

대형 망원경용 FSM(Fast Steering Secondary Mirror)을 위한 틸트 액츄에이터의 성능평가

Performance Evaluation of the Tip-tilt Actuator in Fast Steering Secondary Mirror for Large Telescope

김호상^{1,✉}, 이동찬², 이경돈¹, 김영수³
Ho Sang Kim^{1,✉}, Dong-Chan Lee², Kyoung-Don Lee¹, and Young-Soo Kim³

1 고등기술연구원 로봇/생산기술센터 (Center for Robot and Manufacturing Technology, Institute for Advanced Engineering)

2 주식회사 네오시스템 (Neosystem/ESPRIT)

3 한국천문연구원 광학천문센터 (Optical Astronomy center, Korea Astronomy and Space Science Institute)

✉ Corresponding author: hoskim@iae.re.kr, Tel: +82-31-330-7332

Manuscript received: 2013.12.30 / Revised: 2014.2.26 / Accepted: 2014.04.08

For ground-based telescope application, the performance assessment of tip-tilt actuator is important because the optical quality of telescope depends upon the windshake compensation ability of the fast steering secondary mirror. But it is difficult to measure the performance characteristics of the actuators due to the large size mirror and test facilities including the vacuum support and structural frame. In this paper, the full-scale tip-tilt test bed for the large size secondary mirror with diameter of 1m is built and the several tests are performed including the range, resolution and frequency response function. From the measurement results, it is shown that the tip-tilt actuator can successfully compensate the windshake with frequency of maximum 12 Hz and be a candidate for the Giant Magellan Telescope.

Key Words: Tip-tilt actuator (틸트 액츄에이터), Fast Steering Secondary Mirror (고속 스티어링 미러), Performance evaluation test bed (성능시험용 테스트 베드), Piezoelectric actuator (압전액츄에이터), Giant Magellan Telescope (거대 마젤란 망원경)

기호설명

M = Mass of mirror

I = Moment of inertia of mirror in the X-direction

θ_x = The rotation angle in the X-direction

θ_y = The rotation angle in the Y-direction

r = Distance between the mirror center and tip-tilt actuators

f_1, f_2, f_3 = Forces exerted to the mirror by three tip-tilt actuators

1. 서론

최근 들어 광학기술의 진보와 정확한 우주관측의 요구에 의해 대구경의 망원경 제작에 대한 수요가 급증하고 있으며 특히, 지난 2002년부터 진행되고 있는 차세대 거대 마젤란 망원경(Giant Magellan Telescope, GMT) 개발사업에는 국내의 연구기관들도 미국, 호주 등 유수의 연구기관들과 공동으로 개발에 참여하고 있다. 국내에서는 이러한 대형 망원경의 구성품들 중 Fast Steering Secondary Mirror(FSM)의 개발 및 성능평가를 위한

시험모델(Prototype) 개발을 진행하고 있으며 현재 관련 개발의 막바지 단계에 도달해 있다. 본 논문에서는 개발 중인 시험모델 중 틸트 액추에이터의 성능평가 결과에 대해 기술한다.

틸트 액추에이터는 설치될 망원경의 요구조건과 특징에 의해 좌우되지만 대체로 동적특성에 관한 시험을 포함하며 이를 통한 피드백 제어시스템의 검증은 포함하고 있다.¹⁻³ 또한 설계단계에서의 유한 요소법을 이용한 예측과 성능평가를 통한 동특성 확인의 절차를 따르며 이에 따른 전체 시스템의 요구사항 만족여부를 검토하고 있다.^{4,5} 그러나 이러한 연구내용은 공작기계 등에 응용을 목적으로 하고 있어 실제 망원경의 탑재를 위한 성능평가에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 대형 망원경용 틸트 액추에이터의 성능시험을 수행하기 위해 관련장치의 제작과 평가를 수행하였다. 성능시험을 위해 틸트 액추에이터 뿐만 아니라 이를 장착하기 위한 미러셀과 대형 미러 및 테스트 프레임의 제작을 수행하고 제작된 테스트 베드를 이용하여 실제 대형 망원경의 구동조건과 유사한 조건 하에 동특성 예측과 시험을 수행하였다. 실험결과는 운동방정식에 대한 모델링 및 유한 요소법에 의한 결과와 비교하고 관련 설계 파라미터의 영향을 분석하였다.

2. FSM 용 틸트 액추에이터

2.1 틸트 액추에이터

Fig. 1은 GMT의 FSM을 위한 틸트 액추에이터의 솔리드 모델을 나타낸다. 틸트 액추에이터는 미러의 고속, 정밀운동 구현을 위해 위치형 구동기인 압전액추에이터(Piezoelectric actuator)를 포함하며 횡 방향 하중 작용 시 액추에이터의 파손을 방지하는 플렉서 팁(Flexure tip), 액추에이터에 예압을 가해주는 예압 스프링(Pre-compression spring), 그리고 진공장치의 작동상태를 모니터링 하는 로드셀(Load cell) 등의 관련 부속 부품들을 포함하고 있다.

틸트 액추에이터는 Fig. 2와 같이 3개의 액추에이터들이 한 쌍으로 한 개의 부경(Secondary mirror)에 장착되며 각각 축 방향 지지를 통해 반사경의 빠른 움직임을 발생시켜 망원경 상의 흔들림을 보정할 수 있는 역할을 수행하게 된다. 이러한 액추에이터의 주요 요구사항들은 주로 망원경의 광학적인 요구사항들로부터 결정되며 본 연구

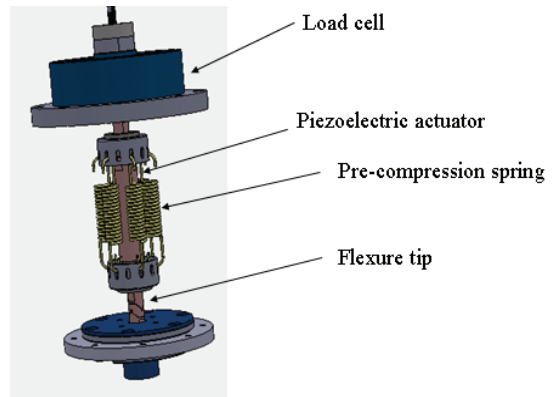


Fig. 1 Tip-tilt actuator for fast steering mirror

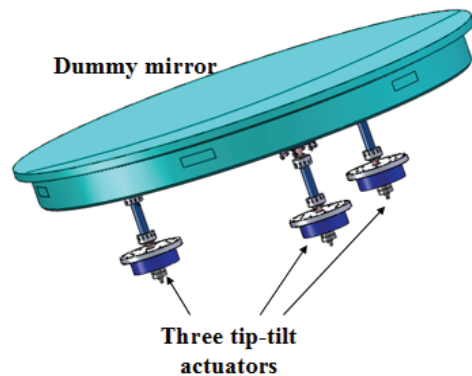


Fig. 2 Three tip-tilt actuators and dummy mirror

의 주요 응용대상인 Giant Magellan Telescope의 경우 ± 10 arc sec의 틸팅 각도와 외부 흔들림의 대역폭을 고려한 최대 12 Hz의 보상능력 그리고 분해능 0.03 arc sec로 정해져 있다.⁶

2.2 더미미러, 래터럴 서포트 그리고 미러셀

Fig. 3과 같이 직경 1064 mm, 두께 168 mm, 무게 114 Kg의 알루미늄 재질의 더미 미러를 제작하였다. 이 미러는 틸트 액추에이터의 성능을 측정하기 위한 목적으로 제작되었으며 향후 제작될 제로더 미러와 동일한 질량과 관성모멘트를 갖도록 제작하였다.

GMT의 부경은 천정각(Zenith angle) 0.5 ~ 60도 사이에서 작동하게 되며 부경이 기울어진 경우 중력방향의 분력은 래터럴 서포트(Lateral support)를 통해 지지하게 된다. 래터럴 서포트의 형상은 여러 형태가 알려져 있지만 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 스파이럴 타입(Spiral type)의 형상을 가지며

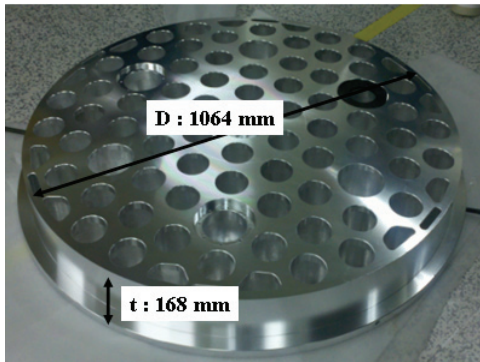


Fig. 3 Photograph of dummy mirror manufactured

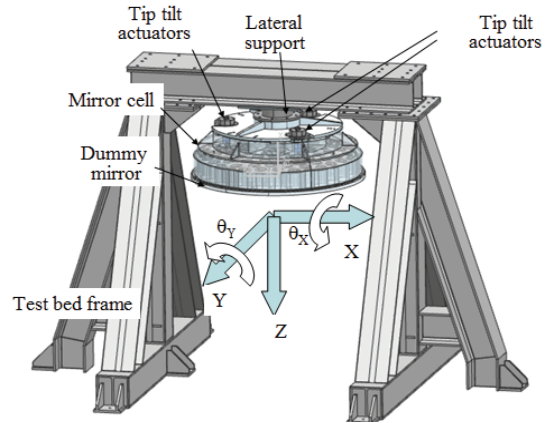


Fig. 6 Three tip-tilt actuators and dummy mirror

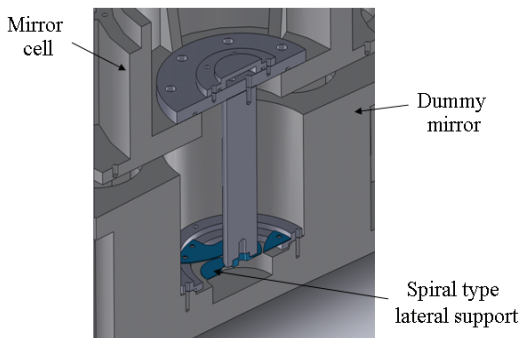


Fig. 4 Solid model of lateral support

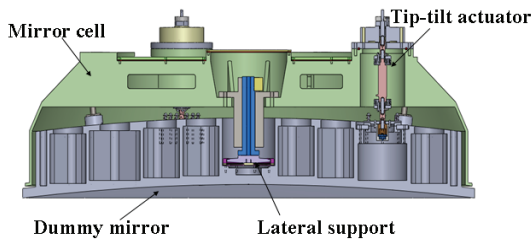


Fig. 5 Sectional view of mirror cell assembly

스테인레스 스틸 재질을 갖는 박판형태의 부품을 사용하였다. 이러한 래터럴 서포트는 액추에이터의 틸팅 성능에 영향을 주지 않으며 횡방향 하중에 대해 강성을 충분히 확보하기 위한 목적으로 제작된다.⁷

미러 셀은 더미 미러의 부상(Levitation)을 위한 진공 공간 확보 및 틸팅 액추에이터의 고정부로서의 역할을 수행하며 망원경 운영 중 나타날 수 있는 위험상황에 대한 각종 보호부품들을 장착하고 있다. Fig. 5는 관련부품들을 포함한 미러 셀 어셈블리의 단면도를 나타낸다.

Table 1 Parameters of tip-tilt actuator and dummy mirror

Moment of inertia of dummy mirror in the X-direction I	8.185 Kg m ²
Distance between the mirror center and tip-tilt actuators r	0.315 m
Mass of dummy mirror M	$M = 114$ Kg

3. 틸팅 액추에이터와 더미미러의 유한요소 해석

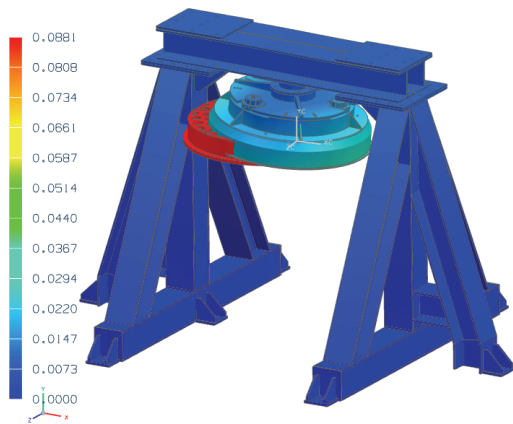
틸팅 액추에이터와 더미 미러의 유한요소 해석을 위해 Fig. 6과 같은 모델을 사용하였다. 테스트 베드는 미러셀과 더미 미러 어셈블리를 고정하는 역할을 담당하며 가능한 구조강성을 높여 설계하여 틸팅 액추에이터의 고유진동수 측정에 영향이 없도록 제작하였다. 더미 미러를 지지하는 3개의 액추에이터에서 f_1, f_2, f_3 의 복원력이 발생한다고 가정하면 더미 미러는 θ_x 와 θ_y 방향으로 회전하게 되며 추가적으로 미러 중심부에 장착된 래터럴 서포트에 의해 횡방향 운동이 발생된다.

틸팅 액추에이터와 더미 미러가 결합된 상태에서의 고유진동수를 예측하기 위해 Fig. 7과 같이 미러셀의 마운팅 되는 부위에 고정 조건을 부과하여 진동 해석을 수행하여 이에 따른 변위 분포를 얻었다. 유한요소 해석시 사용한 요소는 테트라(Tetra)요소로서 총 1,182,646개이며, 상용 소프트웨어인 NX Nastran 7.5를 이용하였다. 참고적으로 본 연구에서 사용된 액추에이터와 더미 미러의 관련 파라미터를 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

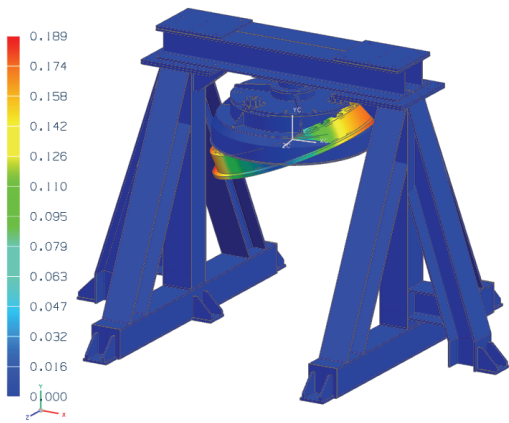
해석결과 주파수 39.11 Hz에서 Y축 방향으로 이동하는 래터럴 모드, 87.59 Hz에서 미러의 θ_x 방



(a) Finite element model for mirror cell assembly



(b) Lateral mode shape at 39.11 Hz



(c) Tilting mode shape at 87.59 Hz

Fig. 7 Contour plot of displacements for tip-tilt actuator and dummy mirror by finite element analysis

향에 대해 회전하는 틸팅 모드에 대한 공진을 확인하였다.

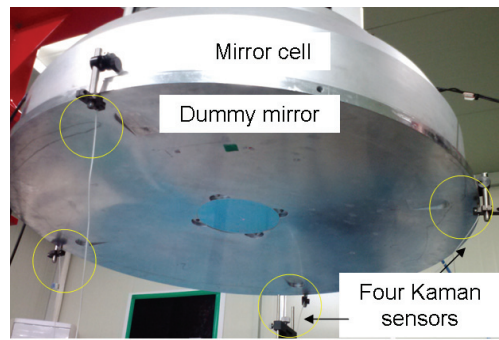


Fig. 8 Four differential precision angle sensors to measure the angular positions of dummy mirror in the test bed

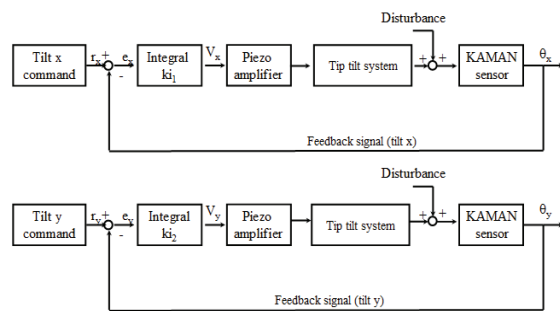


Fig. 9 Block diagrams of closed-loop control systems for tip-tilt actuator and dummy mirror (θ_x and θ_y)

4. 틸트 액추에이터의 성능측정

4.1 성능시험용 테스트 베드

틸트 액추에이터의 구동특성을 측정하기 위해 Fig. 8과 같이 2쌍의 차동 정밀각도 센서(Differential precision angle sensor)를 미러 셀 최외곽 부분 4곳에 장착하여 θ_x 와 θ_y 회전방향에 대해 회전각도를 측정하였다.

사용한 차동 정밀각도 센서는 Kaman사의 KD-5100 모델로서 길이방향으로 약 55 nm의 비선형성을 가지며 이는 각도로 환산하면 0.02 arc sec에 해당된다. 또한 분해능의 경우 길이방향으로 1 nm 이하의 성능을 갖고 있다.⁸

4.2 피드백 제어 시스템 및 동작범위, 분해능

틸트 액추에이터의 구동특성을 확인하기 위해 Fig. 9와 같이 차동 정밀각도센서로부터 X, Y방향 회전각도를 실시간으로 측정하여 피드백 제어 시스템을 구성하였다. 피드백 제어기는 적분제어기

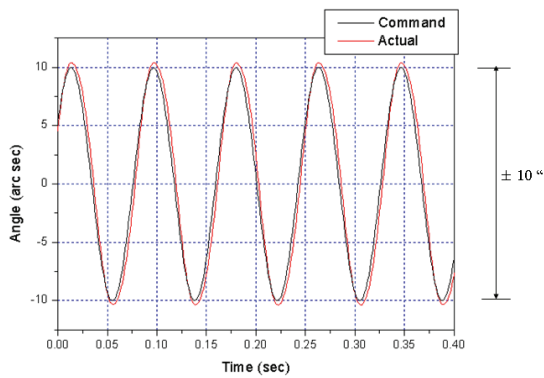


Fig. 10 Time response of tip-tilt actuator for sinusoidal input with amplitude of 10 arc sec, frequency 12 Hz

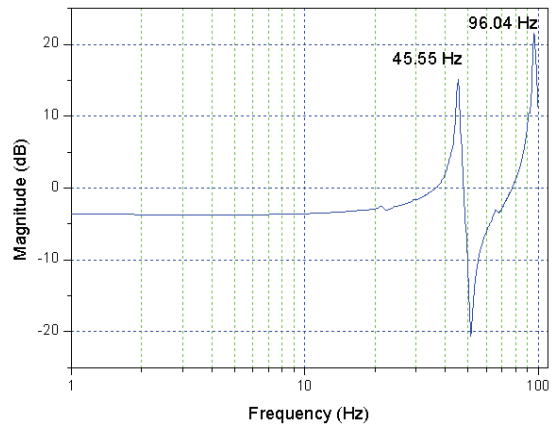


Fig. 13 Resonance characteristics of tip-tilt actuator and dummy mirror in open-loop condition

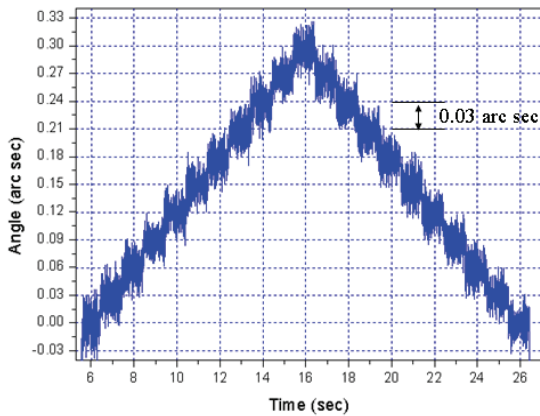


Fig. 11 Resolution of tip-tilt actuator for 10 step inputs with amplitude of 0.03 arc sec

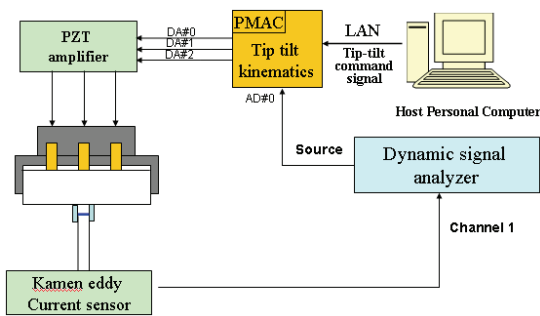


Fig. 12 Experimental layout for frequency response function of tip tilt actuator

를 사용하였으며 각 축들간에 크로스 커플링(Cross coupling)은 없는 것으로 가정하였다.

제작된 틸틸트 액츄에이터의 동작특성을 확인하기 위해 Fig. 10, Fig. 11과 같이 정현파 추종 및 분해능 실험을 수행하였다. Fig. 10은 진폭 10 arc sec, 주파수 12 Hz의 정현파 입력에 대한 추종 결과이며 Fig. 11은 단위 계단 크기 0.03 arc sec에 대한 분해능 측정 결과를 나타낸다. 최대 12 Hz의 정현파에 대해 우수한 추종결과를 얻었으며 매우 작은 단위의 계단형 입력에 대해 제작된 틸틸트 액츄에이터가 구동이 가능함을 확인하였다.

4.3 주파수 특성 (개루프)

틸틸트 액츄에이터의 주파수 특성을 확인하기 위해 3개의 액츄에이터들을 틸팅 방향으로 가진시켜 이때 발생하는 더미 미러의 각도를 차동 정밀 각도센서를 이용하여 측정하였다. Fig. 12와 같이 모션 제어기(Delta Tau PMAC)로부터 각 축 별 운동 프로파일을 발생시키고 이를 압전 액츄에이터 및 증폭기(Piezoelectric actuator and amplifier)를 통해 더미 미러의 틸팅 모션으로 전달하게 된다. 주파수 특성 분석을 위해 동적 신호분석기(Hewlett Packard 35670)를 이용하여 압전 액츄에이터에 입력되는 0-100 Hz까지의 가진 전압을 발생시켰고 출력으로는 차동 정밀각도센서의 출력전압을 사용하였다.

측정결과, 틸틸트 액츄에이터는 틸팅 고유진동수가 96.04 Hz대역으로 예상되어 GMT 부경의 최대 운용주파수인 20 Hz의 약 4배 이상의 값을 확보한 것으로 판단된다(Fig. 13). 또한, 측정된 고유진동수는 유한요소 해석에 의한 예측치인 87 Hz와 비교하여 10% 정도 높게 나타났으며 이는 유한

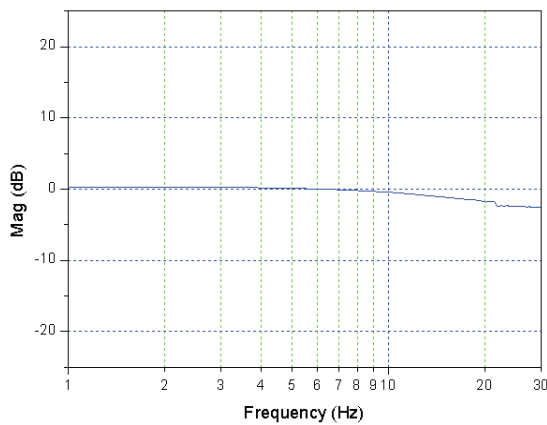


Fig. 14 Frequency response of tip-tilt actuator and dummy mirror in closed loop condition

요소 해석에서 틸트 액츄에이터의 강성 계산시 압전 액츄에이터와 플렉서 틸트 구성 부품간의 강성과 관련된 물성치 및 거동에 따른 부품 모델링의 방법에 관한 오차 때문으로 판단된다. 참고로 미러셀 어셈블리에 포함된 래터럴 서포트의 영향에 의해 횡방향 공진모드는 45 Hz 근방에서 나타나며 이는 GMT의 요구사항인 최소 고유진동수 40 Hz 이상의 조건들을 만족하고 있다.⁹

4.4 주파수 특성 (폐루프)

앞 절의 개루프 주파수 특성에 대한 측정 결과를 토대로 Fig. 9의 적분제어기를 채용하여 0부터 30 Hz까지 정현파 명령을 인가했을 때 발생하는 미러의 회전각도를 측정하여 이에 따른 입력과 출력 프로파일의 크기(Magnitude)의 비율을 표시하였다(Fig. 14). 측정결과 본 논문의 틸트 액츄에이터를 직경 1064 mm의 알루미늄 더미 미러에 장착하여 동작시켰을 때 주파수 12 Hz대역에서 -0.71 dB의 추종특성을 얻었으며 이로부터 GMT의 요구조건인 0.5배의 추종특성을 상회하는 결과를 확인할 수 있었다.⁶ 이러한 결과로부터 대형 망원경 적용 시 바람요동(Windshake)에 대한 보상기능을 효과적으로 수행할 수 있다고 판단된다.

5. 결론

대형망원경용 틸트 액츄에이터의 성능을 측정하기 위해 테스트 베드를 제작하고 진공상태에서 액츄에이터에 의한 더미 미러의 특성을 평가하

였다. 주파수 응답 측정 결과 고유진동수는 96 Hz로 측정되었다. 또한, 폐루프 제어기를 이용한 성능 측정결과 최대 구동주파수인 12 Hz에서 -0.71 dB의 추종치를 나타내어 실제 망원경에서 성공적 적용 가능성을 확인하였다.

향후 연구로서 틸트 액츄에이터의 강성 측정 및 래터럴 서포트의 영향에 관한 연구가 필요하며 이를 고려한 추가적인 제어방식의 개발이 필요하다고 판단된다.

REFERENCES

1. Woody, S. and Smith, S., "Steering Mirror Design and Dynamic Controls for a Dual Actuation Platform using Highstrain Actuators," Proc. of the 46th AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2005.
2. Woody, S. and Smith, S., "Design and Performance of a Dual Drive System for Tip-tilt Angular Control of a 300mm Diameter Mirror," Mechatronics, Vol. 16, No. 7, pp. 389-397, 2006.
3. Zhang, D., Chetwynd, D. G., Liu, X., and Tian, Y., "Investigation of a 3-dof Micro-positioning Table for Surface Grinding," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 48, No. 12, pp. 1401-1408, 2006.
4. Seo, T., Yoon, Y., Kim, H., Kang, D., and Kim, J., "A Fine Actuation System Control for the Micro Positioning Parallel Mechanism Platform," Proc. of Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology, Document ID: TC2-4, pp. 589-592, 2007.
5. Kim, H. S. and Cho, Y. M., "Design and Modeling of a Novel 3-dof Precision Micro-stage," Mechatronics, Vol. 19, No. 5, pp. 598-608, 2009.
6. GMT, "Secondary mirrors: GMT-ID-01472," http://www.gmto.org/Resources/GMT-ID-01472_Chapter_11_Secondary_Mirrors.pdf (Accessed date 14 April)
7. Cho, M., Corredor, A., Dribusch, C., Park, W. H., Sheehan, M., and et al., "Performance Prediction of the Fast Steering Secondary Mirror for the Giant Magellan Telescope," Proc. of SPIE, Vol. 8444, pp. 844424-1-844424-13, 2012.
8. Kaman Precision, "Sensor Data Sheet KD-5100," http://www.kamansensors.com/html_pages/KD-5100

- 0.html (Accessed 11 April 2014)
9. Muller, G. and Cho, M., "Fast Steering Secondary Mirror," GMT Telescope PDR, 2013.