

<기술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.8.693

## 실험계획법을 이용한 인공위성 주반사경 플렉서 마운트의 최적 설계

김현중\* · 서유덕\* · 윤성기† · 이승훈\*\* · 이덕규\*\* · 이응식\*\*  
(2008년 3월 12일 접수, 2008년 6월 11일 수정, 2008년 7월 8일 심사완료)

### Optimal Design of the Flexure Mounts for Satellite Camera by Using Design of Experiments

Hyun-Jung Kim, Yu-Deok Seo, Sung-Kie Youn, Seung-Hoon Lee, Deog-Gyu Lee  
and Eung-Shik Lee

**Key Words :** Flexure mount (플렉서 마운트), Opto-mechanical analysis (광기계해석), Tables of orthogonal arrays (직교배열표), Response surface method (반응표면법), RMS wavefront error (RMS 파면 오차), MADM (다속성 의사결정)

#### Abstract

The primary mirror system in a satellite camera is an opto-mechanically coupled system for a reason that optical and mechanical behaviors are intricately interactive. In order to enhance the opto-mechanical performance of the primary mirror system, opto-mechanical behaviors should be thoroughly investigated by using various analysis procedures such as elastic, thermo-elastic, optical and eigenvalue analysis. In this paper, optimal design of the bipod flexure mounts for high opto-mechanical performance is performed. Opto-mechanical performances considered in this paper are RMS wavefront error under the gravity and thermal loading conditions and 1st natural frequency of the mirror system. The procedures of the flexure mounts design based on design of experiments and statistics is as follows. The experiments for opto-mechanical analysis are constructed based on the tables of orthogonal arrays and analysis of each experiment is carried out. In order to deal with the multiple opto-mechanical properties, MADM (Multiple-attribute decision making) is employed. From the analysis results, the critical design variables of the flexure mounts which have dominant influences on opto-mechanical performance are determined through analysis of variance and F-test. The regression model in terms of the critical design variables is constructed based on the response surface analysis. Then the critical design variables are optimized from the regression model by using SQP algorithm. Opto-mechanical performance of the optimal bipod flexure mounts is verified through analysis.

## 1. 서 론

### 1.1 연구 목표 및 필요성

인공위성 카메라 주반사경을 지지하는데 있어서 기계적, 열적 변형이 광학 부품에 미치는 영향

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : skyoun@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3034 FAX : (042)869-3210

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국항공우주연구원 광학탑재체 그룹

을 최소화하도록, 광학 요소를 이러한 영향으로부터 차단하는 기계장치를 플렉서(flexure)라 한다. 반사경과 같은 광학 부품이 지지구조의 기계적 혹은 열적 변형과 격리되어있지 않으면 지지구조의 변형이 광학부품에 영향을 주어 상이 심하게 왜곡하는 현상을 갖는다. 기계적, 열적 변형으로부터 광학 부품이 변형되는 것을 막기 위해 플렉서는 반경 방향 자유도에 대해서는 유연해야 하고, 나머지 두 자유도에 대해서는 단단해야 한다. 회전 자유도에 대해서는 광축 방향의 회전자유도를 제

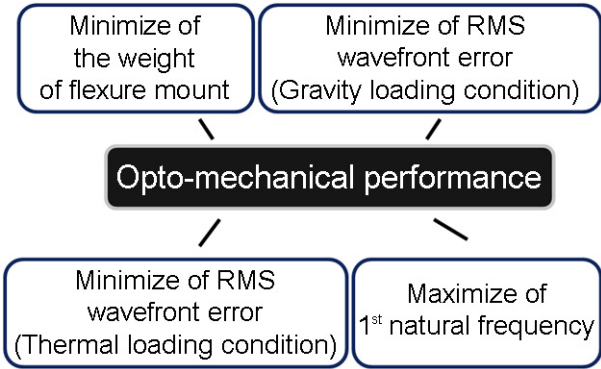


Fig. 1 Opto-mechanical performance

의한 나머지 회전 자유도에 대해 모두 유연성을 가져야 한다.<sup>(1)</sup> 기존의 플렉서 마운트는 이러한 기구학(kinematics)적인 개념을 사용하여 반사경의 설계와 상관없이 독립적으로 설계되어왔다.<sup>(2)</sup> 이와 같은 개념으로 설계된 플렉서 마운트는 성능을 검증하기 위해서 반사경과 결합하여 별도로 광학 성능 시험을 수행하는데, 플렉서의 설계 개념이 반사경의 광학 성능과 직접적인 관련이 없기 때문에 항상 우수한 광학 성능이 보장되지 않는다. 따라서 요구 사양을 만족하기 위해서는 플렉서의 설계가 지속적으로 반복 수정되어야 하는 번거로움이 존재한다.

본 연구에서는 이러한 기존 설계 방법의 단점을 보완하기 위해 반사경 시스템의 광기계적 성능(opto-mechanical performance, Fig. 1)과 직접적으로 연계하여 플렉서 마운트의 최적 설계를 수행한다. 주반사경의 광기계적 성능으로 자중 및 열하중 환경에서의 반사경 RMS 파면 오차, 반사경 시스템의 첫 번째 고유진동수를 고려한다.

## 2. 광기계 해석 개요

Fig. 2 는 광기계 해석의 흐름도를 나타낸다. 본 연구실에서 개발한  $\phi 800$  급 반사경(Fig. 3)과 플렉서 마운트를 결합하여 주반사경 시스템을 모델링한 후, 탄성 해석(elastic analysis), 열탄성 해석(thermo-elastic analysis), 고유치 해석(eigenvalue analysis)을 수행한다. 이 때 탄성 해석의 하중조건은 자중이 광축과 수직방향으로 작용하는 경우이며 열탄성 해석의 하중 조건은  $40^{\circ}\text{C}$  온도 변화로 설정하였다.

광학 해석은 다음과 같은 과정을 통해 수행된다.

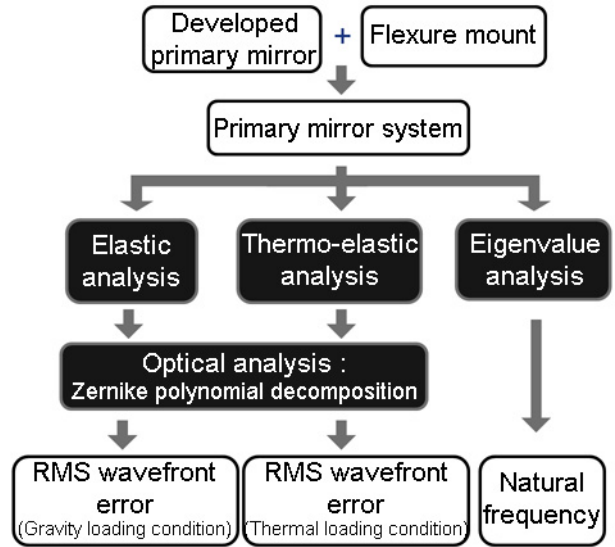
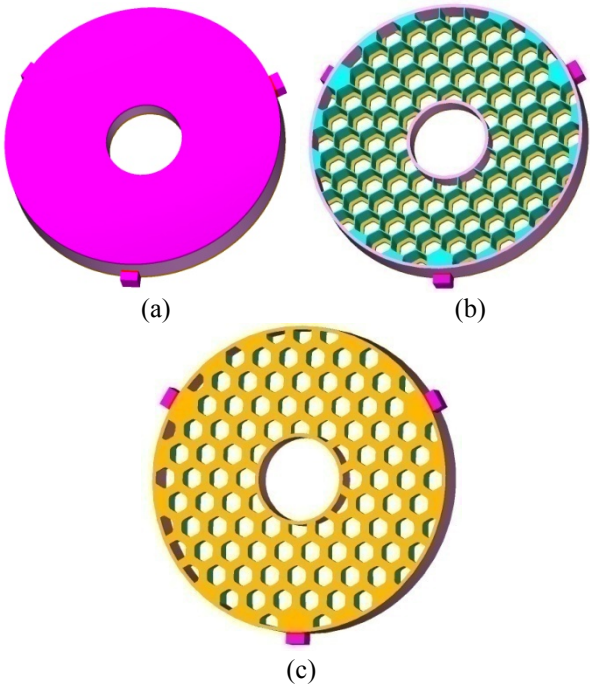


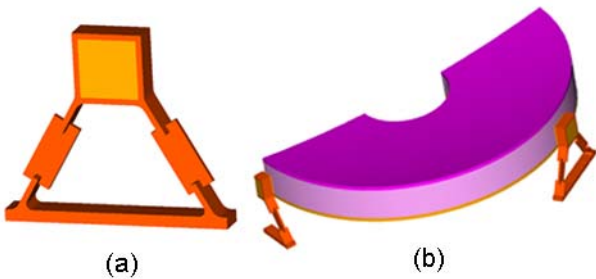
Fig. 2 Flow chart of opto-mechanical analysis

탄성 및 열탄성 해석 결과로부터 반사경 광학면의 변형장을 추출한다. 제르니케 다항식 분할(Zernike polynomial decomposition)을 통해 강체모드(rigid body mode)를 제거한 반사경 RMS 파면 오차를 계산한다. 여기서 제르니케 다항식의 1 번 피스톤(piston)항, 2 번과 3 번 틸트(tilt)항, 4 번 디포커스(defocus)항이 강체모드에 포함된다. 강체모드에 의한 변형은 광학 요소들의 정렬을 통해 쉽게 보상할 수 있으므로, 반사경 시스템의 광학 성능을 평가하는 척도로 강체모드를 제거한 반사경의 RMS 파면 오차를 사용하였다.

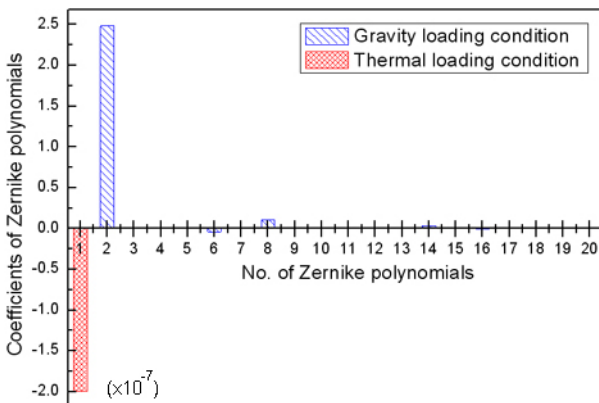
반사경 시스템이 어떠한 거동을 보이는지 알아보기 위해 Fig. 4(a)와 같은 바이포드 플렉서 마운트를 반사경과 결합한 후 (Fig. 4(b)), 광기계 해석을 수행하였다. Fig. 5 는 광학면의 변형으로부터 추출한 제르니케 다항식 계수를 나타낸다. 자중 환경에서는 자중이 광축과 수직방향으로 작용하기 때문에 반사경의 기울어짐 변형이 크게 나타나고, 열하중 환경에서는 마운트의 열팽창계수가 반사경의 열팽창계수보다 높기 때문에 반사경의 광축방향으로 병진방향 변형(translational deformation)이 지배적으로 나타난다. 따라서 자중 환경에서는 2 번 틸트항이, 열 하중 환경에서는 1 번 피스톤항 계수가 큰 값을 갖는다. Fig. 6(a) 와 Fig. 6(c)는 자중 및 열하중 환경에서 강체모드를 포함한 광학면 변형 형상이고, Fig. 6(b) 와 Fig. 6(d)는 강체모드를 제거한 변형 형상이다. 틸트 및 피스톤 항 보정으로 인해 광학면의 RMS 값이 상당히 향상됨을 알 수 있다.



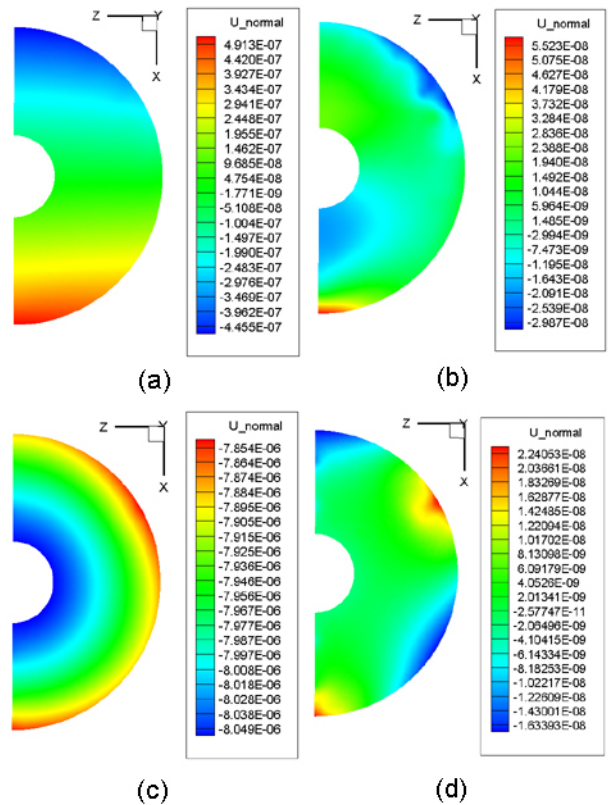
**Fig. 3** Developed lightweight primary mirror (a) Mirror : perspective view (b) Hexagonal cell pattern : honeycomb type (c) Partially-open back mirror : bottom view



**Fig. 4** Example (a) Bipod flexure mounts (b) Primary mirror attached with bipod flexure mounts



**Fig. 5** Coefficients of Zernike polynomials



**Fig. 6** Normal displacement of optical surface; (a) RMS wavefront error with rigid body mode under gravity loading:  $\lambda/1.22$ ; (b) RMS wavefront error without rigid body mode under gravity loading:  $\lambda/24.96$ ; (c) RMS wavefront error with rigid body mode under thermal loading:  $\lambda/1.59$ ; (d) RMS wavefront error without rigid body mode under thermal loading:  $\lambda/48.46$

반사경 시스템의 광학 성능 분석과는 별도로 기계적 성능을 평가하기 위하여 고유치 해석을 수행하여 시스템의 고유진동수와 고유모드를 계산한다. 탄성, 열탄성, 고유치해석은 ABAQUS<sup>(3)</sup>를 사용하였으며 광학해석은 In-house 코드를 사용하였다.

### 3. 플렉서 마운트 최적 설계

2 장에서 설명한 광기계 해석 절차를 실험계획법과 접목하여 플렉서 마운트 최적설계를 수행한다. Fig. 7 은 플렉서 마운트 설계 과정 흐름도를 나타낸다. 플렉서 마운트 최적 설계 과정은 두 단계로 구분하여 수행한다. 첫 번째 단계는 반사경의 광기계적 성능에 영향을 미치는 플렉서 마운트의 주요 형상 인자를 탐색하는 과정이다. 플렉서 마운트의 형상 인자를 대략적으로 선별하고, 직교배열표(Tables of orthogonal arrays)를 이용하여 실험

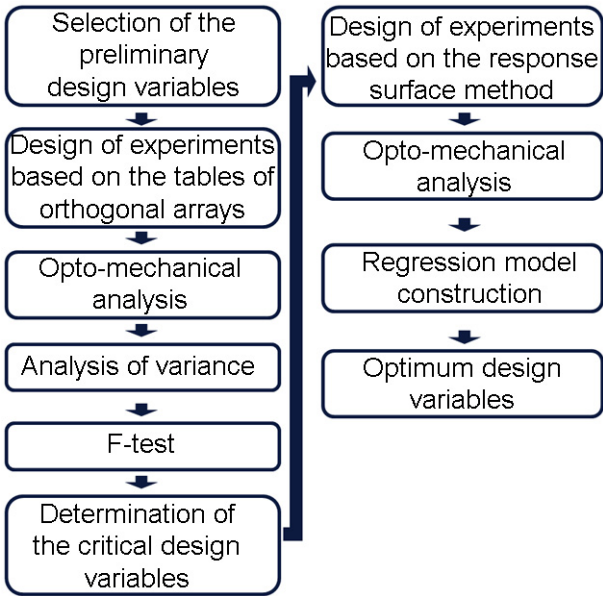


Fig. 7 Flow chart of the flexure mounts design

을 계획한다. 직교배열표에 따라 플렉서 마운트를 모델링한 후 광기계 해석을 수행한다. 해석 결과 데이터를 이용하여 분산분석표(analysis of variance)를 작성하고 F-검정(F-test)을 수행하여 광기계적 성능에 결정적인 영향을 미치는 주요 형상 인자를 선별한다. 두 번째 단계에서는 선별된 주요 형상 인자들의 최적 값을 구한다. 반응표면계획법(response surface method)을 이용하여 실험을 계획한 후 해석 결과 데이터를 이용하여 회귀모형(regression model)을 결정한다. 회귀계수를 추출하고 이로부터 최적 설계 알고리즘을 이용하여 최적 값을 산출한다.

3.1 반사경의 광기계적 성능에 영향을 미치는 주요인자 탐색

3.1.1 직교배열표에 의한 실험 계획 구성

직교배열표는 직교화의 원리를 이용하여 변수들의 교호작용을 최소화하여 실험횟수를 획기적으로 줄일 수 있는 실험계획법이다<sup>(4)</sup>. 직교배열표에 의한 실험계획법을 이용하여 반사경의 광기계적 특성에 결정적인 영향을 미치는 플렉서 마운트의 인자들을 선별한다. 플렉서 마운트의 형상인자를 Fig. 8 과 같이 보스 결합부 두께(A), 플렉서 요소의 길이(B), 플렉서 요소의 두께(C), 마운트 다리의 각도(D), 두 플렉서 요소의 겹치는 부분 길이(E), 플렉서 마운트의 받침대의 폭(F)의 6 인자를 설정하였다. 이 때 반응치는 반사경의 광기계적 특성이다. 6 개 인자의 교호작용이 없다고 가정한다면  $L_8(2^7)$  형 직교배열표를 이용하여, 8 번의

Table 1 Table of orthogonal arrays. i.e. geometrical information of flexure mounts

No.	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (°)	E (mm)	F (mm)
1	3	50	2.5	40	3	30
2	3	50	2.5	60	10	25
3	3	80	10	40	3	25
4	3	80	10	60	10	30
5	10	50	10	40	10	30
6	10	50	10	60	3	25
7	10	80	2.5	40	10	25
8	10	80	2.5	60	3	30

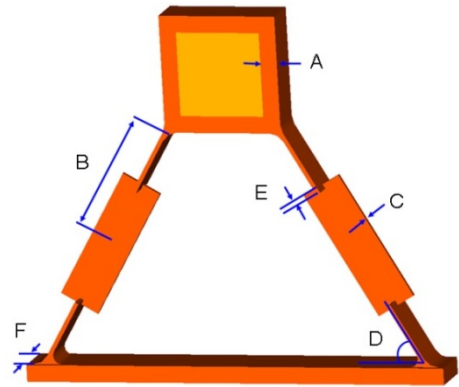


Fig. 8 The preliminary design variables of the flexure mounts

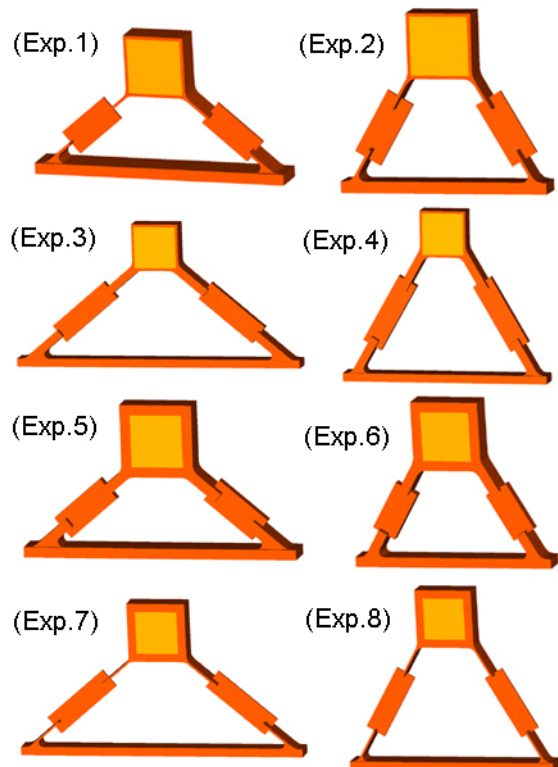


Fig. 9 The shape of flexure mounts of each experiment

**Table 2** The results of opto-mechanical analysis : RMS wavefront error and 1<sup>st</sup> natural frequency

No.	Weight of mounts (kg)	RMS wavefront error		1st natural frequency (Hz)
		Gravity loading condition	Thermal loading condition	
1	0.82	$\lambda/40.26$	$\lambda/139.63$	264.39
2	0.62	$\lambda/30.06$	$\lambda/101.92$	198.53
3	1.53	$\lambda/35.54$	$\lambda/62.58$	357.14
4	1.46	$\lambda/33.37$	$\lambda/44.98$	300.72
5	1.63	$\lambda/32.30$	$\lambda/36.38$	375.56
6	1.35	$\lambda/23.74$	$\lambda/24.52$	354.50
7	1.37	$\lambda/37.47$	$\lambda/102.15$	233.89
8	1.27	$\lambda/46.02$	$\lambda/85.02$	146.55

※  $\lambda = 632.8nm$

실험으로 6 인자의 주효과 작용을 검출할 수 있다. Table 1 은 각 변수의 수준 수를 2 수준으로 하였을 때 플렉서 마운트의  $L_8(2^7)$  형 직교배열표이고, Fig. 9 는 8 번의 각각의 실험에 따른 플렉서 마운트 형상이다.

3.1.2 광기계 해석

Table 2 는 각각의 실험에 대한 광기계 해석 결과이다. 2 번 마운트가 무게가 가장 작았으며, 1 번 마운트가 열 하중에 대한 광학 성능이  $\lambda/139.63$  로 가장 좋게 나왔고, 8 번 마운트가 자중에 대한 광학성능이  $\lambda/46.02$  로 가장 좋게 나왔다.

열 하중 환경에서의 RMS 파면오차는 마운트가 유연해질수록 유리한 반면, 고유진동수는 강성이 클수록 유리하다. 해석 결과에서 알 수 있듯이 열 하중환경에서의 RMS 오차와 고유진동수가 서로 상충(Trade off) 관계임을 알 수 있다.

3.1.3 분산분석 및 F-검정

플렉서 마운트의 형상 인자가 광기계적 특성에 미치는 영향 정도를 정량적으로 비교하기 위해서 F-검정을 수행한다. Table 2 의 실험데이터를 분산 분석한 후 F-검정을 수행한다. Table 3 에 각 인자들의  $F_o$  값을 나타내었다. 인자의  $F_o$  값이 클수록 그 인자가 영향력있는 인자임을 의미한다. 자중 환경에서는 **B, C** 가, 열하중 환경에서는 **A, C, D** 가 중요한 인자임을 알 수 있고, 고유진동수에 대해서는 **B, C, D** 가 결정적 인자로 작용함을 알 수 있다.

이와 같이 설계자가 어떠한 광기계적 성능을 관심대상으로 하느냐에 따라 그 성능에 대한 주요인자가 다르게 된다. 만약 3 개의 설계변수를 선택하

**Table 3**  $F_o$  value of RMS wavefront error and 1<sup>st</sup> natural frequency

Design variables	$F_o$ value		
	RMS wavefront error		1 <sup>st</sup> natural frequency (Hz)
	Gravity loading condition	Thermal loading condition	
<b>A</b>	0.001	<b>15.84</b>	0.018
<b>B</b>	<b>8.21</b>	0.09	<b>4.17</b>
<b>C</b>	<b>10.10</b>	<b>105.09</b>	<b>51.72</b>
<b>D</b>	1.85	<b>11.03</b>	<b>9.28</b>
<b>E</b>	1.85	1.07	0.03
<b>F</b>	7.65	0.34	0.56
<i>e</i>	1.00	1.00	1.00

라고 한다면 공통적으로 3 개의 인자가 세 반응치의 주요변수로 포함되어있지 않았기 때문에 주요 설계 변수를 결정하는데 있어서 어려움이 존재한다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서 MADM (Multiple-attribute decision making) 방법을 도입하여 4 개의 반응치(마운트 무게, 자중과 열 하중에 대한 RMS 파면 오차, 고유진동수)를 중요도에 따라 하나의 반응치로 표현하여 주요 설계 변수를 결정하였다.

3.1.4 MADM

MADM 은 전문가 시스템에서 많이 사용되는 방법으로 다수 속성에 대한 평가치를 하나의 상위평가기준으로 통합함으로써 단일 속성 의사 결정문제로 변환하는 방법이다. 본 연구에서는 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)를 이용하여 하나의 상위평가기준으로 통합한다. TOPSIS 는 다속성 평가척도중 하나로써, 이상해(ideal solution)로부터 가장 가깝고, 반이상해(negative-ideal solution)로부터는 가장 멀어야 한다는 논리로부터 정의된 것이다. 상대적 근접도(relative closeness)는 0 부터 1 사이의 값을 갖으며 1 에 가까울수록 이상적인 경우에 가깝고 0 에 가까울수록 반이상적인 경우에 가깝다. 상대적 근접도를 계산하는 방법은 참고문헌<sup>(5)</sup>에 자세히 기술되어있다.

상대적 중요도는 각각의 반응치에 따른 중요도를 비로 나타낸 것으로, 설계자가 광기계적 성능의 우선도를 설정하여 자유롭게 가중치를 설정할 수 있다. 본 연구에서는 마운트 무게, 자중 환경에서 RMS 파면오차, 열하중 환경에서 RMS 파면오차, 고유진동수의 상대적 중요도(relative importance) 비

**Table 4** Relative closeness of Table 2 with respect to relative importance

No.	Relative closeness			
	Ratio of relative importance (Weight of mounts : RMS wavefront error (gravity loading) : RMS wavefront error (thermal loading) : 1 <sup>st</sup> natural frequency)			
	1:1:1:1	1:3:3:3	1:2:2:2	1:2:2:1
1	0.86	0.86	0.86	0.90
2	0.71	0.69	0.70	0.76
3	0.65	0.75	0.73	0.70
4	0.56	0.61	0.60	0.56
5	0.49	0.54	0.53	0.45
6	0.35	0.36	0.36	0.22
7	0.70	0.78	0.76	0.80
8	0.58	0.60	0.59	0.72

**Table 5**  $F_o$  value of relative closeness

Design variables	$F_o$ value			
	Ratio of relative importance (Weight of mounts : RMS wavefront error (gravity loading) : RMS wavefront error (thermal loading) : 1 <sup>st</sup> natural frequency)			
	1:1:1:1	1:3:3:3	1:2:2:2	1:2:2:1
<b>A</b>	<b>519.53</b>	<b>673.92</b>	<b>538.90</b>	<b>24.73</b>
<b>B</b>	6.69	128.14	74.70	8.84
<b>C</b>	<b>743.97</b>	<b>716.10</b>	<b>614.33</b>	<b>72.02</b>
<b>D</b>	<b>298.45</b>	<b>733.33</b>	<b>522.45</b>	<b>16.00</b>
<b>E</b>	1.00	5.57	3.45	0.04
<b>F</b>	0.43	0.19	0.01	0.19
<i>e</i>	1.00	1.00	1.00	1.00

를 1:1:1:1, 1:3:3:3, 1:2:2:2, 1:2:2:1 의 4 가지로 설정하였다. Table 4 는 각각의 상대적 중요도 비에 따른 상대적 근접도를 나타낸 표이다. 마운트 무게는 어느 상한선 이상만 넘지 않으면 설계요구조건을 만족한다고 보기 때문에 마운트 무게에 대해 상대적 중요도를 높게 설정하지 않았다. Table 4 의 결과를 분산분석후 F-검정을 수행하면 Table 5 와 같다. MADM 을 이용하여 하나의 반응치로 합산한 결과, 모든 경우에 대해서 **A**, **C**, **D** 가 다른 형상 인자보다 상대적으로 우세한 인자임을 알 수 있다. 따라서 반사경의 광기계적 성능에 결정적으로 영향을 미치는 주요 형상인자로 보스 결합부 두께(**A**), 플렉서 요소의 두께(**C**), 마운트 다리의 각도(**D**)를 도출하였다.

**Table 6** Design of experiments (central composite design)

	No.	Variables		
		<b>A</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
2 <sup>3</sup> factorial experiments	1	3	2	40
	2	3	2	60
	3	3	6	40
	4	3	6	60
	5	10	2	40
	6	10	2	60
	7	10	6	40
	8	10	6	60
Center points	9	6.50	4	50
	10	1.55	4	50
Axial points	11	11.45	4	50
	12	6.50	1.17	50
	13	6.50	6.83	50
	14	6.50	4	35.86
	15	6.50	4	60

**Table 7** Relative closeness with respect to relative importance

No.	Relative closeness			
	Ratio of relative importance (Weight of mounts : RMS wavefront error (gravity loading) : RMS wavefront error (thermal loading) : 1 <sup>st</sup> natural frequency)			
	1:1:1:1	1:3:3:3	1:2:2:2	1:2:2:1
1	0.78	0.78	0.78	0.83
2	0.67	0.65	0.65	0.79
3	0.54	0.55	0.55	0.47
4	0.42	0.38	0.39	0.31
5	0.60	0.64	0.63	0.64
6	0.44	0.44	0.44	0.51
7	0.52	0.59	0.57	0.51
8	0.28	0.29	0.29	0.17
9	0.63	0.65	0.65	0.63
10	0.71	0.69	0.70	0.68
11	0.49	0.54	0.53	0.49
12	0.60	0.59	0.59	0.72
13	0.45	0.47	0.47	0.37
14	0.70	0.76	0.75	0.74
15	0.53	0.51	0.51	0.52

### 3.2 반응표면계획법에 의한 최적 인자 결정

반응표면분석(response surface analysis)은 여러 개의 설명변수  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$  가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수  $\eta$  에 영향을 주고 있을 때 이

러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 의미한다<sup>(4)</sup>.

3.2.1 중심합성계획법에 의한 실험계획 구성

중심합성계획(central composite design)은 2 차 회귀모형(2<sup>nd</sup> order regression model)이 적절하다고 판단될 때 사용하는 반응표면 실험계획법으로, 기존의 2<sup>k</sup> 요인 실험에 중심과 축에 새로운 자료점을 증가시켜 실험을 수행하는 계획법이다.

본 연구에서는 상대적 근접도를 3 개의 주요형상인자로 표현되는 2 차 회귀모형으로 가정하고, 중심합성계획법을 이용하여 실험을 계획한다. 변수의 수가 3 개일 때 중심합성 계획의 실험점은 Table 6 과 같으며 2 차 회귀모형을 결정하기 위해서는 최소 15 번의 실험이 필요하다.

3.2.2 광기계 해석 및 회귀계수 계산

3.1 절과 마찬가지로 각각의 마운트에 대해 해석을 수행하고 MADM 을 이용하여 상대적 근접도를 계산하면 Table 7 과 같다.

변수가 3 개일 때 2 차 회귀모형은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\eta = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2y + \beta_3z + \beta_{11}x^2 + \beta_{22}y^2 + \beta_{33}z^2 + \beta_{12}xy + \beta_{23}yz + \beta_{31}zx \quad (1)$$

여기서  $\eta$  는 상대적 근접도를 의미한다. 회귀계수는 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\beta = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \boldsymbol{\eta} \quad (2)$$

여기서

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & x_1y_1 & y_1z_1 & z_1x_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 & x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & x_2y_2 & y_2z_2 & z_2x_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \dots & \dots & & & & & & & y_nz_n & z_nx_n \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\eta}^T = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \dots \quad \eta_n]^T$$

$$\beta^T = [\beta_0 \quad \beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3 \quad \beta_{11} \quad \beta_{22} \quad \beta_{33} \quad \beta_{12} \quad \beta_{23} \quad \beta_{31}]$$

대표적으로 상대적 중요도가 1:3:3:3 인 경우 회귀계수를 계산하면, 회귀 모형은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = 0.655 - 0.052x - 0.072y - 0.104z - 0.022x^2 - 0.065y^2 - 0.027z^2 + 0.036xy - 0.016yz - 0.026zx$$

결정계수 ( $R^2$ ) 는 계산된 회귀모형의 정도 (precision)가 어느 정도인지를 가늠하는 척도이다. 총변동과 회귀변동, 잔차변동을 계산하는 식은 각각 식 (3)~식 (5)와 같다.

$$SST = \sum_i \eta_i^2 - n(\bar{\eta})^2 \quad (3)$$

$$SSR = \beta^T \mathbf{X}^T \boldsymbol{\eta} - n(\bar{\eta})^2 \quad (4)$$

$$SSE = SST - SSR \quad (5)$$

상대적 중요도 비가 1:3:3:3 인 경우 결정계수는 0.977 의 값을 보였으며, 이는 회귀방정식에 의하여 97.7%의 변동이 설명되고 있음을 알 수 있다. 이는 매우 높은 결정계수 값에 속한다.

3.2.3 최적 인자 결정

2 차 회귀방정식이 구성되었으면 다음으로 최적 값을 계산한다. 사용자가 어떠한 반응치에 가중치를 두어 설계를 하느냐에 따라 상대적 중요도를 다양하게 결정할 수 있다. 본 연구에서는 대표적으로 상대적 중요도 비가 1:3:3:3 인 문제를 선택하였다. 목적함수는 아래와 같다.

목적함수  $\min(-\eta)$

중심합성계획법의 상한 및 하한범위를 벗어나지 않도록 상한 하한 조건을 결정한다. 최적 설계 알고리즘은 순차적 이차 계획법(SQP, sequential quadratic programming, SQP)을 사용하였다. 목적함수 및 최적 값은 아래와 같다.

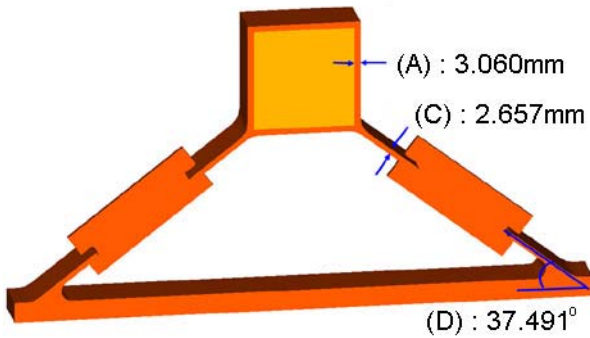
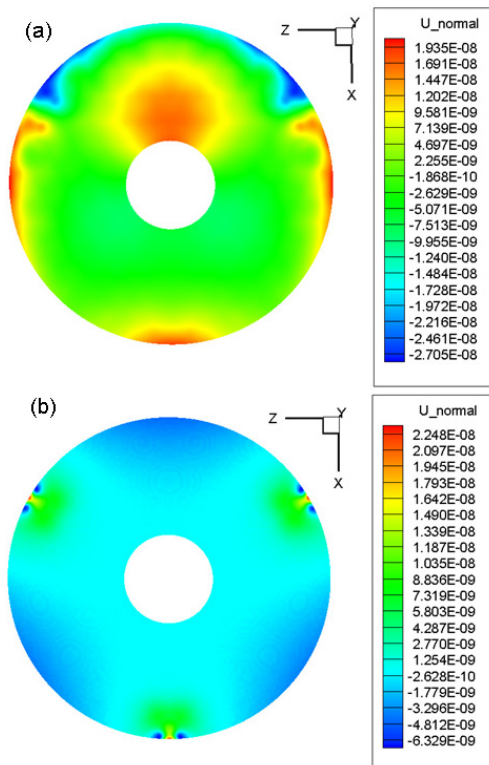
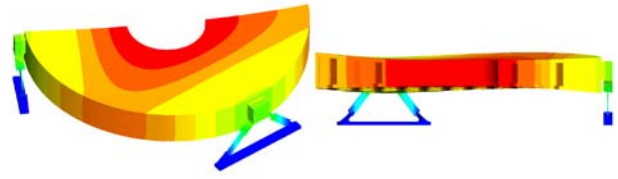
목적함수 값 : 0.77

최적 값 :  $x = -0.983, y = -0.671, z = -1.250$

이를 실제 물리적인 변수의 값으로 환산하여 얻어진 플렉서 마운트 최적 형상은 Fig. 10 과 같다. 이때 반사경 시스템의 자중 및 열하중에 따른 탄성 및 열탄성 해석, 고유치 해석 결과는 Table 8 과 같다. 최적 플렉서 마운트를 부착한 반사경 시스템은 자중 및 열하중 환경에서의 RMS 오차 값은  $\lambda/30$  이상으로 만족할만한 결과를 나타내었다. 자중 및 열하중 환경에서 강제모드를 제거한 광학면 변형 형상을 Fig. 11 에, 고유모드를 Fig. 12 에 나타내었다.

**Table 8** Opto-mechanical performances of the primary mirror system with optimum flexure mounts

Weight of mounts (kg)	RMS wavefront error		1 <sup>st</sup> natural frequency (Hz)
	Gravity loading condition	Thermal loading condition	
0.887	$\lambda/39.82$	$\lambda/140.93$	255.79

**Fig. 10** Optimum bipod flexure mounts**Fig. 11** Normal displacement of optical surface of the primary mirror system with optimum flexure mounts ; (a) RMS wavefront error without rigid body mode  $\lambda/39.82$  (gravity loading condition) ; (b) RMS wavefront error without rigid body mode:  $\lambda/140.93$  (thermal loading condition)**Fig. 12** 1st eigenmode of the primary mirror system with optimum flexure mounts (255.79 Hz)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 인공위성 반사경의 장착에 사용되는 플렉서 마운트의 설계에 관한 연구를 수행하였다. 플렉서 마운트 설계를 반사경의 광기계적 성능과 직접적으로 연계하기 위해 실험계획법을 도입하여 최적 설계를 수행하였다.

제안한 설계방법을 이용하면 기존 방법으로 해석이 어려운 복잡한 형태의 광기계 시스템의 거동을 효과적으로 분석할 수 있고, 동시에 고려하기 어려운 다양한 반응치를 하나의 상위 반응치로 통합하여 주요 설계변수를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 바이포드 플렉서 마운트에 대해 적용하였지만, 제안한 접근법을 활용하면 다양한 타입의 마운트 설계에도 적용이 가능하다.

#### 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원(KARI)의 ‘다목적 실용위성 3 호 시스템종합개발사업’에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

- (1) Vukobratovich, D., Richard, R.M., 1988, “Flexure Mounts for High-Resolution Optical Elements,” Proceeding of SPIE, 0959.
- (2) Smith, W.J., 1990, “Modern Optical Engineering 2<sup>nd</sup> ed,” McGraw-Hill, New York.
- (3) Hibbitt, K. and Sorensen, Inc., 1998, “ABAQUS Theory Manual,” Version 5.8.
- (4) Park, S. H., 2003, “Design of Experiments,” Minyoungsa.
- (5) Park, J.C., Kim, K.B. and Kim, K.M., 2001, “Robust Design for Multiple Quality Attributes in Injection Molded Parts by the TOPSIS and Complex Method,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.18, No.12, pp.116~123.