

어븀 첨가 광섬유형 링 레이저와 광섬유 격자 기반 센서를 이용한 원거리의 온도 및 전류 측정

손경락† · 심준환* · 양규식**

(원고접수일 : 2008년 5월 22일, 원고수정일 : 2008년 8월 25일, 심사완료일 : 2008년 9월 5일)

Remote Measurement of a Distant Temperature and Current using Fiber Bragg Grating Sensors and Erbium-doped Fiber Ring Laser

Kyung-Rak Sohn† · June-Hwan Shim* and Gyu-Sik Yang**

Abstract : A long-distance remote sensing of temperature and current based on a fiber Bragg grating (FBG) is proposed and demonstrated. The thermal expanding effect of the epoxy and the Er-doped fiber ring laser (EFRL) are applied to the sensor system to enhance the temperature and current sensitivity. An EFRL with a 5 km-single-mode fiber and a FBG shows a high extinction ratio of more than 60 dB and a low power fluctuation of less than 1 dB. The metal wires are used to supply the current to the sensors. When the NOA65 puts on the FBG as a thermal expanding material, the temperature and current sensitivity of the lasing wavelength shift are about 30 pm/°C and 3pm/mA, respectively. The proposed sensing scheme is useful for measurement of current or temperature at a distant object of more than several km.

Key words : Fiber optic sensor (광섬유 센서), Fiber bragg grating (광섬유 브래그 격자), Erbium-doped fiber ring laser (어븀 첨가 광섬유 링 레이저), Coefficient of thermal expansion (열팽창계수), Long-distance sensor (원거리 센서), Temperature sensor(온도센서), Current sensor(전류센서)

1. 서 론

광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg grating: FBG)는 파장 선택성, 광섬유 호환성, 제작의 용이성, 사용 및 설치의 편리함 등으로 광통신 및 광센서 분야 등에서 매우 폭 넓게 응용되고 있다^[1].

특히 광센서 활용분야로는 건축이나 선박의 구조물, 교량, 터널 등의 안전 진단 분야에 최근 큰 관심을 끌고 있다^[2]. 주로 정밀하게 인장력이나 온도 변화를 측정하기 위한 연구가 활발하게 진행이 되고 있으며 상당한 성과들이 발표되고 있는 실정이다^{[3]-[9]}. 수동형 광섬유 브래그 격자는 광 대역 광

† 교신저자(한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부, E-mail:krsohn@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4312)

* 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부

** 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부

원이나 파장가변 레이저를 이용하여 센서에서 감지한 물리적인 변화량을 얻어내고 있으나 브래그 격자로부터 반사되는 빛의 세기는 광원의 세기에 의존하므로 신호 대 잡음 비를 제약하는 요인으로 작용한다. 그러므로 장거리에 위치한 센서의 경우 레일레이 산란 등에 의해서 센서 시스템의 정확도를 저하시키는 결과를 초래할 수 있다. 광섬유형 레이저를 기반으로 하는 능동형 브래그 격자 센서 시스템은 높은 출력과 좁은 선폭으로 인하여 이러한 문제를 상당히 줄일 수 있다. L-Y. Shao 등은 Er:Yb가 첨가된 광섬유에 브래그 격자를 이용하여 16.5 mm의 공진기를 만들어 발진되는 레이저를 구현함으로써 변형률과 온도를 측정하는 센서로 활용할 수 있음을 제안하였고^[3], T. V. A. Tran 등은 클래딩의 일부가 식각된 광섬유 브래그 격자와 광섬유형 라만 레이저를 이용하여 50 km의 거리에 위치한 대상 체의 변형률과 온도를 측정할 결과를 보고 하였다^[4].

본 논문에서는 어븀 첨가 광섬유를 이용한 광증폭기의 원리와 5 km 길이의 일반 통신용 광섬유를 이용하여 원격지의 전류와 온도를 측정할 수 있는 센서를 제안하였다. 센서와 링 레이저의 동작원리와 제작방법을 소개 하였으며 전류와 온도 변화에 대한 응답 특성을 측정하여 분석한 결과를 제시 하였다.

2. 동작원리

열 팽창 효과에 의한 광섬유 격자의 파장 가변은 광섬유에 가해지는 인장력과 굴절률의 변화에 기인한다. 이것은 브래그 파장을 계산하는 $\lambda_B = 2n\Lambda$ 로부터 유도되어진다. 브래그 파장의 천이 $\Delta\lambda_B$ 는 식 (1)과 같이 계산되어 진다^[5].

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n\Lambda + 2n\epsilon_z\Lambda \tag{1}$$

여기서 n 은 왜란이 없는 상태에서의 광섬유의 굴절률, Λ 는 브래그 격자의 주기, Δn 은 굴절률의 차이, ϵ_z 는 코어에 대하여 축 방향으로 가해진 광섬유의 변형률이다. 온도 변화(ΔT)에 의한 굴절률의

변화(Δn)는 식 (2)로 표현되어진다.

$$\begin{aligned} \Delta n &= \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_\rho \rho \Delta T + \left(\frac{\partial n}{\partial n}\right)_T n \\ &= \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_\rho \Delta T - \frac{n^3}{2} [(P_{11} + P_{12})\epsilon_r + P_{12}\epsilon_z] \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 ρ 는 코어의 밀도, ϵ_r 은 광섬유의 방사 방향의 변형률이다. P_{11} 과 P_{12} 는 광섬유의 포켈 상수(Pockels coefficients)이며 각각 0.121과 0.270 이다.

$\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_\rho \frac{1}{n}$ 은 $6.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 로 계산되어진다. 식 (2)의 오른쪽 수식의 첫 번째 항은 온도에 의해서 유도된 굴절률의 변화이며 두 번째 항은 광탄성 효과로서 변형률과 pockel 계수로서 나타난다.

일반적으로 광섬유 격자는 수십 또는 수백 나노미터의 주기를 가지므로 외부의 물리적인 변화에 민감하게 반응을 하게 된다. 그러나 광섬유의 열팽창 계수가 $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 로 매우 작아 온도 및 전류 변화에 대한 민감도를 높이는데 한계가 있다.

본 연구에서는 광섬유보다 열팽창 계수가 훨씬 큰 에폭시 계열의 물질을 이용하여 수km 이상 떨어진 곳의 온도 또는 전류를 측정할 수 있는 센서를 제작하고자 한다. Table 1은 몇 가지 재료에 대한 열팽창 계수를 비교한 것을 보여주고 있다.

Table 1 Coefficient of thermal expansion

Material	Optical fiber	Copper	NOA65	Glass
ppm/ $^\circ\text{C}$	0.55	12	225	8.5

3. 센서설계 및 제작

3.1 광섬유 브래그 격자 센서부

광 민감성이 높은 단일모드 광섬유상에 자외선과 위상 마스크를 이용하여 빛을 조사하게 되면 간섭 현상에 의해서 광섬유의 코어에 주기적인 굴절률 변화가 유도된다. 이러한 소자는 주기와 관계되는 특정한 파장의 빛만 반사시키는 대역 투과 필터 특성을 얻을 수 있다. Fig. 1은 사용된 광섬유 브래

그 격자의 투과 스펙트럼과 반사 스펙트럼을 보여주고 있다. 1539.7 nm의 브래그 파장을 가지며 10 dB 정도의 반사도를 가진다.

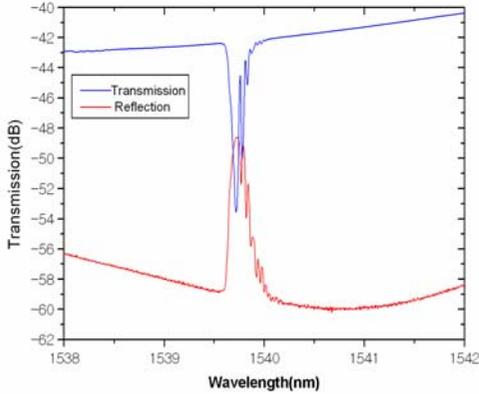


Fig. 1 Transmission and reflection spectrum of the FBG

Fig. 2는 제작된 센서의 개략도이다. 황동선을 이용하여 길이 4 cm 정도의 열선을 만들고 그 위에 광섬유 브래그 격자가 새겨진 부분을 중심 위치시키고 자외선경화제의 일종인 NOA65를 도포하여 20분 정도 자외선 램프를 조사하여 완전히 경화시킨다. Table 1에서 제시한 것과 같이 NOA65의 경우 열팽창 계수는 $225 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 로 광섬유와 비교하여 매우 큰 값을 가지고 있다. 황동선에 전류를 흘리게 되면 저항열이 발생하게 되는데 발열량에 의해 NOA65는 팽창하게 되고 이것은 광섬유 격자의 브래그 주기를 변화시키는 역할을 한다.

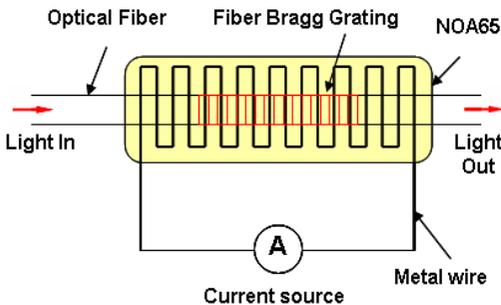


Fig. 2 Schematic of the optical fiber sensor based on the FBG

3.2 EDF를 이용한 링 레이저 기반 원거리 온도 및

전류 변화 측정 센서

광섬유 브래그 격자를 이용한 변위센서에서 반사 파장을 이용하기 위해 주로 광대역 광원을 사용한다. 그러나 센서가 수 km 이상 원거리에 설치되어 원격 모니터링을 해야 하는 경우 여러 가지 광 손실로 인하여 제약을 받게 된다. 본 연구에서는 광섬유형 레이저를 이용하여 이러한 문제점을 해결하고자 하였다.

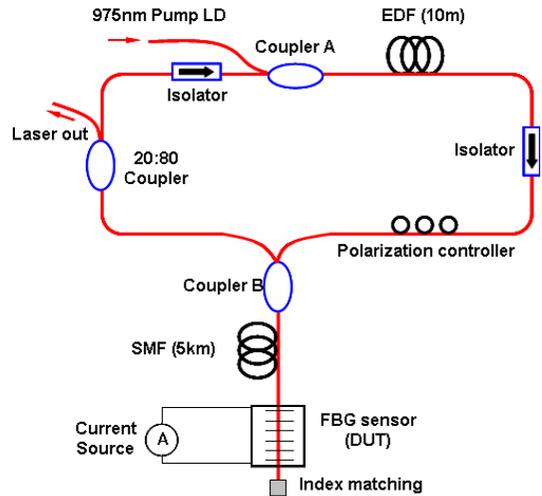


Fig. 3 Configuration of the FBG sensor using EDF ring laser for detecting a distant temperature and current change

Fig. 3은 어븀 첨가 광섬유를 이용한 광섬유형 링 레이저와 광섬유 브래그 격자 센서가 결합된 센서 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 10 m 길이의 어븀 첨가 광섬유를 사용하여 발진에 필요한 이득을 제공할 수 있도록 하였으며 지속적인 발진이 이루어질 수 있도록 975nm 레이저 다이오드로 펌핑 시켰다. 광 아이솔레이터(isolator)는 975 nm의 펌핑 광이 링 레이저의 양방향으로 전달되는 것을 막고 1550 nm 영역의 광 신호가 한 방향으로 빠져나갈 수 있도록 해준다. 편광 조절기(Polarization controller)는 공진기를 한 바퀴 돌아온 모드들 중 이득이 집중된 특정한 파장의 위상을 동 위상으로 맞추어 주어 최대 발진이 일어날 수 있도록 한다. 편광 조절기를 통과한 빛은 결합

기 B를 통하여 5 km 일반 통신용 광섬유로 연결된 브래그 격자 센서로 전달된다. 브래그 격자에서는 격자주기에 해당하는 특정한 파장의 빛을 반사시키고 반사된 빛은 다시 5 km의 광섬유를 되돌아간 후 결합기 B를 통하여 20:80 결합기로 향하게 된다. 이중 20 %만이 레이저의 출력으로 나가고 나머지 80 %는 케환되어 발진을 유지할 수 있도록 한다. 제안된 센서 시스템의 경우 레이저의 공진기가 고리형의 광섬유로 이루어져 있으며 브래그 격자의 반사되는 빛의 파장에 의해서 레이저의 공진파장이 결정된다. 그러므로 브래그 파장이 외부의 물리적인 요인에 의해서 바뀐다면 이것을 레이저의 발진파장의 이동으로 측정해 낼 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 제작된 센서 시스템의 모습이다. 어블럼 첨가 광섬유를 이용한 광섬유 증폭기와 브래그 격자를 이용한 파장 가변 필터의 두개 부분으로 구별하여 제작하였으며 광 점프 케이블과 편광 조절기를 이용하여 서로 연결하였다. 5km 단일모드 광섬유는 코닝사의 SMF-28을 사용하였으며 5km 끝단에 그림 2에서 제안한 브래그 격자 광섬유 센서 제작하여 광섬유 융착기로 연결하였다.

Fig. 5는 센서에 설치된 황동 선에 전류를 흘렸을 때 레이저의 발진파장이 이동하는 정도를 측정 한 스펙트럼을 보여주고 있다. 펄스 레이저 다이오드의 구동 전류는 60mA이며 전류가 인가되기 전 센서의 중심파장은 1539.5nm 였다. 레이저 출력 광에 대한 소멸비가 60dB 이상으로 매우 우수한 발진특성을 보이고 있다. 전류가 인가됨에 따라 중심파장이 장파장 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있는데 황동선의 저항 열에 의하여 센서부의 온도가 상승하게 되고 열팽창 계수에 의하여 NOA65의 부피가 늘어나기 때문이다. 이것은 NOA65에 의하여 접착 되어진 브래그 센서의 주기를 늘어나게 하는 효과를 줌으로서 공진파장의 천이를 유도한다. 1A의 전류를 흘렸을 때 발진파장이 1.7nm 정도 장파장으로 이동하였다.

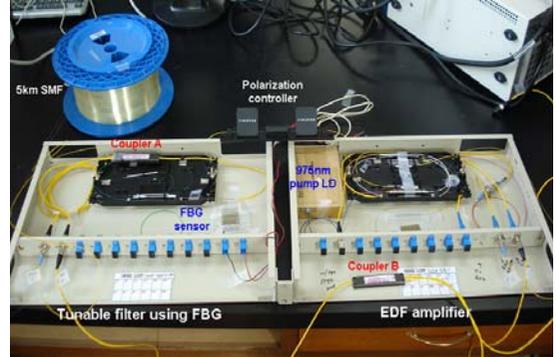


Fig. 4 Photograph of the fabricated sensor system.

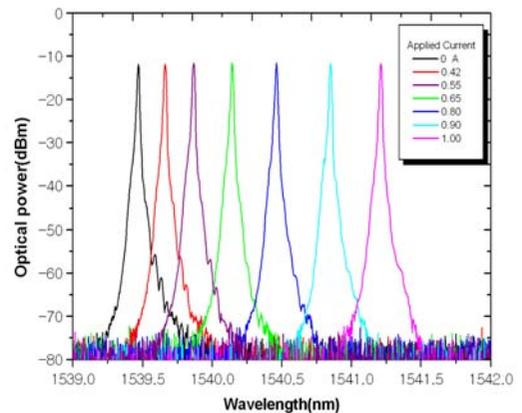


Fig. 5 Tunable spectral responses as a function of the applied current change

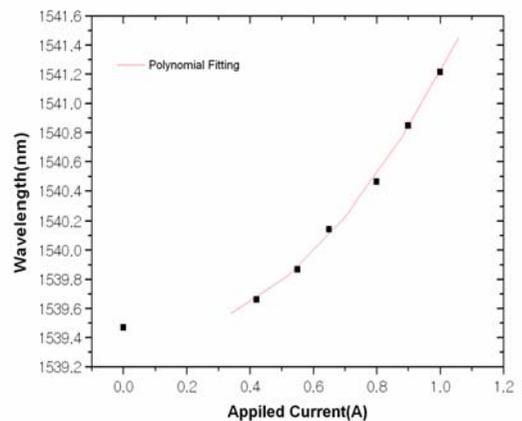


Fig. 6 A plot of the shift in resonant wavelength versus applied current.

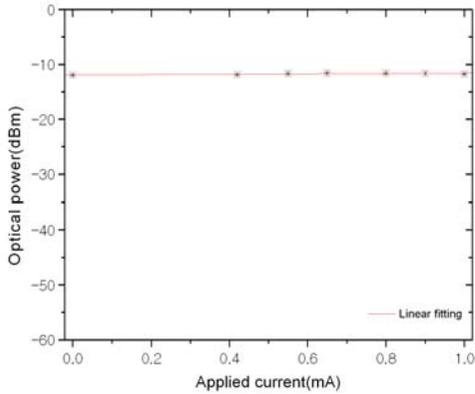


Fig. 7 A plot of the peak power variation at the lasing wavelength versus applied current

Fig. 6은 인가된 전류에 대한 링 레이저의 발진 파장의 변화를 보여주는 그래프이다. 전류에 대한 발진파장의 이동관계가 저 전류 상태에서는 선형적이지 못한 특성을 보인다. 이것은 황동선이 저항 열에 의해서 실온 상태까지 발열하는데 필요한 최소한의 전류를 요구하기 때문이며, 실온 이상의 저항 열이 NOA65에 가해지게 되면 팽창을 하게 되고 0.5A 이상의 전류에서는 거의 선형적인 관계를 보여준다. 선형역영에서 전류변화에 대한 발진파장의 이동정도는 3 pm/mA이다. 이러한 전류 감지 센서는 원거리에 위치한 장치의 과전류를 감시하고 단속하는 시스템에 응용될 수 있다.

Fig. 7은 전류의 변화에 의한 브래그 격자 주기의 변화로 레이저의 발진파장이 이동할 때 광 출력의 변화를 나타낸 것이다. 측정 범위 내에서 광 출력의 변화는 1dB 미만으로 매우 안정적으로 유지됨을 알 수 있다. 5km 단일모드 광섬유를 링 레이저 구조에 직렬로 연결하여 공진기 길이가 늘어나더라도 정상적인 발진을 유지함을 확인한 것으로 실시간으로 원격 모니터링이 가능함을 보여준다.

Fig. 8은 온도 변화에 따른 링 레이저 센서 시스템의 발진파장의 변화를 보여주는 그래프이다. 센서의 동작원리가 물질의 열팽창 효과이므로 NOA65의 높은 열팽창계수를 이용하면 온도 센서로도 활용할 수 있다. 실온에서 80°C까지 온도를 변화시켰을 때 발진파장의 이동을 나타내었다. 전류의 변화에 대한 발진파장의 이동도와는 달리 온

도변화에 대해서는 30nm/°C의 민감도를 가지며 매우 선형적인 관계를 보인다. 이것으로부터 원거리에 위치한 대상체의 온도를 정량적으로 모니터링할 수 있음을 알 수 있다.

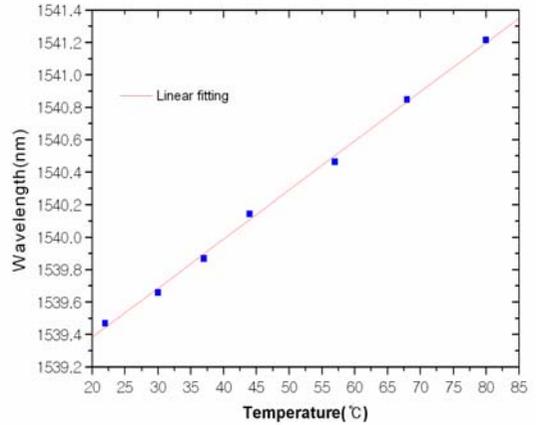


Fig. 8 A plot of the shift in resonant wavelength versus applied current. The sensitivity is a 30pm/°C.

5. 결 론

광섬유 브래그 격자와 에폭시의 열팽창 계수를 사용하여 수km이상 떨어진 곳의 전류와 온도를 감시할 수 있는 광섬유형 센서를 구현하였다. 원거리에 따른 광 신호 손실 문제를 해결하기 위하여 어븀 첨가 광섬유를 이용한 광증폭기와 브래그 격자로 제작된 광섬유 센서를 결합함으로써 링 레이저를 구현하였다. 공진기의 길이가 수 km 상태에서도 60 mA의 펄핑 전류에 1 dB 이하의 출력 광 전력의 변화를 보일 정도로 매우 안정적으로 동작하였다. 전류 검출 센서로서 1 mA의 전류 변화에 대하여 3pm의 발진파장의 변화를 얻었으며 온도 센서로서 1°C 변화에 대하여 30pm의 발진파장의 이동을 보였다. 제안된 센서는 원격지의 화재 및 고온에 따른 시설물의 안전성을 실시간으로 모니터링 하거나 전력설비 관련 과전류로 인한 폭발이나 이상상태를 감시하는 센서 시스템으로 활용 가능하다.

참고문헌

- [1] T. Poloso, "Fiber Bragg gratings optical sensing technology", Smart Materials Bulletin, pp. 7-10, Sept. 2001.
- [2] 서준규, 김경조, 오민철, 이상민, 김영제, 김명현, "광섬유 센서를 이용한 LNG 선박의 간열재의 충격 손상 감지 시스템", 제 15회 광전자 및 광통신 학술회의, pp. 355-356, 2008.
- [3] L-Y. Shao, X. Dong, A. P. Zhang, H-Y. Tam, and S. He, "High-resolution strain and temperature sensor based on distributed Bragg refractor fiber laser", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 19, No. 20, pp. 1598-1600, 2007.
- [4] T. V. A. Tran, Y-G. Han, Y. J. Lee, S. H. Kim, and S. B. Lee, "Performance enhancement of long-distance simultaneous measurement of strain and temperature based on a fiber Raman laser with an etched FBG", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 17, No. 9, pp. 1920-1922, 2005.
- [5] C-T Shyu and Likarn Wang, "Sensitive linear electric current measurement using two metal-coated single-mode optical fibers", IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 12, No. 11, pp. 2040-2048, 1994.
- [6] J. L. Cruz, L. Dong, and L. Reekie, "Improved thermal sensitivity of fiber bragg gratings using a polymer overlayer", Electron. Lett., Vol. 32, No. 4, pp. 385-387, 1996.
- [7] J. Mandal, T. Sun, K. T. V. Grattan, R. T. Zheng, N. Q. Nam, and A. T. Augousti, "A parallel multiplexed temperature sensor system using Bragg-grating-based fiber laser", IEEE Sensors J., Vol. 6, No. 4, pp. 986-995, 2006.
- [8] D. Reilly, A. J. Willshire, G. Fusiek, P. Niewczas, and J. R. McDonald, "A fiber-Bragg-grating-based sensor for simultaneous AC current and temperature measurement", IEEE Sensors J., Vol. 6, No. 6, pp. 1539-1542, 1997.
- [9] 김영복, 김태영, 고종경, 박창수, "자체 주입 잠김된 반사형 반도체 광 증폭기를 기반으로 하는 변형 및 온도 센서 네트워크", 제 15회 광전자 및 광통신 학술회의, pp. 357-358, 2008.

저 자 소 개



손경락(孫慶洛)

1992년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1995년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 2002년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 2007년 1월~2008년 1월 University of New South Wales 연구교수, 2003년~현재 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부 조교수



심준환(沈俊煥)

1991년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1993년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 1998년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 2003년 8월~2005년 2월 텍사스주립대(알링턴소재) 연구교수, 1998년~현재 한국해양대학교 전자정보통신공학부 부교수



양규식(梁圭植)

1974년 한국항공대학교 항공통신공학과 졸업(공학사), 1984년 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 1991년 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사), 1986년~현재 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부 교수