

릴러턴스 액추에이터를 적용한 고속 조종 거울의 구조설계

Structural Design of Fast Steering Mirror with Reluctance Actuator

김 원 목* · 임 선 빈* · 정 재 우* · 정 상 원* · 김 재 현* · 강 보 민*
윤 준 영* · 이 승 한** · 이 병 주** · 이 용 훈** · 김 형 래** · 박 노 철†

Onemook Kim*, Seonbin Lim*, Jaewoo Jung*, Sangwon Jung*, Jaehyun Kim*,
Bomin Kang*, Junyoung Yoon*, Seounghan Lee**, Byoungju Lee**, Yonghoon Lee**,
Hyeongrae Kim** and No-cheol Park†

(Received February 26, 2024 ; Revised April 11, 2024 ; Accepted April 17, 2024)

Key Words : Fast Steering Mirror(고속 조종 거울), Reluctance Actuator(릴러턴스 액추에이터), Negative Stiffness (음의 강성), Flexure Hinge(탄성 힌지), Natural Frequencies(고유진동수)

ABSTRACT

This study deals with the structural design of a fast steering mirror (FSM) with a reluctance actuator. FSM is a device that points a laser toward a target and is used in the military, aviation, and space communication. An FSM with a reluctance actuator can have a wide driving range and strong thrust that can result in a high performance. When analyzing the performance, structural safety, and dynamic characteristics of an FSM with a reluctance actuator, driving characteristics of the reluctance actuator should be considered. In this study, an FSM with a reluctance actuator was structurally designed by considering actuator driving characteristics. Finite element analysis was used to verify the FSM by considering the characteristics of the reluctance actuator and negative stiffness by the magnet. The results confirmed that the designed FSM could achieve the target performance, and the structural safety was confirmed. In addition, the actual dynamic characteristics of the FSM were predicted and analyzed considering the negative stiffness. In the future, a high-performance FSM with a reluctance actuator can be designed using this method.

1. 서 론

레이저는 고속성, 무음성, 고정밀성의 장점으로 군사, 항공, 우주 통신 분야 등 여러 곳에서 이용되고 있다. 다양한 장점으로 인해 레이저를 이용하는 장비의 수요가 증가함에 따라 레이저를 원하는 위치로 포인팅하기 위한 장치의 필요성이 증가하고 있다⁽¹⁾. 그

에 따라 고속 조종 거울(fast steering mirror, FSM)을 개발하기 위한 연구가 최근까지 활발하게 진행되고 있다⁽²⁾. FSM은 액추에이터의 구동력으로 상단 거울의 조향각을 변화시켜 목표물에 레이저를 정확하게 조준하기 위한 장치이다⁽³⁾. 드론, 미사일, 인공위성 등 빠르게 움직이는 물체를 레이저로 조준하기 위해 FSM은 고속 응답성, 고정밀성이 반드시 확보되어야 한다⁽⁴⁾.

FSM의 액추에이터는 구동 방식에 따라 크게 보이

† Corresponding Author ; Member, Yonsei University, Department of Mechanical Engineering, Professor
E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

* Yonsei University, Department of Mechanical Engineering, Student
** LIG Nex1, Researcher

‡ Recommended by Editor Joong-Kwan Kim
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

스 코일 액추에이터(voice coil actuator, VCA)⁽⁵⁾, 릴럭턴스 액추에이터⁽⁶⁾, 압전형 액추에이터⁽⁷⁾ 구분된다. 이 중 릴럭턴스 액추에이터는 동일한 크기의 VCA 보다 큰 추력을 가지고 압전형 액추에이터 보다 넓은 스트로크를 가진다. 이에 따라 최근 릴럭턴스 액추에이터를 적용한 고성능 FSM 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다^(8,9).

이 연구는 릴럭턴스 액추에이터가 적용된 틸트 구동을 하는 2축 FSM의 구조설계를 다루고자 한다. 이를 위해 릴럭턴스 액추에이터의 구동 특성을 설계 단계부터 반영하여 FSM을 구조적으로 설계하고 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용해 해석적으로 검증하고자 한다. 정적 해석을 통한 성능과 구조적 안전성을 분석하고 동적 해석을 통한 고유진동수와 주파수 응답 함수를 분석하고자 한다. 또한 릴럭턴스 액추에이터의 특성인 음의 강성을 고려하여 고유진동수와 주파수 응답 함수 분석을 통해 실제 제어를 위한 시스템의 동특성을 파악하고자 한다.

2. FSM 구조설계

2.1 릴럭턴스 액추에이터

이 연구에서 설계한 릴럭턴스 액추에이터는 halbach array 타입의 영구자석, 회전 운동을 하는 무버(mover), 코일 권선이 감겨있는 요크(yoke), 그리고 요크와 무버 사이에 존재하는 공극(airgap)으로 구성하였으며, 이는 Fig. 1에 제시되어 있다. 영구자석의 바이어스 자속(빨간색)은 무버, 공극, 그리고 요크를 따라 흐르며, 이는 두 공극에서 무버에 동일한 크기의 전자기 인력을 발생한다. 무버에 토크를 생성하기 위해서 Fig. 1에서와 같이 코일에 전류를 인가하게 되면, 생성된 자속(파란색)은 무버와 요크 그리고 두 공극을 따라 시계방향으로 흐르게 된다. 이는 오른쪽 공극에서는 영구자석의 자속과 동일한 방향을 가지기 때문에 강화가 되지만, 왼쪽 공극에서는 반대 방향이기 때문에 약화가 된다. 따라서, 오른쪽 공극에서의 인력은 증가하고, 왼쪽 공극에서의 인력은 감소하기 때문에, 무버에 시계방향으로 회전하는 토크를 생성하게 된다. 전류의 방향을 반대로 인가하게 되면 반시계 방향의 토크를 생성할 수 있다. 설계한 액추에이터의 전자기적 성능을 FEM simulation(Ansys electronics desktop, Ansys Inc.)를 통해서 분석하였으며, 그 결

과는 Fig. 2에 제시하였다. 무버의 회전 변위와 전류 크기에 따라 발생하는 토크는 목표 구동 범위 A mrad 이내에서 선형적인 거동을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이때의 토크 상수와 음의 강성은 각각 28.55 mNm/A, 5.81 mNm/mrad이다(이 연구에서 제시되는 FSM의 정확한 목표 성능은 군사상의 문제로 정확한 수치를 표기하지 않는다).

2.2 한지 설계

영구자석에 의한 인력은 무버와 요크 사이의 공극의 크기가 감소하면 증가하고, 공극의 크기가 증가하

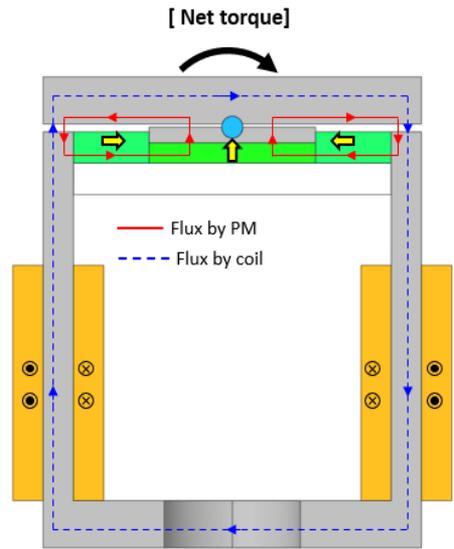


Fig. 1 Design of reluctance actuator

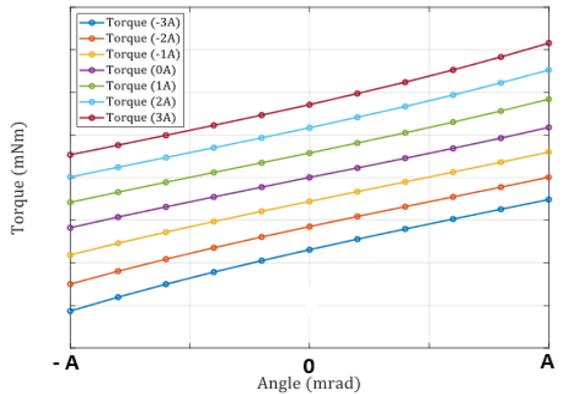


Fig. 2 Designed actuator angle-torque plot

면 감소하는 특성을 가지고 있다. 따라서 이 액추에이터는 스프링의 반력과 반대로 작용하는 음의 강성(negative stiffness)을 가진다. 음의 강성은 피드백 제어에 따른 전류가 인가되지 않는 상황에서 불안정한 시스템으로 만들어, 무버에 중심 위치로부터 경미한 변위가 발생 시 요크의 한쪽 면에 부착되게 만든다. 이를 전류 미인가 상태에서도 거울의 수평 상태를 유지하는 안정한 시스템으로 만들어주기 위해 힌지의 설계가 필요하다.

힌지는 거울이 원하는 방향으로 구동하도록 가이드 역할을 하는 FSM의 필수 부품이다⁽¹⁰⁾. 힌지는 힘에 대한 변위 응답이 선형, 고속 응답, 고정밀로 발생하는 장점이 있어, FSM의 요구성능인 고속 응답성과 고정밀성을 확보하기 위해 반드시 부착되어야 한다⁽¹¹⁾. FSM의 목표 성능과 사용되는 액추에이터의 크기와 종류에 따라 다양한 형태의 힌지가 부착된다⁽¹²⁾. 특히 릴렉턴스 액추에이터는 간극 확보에 유리한 판스프링 형태의 힌지를 주로 부착한다. 설계한 판스프링 형태의 힌지를 Fig. 3에 제시하였다. 하우징과 연결되는 외측 도넛 형태의 하우징 접촉 부위와 주거울이 부착되는 중앙 부위를 2쌍의 힌지 다리가 연결되어 틸/틸트 구동이 발생하기 쉬운 형태를 가진다. 또한 대칭형 구조로 인해 틸과 틸트의 구동 시 힌지는 거동 방향에 상관없이 동일한 회전 강성을 가진다.

앞선 구동 특성으로 인해, 릴렉턴스 액추에이터가 적용된 FSM의 힌지를 설계할 때 반드시 음의 강성과 추력을 고려해야 한다. 만약 힌지의 틸/틸트 회전 강성이 액추에이터 음의 강성보다 작게 설계할 경우, 전류를 인가하지 않은 상태에서 FSM의 거울이 수평

을 유지하지 못하는 불안정한 시스템이 된다. 이는 초반 레이저빔의 정렬을 맞추는데 어려움을 발생시킨다. 반면 힌지의 회전 강성을 너무 크게 설계하여 액추에이터의 추력 범위보다 클 경우, 힌지에서의 복원력이 액추에이터의 추력보다 커서 목표 구동각을 달성하지 못하는 문제가 발생한다. 따라서 힌지의 회전 강성은 액추에이터 음의 강성보다 크고 액추에이터의 발생 가능 최대 토크 강성보다 작게 설계해야 한다. 이를 위해 이 연구에서는 Fig. 3에 제시된 3가지 디자인 변수를 선정하였다. $R_{housing}$ 은 하우징 내측 반경길이, w 는 힌지 너비, t 는 힌지 두께이다. 각각의 변수들은 거울의 주요 거동과 관련 있으며 $R_{housing}$ 이 작고 w 와 t 가 클수록 틸/틸트 방향 회전 강성 k_{hinge} 는 증가한다.

이 연구에서 설계한 힌지의 대표적인 2가지 경우의 설계 변수와 회전 강성을 Table 1에 제시하였으며, 설계한 액추에이터의 성능에 힌지 강성별 복원력에 의한 angle-torque 선도를 Fig. 4와 같이 나타내었다. Fig. 4(a)는 type 1 힌지가 액추에이터와 결합된 경우로 음의 강성이 힌지의 회전 강성보다 커서 전류를 인가하지 않았을 때 거울이 수평을 유지하지 못하는 불안정한 시스템이다. Fig. 4(b)는 type 2 힌지가 액추에이터와 결합된 경우로 힌지의 회전 강성이 음의 강성보다 커 거울의 수평을 유지하는 안정한(stable) 시스템이다. 이 연구에서는 앞선 자석에 의한 음의 강성 및 액추에이터 최대 추력을 고려해 목표 회전 강성 범위를 식 (1)과 같이 설정하였으며 이를 만족하는 type 2 힌지를 설계하는 FSM에 적용하였다.

$$5.81 \text{ mNm/mrad} < k_{hinge} < 11.49 \text{ mNm/mrad} \quad (1)$$

힌지는 주 거울의 목표 구동각을 달성하기 위해 틸/틸트 방향으로 변형이 쉽게 발생하도록 설계된다. 이로 인해 주요 변형이 발생하는 힌지의 다리(연결부)

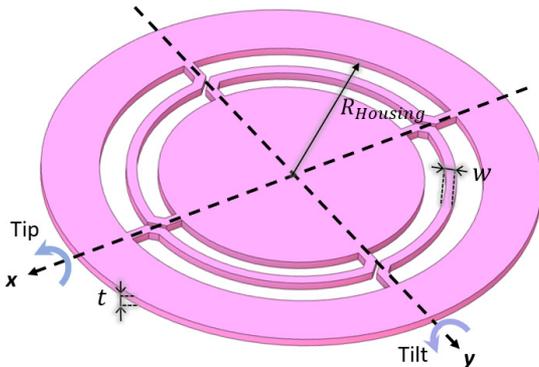


Fig. 3 Plate type flexure hinge

Table 1 Designed flexure hinge parameter

Design parameter				Rotational stiffness
Type	$R_{housing}$	w	t	k_{hinge}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mNm/mrad]
1	18.5	1.2	0.4	3.93
2	18.5	1.0	1.0	10.2

는 응력이 비교적 높게 발생하는 부위로 힌지의 응력을 낮춰 구조적 안전성을 높이기 위한 설계가 필요하다. 이를 위해 비틀림에 강한 정사각형 단면의 힌지 다리를 설계하고 라운드 필렛을 이용해 응력을 감소한 힌지를 디자인하였다. 단축 팁 방향 거동 시 힌지에서 발생하는 주요 응력 분포는 Fig. 5와 같다.

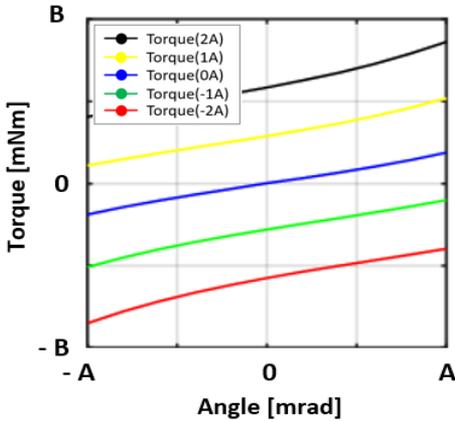
3. 유한요소 해석

3.1 해석 모델 구축

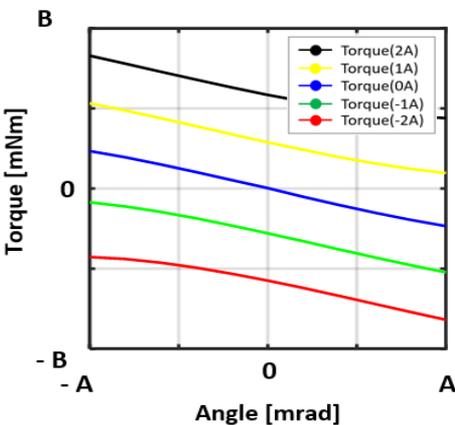
앞선 액추에이터의 특성을 반영하여 설계한 톨릭턴스 FSM의 성능 및 동특성 분석을 위해 검증된 상용 소프트웨어인 ANSYS mechanical을 이용하여 유한요소 해석하였다. 액추에이터와 힌지, 위상각 측정

을 위한 보조 거울과 하우징을 결합하여 Fig. 6과 같이 FSM을 설계하였다. 보조 거울은 yoke 사이마다 설치한 가이드에 의해 부착되었으며 주 거울과 동일한 위상각을 가진다. 이를 통해 광학 센서로 주 거울과 동일한 위상각을 가지는 보조 거울의 위상각을 측정하고 이를 피드백 제어에 이용하여 FSM을 고속, 고정밀 제어하는 것이 가능하다. 외부 하우징은 액추에이터와 힌지를 연결하도록 설계하였으며, 피드백 제어를 위한 광학 센서 부착을 위해 중심부에 광 경로를 확보하였다.

실제 FSM의 구동 시 체결을 고려하여 하우징의 바닥면에 고정-지지단(fixed-support) 경계 조건을, 회전 가능한 구조인 pivot ball bearing은 분리 불가(no-seperation) 접촉 조건을 인가하였다. 전체적으로 1 mm 이하 수준의 조밀한 요소를 형성하였고, 특히 주요 응력 발생 부위인 힌지와 pivot ball bearing 부근에는 0.1 mm 이하의 조밀한 요소를 형성하였다. 이를 통해 해석 모델의 오류로 발생할 수 있는 응력 집중을 회피하고 정확한 해석을 하는 것이 가능하다. 이



(a) With type 1 hinge (unstable)



(b) With type 2 hinge (stable)

Fig. 4 Actuator & hinge angle-torque plot

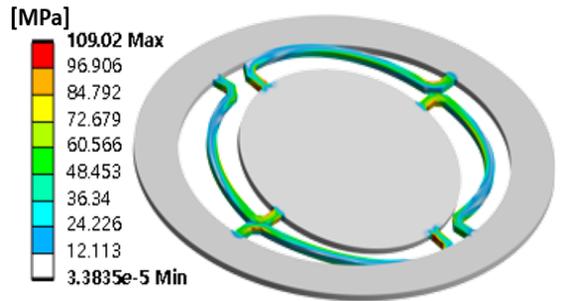


Fig. 5 Equivalent stress distribution of flexure hinge

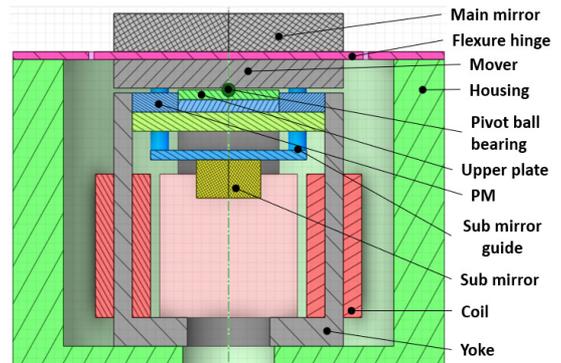


Fig. 6 Cross-section view of designed FSM

러한 조건으로 설계한 유한요소 모델은 Fig. 7에 제시된 것과 같이 총 179 645개의 절점과 120 742개의 요소로 이루어져 있다. 이후 설계한 FSM의 정적/동적 해석을 진행하였다.

3.2 정적 해석 결과

정적 해석을 통해 릴럭턴스 액추에이터의 특성을 반영하여 FSM의 성능을 분석하였다. 릴럭턴스 액추에이터는 Fig. 1과 같이 영구자석에 의한 자속이 발생하므로 요크에서 무버를 당기는 수직 방향 인력이 작용한다. 설계한 액추에이터는 Fig. 8과 같이 요크의 끝단과 중앙 영구자석이 부착된 부분에서 44.6 N의 인력이 발생한다. 무버와 상단 플레이트 사이 중심축을 지지하는 pivot ball bearing 부근에서 최대 응력이 발생한다. 주요 접촉 부위에서 발생하는 최대 등가 응력을 Fig. 9와 같이 분석하였다. 최대 응력은 Fig. 9(c)와 같이 상단 플레이트에서 약 44 MPa로 재료의 yield strength인 252.1 MPa보다 작다. 상단 플레이트의 안전 여유도(margin of safety, MOS)를 식 (2)와 같이 이용하였다. 이는 구조물에서 발생하는 최대 응력과 재료의 허용 가능 응력 사이의 비에서 1을 뺀

값으로 MOS 값이 0보다 클 경우 구조물이 선형 탄성 범위 이내에 거동을 하여 안전하다는 것을 의미한다. 이를 통해 상단 플레이트의 MOS 값은 4.73으로 구조적으로 충분히 안전함을 확인하였다.

$$MOS = \frac{\sigma_{allow}}{\sigma_{max}} - 1 \tag{2}$$

또한 수직 방향 인력으로 인해 무버의 변형이 발생할 수 있다. 이는 무버 위에 힌지와 함께 부착되는 주 거울 표면의 변형을 발생시킨다. 거울의 과도한 변형은 FSM의 성능을 감소시키므로 수직 방향 인력 작용 시 거울의 편평도(surface flatness)를 분석해야 한다. 거울의 편평도를 분석하기 위해 표면 변형에 의한 P-V(peak-to-valley)와 사용될 수 있는 레이저 파장과의 관계를 분석하였다. 수직 방향 인력에 의한

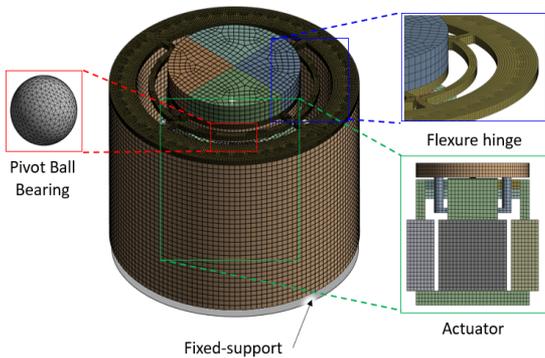


Fig. 7 FEM model of designed FSM

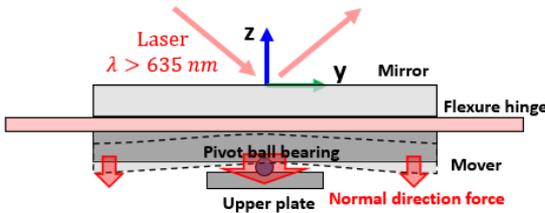
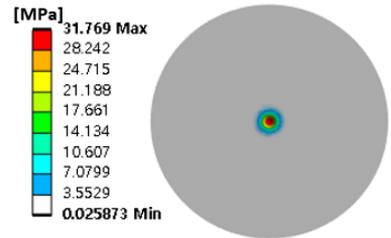
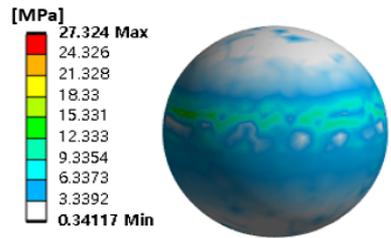


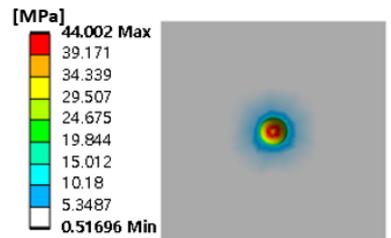
Fig. 8 Mover & mirror deformation



(a) Mover



(b) Pivot ball bearing



(c) Upper plate

Fig. 9 Max equivalent stress distribution

끝단에서 시작되는 거울 표면의 변형을 Fig. 10과 같이 분석하였다. 분석 결과 P-V는 41 nm로, 사용될 수 있는 레이저 파장인 635 nm를 기준으로 $\lambda/10$ 이하의 거울의 높은 편평도를 만족할 수 있음을 확인하였다.

FSM의 액추에이터 구동에 의한 틸/틸트 거동 형상 및 구조물 간의 간섭 여부를 확인하기 위해 구동 시 발생하는 주 거울과 보조 거울의 틸/틸트 각을 분석하였다. 정방향 상태에서 액추에이터 최대 전류인가 시 발생하는 구동 토크인 57 mNm를 단축으로 인가하여 Fig. 11과 같이 나타나는 주 거울과 보조 거울의 틸/틸트 각을 식 (3)과 같이 분석하였다.

$$\theta_{tip} = \arcsin\left(\frac{z_{max} - z_{min}}{D}\right) \quad (3)$$

분석 결과 틸/틸트 구동에 의한 주 거울과 보조 거울의 위상각을 분석하였다. 분석 결과 대칭형 구조로 틸/틸트 구동에 차이가 없었으며 주 거울과 보조 거울은 항상 동일한 위상각을 가진다. 이는 틸/틸트 구

동을 위해 축별로 동일한 제어를 부착할 수 있음을 의미한다. 또한 보조 거울의 위상각은 주 거울의 위상각과 동일하므로 보조 거울의 위상각을 피드백 제어에 이용할 수 있다. 목표 구동각 A mrad 구동 시 한지에서 발생하는 최대 응력은 109 MPa로 이때의 MOS 값은 앞선 식 (2)를 이용하여 계산한 결과 1.31이다. 또한 구동 간 구조물 간의 간섭이 발생하지 않아 구조적으로 안전함을 확인하였다.

틸러턴스 액추에이터의 틸/틸트 구동 시 발생하는 음의 강성 영향성을 반영하여 실제 시스템의 특성을 분석하고자 한다. 음의 강성을 가지는 스프링을 기계 시스템에서 구현하는 것이 불가능하므로, 이 연구에서는 Fig. 12와 같이 한지의 탄성 계수를 감소시켜 음의 강성을 해석적으로 반영하는 방법을 제안한다. 이를 통해 자석에 의한 영향을 유한요소 해석으로 구현할 수 있다. 앞선 방법을 이용하여 해석을 통해 계산된 회전 강성 k'_{hinge} 는 4.46 mNm/mrad으로 이론값 4.39 mNm/mrad과 1.59%의 오차 범위로 유사한 결과를 보였다. 틸/틸트의 회전 강성과 주 거울, 보조 거울의 위상각은 항상 동일하며 음의 강성 고려 여부에 따라 발생하는 틸/틸트 회전 강성을 Table 2에 제시하였다. 이에 따라 음의 강성이 작용하는 실제 시스템이 액추에이터 구동 시 목표 구동각보다 넓은 $1.28 \times A$ mrad까지 구동가능함을 확인하였다.

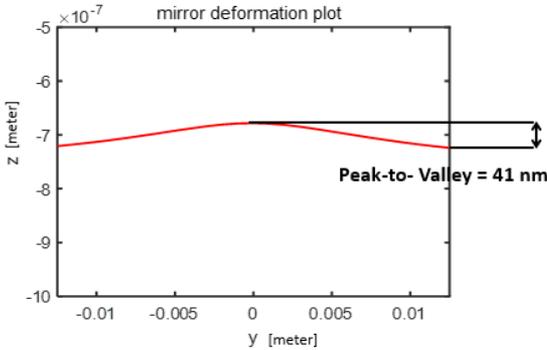


Fig. 10 Mirror deformation plot due to normal direction force

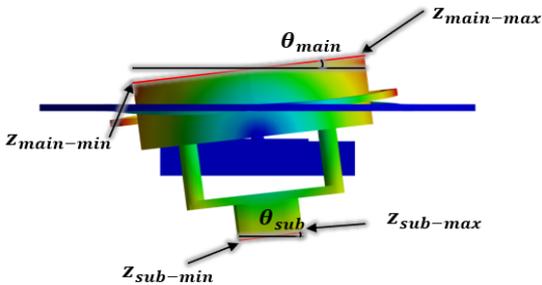


Fig. 11 Tip/tilt angle analysis

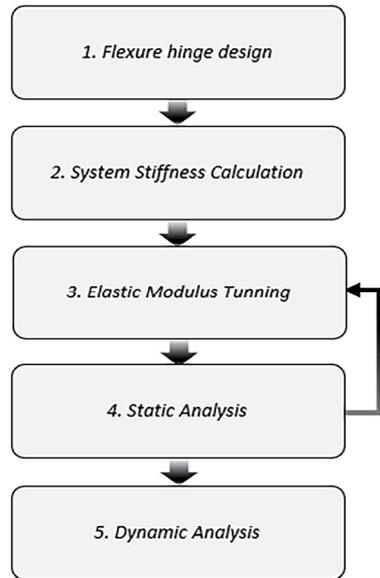


Fig. 12 Negative stiffness applying algorithm

Table 2 FSM rotational stiffness analysis results

Mirror	Direction	Rotational stiffness [mNm/mrad]
Theoretical stiffness	Tip	4.39
	Tilt	4.39
Calculated stiffness	Tip	4.46
	Tilt	4.46

Table 3 Modal analysis with negative stiffness

Mode	Frequency [Hz]	Description
1	440 → 291	Tip
2	440 → 291	Tilt
3	1346	Rotate
4	4880	Slide
5	4880	Slide
6	5376	Local

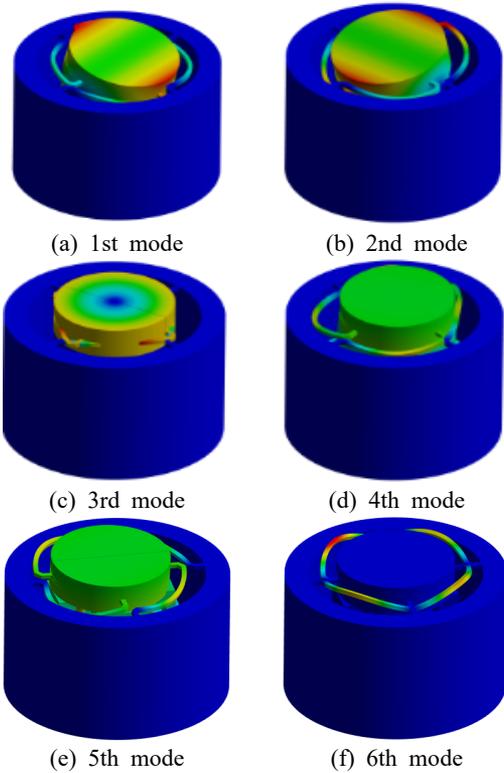


Fig. 13 Modal shape of designed FSM

3.3 동적 해석 결과

FSM은 일반적으로 고정밀, 고속으로 제어하기 위해 피드백 제어를 부착하여 사용한다. 이를 위해 FSM의 open-loop 상에서 플랜트에 대한 정보인 시스템의 동특성 분석이 필요하다.

먼저 설계한 릴럭턴스 FSM의 동특성인 고유진동수와 주요 거동 형상을 분석하기 위해 자석의 힘에 의해 발생하는 음의 강성을 고려하지 않은 상태에서 모드 해석(modal analysis)을 진행하였다. 해석 결과 주요 모드인 1차 ~ 6차 고유진동수와 모드 형상을

Fig. 13에 제시하였다. 6개의 모드 형상 모두 다른 구조물에 비해 상대적으로 낮은 강성을 가지는 힌지 부분의 거동에 의해 발생하였다. 주요 거동 방향인 틸/틸트 방향 모드가 440 Hz에서 1차, 2차 모드로 나타났다. 3차 모드는 거울이 pivot ball bearing을 기준으로 회전하는 모드가 나타났다. 4차, 5차 모드는 거울이 측면방향으로 움직이는 모드, 6차는 힌지 연결부에서 local한 모드가 나타났다. 힌지의 주요 설계 변수 w 와 t 가 주요 모드에 기여하는 변수임을 확인하였다.

다만, 자석의 힘에 의한 음의 강성을 고려하는 경우 실제 회전 강성은 감소한다. 따라서 실제 시스템의 틸/틸트 거동을 하는 1차, 2차 모드 고유진동수 또한 변화하므로⁽¹³⁾ 이를 반영하여 틸/틸트 모드 고유진동수를 예측하고자 한다. 앞선 정적 해석에서 이용한 탄성 계수의 감소 방법을 이용해 힌지의 회전 강성에 음의 강성을 고려하는 것이 가능하였다. 따라서 Fig. 11과 동일한 방법으로 틸/틸트 방향 고유진동수를 분석하였고 그 결과를 Table 3에 제시하였다. 이를 통해 틸/틸트 방향 거동인 1차, 2차 모드는 음의 강성이 반영되지 않은 경우 440 Hz이지만, 실제로 자석에 의한 음의 강성으로 인해 시스템의 고유진동수는 291 Hz로 감소한다. 제어를 설계할 때 이를 고려하여 설계해야 한다.

모달 해석 결과를 바탕으로 조화 함수 형태의 액추에이터 구동력에 의한 거울의 응답을 확인하고자 한다. 이를 위해 설계한 FSM을 주파수 응답 해석(harmonic response analysis)하였다. 모드 해석 결과를 바탕으로 mode-superposition method(MSUP)를 이용하여 고유진동수 근처의 주파수 대역을 집중(cluster) 해석하였다. FSM은 틸/틸트 방향으로 대칭 구조이므로 단축 틸방향 구동의 경우를 분석 결과로

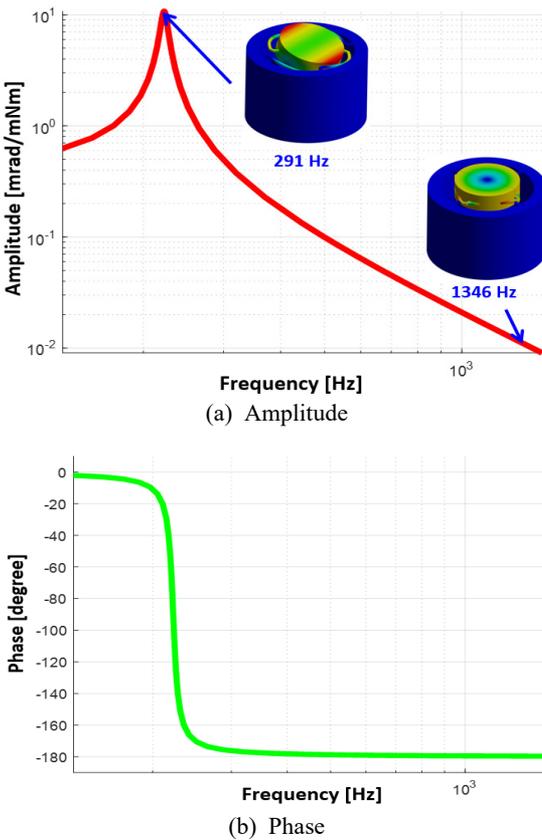


Fig. 14 Frequency response function of FSM

제시하였다. 액추에이터의 구동 토크에 의한 거울의 변위 응답을 Fig. 14와 같이 주파수 응답 함수로 확인하였다. 1차 모드인 291 Hz에서 공진으로 인한 극값을 확인하였고 1346 Hz에서 회전에 대한 모드는 부공진으로 주파수 응답 함수에서는 발생하지 않았다. 이는 액추에이터의 구동으로 인해 틸트/틸트 모드 이외의 부공진은 응답이 거의 발생하지 않음을 의미한다.

4. 결 론

이 연구는 큰 추력, 넓은 스트로크와 구동 대역폭을 가질 수 있는 릴럭턴스 액추에이터가 적용된 고속 조종 거울(FSM)의 구조설계를 다룬다. 릴럭턴스 액추에이터는 기존 VCA나 압전형 액추에이터와는 다른 구동 방식을 가지므로 이러한 액추에이터 특성을 반영하여 설계하고 검증해야 한다. 이를 위해 설계

단계에서부터 구동 특성을 반영하여 릴럭턴스 액추에이터가 적용된 초소형 FSM을 설계하였다. 설계한 FSM을 유한요소 해석을 통해 성능과 구조적 안전성을 분석 및 검증하였다. 그 과정에서 액추에이터 특성인 음의 강성을 고려하여 실제의 거울의 틸트/틸트 방향 회전 강성을 1.38% 오차 범위 이내로 이론값에 만족하였다. 이를 바탕으로 FSM의 동특성인 고유진동수와 주파수 응답 함수를 분석하였다. 향후 이러한 성능 및 동특성 분석 결과를 바탕으로 설계한 릴럭턴스 FSM에 제어기를 부착하여 고정밀, 고속 제어를 하는 것이 가능하다. 또한 앞선 설계와 분석 방식이 새로운 릴럭턴스 액추에이터가 적용된 FSM 설계에 기여할 수 있다.

후 기

이 연구는 LIG Nex1 산학협력과제 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Kluk, D. J., Boulet, M. T. and Trumper, D. L., 2012, A High-bandwidth, High-precision, Two-axis Steering Mirror with Moving Iron Actuator, *Mechatronics*, Vol. 22, No. 3, pp. 257~270.
- (2) Han, W., Shao, S., Zhang, S., Tian, Z. and Xu, M., 2022, Design and Modeling of Decoupled Miniature Fast Steering Mirror with Ultrahigh Precision, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 167, 108521.
- (3) Xiao, R., Xu, M., Shao, S. and Tian, Z., 2019, Design and Wide-bandwidth Control of Large Aperture Fast Steering Mirror with Integrated-sensing Unit, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 126, pp. 211~226.
- (4) Bae, H.-W., Jang, H., Park, D.-H. and Kim, H.-S., 2021, Development of Moving Mirror Assembly in the Spectroscopic Sensor for Remote Gas Monitoring, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 38, No. 8, pp. 581~587.
- (5) Yoo, J., Lim, S. B., Jung, J., Chung, S., Kim, J.-H. et al., 2021, A Study for Reliability Verification of Structural Design of Fast Steering Mirror with Voice Coil Actuators, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 31, No. 4,

pp. 442-449.

(6) Csencsics, E., Schlarp, J., Schopf, T. and Schitter, G., 2019, Compact High Performance Hybrid Reluctance Actuated Fast Steering Mirror System, *Mechatronics*, Vol. 62, 102251.

(7) Lim, S. B., Yoo, J., Jung, J., Chung, S., Kim, J. et al., 2022, Simulation Model of the Fast Steering Mirror Considering Piezoelectric Effect, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 32, No. 6, pp. 623-630.

(8) Pechgraber, D., Csencsics, E., Yoo, H. and Schitter, G., 2023, Controlling the Amplitude of a Resonant Rotational Reluctance Actuated Scanning Mirror System, *IFAC-papersonline*, Vol. 56, No. 2, pp. 6043-6049.

(9) Csencsics, E., Schlarp, J. and Schitter, G., 2018, High-performance Hybrid-reluctance-force-based Tip/tilt System: Design, Control, and Evaluation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 23, No. 5, pp. 2494-2502.

(10) Wei, H., Tian, Y., Zhao, Y., Ling, M. and Shirinzadeh, B., 2023, Two-axis Flexure Hinges with Variable Elliptical Transverse Cross-sections, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 181, 105183.

(11) Gimm, H., Nam, B.-U., Kang, D. and Gweon, D., 2016, Design and Analysis of a Tip-tilt Guide Mechanism for the Fast Steering of a Large-scale Mirror,

Optical Engineering, Vol. 55, No. 10, 106120.

(12) Abid, M., Yu, J., Xie, Y. and Salam, A., 2020, Conceptual Design, Modeling and Compliance Characterization of a Novel 2-DOF Rotational Pointing Mechanism for Fast Steering Mirror, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 33, No. 12, pp. 3564-3574.

(13) Zhang, F., Xu, M., Shao, S. and Xie, S., 2020, A New High-static-low-dynamic Stiffness Vibration Isolator based on Magnetic Negative Stiffness Mechanism Employing Variable Reluctance Stress, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 476, 115322.



One Mook Kim is graduate school student in Mechanical Engineering at Soongsil University and currently majoring Structural Vibration in Yonsei University. He is especially interested in vibration analysis of actuator.



No-cheol Park received B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Yonsei University in 1986, 1988, and 1997, respectively. Dr. Park is currently a professor at department of Mechanical Engineering in Yonsei University.