

특집 ■ 우주광학

자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경

장승혁*, 박수중**, 김건희***

1. 서론

1609년 이탈리아 과학자 갈릴레오 갈릴레이(Galileo Galilei, 1564-1642)는 망원경을 사용하여 최초로 천체를 관측하였다. 천체망원경은 인류가 보지 못했던 천체의 모습을 보여주면서 우주에 대한 인식 자체를 바꾸고, 과학혁명의 견인차 역할을 하였다. 그런데 볼록렌즈와 오목렌즈의 조합으로 이루어진 갈릴레이 망원경은 렌즈를 크게 만드는 것이 어렵고, 굴절과정에서 색수차가 생기는 단점이 있었다. 1668년 영국의 물리학자 아이작 뉴턴(Isaac Newton, 1642-1727)은 오목거울을 사용하여 최초의 반사망원경을 만들었다. 그 후 영국의 천문학자 프리드리히 윌리엄 허셜(Friedrich William Herschel, 1738-1822)은 일생동안 400개 이상의 반사망원경을 직접 제작하면서 반사경을 크게 하고 성능을 개량하여 천왕성, 외부 은하 등 많은 천체를 발견하였다. 또한 허셜은 1800년에 태양의 스펙트럼에서 적외선을 발견하여 천문관측이 가시광선 파장대를 벗어나는 계기를 마련하였다[1].

적외선은 투과성이 좋아서 블랙홀이 있는 은하의 중심과 별이 탄생하는 성간구름의 내부를 관측할 수 있다. 또한 멀리 있는 천체는 우주의 팽창으로 적색편이가 되어 적외선 파장대에서 관측된다. 그렇지만 대부분의

적외선 에너지는 지구 대기에 흡수되기 때문에 본격적인 적외선 천문학 연구는 1970년대 이후 지구 대기권을 벗어난 우주에서 가능하게 되었다. 적외선 우주망원경은 큰 구경으로 우주의 가장 먼 천체를 관측하는 목적으로 미국, 유럽, 일본 등이 경쟁하고 있다. 지금까지 가장 큰 적외선 우주망원경은 2009년 유럽우주항공우주국(European Space Agency)이 발사한 구경 3.5m 허셜 우주 망원경(Herschel Space Observatory)이다.

한편 우주와 우리 은하의 구조를 연구할 때는 소형 광시야 적외선 우주망원경으로 넓은 시야를 확보하여 넓은 지역을 관측해야 한다. 우리나라에서 2013년 발사한 과학기술위성 3호에 탑재된 구경 80 mm 다목적 적외선 영상시스템(MIRIS: Multi-purpose IR Imaging System)이 이러한 목적을 가지고 있다. MIRIS의 망원경은 굴절식이고 0.9 - 2 μm 파장대에서 근적외선 우주배경 복사와 우리 은하의 가스분포 구조 등 관측을 수행하였다[2]. 굴절식 망원경은 카메라 렌즈 설계 기술을 사용하여 여러 장의 렌즈로 광학 수차를 보정할 수 있지만, 유효 파장대가 5 μm 보다 커지면 사용할 수 있는 렌즈의 재질이 제한되어 색수차 보정이 어렵다. 또한 저온 냉각 상태에서 우주 로켓의 발사 충격을 견딜 수 있는 광기계 구조에 제약이 있어서 크게 만드는 것이 불가능하다.

반사망원경은 유효 파장대에 제한이 없어서 적외선

* 스마트IT융합시스템연구원, ** 경희대학교 우주탐사학과, *** 한국기초과학지원연구원 광분석장비개발팀

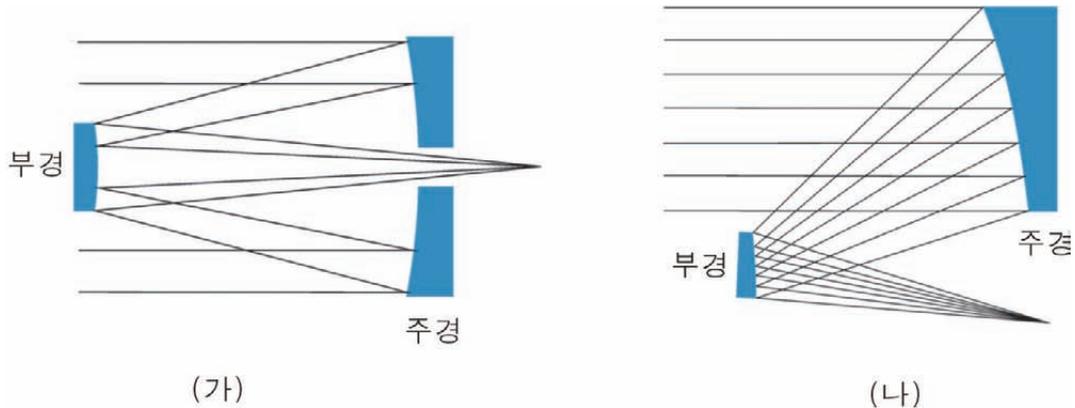
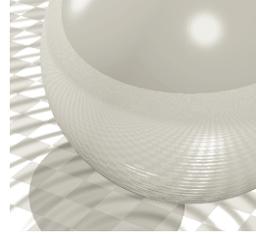


그림 1. (가) 축대칭 반사망원경과 (나) 비축 반사망원경

관측에 많은 장점이 있다. 또한 반사경을 알루미늄으로 제작하면 저온에서 알루미늄 구조물과 같은 비율로 수축하여 광기계 장치가 단순해지는 장점이 있다. 그림 1 (가)에서 보듯이 반사망원경은 전통적으로 축대칭 형태로 만들어 지는데, 모든 반사경이 하나의 축을 공유하도록 되어 있다. 굴절망원경을 비롯한 렌즈를 이용한 결상 광학계도 대부분 하나의 축을 공유하도록 만들어지지만, 굴절망원경과는 달리 반사망원경은 축대칭 구조로 인해 큰 단점이 발생한다. 바로 부경에 의한 차폐현상이다. 반사망원경의 부경은 유효 구경의 크기를 줄이고 입사 빛이 회절, 산란되어 이미지의 해상도를 낮춘다. 또한 주경의 중심 구멍 주변의 열복사와 산란광이 적외선 파장대의 열복사 잡음을 크게 한다. 이를 피하기 위해서는 그림 1 (나)와 같이 주경에 의해 빛이 비스듬하게 반사되도록 만들어야 하는데 그럴 경우 주경의 형태는 비축대칭이 된다. 마찬가지로 부경에서 반사된 빛도 주경으로 돌아가지 않게 하기 위해서는 부경의 형태 또한 비축대칭이 되어야 한다. 이렇게 비축대칭 형태의 미러로 이루어진 비축 반사망원경은 전통적으로 극히 제한적 목적에서 사용되었다. 그 이유는 이러한 비축 반사경을 만들 수 있는 기술이 과거에 없었기에 비축 망원경 설계 기술도 개발되지 않았고, 관례적으로 비축 반사 망원경은 전통적인 축대칭 반사망원경보다 결상 성능이 나쁘다는 선입관 때문이다.

최근 컴퓨터 제어 공학의 발달로 초정밀 가공 기술이 발달하여 과거에는 불가능했던 자유곡면 반사경의 제작이 가능하게 되었고 이를 이용하여 비축대칭 반사경을 만들 수 있어서 비축 반사망원경이 주목을 받고 있

다. 본 연구팀은 비축 반사망원경의 수차를 처음부터 해석학적으로 다시 분석하여 축대칭 반사망원경과 동등한 광학 성능을 가진 비축 반사망원경을 설계하고, 광시야 적외선 우주망원경의 시험 모델을 제작하고 있다.

2. 비축 반사망원경의 수차 이론

비축 반사망원경의 결상성능을 알아보기 위해서는 비축 반사망원경의 수차를 분석해야 한다. 해석학을 바탕으로 하는 수차 이론이 등장한 19세기에는 비축 반사경의 제작이 불가능하였기에 모든 결상 광학계는 축대칭 광학계를 대상으로 하였다. 컴퓨터가 등장하기 훨씬 전에 축대칭 반사망원경의 기본 설계 원리는 완성되었고, 현대의 망원경 설계자는 복잡한 수차 이론을 몰라도 렌즈설계 소프트웨어를 사용하여 기본 설계 값 주변에서 최적화된 설계를 얻을 수 있다. 그렇지만 전통적으로 알려진 수차 이론은 축대칭 광학계를 전제로 하고 있기 때문에 비축 반사망원경에는 적용할 수 없다.

비록 상당히 오래 전부터 비축 광학계에 대한 연구가 있었지만 그 복잡성으로 인해 실제로 광학계의 설계에 적용하기에는 어려움이 따른다 [3-8]. 하지만 단순화된 비축 광학계는 비교적 수차의 해석이 용이하다. 그 중에 하나가 서로 초점을 공유하는 원뿔 곡선(conic section) 반사경들로 이루어진 비축 동초점(confocal) 시스템이다. 이 광학계는 그림 2에서 보는 것과 같이 원뿔 곡선의 성질로 인해 최종 초점에서는 고전 축대칭 광학계와 마찬가지로 수차가 없는 완벽한 상을 맺는다 [9].

자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경

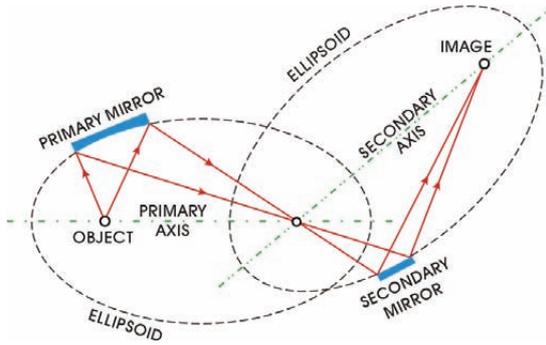


그림 2. 두 개의 반사경이 서로 초점을 공유하지만 축을 공유하지 않는 비축 반사광학계

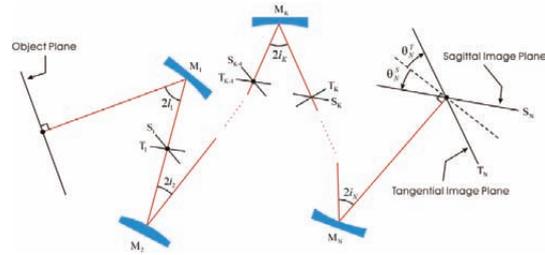


그림 3. 서로 초점을 공유하는 N개의 conic mirror로 이루어진 비축 반사광학계

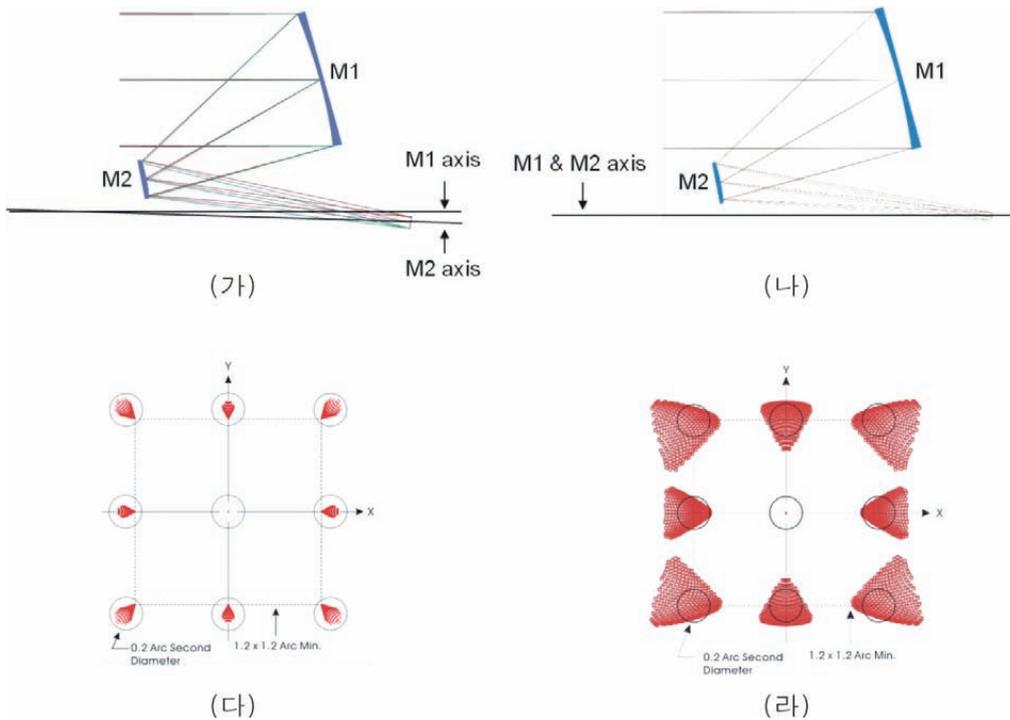
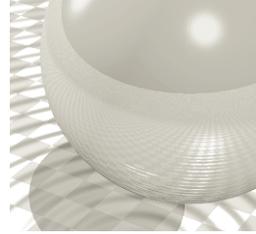


그림 4. 선형 비점수차가 제거된 비축 카세그레인 망원경과 선형 비점수차가 제거되지 않은 비축 카세그레인 망원경

한가지 주목할 부분은 서로 초점을 공유하기만 하면 각 반사경의 축이 일치할 필요가 없다는 것이다. 문제는 초점 주변부의 결상 성능이다. 비축 광학계는 축 대칭성이 없기 때문에 축대칭 광학계에 비해 수차가 클 것이라고 예상해 볼 수 있다. 이는 사실인데, 비축 광학계는 축대칭 광학계에 없는 선형 비점수차(linear astigmatism)가 발생하기 때문이다. 선형 비점수차는 탄젠셜(tangential)

상면과 새지털(sagittal) 상면이 기울어져 서로 일치하지 않기 때문에 나타나는 현상이다. 선형 비점수차는 일반적인 축대칭 광학계에서 탄젠셜 상면과 새지털 상면의 곡률 차이로 발생하는 3차 비점수차 보다 한 차수가 낮은 2차 수차이다. 따라서 광학계의 결상 성능에 가장 큰 영향을 미치며 넓은 상면을 위해 반드시 제거 되어야 하는 수차이다 [9].



다행히 서로 초점을 공유하는 2개 이상의 원뿔 곡선 반사경들로 이루어진 비축 반사광학계에서는 선형 비점수차의 제거가 가능하다 [9,10]. 선형 비점수차의 제거 조건은 다음 식과 같다.

$$\sum_{p=1}^{N-1} \left[(1+m_p) \tan i_p \prod_{q=p+1}^N m_q \right] + (1+m_N) \tan i_N = 0$$

여기서 N은 반사경의 개수, m_k 와 i_k 는 각각 k번째 반사경의 확대율과 중심광선의 입사각이다 (그림 3).

위의 식을 만족하도록 비축 반사광학계를 설계하면 축대칭 광학계와 동등한 수차 성능을 가지게 된다. 예로서 그림 4 (가), (나)는 두 개의 서로 다른 비축 고전 카세그레인식 망원경을 보여주고 있는데, (가)는 선형 비점수차 제거 조건을 만족하도록 설계 되었고, (나)는 일반 축대칭 카세그레인의 주변부를 사용하는 것으로 선형 비점수차 제거 조건을 만족하지 않는다. 두 망원경 모두 유효 구경과 유효 초점비는 각각 1m와 f/8로서 동일하다. 그림 4 (가) 망원경의 부경 축은 주경 축으로부터 기울어져 있는데, 기울어진 각도는 선형 비점수차 제거 조건과 원뿔 곡선 방정식으로부터 계산할 수 있다. 그림 4 (나) 망원경의 주경과 부경축은 서로 일치한다. 그림 4 (다), (라)는 각각 그림 4 (가), (나) 망원경의 스폿다이아그램 (spot diagram) 을 보여주는 것으로 (가) 망원경은 선형 비점수차가 제거 되어 일반 축대칭 망원경과 동등한 수차 성능을 보여주는 반면 (나) 망원경은 그렇지 않다는 것을 알 수 있다.



그림 5. 자유곡면 반사경 가공 모습.

3. 알루미늄 자유곡면 반사경의 제작

그림 4 (나)에서 보여주는 비축 카세그레인 반사망원경은 축대칭 반사망원경 반사경의 가장자리를 사용하고 있다. 이러한 경우에는 축대칭 비구면 반사경을 만들어서 가장자리를 잘라서 반사경을 만드는 것이 일반적이고, 이 제작 방법은 전통적인 축대칭 반사경을 만드는 것과 거의 동일하다. 하지만 축에서 멀리 떨어진 비축반사경이나 고차 수차의 제거를 위해 최적화된 자유곡면 반사경의 경우는 그러한 방법을 사용할 수 없고 자유곡면 가공을 할 수 있는 서보툴머시닝 (Servo Tool Machining) 기술을 사용해야 한다 [11,12]. 이 기술은 기존의 축대칭에서 사용하는 2차원 (x, z) 좌표에 한 차원을 추가하여 3차원 (x, y, z) 또는 (r, θ, z) 좌표의 가공 경로를 설정할 수 있다. 본 연구에서는 한국기초과학지원연구원이 보유한 5축 제어 초정밀 다이아몬드 선삭기계 (Nanotech 450 UPL, Moore Nanotechnology System)를 사용하고 있다. 그림 5는 자유곡면 반사경의 가공 모습을 보여준다. 자유곡면 반사경의 표면은 간섭계로 측정할 수 없다. 본 연구에서는 한국기초과학지원연구원이 운영하는 초정밀 비점측식 3차원 형상 측정장비 UA3P (Ultra-high Accurate 3-D Profilometer, Panasonic Co.)를 사용하고 있다.

반사경을 가공하고 표면 측정을 하여 분석을 할 때는, 설계 값과 차이(오차)를 다음의 세가지 공간주파수로 분류한다.

- (1) LFE (Low Frequency Error): 밀리미터 주기의 오차로 반사경의 형상 오차를 표시한다. 이 오차는 광학계의 결상 성능을 결정한다.
- (2) MFE (Mid Frequency Error): 마이크로미터 주기의 오차로 다이아몬드 톨이 지나가면서 생겨서 톨마크라고도 한다. 이 오차는 동심원 패턴으로 나타나고 격자 분광기처럼 간섭 현상을 만든다.
- (3) HFE (High Frequency Error): 나노미터 주기의 오차로 표면 거칠기를 표시한다. 이 오차는 반사경 표면의 산란과 반사율을 결정한다.

자유곡면 가공은 다이아몬드 선삭기계의 C-축이 재료의 회전에 동기화되어 움직이는 서보툴머시닝 기술을 쓰는데, 기계의 가공경로와 속도를 지정한

자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경

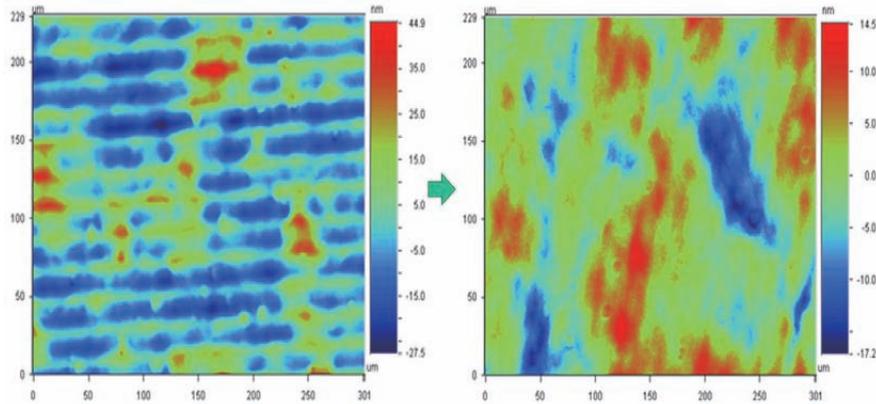


그림 6. 왼쪽은 DTM 가공 후에 보이는 MFE, 오른쪽은 표면 연마 후의 모습 [13].

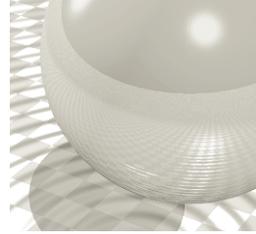
프로그램 값에 따라서 위의 LFE, MFE, HFE 값이 다르게 나타난다. 모든 에러 값을 동시에 줄이는 가공 방법은 없고 상호 보완적으로 나타나는 에러를 없애는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 LFE와 HFE 를 최소화하는 프로그램으로 가공하였고 그림 6에서 보이는 MFE를 줄이는 표면 연마 연구를 진행했다 [13]. 알루미늄은 무른 재질의 특성으로 반사경의 LFE(형상정밀도)가 작아질 위험이 있고, 표면 연마 작업의 효율이 떨어진다. 이 단점을 극복하기 위해 표면을 무전해 니켈 도금하고 200도에서 열처리를 하여 표면 강도를 4배 이상 높이고 연마를 했다. 그림 8은 연마 후에 MFE 가 현저하게 줄어든 모습을 보여준다.

4. 결론

초정밀 가공 기술의 발달로 기존에 불가능했던 자유 곡면 반사경의 제작이 가능해지고, 다양한 형태의 비축 반사망원경 설계가 등장하고 있다. 선형 비점수차가 완전히 없어지는 비축 반사경 수차 이론을 활용하면 축대칭 광학계와 동등한 성능의 비축 반사망원경을 만들 수 있다 [14,15]. 자유 곡면 반사경은 초정밀 다이아몬드 선삭기로 만들 수 있다. 현재까지의 연구 결과로는 알루미늄 반사경으로 적외선 파장대의 우주 망원경 제작이 가능하다. 초정밀 다이아몬드 선삭기의 가공 기술을 개발하면 반사경 재료를 다양화 할 수 있고, 광학과 자외선 우주 망원경에 활용할 수 있는 표면 정밀도를 얻을 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

- [1] 박수중, 천문관측기술, 네이버 학문명백과 (2014), <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=2083669&cid=44413&categoryId=44413>
- [2] I. S. Yuk, et al., "Preliminary Optical Design of MIRIS, Main Payload of STSAT-3", Publications of The Korean Astronomical Society 22, 201 (2007)
- [3] R. A. Buchroeder, "Tilted component optical systems," Ph.D. thesis (Optical Science Center, University of Arizona, Tucson, Arizona 1976).
- [4] K. P. Thompson, "Aberration fields in tilted and decentered optical systems," Ph.D. thesis (Optical Science Center, University of Arizona, Tucson, Arizona 1980).
- [5] J. R. Rogers, "Vector aberration theory and the design of off-axis systems," in International Lens Design Conference, W. H. Taylor and D. T. Moore, eds, Proc. SPIE 554, 76—81 (1985).
- [6] P. J. Sands, "Aberration coefficients of plane symmetric systems," J. Opt. Soc. Am, A62, 1211—1220 (1972).
- [7] J. M. Sasian, "How to approach the design of a bilateral symmetric optical system," Optical Engineering 33, 2045—2061 (1994).
- [8] B. D. Stone and G. W. Forbes, "Second-order design methods for definitive studies of plane-symmetric, two-mirror systems," J. Opt. Soc. Am, A 11, 3292—3307 (1994).
- [9] S. Chang and A. Prata, Jr., "Geometrical theory of aberrations near the axis in classical off-axis reflecting telescopes," J. Opt. Soc. Am, A22, 2454—2464 (2005)
- [10] S. Chang, "Linear astigmatism of confocal off-axis reflective imaging systems with N-conic mirrors and its elimination," J. Opt. Soc. Am, A 32, 852—859 (2015)
- [11] S. Kim, S. Pak, and S. Chang, et al., "Proto-model of an infrared wide-field off-axis telescope," Journal of the



Korean Astronomical Society 43, 169-181 (2010)

- [12] L. Li, X. Min, D. Chen, and J. Wang, "Special techniques in ultra-precision machining", Proc. SPIE 6722, 672213-672213-6 (2007)
- [13] S. Kim, S. Chang, and S. Pak, et al., "Fabrication of electroless nickel plated aluminum freeform mirror for an infrared off-axis telescope," Applied Optics 54, 10137-10144 (2015)
- [14] S. Chang, "Off-axis reflecting telescope with axially-symmetric optical property and its applications," Proc. SPIE 6265, Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter, 626548 (2006)
- [15] S. Chang, "Elimination of linear astigmatism in off-axis three-mirror telescope and its applications," Proc. SPIE 8860, UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VI, 88600U (2013)

약력

장승혁



- 2003 University of Southern California, Los Angeles, California, USA, 전자공학과 박사
- 1996 University of California, Riverside, California, USA, 물리학과 석사
- 1993 서울대학교, 물리학과 학사
- 2014. 7 - 현재 (재)스마트IT융합시스템연구단, 연구부교수
- 2013. 3 - 2014. 6 삼성전자 S.LSI 사업부 이미지개발팀, 책임연구원
- 2011. 1 - 2013. 2 삼성전자 반도체 연구소, 책임연구원
- 2004. 3 - 2010. 12 삼성종합기술원, 전문연구원
- 수차이론, 비축 반사망원경, 적외선 결상광학계, 반사식 안테나, 이미지 센서

박수중



- 1997 University of Texas at Austin, USA, 천문학과 박사
- 1994 University of Texas at Austin, USA, 천문학과 석사
- 1990 서울대학교, 천문학과 학사
- 2011. 3 - 현재 경희대학교 우주과학과, 교수
- 2010. 3 - 2012. 2 경희대학교 천문대, 대장
- 2006. 3 - 2011. 2 경희대학교 우주과학과, 부교수
- 2002. 12 - 2006. 2 한국천문연구원 우주과학연구부, 선임연구원
- 2001. 8 - 2002. 8 일본 우주과학연구소 JAXA/ISAS, 초빙부교수
- 1998. 9 - 2002. 12 서울대학교 자연과학대학 천문학과, 조교수
- 1997. 8 - 1998. 5 막스플랑크 연구소, 박사후 연구원
- 광학 및 적외선 관측기기, 비축 반사망원경, 별탄생 연구, 우리은하 중심 연구

김건희



- 2003 충남대학교 기계공학과 생산기계 박사
- 1999 충남대학교 기계공학과 생산기계 석사
- 1996 한밭대학교 기계설계공학과 학사
- 1993. 9 - 현재 한국기초과학지원연구원 광분석장비개발팀장(책임연구원)
- 2007. 3 - 현재 과학기술연합대학원대학교(UST) 나노메카트로닉스학과 교수
- 2005. 3 - 현재 충남대학교 기계공학과, 분석과학대학원 학연교원
- 2009. 1 - 현재 한국생산제조시스템학회, 한국기계공학회 초청 밀나노가공부문 이사
- 2013. 8 - 2014. 6 아리조나대학교 광공학대학 방문연구자
- 2003. 3 - 2012. 2 한밭대학교 기계설계공학과 겸임교수
- 광학계 초정밀가공 및 평가, 적외선 망원경, 초정밀 열영상 현미경 개발, 첨단광분석장비개발