석사학위논문

적외선 우주망원경용 알루미늄 자유곡면 반사경의 형상오차 보상

지도교수 박수종

경희대학교 대학원 우주탐사학과

정병준

석사학위논문

적외선 우주망원경용 알루미늄 자유곡면 반사경의 형상오차 보상

지도교수 박수종

경희대학교 대학원 우주탐사학과

정병준

적외선 우주망원경용 알루미늄 자유곡면 반사경의 형상오차 보상

지도교수 박수종

이 논문을 석(박)사 학위논문으로 제출함

경희대학교 대학원

우주탐사학과

정병준

정병준의 이학석사학위 논문을 인준함





경희대학교 대학원

국문요약

자유곡면 반사 광학계는 중앙 차폐를 피할 수 있고 광학 수차를 줄일 수 있지만. 반사경의 형상정밀도가 떨어진다는 단점이 있어 많이 활용되지 못한다. 우리는 자유곡면 반사경의 정렬오차를 최소화하는 가공 부품의 설계와 반복 자유곡면 가공 연구를 수행하였다. 자유곡면 반사경의 형상오차는 10 차 다항식으로 표현된다. 연구에서 설계한 비축 반사광학계의 반사경 면은 곡률 반경의 중심 축으로부터 멀리 떨어진 부분에 위치하며, 그 표면 형상 역시 10 차 다항식의 자유곡면(freeform)으로 표현된다. 비축 반사경은 형상이 복잡하여 축상 반사경의 가장자리를 잘라내는 기존 방법으로는 가공이 불가능하지만, 최신 단촉 다이아몬드 절삭가공 기술(Single Point Diamond Turning, SPDT)을 이용하면 가공할 수 있다. 자유곡면 반사경은 측정단계에서도 몇 가지 문제점을 갖고 있다. 먼저 기상계측기로 실시간 측정이 불가능하다. 외부 장비를 사용하는 경우, 고정밀 측정이 가능하지만, 반사경을 탈, 부착하는 과정에서 발생하는 정렬오차에 의해 가공과 측정의 재현성이 떨어진다. 우리는 기준면을 공유하는 반사경 가공용 지그와 측정용 블록을 제작하여 외부장비 측정에 의한 정렬오차를 최소화하고, 가공의 재현성을 확보하였다. 이와 같이 가공이 재현성을 갖게 되면, 재현성을 갖는 형상오차를 토대로 보상가공을 적용할 수 있다. 본 연구에서 개발한 알루미늄 자유곡면 반사경은 광시야 우주 적외선 망원경의 시험 모델에 사용할 계획이다.

i

차 례

1. 서론

2	. 정렬오차	$\cdot 4$
	2.1 외부 측정장비 사용으로 인한 정렬오차	4
	2.2 정렬오차를 고려한 가공용 지그와 측정용 블록의 설계	4
	2.3 반사경의 가공환경	5

3. 7	재현성	검중	및 결	과고	찰 …	••••	••••••	• • • • • • • • •	•••••	• • • • • • • • • •	•••••	• • • • • • • • • •	•••••	11
3.	1 구면	가공:	의 재	현성	검증	•••••				•••••	•••••			11
3.	2 자유	곡면	가공의	의 재학	현성	검증								12

참고문헌	 22

Abstract	 24

가시이	コ	 25
12/1-1	2	40

그림 목차

그림 2.1 다이아몬드 선삭 기계 지그의 설계도면6
그림 2.2 측정용 블록의 설계도면
그림 2.3 다이아몬드 선삭 기계 지그와 측정용 블록의 조립모식도 8
그림 2.4 Slow Slide Servo 기능으로 생성한 자유곡면 반사경의 가공경로 9
그림 2.5 다이아몬드 선삭 기계 지그를 이용한 회전축 정렬 10
그림3.1 UA3P를 이용한 반사경의 3차원 측정
표 1. 동일한 조건으로 가공한 두 구면 반사경의 형상오차량 비교 15
표 2. 동일한 조건으로 가공한 두 자유곡면 반사경의 형상오차량 비교 15
그림3.2 첫번째 자유곡면 반사경의 형상오차 패턴
그림3.3 두번째 자유곡면 반사경의 형상오차 패턴
그림3.4 반복가공 과정에서 발생한 형상오차 간 차이
그림3.5 가공 중에 발생하는 반사경 중앙의 꼭지 형상의 3차원 측정 사진 … 19
그림4.1 보상가공 과정의 알고리즘 진행도

iii

1. 서론

대기, 하천 오염 감시 및 지구 상시 관측을 위해 우주망원경 기술이 도입되고 있 다. ^{1,2} 우주망원경용 광학계는 공간과 하중의 제약이 있고 극저온 환경과 같은 가혹 한 조건에서 사용되는 경우가 많기 때문에, 소형화, 경량화 및 진동에 강한 구조가 필요하다. 이에 대해 기존의 렌즈 광학계를 대체할 새로운 기술로 비축 반사 광학 계가 주목을 받고 있다. 우주망원경 광학계는 로켓에 실려 우주로 보내지게 되는데, 일반적인 렌즈 광학계의 경우 로켓이 발사될 때 발생하는 진동에 의해 광학계의 정 렬 상태가 흐트러지거나, 심한 경우 렌즈 소재가 부서지게 될 수도 있다. 또한 구조 체와 렌즈의 소재가 다르기 때문에, 우주공간과 같은 극저온의 환경에서는 냉각으 로 인한 구조변형이 일어난다. 이러한 변형을 최소화 하기 위해서, 구조체와 거울을 동일한 소재로 설계할 수 있는 축상 (On-axis) 반사 광학계를 사용한다. 이 구조 에서는 반사경을 구조체에 견고하게 고정할 수 있기 때문에, 광학계가 진동에 대해 강한 내성을 가지게 된다. 하지만 반사경을 지지하는 부분이 광 경로 안에 존재하 기 때문에 광량 손실과 회절현상이 발생한다는 단점도 있다. 이에 반해 비축 반사 광학계는 중앙을 차폐하지 않는 구조로 설계하는 것이 가능하다. 따라서 광량의 손 실이 없이 광시야 광학계를 제작할 수 있으며, 약한 신호를 측정하는 우주망원경에 보다 적합하다고 할 수 있다.^{3,4,5}

기존의 반사광학계에서는 선형비점수차가 축상 광학계에 비해 크게 나타나는 문 제점이 있었다.⁶ 그러나 본 연구 그룹은 선행 연구에서, 초점을 공유하는 두 개의 기울어진 비구면 거울을 조합하여 선형비점수차를 제거하였고, 그 외의 수차들은 축상 광학계와 비슷한 수준으로 감소시킨 자유곡면 광시야 광학계를 설계한 바가 있다.^{7,8}

자유곡면 형상이 광학계 설계에 적용되기 시작하면서 초정밀 가공 분야에서도 자유곡면 가공에 대한 관심과 필요성이 증가하였다. 기존의 비축 반사경은 일반 비구

면 가공으로도 얻을 수 있었지만, 자유곡면은 기본적으로 축 비대칭 형상이고, 가공 경로 또한 회전 축 비대칭 구조이다. 이러한 자유곡면을 가공하기 위해 도입된 기 술이 서보 툴 머시닝 (Servo Tool Machining)이다. ⁹ 이 기술을 이용할 경우, 기존 의 x, z좌표만 고려한 2차원 가공경로에서 벗어나 원통 좌표계 (r, θ, z)의 각 성분 을 조절하는 3차원 형태의 가공을 할 수 있고, 따라서 회전축 대칭 여부에 관계 없 이 초정밀 가공이 가능하다. 이 기술은 공구의 z축 이송범위와 좌표계 설정 방법에 따라 Fast Tool Servo (FTS), Slow Tool Servo (STS), Slow Slide Servo (SSS) 등으로 나눌 수 있다. ^{10, 11, 12}

그럼에도 불구하고 자유곡면 가공은 많은 문제점을 가진다. 그 중 하나는 측정과 가공의 낮은 재현성이다. 기존의 자유곡면 가공방법에는 가공을 진행하는 도중에 오차를 정량적으로 보상할 수 있는 피드백 과정이 없었다. 따라서, 원하는 수준의 형상정밀도를 얻기 위해서는 만족하는 결과가 나올 때까지 가공조건을 바꾸어가며 반사경을 반복 가공해야 했다.⁷

자유곡면 반사경의 형상오차 측정과 정량적인 오차 보상이 어려운 이유는 다음과 같다. 우선 회전 축 비대칭 가공경로로 가공하는 자유곡면의 경우, 오차형상 또한 국부적인 형태로 발생한다. 가공장비에 부착된 오차 측정장치는 축 비대칭 형태의 국부적인 형상오차를 측정하기 적합하게 설계되어 있지 않으므로, 외부장비를 이용 하여 반사경 표면 전체를 3차원으로 측정해야 할 필요가 있다. 하지만 외부 장비를 사용하기 위해서는 반사경을 탈, 부착하는 과정이 필요하며, 이때 정렬 오차가 발생 한다. 여기에서 정렬오차란, 사용자가 반사경을 정렬하는 과정에서 발생하는 위치 변화를 말한다. 이러한 정렬 오차는 단순히 사용자가 부주의로 시편을 비스듬히 배 열하는 경우에도 발생할 수 있으며, 또한 제작한 반사경의 편평도, 직각도와 같은 제작공차 등도 원인이 된다. 이렇게 사용자가 동일한 조건과 가공 경로를 입력하더 라도, 정렬오차에 의해 회전축의 위치 자체가 변할 경우에는 반사경에 가해지는 압 력과 절삭량이 달라지며, 이것이 자유곡면 가공의 재현성을 떨어뜨리는 가장 큰 원

인이 된다. 또한 3차원 측정을 할 때, 동일한 형상오차를 분석하여도 정렬오차에 따라 도출되는 오차형상의 결과가 다를 수 있으며, 이것은 측정의 신뢰도를 감소시 킨다.

이와 같이 초정밀 가공분야에서 가공과 측정의 재현성은 제작하고자 하는 반사경의 정밀도와 신뢰도에 직결되는 문제이기 때문에 매우 중요하다. 기존의 자유곡면 반 사경 가공의 경우, 가공의 재현성이 매우 떨어져 보상가공 자체를 시도할 수 없었 으며, 때문에 제작할 수 있는 반사경의 형상정밀도에도 한계가 있었다. ¹² 따라서 높 은 형상정밀도의 자유곡면 반사경을 제작하기 위해서는 폴리싱과 피겨링 등 추가 연삭 과정이 필요하지만, 절삭가공에 비해 소요시간이 길어 반사경 제작의 생산성 을 떨어뜨리는 단점도 있었다. 만일 정렬오차를 최소화하여 가공과 측정의 재현성 을 확보할 수 있다면, 자유곡면의 초정밀가공과 보상가공이 가능하여 단순 절삭 가 공만으로도 높은 형상 정밀도의 반사경을 가공할 수 있다. 이는 산업적으로 자유곡 면 반사경의 생산성과 경쟁력을 향상시키는 매우 중요한 과제이다.

본 연구에서는 자유곡면 반사경의 정렬오차를 최소화할 수 있는 가공용 지그, 측 정용 블록을 설계하였다. 또한 이를 실제 반사경의 제작에 적용하고, 가공의 재현성 을 상세히 분석하였다. 반복된 가공 결과를 바탕으로 형상 오차량과 오차의 패턴을 분석하였다. 마지막으로 확보된 재현성을 기반으로 자유곡면 반사경의 보상가공 알 고리즘을 제안하였다.

2. 정렬오차

2.1 외부 측정장비 사용으로 인한 정렬오차

정렬오차는 반사경을 탈, 부착하는 과정에서 발생하는 위치 및 각도 변화로 정의 한다. 그 중 회전축 방향의 오차는 자유곡면에서 가장 중요한 정렬오차이다. 축 비 대칭 경로를 이용하여 가공하는 자유곡면의 경우, 동일한 가공 조건을 입력하더라 도 회전축의 오차만큼 절삭되는 양이 변화할 수 있다. 따라서 회전축 방향 오차에 따라 가공의 재현성과 측정의 신뢰도가 결정된다.

2.2 정렬오차를 고려한 가공용 지그와 측정용 블록의 설계

기기 상의 계측기를 사용하는 경우에는 반사경을 가공장비에서 탈착하지 않아 항 상 같은 위치에서 측정과 가공을 반복할 수 있지만, 외부장비로 측정하기 위해서는 반사경의 탈착이 불가피하다. 이러한 경우에는 반사경의 배치와 정렬 과정에서 발 생하는 정렬오차만큼 측정의 재현성이 떨어지게 되므로, 오차를 최소화하기 위해서 는 반사경을 항상 동일한 위치에 배치하는 것이 중요하다.

이를 위해 본 연구에서는 그림 2.1과 그림 2.2와 같은 설계의 가공용 지그와 측 정용 블록을 제안한다. 지그의 경우, 일반적으로 원통형으로 제작하는 가공용 지그 형태에 수직한 기준면을 추가 함으로써, 사용자가 회전축 방향 오차를 고려하여 반 사경을 더 정밀하게 가공장비에 부착할 수 있도록 하였다. 측정장비에 고정되는 측 정용 블록은 가공용 지그와 공통의 기준면을 공유함으로써 사용자가 가공 및 측정 과정에서 기준면을 중심으로 정렬할 수 있도록 하였다. 이와 같이, 본 연구에서는 정렬오차를 기계적으로 최소화할 수 있는 방법을 제안함으로써, 별도의 추가 측정 장비 없이 단시간에 가공 대상을 재배치하는 것이 가능하도록 하였다. ¹³ 그림 2.3 은 지그와 블록이 함께 결합된 모습을 보여준다.

2.3 반사경의 가공환경

우리가 제안한 방법과 설계를 실제 금속 표면 가공에 적용하기 위해, 알루미늄 자유형상 반사경 제작을 수행하였다. 이를 위해 5 축 정밀제어가 가능한 초정밀 다이아몬드 선삭 기계 (Nanotech 450 UPL, Moore Nanotechnology Systems)를 사용하였다. 비축 자유곡면을 가공하기 위해 SSS 기능을 이용하였는데, 이 기능을 사용하면 가공형상이 원통형 좌표계로 변환된다. 반사경의 가공경로는 그림 2.4 와 같이 연속된 3 차원 등고선 형태로 나타난다. 가공경로를 바탕으로 회전축의 위치에 따른 공구의 위치를 실시간으로 동기화하여 XCZ 3 축으로 제어하기 때문에 축 비대칭인 자유곡면을 가공할 수 있다.

자유곡면 가공에서 고려해야 하는 가장 중요한 요소는 회전축 정렬이다. 기존에는 사용자의 직관에 의존하여 반사경의 회전축을 재정렬했지만, 공통의 기준면을 고려한 지그를 제작하면서 측정과 동일한 지점을 그림 2.5 와 같이 회전축을 기준으로 정렬하고 가공할 수 있게 되었다.



그림 2.1 다이아몬드 선삭 기계 지그의 설계도면



그림 2.2 측정용 블록의 설계도면



그림 2.3 다이아몬드 선삭 기계 지그와 측정용 블록의 조립모식도



그림 2.4 Slow Slide Servo 기능으로 생성한 자유곡면 반사경의 가공경로



그림 2.5 다이아몬드 선삭 기계 지그를 이용한 회전축 정렬

3. 재현성 검증 및 결과고찰

가공한 반사경의 형상오차는 비접촉식 3 차원형상 측정장비인 Ultra-high Accurate 3-D Profilometer (UA3P, Panasonic)를 사용하여 측정하였다. 측정용 블록은 그림 3.1 와 같이 UA3P 내부에 고정하였으며, 가공용 지그를 블록과 밀착 한 후에 반사경의 형상오차를 측정하였다.

3.1 구면 가공의 재현성 검증

자유곡면 가공의 재현성 검증에 앞서 구면 형상 가공의 재현성 검증을 진행하였다. 이를 위해 동일한 조건으로 가공한 두 구면 반사경을 측정하고, 만들어진 반사경들이 동일한 형태를 갖는지 비교하였다. 두 가공 과정 모두 가공용 지그와 측정용 블록을 사용하여 외부장비를 사용함으로써 발생하는 정렬오차를 최소화하였다. 반사경의 형상 정밀도가 높을 경우 형상 오차의 차이를 비교할 수 없으므로, 구면 반사경의 가공은 최적 가공 조건에서 중심축을 변화시켜 형상오차를 의도적으로 증가시켰다.

형상오차를 측정한 결과는 표 1 과 같다. 두 구면 반사경의 Peak to Valley (P-V) 형상오차는 6.16 μm 와 6.11 μm, Root Mean Square (RMS) 형상오차는 1.78 μm 와 1.75 μm 가 되었다. UA3P 가 측정할 수 있는 오차의 분해능은 0.1 μm 이므로, 측정 결과는 오차범위 내에서 일치한다고 할 수 있다. 위 결과를 통해 가공용 지그와 측정용 블록을 이용할 경우, 가공 장비와 측정 장비가 분리된 환경에서 X축 방향 정렬오차, Y 축 방향 정렬오차를 최소화할 수 있다는 것을 확인했다. 측정된 형상 오차는 0.1 μm 이하의 크기로, 적외선 신호의 파장 보다 매우 작다. 따라서 본 방법으로 제작되는 반사경은 적외선 천체 망원경 광학계에 사용하기에 충분한 성능을 가진다고 할 수 있다.

3.2 자유곡면 가공의 재현성 검증

자유곡면 가공의 재현성 검증도 구면 가공의 재현성 검증과 동일하게 진행하였다. 동일한 조건으로 가공한 두 자유곡면 반사경을 측정하여 형상오차량과 패턴을 분석하였다. 형상오차량을 비교한 결과는 표 2 에 나타나 있다.

본 실험의 형상오차 패턴의 경우, 두 반사경 모두 유사한 형상오차 무늬를 보이는 것을 알 수 있다. 형상오차 패턴은 그림 3.2 과 그림 3.3 에 나타난 모습처럼 x 축 형태로 대칭이며, y 축 방향으로는 비대칭인 말 안장 구조를 띄고 있다. 비축 반사경의 경우 중심으로부터 거리가 멀어질수록 공구의 이송범위가 넓어져 가공의 정확도가 떨어지기 때문이다. 그림 3.4 는 그림 3.2, 그림 3.3 에 나타낸 형상 오차의 차이를 2 차원 그림으로 나타낸 것이다. 본 연구에서 가공한 반사경 외곽부의 형상오차 또한 유사한 패턴을 갖는다는 점에서 우선 형상오차의 재현성을 충분히 확보하였다고 할 수 있다. 동일한 가공경로를 입력했음에도 두 자유곡면의 형상 오차량은 각각 RMS 0.33 µm, 0.46 µm 으로 나타났으며, P-V 오차량의 차이는 약 0.87 µm 로 나타났다. 이러한 차이는 그림 3.5 와 같이 반사경 중앙의 꼭지(Peak)가 가공 중에 떨어져 나가면서 반사경 중앙이 파이기 때문에 발생한 것으로 분석한다.

두 반사경 모두 RMS 형상오차가 충분히 작아 적외선 영역에서 사용하기에 충분한 성능을 가진다. 그러나 가시광선, 자외선 영역에서 사용하기 위해서는 더 나은 형상정밀도의 반사경이 필요하다. 본 연구를 바탕으로 형상정밀도를 더욱 향상시키기 위해서는 보상가공이 필요하다. 보상가공은 반사경의 형상오차를 감안한 새로운 가공 경로를 가공 과정에 피드백 함으로써 형상오차를 보상한다. 그런데 우선은 동일한 가공 조건에서 제작한 반사경들의 형상오차 패턴이 재현되어야 형상오차 패턴을 기준으로 보상 가공경로를 생성할 수 있으므로, 반사경 들의 형상오차 패턴이 재현성을 가지는 것은 매우 중요하다. 그렇지 않으면,

보상가공을 했을 때 전혀 다른 형상오차가 발생하거나 도리어 형상오차가 증가할 수 있기 때문이다.

、

본 연구에서 제작한 반사경으로도 적외선 신호 측정용 광학계에는 충분히 이용이 가능하지만, 측정 가능한 파장 신호를 가시광선 및 자외선 영역으로 확장하기 위해서는 형상 오차를 더욱 줄일 필요가 있다. 본 연구에서 제안한 방법으로 비축 자유곡면 반사경을 가공할 경우, 정렬오차가 최소화되어 형상 오차 패턴이 재현성을 가지게 됨을 알 수 있었다. 본 연구 그룹은 현재 결과를 비축 자유곡면 반사경 제작을 위한 보상가공 방법에 새로 적용할 것이며, 현재 관련 후속 연구를 진행하고 있다.



그림3.1 UA3P를 이용한 반사경의 3차원 측정

	P-V	RMS
SPH_1	6.16 µ m	1.78 µ m
SPH_2	6.11 µ m	$1.75\mu\mathrm{m}$

표 1. 동일한 조건으로 가공한 두 구면 반사경의 형상오차량 비교

	P-V	RMS
Freeform_1	1.96 µ m	0.33 µ m
Freeform_2	2.83 µ m	0.46 µ m

표 2. 동일한 조건으로 가공한 두 자유곡면 반사경의 형상오차량 비교



그림3.2 첫번째 자유곡면 반사경의 형상오차 패턴



그림3.3 두번째 자유곡면 반사경의 형상오차 패턴



그림3.4 반복가공 과정에서 발생한 형상오차 간 차이



그림3.5 가공 중에 발생하는 반사경 중앙의 꼭지 형상의 3차원 측정 사진

4. 토의 및 결론

본 논문에서는 자유곡면 가공의 재현성을 향상하기 위해 정렬오차를 최소화하는 가공용 지그 및 측정용 블록을 설계, 제작하였으며 동일한 조건으로 구면, 자유곡면 반사경을 가공하여 가공과 측정의 재현성을 검증하였다.

동일한 가공 조건에서 제작한 반사경들의 형상오차 패턴이 재현되어야 형상오차 패턴을 기준으로 보상 가공경로를 생성할 수 있으므로, 반사경 들의 형상오차 패턴이 재현성을 가지는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서 제안한 방법으로 비축 자유곡면 반사경을 가공할 경우, 정렬오차가 최소화되어 형상 오차 패턴이 재현성을 가지게 됨을 알 수 있었다.

그러나 자유곡면 반사경의 형상정밀도를 더욱 향상시키기 위해서는 보상가공 과정이 필요하다. 보상가공 과정은 그림 4.1 과 같은 알고리즘으로 진행된다. 보상가공은 3 차원 행렬 형태로 측정한 반사경의 형상오차를 10 차 다항식 형태로 변환하여 본래의 설계식에 대입한다. 자유곡면 반사경은 오차 형상을 감안한 새로운 가공 경로를 가공 과정에 피드백 함으로써 형상오차를 보상한다. 본 연구 그룹은 현재 결과를 비축 자유곡면 반사경 제작을 위한 보상가공 방법에 새로 적용할 것이며, 현재 관련 후속 연구를 진행하고 있다.



그림4.1 보상가공 과정의 알고리즘 진행도

참고문헌

[1] G. H. Kim, S. C. Yang, H. S. Kim, I. J. Lee, M. H. Kook, D. H. Lee, "Ultra Precision Machining Technology of Infrared Optical System for Astronomy and Space," JKSPE, Vol. 24, No. 2, pp. 25–32, 2007.

[2] G. Moretto, M. P. Langlois, and M. Ferrari, "Suitable off-axis space-based telescope designs," Proc. SPIE 5487, pp.1111-1118, 2004.

[3] J. Kuhn and S. Hawley, "Some Astronomical Performance Advantages of Off-Axis Telescopes," Publ. Astron. Soc. Pac. 111, pp. 601-620, 1999.

[4] J. Kuhn and G. Moretto, "Wide-field off-axis new planetary telescope: science and design, new opportunities," Proc. SPIE 4003, pp. 324-330, 2000.

[5] S. Chang, "Off-axis reflecting telescope with axially-symmetric optical property and its applications," Proc. SPIE 6265, pp. 626548-626548-11, 2006.

[6] S. Chang, J. H. Lee, S. P. Kim, H. Kim, W. J. Kim, I. Song, and Y. Park,
"Linear astigmatism of confocal off-axis reflective imaging systems and its elimination," Appl. Opt., Vol. 45, No. 3, pp. 484-488, 2006.

[7] S. Kim, S. Pak, S. Chang, G. H. Kim, S. C. Yang, M. S. Kim, S. Lee, and H. Lee, "Proto-Model of an Infrared Wide-Field Off-Axis Telescope," JKAS, Vol. 43, No.5, pp. 169-181, 2010.

[8] S. Kim, S. Chang, S. Pak, K. J. Lee, B. Jeong, G. Lee, G. H. Kim, S. K. Shin, and S. M. Yoo, "Fabrication of electroless nickel plated aluminum freeform mirror for an infrared off-axis telescope," Appl. Opt. Vol. 54, No. 34, pp. 10137-10144, 2015.

[9] L. Li, X. Min, D. Chen, and J. Wang, "Special techniques in ultra-precision machining," Proc. SPIE 6722, pp. 672213-672213-6, 2007.

[10] H. Kim, K. Lee, K. Lee, and Y. Bang, "Fabrication of free-form surfaces using a long-stroke fast tool servo and corrective figuring with on-machine measurement," Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol.49, No. 12, pp. 991-997, 2009.

[11] Y. Tohme, R. Murray, and E. Allaire, "Principles and applications of the slow slide servo," Nanotech, 2005.

[12] X. Zhang, F. Fang, Q. Wu, X. Liu, and H. Gao, "Coordinate transformation machining of off-axis aspheric mirrors," INT J ADV MANUF TECH, Vol. 67, No. 9-12, pp. 2217-2224, 2013.

[13] X. Zhang, Z. Zeng, X. Liu, and F. Fang, "Compensation strategy for machining optical freeform surfaces by the combined on-and off-machine measurement," OPT EXPRESS, Vol. 23, No. 19, pp. 24800-24810, 2015.

Abstract

Freeform reflecting systems can reduce system size and optical aberration. However, they are not applied widely due to a significant disadvantage of low form accuracy of mirror. We conducted the new machining components which minimize the remounting accuracy of the freeform mirrors and an iterated freeform machining experiment using new designed components. The form error patterns of freeform mirrors are expressed into 10th order polynomials. Optical surfaces of designed freeform reflecting systems are placed on the outer area from the radius of curvature and also expressed into 10th polynomials. Freeform surface are complicated that it is impossible to fabricate by classical method of cutting the edge of on-axis mirrors but can be fabricated by Single Point Diamond Turning (SPDT). There are several problems in the measuring the freeform mirrors. Freeform surface is not able to apply real time measurement using on-machine measurement device. In case of utilizing offmachine measurement, high-precision measurement is possible whereas repeatability of measurement and fabrication is decreased due to remounting inaccuracy caused in process of detachment and attachment. We minimize the remounting inaccuracy and confirm the repeatability of fabrication using new designed machining jig and measurement blocks, they share the common reference planes. If the repeatability of machining is preserved, an error compensation can be applied to the mirrors based on form error pattern with repeatability. The aluminum freeform mirrors developed in this research will be applied in a test model for wide field space infrared telescope.

감사의 글

눈 앞에 닥친 일들을 하나, 둘 처리하다 보니, 어느덧 졸업을 앞두게 되었습니다. 논문을 완성하기까지 도움을 주신 분들께 정말 감사하다는 말씀을 드리고 싶습니다. 가장 먼저 저의 지도교수님이신 박수종 교수님께 감사하다는 말씀을 드리고 싶습니다. 교수님과 맥도날드 천문대로 관측 갔던 때를 지금도 잊지 못합니다. 학부연구생이었던 때부터, 크고 작은 부분에서 적응을 하지 못하였을 때 기다려 주시고, 조언을 해주셔서 감사합니다. 덕분에 많은 것을 배우고 밖으로 나서게 되었습니다. 항상 친절히 안부를 물어주시고 걱정해주신 진호 교수님, 낯선 분야의 논문을 쓰면서 어려움이 많을 때에 많은 도움을 주신 이광조 교수님, 기초과학지원연구원에서 적응할 수 있도록 힘 써주신 김건희 교수님, 전공에 흥미를 잃었을 때 좋은 말씀 해주신 최광선 교수님, 매일 성경말씀 보내주시고 바른 길로 안내 해주신 문용재 교수님, 우주탐사학과 학과장님으로써 노력하신 김성수 교수님, 그 외 다른 우주탐사학과 교수님들께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

적외선 연구실 식구들에게도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 제가 이 연구실에 들어오면서 정말 누구보다 저를 아껴주시고 많은 것을 가르쳐준 상혁형에게 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다. 2011 년, 기초과학지원연구원에서 만난 것을 인연으로 정말 많은 도움을 받았습니다. 적외선 연구실의 맏형, 재영형에게도 감사하다는 말씀 드리고 싶습니다. 신입생 때 야구동아리를 계기로 많은 학번 차이에도 불구하고 친동생처럼 대해주셔서 정말 감사합니다. 제가 논문 쓰느라 일을 못하는 와중에도, 제 일까지 도맡아 해주신 우진형, 파이썬을 처음 접할 때 정말 많은 도움을 주신 혜인씨, Huynan, 여름방학 때 매일 같이 코딩했던 태근형, 새로 적외선 연구실에 들어와 고생하고 있는 종호, 교육프로그램 때 도움주신 현종선생님, 비축 반사경 연구가 시작될 수 있도록 해주시고, 이론적으로 도움 주셨던 장승혁 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다.

기초과학지원연구원 초정밀가공실 사람들이 있었기 때문에 실험을 잘 마무리 할 수 있었습니다. 매일 새벽 1, 2 시까지 같이 일하며 노력한 민우형에게 가장 먼저 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 추석 연휴까지 반사경 보상 가공을 위해 끝까지 남아주셨던 형진형님께도 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다. 책이 아닌 경험을 토대로 해주신 조언들이 정말 많은 도움이 되었습니다. 정신 없는 와중에도 중심을 잃지 않도록 도와준 인주형, 연구원 업무와 관련하여 사소한 부분도 빠뜨리는 부분이 없도록 도움을 주신 하영형, 초정밀가공실 막내 근용이, 지금도 가공 일정으로 복잡해하실 최환진 선생님께도 감사하다는 말씀을 드립니다.

기초과학지원연구원 박사님들 덕분에 좋은 논문을 쓸 수 있었습니다. 측정부터 실험 방법에 이르기까지 중요한 것을 놓칠 때마다 일러주시고 조언해주신 현상원 박사님께 감사하다는 말씀을 드립니다. 처음 연구원에 갔을 때 친절히 대해주시고, 영어로 논문 작성할 때에 기초부터 도움을 주신 남기환 박사님, 허환 박사님, 허현 박사님, 김승현 박사님, 비축 설계할 때 도움주신 배지용 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다.

6 년이라는 시간을 같이한 동기들에게도 감사의 말을 전합니다. 대학원에서 고생하고 있는 슬민, 소명, 정연, 민경, 철용이 별 탈 없이 졸업할 수 있기를 기도합니다. 가장 가까웠고, 오랫동안 함께한 재희 방 식구들, 재희, 지환, 인혁, 종권, 정호, 준희, 성민 모두 앞으로 좋은 일만 가득하기를 빕니다.

힘든 일 있을 때마다 가족처럼 반겨준 어린이 천문대 식구들에게도 감사의 말을 전합니다. 어린이 천문대 박성민 대장님, 용식형, 준호형, 선우형, 보라누나, 진일샘, 길호, 의탁, 민제, 주호 모두에게 감사합니다.

마지막으로 사랑하는 가족에게도 감사의 말을 전합니다. 항상 응원해주신 아버지, 매일 기도 해주신 어머니, 대들지 않고 말 잘 따라준 동생, 힘든 일 있을 때마다 응원해준 소은이에게 항상 사랑하고 감사하다는 말을 전하며 논문을 마칩니다.

2015 년 12 월 정병준