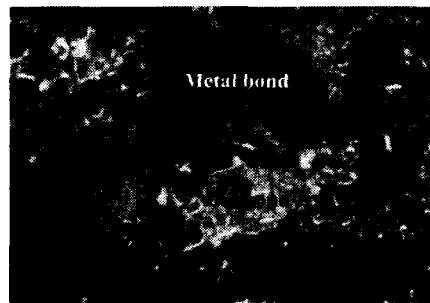
(a)



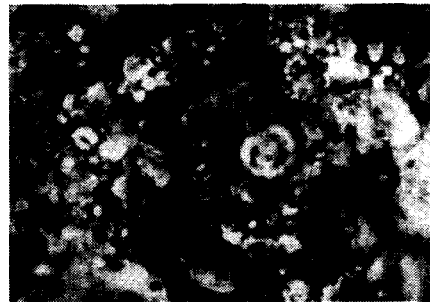
(b)

Fig. 4 Photographs of (a) surface tester and (b) AFM

자의 크기가 큰 것부터 조밀한 순서로 경면 가공을 하였으며, 본 연구에서는 #325 에서 #1200, #4000, #8000 까지의 슷돌을 사용하여 연삭하였다. 또한 모든 슷돌은 연삭 작업이 시작되기 전에 트루잉과 초기 드레싱 과정을 거쳤다.



(a)



(b)

Fig. 5 Photograph of the surface of #325 grinding wheel (a) before dressing and (b) after dressing ($\times 1000$)

Fig. 4 에는 #325 슛들의 드레싱 전과 드레싱 후의 표면을 1000 배 확대(enlarger: OVM 1000NM model, Olympus Co.)한 사진이다. Fig. 5(a) 에서 드레싱 전의 슛돌 표면에 주철 본드재와 다이아몬드 입자를 볼 수 있으며, Fig. 5(b) 에서는 드레싱 후 슛돌 표면에 산화층이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

초기의 전해 드레싱시 시간에 따른 출력 전압과 전류를 비교해 보면, 전해 드레싱 시작점에는 전압과 전류가 25V, 3A 로 나타났지만 시작한지 30 초가 될 때까지 급격히 전류가 줄어들게 되고 3 분이 될 때 전압과 전류가 각각 54V, 0.7A 로 안정화 되었다. 이것은 슛들의 표면에 생성된 산화층이 절연피막으로 작용하여 일정 시간이 지나면 전압과 전류가 거의 일정한 값으로 유지되는 것으로 생각된다. 일반적으로 트루잉과 드레싱에 대한 평가는 육안으로 확인한다. 트루잉과 초기 드레싱 공정에 대한 조건은 Table 2 와 같다.

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 끝난 후 연삭을 개시하였으며 연삭 작업 조건은 Table 3 과 같다.

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

연삭 조건에서 전해 연속 드레싱을 위한 전압

과 전류의 조건은 모든 경우에 60V, 10A(2 μ s in/out pulse type)로 두었다. 또한 각 공정에서 연삭이 끝난 뒤에 30 초간 슛들을 공회전(spark out)시켜 가공물의 연삭면이 균일하게 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연삭스�돌 입도에 따른 표면거칠기 변화

Fig. 6 과 Fig. 7 에는 실전류가 0.2~0.4A 수준의 적절한 ELID 연삭 조건으로 구한 SF-5 유리와 수정유리의 슛돌입도와 표면거칠기의 관계를 시편의 중심부에서 측정된 R_a , R_{max} 값으로 비교하였다.

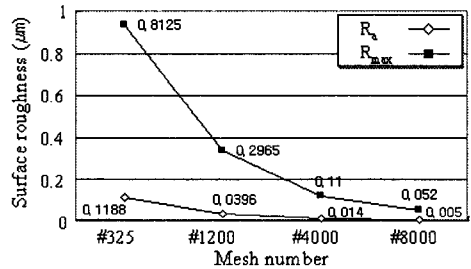


Fig. 6 Effects of mesh number on the surface roughness of SF-5 glass

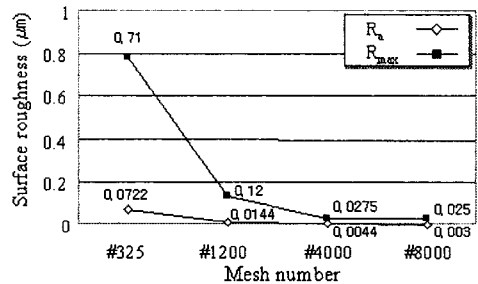


Fig. 7 Effects of mesh number on the surface roughness of quartz glass

Fig. 6 과 Fig. 7 의 결과에서 슛돌입도가 미세할 수록 표면거칠기는 급격히 좋아짐을 알 수 있으며, R_{max} 기준으로 50 nm 수준 이하가 되기 위해서는 SF-5 유리의 경우 슛돌입도 번호가 #8000 이상이 되어야 하고 수정유리의 경우에는 #4000 정도에서도 충분한 것으로 나타났다. 또한 이러한 경우에 표면거칠기의 평균값을 의미하는 R_a 는 수 nm 수준으로 매우 정밀하게 나타났다. 그리고 수정유리

의 경우는 SF-5 유리에 비하여 ELID 연삭성이 더 우수하였으며 슛돌입도 번호가 #4000 이상에서는 표면거칠기의 변화가 거의 완만하게 나타났다. 따라서 ELID 연삭 가공에 있어서 표면거칠기는 수정유리가 SF-5 유리에 비하여 우수함을 알 수 있었다.

본 실험에서 ELID 연삭에 사용된 평면 연삭반은 로타리 타입이므로 Fig. 8 에 나타낸 바와 같이 피삭재의 회전중심에서 슛돌과 접촉하는 부분의 거리가 달라 발생하는 선속도(linear velocity) 차이에 의해서 시편의 중심부와 가장자리의 연삭특성이 달라지므로 피삭재의 중심부와 가장자리의 표면거칠기를 각각 측정하였다. Fig. 9 는 SF-5 유리의 중심부와 가장자리에서의 슛돌 입도에 따른 표면거칠기(R_{max}) 변화 그래프이다.

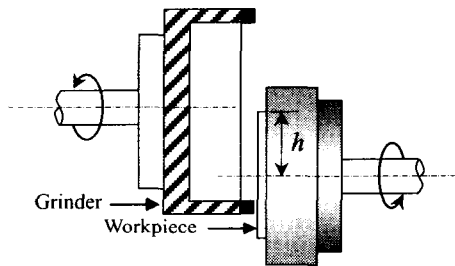


Fig. 8 Schematic mechanism of rotary type grinder

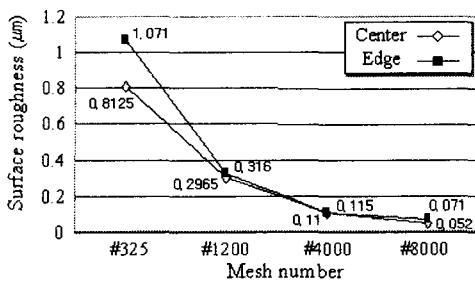


Fig. 9 Comparison the surface roughness of center point and edge point of SF-5 glass

스�돌입도가 미세할수록 시편의 가장자리와 중심부의 표면거칠기 차이는 미소하였으며, 슛돌입도가 #8000 에서는 R_{max} 차이가 19nm 이내로 나타났다. 따라서 로타리 타입의 연삭기에서 ELID 연삭시 시편의 가장자리와 중심부의 연삭성 차이는 무시할 만한 수준이었다.

3.2 SF-5 유리와 수정유리의 표면경도 측정

SF-5 유리와 수정유리의 연삭성 차이를 알아보기 위하여 경도를 최근 나노 관련기술의 발달로 얇은 재료 또는 피막층에 대한 경도를 측정할 수 있는 나노 표면경도 측정기(Fig. 4(b))를 이용하여 측정하였다. 본 연구에 사용된 나노 표면경도 측정기는 연성인 재료에서 취성이 강한 재료까지 다양한 재료에 적용이 가능하고 최대하중은 300 mN 까지이며 하중에 대한 분해능은 1 μ N 이다. 또한 눌림자국(indentation mark)의 깊이는 최대 20 μ m이며, 깊이에 대한 분해능은 0.03 nm 이다. 따라서 유리와 같은 취성 재료도 표면에 거시적인 균열을 남기지 않고 경도, 탄성계수 등의 기계적 특성을 구할 수 있다⁹.

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

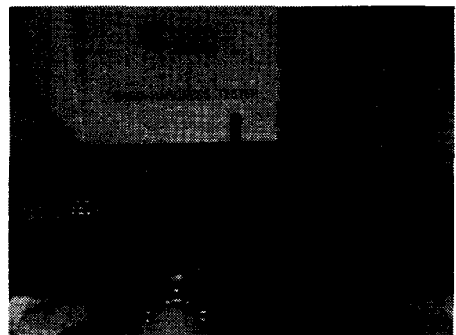


Fig. 10 Surface hardness test

측정은 오차를 줄이기 위해 시편의 10 군데에서 측정하여 평균치로 계산하였다. 실험결과 SF-5 유리의 경우 비커스 경도(Vickers hardness) 평균값으로 555.76 Hv 로 나타났으며 수정유리의 경우에는 409.22 Hv 로 나타났다. 일반적으로 피삭재는 인성이 높고 경도가 낮은 재료에서 슛돌의 눈매음 현상이 심해지므로 우수한 표면거칠기를 얻기 어려운 경향이 있다. 그러나 유리에 대한 표면경도 측정 결과에 의하면 수정유리는 SF-5 유리에 비해 표면경도가 낮음에도 우수한 표면거칠기를 얻고

있음을 알 수 있었다. 이것은 유리 재료는 취성이 강하므로 연삭 슷들의 눈메움 현상이 상대적으로 낮아, 유리의 표면경도가 낮은 경우에 오히려 ELID 연삭시 연삭성이 좋아지는 것으로 판단된다. Table 4 는 표면경도 측정에 사용된 주요 실험인자를 나타내고 있으며, Fig. 10 은 나노 표면경도 측정기를 이용한 측정과정을 나타낸 것이다.

3.3 연삭 가공면의 AFM 측정

ELID 연삭 가공면의 상태를 보다 자세히 관찰하기 위하여 AFM⁸으로 측정하여 확인하였다. 실험에 사용된 AFM의 x, y, z 축의 분해능은 1 nm이며, 스캐닝 처리 영역은 최대 40 μm × 40 μm 이다.

본 연구에서는 측정부위는 표면거칠기를 측정했던 시편의 중심부로 하였으며 측정크기는 정사각형 형태로 26 μm × 26 μm로 하였다. Probe의 측정속도는 0.5 lines/sec로 하였다.

Fig. 11 은 연삭 가공면을 측정한 AFM 이미지 그림이다. AFM 이미지에서 급격하게 형상이 튀어나온 부분은 시편 표면의 먼지 또는 기타 오염물로 판단되며, SKD11의 금속면을 ELID 연삭한 기존 연구¹⁰와 비교할 때 전체적으로 연삭의 흔적은 거의 나타나지 않았다.

또한, 수정유리의 경우가 SF-5 유리에 비하여 표면이 균질한 것을 알 수 있는데 이것은 3.1 절의 표면거칠기 측정결과와 일치하는 것이다. 측정면적에서 평균 높이의 편차량(deviation)으로 비교해보면 수정유리가 8.89 nm 이고 SF-5 유리가 11.93 nm 로 나타났다. 따라서 AFM의 결과에서도 수정유리의 표면이 SF-5 유리보다 균일하며 우수한 경면연삭이 가능함을 알 수 있었다.

4. 결론

다이오드 레이저용 이중렌즈 등의 초정밀 광학부품 제작에 적용이 가능한 SF-5 유리와 수정유리에 대한 ELID 연삭 특성을 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) ELID 연삭법을 적용하여 슷돌입도 #8000 에서 수정 유리의 R_{max} 와 R_a 는 각각 25 nm, 3 nm 이었으며, SF-5 유리의 R_{max} 와 R_a 는 각각 71 nm, 7.8 nm 로 나노급 표면거칠기를 얻을 수 있었다.
- 2) 수정유리의 경우 슷돌입도 #4000 에서 R_{max} 와 R_a 는 각각 27.5 nm, 4.4 nm 의 나노급 표면거칠기를 얻을 수 있었다.
- 3) 동일 연삭 조건에서 수정유리는 SF-5 유리에 비하여 표면거칠기가 2.5 배 이상의 우수한 경면 연삭이 가능하였는데 이것은 나노 표면경도를 측정한 결과 수정유리가 SF-5 유리에 비하여 표면경도가 낮아 연삭특성이 더욱 우수하기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 수정유리와 SF-5 유리의 경면 연삭을 위해 ELID 연삭법을 적용한 결과 유리 소재에서도 나노 수준의 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)과 일본 과학기술 국제교류 센터(JISTEC)에서 주최하는 '2003

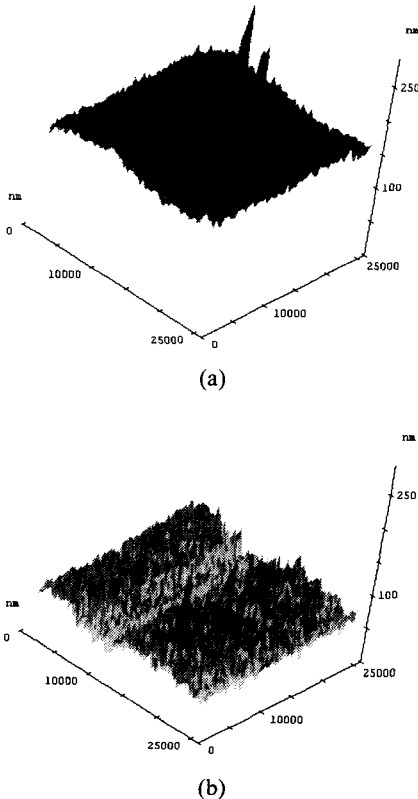


Fig. 11 AFM image of (a) quartz glass and (b) SF-5 glass

Winter Institute 연수 과정을 통해 이화학연구소 (RIKEN)의 소형재공학연구실에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. Ohmori, H., "電解 Dressing の超精密 鏡面研削の實現," Nikkei Mechanical, No. 544, 1999. 10.
2. Ohmori, H., Lin, W., Moriyasu, S. and Yamagata, Y., "Microspherical Lens Fabrication by Cup Grinding Wheels applying ELID Grinding," RIKEN Reivew, No. 34, pp. 3-5, April 2001.
3. Kim, G. Y., Kim, Y. T., Park, C. W., Lee, Y. C., Ohmori, H., Lee, S. J., "Research for Possibility of ELID Grinding of Hard Disk Glass," J. KSPE, Vol. 17, No. 2, pp. 161-168, 2000.
4. 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.
5. Choi, J. Y., Lee, H. W., Choi, H. Z., Lee, S. W. and Jeong, H. D., "A Study on the Micro Tool Fabrication Technology employing ELID," Conf. of KSPE, pp. 508-511, Spring 2002.
6. 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, pp. 19-24, April 2001.
7. 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
8. 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.
9. "Introduction on the CSM Nano-hardness Tester," <http://www.microphotonic.com/nht.html>
10. Kim, G. N., Qian, J., Ohmori, H., "ELID Grinding of Hard-To-Machine Materials on Surface Grinder," J. of KSPE, Vol. 18, No. 5, pp. 157-164, 2001.