

◆ 특집 ◆ 렌즈/미러 가공 및 소재기술

Infrared 광학초자의 초정밀 가공 특성

The Characteristics on Ultra Precision Machining for Infrared Optical Materials

양순철¹, 허명상¹, 김상혁¹, 이길재¹, 이상용¹, 국명호¹, 장기수¹, 유선영¹, 원종호², 김건희^{1,✉}
Sun Choel Yang¹, Myung Sang Huh¹, Sang Hyuk Kim¹, Gil Jae Lee¹, Sang Yong Lee¹,
Myung Ho Kook¹, Ki Soo Chang¹, Seon Young Ryu¹, Jong Ho Won² and Geon Hee Kim^{1,✉}

¹ 한국기초과학지원연구원(Korea Basic Science Institute.)

² 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

✉ Corresponding author: kgh@kbsi.re.kr, Tel: 042-865-3460

Manuscript received: 2012.1.17 / Accepted: 2012.1.31

In nowadays, the infrared optics is frequently employed to various fields such as military, aerospace, industry and medical. To develop the infrared optics, special glasses which can transmit infrared wave are required. Ge(Germanium), Si(silicon), and fluoride glasses are typically used for material of the infrared optics. Compared with Ge and Si glasses, fluoride glasses have high transmittance in infrared wavelength range. Additionally, UV(ultraviolet) and visible light can be transmitted through fluoride glasses. There characteristics of fluoride glasses makes it possible to evaluate optical performance with generally used visible testing equipment. In this paper, we used design of experiment to find ultra precision machining characteristic of Ge and fluoride glasses and optimized machining process to obtain required form accuracy of P-V(Peak to Valley) 0.2 μm .

Key Words: Ultra Precision Engineering (초정밀 가공), Infrared Optics (적외선 광학계), Germanium (게르마늄), Silicon (실리콘), Fluoride Glass (불화계열 초자), Design of Experiment (실험 계획법)

1. 서론

절대영도 (-273 °C) 이상의 온도를 가지고 있는 모든 물체들은 그 온도에 대응하는 열 에너지를 방사한다. 이러한 열 에너지의 근원은 적외선이며 전자기파의 스펙트럼에서 일반적으로 0.8 μm 에서 1 mm 사이의 파장 영역을 가지고 있다. 적외선은 파장의 길이에 따라 근적외선 (0.8~2 μm), 중적외선 (3~5 μm), 그리고 원적외선 (5 μm 이상)으로 분류된다.¹

적외선을 감지하는 적외선 광학계는 초기에는 빛이 없는 야간에도 사용이 가능하다는 장점으로

인하여 방위 산업과 관련된 분야에 널리 사용되었으며 적외선 관측을 위한 천문우주용으로 인공위성 광학계에 주로 사용되었다. 그러나 근래에 들어 대상에 직접적인 물리적인 영향을 주지 않으며 반복적 수행이 가능하다는 적외선 광학계의 장점을 이용하여 반도체 직접회로의 검사장비, 산불감시와 같은 보안용 카메라, 자동차용 나이트비전 (night vision)등에 응용되고 있다. 또한, 특정 질병들의 초기진단 및 감별을 위한 의료용 검사 장비 및 생체 시료의 분석에도 적외선 광학계가 응용되어 그 수요와 응용 범위가 증가하고 있다.²⁻⁴

그러나 일반적인 광학 소재는 적외선이 투과시

키지 못하기 때문에 적외선 굴절 광학계의 개발을 위해서는 적외선 파장 영역을 투과시킬 수 있는 광학 초자를 사용해야 한다.^{5,6} 대표적인 적외선 광학 초자로는 게르마늄(Ge)과 실리콘(Si)이 있다. 두 소재 모두 큰 굴절률을 가지고 있지만 적외선 파장 영역에서의 투과율이 높지 않다. 또한, 실리콘은 다른 적외선 초자에 비하여 높은 탄소 함량을 가지고 있기 때문에 강성이 크며 이러한 물리적 특성은 다이아몬드 바이트(diamond bite)를 이용한 DTM(Diamond Turning Machine) 가공 과정에서 바이트의 소모를 크게 만든다. 이러한 이유로 실리콘을 이용한 비구면 광학계는 비용이 많이 요구되며 개발이 어렵고 실리콘은 주로 구면으로 제작되어 사용된다. 실리콘과 달리 게르마늄은 DTM을 이용한 비구면 가공이 가능하기 때문에 비구면으로 설계된 적외선 광학계에서 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 게르마늄은 소재의 가격이 고가이며 코팅 및 조립과정에서의 칩핑(Chipping)에 주의해야 하기 때문에 일반적으로 광학계의 끝부분이 아닌 밀폐된 중심부에 배치되도록 광학계를 설계하는 것이 바람직하다.

게르마늄과 실리콘 외에도 불화 계열의 적외선 초자가 있으며 불화칼슘(CaF₂, Calcium Fluoride), 불화바륨(BaF₂, Barium Fluoride), 불화리튬(LiF, Lithium Fluoride) 및 불화마그네슘(MgF₂, Magnesium Fluoride) 등이 일반적으로 사용되고 있다. 불화 계열의 적외선 초자들은 적외선뿐만 아니라 가시광선 및 일부 자외선 영역에서도 높은 투과율을 보이지만 상대적으로 낮은 굴절률을 갖기 때문에 주로 광학계의 광학창으로 사용되고 있다.⁷⁻¹⁰ 적외선 비구면 광학계 개발에 있어 불화 계열의 가장 큰 장점은 가시광 영역의 검사 장비를 이용한 광학계의 측정 및 평가가 가능하다는 것이다. 가장 일반적인 적외선 광학 초자인 게르마늄의 경우에는 광학계의 측정 및 평가를 위하여 적외선 파장을 이용해야 하지만 비구면 광학계를 적외선을 이용하여 평가하는 장비는 아직 대중화되지 못하였으며 현존하는 장비의 측정 가능한 광학 특성 또한 가시광선 장비에 비해 한정되어있기 때문에 광학계의 측정 및 평가에 어려움을 가지고 있다. 하지만 불화 계열의 적외선 초자들은 가시광선 파장 영역을 투과시킬 수 있기 때문에 이미 대중화된 가시광선을 이용한 간섭계 장비를 이용한 다양한 광학적 성능의 측정 및 평가가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

적외선 광학계의 응용분야와 필요성 및 수요는 점차 증가하고 있는 상황이지만 적외선 광학계의 설계, 제작, 측정 및 개발에 관련된 첨단 기술 및 특허는 미국, 유럽 및 일본과 같은 선진국들이 대부분 보유하고 있으며 국방관련 핵심 기술로 분류되기 때문에 기술공개가 극도로 제한되어 있고 관련 부품 및 장비의 수출에도 엄격한 심사가 요구되어 국내 도입에 높은 비용이 요구되고 있다. 따라서, 국내에서도 적외선 광학계의 수요 증대에 맞추어 적외선 광학계의 설계, 제작, 측정 및 개발을 위한 독자적인 기술력 확보가 요구되는 상황이다.

본 논문에서는 일반적으로 적외선 비구면 광학계에서 사용되는 게르마늄과 불화 계열의 소재인 BaF₂, MgF₂ 및 LiF 적외선 초자의 초정밀 가공 특성을 실험계획법을 통하여 분석하였고, 분석 결과를 이용해 게르마늄과 LiF 비구면 렌즈를 초정밀 가공하여 요구 형상정밀도를 만족하였다.

2. 실험 장비 및 방법

2.1 실험 장비

게르마늄, BaF₂, MgF₂ 및 LiF의 초정밀 가공 특성에 대한 연구를 위해 사용한 장비는 Fig. 1(a)의 초정밀 자유곡면가공기(5-axis control ultra precision freeform generator machine)는 Freeform 700A (Precitech: USA)이며 Fig. 1(b)의 비접촉식 표면형상 측정기인 NT2000(Veeco: USA)을 이용하여 표면 조도(surface roughness)를 측정하였다. NT2000은 광간섭의 원리를 이용한 대물렌즈의 확대를 통하여 표면 거칠기 및 미세한 형상을 측정하는 장비이며 자동 초점 이송 방식으로 최대 측정범위는 100 mm × 100 mm, 측정 높이는 0.1 nm - 150 μm, 분해능은 0.1 nm이다.¹¹ 비구면 렌즈의 형상 정밀도(form accuracy)는 초고정도 3차원 형상 측정기(ultra-high accurate 3D profilometer)인 UA3P(Panasonic: Japan)를 이용해 측정하였다. UA3P는 AFP(Atomic Force Probe)를 이용한 측정기로 원자간력을 이용하여 구면, 비구면 및 자유곡면의 형상을 2차원 및 3차원으로 측정할 수 있다. 통상적으로 표면 형상측정에는 각각의 축 방향으로 한 방향에 대해 한 개의 라인을 측정 후 분석을 하지만 UA3P는 두 개의 축 방향에 대해 두 개의 측정값을 동시에 분석할 수 있기 때문에 형상 정밀도에 대한 정확한 측정이 가능하다. UA3P는 AFP를 원자간력이 작용하

는 영역까지 근접을 시켜 원자간력을 15-30 mgf 정도로 항상 일정하게 유지하며 최대 60° 까지 경사면을 측정할 수가 있고 측정 속도는 0.01 - 10 mm/s 로써 측정대상물에 따라 조절이 가능하다.¹² 또한, 측정값을 이용하여 측정 대상의 편심 및 비구면계수의 산출이 가능하고 도광관 및 광통신부품의 홈(groove) 형상도 측정할 수 있다. UA3P 는 Windows 를 기반으로 하는 간단한 조작과 분석이 가능하고 무엇보다도 초정밀 가공된 제품을 측정할 경우에 측정 표면에 손상을 주지 않고 측정을 하여 측정 결과를 빠르게 가공 공정으로 피드백(feedback)시켜 보정가공을 할 수 있기 때문에 초정밀 가공에서의 정밀도 향상에 유리하다.

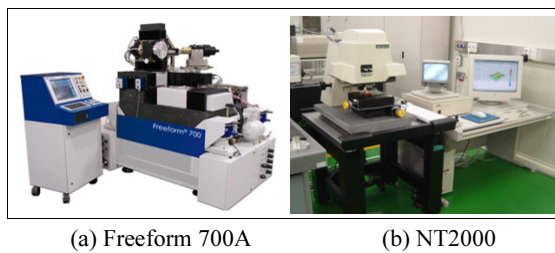


Fig. 1 Equipment for fabrication and measurement

2.2 실험 계획법

본 연구에서는 초정밀 가공 특성에 따른 표면 거칠기를 실험계획법(design of experiment)을 통해 분석하여 최소한의 실험으로 초정밀 가공 특성에 대한 정보를 얻을 수 있었다. 실험계획법은 주어진 실험에 대한 실험방법을 의미하는 것으로 어떠한 통계적 방법으로 데이터 분석을 하면 최소의 실험회수로 최대의 정보를 얻을 수 있는지를 계획하는 것으로 정의할 수 있다. 이러한 실험계획법을 이용하여 해결해야 할 문제에 대한 인자를 선정하고 실험 방법 및 실험 순서를 정해 실험값을 얻는다면 최적의 분석방법을 선택할 수 있다. 각 요인의 효과 분석에는 분산분석(analysis of variance)을 사용하였다. 분산분석은 실험에서 얻은 특성치의 분산 분포를 제품의 합으로 나타내고 그 제품의 합을 실험과 관련된 인자별의 제품의 합으로 분배하여 오차의 정도에 따라 큰 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석 방법이다. 분산분석의 통계적 산출은 MINITAB 프로그램을 사용하였으며 표면 조도에 영향을 미치는 주 효과와 각 인자의 상호간에 미치는 교호작용을 파악하였다. 실험 설계를 위한 요인배치법으로는 K^n 요인배치

법(K^n factorial design)을 사용하였으며 인자의 수가 n 개이고 각 인자의 수준수가 K 인 실험계획법으로 모든 인자간의 수준의 조합에서 실험이 이루어지는 실험으로 K^n 번의 실험 횟수가 실행되어야 한다. 요인배치법에 의한 실험을 요인실험(factorial experiment)이라고 하고 요인실험에서는 인자의 효과와 교호작용을 포함한 모든 요인효과를 추정할 수 있다는 특징이 있다.¹³

MINITAB 프로그램을 통해 분석한 잔차의 정규 확률플롯(probability plot)은 실험의 비정규성을 탐지하며, 플롯 모양이 거의 직선을 이루면 잔차가 정규분포를 따른다는 의미이다. 만약, 플롯의 점들이 직선에서 벗어나면 정규성 가정이 옳바르지 않은 것으로 판단할 수 있다. 잔차 대 적합치(residuals versus of the fitted values)에서는 일정하지 않은 분산, 고차 항 누락 및 특이치 등을 탐지하며 0 의 양쪽으로 잔차의 랜덤 패턴이 나타나야 한다. 대다수 점으로부터 멀리 떨어진 점은 특이치일 수 있으며 그림 내에 식별 가능한 특정 패턴이 존재하지 않아야 한다. 히스토그램(histogram)의 모양은 데이터를 그룹화 하는데 사용된 구간의 수에 따라 달라지므로 잔차의 정규성을 평가하려면 정규 확률도와 적합도 검정을 사용한다. 잔차 히스토그램은 근사적으로 대칭을 이루고 종 모양을 따라야 정규분포를 이룬다고 할 수 있다. 잔차 대 데이터순서(residuals versus the order of the data)는 모든 잔차를 데이터 수집 순서와 같은 순서로 표시한 것으로 부호가 같은 잔차들이 모여 있으면 양의 상관관계, 연속된 부호 사이의 변화가 크다면 음의 상관관계로 해석할 수 있다.

적외선 초자의 초정밀 가공 특성에 따른 표면 거칠기에 영향을 주는 인자는 공구 윗면 경사각, 절삭 속도, 이송 속도 및 절삭 깊이로 정의하였으며 각각의 인자들을 3 수준으로 하였다. 실험 결과는 MINITAB 프로그램의 분산분석 기법을 이용하여 초정밀 가공 특성이 표면 조도에 미치는 영향을 분석하여 가공 특성을 찾도록 하였다.

3. 적외선 초자의 초정밀 가공 특성

3.1 게르마늄의 초정밀 가공 특성

게르마늄의 초정밀 가공 특성에 대한 연구를 위하여 지름 38 mm, 두께 10 mm 의 시편을 제작하여 공구 윗면 경사각, 절삭 속도, 이송 속도 및 절삭 깊이에 대한 28 mm 부분의 4 지점을 동일한 방

법으로 반복 측정된 결과를 평균값으로 산출하여 표면 거칠기를 측정하였다. 초정밀 가공 공정에 미스트를 사용하여 다이아몬드 바이트의 손상을 최소화하고 공작물의 칩 배출을 용이함으로써 표면 조도가 향상되도록 하였다. 초정밀 가공 실험은 시편의 끝단으로 단면 절삭 실험을 하였다.

Table 1 에 표기한 각각의 인자들을 3 수준으로 하여 조건 변화에 따른 표면 거칠기를 MINITAB 프로그램의 분산분석기법을 이용하여 실험에서 얻은 특성치로 초정밀 절삭가공에 미치는 영향을 분석하였으며 Table 1 에 나타난 각각의 인자 관하여 가공 특성을 찾는 것을 목적으로 실험을 진행하였다.

Table 1 Experimental condition of Germanium

Parameters	Cutting Condition
Work piece	Germanium
Cutting speed (m/min)	131, 155, 179
Feed rate (mm/min)	2, 5, 10
Depth of cut (μm)	1, 5, 10
Tool rake angle ($^\circ$)	-15, -25, -45
Nose radius (mm)	1.0
Cutting fluid	Mist

Fig. 2 는 게르마늄의 초정밀 가공에서 특성치에 대한 잔차분석을 나타내고 있다. Fig. 2 에서 잔차는 0 주위에 랜덤하게 분포되어있으며 잔차 히스토그램 또한 근사적으로 대칭을 이루는 종모양이기 때문에 정규분포를 이루는 것으로 확인할 수 있다. 따라서 실험에서의 특이성과 비정규성이 드러나지 않으며 실험의 조건 설정 및 수행이 정상적으로 수행되었다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3 은 표면 조도 측정값과 주효과의 크기를 비교하기 위해 분산 분석을 수행한 그래프이다. 주효과는 수준 간 반응치 평균의 차이를 말하며 그림에서 중심부의 수평선은 총 평균값을 나타낸다. 각 점들은 각 수준에서의 평균값을 의미하며 절대값이 클수록 영향이 큰 인자이다. 주효과는 각 요인들의 가장 높은 표면 조도와 가장 낮은 조도와와의 편차량이 가장 큰 순서대로 초정밀 가공 특성에 큰 영향을 미치고 있다고 판단한다. 이송 속도가 1.575 nm 의 변화로 조건 변화에 따른 가공 특성에 가장 큰 영향을 미치고 있으며 다음으로 영향이 큰 인자는 공구 윗면 경사각으로 0.938 nm 의 변화를 보였다. 가장 작은 영향을 미치는 인자

는 절삭 깊이로 0.244 nm 의 변화를 보였다. 절삭 속도에 의한 변화량은 0.515 nm 로 나타났다. 실험 계획법을 이용한 게르마늄 초자의 초정밀 가공 특성을 분석한 결과 Fig. 4 와 같이 공구 윗면 경사각 -45° , 절삭 속도 179m/min, 이송 속도 2 mm/min 및 절삭 깊이 1 μm 의 가공 조건에서 최적의 표면 조도 Ra 0.72 nm 의 결과를 Fig. 5 와 같이 확인하였다.

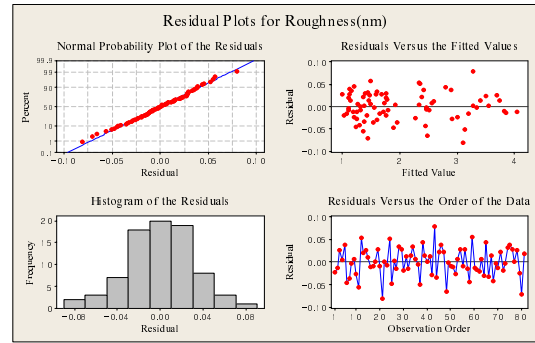


Fig. 2 Residual model diagnostic for surface roughness of Germanium

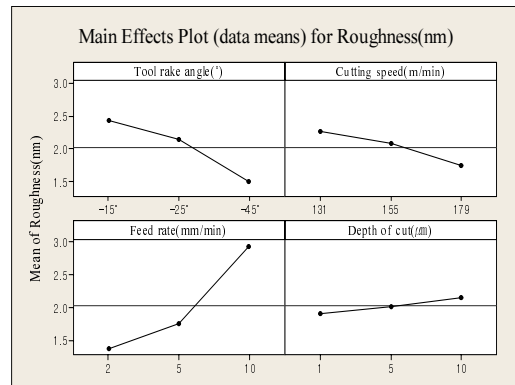


Fig. 3 Main effect plot for surface roughness of Germanium

3.2 불화(Fluoride)계열초자의 초정밀가공 특성

불화계열 초자의 초정밀 가공특성에 대한 연구를 위하여 지름 50.8 mm, 두께 10 mm 의 LiF, BaF₂ 및 MgF₂ 시편을 제작하여 게르마늄과 동일하게 공구 윗면 경사각, 절삭 속도, 이송 속도 및 절삭 깊이에 대한 표면 조도를 측정하였다. 인자의 종류와 수준은 동일하게 배치하였지만 불화계열 초자들은 게르마늄에 비하여 누프경도(Knoop hardness)가 낮기 때문에 물리적 특성으로 고려해 절삭 속도를 상대적으로 높게 설정하였다.

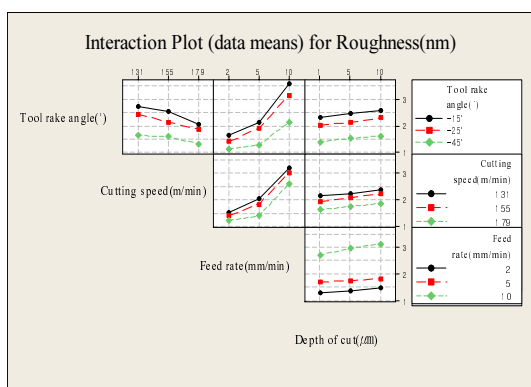


Fig. 4 Surface roughness versus tool angle, cutting speed, feed rate and depth of cut(Germanium)

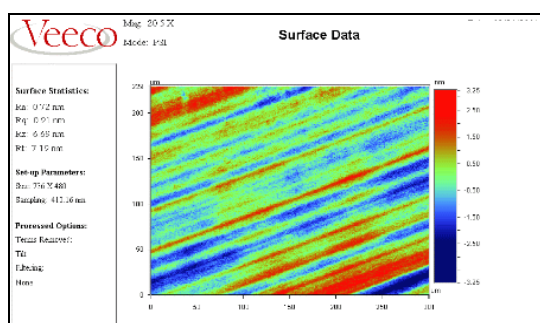


Fig. 5 Measurement roughness of aspheric Germanium lens

Table 2 Experimental condition of fluoride glasses

Parameters	Cutting Condition
Work piece	LiF, BaF ₂ , MgF ₂
Cutting speed (m/min)	173, 204, 235
Feed rate (mm/min)	2, 5, 10
Depth of cut (μm)	1, 5, 10
Tool rake angle (°)	-15, -25, -45
Nose radius (mm)	1.0
Cutting fluid	Mist

표면 조도는 시편의 지름 35 mm 부분의 4 지점을 동일한 방법으로 반복 측정된 결과의 평균값으로 산출하였다. 3.1 절에서의 적외선 게르마늄 초자의 초정밀 가공특성을 분석한 것을 바탕으로 LiF, BaF₂ 및 MgF₂ 초자를 실험계획법의 요인배치법을 이용하여 실험 테이블을 작성하였다. 불화계열 초자의 초정밀 가공 특성을 분석하기 위해 Table 2의 각각의 인자들의 변화에 따른 표면 거칠기를 MINITAB 프로그램의 분산분석을 이용하여 분산의

동일성을 검정하고 각각의 인자들이 표면 조도에 미치는 영향을 분석하였다.

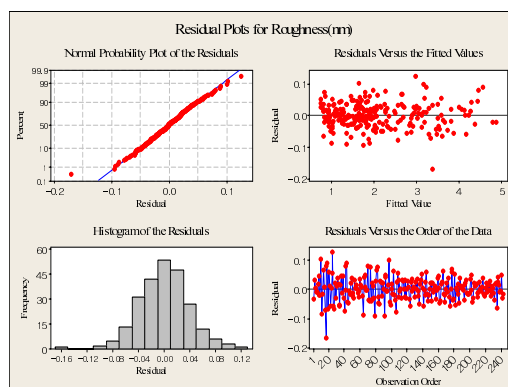


Fig. 6 Residual model diagnostic for surface roughness of fluoride glasses

Fig. 6 은 LiF, BaF₂ 및 MgF₂ 초자의 초정밀 가공에서 특성치에 대한 잔차분석을 나타내고 있다. Fig. 6 에서 잔차들은 일반적인 직선형태를 따르며 분포하고 있기 때문에 잔차의 분포가 정규분포를 이룬다고 볼 수 있으며 실험의 정규성을 확인할 수 있다. 잔차 대 적합치에서도 잔차들이 일정한 패턴 없이 무작위로 분포되어 있으며 히스토그램 또한 근사적으로 대칭을 이루어 정규분포의 성향을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 게르마늄 초정밀 가공 특성 실험에서와 같이 실험이 특이성 및 비정규성 없이 정상적으로 수행되었다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7 은 불화 계열 초자들의 표면 조도 측정값과 주효과의 크기를 비교하기 위해 분산 분석을 수행한 결과를 보여주는 그래프이다. 게르마늄 초자를 이용해 수행한 실험과 비교하여 LiF, BaF₂ 및 MgF₂ 초자의 종류에 대한 주효과를 추가하였으며 물리적 특성을 고려한 절삭 속도의 변화를 제외한 모든 주효과를 동일하게 설정하였다. 게르마늄의 초정밀 가공 특성에 관한 분석 결과와 동일하게 가공 특성에 가장 큰 영향을 미치는 주효과는 이송속도로 나타났으며 표면 조도 Ra 1.575 nm의 변화량을 갖는다. 그리고 가장 작은 영향을 미치는 주효과도 게르마늄의 초정밀 가공 특성에 관한 실험 결과와 동일하게 절삭 깊이로 0.425 nm의 변화를 보였다. 초자의 재질에 따른 공구 윗면 경사각에 의한 변화량은 0.589 nm이며 절삭 속도에 의한 변화량은 0.582 nm으로 나타났다.

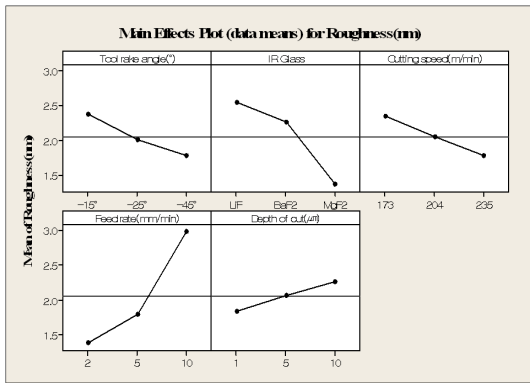


Fig. 7 Main effect plot for surface roughness of fluoride glasses

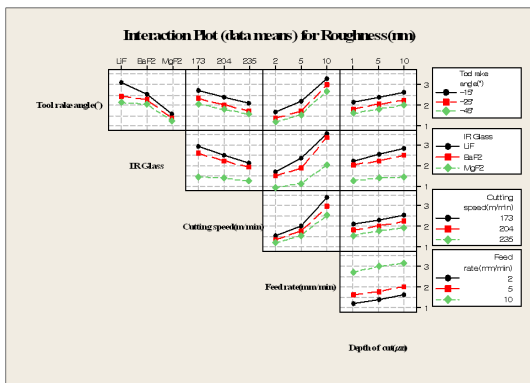


Fig. 8 Surface roughness versus tool angle, cutting speed, feed rate and depth of cut (fluoride glasses)

불화 계열 초자의 초정밀 가공 특성을 실험 계획법으로 분석한 결과 게르마늄의 초정밀 가공 특성과 동일하게 이송속도가 가장 영향이 큰 가공 조건이었다. 이송 속도 다음으로 표면 조도에 영향을 주는 요인으로는 공구 윗면 경사각, 절삭 속도가 있으며 절삭 깊이가 가장 영향이 적은 가공 조건으로 판단되었다. 실험 계획법을 이용한 LiF, BaF₂ 및 MgF₂ 초자의 초정밀 가공 특성을 분석한 결과 Fig. 8 과 같이 공구 윗면 경사각 -45°, 절삭 속도 235 m/min, 이송 속도 2 mm/min 및 절삭 깊이 1 μm 의 가공 조건에서 최적의 표면 조도를 확인할 수 있었다. 초정밀 가공 특성으로 가공한 LiF, BaF₂ 및 MgF₂ 초자의 표면 조도는 각각 Ra 0.69 nm, Ra 0.81 nm 및 Ra 0.57 nm 이다. 또한, 실험 결과를 바탕으로 게르마늄 초자의 가공 특성과 비교하여 절삭 속도를 제외한 다른 조건들이 동일함을 실험의 결과를 확인하였다. Fig. 9 는 MgF₂ 초자를 초정

밀 가공 특성으로 가공했을 경우의 표면조도를 보여준다.

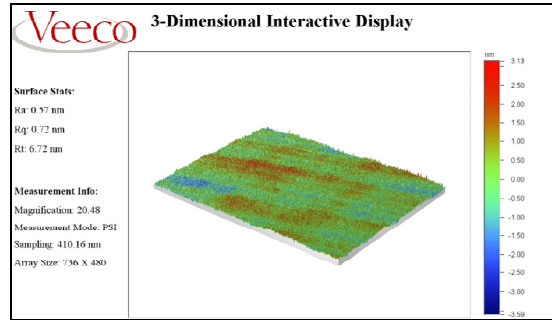


Fig. 9 Measurement results of surface roughness of aspheric MgF₂ lens

4. 적외선 비구면 렌즈의 초정밀가공 및 측정

4.1 게르마늄 비구면 렌즈의 초정밀가공 및 측정

본 연구에서는 3 장에서 서술한 게르마늄 초자의 초정밀 가공 특성을 이용해 적외선 광학계 비구면 게르마늄 렌즈를 Fig. 10 과 같이 Freeform 700A 로 가공하였으며 UA3P 를 이용해 형상 정밀도를 3 차원 측정된 결과 Fig. 11 과 같이 형상 정밀도 P-V (Peak to Valley) 0.099 μm 의 결과를 확인할 수 있었다.

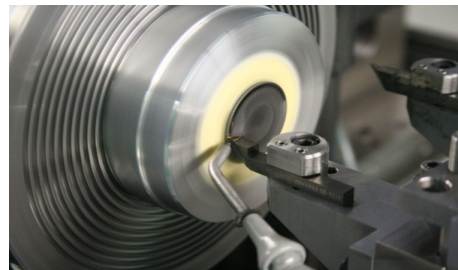


Fig. 10 Picture of ultra precision machining of aspheric Germanium lens

4.2 LiF 비구면 렌즈의 초정밀 가공 및 측정

LiF 비구면 렌즈는 JWST(James Webb Space Telescope)의 NIRCAM(Near Infrared Camera)에 포함되어 있으며 본 연구에서는 이와 유사한 형태의 LiF 렌즈를 비구면으로 초정밀 가공하여 형상 정밀도를 측정하였다. 실험 계획법을 통해 얻은 불화 계열 초자의 초정밀 가공 특성을 이용하여 LiF 비구면 렌즈를 가공한 결과 Fig. 12 와 같이 형상 정밀도 P-V 0.162 μm 를 확인하였다.

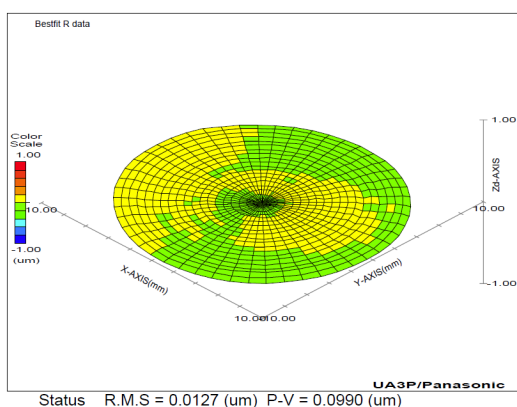


Fig. 11 3D measurement data of aspheric Germanium lens

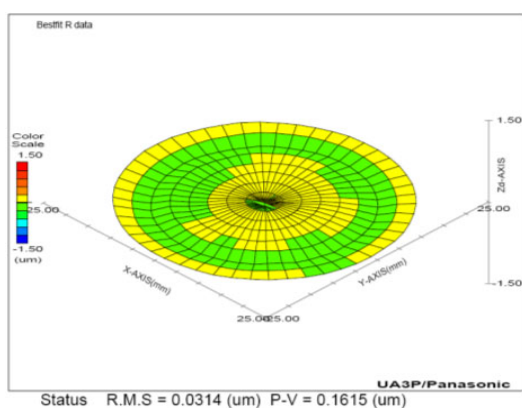


Fig. 12 3D measurement data of aspheric LiF lens

5. 결론

본 논문에서는 게르마늄 및 불화 계열 초자의 초정밀 가공 특성을 실험 계획법을 이용하여 분석하였다. 실험계획법으로 요인배치법을 이용하여 공구 윗면 경사각, 절삭 속도, 이송 속도, 절삭 깊이 변화에 따른 표면 조도의 변화를 NT2000 을 이용해 측정하였다.

1) 적외선 초자 게르마늄의 초정밀 가공 특성 분석결과로는 윗면 경사각 -45° , 절삭 속도 179 m/min, 이송 속도 2 mm/min, 절삭 깊이 1 μm 일 때 표면 조도 Ra 0.72 nm 를 확인하였다.

2) 불화 계열의 적외선 초자 LiF, BaF₂ 및 MgF₂ 에 대한 초정밀 가공 특성을 분석한 결과 공구 윗면 경사각 -45° , 절삭 속도 235 m/min, 이송 속도 2 mm/min, 절삭 깊이 1 μm 에서 Ra 1.0 nm 이하의 표면 조도를 확인하였다.

3) 초정밀 가공 특성 실험에서 얻은 결과를 이용하여 게르마늄과 LiF 비구면 렌즈를 가공하였으며 3 차원 형상 정밀도를 측정한 결과 목표 형상 정밀도인 P-V 0.2 μm 이하의 형상 정밀도를 확인하였다.

후 기

본 논문은 한국기초과학지원연구원 “초정밀 열영상 현미경 개발” 사업에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- Richmond, J. C. and Nicodemus, F. E., “Blackbodies, blackbody radiation and temperature scales, self-study manual of optical radiation measurements,” U. S. Department of Commerce, NBS Technical Note 910-8, Chap. 12, 1985.
- Yang, S. C., Kim, G. H., Kim, H. S., Shin, H. S. and Won, J. H., “A Study on the Characteristics on Ultra Precision Machining of IR Camera Mirror,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 44-50, 2006.
- Kim, G. H., Yang, S. C., Kim, H. S., Lee, I. J., Kook, M. H. and Lee, D. H., “Ultra Precision Machining Technology of Infrared Optical System for Astronomy and Space,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 25-32, 2007.
- Yang, S. C., Kim, G. H., Kim, H. S., Lee, S. Y., Kim, M. S. and Won, J. H., “Ultra Precision Machining Technology of Infrared Optical System for Aerospace,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 19-24, 2007.
- Touloukian, Y. S. and Dewitt, D. P., “Thermophysical properties of matter: thermal radiative properties - nonmetallic solids,” Vol. 8, IFI/Plenum Data Corporation, 1972.
- Touloukian, Y. S., Dewitt, D. P. and Hernicz, R. S., “Thermophysical properties of matter: thermal radiative properties - coatings,” Vol. 9, IFI/Plenum Data Corporation, 1972.
- Shannon, R. R., “The Art and Science of Optical Design,” Cambridge University Press, Chapter 2, 6,

- 1997.
8. Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B. and Yoder, P. R., "Optical System Design," SPIE Press, Chapter 3, 11, 12, 2000.
 9. Kvamme, E. T., Earthman, J. C., Leviton, D. B. and Ftey, B. J., "Lithium fluoride material properties as applied on the NIRCcam instrument," Proc. of the SPIE, Vol. 5904, pp. 212-221, 2005.
 10. Ryder, L. A. and Jamieson, T., "Lens Design for the Near Infrared Camera for the James Webb Space Telescope," Proc. of the SPIE, Vol. 5904, pp. 71-78, 2005.
 11. Wyant, J. C., "White light interferometry," Proc. SPIE, Vol. 4737, pp. 98-107. 2002.
 12. Tsutsumi, H., Yoshizumi, K. and Takeuchi, H., "Ultrahigh Accurate 3D Profilometer," Proc. SPIE, Vol. 5638, pp. 387-394, 2005.
 13. Yang, S. C. and Won, J. H., "Development of the Ultra precision machining of IR material for space observation optical system," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, No. 12, pp. 9-14, 2010.