특 집

초정밀 대구경 반사경의 기술 개발 현황

이호철 한밭대학교 기계공학부

송창규 한국기계연구원 지능기계센터

이후상 한국기계연구원 지능기계센터

1. 서 론

인류가 생존하고 있는 이 우주를 이해하고자 하는 인간의 지적욕구는 천체를 보다 정밀하게 관측하려는 노력을 끊임없이 지속시켜 왔으며, 이는 천체를 관측할 망원경의 대형화와 정밀화로 이어지고 있다. 현재, 지구상에 건설된 또는 건설되고 있는 대구경의 천체망원경은 대개 유효직경 6.5m~10 m에 이르고 있다. 이러한 천체망원경 기술의 핵심은 대구경 반사경기술로서, 최근의 반사경 가공기술은 8 m 직경에 형상정도 12 nm를 실현하고 있으며, 이는 대구경 평활화 가공기술의 극치라 할 수 있을 정도이다. 최근의 우주기술개발과 더불어 천체망원경은 천체 관측만이 아니라 위성에 탑재한 망원경을 이용한 원격탐사기술(Remote Sensing 기술), LIDAR(Light Detection And Ranging) 기술, SLR(Satellite Laser Ranging)기술 등의 민수기술과 아울러 정찰위성용 망원경 등 군사적 목적용으로도 그 수요가 늘어나고 있다. 이와 같은 수요증가에 비하여 국내에는 천체망원경의 반사경을 무인 가공할 수 있는 설비가 존재하지 않으므로, 1m급의 일반 공개용의 천체관측 망원경도 국내 제작이 불가능하여 영월, 김해, 대전 등지에서 최근 설치한 천체망원경이 모두 수입에 의존하고 있는 실정이다. 또한, 대구경 반사경의 가공기술은 최고의 가공 정밀도가 요구되는 최첨단 기술로서 본 기술의 개발은 점차 그 수요가 증가하고 있는 천체망원경의 개발은 물론 인공위성 카메라, 대형 노광장비 등 다른 대구경 광학계 기술 분야에로의 기술적 파급효과를 가져올 수 있다.

한편, 천체망원경 기술은 최근 민수 및 군수양면에서 수요가 크게 증가하고 있으며, 현재 국내에서 계획되고 있는 천체망원경의 수요는 표 1과 같으며, 그 핵심기술인 반사경 가공기술이 확보되지 못하면 모두 수입에 의존하게 될 것으로 예측되고 있다. 구체적으로, 천문연구원은 구경 60cm급의 적도의식 망원경을 4기 제작하여 본원에 1기, 제주도, 울산시, 광주시에 각 1기를 20m 전파망원경의 보조 장비로 설치할 계획을 갖고 있으며, 1m급의 천체망원경

을 천체측광전용과 천체탐사용으로 각 1기를 설치할 계획을 갖고 있고, 향후 중장기적으로는 8 m급과 그이상의 초대구경의 천체망원경을 국제공동으로 설치, 운영할 계획을 갖고 있다.

또한, 연세대학교의 천문연구팀은 천문연구원과 공동으로 세계 각지에 10기의 60 cm~1 m급의 광시야 천체망원경을 설치하여 운영할 계획을 추진하고 있으며, 2002년 4월에 남아공화국에, 2002년 8월에 대만에 천체망원경을 설치한바 있다. 따라서 국내에서 대구경 반사경의 저가격의 생산이 이루어질 수 있다면 일본 및 동남아시아 등 해외수요에 대한 대응도 충분히 가능하다고 예상되고 있다. 대구경 광학 반사경의 또 하나의 수요처는 인공위성의 광학

표 1. 국내 예상되는 천체 망원경의 수요

수요처		용 도	크기	수량	비 고
전문 연구기관	천문연구원	일반 천체관측	60cm급	4기	KNV연계 지방자치단체연계
		천체 측광전용	1~2m급	1기	
		천체 survey용	1~2m급	1기	
		천체관측	8m급	1기	중장기 계획
		천체관측	초대구경	1기	중장기 계획
	연세대	광시야 망원경	60cm~1m급	8기	해외설치
	대학	일반 천체관측	60cm~1m급		
공개천문대	지방자치단체	시민천문대 과학관	60cm~1m급	수십기	
	일본 및 동남아		60cm~2m급		
특수목적용	항우(연)	위성카메라	60cm급	1기이상	중장기 계획
		SLR 망원경	1~2m급	1기이상	
	군사목적	우주감시용	1~2m급	1기이상	

표 2. 한국의 다목적 실용위성 발사 계획

구분	개발기간	규격		탑재 체	임무	개발방법
		궤도	중량			
1호	1995~1999	고도 685km, 태양동기궤도	500kg	EOC - Panchromatic(6.6m) OSMI, SPS	지상관측, 해양관측, 과학관측	관련기관 수요에 따른 국내개발
2호	1999~2005	고도 685km, 태양동기궤도	800kg	MSC - Panchromatic(1m) - Multispectral(4m)	지상관측	
3호	2004~2009	저궤도, 태양동기궤도	800kg	MSC - Panchromatic - Multispectral	지상관측	
3A호	2006~2011	저궤도, 태양동기궤도	800kg	EO/IR - Panchromatic - Infra red	지상관측	
5호	2005~2009	저궤도, 태양동기궤도	1톤	SAR	전천후 지상관측	
6호	2010~2013	저궤도, 태양동기궤도		MSC(미확정) - Panchromatic(0.5m) - Multispectral(2m)	지상관측	
7호	2010~2014	저궤도, 태양동기궤도		추후결정	전천후 지상관측	

표 3. 대구경 광학계 가공설비 보유 회사 및 가공실적

회사명	국명	가공 실적		
		천체망원경 명칭	반사경 직경	가공정밀도
REOSC	프랑스	VLT (1997년)	8.2 m	38 nm rms
Contraves	미국	Subaru (1998년)	8.4 m	12 nm rms
Carl Zeiss	독일	ESO NTT(1986년)	3.5 m	13.5 nm rms
KODAK	미국	Keck (1991년)	1.8 m×36	10 nm rms

탑재체로 한국의 우주기술개발이 활성화됨에 따라 그 수요가 활발해질 것으로 예상되고 있다. 항공우주연구원은 위성개발 계획안에 여러 가지 목적의 관측용 위성카메라를 개발할 계획이며, 다목적 위성 1호가 1999년 12월 궤도에 올려져 사용되고 있으며, 다목적 위성 2호에는 60cm급의 위성카메라 개발이 추진되었고, 이 60cm급의 위성 카메라의 개발은 그 특수성으로 인하여 외국 기술에 의존하고 있으며, 그 개발비만도 600억원에 이르는 것으로 알려지고 있다. 2008년 10월에 계획되어있는 다목적 위성 3호에도 위성 2호 보다 한 단계 높은 해상도의 위성 카메라가 설치될 예정이다.

이와 같은 사례로 볼 때, 국내에도 향후 10년 안에 적어도 수십기의 천체망원경을 각 지방자치단체별로 설치하여 관광자원 및 과학대중화의 역할을 담당하게 할 필요가 있으며, 최근 각 지방자치단체의 움직임도 활발하고, 또한 위성개발 계획의 추진에 따른 기상관측 등의 다목적 용도로 위성카메라의 수요가 지속적으로 발생할 것으로 예상되고 있다.

2. 국내 · 외 관련기술 현황

2.1 국외기술 현황

현재 국외에서 직경 8m급 이상의 대형광학계를 연마할 수 있는 설비를 보유한 회사는 표 3과 같이 미국, 프랑스, 독일의 4개 회사정도로 알려져 있다.

콘트라베스사는 석회석의 폐광 안에 연마장비가 설치되어 온도의 안정성과 진동이 없는 연마 환경을 보유하고 있으며, 측정용의 샤프트(shaft)는 직경 10m 높이 30m의 크기로, 측정용 간섭계와 널 렌즈가 샤프트의 상단에 설치되어 있는 구조이다. 레오스크사는 882m^{2}의 연마실에 높이 32m의 광학 검사용 타워를 설치하고 내부에 특별 공조시스템을 설치, 운영하고 있다. 그림 1은 이 공장의 외관을 보여준다.

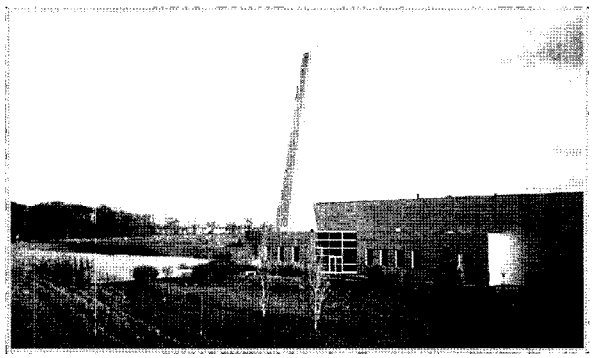

그림 1. 프랑스의 REOSC사 대구경 반사경의 연마공장의 외관

반사경의 연마는 대부분, 형상정도 λ/10 (50nm전후)이내를 목표로 하고 있으며, 최근에 제작된 바 있는 8~10 m급 대구경 망원경의 연마정도는 10nm급에도 이르고 있다. 일본이 개발한 Subaru망원경은 12nm RMS까지의 연마정도를 실현하고 있으며, 이를 위해, 구면형상 가공, 직경 50 cm의 다이아몬드 휠을 사용한 회전쌍곡면으로의 수정가공 및 직경 약 5 cm정도의 동합금(眞鍮)의 패드를 사용한 랩핑(Lapping)작업 공정 등으로 연마가 수행되고 있다. 이후로는 연마 정밀도에 따라 표 4와 같이 측정방법을 바꿔가며 연마에 의한 형상수정과 측정을 반복하여 요구 정밀도를 실현하였다.

2.2 국내기술 현황

렌즈나 반사경의 연마기술은 천체망원경 제작에 있어서

표 4. 거울면의 형상오차와 측정방법(Subaru의 경우)

거울면 형상오차	측정방법
50 ㎛	접촉식 Probe
10 ㎛	Knife-shift법
5 ㎛	적외간섭계+적외 Null Lens
1 ㎛	가시간섭계+가시 Null Lense

의 핵심기술이나, 국내 보유기술은 비교적 취약한 부분이다. 국내에서도 직경 600mm까지의 렌즈나 반사경의 가공은 아직 불완전하지만 몇몇 기관들이 장비를 갖고 있으며 표 5에 그 장비내역을 제시하고 있다. 두산인프라코어와 한국기계연구원(KIMM)은 전자광학 카메라용 비구면 반사경(구경 620mm)을 자체 개발한 Nano Turn 60 이라는 CNC Diamond Turning Machine으로 선삭 후 폴리싱하여 제작한 바 있으며, polishing 후의 형상정도는 Null Lens를 이용한 측정에서 4~5 λ(λ=632.8nm)정도인 것으로 발표되었다. 표준과학연구원은 광학렌즈의 제작에 있어서 지속적인 연구를 통해 많은 실적을 가지고 있으며, 600 mm 급의 대구경 광학 연마장비를 자체적으로 설계하여 제작하여 보유하고 이를 이용하여 평가에 필요한 광학소자 및 대구경(400~600 mm) 반사경을 연마한 실적을 갖고 있음. 그러나 연마장비가 범용장비(Non-CNC)로 연마과정이 경험에 의한 가공에 의존할 수밖에 없다는 점과 비축대칭(off-axis) 광학계의 가공이 지극히 어렵다는 단점이 있어 현재 이를 보완하고 있는 중이다. 고등기술원에서는 해외에서 구입한 구경 1m까지 가공할 수 있는 CCP (Computer Controlled Polishing) 장비를 보유하고 있으며, 이를 이용하여 직경 600mm의 Glass제 반사경을 1/10 λ의 형상정밀도로 가공한 실현한 바 있다. 그러나 이 기계는 기상측정(On-Machine Measuring)이 불가능하여 가

표 5. 렌즈 및 반사경 가공장비를 보유하고 있는 기관 및 내역

	장비 보유 기관	장비 내역	비고
1	두산인프라코어	• Nano Turn 60 - CNC Diamond Turning Machine - 최대 구경 620mm 가공 - 비축대칭 가공 가능 - probe식 on-machine 계측장비 부가	• 자체 개발장비 (KIMM공동개발)
2	서울광학	• Moor M18 - CNC Diamond Turning(ELID연삭기능) - 최대가공경 700mm, 비축대칭 가공 가능 • CNC 연마기 - 비구면 곡면의 정밀 polishing - 최대가공경 300mm	• Moor사 제품
3	기초지원연구원	• Nanoform 600 - CNC Diamond Turning 및 비축대칭 가공 가능 - 최대 구경 600mm 가공 - 최대경 300mm ELID 연삭기능 부가	• Pneumo사 제품
4	표준과학연구원	• 600mm 비구면 연마기 - Non-CNC 연마전용, 축대칭 가공 가능 • 구경 1m 비구면 연마기 - Non-CNC 연마전용, 축대칭 가공 가능 - 최대 구경 1m 가공	• 자체설계 국내제작 • 자체설계 국내제작 (현재 장비 설치 중)
5	고등과학원	• 구경 1m CCP 연마기 (도입품) - CNC 연마전용, 축대칭 가공 가능 - 최대 구경 1m 가공 - 구경 600mm를 1/10λ로 가공한 실적 있음.	

표 6. 대구경 광학계 가공기술의 현황 비교

	해외 선도기술	국내 기술	본 과제의 목표
가공 최대 구경	8.4 m	0.62 m	1.5 m
가공 정밀도	12 nm	4~5λ(2~3 ㎛)	1/10λ(<50 nm)

공 후 매번 가공품을 기계에서 떼어내어 별도의 측정 장비에서 측정하여야 된다는 번거로움이 있고 이러한 과정에서 측정이나 가공의 반복도 확보가 어렵다는 단점도 있다.

대구경 반사경의 측정기술로는 한국과학기술원(KAIST)에서 점회절 간섭계를 이용, 10^{-3}nm수준의 고정밀 기준파를 생성하여 대구경 반사경의 측정에 적용하고 있으며, 비구면 형상을 파면보상 없이 측정할 수 있는 Zonal Scanning Method에 대한 개발을 추진 중에 있다. 이상과 같이, 600 mm 이하의 광학계에 관해서는 국내에서도 제작 경험을 갖고 있으나, 천체망원경의 반사경가공을 위해서는 현재의 가공 수준보다는 한 단계 높은 가공정밀도를 실현할 필요가 있으며, 600 mm 이상의 대구경 광학계를 가공할 장비, 특히 가공과 동시에 측정이 가공한 연마시스템을 갖출 필요가 절실하다. 따라서, 현재의 국내기술 상태의 취약성을 분석하여 정리할 때, 국내외 대구경 광학계의 가공기술 수준을 비교하면 표 6과 같으며, 핵심기술에 대한 국내외의 기술 현황을 분석하면 표 7과 같다. 표에서 살펴 본 바와 같이, 대구경 광학계의 연마/측정시스템 개발을 위한 핵심 요소기술은 대부분 국내 기 보유 기술을 활용하여 추진할 수 있다고 평가되며, 기술개발의 핵심과제는 지금까지 국내에서 개발된 것보다 대형화하면서도 가공의 정밀도는 향상시켜야 하는 것임.

특히 국내기술의 경우 아직 1 m이상의 대구경 광학계의 연마·측정기술이 아직 갖추어져 있지 않으며, 나노미터급의 연마 경험도 부족하므로 이에 관한 경험 축적으로, 보다 효율적인 연마공정을 실현하는 것이 중요할 것으로 예측됨.

한편, 한국기계연구원에서는 기상측정(on-machine measurement)과 형상수정연마 및 비구면 연삭의 복합기능을 가진 대구경 반사경 가공장비를 현재 개발 진행하고

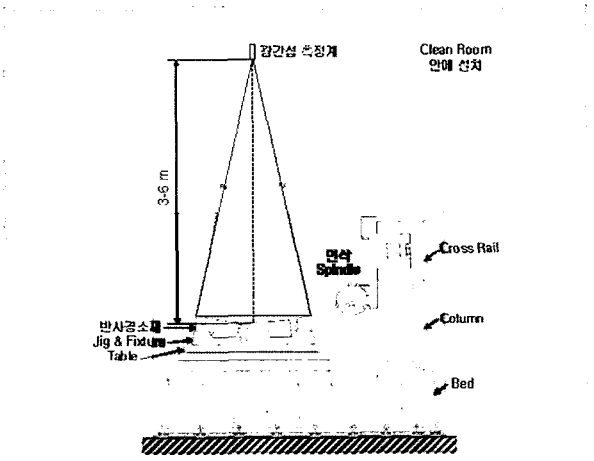

그림 2. 개발 중인 반사경 가공장비의 Layout

표 7. 대구경 광학계의 연마/측정 설비 요소기술의 현황 분석

	요소기술	국외 기술현황	국내 기술현황
1	통합시스템	1980년대부터 실현, 현재 φ8m급, 형상정도 10nm대	1m이하의 광학계 가공장치 개발, 형상정도 200~300nm 실현
2	기계 시스템기술	1982년 LODTM (φ2,5m 가공) 최대 8m까지의 연삭/연마 장치 실현	φ600mm 초정밀 가공기 개발, 초정밀 회전, 구동요소기술 보유 대형 초정밀 가공기 미개발
3	제어시스템	1970년대부터 CCP기술 응용 (Computer Controlled Polishing)	범용 CNC제어 응용사례 있음, CCP기술에의 응용 사례 없음 보유기술 활용으로 기술개발 가능
4	연마공구기술	ELID기술은 일본의 生技研이 선도 광학 polishing공구 REOSC사 선도	ELID기술 응용사례 있음, 일반적 광학 polishing기술 활용 보유기술 활용으로 기술개발 가능
5	Probe 응용 측정	접촉식, 비접촉식 측정기술 보유	접촉식, 비접촉식 측정기술 보유
6	광간섭계식 측정	φ8m급 측정기술 실현	연구 중, 기술개발 필요, 나노메터급의 분해능 실현이 관건
7	자동 연마 소프트웨어	CCP기술 적용시부터 기술 축적 연마 DB구축으로부터 자동 연마 프로그램 생성	기능에 의한 광학연마로 자료의 DB화 미비 CCP장치의 경험 미비로 초정밀 연마공정에 관한 자료 부족 경험 축적에 의한 지속적 연마공정 및 소프트웨어 개선 필요
8	환경제어	온도, 진동제어 등 기술 확립, CCP에의 적용 경험 보유	일반적 온도, 진동제어 기술 보유, CCP장치에의 적용 경험 미비

있다. 이 장비는 복합기능에 의해서 최단시간 내에 형상수정연마를 구현하며 최대 구경 1.5m를 제작하는 것을 목표로 하고 있어, 조만간 시제품가공 단계에 진입할 예정이다. 그림 2는 개발진행 중인 반사경 가공장비의 layout이다.

3. 향후 기술 및 파급효과

3.1 향후 기술 전망

대구경 광학 천체망원경의 개발은 8m급을 한계로 하여 더 이상 확대될 것으로 예측되지 않으며, 현재 21세기 대형 망원경으로 계획되고 있는 20 m~100 m급의 초대형 망원경은 직경 1.3m~8m급 반사경을 조합하는 형태로 구상되고 있다. 이 경우에는 비축대칭 형상의 연마가 필수적이며, 또한 수백~수천개의 반사경의 조합이 필요하므로 다량의 반사경을 단시간내에 가공할 수 있는 생산속도가 문제시 될 전망이다.

3.2 기술확보시 파급효과

대구경 반사경 기술개발은 직접적으로는 최근의 수요가 증가하고 있는 1~1.5m급의 민수 및 군수용의 천체망원경의 국내 개발에 활용될 수 있을 것이며, 이러한 기술의 발전은 다음과 같이 여러 분야의 기술개발에 파급효과를 가져 올 것으로 기대되고 있다. 대구경 광학계의 가공, 측정 기술의 획기적 발전으로 일반 산업용 광학기술에 큰 파급효과가 기대된다. 또한, 천체망원경의 반사경 제작에 활용에 대영역 초정밀 가공기술은 일반 산업계 및 기간산업분야에 폭넓게 활용될 수 있고, 인공위성 관측 카메라, 위성 Laser Ranging(SLR; Satellite Laser Ranging), 원격대기 관측기술 (LIDAR: Light Detection And Ranging), 각종의 노광장비, 레이저 무기 등의 방위산업용 장비, 핵융합로, 광가속기 등에 활용될 전망이다. 산업적인 파급 효과 면에서는, 최근 증가하고 있는 천체망원경 기술에 대한 민수, 군수양면의 기술수요를 일정부분 충족시킴으로써 수입 대체 및 국내의 민수, 군수용의 천체망원

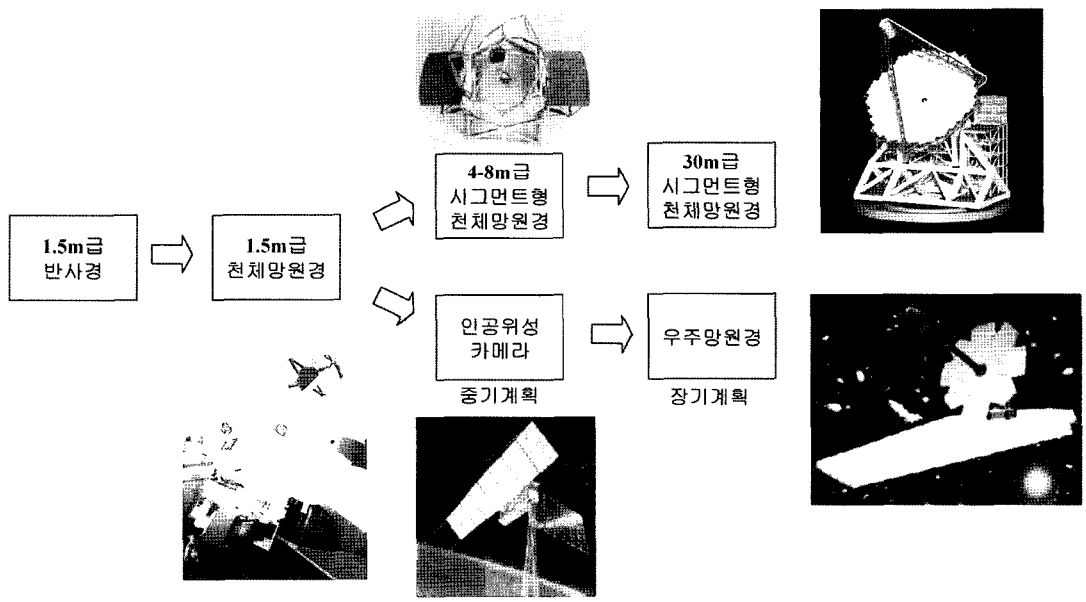

그림 3. 대구경 광학계 연마/측정 설비의 활용계획

경 개발에 활용될 수 있으며, 중장기적으로는 인공위성 관측 카메라, 각종 노광 장비, 방위 산업용 장비 개발 등에도 활용 가능하다. 천체망원경 관련 기술은 몇몇 선진국에서만 보유하고 있는 것으로 기술 확보가 이루어진다면 동남아를 비롯한 후발국에의 기술 수출이 가능하다. 또한, 대구경 광학계의 가공기술은 우선 수요가 점차 증가하고 있는 천체망원경용의 반사경 개발을 통하여 국내의 민수, 군수용의 천체망원경 개발에 활용가능하며, 중장기적으로는 그림 3과 같이 인공위성 카메라, 대구경 천체망원경의 개발로 발전시켜 나갈 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

대구경 반사경은 수십나노미터급의 형상정도의 제조기술을 요구하는 것으로, 천체망원경 및 인공위성에서부터 산업용 노광기의 핵심부품으로 그 응용분야가 다양하다. 따라서 이에 대한 가공기술 확보가 시급함에도 불구하고 국내의 기술은 해외에 비해 아직은 극히 미진한 실정이다. 따라서 국가적으로 초정밀 광학 가공기술 확보를 위한 대구경 반사경 제조장비의 개발 및 확보에 대한 지속적인 지원이 필요하고, 이에 따라 최근 기계연구원, 표준과학연구원 등의 연구기관을 중심으로 이에 대한 가공장비 개발 연구가 활발하게 진행되고 있어서, 조만간 1.5m급의 대구경 반사경의 가공기술을 확보할 것으로 기대된다.