



Received: 2026/02/10
Revised: 2026/02/22
Accepted: 2026/03/13
Published: 2026/03/31

***Corresponding Author:**

Young-Durk Park
(34158) 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon,
Republic of Korea
Tel: +82-42-939-4751
Fax: +82-42-939-4734
E-mail: parkyd@hanbat.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 방사광가속기 미러를 이용한 해양물질 분석을 위하여 광미러를 기술개발하였다. 현재 국내에는 포항가속기 센터에서 광미러를 사용하는데 전량 해외 수입에 의존하고 있다. 국산화를 통해 가속기에 장착되는 미러를 개발하여 다양한 해양물질 분석을 할 수 있게 해외 제품 기준으로 미러 스펙에 필요한 표면형상(slope error), 거칠기(roughness), 곡률값(radius), Au 코팅기술에 대한 연구를 하였다.

In this study, we developed an optical mirror technology for a synchrotron radiation accelerator to analyze marine materials. Currently, the Pohang Accelerator Center in Korea uses imported optical mirrors. Therefore, we studied existing foreign products and developed a mirror suitable for installation in an accelerator to enable the analysis of various marine materials. We focused on specifications such as the surface shape (slope error), roughness, curvature value (radius), and Au coating technology.

Keywords

해양물질(Marine Materials),
방사광가속기(Synchrotron Radiation Accelerator),
거울(Mirror), 연마(Polishing), 코팅(Coating)

Acknowledgement

본 연구는 충북테크노파크 “가속기 장치 선도기술개발 지원사업”의 지원을 받아 수행한 연구결과이다(과제번호: SR230101, 과제명: 방사광 가속기에 적용되는 광미러 기술개발).

본 연구는 2024학년도 국립한밭대학교 교내학술연구자원을 받아 수행된 연구임.

해양물질 분석을 위한 방사광가속기 광미러 기술 개발

Development of Synchrotron Radiation Accelerator Optical-Mirror Technology for Marine Material Analysis

김진호¹, 김건희², 양민수³, 김서현³, 박영덕^{2*}

¹국립한밭대학교 대학원 국방우주공학과 박사과정

²국립한밭대학교 국방우주공학과 부교수

³국립한밭대학교 국방우주공학과 연구교수

Jin-Ho Kim¹, Geon Hee Kim², MinSoo Yang³, Seo Hyun Kim³,
Young-Durk Park^{2*}

¹Ph.D. student, Dept. of Defense and Space Engineering, Hanbat N.U. Graduate School

²Associate professor, Dept. of Defense and Space Engineering, Hanbat N.U.

³Research professor, Dept. of Defense and Space Engineering, Hanbat N.U.

1. 서론

방사광 가속기의 광원에서 발생하는 X-선은 다양한 광학 소자에 의해 단색화, 미세화 등 실험 용도에 맞는 형태로 선별되어 사용된다[1]. 현재 방사광 가속기 X-선 미러는 전량 해외 수입으로 높은 기술력이 요구되는 분야이다. 방사광 가속기에 들어가는 X-선 초고정밀 미러에 요구되는 표면형상(slope error), 거칠기(roughness), 곡률값(radius), Au 코팅기술 등 높은 수준의 기술이 필요하고 미러 자체 성능 외에도 ray tracing 기술개발을 통한 미러의 성능을 극대화 할 수 있는 조건과 상태 및 환경을 확보하여 다양한 해양 물질을 분석할 수 있는 광미러를 개발하였다.

1.1 기술개발의 배경과 필요성

Fig. 1은 방사광 가속기 빔라인 광학계 개념도이다. 개념도 중 붉은색으로 표시된 부분의 광미러를 국산화하기 위하여 연구를 하였다. 이 연구를 통하여 현재 포항에 있는 가속기 센터의 미러 공급 및 2030년에 청주 오창에 구축될 4세대 원형 방사광가속기 센터

및 향후에는 해외 수출까지 목표를 하고 있다[2].

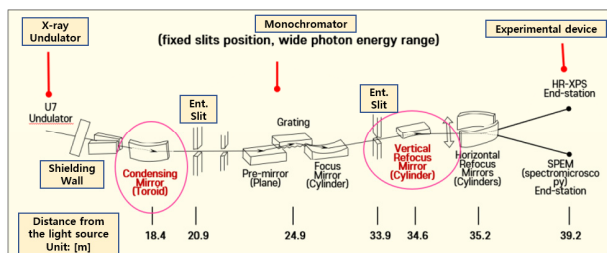


Fig. 1. Accelerator beamline optical system

1.2 기술개발 관련 분야 동향

X-선 광학계 초정밀가공 기술은 일본, 영국, 프랑스, 독일 등에서 많은 연구개발이 수행되고 있다. 일본의 JTEC, 영국의 Crystal Scientific, 프랑스 Thales, 독일의 Zeiss社에서는 길이 1000 mm 내외의 광미러를 roughness 0.3 nm 이하, slope error 1urad 이하의 정밀도로 제작하고 있다.

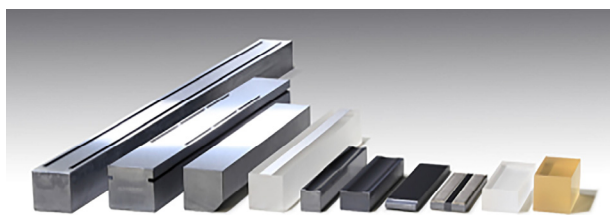


Fig. 2. Ultra-precision mirror

해외 제품을 기준으로 국산화를 단계별로 진행하기 위하여 Table 1과 같이 목표를 정하고 연구를 진행하였다.

Table 1. Mirror development specifications

Cylindrical mirror	Development Specifications
Material	▪ Si
Size	▪ 160 mm × 50 mm × 50 t ▪ Product: Cylinder 1ea
Curvature (Efficiency area 70%)	▪ Infinity (∞) ▪ 1.5 km < R < 1.95 km
Slop Error	▪ Tangential (Efficiency area 70%) : ≤ 1 μrad rms
	▪ Sagittal (Efficiency area 70%) : ≤ 2.0 μrad rms
Surface roughness	▪ MSFR: ≤ 0.4 nm rms ▪ HSFR: ≤ 0.4 nm rms
Coating	▪ Au (30 nm more)/Cr binding layer

1.3 개발 활용방안

X-선 반사경은 적외선, 가시광 소스를 사용하는 분야와는 다르게 초고정밀도의 정밀도를 요구하고 있다. 또한 X-선 반사경으로 사용되는 재료들은 우주/해양/레이저 분야등에서 사용되는 재료와 유사하여 본 연구로 개발될 초정밀가공 기술은 다양한 분야에 적용될 수 있다.

2. 연구의 수행과정 및 수행내용

2.1 Silicon 소재가공

소재 투입 후 MCT 가공으로 형상 및 두께 가공을 진행한다. 첫 공정으로 제품의 치수 및 형상을 구현하는 공정으로 중삭가공은 측면 당 2~3 mm/가공절임량은 0.04~0.05 mm 가공을 한다. 이후 정삭가공은 측면당 0.3~0.5 mm/Feed 400/1회 절임량 0.03 mm의 조건으로 가공을 한다. 형상 및 두께 가공 후에는 평면 및 cylinder면을 가공량 0.05~0.06 mm/Feed 500/가공 절임량 0.005 mm 조건으로 가공을 진행한다. MCT 바이스 세팅 시에는 직각도 3 um 이내, 평면도 10 um 이내로 가공을 진행한다.



Fig. 3. Silicon material mirror manufacturing

2.2 1차 연마

Si_Cylindrical mirror 가공 후 초기연마공정은 제품 성능과 직결되는 표면 data를 구현해 나가는 공정이다. 초기 연마 시 조건 확립을 위하여 다양한 테스트를 시도하였다. 연마제는 폴리트론, 콤폴, 세륨E30, E10으로 테스트를 하였다. 연마패드는 LP66, GR38, Pitch#64, Pitch55 등으로 진행하였고, final 연마시에는 data가 무너질 경우 pitch로 연마를 하였다.

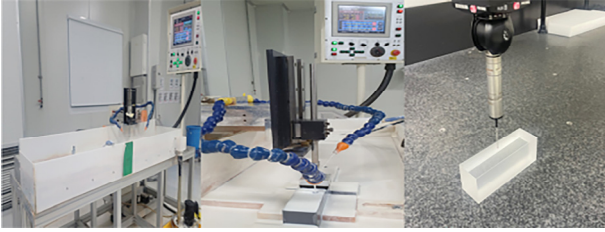


Fig. 4. 1st polishing and measurement

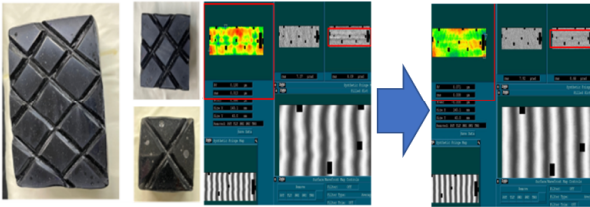


Fig. 5. Polishing condition test

2.3 Final 연마

Final 연마의 개념은 최종 성능을 위한 spec을 만족하는 data 값을 구현해 내는 공정이다. QED社의 Q-22 장비를 이용하여 final 연마를 진행하였다. Fig. 7은 silicon 소재에 따른 spot을 활용한 연마 조건을 세팅한 조건이다. 초기 연마 공정에서의 data를 보존



Fig. 6. Final polishing

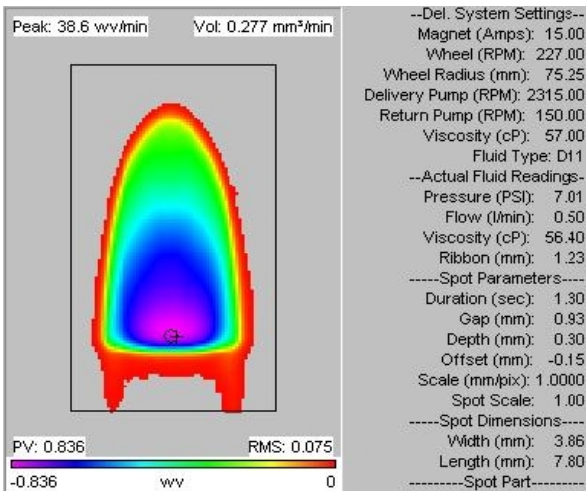


Fig. 7. MRF spot condition

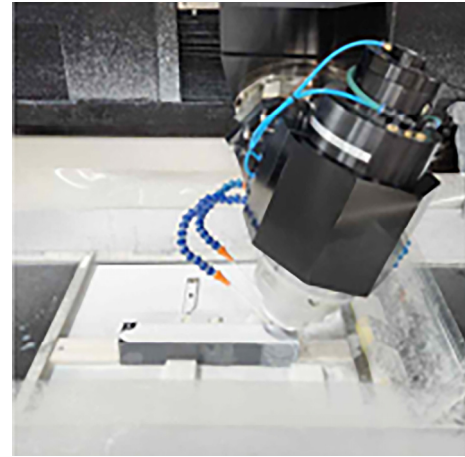


Fig. 8. PLC smoothing manufacturing

하면서 각 소재에 최적화된 연마 조건을 찾기 위하여 제품의 소재와 동일한 silicon 소재의 spot을 이용하여 removal rate 및 연마제 농도, wheel RPM 등을 setting 후 final 연마 공정을 진행하였다. data 보정 작업 진행 중 데이터 형상이 무너지거나 표면거칠기 값이 높아질 경우 Fig. 8과 같이 PLC smoothing 공정과 교체 진행을 하며 final 연마를 진행하였다.

2.4 Coating

코팅 공정은 제품의 마지막 공정으로 final 연마된 면에 Au coating를 진행한다. 코팅 설비는 세신社의 C-8 Φ 1350 장비를 이용하여 E-beam, thermal boat 방식으로 진행하였다. 성막 온도는 코팅 후 미러의 변형을 방지하기 위하여 상온에서 공자전 방식에 속도는 5 rpm으로 진행하였다. 성막 방식으로는 Cr, Ni은 E-beam 가열방식, Au는 thermal 가열 방식으로 진행하였다. 성막 속도는 Cr 1.5 Å/s, Ni 3.5 Å/s, Au 30~35 Å/s로 진행하였다. Fig. 10은 코팅 박막 구조를 나타내고 있다.

코팅막 두께는 Cr 50 nm, Ni 30 nm, Au 80 nm 순으로 박막을 진행하였다.

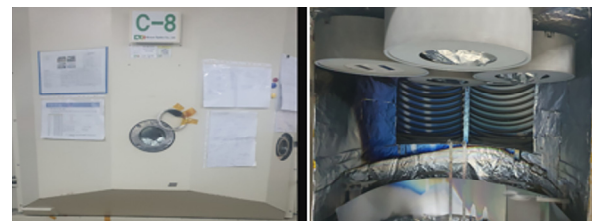


Fig. 9. Coating machine

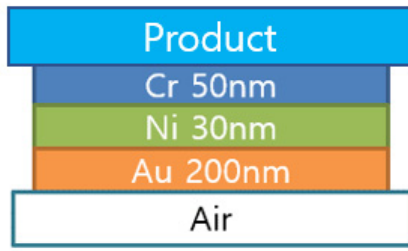


Fig. 10. Coating thin film structure

2.5 Ray Tracing 기술 개발

본 연구를 통하여 ray tracing 기술을 계속 향상시켜 이를 바탕으로 빔 라인에 사용하고 있는 미리의 형상에러 영향을 연구할 수 있는 ray tracing 기술을 확보하였다.

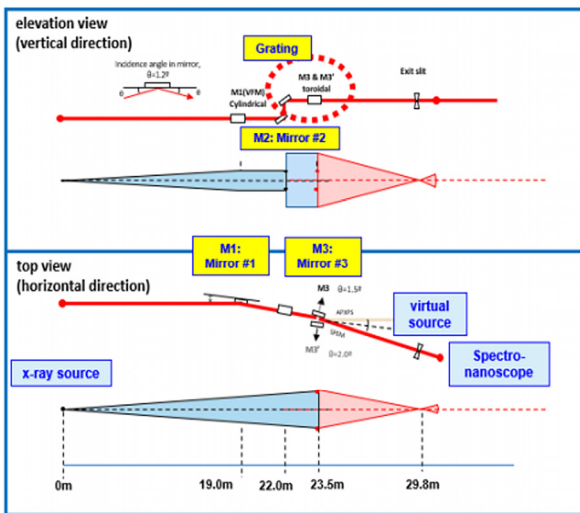


Fig. 11. Ray tracing beamline structure

3. 연구수행 결과 및 목표 달성 정도

3.1 정성적 연구 개발 성과

Cylinder mirror를 구현하기 위하여 형상 구현, 연마 구현, 표면 형상 측정 및 보정 가공기술을 개발하였다.

3.2 정량적 연구 개발 성과

3.2.1 Surface Roughness

국부 표면형상 측정기를 이용하여 MSFR 0.3088 nm, HSF 0.2803 nm로 목표값을 달성하였다.

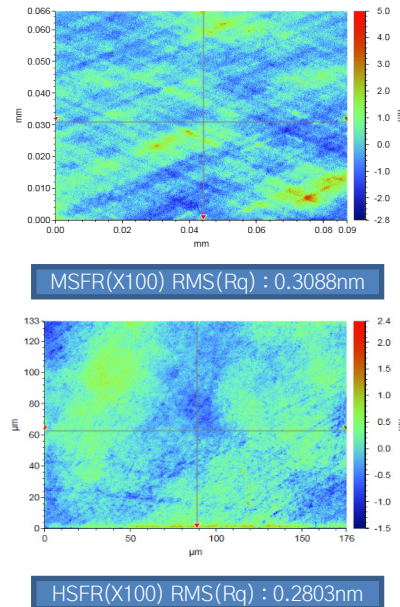


Fig. 12. Surface roughness

Table 2. Cylindrical mirror result indicators

No.	Evaluation items (Key Perfomence)	Unit	Development Goals	Development Results	Attainment Rate
1	Surface roughness	nm rms	<ul style="list-style-type: none"> MSFR: 0.4 HSFR: 0.4 	<ul style="list-style-type: none"> MSFR: 0.3088 HSFR: 0.2803 	100%
2	Tangential slope error Sagittal slope error	μ rad rms	1.0	0.43 0.42	100%
3	Radius	km	1.5 km < R < 1.95 km	0.42	100%
4	Coating	nm	Au (30nm more)	80	100%

3.2.2 Slope error

초고정밀 자유표면형상측정기(UA3P)를 이용하여 tangential slope error 0.43 urad, sagittal slope error 0.42 urad로 목표값을 달성하였다.

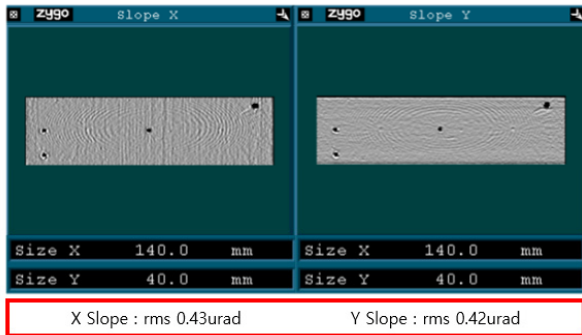


Fig. 13. Slope error (X, Y)

3.2.3 Radius

초고정밀 자유표면형상측정기(UA3P)를 이용하여 곡률 측정 결과 1.58 km로 형성되었다(1.5 km < R < 1.95 km).

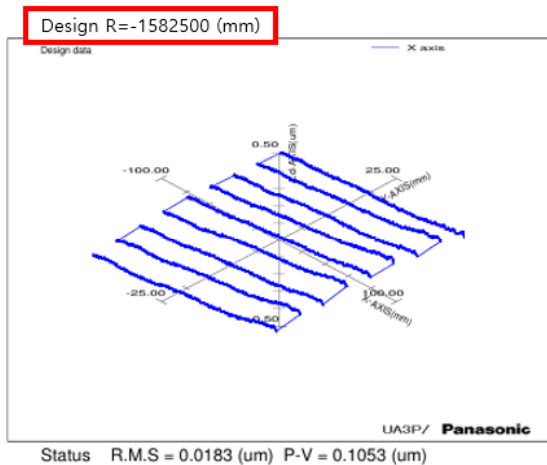


Fig. 14. Curvature measurement data

3.2.4 Coating

비구면 표면 형상 측정기(Taylor Hobson PGI)를

이용하여 코팅 시편의 Au 코팅막 두께를 측정한 결과 60 nm의 결과값을 얻게 되었다.



Fig. 15. Measurement of Au coating thickness

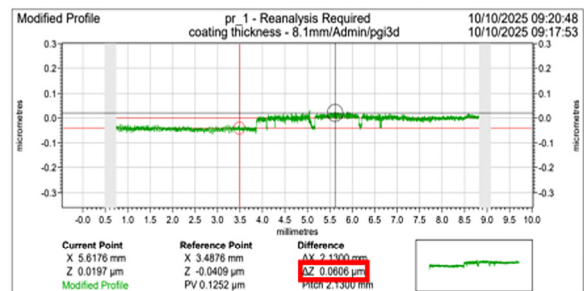


Fig. 16. Au coating film thickness 60 nm

본 연구에서는 국내 가속기 장치에 장착되는 광미러 기술개발을 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

- (1) 해외 제품 기준으로 동등한 스펙의 제품을 제작하였다.
- (2) 본 제품을 토대로 국내 가속기 장치에 장착할 수 있는 기술력을 확보하였다.
- (3) 본 연구 제품 외에 곡률값 또는 제품 사이즈 변경 시 다양한 광미러를 제작할 수 있는 기술력도 확보하였다.

참고문헌

[1] Jitendra Pal Singh, Anil Kumar Paidi, Keun Hwa Chae, Sangsul Lee, & Docheon Ahn, 'Synchrotron Radiation Based X-Ray Techniques for Analysis of Cathodes in Li Rechargeable Batteries,' RSC Advances, VOL. 12, 2022, pp. 20360-20378.

[2] 손영욱, '방사광가속기,' 초전도와 저온공학, VOL. 19, NO. 1, 2017.