

로봇의 지능형 손을 위한 3축 손가락 힘센서 개발

김 갑 순*

Development of 3-axis finger force sensor for an intelligent robot's hand

Gab-Soon Kim*

Abstract

This paper describes the development of a 3-axis finger force sensor to grasp an unknown object safely in an intelligent robot's hand. In order to safely grasp an unknown object, robot's hand should measure the weight of an object and the force of grasping direction simultaneous. But, in the published papers, the grippers and hands equipped with the force sensor that could only measure the force of grasping direction, and grasped objects using their sensors. These grippers and hands can't safely grasp unknown objects, because they can't measure the weight of it. Thus, it is necessary to develop 3-axis force sensor that can measure the weight of an object and the force of grasping direction for an intelligent gripper. In this paper, 3-axis finger force sensor to grasp an unknown object safely in an intelligent robot's hand was developed. In order to fabricate a 3-axis finger force sensor, the sensing elements were modeled using parallel plate beams, and the theoretical analysis was performed to determine the size of sensing elements, then the 3-axis finger force sensor was fabricated. Also, the characteristic test of the developed 3-axis finger force sensor was performed.

Key Words : intelligent hand, intelligent gripper, 3-axis finger force sensor, multi-axis force sensor

1. 서 론

로봇은 다양한 분야의 산업에서 인간을 대신하여 많은 일을 하고 있으며, 앞으로도 더 많은 일을 할 것이다. 산업에서 사용되고 있는 산업용 로봇은 하나 혹은 두 가지의 결정된 일을 하도록 제작되고 있다. 이와 같은 로봇은 물체를 잡기 위해 로봇 그리퍼를 위치제어하거나 공기압이나 유압을 이용하여 일정한 힘이 작용되도록 제작되었다. 그러므로 무게와 같은 물체의 정보를 알 수 없는 위험물 등의 미지물체를 떨어뜨리거나 깨뜨리지 않고 안전하게 잡는 것이 매우 어렵다.

따라서 로봇의 그리퍼가 미지의 물체를 안전하게 잡기 위해서는 그리퍼에 작용되는 힘과 물체의 무게를 측정할 수 있는 힘센서가 부착되고, 이 신호를 이용한 힘제어가 이루어져야 한다. 즉, 미지물체를 안전하게 잡기 위해서는 물체를 잡아드는 순간 물체의 무게를 측정해야 하고, 감지된 물체의 무게에 따라 그리퍼가

잡는 힘이 결정되어야 하며, 그 결과를 이용하여 정밀하게 제어되어야 한다. 미지물체를 안전하게 잡기 위해서는 3개 방향의 힘 F_x , F_y , F_z 를 동시에 측정할 수 있는 3축 힘센서가 필요하다.

이미 발표된 논문^[1]에서는 물체를 잡는 방향으로 한 방향 힘센서를 부착하여 로봇의 지능형 손 혹은 그리퍼를 제작하고, 이를 힘제어하여 물체를 잡았다. 이와 같이 제작된 지능형 손 혹은 그리퍼는 잡는 방향으로만 힘제어하므로써 정해진 힘으로 알고 있는 물체를 안전하게 잡을 수 있지만, 무게를 측정할 수 없으므로 미지물체를 안전하게 잡을 수는 없다. 이것은 정해진 일정한 공기압이나 유압을 이용하여 물체를 잡는 산업용 로봇의 그리퍼와 기능이 비슷하다. 논문^[7]은 3개 방향의 힘 F_x , F_y , F_z 와 3개 방향의 모멘트 M_x , M_y , M_z 를 동시에 측정할 수 있는 센서이므로 미지물체를 안전하게 잡기 위한 그리퍼로 사용할 수 있으나 크기(길이 180 mm, 폭 100 mm, 높이 90 mm)가 크고, 정확하게 잡기 위해서는 3개 방향의 힘만 필요한데 3개의 모멘트 센서가 더 있으므로 가격이 매우 고가인 단점을 가지고 있다. 따라서 로봇의 지능형 손 혹은 그리퍼가 미

경상대학교 제어계측공학과 (ERI, Gyeongsang National University)

*Corresponding author: gskim@gsnu.ac.kr

(Received : April 14, 2006, Accepted : August 4, 2006)

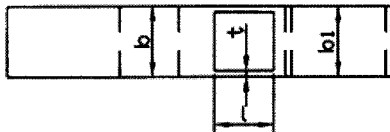
지물체를 안전하게 잡기 위해서는 물체의 무게를 측정함과 동시에 잡는 방향으로의 힘을 측정할 수 있는 3축 손가락 힘센서(힘 F_x, F_y, F_z 만 측정)의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 미지물체를 안전하게 잡기 위한 3축 손가락 힘센서를 개발하였다. 로봇의 손 혹은 그리퍼를 제작하기 위해 F_x 센서, F_y 센서 및 F_z 센서가 한 몸체로 구성된 3축 손가락 힘센서를 모델링하였고, 각 센서의 감지부 크기설계를 위한 이론식을 유도하였으며, 이를 토대로 정격용량이 각각 10 N인 F_x 센서, F_y 센서 및 F_z 센서가 한 몸체로 구성된 3축 손가락 힘센서를 설계하였다. 그리고 스트레인게이지를 부착하여 3축 손가락 힘센서를 제작하였으며, 이것을 특성실험하였다.

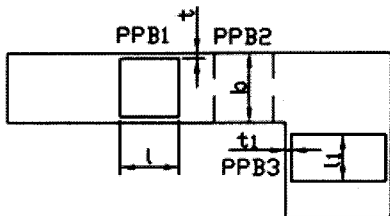
2. 3축 손가락 힘센서 설계 및 제작

2.1. 3축 손가락 힘센서의 모델링

본 논문에서는 미지물체를 안전하게 잡기 위한 로봇의 손 혹은 그리퍼 제작을 위해 F_x 센서, F_y 센서 및 F_z 센서가 한 몸체로 구성된 3축 손가락 힘센서를 모델링하였다. 그림 1은 x, y, z 방향의 힘 F_x, F_y, F_z 를 동시에 측정할 수 있는 3축 손가락 힘센서의 모델링을 나타내고 있으며, (a)는 측면도, (b)는 정면도이다. 3축 손가락 힘센서의 감지부는 3개의 평행평판(PPB : parallel plate beam)을 한 몸체로 하여 기억자형태의 모습이다. 힘 F_x 센서의 감지부는 PPB2, F_y 센서의 감지부는 PPB1, F_z 센서의 감지부는 PPB3이다. PPB1과 PPB2의 빔의 크기는 길이가 l , 폭이 b , 높이가 t 이고, PPB3은



(a) Side view (측면도)



(b) Front view (정면도)

그림 1. 3축 손가락 힘센서의 모델링
Fig. 1. Modeling of 3-axis finger force sensor.

길이가 l_1 , 폭이 b_1 , 높이가 t_1 이다. 각 센서들의 감지부의 크기를 결정하기 위해서는 각각의 센서에 정격하중이 가해질 때 빔의 표면에 발생하는 변형률을 계산하는 이론식을 유도해야 한다.

2.2. 센서 감지부의 이론해석

힘 F_x 센서의 감지부 PPB2, F_y 센서의 감지부 PPB1, F_z 센서의 감지부 PPB3가 모두 평행평판이므로 힘 F_x 를 감지하는 감지부 PPB2만 이론해석하고 이식을 다른 평행평판에 적용하여 각 센서의 감지부 크기를 결정한다. 그리고 PPB2를 구성하는 두개의 빔의 크기가 같으므로 빔1만 해석하고 이식을 빔2에도 적용한다.

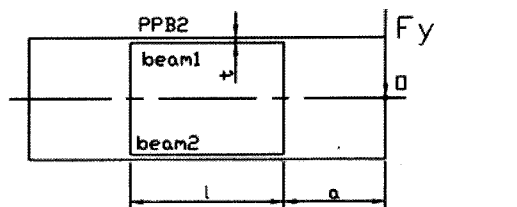
그림 2는 힘 F_y 가 점 O에 가해질 때 빔1과 블록에 작용되는 힘과 모멘트를 나타내고 있으며, (a)는 측면도, (b)는 정면도이다. 빔1에 작용되는 y방향의 힘 F_{Fyy} , z방향의 힘 F_{Fyz} 과 x방향의 모멘트 M_{Fyx} 식을 유도하면^[7,8] 각각 식 (1)~(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{Fyy} = \frac{12EI}{l^3} \left[u + \left(a + \frac{l}{2} \right) \phi \right] \quad (1)$$

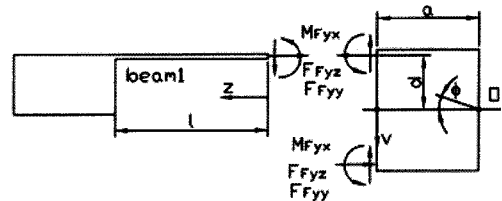
$$F_{Fyz} = \frac{AE d}{l} \phi \quad (2)$$

$$M_{Fyx} = \frac{12EI}{l^2} \left[\frac{u}{2} + \left(\frac{a}{2} + \frac{l}{3} \right) \phi \right] \quad (3)$$

여기서, E 는 재료의 종탄성계수, I 는 2차 단면 모멘트,



(a) Side view (측면도)



(b) Front view (정면도)

그림 2. 힘 F_y 가 가해질 때 F_y 센서를 위한 PPB2의 형상도
Fig. 2. Free body diagram of PPB2 for F_y sensor under the force F_y .

u 는 블록의 수직처짐, ϕ 는 블록의 회전각, A 는 빔의 단면적, d 는 블록의 수평중심선으로부터 빔의 중심선까지의 거리, a 는 블록의 길이이다.

힘과 모멘트 평형조건식 $\sum F_x=0, \sum F_y=0, \sum M_o=0$ 식을 구하고^[7,8] 이식에 힘과 모멘트식 (1)~(3)을 대입하여 O점을 기준으로 블록이 회전하는 회전각 ϕ 와 블록의 수직처짐 v 의 식을 유도하면 각각 식 (4), (5)와 같다.

$$\phi = \frac{(2a+l)F_y}{\frac{48EI}{l^2}\left(\frac{3}{2}a+\frac{2}{3}l\right) + \frac{4AE d^2}{l}} \quad (4)$$

$$u = \frac{F_y - \frac{24EI}{l^2}\left(a+\frac{l}{2}\right)\phi}{\frac{24EI}{l^2}} \quad (5)$$

임의의 점 z 에서 굽힘모멘트 Mz 를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$M_z = F_{Fyy}z - M_{Fyx} = \frac{12EIz}{l^2}\left[u + \left(a+\frac{l}{2}\right)\phi\right] - \frac{12EI}{l^2}\left[\frac{l}{2} + \left(\frac{a}{2}+\frac{l}{3}\right)\phi\right] \quad (6)$$

인장변형률식과 압축변형률식에 식 (1)~(6)을 대입하고 이것들을 중첩시켜 빔1의 윗면과 아랫면의 변형률식을 유도하면 각각 다음과 같다.

$$\varepsilon_{Fy-U} = \frac{6tx}{l^2}\left(u + \left(a+\frac{l}{2}\right)\phi\right) - \frac{6t}{l^2}\left(\frac{u}{2} + \left(\frac{a}{2}+\frac{l}{3}\right)\phi\right) + \frac{d\phi}{l} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{Fy-L} = \frac{6tx}{l^2}\left(u + \left(a+\frac{l}{2}\right)\phi\right) + \frac{6t}{l^2}\left(\frac{u}{2} + \left(\frac{a}{2}+\frac{l}{3}\right)\phi\right) + \frac{d\phi}{l} \quad (8)$$

2.3. 3축 손가락 힘센서 설계 및 제작

3축 손가락 힘센서의 각 센서들의 감지부의 크기를 설계하기 위한 변수는 빔의 길이, 폭, 높이와 정격변형률, 정격하중, 스트레인게이지의 부착위치 등이다. 정격하중은 3개의 센서 모두 10 N, 정격변형률은 870 $\mu\text{m}/\text{m}$, 스트레인게이지의 부착위치는 길이방향이 블록으로부터 2 mm이고 폭방향은 중심선상으로 결정하였다. 이 결정된 값들과 식(7), (8)를 이용하여 각 센서의 감지부의 크기를 계산하였다. 그 결과, PPB1과 PPB2의 빔의 크기는 길이 $l=10$ mm, 폭이 $b=12$ mm, 높이가 $t=0.7$ mm, 블록의 중심으로부터 빔의 중심까지의 거리 $d=5.65$ mm이고, PPB3은 길이가 $l_1=8$ mm, 폭이 $b_1=12$ mm, 높이가 $t_1=0.57$ mm, 블록의 중심으로부터

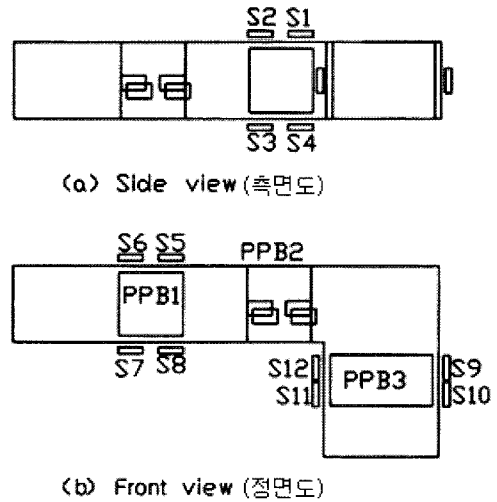


그림 3. 각 센서의 스트레인게이지 부착위치
Fig. 3. Locations of strain gages for each sensor.

빔의 중심까지의 거리 $d_1=8.72$ mm이다. 감지부의 재질은 소형 힘센서의 감지부로 많이 사용되는 알루미늄 2024-T351을 사용하였다.

그림 3은 3축 손가락 힘센서를 제작하기 위한 스트레인게이지 부착위치를 나타낸 것이며, (a)는 측면도, (b)는 정면도이다. 힘 F_x 를 감지하는 센서의 스트레인게이지는 S5~S8, F_y 인 경우에는 S1~S4, F_z 인 경우에는 S9~S12로 선정하였다.

각 힘센서는 휘스톤 브리지회로를 구성하여 제작된다. 각 힘센서의 정격변형률과 상호간섭오차는 스트레인게이지의 부착위치에서의 변형률을 식 (9)에 의해 계산할 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \quad (9)$$

여기서 ε 은 휘스톤 브리지회로로부터 계산된 변형률, ε_{T1} 은 인장 스트레인게이지 T_1 의 변형률, ε_{T2} 는 인장 스트레인게이지 T_2 의 변형률, ε_{C1} 은 압축 스트레인게이지 C_1 의 변형률, ε_{C2} 은 압축 스트레인게이지 C_2 의 변형률이다.

식 (7)과 (8)를 이용하여 스트레인게이지 부착위치에서의 계산한 변형률을 식 (9)에 대입하여 계산한 정격 변형률은 F_x 센서, F_y 센서, F_z 센서 875 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었고, 각 센서의 상호간섭오차는 모두 0이었다. 각 센서의 상호간섭오차가 0인 것은 완전결선회로의 결선을 고려하여 스트레인게이지의 부착위치를 결정하였으며, 게이지의 부착을 게이지의 중심선과 평판보의 중심선이 일치하도록 하였기 때문이다.

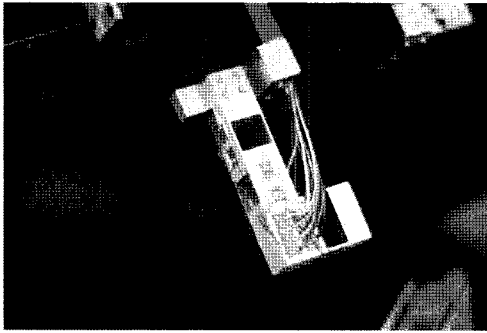


그림 4. 개발된 3축 손가락 힘센서
Fig. 4. Photograph of developed 3-axis finger force sensor.

3축 손가락 힘센서는 그림 3에 나타난 스트레인게이지의 부착위치에 순간접착제(M-bond 200)를 이용하여 스트레인게이지(N2A-13-T001N-350)를 부착하였으며, 휘스톤 브리지회로를 구성하여 제작하였다⁷⁻⁹⁾. 그림 4는 본 논문에서 개발한 3축 손가락 힘센서를 나타내고 있다.

3. 실험 및 고찰

그림 5는 3축 손가락 힘센서의 특성실험을 위한 시험장치를 나타내고 있으며, 암(arm), 추(weight), 몸체(body), 디지털 멀티미터(digital multi-meter, ADCAN-TEST, R6552), 파워서플라이(power supply, UNICORN, UP-100DT)로 구성되었다. 3축 힘센서는 센서의 한쪽 끝의 나사부분에 고정지그로 고정하여 시험장치의 몸체에 고정하고, 다른 쪽 끝의 나사부분에 다른 고정지그로 고정하여 암에 고정한다. 3축 손가락 힘센서의 특성실험은 그림 5에 나타난 특성실험장치를 이용하여 힘 F_x , F_y , F_z 를 각각 10 N을 센서에 가하여 각

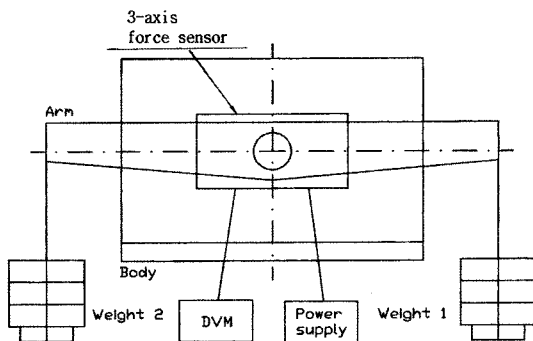


그림 5. 3축 손가락 센서의 실험장치
Fig. 5. Experimental set up for 3-axis finger force sensor.

각 3회씩 실시하였으며⁸⁾, 그리고 그 값들을 평균하였다. 이론식과 특성시험에 의한 정격출력의 단위를 같게 하기 위하여 특성시험에 의한 각 센서의 정격출력의 단위가 mV/V 이므로 이론식에 의한 정격변형률($\mu m/m$)을 정격출력(mV/V)으로 바꾸어야 한다. 정격변형률을 정격출력으로 바꾸는 식은 다음과 같다.

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K \epsilon \tag{10}$$

여기서, E_i 는 완전결선회로의 입력전압(V), E_o 는 완전결선회로의 출력전압(V), K 는 스트레인게이지 상수이고, 사용된 스트레인게이지의 게이지상수는 2.03, ϵ 는 각 센서의 정격변형률($\mu m/m$)이다.

식 (9)에 대입하여 계산한 F_x 센서, F_y 센서, F_z 센서의 정격변형률 875 $\mu m/m$ 을 식 (10)에 대입하여 정격출력(mV/V)으로 변환하였다. 표 1과 2는 유도된 이론식과 특성시험에 의한 3축 손가락 힘센서1과 2의 정격출력을 나타내었다. 이론식에 의한 정격출력을 기준으로 실험에 의한 정격출력을 비교한 결과, 1.13%~9.68%의 오차를 보였다. 이와 같이 오차가 발생된 것은 센서의 가공오차와 스트레인게이지의 부착오차 때문인 것으로 생각된다. 이와 같은 결과를 볼 때, 본 논문에서 유도

표 1. 3축 손가락 센서1의 정격출력의 이론과 실험 결과
Table 1. Rated output of 3-axis finger force sensor 1 in theory and characteristic test

Sensor	Analysis	Rated output (mV/V)	Error (%)
Fx	Theory	0.444	9.0%
	Test	0.484	
Fy	Theory	0.444	7.88%
	Test	0.479	
Fz	Theory	0.444	1.13%
	Test	0.439	

표 2. 3축 손가락 센서2의 정격출력의 이론과 실험 결과
Table 2. Rated output of 3-axis finger force sensor 2 in theory and characteristic test

Sensor	Analysis	Rated strain (mV/V)	Error (%)
Fx	Theory	0.444	9.68%
	Test	0.487	
Fy	Theory	0.444	6.98%
	Test	0.475	
Fz	Theory	0.444	4.51%
	Test	0.464	

표 3. 3축 손가락 센서1의 상호간섭오차
Table 3. Interference error of 3-axis finger force sensor 1 in characteristic test

Force	Interference error (%)		
	Fx sensor	Fy sensor	Fz sensor
Fx=10 N	-	2.61	1.82
Fy=10 N	2.27	-	0.46
Fz=10 N	3.01	2.82	-

표 4. 3축 손가락 센서2의 상호간섭오차
Table 4. Interference error of 3-axis finger force sensor 2 in characteristic test

Force	Interference error (%)		
	Fx sensor	Fy sensor	Fz sensor
Fx=10 N	-	0.42	2.45
Fy=10 N	2.52	-	1.72
Fz=10 N	2.98	0.59	-

한 식 (7)과 (8)은 고안한 3축 손가락 힘센서의 설계를 위한 정격변형률을 계산하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

표 3과 4는 각각 3축 손가락 힘센서1과 2의 상호간섭오차를 나타내고 있다. 3축 손가락 힘센서1의 최대 상호간섭오차는 Fz=10N을 가했을 때 Fx센서에서 3.01%가 나타났으며, 3축 손가락 힘센서2의 최대상호간섭오차는 Fz=10N을 가했을 때 Fx센서에서 2.98%가 나타났다. 이와 같이 상호간섭오차가 발생하는 것은 센서의 가공오차와 스트레인게이지의 부착오차, 특히 측정시 소형 센서에서 발생하는 흔들림 오차, 등 때문인 것으로 생각된다.

따라서 개발한 3축 손가락 힘센서의 최대상호간섭오차는 3.01%이고, 이것은 선진국에서 상품화된 다축 힘센서의 상호간섭오차와 비슷한 수준이며, 정격용량이 10N이하의 소형센서인 것을 감안하면 매우 우수한 것으로 판단된다⁷⁻⁹⁾.

4. 결 론

본 논문에서는 미지물체를 안전하게 잡기 위한 3축 손가락 힘센서를 개발하였다. 개발한 3축 손가락 힘센서는 상호간섭오차가 최대 3.01%이하이므로 선진국 수준과 비슷함을 확인하였으며, 유도한 식들은 3축 손

가락 힘센서를 설계하는데 유용하게 사용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 개발한 3축 손가락 힘센서는 미지물체를 안전하게 잡기 위한 로봇의 손 및 그리퍼를 제작하는데 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] P. J. Kybed, C. Light, P. H. Chappel, J. M. Nightigale, D. Whatley, and M. Evans, "The design of anthropomorphic prosthetic hands: a study of the Southampton Hand", *Robotica*, vol. 19, no. 6, pp. 593-600, 2001.
- [2] P. H. Chappel and J. A. Elliott, "Contact force sensor for artificial hands with a digital interface for a controller", *Measurement Science and Technology*, vol. 14, no. 8, pp. 1275-1279, 2003.
- [3] Y. Takahashi, "Human balance measurement and human posture assist robot design", *SICE'99 July 28-30*, pp. 983-988, 1999.
- [4] F. Kanehiro, "Development methodology for building whole body humanoid system", *Proceeding of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1210-1215, 1999.
- [5] S. Charoenseang, "Intergrating visual feedback and force feedback in 3-D collision avoidance for a dual-arm humanoid robot", *Proceeding of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3406-3410, 1998.
- [6] H. Takanobu, "Remote interaction between human and humanoid robot", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 25, pp. 371-385, 1999.
- [7] G. S. Kim and H. D. Lee, "Development of a six-axis force/moment sensor and its control system for an intelligent robots gripper", *Measurement Science and Technology*, vol. 14, pp. 1265-1274, 2003.
- [8] G. S. Kim, "The design of a six-component force/moment sensor and evaluation of its uncertainty", *Measurement Science and Technology*, vol. 12, pp. 1445-1455, 2001.
- [9] G. S. Kim, "Development of a 6-axis robot's force/moment sensor for stable grasping of an unknown object", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 5, no. 3, pp. 54-61, 2004.



김 갑 순

- 1990년 8월 한양대학교 정밀기계공학과 (자동화시스템전공)(학공석사)
- 1999년 8월 한양대학교 정밀기계공학과 (자동화시스템전공)(학공박사)
- 1990년 2월~2000년 2월 한국표준과학연구원 선임연구원
- 1996년 독일연방물리청 객원연구원
- 2003년 7월~2004년 7월 일본쓰쿠바대학교 지능로봇연구실 교환교수
- 2000년 3월~현재 경상대학교 제어계측공학과 부교수