

초경합금 소재 LCU_CL 코어의 초정밀 연삭 특성에 관한 연구

정상화*, 차경래+, 김현욱+, 이봉주+

A Study on Ultra Precision Grinding Characteristics of Tungsten Carbide LCU_CL Core

Sanghwa Jeong*, Kyoungrae Cha+, Hyunuk Kim+, Bongju Lee+

Abstract

As the various manufacturing technology of optical glass is developed, the aspherical lenses are applied to many fields. However, It is still very difficult to manufacture glass lens because of the high cost and the short life of core. In recent years, the demands of the aspherical glass lenses increase since it is difficult to obtain the desirable performance in the plastic lens. In the glass mold lens, it has merits of high productivity and reproductivity since lens is manufactured by the only forming with high precision mold. The fabricating conditions for glass mold lens are glass surface that does not cause fusion, viscosity of 108-1013 poise for the 0.2 μm accuracy, and viscoelasticity for the roughness less than 100 angstrom. In this thesis, ultra-precision grinding characteristics of tungsten carbide for forming the aspherical glass lens core were studied and the result of it is applied to manufacture the tungsten carbide-base core of the glass lens used to the laser scanning unit and the camera phone.

Key Words : Aspherical(비구면), Tungsten Carbide-base(초경합금), Glass Mold(글라스 성형), LSU_CL(Laser Scanning Unit Collimator Lens), Waviness(형상정도), Surface Roughness(표면 거칠기)

1. 서론

초정밀 가공기는 단결정 천연 다이아몬드 바이트와 다이아몬드 휠을 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 공작기계로서 주로 초정밀 광학 렌즈 가공이나 초정밀 방위, 우주항공 산업 관련부품을 가공하는데 이용되며 또한 컴퓨터 하드

디스크용 알루미늄이나 레이저 장비용 구리와 같은 비철금속 부품을 가공하는데 이용되고 있다.¹⁻²⁾ 70년대 중반 초정밀 가공기술이 등장한 이래 특히 초정밀 광학 부품의 가공에 있어서 생산비용의 절감 및 가공의 정밀도 분야에 많은 기술 개발이 진행되어 왔다.

* 정상화, 조선대학교 기계공학과 (shjeong@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

+ 조선대 기계공학과

최근 고성능 카메라폰의 수요가 증가하면서 플라스틱 렌즈만으로는 원하는 광학적 성능을 얻기 힘들기 때문에 비구면 글라스에 대한 요구가 증가하고 있다. 글라스 몰드 렌즈는 고정밀 몰드를 사용하면 성형만으로 렌즈가 만들어 지기 때문에 제조시간이 많이 단축되며, 고도의 재현성을 갖고 비구면 생산이 가능한 장점을 가지고 있다. 글라스 몰드 렌즈에 요구되는 가공 조건으로는 금형표면과 융착 반응이 일어나지 않는 글라스 조성, 형상의 고정밀도 P-V 0.2 μm 정도를 실현하기 위한 점도특성 108~1013 Poise이며, 표면 거칠기 Ra 10 nm 이내를 위한 점탄성을 가져야 한다.

본 연구에서 이러한 글라스 렌즈 성형용 비구면 소형렌즈 등에 사용되고 있는 초경합금의 초정밀 연삭특성을 연구하여 레이저 스캐닝 유닛에 사용되는 글라스 렌즈 성형용 초경합금 코어의 제작에 적용하였다. 이를 위해 글라스 렌즈 성형용 초경합금 코어를 가공하기 위한 정밀 지그 및 공구를 설계·제작하였으며, 초경합금의 소재 가공에 관한 초정밀 연삭특성의 연구를 통하여 초경합금의 초정밀가공 데이터베이스를 구축하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 비구면 글라스렌즈 성형용 초경코어를 제작하기 위해 자유곡면 초정밀가공기(ASP-01X, Nachi社)를 사용하였다. 자유곡면 가공기는 세 개의 유정압 슬라이드(X, Y, Z축)가 직교 형태를 이루며 구동하는 5축 가공기로서 유정압 베어링에 의해 구동되는 B축 Rotary Table에 공기 터빈 스피들이 장착되어 소구경 코어연삭이 가능한 가공기이다. 안내면의 위치는 1 nm의 성능을 가지며, 최대 가공 직경 150 mm까지의 공작물 가공이 가능하다. 안내면의 구동은 AC servo motor에 의해 구동된다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 초정밀가공기이다. 초정밀 가공을 통해 광응용 부품을 제작하고자 할 때 1차 가공된 가공품을 측정하고 보정 가공하는 것이 필수적으로 선행되어야 한다. Table 1은 가공정도 측정 및 평가를 위해 사용된 초정밀 계측기 사양이다. 표면 거칠기 측정장비(NT3300, Veeco社)는 초정밀 가공부품의 미세한 표면 형상을 비접촉식으로 광간섭의 원리를 이용, 확대해서 표면 거칠기 및 국부 현상을 측정하는 장비이다. 표면 형상 정도를 측정하는 장비 (GPI-XP Interferometer, Zygo社)로써 피에조 타입 간섭계를 사용하며, 광학적 오차를 가지고 있지 않으며, He-Ne 저출력 Laser(632.8 nm)를

사용한다. 접촉식 프로브 시스템 방식을 이용한 비구면 형상 측정장비(Form Talysurf PGI 1240, Taylor Hobson社)로써 미세한 축침으로 표면을 긁어서 표면을 측정한다.

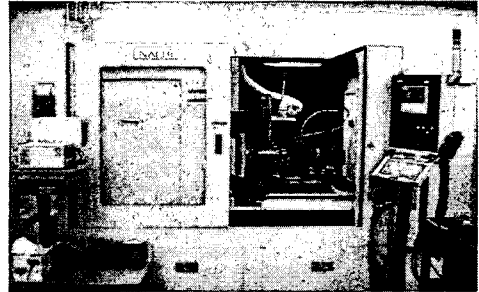


Fig. 1 Ultra-Precision Machine(ASP-01X)

Table 1 System Specification

NT3300, Veeco	
- Vertical Resolution :	0.1 nm
- Lateral Resolution :	0.64 ~ 11.8 μm
- Stitching Measurement Range :	100 mm \times 100 mm
- Objective :	10 \times , 50 \times , 100 \times
Laser Interferometer GPI-XP 4", Zygo	
- 4 Inch(100 mm)Interferometer System	
- Wave Length :	632.8 nm
- Resolution :	$\lambda/6000$
- Transmission Sphere :	f/0.65, f/1.5
Form Talysurf PGI 1240, Taylor Hobson	
- Resolution :	0.8 nm / 10 mm
- Data Resolution:	0.25 μm
- Standard Stylus:	1.5 - 2.5 μm radius

2.2 실험 방법

비구면 글라스렌즈 성형용 초경코어를 가공하기 위해 범용 공작기계를 사용하여 1차로 외형 형상 가공하고 경면 가공면은 초정밀 그라인딩 여유 0.1 mm까지 1차 구면가공한 후, 초정밀 가공기를 이용하여 최종 정삭 가공을 하였다. 실험을 수행하기 전에 초경합금 시편 지그를 주축의 진공척에 -82.8 kpa로 고정하여 회전시켰으며, 이때 사용되는 연삭액의 급유방식은 물 70 %, 연삭액 20 %, 방청유 10 %를 혼합하여 노즐분사방식을 사용하였다. 또한 연삭 후 측정 방법은 시편의 지름 6 mm되는 부분을 선정하여 항상 같은 위치에

서 5번을 측정하여 매번 총 16~20회 측정을 통하여 오차 범위가 큰 값을 제외하고 나머지 18개의 값을 평균 산출하여 측정값의 오차를 줄이고자 하였다. Table. 2는 최적 연삭가공조건을 규명하기 위한 초경소재의 단계별 가공조건을 나타낸다. Fig 2는 자유곡면 초정밀 가공기를 이용하여 가공하고자 하는 초경합금의 형상 설계도이며, Table 3은 초경합금의 특성을 나타낸다.

Table. 2 Cutting Conditions of WC

Diamond Wheel (mesh)	500, 1500, 2000
Spindle Speed (rpm)	200, 250, 300, 350 400, 450, 500
Turbine Speed (rpm)	30000, 35000, 40000, 45000, 50000
Feed Rate (mm/min)	0.25, 0.5, 1.0, 1.5
Depth of Cut (μm)	0.1, 0.25, 0.5, 1.0

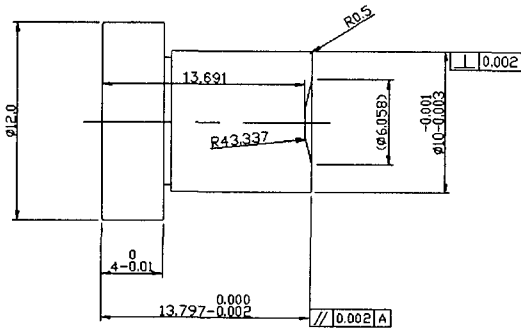


Fig. 2 Drawing of WC

Table. 3 Characteristics of WC(FB01)

WC	99%
Co	1%
Hardness	95 HRA Gpa
Transverse rupture strength	1.6 Gpa
Fracture Toughness	5.0 $\text{Mpa}\sqrt{m}$
Density	15.4
Young's Modules	660 Gpa
Coefficient of Thermal Expansion	$4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주축 회전속도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 3은 터빈 회전속도 40000 rpm, 이송속도 0.5

mm/min, 연삭깊이 0.25 μm 의 가공조건에서 각각의 휠 메시에 대한 주축 회전속도의 변화에 따른 표면 거칠기를 측정할 결과이다. 200~500 rpm까지 주축 회전속도를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 결과 300 rpm에서부터 450 rpm까지는 주축 회전속도의 변화에 따른 표면 거칠기가 양호해지며 450 rpm이후에는 표면 거칠기가 악화 되는 것을 알 수 있다. 휠 메시에 대한 표면 거칠기 변화는 휠 메시별로 차이를 보이고 있으며 일반적인 연삭의 특성에서 입자가 큰 경우 연삭의 절입날 밀도가 낮으며 연삭입자의 절입깊이가 커져서 소수의 큰 절삭분이 형성되는 것처럼 본 실험결과에서도 거친 입자를 가진 #500 다이아몬드 휠 또한 거친 결과를 보이고 있다. #2000 주축 회전속도 350 rpm일 때 표면 거칠기는 Ra 1.73 nm로 양호하게 나타났다.

실험 결과에 따르면 초경합금의 연삭에서 주축 회전속도는 300 rpm이상으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 도움을 주며 #500, #1500은 약 400 rpm정도가 가장 적합하다.

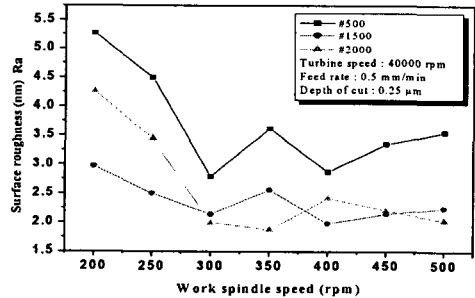


Fig. 3 Experimental Result of Roughness(Ra:nm) versus Spindle Speed Conditions.

3.2 터빈 회전속도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 4는 주축 회전속도 400 rpm, 이송속도 0.5 mm/min, 연삭깊이 0.25 μm 의 가공조건에서 각각의 휠 메시에 대한 터빈 회전속도의 변화에 따른 표면 거칠기를 측정할 결과이다. 30000 rpm에서 50000 rpm까지 터빈 회전속도를 단계적으로 변화시켰으며, 그 결과 #500은 30000 rpm에서 Ra 3.78 nm로 표면 거칠기를 얻을 수 있었으며 점차적으로 감소하는 경향을 보이다가 40000 rpm에서는 Ra 3.28 nm로 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 45000 rpm에서부터는 표면 거칠기가 다시 증가하는 경향을 보였으며 50000 rpm에서 Ra 8.08 nm의 표면 거칠기가 악화되는 것으로 나타났다. 다이아몬드 휠 #1500을 이용하여 가공한 결과 30000 rpm에

서 Ra 2.43 nm로 표면 거칠기를 얻을 수 있었으며 점차적으로 감소하여 45000 rpm에서는 가장 양호한 Ra 1.68 nm값을 얻을 수 있었다. 이후 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. #2000을 이용하여 가공한 결과 터빈 회전속도 30000 rpm에서 Ra 2.13 nm로 표면 거칠기를 얻을 수가 있었으며 점차적으로 감소하였다. 터빈 회전 속도 35000 rpm에서 Ra 1.60 nm로 표면 거칠기가 좋았고 점차적으로 증가하는 경향을 보이거나 다시 터빈 회전속도 50000 rpm에서 좋아지는 결과를 볼 수가 있었다.

본 실험을 통하여 #1500, #2000은 아주 비슷한 결과를 보였다. 다이아몬드 휠의 경우 드레싱으로 조절 가능한 표면 거칠기의 범위가 매우 작기 때문에 입도에 따라 우선적으로 표면 거칠기의 범위가 결정되었다. 다이아몬드 휠 #500을 이용하여 가공한 결과 이론적 표면 거칠기를 보듯이 전체적으로 높은 메시에 비하여 표면 거칠기가 전체적으로 크게 나타났다. #500에서 45000 rpm 이상에서는 표면 거칠기가 급속도로 증가하는 경향을 보였으며 50000 rpm에서는 Ra 8.08 nm로 표면 거칠기가 나왔다. 그 이유는 연삭 가공을 실시할 때 입도가 너무 낮은 휠을 이용하면 연삭분은 잘 빠지지만 연삭날 수가 적기 때문에 연삭날에 마모가 생기기 쉽고, 휠의 연삭 성능이 저하되어 표면 거칠기가 커지기 때문이다.

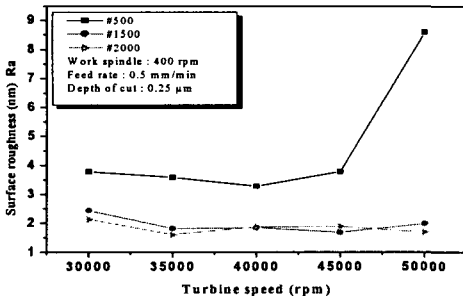


Fig. 4 Experimental Result of Roughness(Ra:nm) versus Turbine Speed Conditions.

3.3 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 5는 주축 회전속도 400 rpm, 터빈 회전속도 40000 rpm, 연삭깊이 0.25 μm의 가공조건에서 각각의 휠 메시에 대한 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 초정밀 가공시 이송속도에 따른 표면 거칠기는 터닝에서 일반적으로 비례적으로 나타난다.⁴⁾ 연삭 가공에서는 Fig. 6과 같이 각각의 연삭깊이에 대하여 연삭 이송속도에 따른 표면 거칠기 값이 증가하는 경향을 볼 수 있으며 #500은 이송속

도 0.25 mm/min에서 점차적으로 감소하여 0.5 mm/min에서 Ra 2.4 nm로 가장 양호한 표면 거칠기를 나타내고 점차적으로 증가하여 이송속도 1.5 mm/min에서는 Ra 5.8 nm로 표면 거칠기가 가장 크게 나타났다.

#1500은 이송속도 0.25 mm/min에서 점차적으로 감소하여 0.5 mm/min에서 Ra 1.93 nm로 가장 양호한 표면 거칠기를 나타내고 점차적으로 증가하여 이송속도 1.5 mm/min에서는 Ra 3.45 nm로 표면 거칠기가 가장 크게 나타났다.

#2000은 이송속도 0.2 mm/min에서 점차적으로 감소하였으며 0.7 mm/min에서는 #500과 #1500보다 표면 거칠기가 크게 나타났다. 그 이유는 휠 작업면 상의 연삭날이 #500과 #1500보다 칩 포켓의 크기가 작기 때문에 원활한 칩 배출이 되지 않아 연삭 성능이 저하 되어 표면 거칠기가 크게 나타나는 것으로 사료된다. 또한 0.5 mm/min에서 Ra 1.65 nm로 가장 양호한 표면 거칠기를 나타내고 점차적으로 증가하여 이송속도 1.5 mm/min에서는 Ra 6.5 nm로 표면 거칠기가 가장 크게 나타났다. 실험결과는 일반적으로 메시가 커짐에 따라 표면 거칠기가 양호하게 나타나는 이론적 표면거칠기와 비슷한 경향의 측정결과를 나타내었다. 따라서 초경합금의 경우, 0.5 mm/min 정도의 이송속도로 가공을 할 경우 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있다.

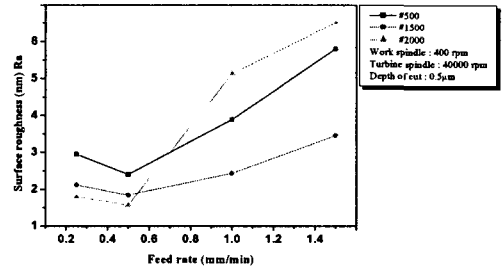


Fig. 5 Experimental Result of Roughness(Ra:nm) versus Feed Rate Conditions.

3.4 연삭깊이 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 6은 주축 회전속도 400 rpm, 터빈 회전속도 40000 rpm, 이송속도 0.5 mm/min의 가공조건에서 각각의 휠 메시에 대한 연삭깊이의 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 0.1 μm에서 1 μm까지 연삭깊이를 단계적으로 변화시켰으며, 그 결과 #500에서는 초기 0.1 μm에서 Ra 4.22 nm로 표면 거칠기가 크게 나타났으며 점차적으로 감소하여 0.25 μm에서 Ra 2.87 nm로 표면 거칠기가 양호하였다. 0.25 μm 이후에는 점차적으로 표면 거칠기가 크게 나타났다. Fig. 6

에서 나타낸 바와 같이 Optical Grinding Condition #1500에서는 0.1 μm 에서 Ra 2.6 nm로 표면 거칠기가 나타났으며 0.25 μm 에서는 Ra 1.84 nm로 표면 거칠기가 양호하게 나타나고 0.5 μm 에서부터 1 μm 까지는 비교적 일정한 값을 유지하였다. 다이아몬드 입자 #2000은 0.5 μm 에서 표면 거칠기가 양호하게 나타났으며 0.1 μm 에서 1 μm 까지 비교적 일정한 값을 유지하였다. 여러 가지 실험 결과 최적의 연삭 조건은 가공 효율성을 고려할 때 다이아몬드 입자 #2000에서 주축 회전속도는 400 rpm, 이송속도는 0.5 mm/min, 연삭깊이는 0.5 μm 일 때 가장 양호한 표면 거칠기 Ra 1.6 nm를 얻을 수 있었다. 또한 연삭공구의 선정에 있어서 가공물의 형상에 따라 적용하는 데는 차이가 있겠지만 다이아몬드 휠의 메시가 큰 휠을 선택해야 한다.

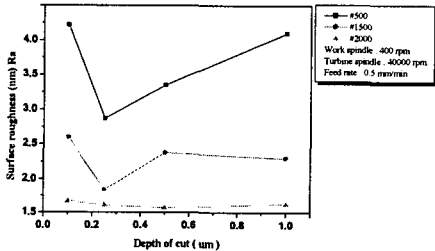


Fig. 6 Experimental Result of Roughness(Ra:nm) versus Depths of Cut Conditions.

3.5 Laser Scanning Unit Collimator Lens (LSU_CL) 코어 가공 및 측정

LSU_CL 코어의 가공 요구 정밀도는 표면 거칠기가 Ra 10 nm, 형상정밀도 P-V 0.2 μm 이하의 정밀도를 요구한다. 코어의 비구면형상가공은 일차적으로는 비구면 가공프로그램(NA-CAM)을 이용하여 NC 프로그램을 작성하고, 최적곡률 반경(Optimum Radius)을 찾아 구면을 가공한 후 비구면 프로그램을 이용하여 초정밀 가공을 수행하였다. Table. 4는 앞 절에서 실험을 통해 구한 초경합금의 초정밀 최적 연삭조건이며, Fig. 87 LSU_CL 코어의 초정밀가공 사진이다.

Table. 4 Best Cutting Condition.

Material	WC(FB01)
Diamond Wheel	# 2000
Spindle Speed	350 rpm
Turbine Speed	35000 rpm
Feed Rate	0.5 mm/min
Depth of Cut	0.5 μm

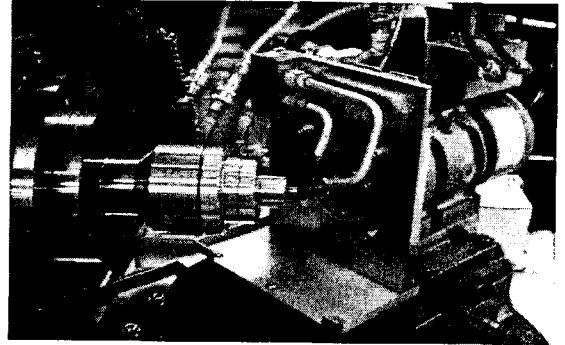


Fig. 7 Ultra Precision Grinding Process of LSU_CL

Fig. 8은 비접촉식 표면 거칠기 측정기(NT3300, Veeco社)를 이용하여 초정밀 가공한 코어의 조도를 측정된 결과이다. 다이아몬드 휠 #2000, 주축 회전속도 350 rpm, 터빈 회전속도 35000 rpm, 이송속도 0.5 mm/min, 절삭 깊이가 0.5 μm 로 가공한 표면의 측정결과 Ra 1.53 nm값을 나타낸다. 또한, 가공면의 비구면 형상 오차를 측정하였다. Fig. 9(a)는 LSU_CL Upper 코어를 가공후 Zygo社의 GPI-XP를 이용하여 측정된 결과이며, Fig. 9(b)는 LSU_CL Low 코어를 가공 후 FTS를 이용하여 형상측정한 결과를 나타낸다. LSU_CL 코어의 가공결과 요구되는 정밀도인 표면 거칠기 Ra 10 nm, 형상정도 P-V 0.2 μm 이하를 충분히 만족하는 Ra 1.53 nm, Low core P-V 0.0975 μm , Upper core P-V 0.134 μm 의 정밀도로 가공되었다.

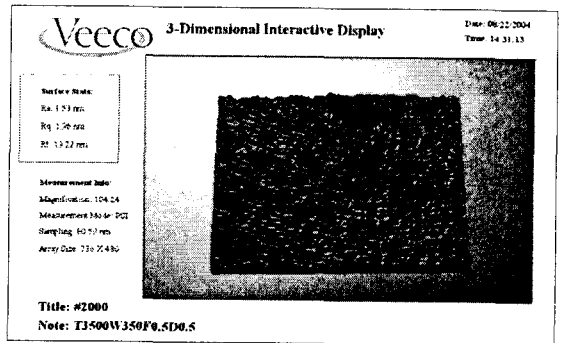
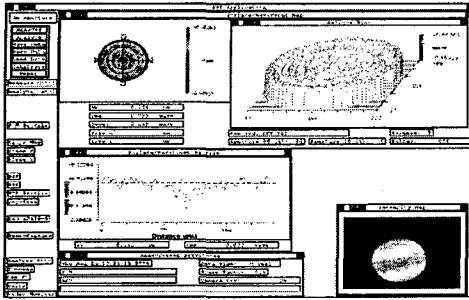
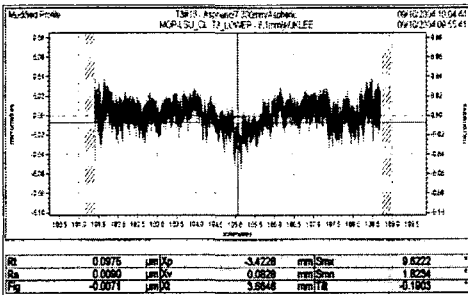


Fig. 8 Measurement result of surface roughness.



a) Upper Core P-V 0.134 μm

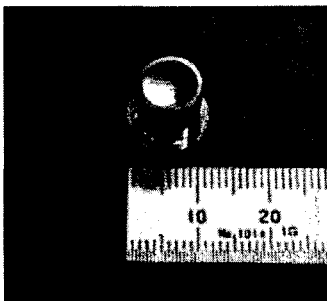


b) Low Core P-V 0.0975 μm

Fig. 9 Measurement Result of Form Error.



a) Low core



b) Upper core

Fig. 11 LSU_CL core

4. 결론

본 연구에서는, 초경합금의 초정밀 가공 특성을 파악하기 위하여 다이아몬드 휠의 메시, 주축 회전속도, 터빈 회전속도, 이송속도 및 연삭 깊이에 따른 표면 거칠기를 측정하여 최적 연삭조건을 규명하였으며, 이러한 초경합금의 초정밀 가공 조건을 바탕으로 LSU_CL코어의 초정밀 보정 가공을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째 초경합금의 초정밀 최적가공조건은 주축회전속도 350 rpm, 터빈회전속도 35000 rpm, 이송속도 0.5 mm/min, 절삭 깊이 0.5 μm 일 때 Ra 1.53 nm정도의 양호한 표면 거칠기를 얻었다.

둘째 다이아몬드 휠의 메시에 따른 표면 거칠기 평가에서는 다이아몬드 휠의 메시가 #2000에서 가장 양호한 표면 거칠기 Ra 1.53 nm를 얻을 수 있었으며, 다이아몬드 휠의 메시가 가장 큰 #500 다이아몬드 휠의 경우 표면 거칠기가 높게 나타났지만 연삭성은 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 #1500는 #2000와 각 변수에 대하여 비슷한 양상을 보였으며 정상 휠로 사용하는데 무리가 없는 것으로 사료된다.

마지막으로 LSU_CL 코어의 초정밀 가공 결과 가공면은 표면 거칠기 Ra 1.53 nm, 형상정밀도는 Low core P-V 0.0975 μm , Upper core P-V 0.134 μm 로써 요구정밀도의 요구 조건 이내로 제작하였다.

참고문헌

1. Junyi Yu and Jiawang Yan "Ultraprecision diamond turning of optical crystals." SPIE, Vol 1994/5
2. T. Moriwaki and K. Okuda, "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting," Ann. CIRP, Vol 38, pp. 115-118, 1989.
3. 辻郷康生 : 다이아몬드 지석을 이용한 경취 재료의 연삭, 현장에 도움이 되는 경취 재료의 정밀 가공, 텍스트, 정밀 공학회(1993) P64
4. 성철현, 김형철, 김기수, "알루미늄 합금의 고속 선삭에 있어서 표면 거칠기 특성" 정밀공학회지 제 16권 Vol. 16. No7. pp. 94~100 1999