



위성 통신용 고속 조준 거울의 설계와 제어

김현태^a, 김세은^a, 전용호^a, 박성언^b, 이문구^{a,*}

Design and Control of Fast Steering Mirror for Satellite Communication Process

Hyuntae Kim^a, Se Eun Kim^a, Yongho Jeon^a, Sung Un Park^b, Moon Gu Lee^{a,*}^a Department of Mechanical Engineering, Ajou University^b Institute Laser Technologies R&D Team, Hanwha Aerospace

ARTICLE INFO

Article history:

Received	1	August	2024
Revised	25	September	2024
Accepted	10	October	2024

Keywords:

Fast steering mirror
Voice coil motor
Compliant mechanism
Cartwheel flexure
Sensor kinematics

ABSTRACT

In this study, we designed a fast steering mirror for precise beam alignment between a transmitter and receiver in optical communication systems. The mirror was designed with a cartwheel flexure hinge and voice coil actuator. design variables were optimized using an optimization method and validated using a finite element method analysis. The control results showed a driving range of 1.5 °, a high resolution of 0.005 °, and steady state error is less than 1%. This design approach, which combined optimization algorithms and high-speed precision control, significantly improved the performance of laser-beam alignment systems. The increased alignment precision, and lower error rates were expected to be extremely beneficial for various applications requiring reliable and accurate optical communication.

1. 서론

인터넷 사업 발달에 따라 정보의 교류가 많아지고, 늘어난 통신량을 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 기존 무선주파수 통신(radio frequency communication, RF communication)은 오랫동안 사용되었고, 구현하기 쉽다는 장점이 있지만 전파의 손실이 크고 주파수 사용에 제한이 있다는 단점이 있다^[1]. 자유공간 광통신(free space optical communication, FSO communication)은 RF 통신과 다르게 높은 대역폭을 가지고 있어 전력 당 정보 전달량이 크고, 손실이 적으며, 높은 지향성을 가지고 있어 대용량의 정보를 빠르게 교류하기에 용이하다^[2]. 그에 따라 정확한 빔 정렬(beam alignment)는 필수적이며, 고속 조향거울(fast steering mirror, FSM)을 통한 정확한 빔 위치 결정 시스템(beam positioning system)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[3]. 본 논문에서는

빔 정렬을 위한 FSM의 설계와 제어 성능평가에 대해 기술하였다.

FSM은 반사 거울(mirror), 구동기(actuator), 유연 힌지(flexural hinge)로 이루어진 시스템으로, 모터의 회전을 제어함으로써 반사 거울의 Tip/Tilt 조향각을 변화시켜 레이저 방향을 정밀하게 조정할 수 있다^[4]. FSO에 사용되는 FSM은 움직이는 수신부에 대해 정밀한 빔 정렬 및 높은 반복능을 요구한다. 따라서 구동부 또한 같은 특징을 보유한 구동기를 사용할 필요가 있다. FSM의 구동기로 사용되는 모터는 코일 가동형 보이스 코일 구동기(voice coil motor, VCM)^[5], 자석 가동형 보이스 코일 모터(moving magnet voice coil motor, MMVCM)^[6], 압전 세라믹 모터(piezoelectric transducer, PZT)^[7] 등이 있다. PZT는 압전 세라믹으로 작동하여 고출력, 고대역폭을 지니고 있지만 구동 범위가 수 μm 정도로 제한되는 단점이 있다. VCM과 MMVCM은 로렌츠 힘을 이용하여 구동되는 모터로, PZT에 비해 추력은 낮지만 구동범위가 크다는

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2338

E-mail address: moongulee@ajou.ac.kr (Moon Gu Lee).

장점이 있다. 그중 MMVCM은 소형 FSM에 많이 사용되는 구동기로, 코일을 고정자로 사용함으로써 요크를 통해 코일의 열을 확산시켜 시스템 안정성을 증가시킬 수 있다. FSM의 회전 가이드로 사용되는 유연 힌지는 시스템의 정밀도와 구동 대역폭에 영향을 준다. 유연 힌지(flexure hinge)는 재료의 탄성 변형을 활용하여 부품 사이의 상대 회전을 허용하는 가이드이며, 마찰(friction), 히스테리시스(hysteresis), 백래시(backlash)가 없어 선형적인 회전 변위를 제공한다. 이러한 유연 힌지는 Leaf, notch, Cross-axis, 수레바퀴(cartwheel) 형태의 힌지들이 있으며, 목표성능에 따라 적절한 가이드와 구동기를 선정하여 시스템을 구성할 수 있다^[8]. 그러므로 작은 크기에도 불구하고, 큰 구동 범위를 가지고 고속으로 움직일 수 있는 FSM의 설계가 필요하다. 작은 크기에서도 넓은 제어 대역으로 고속성을 확보하려면 각 운동 방향의 강성이 큰 가이드가 필요하며^[8], 큰 구동범위와 열적 안정성, 코일 선 강성에 의한 비선형성 배제를 위해 MMVCM을 채택하는 것이 바람직하다^[9].

따라서 본 논문에서는 MMVCM와 가이드 힌지를 이용한 범 정렬용 고속/고정밀 조향 거울의 설계를 진행한다. 특히, 수레바퀴 유연체(cartwheel flexure, CF) 형태의 가이드 힌지를 사용함으로써 시스템의 회전중심을 명확히 설계하고 이전 소형 FSM의 비강성 부족의 단점을 개선하도록 설계한다. 최적화 알고리즘을 통해 유연 힌지의 설계 파라미터를 선정하고, 이를 유한요소법(finite element method, FEM)으로 검증한다. 성능 시험을 위해 줄방전 가공(wire-electrical discharge machining, W-EDM)을 통해 유연 힌지를 제작하였다. 폐루프 피드백 제어(closed loop feedback control)를 통해 시스템의 계단 입력에서의 제어 성능을 시험하고, 결과를 통해 시스템의 구동 범위와 해상도를 평가한다.

2. FSM 시스템 설계

Fig. 1은 본 논문에서 연구한 FSM 시스템의 분해도이다. 알루미늄 재료로 이루어진 더미거울이 있으며, 더미 거울을 가이드 힌지와 구동기에 고정하기 위한 Mirror mount를 설치하였다. Mirror

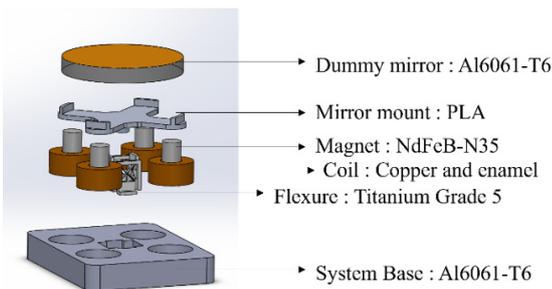


Fig. 1 Exploded view of FSM system

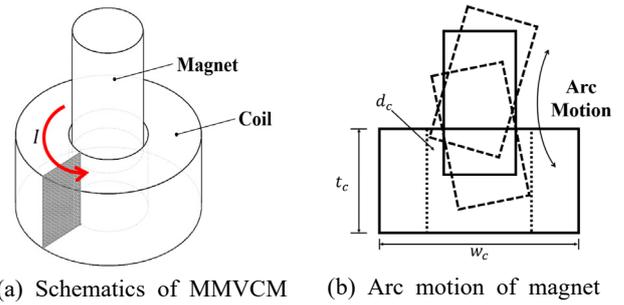


Fig. 2 Schematic of MMVCM

Table 1 Design parameter of coil and magnet

Symbol	Description	Value
d_c	Coil clearance	0.5 mm
t_c	Coil assembly thickness	9 mm
w_c	Coil assembly diameter	21 mm

mount의 경우 가볍고 단열 성능이 좋도록 PLA를 사용하였다. 구동기는 코일이 고정자, 자석이 이동자인 MMVCM형태이며, 코일이 Base에 고정되어 열소산에 용이하다. 구동 시 되도록 선형적인 움직임과 토크성능 극대화를 위해 거울의 양 끝에 위치하도록 설계하였다. 가이드 힌지는 CF형태로 만들어 부피당 비강성을 높이고 회전 중심이 정확하게 위치하도록 설계하였다. 센서는 레이저 센서를 이용한 3점 측정으로 각도를 계산하며, Fig. 12에 도시되어있다.

2.1 구동기 설계

Fig. 2(a)는 시스템의 구동기에 해당하는 MMVCM의 개략도이다. 구동기는 코일과 자석 간의 로렌츠 힘(lorentz force)에 의해 구동되며, 소형 FSM 시스템 특성상 간단한 형태의 MMVCM을 구조로 선정하였다. 본 연구에서 사용되는 FSM은 2 in 직경의 거울을 사용한 소형 FSM 시스템이기 때문에, 코일과 자석의 질량 차이가 크지 않다. 때문에 구동 시 코일의 선강성을 없애고 열관리에서 이점을 가져가기 위해 MMVCM을 구동기로 사용해야 한다.

MMVCM은 Fig. 1과 같이 이동자인 자석이 가이드 힌지와 연결된 mirror mount에 고정되어 있으므로, Tilt 운동 시 자석이 거울의 각도에 따라 회전중심의 반경에 맞추어 Fig. 2(b)와 같이 회전하며 움직인다. 자석의 외경과 코일 내경 사이에는 일정한 공극(air gap)이 있어 상대운동을 허용한다. 이러한 회전운동은 구동범위 내 부품의 간섭에 따라 제한된다. 따라서 부품 간섭이 일어나지 않는 공극을 갖도록 설계하며, 회전각에 따른 추력의 변화도 고려해야 한다.

ANSYS Maxwell의 정자기장 해석을 통해 회전각에 따른 구동기의 추력변화를 확인하였다. 회전각은 0°부터 3°이며, 결과는 아래 Fig. 3과 같다.

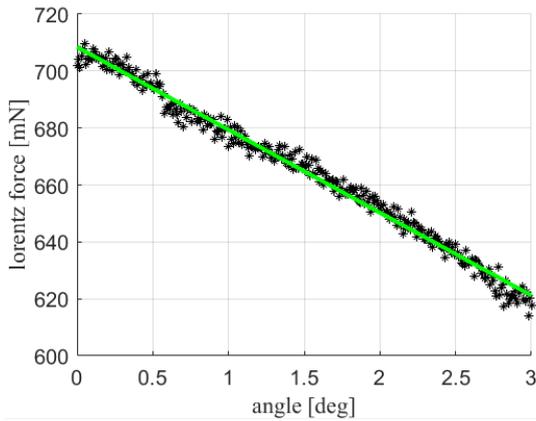


Fig. 3 Force plot according to angular motion

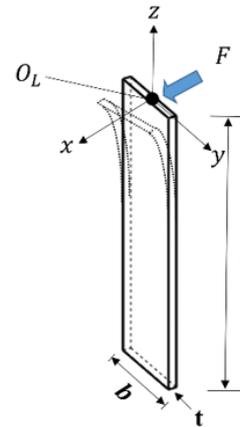


Fig. 5 Deflection of leaf spring

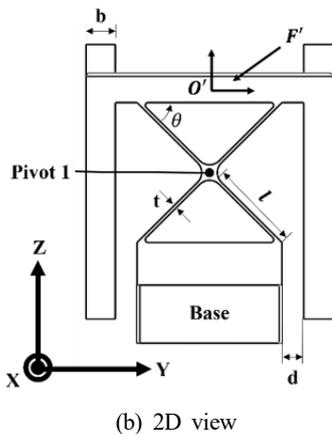
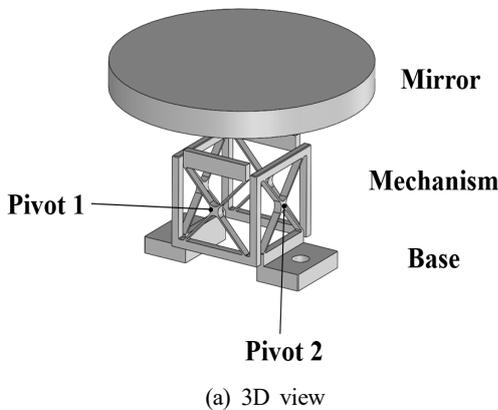


Fig. 4 Structure of H-CFH

분석 결과 공극에서의 자속 밀도는 약 0.5 T, 구동력은 각도가 0° 부터 3° 까지 기울어짐에 따라 708.4 mN 에서 621.2 mN 으로 약 12.3% 변화하였으며 선형적인 추세를 보이고 있다. 구동력 변화가 선형적이고 10%가량의 변화이므로 이는 제어를 통해 보상할 수 있다.

2.2 유연 힌지 설계

FSM 시스템에서 유연 힌지는 회전 가이드의 역할을 수행하며,

Table 2 Variable description of H-CFH

Symbol	Description
l	Half length of hinge
l_t	Total length of hinge
t	Thickness of hinge
b	width of hinge
d	Angular clearance of hinge
θ	Angle between leaf springs

시스템 강성을 높이고 힌지 변형을 통해 선형적인 움직임을 만들어 시스템의 정확도와 정밀도를 향상시키는 역할을 한다. 특히, CF 형태의 힌지는 다른 형태의 유연 힌지에 비해 정확한 회전 중심과 높은 비강성 구조를 갖는다는 장점이 있다. Fig. 4는 Hollow-type Cartwheel Flexural Hinge(H-CFH)의 개략도이다. 해당 힌지는 일종의 Pivot이며 Tip/Tilt 축 방향에 대해 대칭이고, Cartwheel Flexure 형태를 지녀 보다 정확한 회전 중심을 가질 수 있다. 또한, FSM이 소형이므로, Flexure의 크기가 작아야 하는 요구조건을 만족한다. 또한 Cartwheel Flexure 형태는 동일 부피에서 비교적 높은 강성을 가지므로 더 넓은 제어 대역을 가진다.

x축과 y축의 회전을 위해 각각 한 쌍의 H-CFH가 있다. Pivot 1과 그에 평행한 Pivot 1'은 x축 회전을, Pivot 2와 Pivot 2'은 y축 회전을 독립적으로 구성한다.

Pivot 1과 Pivot 1'을 구성하는 한 쌍의 H-CFH (H-CFH 1)는 Base에 연결되어 있고, Pivot 2와 Pivot 2'을 구성하는 H-CFH (H-CFH 2)는 중간체(intermediate body)에 연결되어있다. 각 쌍의 H-CFH는 다시 중간체와 연결되어 있고, 중간체는 각 회전축이 원점에 교차하도록 설계되어 있다. Base는 Flexure에 비해 두꺼워 강체로 고려될 수 있으며, H-CFH 2는 다시 구동 부하인 거울에 연결되어 힌지의 회전 범위가 거울의 각도 변화로 이어진다.

Fig. 5는 H-CFH를 구성하는 판 스프링(leaf spring)이다. 각각의 Pivot은 두께 t , 길이 l , 너비 b 를 가지고 사이각 θ 를 지닌 4개의 결합된 판스프링을 갖는다. 허용 회전각에 따라 Pivot 쌍은 중간체 혹은 Base와 허용 틈새 d 를 가진다. 각각의 변수들은 유연 힌지의 성능과 관련되며, 최적화 설계를 통해 적절한 값이 선정된다. 각 변수명은 아래 Table 2와 같다.

H-CFH는 4개의 Leaf hinge로 구성된 2쌍의 Cartwheel flexure로 구성되어 있으며, 외력에 대한 판스프링의 변형은 다음과 같다^[10].

$$\delta X = CF \quad (1)$$

$$\delta X = [\delta_x \delta_y \delta_z \theta_x \theta_y \theta_z], F = [F_x F_y F_z M_x M_y M_z] \quad (2)$$

$$C = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_4 & 0 & c_6 & 0 & 0 \\ c_3 & 0 & 0 & 0 & c_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = K^{-1} \quad (3)$$

$$c_1 = \frac{l^3}{3EI_{zz}}, c_2 = \frac{l^3}{3EI_{yy}}, c_3 = \frac{l^3}{2EI_{zz}}$$

$$c_4 = \frac{l^3}{2EI_{yy}}, c_5 = \frac{l}{EA}, c_6 = \frac{l}{EI_{yy}}$$

$$c_7 = \frac{l}{EI_{zz}}, c_8 = \frac{l}{Gkb^3t^3}$$

δX 는 판스프링의 6자유도 변형을 나타낸다. C 는 판스프링 강성 행렬 K 의 역수인 컴플라이언스 행렬을 나타내며, G, E 및 I_{ij} 는 각각 전단계수, 탄성계수, 면적관성 모멘트($i, j=x, y, z$)를 나타낸다. 평행이동 벡터(translational vector, R)과 회전 행렬(rotational vector, T)를 통해 첫 번째 및 두 번째 H-CFH쌍의 변형과 그와 연결된 거울의 변위를 구할 수 있으며, 기준점(O)에서 각 판스프링 (O_i)으로의 회전 및 평행이동 행렬은 다음과 같다.

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_x & -\sin\phi_x \\ 0 & \sin\phi_x & \cos\phi_x \end{bmatrix}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\phi_y & 0 & \sin\phi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi_y & 0 & \cos\phi_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\phi_z & -\sin\phi_z & 0 \\ \sin\phi_z & \cos\phi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = R_z R_y R_x \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z 는 각각 판스프링의 힌지점의 x, y, z 축에 대한 상대 각도이며 δ 와 θ 는 판스프링의 변형 변위와 각도를 나타낸다. R 과 P 는 각각 회전행렬과 평행이동 행렬로, 힌지점의 상대적 회전 및 병진 변위를 나타낸다.

$$F' = \begin{bmatrix} I & 0 \\ P & I \end{bmatrix} F \quad (8)$$

$$\delta p = \begin{bmatrix} I & P^T \\ 0 & I \end{bmatrix} \delta X \quad (9)$$

식 (8)과 (9)는 변환된 외력과 병진변위이며, 거울의 변위 X 를 고려할 때 사용된다.

$$C_{rot} = TCT^T \quad (10)$$

$$C_{tr} = \begin{bmatrix} I & P^T \\ 0 & I \end{bmatrix} C_{rot} \begin{bmatrix} I & 0 \\ P & I \end{bmatrix} = C \quad (11)$$

$$X = C'F \quad (12)$$

식 (10)과 (11)을 이용하여 멀리 떨어진 힌지점의 등가 컴플라이언스 C 를 구할 수 있으며, 이는 등가 강성 K 의 역수이다.

2.3 H-CFH의 최적화

2.3.1 최적 설계 문제 정의

정해진 형상 매개 변수가 시스템의 성능을 최대화하기 위해서는 각 설계 변수의 최적화가 필요하다. 보다 용이한 제어를 위해서는 넓은 대역폭을 지녀야 하므로, 제한된 조건 내에서 시스템의 1차 공진주파수를 최대화 할 수 있는 H-CFH의 최적설계에 대한

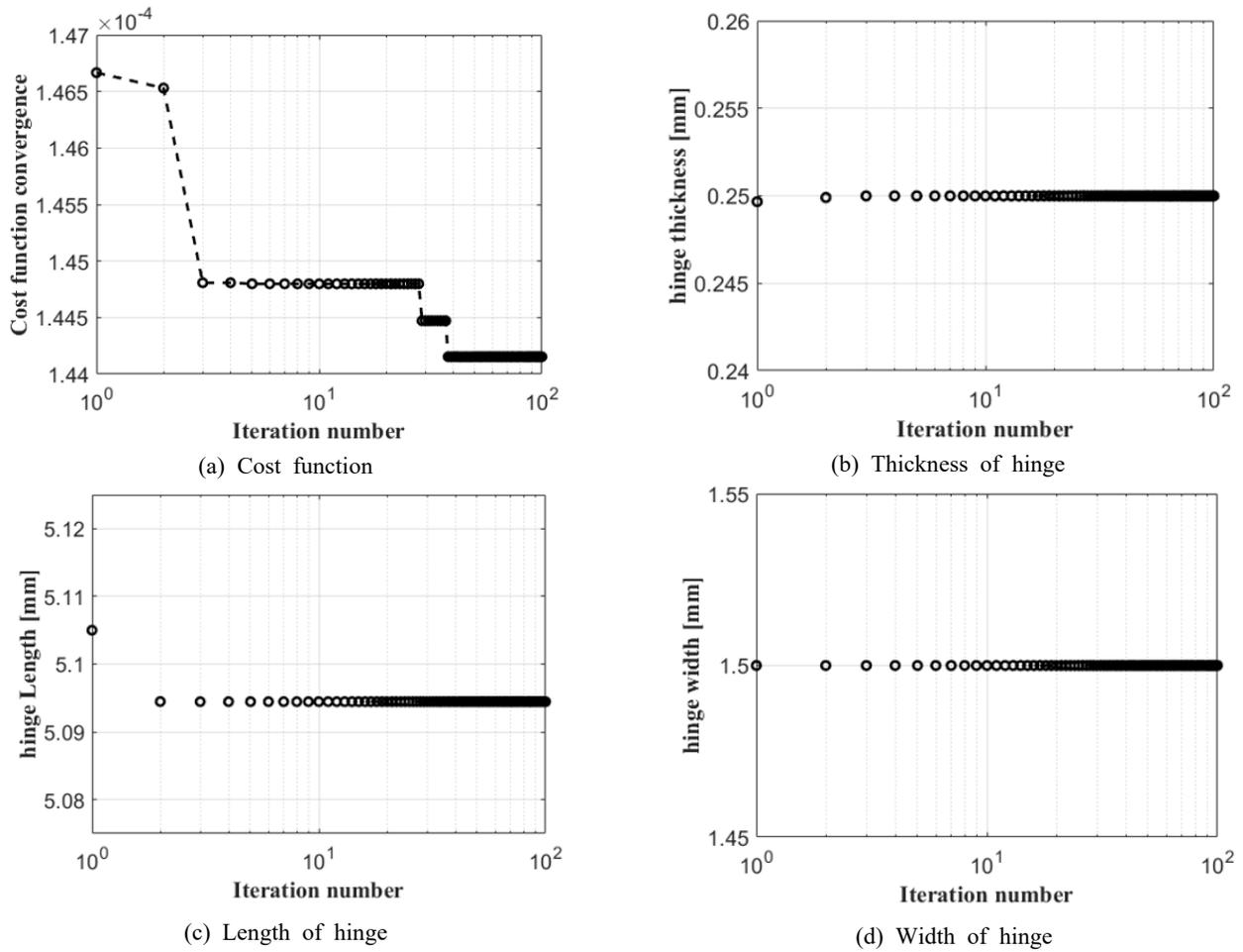


Fig. 6 Optimal value of H-CFH

문제정의를 진행한다. 사용한 최적 설계 툴은 BFGS(broyden-fletcher-goldfarb-shanno)방법으로 최적화의 방향을 정하고^[11], SQP(sequential quadratic programming)알고리즘을 통해 최적화의 Step 크기를 정한다. 공진 주파수가 최대화 되기 위해서는 강성이 커져야 하기 때문에 전역 최솟값을 찾는 목적함수는 아래 식 (13)과 같이 강성 제곱의 역수로 한다. 이때 제곱을 하는 이유는 비용함수를 완만한 오목 형태(convex)로 깊게 만들어 전역 최솟값을 수월하게 찾을 수 있도록 함이다.

$$Cost\ Function = \min \left(\frac{1}{k_{H-CFH}^2} \right) \quad (13)$$

H-CFH의 각 변위는 강성에 반비례하며, 구동 토크에 비례한다. 강성은 판스프링의 길이의 세제곱에 반비례하고, 너비에 비례하며, 두께의 세제곱에 반비례하므로 힌지의 길이 l , 너비 b , 두께 t 가 설계 변수가 된다. 최적 설계를 수행함에 앞서 제한조건을 아래와 같이 부여한다.

첫째, H-CFH의 가로와 세로 길이는 13 mm를 넘지 않도록 한

다. 소형 FSM에 장착할 수 있는 한 쌍의 H-CFH는 거울 면적에서 두 쌍의 MMVCM가 차지하는 면적을 제외한 크기를 넘어서는 안 된다.

둘째, 각 H-CFH의 너비는 1.5 mm를 넘지 않도록 한다. 최대 3의 구동범위를 확보하기 위해서는 Pivot 1과 Pivot 2 사이의 공극 d 가 최소 1mm 확보 되어야 한다. 전체 기구와 두 쌍의 H-CFH의 길이를 고려할 때 충분한 공극을 확보하기 위해서는 H-CFH의 너비는 최대 1.5 mm로 제한한다.

판스프링의 사잇각 θ 는 H-CFH의 대칭성을 고려하여 45°로 고정하였다. 해당 제한조건 하에서 비선형적인 매개변수의 최적 설계를 진행하였으며, 검증을 위해 ANSYS 해석을 통해 설계 값의 신뢰성을 입증하였다.

2.3.2 설계변수 최적화

각 피벗에 대해 Global Search 알고리즘을 적용한 최적설계 결과는 Fig. 6과 같으며, 해당 매개 변수를 토대로 MATLAB을 통해 변형에 대한 시각화한 자료를 Fig. 7에 나타냈다. H-CFH의

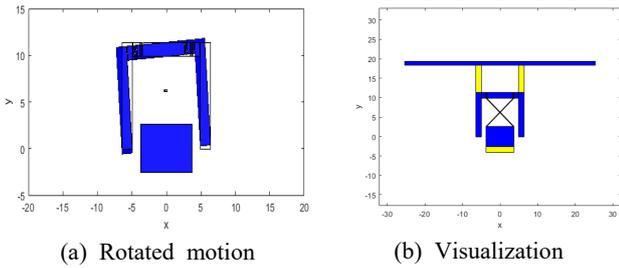


Fig. 7 Optimal design of H-CFH

Table 3 Optimal design results and final design parameters

Parameters	Optimal design	Final design
Length of hinge	5.1247 mm	5.125 mm
Thickness of hinge	0.152 mm	0.15 mm
Width of hinge	1.497 mm	1.5 mm

재질은 Titanium-Grade 5이며, 물성은 Table 3과 같다.

구동기의 추력과 H-CFH 한 쌍의 강성을 가지고 계산하면 거울의 회전 변위는 약 75.8 mrad 이며 1, 2차 공진주파수는 15.34 Hz이다. 이 때 설계변수의 범위와 제한조건들을 만족하지만 거울이 회전할 때 병진방향으로 약 0.97 mm의 기생운동이 발생한다. 이는 거울이 힌지의 회전중심에서 15.7 mm 떨어진 위치에서 회전하기 때문이다. 거울의 회전각을 이용해 레이저를 조준하는 FSM 시스템의 특성상, 병진방향의 기생운동은 레이저 반사지점을 이동시킨다. 해당 운동은 빔 포인팅에 있어 정밀도를 저하시키므로 이를 보완하기 위해 제어를 통한 보상이 필요하다. 해당 병진운동의 보상 제어는 추후 추가적으로 연구한다.

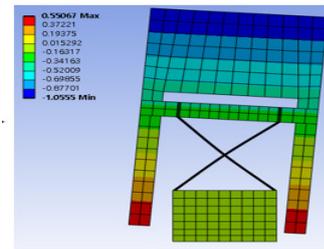
2.3.3 유한요소해석

H-CFH는 회전 시 회전 중심부에 응력 집중이 발생한다. 허용 응력은 항복 응력의 30% 수준으로 유지해야 하기 때문에 이를 검토하기 위해 FEM 해석을 해야한다.

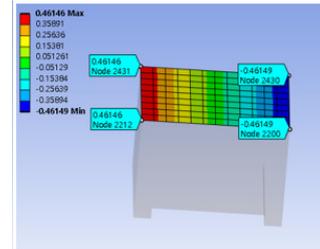
본 절에서는 최종 설계 결과를 검증하기 위해 유한요소 해석을 통해 계산된 H-CFH의 회전운동과 이전 절의 설계 결과를 비교한다. 검증을 위해 최종 설계된 형상 매개변수를 적용하여 H-CFH의 3D 모델을 구현하고 ANSYS 정적 해석을 통해 값을 비교한다. 해석 결과는 아래 그림 Fig. 8과 같으며, 거울 평면의 높이방향 변위를 측정하여 각도 값을 추출한다. 해석 결과 z축 방향 총 변위는 0.923 mm로, 각도는 다음과 같이 구해진다.

$$\tan^{-1}\left(\frac{0.923}{12.7}\right) = 72.5\text{mrad} \quad (14)$$

계산 값과 해석결과는 약 4.36% 오차를 보이며 일치하므로 모델링과 설계 결과의 타당성을 검증했다고 할 수 있다.



(a) Total deformation



(b) Directional deformation

Fig. 8 FEM deflection analysis

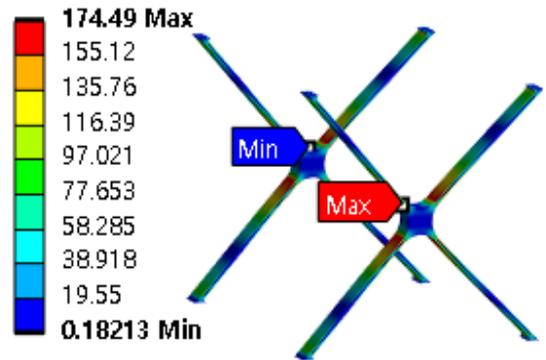


Fig. 9 FEM analysis on stress of a pair of H-CFH

다음으로, 모델에 가해지는 응력을 분석하였으며 이는 Fig. 9에 나타나있다. H-CFH에 가해지는 최대 응력은 174.49 MPa로, 항복 응력의 19.82%에 해당되므로 허용 응력 범위 이내에 존재한다. 이러한 완화된 응력은 Pivot에서 각 판스프링이 만나는 모서리에 필렛(filllet)을 추가했기 때문이다. 이는 설계 안정성을 증가시킨다.

3. 제작 결과와 성능 검증

3.1 최종 설계안

위 Fig. 10은 제작된 FSM 시스템이다. 구동 부하인 거울은 2쌍의 MMVCM에 의해 Pull-Push로 구동되며, Tip/Tilt 운동 시 MMVCM이 모두 구동되면 최대 89.6 N/mm의 토크로 구동할 수 있다.

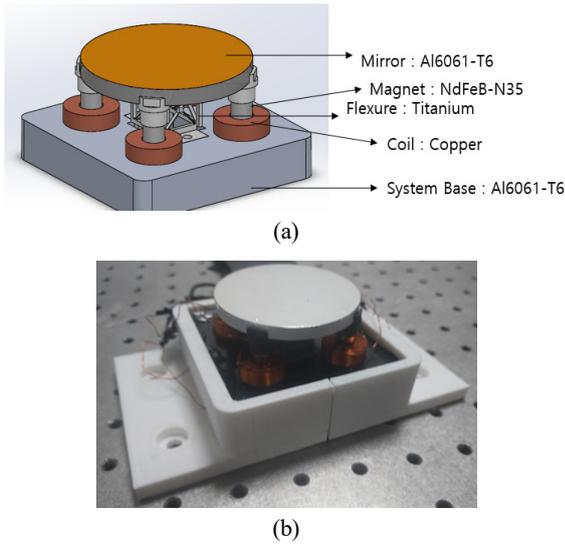


Fig. 10 Fabricated FSM, (a) solid model, (b) fabricated

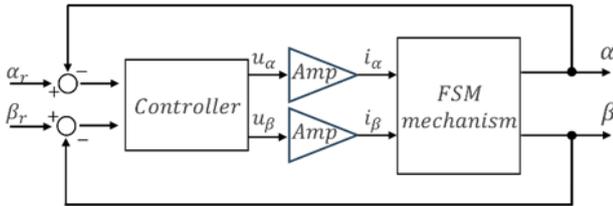


Fig. 11 Control Diagram of FSM

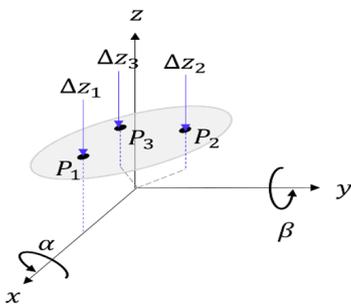


Fig. 12 Schematic diagram of sensor kinematics

3.2 제어 전략

Fig. 11은 본 연구에서 사용하는 제어 시스템의 개략도이다. 제어기는 PID 제어기를 사용하였으며, 시스템은 Tip/Tilt 운동인 α, β 각을 제어 입력으로 받으며 폐루프 되먹임 PID 제어를 통해 Gain값에 맞는 전류를 운동방향의 코일에 전달한다. 각각의 전류 방향은 입력 방향에 맞게 합쳐져 원하는 방향의 운동을 구현한다.

Fig. 12는 센서 기구학(sensor kinematics)에 대한 개략도이다. 거울 면에 대해 높이방향 거리를 재는 세 개의 센서에서 각각 α, β 를 계산한다. 좌표계의 중심인 O는 회전중심, P_0 는 평면의

중심, \vec{n} 은 평면의 법선벡터이다. 측정 면은 겹쳐있지 않은 3개의 점 좌표에 의해 정의되며 3개의 점의 x, y 좌표는 각각 P_1, P_2, P_3 로 고정되어 있으므로 3개의 점의 z축 변위인 $\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3$ 로 정의된다. x축 회전성분인 α 와 y축 회전성분인 β 는 측정 면의 법선벡터에 의해 정의되므로 결국 3개점의 z축 변위인 $\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3$ 로 정의된다.

측정 면에서 추출한 두 벡터 $\overline{P_1P_3}, \overline{P_1P_2}$ 는 아래 식 (12)와 (13)으로 표현되며, 두 벡터를 외적인 법선벡터를 통해 얻은 회전 변위 α, β 는 식 (14)와 식 (15)로 표현되며 각각 x축, y축 회전 변위를 나타낸다.

$$\overline{P_1P_3} = (-r \sin 30^\circ + 1, -r \cos(30^\circ), \Delta z_1 - \Delta z_3) \quad (15)$$

$$\overline{P_1P_2} = (-r \sin 30^\circ + 1, r \cos(30^\circ), \Delta z_1 - \Delta z_2) \quad (16)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta z_2 - \Delta z_3}{2r \cos 30^\circ} \right) \quad (17)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{2\Delta z_1 - \Delta z_2 - \Delta z_3}{2r \sin 30^\circ + 1} \right) \quad (18)$$

3.3 Control Experiment

Fig. 11은 제어 성능실험세트의 구성을 나타내고 있다. Controller는 dSPACE를 사용한다. 전류로 구동하는 MMVCM 특성상 Linear Amplifier (TA-115)를 사용하며 앰프의 Gain은 0.8 A/V이다. 측정에 사용되는 센서는 레이저 변위센서(Micro-Epsilon 社 optoNCDT ILD1420-10)를 사용하였다. 센서는 구동 부하인 거울의 중심으로부터 15 mm 떨어진 위치에 120° 간격으로 3개소 배치하였으며, 센서 기구학을 통해 법선벡터를 도출하고 회전 각도를 계산한다. 변위 제어에 필요한 폐루프 되먹임 제어 알고리즘은 MATLAB SIMULINK를 활용하여 구현한다.

3.4 변위 제어

이번 절에서는 3.2절에서 정의한 센서 기구학과 제어 전략을 기반으로 시스템의 α, β 의 2자유도 회전 각도 제어를 통해 FSM의 성능을 검증한다. 변위 제어는 비례-적분-미분 제어기(PID controller)를 적용하였으며 α, β 에 대한 개별적인 제어를 실시한다. α, β 운동은 Fig. 13과 같이 2쌍의 MMVCM의 pull-push 토크로 구동되며, 아래 식 (19)~(22)와 같다.

$$F_1 = -\alpha_m k_{VCM} + \beta_m k_{VCM} \quad (19)$$

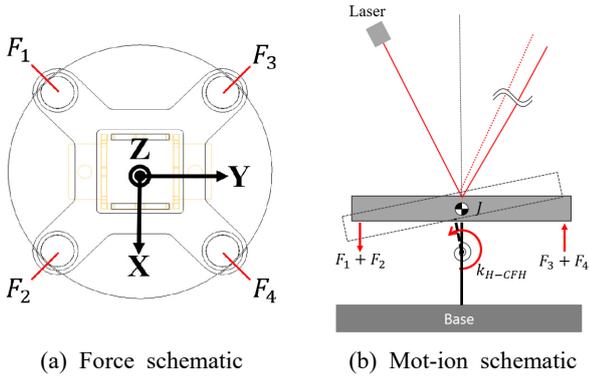


Fig. 13 Schematic diagram of motion

$$F_2 = -\alpha_{in}k_{VCM} - \beta_{in}k_{VCM} \quad (20)$$

$$F_3 = \alpha_{in}k_{VCM} + \beta_{in}k_{VCM} \quad (21)$$

$$F_4 = \alpha_{in}k_{VCM} - \beta_{in}k_{VCM} \quad (22)$$

여기서 F_i 는 각각의 MMVCM이 내는 추력이며, α_{in} , β_{in} 는 제어기의 제어 입력이다. k_{VCM} 은 각도에 따라 선형적으로 감소하는 추력을 보상하기 위한 함수로, 그래프의 역수에 추력의 평균값을 곱하여 추력을 상수화시킨다.

$$J\ddot{\alpha} + B\dot{\alpha} + k_{H-CFH}\alpha = [-(F_1 + F_2) + (F_3 + F_4)]d \quad (23)$$

식 (19)~(22)와 Fig. 13(b), 최적화된 변수들을 이용하여 FSM의 운동방정식을 세우면 위 식 (23)과 같다.

J 는 구동기와 mirror mount, mirror를 포함한 이동자의 등가 관성 모멘트이며, B 는 공기에 의한 감쇠, k_{H-CFH} 는 H-CFH의 등가 강성이다. 시뮬레이션 및 계산된 각 변수의 값은 $J=36608 \text{ g/mm}^2$, $B=0.001 \text{ N/s}$, $k_{H-CFH}=0.32 \text{ Nm/rad}$ 이다.

본 논문에서 연구된 FSM은 각도에 따라 추력의 gain이 일정하게 증가하므로 계산만으로 정확한 PID 이득(gain)값을 정할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 시행착오법을 통해 제어기의 이득값을 도출했으며 이는 Table 4와 같다.

3.4.1 Frequency Response Experiment

FSM의 대역폭을 평가하기 위해 시스템에 처프 신호(chirp signal)를 1 Hz부터 100 Hz까지 입력한 뒤 응답을 실험하였다. 주파수의 증분은 logarithmic하게 진행하여 고주파 영역 대비 저주파 영역에서의 신호를 길게 분석한다. 결과는 Fig. 14와 같으며 1차 공진주파수는 16.7Hz로 계산값과 8.9% 오차로 일치한다. 해당 공진 대역의 진폭을 제어를 통해 보완하며, 제어 이후 결과는

PID gain parameter	Value
K_p	0.035
K_I	0.71
K_D	0.0029

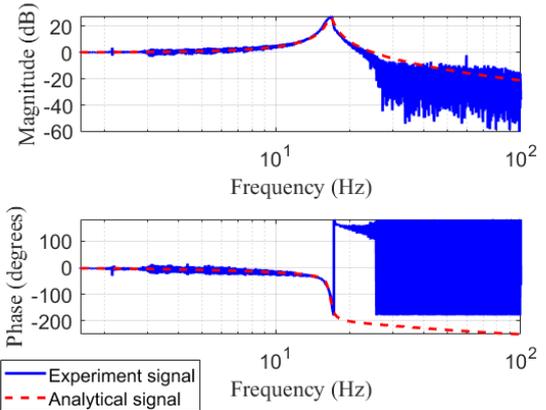


Fig. 14 Bode plot of FSM

다음과 같다.

3.4.2 Driving Range Test

FSM의 구동 범위를 시험하기 위해 계단 입력에 대한 제어를 수행하였다. Step 입력은 0.3° (5 mrad) 씩 1.5° (25 mrad) 까지의 순차적인 입력을 넣었으며, 결과는 Fig. 16과 같다. 제어 결과, 구동 범위는 1.5° 를 달성하였으며, 상승시간은 0.786 s, 오버슈트 0%, 안정화 시간 2.1 s, 정상상태 오차는 1% 이내이다.

3.4.3 Resolution Test

다음으로, FSM의 구동 반복능을 알아보기 위해 작은 계단 입력을 순차적으로 입력하였다. 계단 입력의 진폭을 점차 줄여가며 실험을 진행하였으며, 결과는 Fig. 17과 같다. 제어 결과, 분해능은 0.005° ($87.2 \text{ } \mu\text{rad}$)을 달성하였으며, 센서와 시스템 외란에 의한 노이즈를 보상할 수 있다면 분해능을 더 향상시킬 수 있을

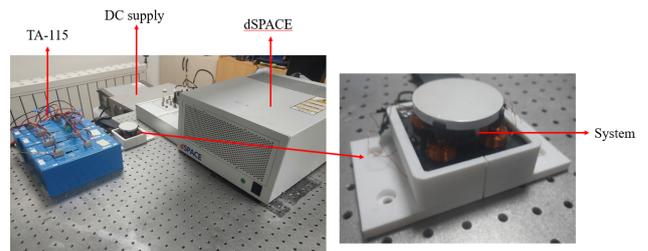


Fig. 15 Experiment setting of FSM

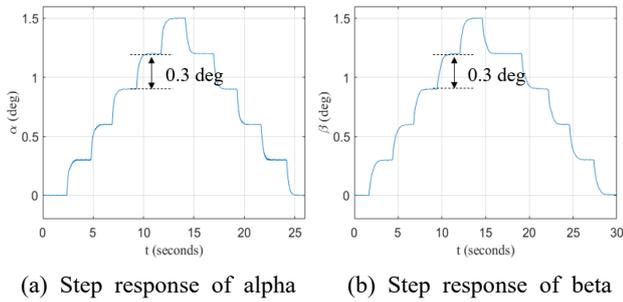


Fig. 16 Results of driving range test

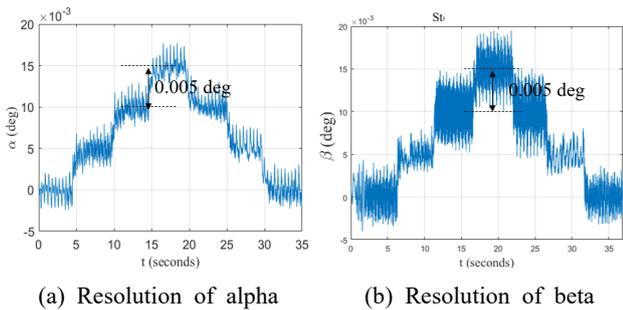


Fig. 17 Results of resolution test

것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문에서는 자유공간에서의 광통신에서 빔 정렬을 위한 고속 조향 거울을 설계하였으며, MATLAB 최적화 알고리즘을 통해 속이 빈 카트휠 힌지(H-CFH)를 사용한 기구의 성능 최적화를 진행하였다. 또한, 유한요소해석을 통해 이를 검증하고 제어를 통한 실증을 진행하여 시스템 성능을 시험했다.

실험 결과, 시스템은 구동범위 1.5° 내에서 Rise Time은 0.786 s, Overshoot 0%, Settling time 2.1 s, Steady State Error (SS-error)는 1% 이내의 오차를 달성하였으며, 구동 분해능은 0.005° (87.2 μrad)를 달성하여 대역역/정밀 조향 거울에 대한 적용 가능성을 확인하였다.

향후 센서와 시스템 외란에 의한 저주파 대역의 노이즈를 보상하여 분해능과 빠른 응답성을 확인해야 한다고 판단된다. 추후 추가적인 연구를 통해 자율주행에 사용되는 Lidar, 대형 망원경, 광통신 분야 등에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 한화 에어로스페이스의 ‘기업체 일반 지원사업’의 도움으로 연구되었음.

References

- [1] Hawe, L. E., 2006, Control of a Fast Steering Mirror for Laser-Based Satellite Communication, Mastergrade Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [2] Kaushal, H., Kaddoum, G., 2017, Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19:1 57-96, <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2603518>.
- [3] Lahari, S. A., Raj, A., Soumya, S., 2021, Control of Fast Steering Mirror for Accurate Beam Positioning in FSO Communication System, International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN), 1-6, <https://doi.org/10.1109/ICSCAN53069.2021.9526537>.
- [4] Liu, C. -S., Jiang, K. -C., Chen, M. -F., Lin, P. -M., 2024, Design and Characterization of Four-Degree-of-Freedom Fast Steering Mirror for Laser Compensation System, IEEE Transactions on Industry Applications, 60:3 3850-3859, <https://doi.org/10.1109/TIA.2024.3360028>.
- [5] Xiao, R., Xu, M., Shao, S., Tian, Z., 2019, Design and Wide-bandwidth Control of Large Aperture Fast Steering Mirror with Integrated-sensing Unit, Mech. Syst. Signal Proc., 126 211-226, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.028>.
- [7] Chang, Q., Chen, W., Liu, J., Yu, H., Deng, J., Liu, Y., 2021, Development of a Novel Two-DOF Piezo-driven Fast Steering Mirror with High Stiffness and Good Decoupling Characteristic, Mech. Syst. Signal Proc., 159 107851, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107851>.
- [8] Wu, J., Cai, S., Cui, J., Tan, J., 2015, A Generalized Analytical Compliance Model for Cartwheel Flexure Hinges, Rev. Sci. Instrum., 86 105003, <https://doi.org/10.1063/1.4934199>.
- [9] Huang, W., Huang, W., Dong, D., Cao, L., Sun, C., 2021, Research and Analysis of a Novel Voice Coil Motor With Wireless Power Supply, IEEE Transactions on Industry Applications, 57:3 2332-2341, <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3056018>.
- [10] Koseki, Y., Tanikawa, T., Koyachi, N., Arai, T., 2000, Kinematic Analysis of Translational 3-DOF Micro Parallel Mechanism using Matrix Method, Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113), 1 786-792, <https://doi.org/10.1109/IROS.2000.894700>.
- [11] Fletcher, R., 1987, Practical Method of Optimization (2nd ed), John Wiley & Spms. New York.

- [12] Kim, H. T., Kim, S. E., Jeon, Y. H., Park, S. U., Song, J. M., Lee, M. G., 2024, Design and Control of High-speed Aiming Mirror for Satellite Communication Process, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Spring Conf., 191.

	<p>Hyuntae Kim Graduate Student in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is Precision Design and Control. E-mail: whyshop@ajou.ac.kr</p>
	<p>Se Eun Kim Ph.D. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. Her research interest is Precision Design and Analysis. E-mail: tpzi08@ajou.ac.kr</p>
	<p>Yong-Ho Jeon Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interests are Developing Novel Manufacturing Processes using Heat and Vibration and their Effects of Processes on the Material Characteristics. E-mail: princaps@ajou.ac.kr</p>
	<p>Sung Un Park Senior Researcher in Institute Laser Technologies R&D Team in Hanwha Aerospace. His research interest is High Accuracy Beam Pointing and Control. E-mail: sungun.park@hanwha.com</p>
	<p>Moon Gu Lee Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is Design and Control of Precision System Control. E-mail: moongulee@ajou.ac.kr</p>