

## 고투과율 광학유리(SF57HHT) 초정밀절삭의 실험적 연구

김민재<sup>+</sup>, 이준기<sup>++</sup>, 황 연<sup>+++</sup>, 김혜정<sup>+++</sup>, 김정호<sup>\*</sup>

(논문접수일 2011. 10. 21, 수정일 2011. 12. 10, 심사완료일 2011. 12. 12)

### An Experimental Study of Ultra-precision Turning of High Transmittance Optical Glass(SF57HHT)

Min-Jae Kim<sup>+</sup>, June-Key Lee<sup>++</sup>, Yeon Hwang<sup>+++</sup>, Hye-Jeong Kim<sup>+++</sup>, Jeong-Ho Kim<sup>\*</sup>

#### Abstract

Heavy flint optical glass(SF57HHT) is new material that has extremely high transmittance. Due to brittleness and high hardness, optical glass is one of the most difficult to materials for ultra-precision turning. According to the hypothesis of ductile machining, all materials, regardless of their hardness and brittleness, will undergo transition from brittle to ductile machining region below critical undeformed chip thickness. In this study, cutting test was carried out to evaluate cutting performance of heavy flint glass using ultra-precision machine with single crystal diamond bite. The machined workpiece surface topography, tool wear and surface roughness were examined using AFM and SEM. The experimental results indicate that the machining mode become the brittle mode to ductile mode, when the maximum undeformed chip thickness is large than critical value. Tool wear mainly occurs on the flank face and its wear mechanism is dominated by abrasion. This study demonstrates the feasibility of SF57HHT by diamond turning.

**Key Words :** Flint optical glass(플린트광학유리), Ultra-precision turning(초정밀절삭), Ductile mode(연성모드)

## 1. 서론

플린트 광학유리(optical glass) SF57HHT는 가시영역에서 고투과율(98%이상)을 가지고 있기 때문에 방송용 카메라, 내시경, 현미경등의 렌즈에 많이 사용되고 있다. 그러나 광학유리는 초정밀 절삭가공(ultra-precision turning)하는 동안에 자주 취성파괴(fracture)가 일어나기 때문에 초정밀 절삭가공이 어려운 재료이다<sup>(1)</sup>. 취성재료(brittle material)의 나노미터급(nano-metric) 가공면은 기존에는 연마나 폴리싱(polishing)으로 가공

되어 왔으나, 비구면 같은 복잡한 형상의 제품을 생산하기는 어렵다. 반면, 재료내부에 취성파괴가 없는 연성모드 가공면을 절삭가공으로 달성한다면, 생산성의 향상 뿐 만아니라, 비구면 같은 복잡한 형상도 제작 할 수 있다. 취성재료의 초정밀 절삭가공은 기본적으로 연성모드(ductile mode) 가공이 요구되며, 또한 연성모드 가공은 나노미터급 범위 안에서 매우 높은 툴(tool) 위치 정밀도가 요구된다. 특히, 유리같은 취성재료를 가공할 때 초정밀 절삭가공은 수십 마이크로 크랙(crack) 층 발생의 원인이 된다<sup>(2-5)</sup>. 그러나 절삭가공에 있어 중요한 가공 파라미

+ 전남대학교 대학원 광공학협동과정  
++ 전남대학교 대학원 신소재공학과  
+++ 한국광기술원 초정밀광학연구센터  
\* 교신저자, 한국광기술원 초정밀광학연구센터 (kimjh@kopti.re.kr)  
주소: 광주광역시 북구 첨단벤처로 108번길 9(월출동)

터인 이송속도나 가공깊이가 임계값(critical specific value)을 초과 하면 가공재료는 연성모드 가공에서 취성모드 가공으로 변화하게 되는데<sup>(6-8)</sup>, 이때 초정밀 절삭가공에서 툴의 선단반경(R)과 이송속도(f), 가공깊이(a<sub>0</sub>)의 가공조건 변화를 통해 미변형칩두께(undeformed chip thickness)를 마이크로급 이하로 줄이면 연성모드 가공을 달성할 수 있다<sup>(9-16)</sup>.

본 실험에서는 고투과율 광학유리인 SF57HHT의 연성모드 나노미터급 초정밀가공을 목적으로, 최대 미변형칩두께에 따른 가공모드 변화와 화이트 마모 특성 연구를 수행하였다.

### 2. 절삭 기구 (Cutting Mechanism)

일반적인 가공에서 카바이드(carbide) 툴의 등금새는 Fig. 1 (a)와 같이 미변형칩두께 보다 충분히 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나, 취성재료의 초정밀 절삭가공은 툴의 등금새가 미변형칩두께와 같은 상태가 발생하며, 이 경우 실제적인 레이크 각(rake angle)의 움직임은 가공면과 칩 형태에 중요한 역할로 작용하게 된다. 등금새가 미변형칩두께와 같은 상태이거나 큰 경우(Fig. 1(b)), 설계상의 툴의 레이크 각이 0° 일지라도, 실제적인 레이크각(γ<sub>e</sub>)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<sub>e</sub>는 실제적인 평균 레이크 각이며, r은 등금새

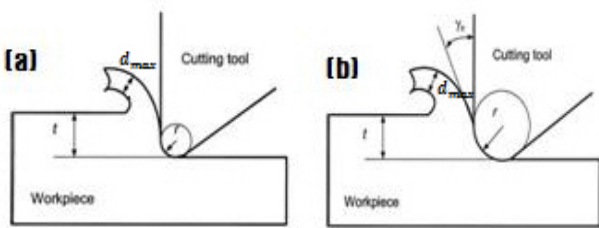


Fig. 1 Geometry of turning action : conventional turning [a], ultra-precision turning [b]

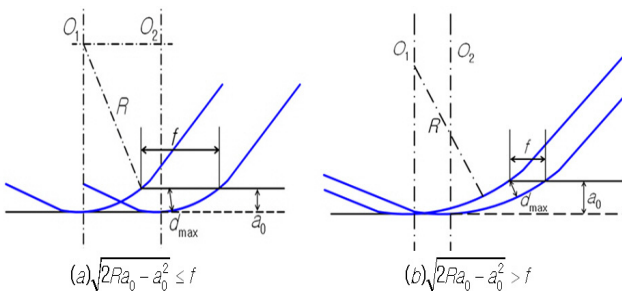


Fig. 2 Schematic for determining maximum undeformed chip thickness

반경이다. 또한, 등근 형상의 툴을 사용하여 초정밀 절삭가공 시 가공깊이와 최대 미변형칩두께(d<sub>max</sub>)는 다르다. 최대 미변형칩두께는 툴의 형상과 가공조건 변화에 따라서 계산되며, 툴의 선단반경(R)과 이송속도(f), 가공깊이(a<sub>0</sub>)와 관계가 있다. 또한, 최대 미변형칩두께는 Fig. 2와 같이 이송속도에 따라 두 가지의 경우가 있다<sup>(17)</sup>. Fig. 2에서 O<sub>1</sub>과 O<sub>2</sub>는 두개의 연속적인 툴 절삭 날(cutting edge)의 중심을 나타내며, 두개의 이송속도가 나타내는 중심 사이의 거리를 나타낸다. 두 가지 경우의 최대 미변형칩두께는 식 (2)에 의해 계산된다.

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

### 3. 실험 방법

본 실험에서 사용된 화이트의 등금새 반경을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)으로 측정한 결과 약 100nm 값을 보였다. 절삭 기구에서 논의 되었던 식 (1), (2)을 통한 최대 미변형 칩두께와 툴의 등금새 반경에 의한 실제적인 레이크 각을 계산한 그래프를 Fig. 3에 나타 내었다. 등금새 반경이 약 100nm일 때 최대 미변형칩두께가 감소할수록 툴의 실제적인 레이크 각은 더욱 더 음의 각으로 증가함을 알 수 있었고, 그 결과로 나타난 큰 음의 각은 절삭 날 앞에서 소성 변형을 가능하게 하는 정역학적인 압력을 일으킨다. 만약 미변형 칩두께가 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. 한편, 본 연구에서 사용된

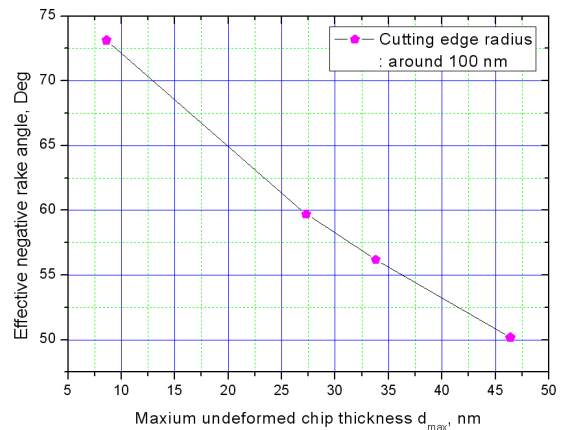


Fig. 3 Tool rake variations with cutting edge radius and maximum undeformed chip thickness

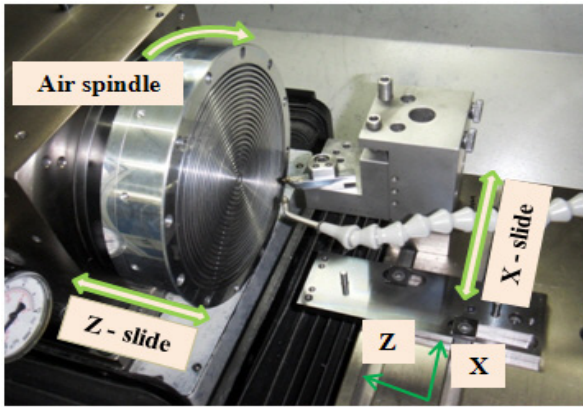


Fig. 4 Schematic of the ultra-precision turning machine

Table 1 Machining conditions for ductile mode cutting test

Tool material	Single crystal diamond
Tool radius R(mm)	0.5
Rake angle(°)	0
Flank angle(°)	10
Cutting edge radius(nm)	100
Work spindle speed(rpm)	2000
Depth of cut(um)	0.2
Feed rate(um/rev)	0.15, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75
Maximum undefromed chip thickness $d_{max}$ (nm)	4.2, 7, 14, 20.6, 27.3, 33.8, 40.2, 46.4
Cutting environment	Dry

플린트 광학유리는 SF57HHT(독일, Schott社)이며, 굴절율( $n_d$ ) 1.84666, 연화온도 414°C, 경도( $H_V$ ) 350kg/mm<sup>2</sup>이다. 절삭 실험은 초정밀 2축 다이아몬드 터닝 머신(미국, Precitech社, Nanoform200)을 사용하였다. 이 장비의 특징은 T 자형 기초에 유정압 베어링 슬라이드와 공작물 스펀들은 공기압 베어링으로 형성되며, 가공기의 위치 반응 분해능은 8.6nm이다. Fig. 4에 초정밀 절삭 가공장비의 모습을 나타내었다.

광학유리의 나노미터급 연성모드 가공 면을 달성하기 위한 가공조건을 Table 1에 나타내었다. Table 1의 초정밀 절삭가공 조건의 변화는 식 (2)에 의해 계산되는 최대 미변형칩두께를 주요인자로 설정하여 수행하였다. 초정밀 절삭 가공후 가공된 표면은 AFM(Atomic Force Microscope), 바이트 마모는 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

## 4. 실험 결과 및 토의

### 4.1 가공표면 분석

임계 최대 미변형 칩두께와 관계된 연성모드에서 취성모드로

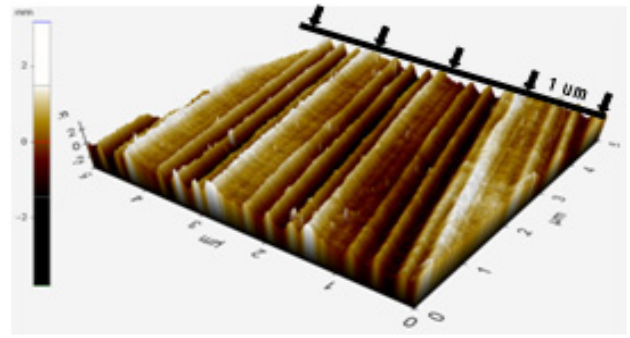


Fig. 5 AFM photograph of machining (SF57HHT) : ductile mode  $d_{max} = 27.3nm$

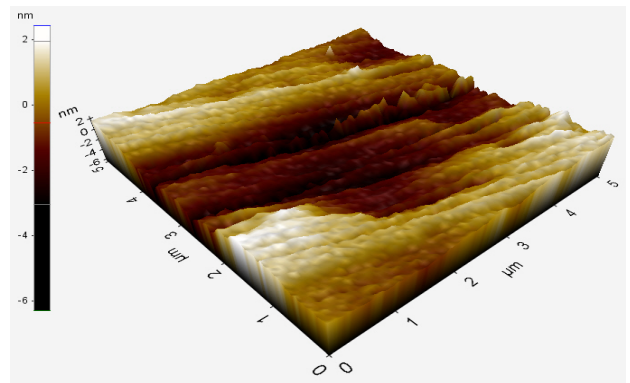


Fig. 6 AFM photograph of machining (SF57HHT) : semi-ductile mode  $d_{max} = 33.8nm$

의 전이를 조사하기 위한 본 실험에서, Table 1의 다수의 가공 조건 중에서 가공물 회전속도 2000rpm, 이송속도 1um/rev, 절삭깊이 0.2um일때 최대 미변형 칩두께( $d_{max}$ )는 27.3nm였으며, 취성모드가 보이지 않는 연성모드 가공면을 달성하였다(Fig. 5). 또한, 가공면의 표면거칠기( $R_a$ )는 0.61nm의 값을 측정하였다. Fig. 5의 가공표면에서 절삭 날에 동일한 공간에 규칙적인 피드 마크가 생성된 것을 확인하였다. 이는 가공 재료의 제거 과정동안 소성변형이 일어난 것으로 이해되며, 이러한 결과로부터 본 실험에서 고투과율 광학유리(SF57HHT)의 초정밀 절삭가공 결과 연성모드 가공이 수행되어진 것으로 판단된다.

Fig. 6은 이송속도 1.25um/rev, 절삭깊이 0.2um의 가공조건일 때 연성모드와 취성모드의 중간상태인 가공표면을 관찰한 사진이며, 이 때 최대 미변형 칩두께는 33.8nm이다. 가공면의 표면거칠기( $R_a$ )는 1.05nm 값을 측정하였다. 또한, 이송속도 1.75um/rev, 절삭깊이 0.2um( $d_{max}$ =46.4nm)일 때 취성모드 가공표면(Fig. 7)을 관찰하였으며, 표면거칠기( $R_a$ )는 3.1nm의 값을 측정하였다.

가공 표면 분석결과 최대 미변형 칩두께가 임계값( $d_{max}$ =27.3nm)보다 증가하면 연성모드에서 취성모드로 가공표면이 바뀌며, 표면거칠기 값이 증가함을 관찰하였다.

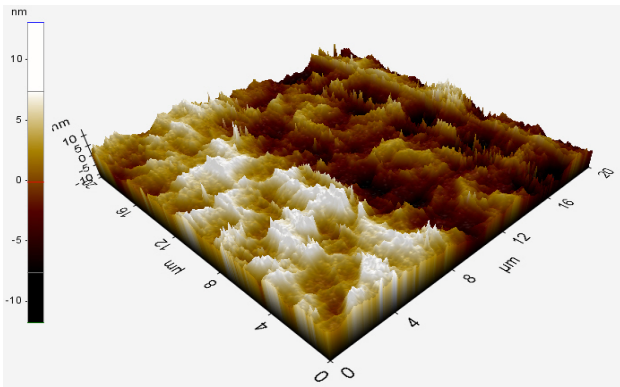


Fig. 7 AFM photograph of machining (SF57HHT) : brittle mode  $d_{max} = 46.4nm$

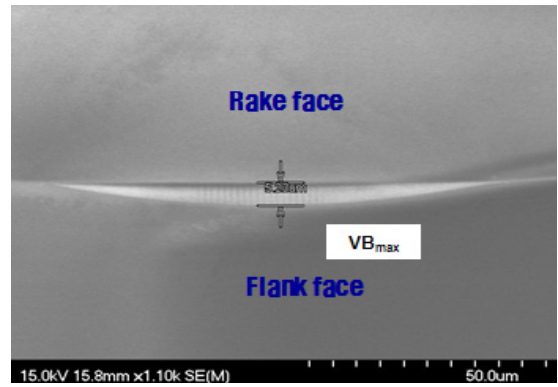


Fig. 9 SEM photograph of tool wear in turning : cutting distance : around 200m, flank wear  $VB_{max} = 5.23um$

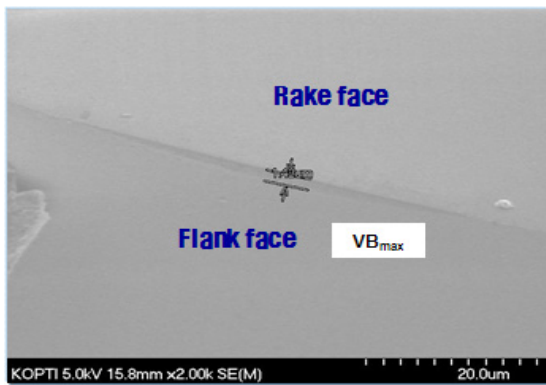


Fig. 8 SEM photograph of tool wear in turning : cutting distance : around 80m, flank wear  $VB_{max} = 1.3um$

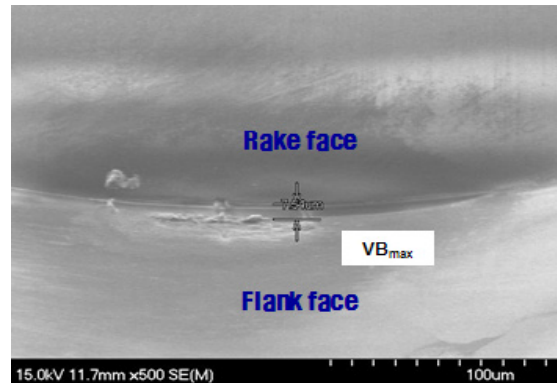


Fig. 10 SEM photograph of tool wear in turning : cutting distance : around 420m, flank wear  $VB_{max} = 7.54um$

#### 4.2 화이트 마모 측정

본 실험에서는 광학유리(SF57HHT)의 초정밀 절삭가공초기의 가공거리에 따른 화이트 마모를 측정하였다. Fig. 8은 총 가공거리가 약 80m일 때 다이아몬드 화이트의 플랭크 마모(flank wear) 약 1.3um이 발생했음을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다.

Fig. 9는 총 가공거리 약 200m일 때 플랭크 마모 약 5.23um을 측정된 사진이며, Fig. 10은 총 가공거리 약 420m일 때 플랭크 마모 약 7.54um을 측정된 사진이다. 광학유리 SF57HHT의 초정밀 절삭 시 화이트 마모가 주로 플랭크 면(flank face)에서 발생하며, 가공거리 증가시 플랭크 마모도 증가하였으며, 플랭크 면의 마모는 전형적인 연마(abrasion)마모이다. 또한, 최대 미변형 칩두께가 1um이하 일 때 가공물과 커팅 툴 사이의 급속한 전단응력 증가로 인해 급속한 툴마모가 일어나며<sup>(18)</sup>, 그 이유는 재료내부의 결함(defect)이 제로(zero)가 되기 때문인 것으로 추정된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 고투과율 광학유리인 SF57HHT의 초정밀 절삭의 가능성을 확인하는 실험을 수행하였고, 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 가공조건 중 가공물 회전속도 2000rpm, 이송속도 1um/rev, 절삭깊이 0.2um의 절삭조건에서 절삭 날에 의해 동일한 공간에 규칙적인 피드 마크를 확인할 수 있는 연성모드 가공표면을 달성하였으며, 이 가공조건에서 최대미변형 칩두께( $d_{max}$ )는 27.3nm였고, 가공면의 표면거칠기(Ra)는 0.61nm의 값을 측정하였다.
- (2) 최대 미변형 칩두께가 임계값( $d_{max}=27.3nm$ )보다 증가하면 연성모드에서 취성모드로 가공표면이 바뀌며, 표면거칠기 값이 증가함을 관찰하였다.
- (3) 광학유리(SF57HHT) 초정밀 절삭가공 시 화이트 마모는 주로 플랭크 면(flank face)에서 발생하며, 가공거리 증가시 플랭크 마모가 증가하였으며, 플랭크 면의 마모는 전형적인 연마(abrasion)마모임을 관찰하였다.

## 참고 문헌

- (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 with 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. 2, 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., and Franks, A. L., 1989, "Single-Point Diamond Machining of Glass," *Proc. R. Soc. Lond. A.*, Vol. 426, pp. 19~30.
- (12) Brehm, R., Van Dun, K., Teunissen, J. C. G., and Hasima, J., 1979, "Transparent Single-Point Turning of Optical Glass," *Precis Eng.*, Vol. 1, No. 3, pp. 207~213.
- (13) 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.
- (14) Schinker, M. G., 1991, "Subsurface Damage Mechanisms at High-Speed Ductile Machining of Optical Glass," *Precis Eng.*, Vol. 13, No. 3, pp. 208~218.
- (15) 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.
- (16) Kim, M. J., Lee, J. K., Yeong, Y. G., Lee, H. S., Hwang, Y., Kim, H. J., and Kim, J. H., 2011, "An Experimental Study of Ultra-Precision Turning Optical Glass(BK7)," *Journal of the KSMTE*, Vol. 20, No. 4, pp. 382~385.
- (17) Liu, K., 2002, *Ductile Cutting for Rapid Prototyping of Tungsten Carbide Tool*, A Thesis for a Doctorate, National University of Singapore, Singapore.
- (18) 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.