

광섬유 EFPI 센서를 이용한 나노 이송장치의 개발

박상욱 · 김대현* · 김천곤**†

Development of nano-positioner using fiber optic EFPI sensor

Sang Wuk Park, Dae Hyun Kim*, and Chun Gon Kim**†

Abstract

Precision displacement of less than a few nm resolution was measured in real-time using fiber optic EFPI sensor. The novel method for real-time processing of analyzing EFPI output signal was developed and verified. Linearity in the mean values of interferometric light intensity among adjacent fringes was shown and verified the sinusoidal approximation algorithm that estimates past and coming fringe values. Real-time signal processing program was developed and the intensity signal of the EFPI sensor was transformed to the phase shift with this program. The resolution below 0.36~8.6 nm in the displacement range of 0~300 μm was obtained. The nano-positioner with a piezoelectric actuator and the EFPI sensor system was designed and tested. The positioner successfully reached to the desired destination within 1 nm accuracy.

Key Words : fiber optic sensor, fabry-perot interferometer, nano-positioner, displacement sensor

1. 서 론

빛의 간섭을 이용한 센서는 일반적으로 민감도가 매우 우수하여 미소 변위의 측정에 많이 이용되어 왔으며 현존하는 센서들 중 가장 높은 해상도를 가진다^[1,2]. 따라서 고정밀 측정 및 구동에 있어서는 비접촉식 광간섭계 방식이 많이 쓰이고 있다. 스마트 구조물(smart structure)의 새로운 감지제로서 각광받고 있는 광섬유 센서는 광소자의 성능 향상과 가격 하락으로 인해 변형량, 압력, 가속도, 진동 및 음향과 센서 등의 기존의 센서 시스템을 성공적으로 대체하고 있다. 특히 광섬유 센서는 크기가 작고 민감도가 우수하며 전자기장의 영향을 받지 않는다는 장점으로 인해 여러 분야로의 적용 가능성이 높다^[3]. 이 중 광섬유 EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometer) 센서는 간섭계와 광섬유 센서의

장점을 모두 지니는 센서로서 게이지 길이 내에서 광매질이 공기이므로 다른 간섭 센서와 달리 게이지 구간 내에서 편광축의 변화가 없으며, 유리관 안에서 간섭이 일어나므로 비교적 외란의 영향이 적고 기계적 특성이 우수하다. 그러나 이제까지 변위 측정을 위해 사용한 EFPI 센서는 가해진 변위에 대해 비선형적인 정현파 형태의 신호를 변위로 변환하기 위해 복잡한 간섭무늬 계수기법(fringe counting technique)을 사용해야 하므로 간섭무늬 사이에서 일어나는 $\lambda/4$ 보다 작은 변형의 경우에는 측정이 불가능하여 해상도에 한계를 가졌다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 여러 가지 시도가 있었지만 제작이 매우 어렵거나 특수한 상황에만 적용할 수 있어 실제 사용이 어려운 단점이 있었다^[4,5].

높은 민감도를 갖는 EFPI 센서의 나노 이송장치 적용을 위해 본 연구에서는 EFPI 센서의 간극 변화에 따른 광 검출기의 출력 전압을 광 간섭의 위상차로 1:1 대응시켜 직접 위상차를 계산해 내는 파장이동 측정법(phase-shifting technique)을 사용하였다. 오늘날 정밀 측정 분야의 첨단에서 사용되고 있는 빛의 간섭을 이용한 변위 측정 방법은 외란에 약한 특성을 보이므로, 측정 장비의 크기가 크고 측정에 많은 제한 조건이 있으며 사용되는 장비가 대부분 매우 고가인 단점이 있

한국과학기술원 기계공학과 항공우주전공 박사과정(Ph. D candidate, Dep. of Mechanical Eng. Div. of Aerospace Eng., KAIST)

*U. C. Irvine 토목공학과 박사후과정(Post Doc., Civil & Environmental Engineering, University of California, Irvine)

**한국과학기술원 기계공학과 항공우주전공 교수(Professor, Dep. of Mechanical Eng. Div. of Aerospace Eng., KAIST)

†Corresponding author: cgkim@kaist.ac.kr

(Received : January 12, 2005, Accepted : January 25, 2005)

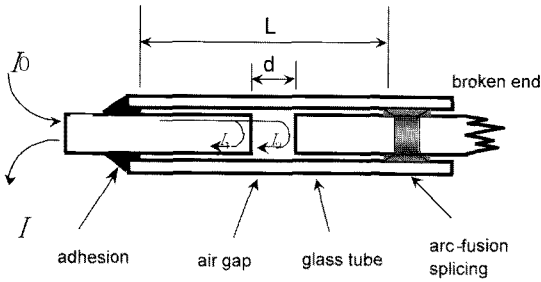


그림 1. EFPI 센서의 개요도
Fig. 1. Schematic diagram of EFPI sensor.

다. 하지만 앞서 설명한 광섬유 EFPI 센서가 해상도의 한계를 극복하고 정밀 측정 분야에 사용이 가능한 높은 정밀도를 가지게 되면, 초소형의 광섬유 센서를 이용하여 레이저 간섭계의 성능을 낼 수 있어 많은 분야에 유용하게 쓰일 수 있게 된다.

2. 광섬유 EFPI 센서 시스템

2.1. 위상차와 변위와의 관계

일반적인 간섭계에서 변형에 따른 간섭 신호의 세기는 다음과 같이 보강간섭과 상쇄간섭이 변형에 따라 일어나는 정현파의 형태를 띠게 된다.

$$I = I_0 \{1 + \cos 2kd\} \quad (1)$$

그러나 Fig. 1에 나타난 광섬유 EFPI센서의 경우 간극의 크기 d 가 커짐에 따라 이에 비례하여(비례상수 k) 위상이 변화하고 간섭시 손실되는 양 또한 달라지므로, 표준화된 간섭광의 세기 I_{nor} 과 입력된 광량 I_0 의 관계는 식 (1)과 같은 정현파 형태에서 비선형 항 A, B 가 포함된 식 (2)의 형태로 변형된다.

$$I_{nor} = A(1 + B\cos 2kd) \quad (2)$$

진폭을 고려하지 않을 경우, (1)과 (2) 식은 같은 주기를 갖는 식이 되며, 이 때 위상 ϕ 와 변위 ΔL 과의 관계는 다음과 같게 된다.

$$\phi = 2kd \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L} = \frac{4\pi}{\lambda} = \frac{4\pi n_c}{\lambda_0} \quad (4)$$

식 (4)에서 ΔL 은 기계적, 열적 변형에 의한 미소변형의 함으로 볼 수 있다. 변위의 시작 초기부터 생기는 위상의 변화를 누적시킨다면 누적된 변위의 크기 역시 식 (4)와 같은 방법으로 계산해낼 수 있다.

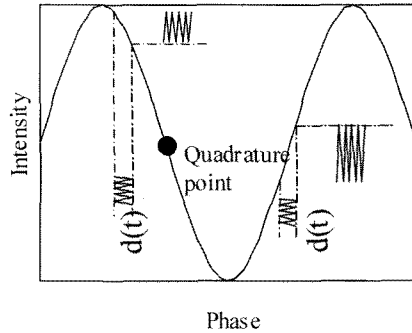


그림 2. 광경로차에 따른 미소변위 발생시의 광 강도 변화
Fig. 2. Intensity variation from infinitesimal displacement as the path difference.

그러나 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 동일한 미소변형에 대해서도 출력값의 강도는 달라질 수 있다. 따라서, 위상을 누적하여 변위를 계산해내는 방법은 미소변위의 최종 지점이 정현파의 프린지(fringe) 부근인지 아니면 프린지 사이의 중간 부분인지에 따라 계산된 총 변위의 정밀도가 달라지게 된다.

2.2. EFPI 출력 신호 프린지 값의 선형성

EFPI 센서의 경우 간극의 길이가 달라짐에 따라 광 강도의 최대값과 최소값이 바뀌게 되어 매 변위마다 서로 다른 상수를 대입하여야 정확한 위상 변화를 계산해낼 수 있게 된다. 이러한 광 강도의 평균값의 증가 혹은 감소는 전반적으로 비선형성을 띄지만 인접한 몇 개의 간섭 프린지 사이에서는 국소적으로 선형성(local linearity)을 가진다. 본 연구에서는 이를 이용하여 광섬유 EFPI 센서의 출력 광 강도를 정현파의 식으로 모사함으로써 위상의 변화를 측정할 수 있다는 가설을 세우고 실험을 통해 검증하였다.

구동장치로 광섬유 용합 접속기(arc-fusion splicer)를 사용하여 0~90 μm 의 범위에서 Fig. 3과 같은 결과를 얻었으며, 이 데이터에서 인접한 10개의 프린지 값들과 이를 선형 보정(linear fit)한 직선과의 표준편차를 측정된 결과, 위상으로 환산하면 0.12 rad 으로 식 (4)를 통해 최대 12 nm 이하 간극의 변위로 계산된다. 이는 측정된 광 검출기 잡음의 표준편차와 거의 같거나 더 작은 값으로, 선형성 가정에 의해 발생한 오차가 잡음으로 인한 오차에 비해 매우 작음을 의미한다. 이는 곧 간섭 프린지 사이 구간의 위상을 계산하기 위해 마루 혹은 골의 위치를 예측하기 위해 프린지 값의 국소적 선형성을 가정한 본 연구의 알고리즘이 정당함을 의미한다.

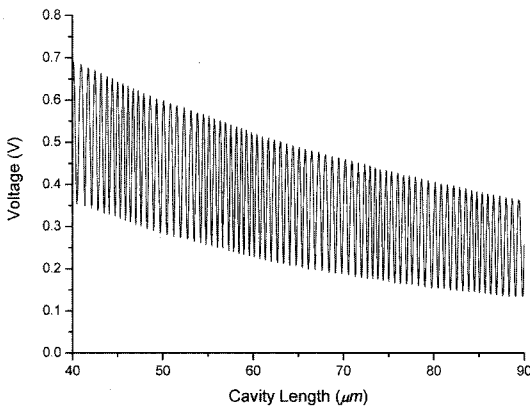


그림 3. 간극 변화에 따른 EFPI 센서 신호
Fig. 3. Original signal of EFPI sensor with the variation of cavity length.

2.3. EFPI 센서의 변위 계산 알고리즘

광 검출기의 출력 전압은 다음과 같은 과정을 거쳐 변위로 계산된다. 우선 광 검출기에서 입력받은 전압 중 처음 위치의 위상 계산을 위해 초기 전압값을 저장해 둔다. 그 다음으로 주어지는 EFPI 센서의 전압 변화를 최대값과 최소값을 비교하는 방법으로 마루(peak)와 골(valley)을 찾고 그 값들을 기억한다. 연속적으로 입력받은 전압의 현 위치가 Fig. 3에서 보이는 상승곡선 구간과 하강곡선 구간 중 어느 곳인지를 판별한다.

하강곡선 구간에서의 위상은 다음 식 (5)에서 구해지는 현 위치에서의 위상 ϕ 가 되고, 상승곡선 구간에서는 삼각함수의 대칭성 때문에 $\pi - \phi$ 가 된다.

$$\phi = \cos^{-1} \left\{ \left(V_{input} - \left(\frac{V_{peak} + V_{valley}}{2} \right) \right) \left(\frac{V_{peak} - V_{valley}}{2} \right) \right\} \quad (5)$$

저장된 초기 출력 전압은 초기 위상값으로 환산하여 프린지 개수와 마지막 프린지로부터 최종 위치의 위상차와 함께 더해지게 된다. 프로그램은 변위의 프로파일과 최종 변위의 계산을 위해 순간순간의 전압을 쫓아가며 직전 간섭 프린지로부터 현재 위치의 위상차로 환산하는 과정을 반복한다. 이렇게 마루와 골의 전압이 정해지지 않은 구간 안에서의 위상, 다시 말해 Fig. 3에서 원 안의 초기 전압과 최종 전압을 위상으로 계산하기 위해서 EFPI 센서의 간극의 길이 변화에 따른 평균 광 강도 변화의 선형성을 이용하였다.

이전의 간섭무늬 계수기법으로는 측정이 불가능했던 측정 초기 위상값의 경우, 정현파 모사에 필요한 초기 값 직전의 간섭 프린지 값을 입력받지 못하고, 최종 위상값의 경우에도 현 위치의 직후에 나타날 간섭 프린지 값을 입력받지 못하게 된다. 계산에 꼭 필요한 이 두가지 프린지 값은 좁은 구간 내에서의 마루와 골 값들의 선형적인 변화를 통해 예측한다. 이를 위해서는 예측해야 하는 프린지와 같은 종류의 최소 2개의 마루 또는 골 값이 필요하다. 최종 이동 변위는 다음 식 (6)과 같으며 N 은 마루와 골 개수의 합을 의미한다.

$$\Delta f_{total} = \phi_{initial} + (N - 1)\pi + \phi_{final} \quad (6)$$

위 식을 식 (4)에 대입하여 간극의 변위 ΔL 을 구할 수 있다.

3. 실시간 신호처리 프로그램

본 신호 처리 프로그램은 Intel Pentium-4 1.6 GHz 의 PC에 장착된 데이터 취득 보드(data acquisition board PCI-6110E, National Instruments)를 통해 EFPI 센서 시스템의 광 검출기 출력 전압을 PC로 읽어들이 센서 간극의 변위로 환산한다. 프로그램이 작성된 LabView의 특성상 EFPI 센서의 출력 전압을 입력받는 속도에는 한계가 있으며, 이는 NI사의 아날로그 입력 장치가 가지는 하드웨어적 한계 뿐 아니라, 데이터 입력과 동시에 변위 계산을 위해 이루어지는 연산들의 속도에도 관계가 있다. 빠른 속도의 CPU를 사용함으로써 고주파 신호의 해석에 필수적인 위상의 변위 환산 속도를 높일 수 있다.

측정 장비의 잡음 정도는 센서 시스템의 해상도를 결정하는 중요한 요소이다. 센서 간극의 변화는 간섭된 빛의 강도 변화를 가져오고, 이는 광 검출기의 출력 전

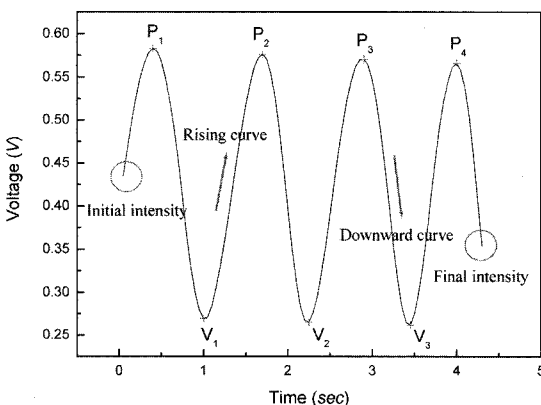


그림 4. EFPI 센서 신호의 구간별 특성
Fig. 4. Sections of EFPI output signal.

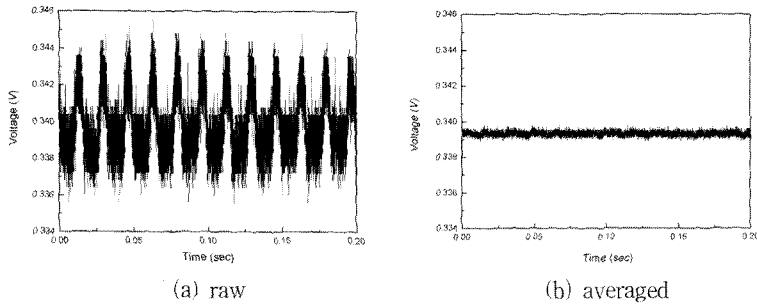


그림 5. 광 검출기의 잡음 신호
Fig. 5. Noise signal of photodetector.

압 변화로 신호 처리부에 입력되게 된다. 신호의 마루와 골 값의 차이가 0.580 V일 때 광 검출기에서 생기는 잡음의 형태를 Fig. 5(a)에 나타내었다.

해상도를 결정하는 잡음의 최대값과 최소값의 차는 약 0.01 V로서 변위로 환산하면 가장 영향을 많이 받는 프린지 부근에서 약 27 nm, 가장 영향이 적은 quadrature point에서 약 3.6 nm 크기가 된다. 그러나 잡음의 특성이 random noise가 아니므로 실시간 신호처리 프로그램의 평균화(averaging) 및 로우패스 필터링(lowpass filtering)과정을 거치게 되면 잡음의 크기는 Fig. 5(b)와 같이 약 1/10로 감소하게 되어 결국 프린지 부근에서 약 8.6 nm, quadrature point에서 약 0.36 nm의 크기가 된다. 즉 변형이 일어나는 때의 간극의 거리가 quadrature 부근인지 아닌지에 따라 해상도는 크게 달라지게 되며 본 시스템의 측정 가능한 이론적 해상도는 0.36~8.6 nm가 된다.

4. 나노 이송장치

위의 실시간 신호 처리 프로그램을 이용하여 광섬유 EFPI 센서와 압전 구동장치로 구성된 고정밀 선형 이송장치(linear translation stage)를 고안하였다.

Fig. 6의 나노 이송장치는 현미경과 translation stage를 사용하여 구성된 EFPI 센서 제작 기기에 압전 구동기(Piezo-electric actuator PE4, Thorlabs Inc.)를 부착하였고, 구동을 위하여 데이터 취득 보드의 아날로그 출력력을 전압 컨트롤러에 연결하여 전압을 인가하였다. 센서의 유리관 한쪽 끝단은 순간접착제를 이용하여 translation stage와 연결된 지그의 홈에 집착하였으며 stage가 움직임에 따라 유리관과 접촉된 90° 절단된 광섬유면과 반대쪽에 집착되어 고정된 금코팅된 광섬유 반사면의 거리가 앞서 나온 간극의 크기 d 가 된다.

Fig. 7은 제작된 나노 이송장치를 동작시키는 Lab-

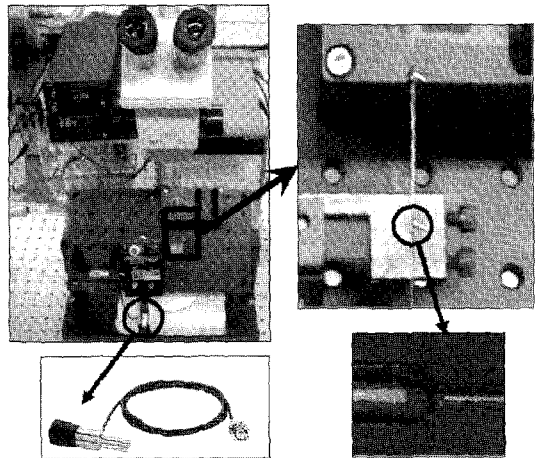


그림 6. 나노 이송장치의 구성
Fig. 6. Experimental setup of nano-positioner.

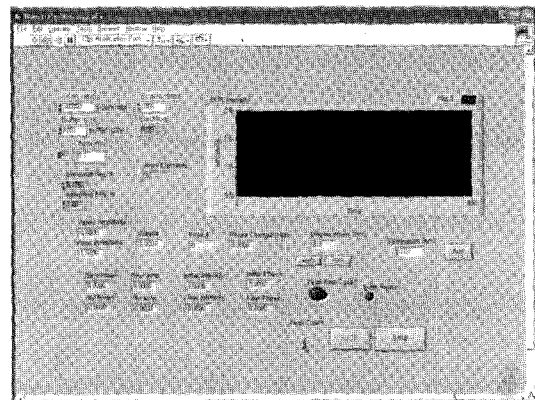


그림 7. 나노 이송장치 프로그램 제어 화면
Fig. 7. Control panel of nano-positioner program.

View 프로그램의 컨트롤 패널이다. 구동장치의 원하는 위치를 nm 단위로 입력하고 프로그램을 실행시키면

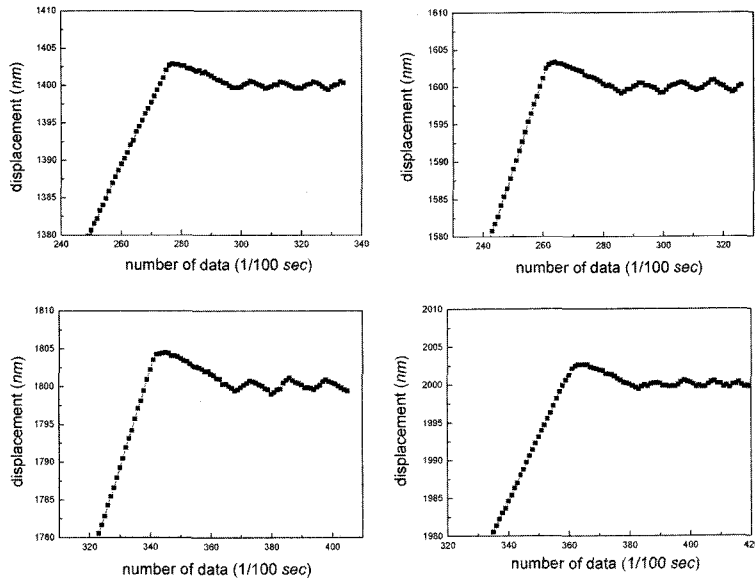


그림 8. 나노 이송장치의 변위 제어 결과
Fig. 8. Displacement control results of nano-positioner.

목표지점 이하의 변위에서는 구동 장치에 가해지는 전압이 약 0.1 nm 크기에 해당하는 미세한 전압만큼씩 더해지게 된다. 센서에서 측정되는 변위가 목표지점을 지나쳤을 경우 반대로 구동 장치에 가해지는 전압이 약 0.1 nm 크기에 해당하는 전압만큼 줄어든게 되고, 이 과정이 반복되면서 구동장치는 초기의 목표지점으로 수렴하게 된다.

목표지점을 1400~2000 nm로 200 nm씩 바뀌가며 앞에서 제작한 실시간 신호 처리 프로그램을 이용하여 광섬유 EFPI 센서의 변위를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 구동장치가 전진과 후진을 반복하는 범위는 참값으로부터 약 ± 1 nm이며 이는 제어 방법을 개선하면 더 작아질 수 있는 값으로 가변적인 측정 해상도와 무관하게 원하는 위치까지 이동하였다. 또한, 1 nm 이내에서도 선형적으로 움직임이 나타날 정도로 본 나노 이송장치가 원하는 위치로 매우 정밀하게 움직임을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 광섬유 EFPI 센서를 이용하여 0.36~8.6 nm 정도의 정밀도를 갖는 실시간 고정밀 변위 센서 시스템을 구성하였다. 새로운 EFPI 센서 시스템은 공기 난류(air turbulence)의 영향을 거의 받지 않으며 구성 장비의 규모가 작은 기존 EFPI 센서의 장점과 간

섭계 방식의 높은 민감도와 해상도를 갖는 간섭식 변위 센서의 장점을 모두 갖추고 있다. 또한 실시간으로 고정밀 변위의 측정이 필요한 이송 장치에 본 시스템을 적용하여 1 nm 이내의 정확도로 이송이 가능하였다. 이로써 주로 항공기나 건축물 같은 대형 구조물에만 적용되었던 스마트 구조의 개념을 정밀 구동 분야에 적용할 수 있는 발판을 마련했다 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21C 프런티어 연구개발사업(수소에너지사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] S. Hosoe, "Highly precise and stable displacement-measuring laser interferometer with differential optical paths", *Precision Engineering*, vol. 17, no. 4, pp. 258-265, 1995.
- [2] S. Hosoe, "Highly precise and stable laser displacement measurement interferometer with differential optical passes in practical use", *Nanotechnology*, vol. 4, no.2, pp. 81-85, 1993.
- [3] R. M. Measures and K. Liu, "Fiber optic sensors focus on smart systems", *IEEE Circuits Devices*

Mag., vol. 8, no. 4, pp. 37-46, 1992.

[4] 강현규, 박중완, 류치영, 홍창선, 김천근, “광섬유 센서 신호의 실시간 디지털 처리에 의한 구조물의 동적 변형률 측정”, 한국항공우주학회지, 제26권, 제2호, pp. 47-59, 1998.

[5] K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar, and R. O. Claus, “Quadrature phase-shifted, extrinsic fabry-perot optical fiber sensors”, *Optics Letters*, vol. 16, no. 4, pp. 273-275, 1991.



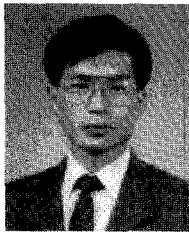
박 상 목

- 2003년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업(공학석사)
- 2003년~현재 한국과학기술원 항공우주공학과 박사과정
- 주관심분야 : 스마트 구조, 광섬유 센서



김 대 현

- 2004년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업(공학박사)
- 2004년~현재 U. C. Irvine 토목공학과 박사후 과정
- 주관심분야 : 스마트 구조, 광섬유 센서



김 천 근

- 1987년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업(공학박사)
- 1991년~현재 한국과학기술원 항공우주공학과 교수
- 주관심분야 : 스마트 구조, 복합재료