

광학유리(BK7) 초정밀절삭의 실험적 연구

김민재⁺, 이준기⁺⁺, 윤영곤⁺⁺⁺, 이현성⁺⁺⁺⁺, 황 연⁺⁺⁺⁺, 김혜정⁺⁺⁺⁺, 김정호^{*}

(논문접수일 2011. 04. 28, 수정일 2011. 07. 14, 심사완료일 2011. 08. 08)

An Experimental Study of Ultra-Precision Turning of Optical Glass(BK7)

Min Jae Kim⁺, June Key Lee⁺⁺, Yeong Gon Yun⁺⁺⁺, Hyeon Sung Lee⁺⁺⁺⁺,
Yeon Hwang⁺⁺⁺⁺, Hye Jeong Kim⁺⁺⁺⁺, Jeong Ho Kim^{*}

Abstract

There is an immense need to obtain nanometric surface finish on optical glass owing to the advantage of improved performance of the components. But owing to brittleness and hardness, optical glass is one of the materials that is difficult to ultra-precision turning. According to the hypothesis of ductile mode machining, regardless of their hardness and brittleness, will undergo a transition from brittle to ductile machining region below a critical undeformed chip thickness. Below this threshold, it is suggested that the energy required for plastic formation. Thus, plastic deformation is the predominant mechanism of material removal in machining these materials in this mode. An experimental study is conducted diamond cutting for machining BK7 glass. The investigation presents the feasibility of achieving nanometric surface and the understanding the mechanism of cutting glass, proving the cutting edge radius effect.

Key Words : Ultra-precision turning(초정밀절삭), Brittle material(취성재료), Ductile machining(연성가공)

1. 서론

최근 광학적, 기계적, 물리적으로 뛰어난 특성을 가지고 있는 광학유리(optical glass), 실리콘(silicon), 게르마늄(germanium) 등과 같은 취성재료의 높은 표면 품질을 생산할 수 있는 초정밀 절삭가공에 대한 관심이 증가하고 있다. 취성재료(brittle material)의 나노미터급(nanometric) 가공면은 기존에는 연삭(grinding)이나 폴리싱(polishing)으로 가공되어 왔으나, 비구면 같은 복

잡한 형상의 제품을 생산하기는 어렵다. 반면, 초정밀 절삭가공(ultra-precision turning)으로 종래의 연삭이나 폴리싱 기술을 대체하여, 비구면 렌즈등의 생산에 적용한다면 높은 생산성으로 인해 생산비용을 절감할 수 있다. 취성 재료의 초정밀 절삭가공은 기본적으로 연성모드(ductile mode) 가공이 요구되며, 또한 연성모드 가공은 나노미터급 범위 안에서 매우 높은 툴(tool) 위치 정밀도가 요구된다. 특히, 유리 같은 취성재료를 가공할 때 초정밀 절삭가공은 수십 마이크로 크랙(crack)층 발생의

+ 전남대학교 대학원 광공학협동과
++ 전남대학교 대학원 신소재공학과
+++ 전남대학교 대학원 기계공학과
+++ 전남대학교 대학원 전기공학과
++++ 한국광기술원 초정밀광학연구센터
* 교신저자, 한국광기술원 초정밀광학연구센터 (mjkim@kopti.re.kr)
주소: 500-757 광주광역시 북구 용봉로 77

원인이 된다^(1~5).

그러나 절삭가공에 있어 중요한 가공 파라미터인 이송속도나 가공깊이가 임계 값(critical specific value)을 초과 하면 가공재료는 연성모드 가공에서 취성모드 가공으로 변화하게 되는데^(6~8), 이때 초정밀 절삭가공에서 툴의 선단반경(R)과 이송속도(f), 가공깊이(a₀)의 가공조건 변화를 통해 미변형칩두께(undeformed chip thickness)를 마이크로급 이하로 줄이면 연성모드 가공을 달성할 수 있다^(9~16).

본 실험에서는 취성재료인 광학유리(BK7)의 연성모드 나노미터급 초정밀가공을 목적으로, 초정밀절삭 기구(mechanism)의 이해, 가공 툴의 둥근새(cutting edge radius)의 영향에 대해 연구하였다.

2. 절삭 기구(Cutting Mechanism)

일반적인 가공에서 카바이드(carbide) 툴의 둥근새는 Fig. 1(a)와 같이 미변형칩두께 보다 충분히 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나, 취성재료의 초정밀 절삭가공은 툴의 둥근새가 미변형칩두께와 같은 상태가 발생하며, 이 경우 실제적인 레이크 각(rake angle)의 움직임은 가공면과 칩 형태에 중요한 역할로 작용하게 된다. 둥근새가 미변형칩두께와 같은상태이거나 큰 경우(Fig. 1(b)), 설계상의 툴의 레이크 각이 0° 일지라도, 실제적인 레이크각(γ_e)은 음(negative)의 값을 가지며 다음의 식 (1)에 의해 계산된다.

$$\gamma_e = -\sin^{-1}\left(\frac{2r - d_{max}}{2r}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 γ_e는 실제적인 평균 레이크 각이며, r은 둥근새 반경이다. 또한, 둥근 형태의 툴을 사용하여 초정밀 절삭가공시 가공깊이와 최대 미변형칩두께(d_{max})는 다르다. 최대 미변형칩두께는 툴의 형상과 가공조건에 따라 계산되며, 툴의 선단반경(R)과 이송속도(f), 가공깊이(a₀)와 관계가 있다. 또한, 최대 미변형칩두께는 Fig. 2와 같이 이송속도에 따라 두 가지 경우가 있다⁽¹⁷⁾. Fig. 2에서 O₁과 O₂는 두개의 연속적인 툴 절삭 날(cutting edge)의 중심을 나타내며, 두개의 이송속도가 나타내는 중심 사이의 거리를 나타낸다. 두 가지 경우의 최

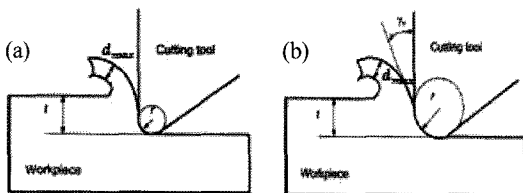


Fig. 1 Geometry of turning action : conventional turning(a), ultra-precision turning(b)

대 미변형칩두께는 식 (2)에 의해 계산된다.

Fig. 3은 화이트의 동금세 반경을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)으로 측정된 그림이며, 약 100nm값을 보였다.

$$d_{max} = \begin{cases} a_0, & \sqrt{2Ra_0 - a_0^2} \leq f \\ R - \sqrt{R^2 + f^2 - 2f\sqrt{2Ra_0 - a_0^2}}, & \sqrt{2Ra_0 - a_0^2} > f \end{cases} \quad (2)$$

식 (1, 2)을 통한 최대 미변형 칩두께와 툴의 동금세 반경에 의한 실제적인 레이크 각을 계산한 그래프를 Fig. 4에 나타 내었다.

Fig. 3에서와 같이 동금세 반경이 약 100nm 일 때 최대 미변

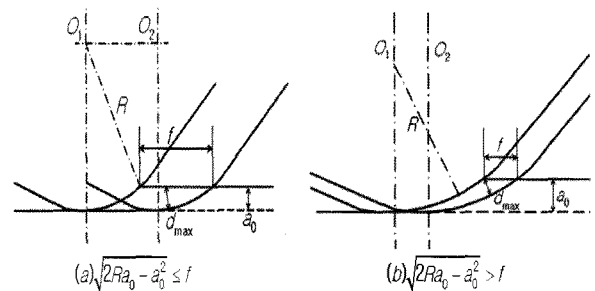


Fig. 2 Schematic for determining maximum undeformed chip thickness

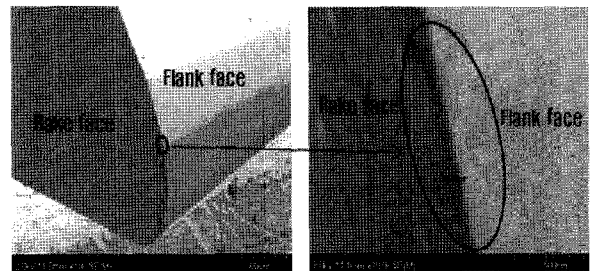


Fig. 3 SEM photograph of cutting edge radius

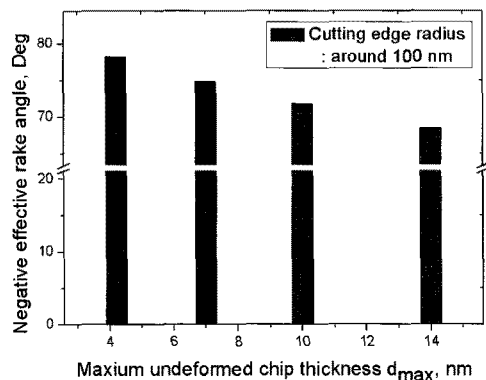


Fig. 4 Tool rake variations with cutting edge radius and maximum undeformed chip thickness

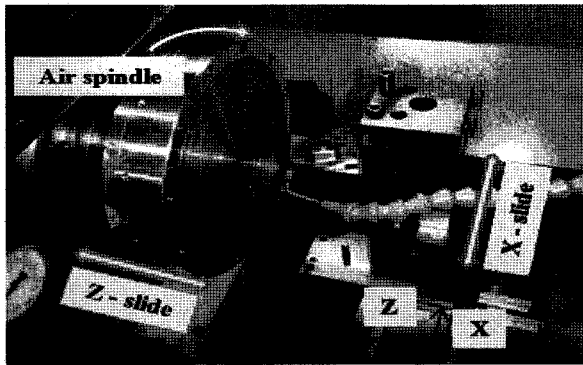


Fig. 5 Schematic of the ultra-precision turning machine

Table 1 Cutting condition of ultra-precision turning

Work spindle speed	1500 - 2500rpm
Depth of cut	0.2 - 0.8um
Feed rate	0.15 - 0.5um/rev
Cutting environment	air

형칩두께가 감소할수록 툴의 실제적인 레이크 각은 더욱 더 음의 각으로 증가하고, 그 결과 큰 음의 각은 절삭 날 앞에서 소성 변형을 가능하게 하는 정역학적인 압력을 일으킨다. 만약 미변형칩두께가 임계값보다 작으면, 가공재료는 절삭 날 아래에서 압축되고, 툴이 지나간 후 탄성적인 스프링 백(springs back)이 일어난다. 이 경우 칩 형성보다는 오히려 갈아지는 공정(plowing) 과 미끄러짐(sliding)이 칩 형성보다 지배적인 거동으로 이해되며, 이러한 결과 커팅 툴의 날카로움은 가공물의 가공 면에 중요한 요인으로 작용됨을 알 수 있다.

3. 실험 방법

본 실험에서 사용된 광학유리(BK7)은 붕규산염 유리(borosilicate crown glass)이며, 비커스경도 610kg/mm², 연화온도는 719°C이다. 절삭 실험은 초정밀 2축 다이아몬드 터닝 머신(USA, Precitech Inc, Nanoform200)을 사용하였다. 이 장비의 특징은 T 자형 기초에 유정압 베어링 슬라이드와 공작물 스피들은 공기압 베어링으로 형성되며, 가공기의 위치 반응 분해능은 8.6nm이다.

광학유리의 나노미터급 연성모드 가공 면을 달성하기 위하여 가공물 회전속도, 가공깊이, 이송속도의 변화를 통한 다수의 가공조건(Table 1)을 시도하였다. Table 1의 초정밀 절삭가공조건 변화는 식 (2)에 의해 계산되는 최대 미변형칩두께를 주요 인자로 설정하여 수행하였다. 바이트는 선단반경(R) 0.5mm, 레이크 각 0°, 플랭크 각 10°를 사용하였으며, 가공된 표면은 AFM(Atomic Force Microscope)로 관찰하였다.

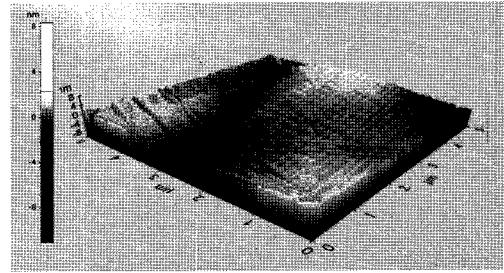


Fig. 6 AFM photograph of machining($d_{max}=4.2nm$)_1st cutting experiment

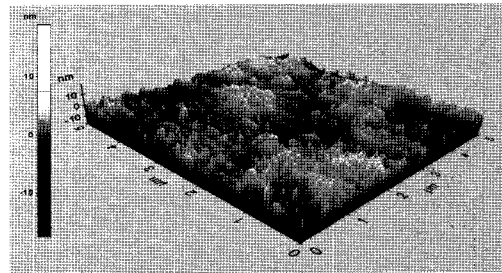


Fig. 7 AFM photograph of machining($d_{max}=4.2 nm$)_2nd cutting experiment



Fig. 8 SEM photograph of tool wear in ultra-precision turning

4. 실험 결과 및 토의

광학유리의 나노미터급 표면을 달성하기 위한 연성모드가공을 위해 Table 1의 가공조건 중 이송속도 0.15um/rev, 가공깊이 0.2um, 가공물 회전속도 2000rpm로 약 34m 가공 후 Fig. 6과 같은 연성모드 가공표면을 관찰하였고, 이 가공조건 최대 미변형칩두께(d_{max})는 4.2nm이다.

Fig. 6의 가공 표면에서 절삭 날에 의해 동일한 공간에 규칙적인 피드 마크가 생성된 것을 확인하였다. 이는 가공 재료의 제거 과정동안 소성변형이 일어난 것을 의미하며, 이는 연성모드 가공이 수행되어졌음을 나타낸다. 표면 거칠기(R_a)는 0.8nm를 관찰하였다. 또한 동일한 조건으로 총 17m를 추가 가공한 결과 Fig. 7과 같은 가공표면을 관찰하였다.

Fig. 7의 표면분석결과 표면거칠기는 2.9nm를 관찰하였고,

이 결과는 1차 실험에 비해 2차 실험 시 절삭 날 마모에 의한 등급새의 증가로 인해 갈아지는 공정(plowing) 과 미끄러짐(sliding)이 칩 형성보다 지배적인 거동이 된 것으로 추정된다. Fig. 8에서 바이트 마모는 커팅 거리 약 2.6km일 때 플랭크 마모(flank wear) 약 18.7um을 관찰하였다.

5. 결론

본 연구에서는 취성재료인 광학유리(BK7)의 나노미터급 표면은 달성하기 위한 초정밀 절삭의 가능성을 확인하는 실험을 수행하고, 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 가공조건 중 이송속도 0.15um/rev, 가공깊이 0.2um, 가공물 회전속도 2000rpm으로 가공 시($d_{max} = 4.2nm$) 절삭 날에 의해 동일한 공간에 규칙적인 피드 마크를 확인할 수 있는 연성모드 가공표면을 달성하였다.
- (2) 동일한 조건으로 가공 길이 총 17m를 추가 절삭가공 한 결과 절삭 날 마모에 의한 등급새의 증가로 인해 갈아지는 공정과 미끄러짐이 칩 형성보다 지배적인 거동이 된 것으로 추정되는 가공면을 관찰하였다.
- (3) 툴의 등급새의 마모에 의한 취성재료의 미변형칩두께가 임계값을 초과할 때, 연성모드 가공에서 취성모드 가공으로의 변화를 관찰하였고, 표면거칠기가 나빠짐을 확인하였다.

후 기

“본 연구는 민군겸용기술사업의 연구개발로 수행되었음”

참 고 문 헌

- (1) Komanduri, R., Lucca, D. A., and Tani, Y., 1997, “Technological Advances in Fine Abrasive Processes,” *Keynote paper. Annals of CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 545~596.
- (2) Venkatesh, V. C., Inasaki, I., Toenshof, H. K., Nakagawa, T., and Marinescu, I. D., 1995, “Observations on Polishing and Ultra-precision Machining of Semi-conductor Materials,” *Keynote paper. Annals of CIRP*, Vol. 44, No. 2, pp. 611~618.
- (3) Gee, A. E., Spragg, R. C., Puttick, K. E., and Rudman, M. R., 1991, “Single-point Diamond Form-finishing of Glass and other Macroscopically Brittle Materials,” *SPIE*, Vol. 1573, pp. 39~48.

- (4) Fang, F. Z., and Venkatesh, V. C., 1998, “Diamond Cutting of Silicon Wity Nanometric Finish,” *Annals of CIRP*, Vol. 47, No. 1, pp. 45~49.
- (5) Shimada, S., Inamura, T., Takezawa, N., Ohmori, H., Sata, T., and Ikawa, N., 1995, “Brittle-ductile Transition Phenomena in Microindentation and Micromachining,” *Annals of CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 523~526.
- (6) Lucca, D. A., Brinksmeier, E., and Goch, G., 1998, “Process in Assessing Surface and Subsurface Integrity,” *Annals of CIRP*, Vol. 47, No. 2, pp. 669~694.
- (7) Blackley, W. S., and Scattergood, R. O., 1991, “Ductile Regime Model for Diamond Turning of Brittle Materials,” *Precis Eng.*, Vol. 13, No. 2, pp. 95~102.
- (8) Jared, B. H., and Dow, T. A., 1997, “Chip Dynamics in Diamond Turning,” *Proc. ASPE*, Vol. 16, pp. 230~233.
- (9) Schinker, M. G., and Doll, W., 1987, “Turning of Optical Glass at Room Temperature,” *SPIE*, Vol. 802, pp. 70~80.
- (10) Fang, F. Z., and Chen, L., 2000, “Ultra-precision Cutting of ZKN7 Glass,” *Annals of CIRP*, Vol. 49, No. 1, pp. 17~20.
- (11) Puttick, K. E., Rudman, M. R., Smith, K. J., Franks, A., and Lindsey, 1989, “Single-point Diamond Machining of Glass,” *Proc. R. Soc. Lond. A.*, Vol. 426, pp. 19~30.
- (12) Brehm, R., Van Dun, K., Teuunissen, J. C. G., and Hasima, J., 1979, “Transparent Single-point Turning of Optical Glass,” *Precis Eng.*, Vol. 1, No. 3, pp. 207~213.
- (13) Takeuchi, Y., Sawada, K., and Sata, T., 1996, “Ultra-precision 3-D Micromachining of Glass,” *Annals of CIRP*, Vol. 45, No. 1, pp. 401~404.
- (14) Moriwaki, T., Shamoto, E., and Inoue, K., 1992, “Ultra-precision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration,” *Annals of CIRP*, Vol. 41, No. 1, pp. 141~144.
- (15) Schinker, M. G., 1991, “Subsurface Damage Mechanisms at High-speed Ductile Machining of Optical Glass,” *Precis Eng.*, Vol. 13, No. 3, pp. 208~218.
- (16) Chiu, W., Endres, W. J., and Thouless, M. D., 2000, “An Experimental Study of Orthogonal Machining of Glass,” *Mach. Sci. Technol.*, Vol. 4, No. 2, pp. 253~275.
- (17) Liu, K., 2002, *Ductile Cutting for Rapid Prototyping of Tungsten Carbide Tool*, A Thesis for a Doctorate, National University of Singapore, Singapore.