

다이아몬드 터닝머신에서 다중점 B 축 제어 가공법을 통한 표면거칠기 향상

Improvement in Surface Roughness by Multi Point B Axis Control Method in Diamond Turning Machine

김영복¹, 황연¹, 안중환², 김정호¹, 김혜정¹, 김동식^{1,✉}

Young-Bok Kim¹, Yeon-Hwang¹, Jung-Hwan An², Jeong-Ho Kim¹, Hye-Jeong Kim¹, and Dong-Sik Kim^{1,✉}

¹ 한국광기술원 초정밀광학연구단 (Ultra-Precision Optics Research Sector, Kopti)

² 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan University)

✉ Corresponding author: grace93@kopti.re.kr, Tel: +82-62-605-9266

Manuscript received: 2014.11.12. / Revised: 2015.8.17. / Accepted: 2015.9.3.

This paper details a new ultra-precise turning method for increasing surface quality, "Multi Point B Axis Control Method." Machined surface error is minimized by the compensation machining process, but the process leaves residual chip marks and surface roughness. This phenomenon is unavoidable in the diamond turning process using existing machining methods. However, Multi Point B axis control uses a small angle (<math><1^\circ</math>) for the unused diamond edge for generation of ultra-fine surfaces; no machining chipping occurs. It is achieved by compensated surface profiling via alignment of the tool radial center on the center of the B axis rotation table. Experimental results show that a diamond turned surface using the Multi Point B axis control method achieved P-V 0.1 μm and Ra 1.1nm and these ultra-fine surface qualities are reproducible.

KEYWORDS: Diamond turning (다이아몬드 터닝), B axis control (공구축 제어), Surface roughness (표면 거칠기), Tool life (공구수명)

1. 서론

최근 고해상도 모바일 기기 등의 급속한 기술발전과 더불어 광학계는 고해상도 및 소형·경량화의 추세로 급격히 발전해 가고 있다. 이에 따라 구면렌즈를 사용해 오던 광학계에서 소형·경량화 및 고해상도에 대한 조건을 충족시키기 위하여 가볍고 형상에 대한 자유도가 높으며, 생산성이 우수한 비구면 플라스틱 비구면렌즈 광학계가 필요

로 하게 되었다. 특히 고해상도 광학계에서 렌즈에 대한 형상정밀도, 표면조도 및 편심(decenter) 등은 광학계의 성능에 큰 영향을 미치므로 높은 정밀도가 필연적으로 요구되고 있다.¹

고해상도 광학계에 적용되는 플라스틱 비구면 렌즈는 금형을 제작하여 사출성형으로 렌즈를 제조하게 되는데, 이러한 사출렌즈 금형코어의 가공 방식으로는 다이아몬드 터닝머신(Diamond Turning Machine)에서 단결정 다이아몬드 공구를 사용하여

초정밀절삭 가공하는 방식이 일반적으로 적용되고 있다.^{2,4}

다이아몬드 터닝공정에서 금형코어의 가공면을 평가하는 주요 요소는 형상정밀도(PV, Peak to Valley)와 표면거칠기(Ra)이다. 초정밀 비구면렌즈 금형코어 가공시 요구되는 형상정밀도(PV)는 일반적으로 0.2 μ m 이하의 고정밀도로서 이러한 정밀도를 만족시키기 위해서는 반복된 형상오차 보정가공을 통하여 구현하게 된다. 그러나, 이 과정에서 공구의 사용거리가 증가함에 따라 초기 예리한 인선으로 형성된 공구끝단이 마멸에 의해 점차 둔화되거나 칩핑(Chipping)이 발생되어 가공면의 표면거칠기를 악화시키게 된다.

특히 거친 표면은 투과하는 빛을 산란(scatter)시켜 입사광량을 줄어들게 하며, 고스트(ghost)나 플레어(flare)을 발생시키고, 이미지에 대한 대조비(contrast)를 감소시키는 등 광학계의 성능과 해상도에 영향을 미치게 됨으로, 고해상도 광학계에서 우수한 표면거칠기는 성능 및 해상도를 향상시키기 위한 필수적인 요소이다.

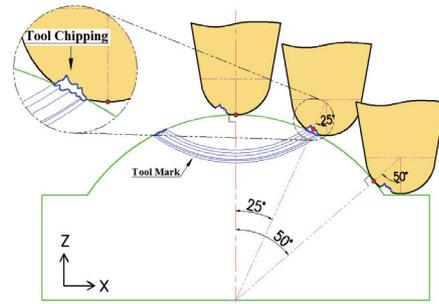
본 연구에서는 가공면의 표면조도 향상을 위해 다이아몬드터닝 공정에서 기존의 공구사용 방식인 2축제어 가공법(2 Axis Control Method) 및 단일점 B축제어 가공법(Single Point B Axis Control Method)에서 공구마멸에 의해 표면이 거칠어지는 원인을 분석하고,⁵ 공구의 마멸에 의한 영향을 최소화하여 초고조도면이 구현 가능한 다중점 B축제어 가공법(Multi Point B Axis Control Method)을 제안한다.

2. 초정밀 절삭가공 메커니즘

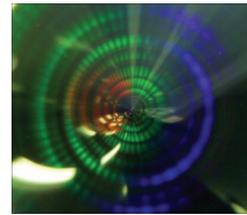
기계의 이송을 통해 금형코어와 같은 가공물에 공구의 형상을 그대로 전사하는 초정밀 절삭가공에서는 불순물이 적고, 경도가 높은 단결정 다이아몬드 공구가 주로 사용된다.⁴

또한, 다이아몬드 터닝머신에서 공구사용 방식으로는 2축(XZ)제어 가공법과 형상에 따라 공구축이 선회하는 단일점 B축제어 가공법(XZB)이 주로 사용된다.

그러나, 본 논문에서는 기술하는 다중점 B축제어 가공법은 공구마멸이나 칩핑에 의해 가공면의 표면거칠기를 악화시키는 문제점을 해결을 위해 최종정삭 과정에서 공구마멸이나 칩핑이 발생하지 않은 공구선단의 미사용 영역을 사용하기 위해 B축을 미소회전시켜 가공하는 방식이다.



(a) Cutting mechanism of 2 axis control method



(b) Photograph of cutting surface by tool chipping

Fig. 1 2 Axis control method

2.1 기존 절삭가공 방식

기존에 주로 사용되는 2축 제어법은 Fig. 1에서와 같이 공구축이 고정된 상태에서 XZ의 2축만을 제어하여 절삭가공 하는 방식이다.

2축제어 가공법의 특징으로는, 기계적인 구성에서 XZ의 2축만으로 제어가 가능하기 때문에 기계적인 축 구성 및 가공을 위한 NC Data의 작성이 비교적 간단하다. 하지만, Fig. 1(a)에서와 같이 가공물 형상의 곡률에 따라 법선방향이 일치하는 공구면의 사용위치가 결정되며, 전체 가공범위를 가공하기 위해서는 일정한 범위의 공구선단을 사용해야 함으로 공구의 마모나 칩핑 등에 의한 공구선단 오차를 그대로 전사시켜 표면조도를 악화시킨다.

예를 들면, Fig. 1(a)에서와 같이 공구선단의 일정영역(25° 지점)에 공구의 칩핑이 존재할 경우, 이 영역으로 가공된 부분에서는 공구선단오차에 의해 표면거칠기가 악화되며 실제 가공된 금형코어 표면은 Fig. 1(b)와 같이 회절격자(diffraction grating)의 영향으로 빛의 경로차에 의한 색분리 현상(간섭무늬)이 발생하게 된다.

공구의 제조과정에서는 Fig. 2에서와 같이 공구선단에서 파상도(Waviness) 오차를 필연적으로 가지게 된다. 이러한 특성으로 넓은 범위를 사용하여 가공하게 되는 2축제어 가공법에서는 파상도 오차 및 공구마멸의 영향에 의해 형상정밀도와 표면조도를 향상시키는데 제약을 받게 된다.

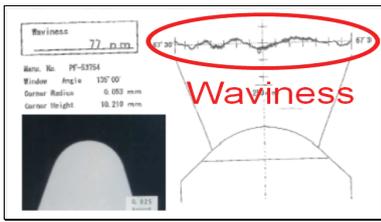


Fig. 2 Diamond tool waviness error

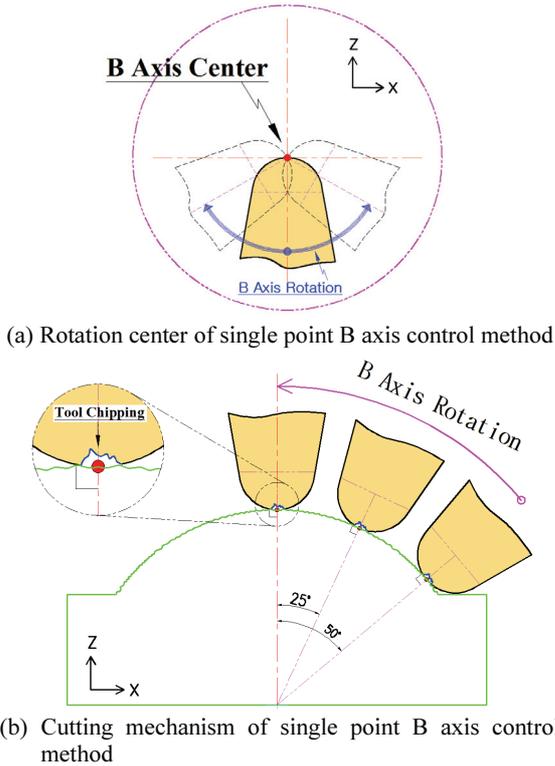


Fig. 3 Single point B axis control method

최근에는 이러한 공구의 파상도오차 및 칩핑에 많은 영향을 받는 2축 제어 가공법의 한계를 극복하고자 Fig. 3과 같이 형상에 따라 공구축(B축)을 회전시키는 단일점 B축 제어 가공법이 사용되고 있다.

단일점 B축 제어 가공법은 Fig. 3(a)에서와 같이 공구선단 단일점이 공구축의 회전중심점으로 설정되며, 형상곡률에 따라 공구축이 선회하여 가공하는 방식이다. 이는 초기 설정된 공구의 회전중심점만을 사용하여 가공함으로써 공구의 파상도에 의한 영향을 최소화 할 수 있다.

그러나, Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 공구의 사용량이 회전중심부에 집중됨으로써 공구의 사용량

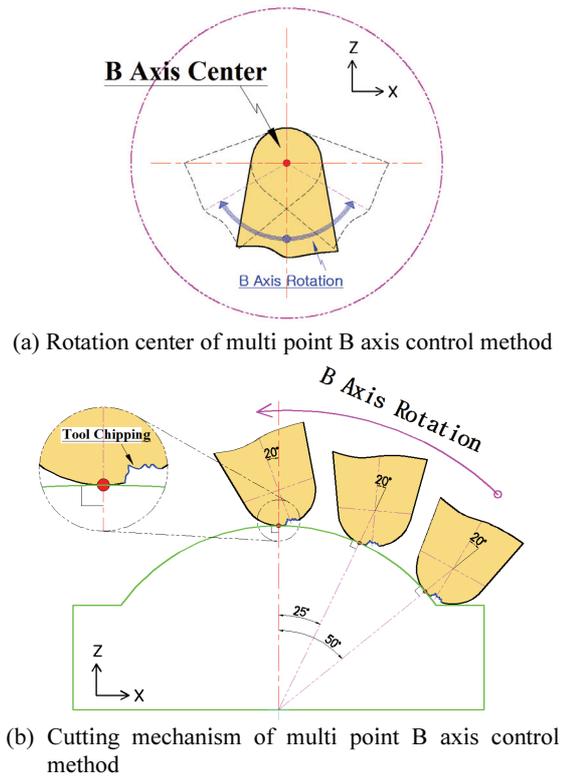


Fig. 4 Multi point B axis control method

을 증가시켜, 공구수명(Tool Life)을 단축시키게 된다. 또한, 공구선단에 칩핑이 발생하거나, 마모가 심할 경우, 가공면의 형상오차 및 표면조도 악화가 발생한다.

따라서, 기존의 2축 및 단일점 B축 제어 가공법에서는 국소적인 칩핑 및 사용중 발생하는 공구의 마멸에 의해 가공면의 표면조도 악화를 개선하는데 한계를 갖게 된다.

2.2 다중점 B 축제어 가공법

본 논문에서 제안하는 다중점 B축 제어 가공법(Multi Point B Axis Control)은 단일점 B축 제어 가공법과 같이 XZB의 3축을 사용하는 가공법이나, Fig. 4(a)에서와 같이 공구축의 회전중심이 공구반경의 중심점을 기준으로 한다.

공구반경 중심점을 공구의 회전중심으로 설정하는 다중점 B축 제어 가공법에서는 국소적인 영역을 계속적으로 사용해야 하는 단일점 B축 제어 가공법과 달리, Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 공구 사용영역에서 칩핑 및 마멸이 발생할 경우, 칩핑이

없는 공구선단부로 미소회전시켜, 공구마멸의 영향을 최소화 할수 있다. 특히 정삭공정의 최종 사이클에 적용한 경우, 회전을 시킨 상태에서도 중심축(XZ위치)은 항상 동일하게 유지됨으로, 마무리공정에서 0.5-1° 정도의 사용되지 않은 영역으로 위치를 회전시켜 마무리 가공이 가능하다.

이는 초기 설정된 위치만을 계속적으로 사용하여야 하는 단일점 B축 제어 가공법과 달리, 공구마멸이 전혀 없는 선단부로 마무리 정삭가공을 수행함으로써 초고조도 가공면을 얻을 수 있으며, 공구마멸을 회피하여 다중점을 사용함으로써 기존의 공구사용방식에 비하여 비약적으로 공구수명을 향상시킬 수 있다.

2.3 다중점 회전에 의한 형상오차 분석

다중점 B축 제어 가공은 실제 가공에 적용시에는 중삭개념의 형상오차 보정가공과 사용된 공구 선단의 근접부에서 미소한 각도를 회전시켜 가공을 완료하게 되는 2점 가공방식이 사용된다. 이러한 방식은 공구회전에 의해 형상오차가 발생할수 있으므로 이에 대한 형상오차 발생량에 대한 분석을 수행하였다.

이와 같은 다중점 B축제어 가공은 공정중 형상오차의 보정을 위한 보정가공이 2-4회 수행되어 형상정도 목표를 달성하고, 다음 단계로서 공구축인 B축을 0.5-1° 정도 미소 회전시켜 고조도의 표면조도를 달성하게 된다. 즉 보정가공 공정을 통해 형상오차는 목표치 이하로 달성되어, 초기 공구위치 설정오차 등에 대한 영향은 제거 되었으므로, 공구회전에 의한 오차 분석만을 수행하였다.

Fig. 5에서와 같이 보정가공을 완료하여 형상정도가 목표치에 달성되었다는 조건하에서 표면조도 향상을 위한 B축의 θ 회전시 발생하는 오차는 그림 Fig. 5(b)와 같이 초기 바이트 반경값 r 의 오차 dr 이고, 회전에 의해 형상정도에 영향을 주게 되는 최종오차는 바이트 회전오차 r_{error} 가 된다. 바이트 회전오차는 바이트 반경오차량이 가공시에 반영되므로 아래 식과 같이 계산된다.

$$r_{error} = 2dr * \sin \frac{\theta}{2} \tag{1}$$

본 연구에서는 공구반경 0.5mm 다이아몬드 바이트를 최종 가공시 $\theta = 0.5^\circ$ 회전시켜 사용하였으며, 초기 설정 바이트 반경오차가 2 μ m일 때 최종 가공

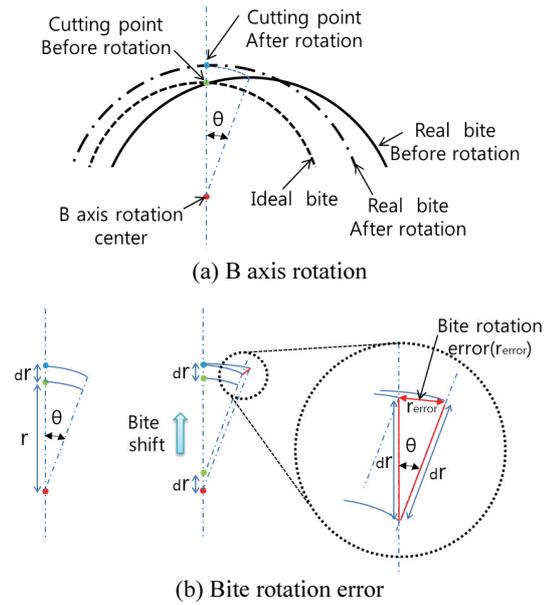


Fig. 5 Ultra-Precision diamond turning machine

물에서 바이트 회전에 의한 오차는 약 17nm로 목표로 하는 형상오차 범위에서는 영향이 크지 않다.

3. 가공실험 및 결과고찰

본 논문의 실험에서는 1-4차의 가공실험에서는 동일영역을 계속적으로 사용하여 형상오차 보정가공을 수행하여 형상정밀도 0.1 μ mPV를 달성하였으며, 이 과정에서 공구의 사용량이 증가함에 따라 표면이 거칠어지는 것을 확인하였다. 그리고, 마무리 가공인 5차 가공실험에서는 미소회전을 통해 공구마멸 영향을 최소화함으로써 표면조도가 향상됨을 확인하였다.

3.1 초정밀 절삭가공

비구면 사출렌즈 금형 코어의 소재로는 Stavax (크롬합금 스테인레스 금형강)을 모재로 하여 1차 가공한 후 HRC 45-54로 열처리 하고, 무전해 니켈 도금층을 100-300 μ m 올린 후 천연결정 다이아몬드 공구로 초정밀절삭 가공하는 것이 일반적이다. Stavax 소재는 내식성 및 내마모성이 우수하며, 무전해 니켈도금은 도금의 두께가 균일하고, 기공에 의한 결함이 거의 없으며, 광택성, 이형성, 내식성, 오염방지, 산화방지, 내마모성 등에서 우수한 특성을 가진다.



Fig. 6 Ultra-Precision diamond turning machine

Fig. 6에서 보는 바와 같이 3축(XZB)으로 구성되어 각축 1nm로 제어가 가능한 초정밀 다이아몬드 터닝머신 (ASP01, Nachi-Fujikoshi Co., Japan)을 사용하여 가공실험을 수행하였다.

3.2 형상오차 보정가공

초정밀 다이아몬드터닝 공정에서도 초기가공에서는 공구의 설정오차 및 선단의 반경오차 등으로 인하여 한번에 수 μm 의 형상오차를 만족시키기 어렵다. 따라서 요구되는 정밀도를 만족시키기 위해서는 가공 및 측정의 반복된 형상오차 보정가공을 통하여 요구되는 정밀도를 충족시키게 된다.

본 실험에의 절삭가공은 1-5차까지 공작물 회전속도 1,100Rpm, 절삭가공 깊이 0.002mm, 공구 이송속도 0.5mm/min의 동일한 절삭가공 조건으로 가공 실험을 수행하였다.

또한, 1-4차 가공 실험에서는 형상정밀도를 충족시키는 과정에서, 공구의 사용량에 따른 표면거칠기 변화를 확인하기 위하여 단일점 B축제어 방식과 유사하게 국소적인 영역만을 계속적으로 사용하여 가공실험을 수행하였다. Figs. 7(a)-(d)에서 보는 바와 같이 1차가공에서 형상정밀도 21.1 μm PV를 얻은 후 추가 3번의 형상오차 보정가공을 통하여 0.1 μm PV의 형상정밀도를 달성하였다.

그리고, 5차 절삭가공 실험에서는 다중점B축제어 가공법을 적용하여 앞선 과정에서 발생한 공구의 마멸구간을 회피하도록 공구를 미소회전시킨 상태에서 가공을 수행하였다. 그 결과 Fig. 7(e)에서 보는 바와 같이, 앞선 4차 가공에서와 유사한 형상정밀도 0.1 μm PV가 유지되고 있음을 확인하였다.

3.3 표면거칠기 측정 및 분석

가공면에 대한 표면거칠기를 분석하기 위하여 Zygo사의 NewView5000을 활용하였다.

표면거칠기를 측정한 결과는 Table 1과 Fig. 9에 나타내었다. Figs. 9(a)-(d)에서 보는 바와 같이, 1-4차가공까지는 표면거칠기(Ra) 1.4nm에서 2.3nm까지 점

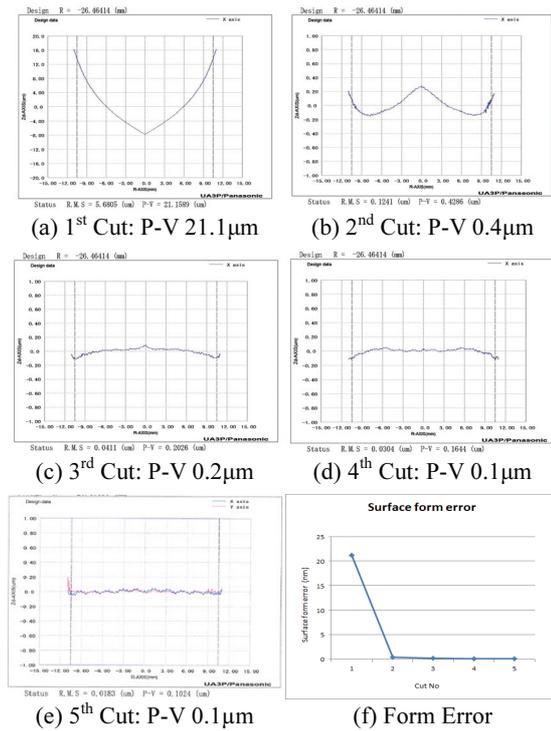


Fig. 7 Experimental result of surface form error

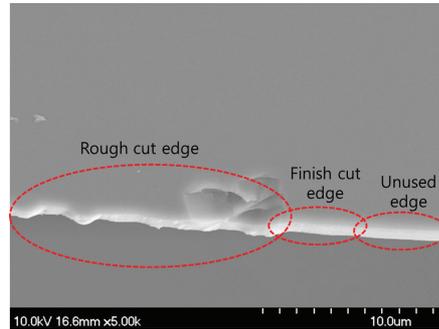


Fig. 8 Wear of bite edge

Table 1 Surface roughness

Cut No.	Ra(nm)
1 st	1.4
2 nd	1.4
3 rd	1.7
4 th	2.3
5 th	1.1

차적으로 증가추세를 보이다가, Fig. 9(e)와 같이 다중점 B축제어 가공법을 적용한 5차 실험에서는 표

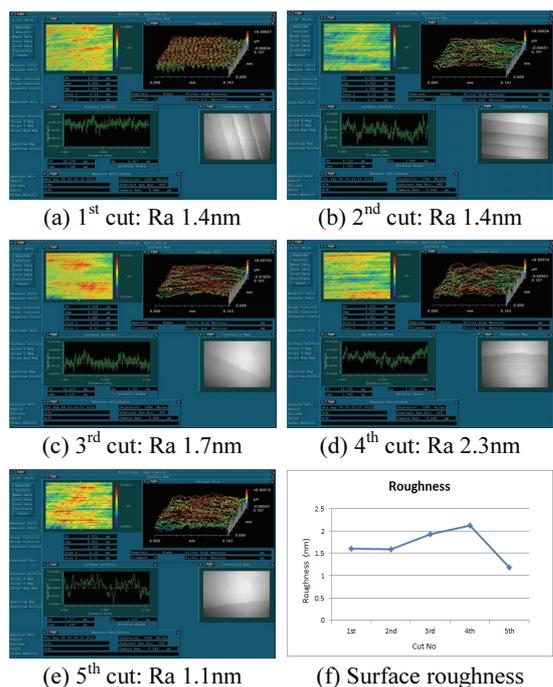


Fig. 9 Experimental result of surface roughness

면거칠기(Ra) 1.1nm로 초고조도 가공면이 구현됨을 알 수 있다.

이는 다중점 B축제어 가공법을 적용할 경우 마멸과 칩핑이 발생하지 않은 미사용 공구 선단을 사용함으로써 칩핑 및 공구마멸의 영향이 최소화 되어 초고조도면 가공이 가능함을 실험적으로 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 초정밀절삭 가공시 초고조도면 가공을 위하여 새로운 방식의 다중점 B축제어 가공법을 제안하고 이에 대한 가공실험을 수행하였다. 그 결과 초정밀절삭가공에서는 요구되는 형상 정밀도를 만족시키기 위하여 형상오차 보정가공은 필연적으로 수반되어야 하며, 이 과정에서 공구의 사용량이 증가됨에 따라 공구의 마멸이 점차 증가하여 표면조도가 계속적으로 악화됨을 확인하였다. 이는 기존의 2축 및 단일점 B축 제어 가공법으로는 표면조도를 향상시키기에는 한계를 가지는 것을 알 수 있다.

따라서, 본 논문에서 제안한 다중점 B축제어 가공법을 사용할 경우, 사용되지 않은 새로운 영

역으로 공구의 마멸영향을 최소화 하여 정삭가공을 수행함으로써, 기계가공을 통하여 달성할 수 있는 최고 수준의 초고조도면(Ultra-Fine surface)을 달성할 수 있음을 알 수 있었다.

REFERENCES

1. Kim, Y. B., "Improvement of Surface Roughness by Tool Axis Control for Diamond Turning Machine," M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2014.
2. Kim, Y. B., "Method for Working a Workpiece," KOR Patent, No. 10-2014-0052892, 2014.
3. Hwang, Y., Park, S. S., Lee, K. Y., Won, J. H., and Kim, H. H., "Tool Locus Analysis of Ultra-Precision Inclined Grinding," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 26, No. 11, pp. 35-40, 2009.
4. Lee, J. K., Je, T. J., and Lee, E. S., "A Study on the Micro Cutting Technology for Mirror Surface," Proc. of the KSME Spring Annual Conference, pp. 767-770, 1993.
5. Hwang, Y., Kim, M. J., Lee, H. S., Kim, H. J., and Kim, J. H., "Ultra Precision Grinding of Tungsten-Carbide with B Axis Angle Alignment," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 469-470, 2009.