

코드분할 다중방식을 기반으로 하는 선박 상태 모니터링 광섬유 센서 네트워크

정희원 김 영 복*, 이 성 로**, 전 시 옥*, 박 창 수***

Fiber Sensor Network for Vessel Monitoring based on Code Division Multiple Access

Youngbok Kim*, Seong Ro Lee**, Sie-Wook Jeon*, Chang-Soo Park***^o *Regular Members*

요 약

본 논문은 코드 분할 다중방식을 이용하여 외부로부터 선박에 가해지는 변형 및 온도 변화를 모니터링 할 수 있는 광섬유 브래그 격자 (FBG) 기반의 센서 네트워크를 제안하였다. 선박에 변형이 발생 하거나 온도의 변화가 일어날 때 FBG는 본래 가지고 있는 중심 파장이 이동하며 이는 외부 변형 크기에 비례하여 증가된다. 중심파장의 변화량을 측정함으로써 센서에 가해지는 변형이나 온도의 크기를 알 수 있다. 제안된 센서 네트워크는 코드분할 다중방식을 이용하였으며 광원에서 발생하는 신호를 직접 변조하여, 변조된 신호를 센서로 보내고 센서로부터 돌아오는 신호를 검출하여 상태를 모니터링하게 된다. 또한 슬라이딩 자기상관 기법과, 파장- 시간 변환 기법을 이용하여 빠른 센싱과 넓은 범위의 센싱이 가능하도록 하였다.

Key Words : Vessel sensor, CDMA, Sensor network, FBG, Sliding correlation

ABSTRACT

We propose a multiplexed fiber Bragg grating (FBG) sensor network for vessel monitoring to measure the variation of strain and temperature by environmental perturbation based on code division multiple access (CDMA). The center wavelength of FBG was linearly changed by environmental perturbation such as strain and temperature variation so that we could be monitoring the state of sensors. A RSOA was used as optical broadband source and which was modulated by using pseudo random binary sequence (PRBS) signal. The correlation peak of reflected signal from sensor networks was measured. In this paper, we used the sliding correlation techniques for high speed response and dynamic range of sensors.

I. 서 론

광섬유 브래그 격자는 전자기장의 간섭에 대한 면역성, 우수한 내구성, 그리고 다단의 센서를 동시에 측정할 수 있는 장점을 가지고 있어 센서 많이 이용되어 왔다. 특히 최근에는 철근 구조물, 토목 현장, 대형

선박 등에 가해지는 변형 및 온도 변화 등을 측정하는 센서로 많이 이용되어 왔다¹⁻³⁾.

이러한 광섬유 브래그 격자를 이용한 센서 네트워크는 외부에서 인가되는 변형 및 온도의 변화에 대하여 각 센서의 중심 파장 변화를 감지하는 파장분할 다중방식, 각 센서가 같은 중심 파장을 가지며 주기가

※ 본 연구는 광주과학기술원 의료시스템공학연구소 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2011-C1090-1121-0007)

* 광주과학기술원 정보통신공학과 광통신 연구실(yongbk@gist.ac.kr), ** 목포대학교 정보전자공학과(srlee@mkpo.ac.kr)

*** 광주과학기술원 정보통신공학과(csp@gist.ac.kr), (°:교신저자)

논문번호 : KICS2011-02-089, 접수일자 : 2011년 2월 7일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 14일

센서의 거리보다 긴 펄스열을 센서로 보내어 각 센서로부터 반사되어 돌아오는 출력 파워의 변화량을 측정하는 시간분할 다중방식, 그리고 입력 광원을 PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) 신호를 이용하여 변조한 후 각 센서로 보낸 후 각 센서로부터 되돌아오는 코드의 자기상관 값의 변화를 측정하는 코드분할 다중방식이 있다. 파장분할 다중방식은 고 분해능을 가지며 다른 시스템에 비하여 구현하기 쉬운 장점 때문에 많이 사용되고 있으나, 외부 변화에 의해 센서의 중심 파장이 변할 때 이웃하는 다른 센서의 중심파장과 중복될 수 없기 때문에 센서의 개수가 제한되는 단점을 가지고 있다^[4]. 시간분할 다중방식은 이러한 센서 개수 제한의 문제를 해결하기 위하여 같은 중심파장을 갖고 광섬유 브래그 격자의 반사율이 작은 센서를 사용하여 각 센서로부터 되돌아오는 출력 파워의 변화량을 측정함으로써 센서 개수 제한의 문제를 해결 하였다. 그러나 이러한 시간분할 다중방식의 경우 신호처리부의 설계가 복잡하여 가격이 비싸고 또한 단일 펄스를 사용함으로써 센서의 응답 속도가 다른 방식에 비하여 느리다는 단점을 가지고 있다^[5]. 코드분할 다중방식은 광원의 신호를 PRBS 코드로 변조하여 각 센서에 코드열을 보냄으로써 센서로부터 되돌아오는 코드열을 자기상관 함으로써 구현할 수 있다. 이러한 코드분할 다중방식은 단일 펄스를 보내는 시간분할 방식보다 센서의 응답속도가 빠르고 또한 각 센서로부터 돌아오는 코드의 자기상관 값을 측정함으로써 센서의 개수가 파장분할 다중방식보다 많은 장점을 가지고 있다^[6].

이 논문에서는 반사형 반도체 광증폭기(RSOA)를 광대역 광원으로 이용하여 센서의 개수를 증가시킬 수 있으며, 높은 응답 속도를 가지는 광섬유 브래그 격자 기반의 코드분할 다중방식 센서 네트워크를 구현하였다. 또한 본 논문에서는 슬라이딩 자기상관 방식을 이용하여 코드열을 복조함으로써 시스템을 간단하고 빠르게 구성하였으며, 분산보상 광섬유를 이용하여 센서의 중심파장의 변화를 시간 이동으로 변환하여 센서의 측정 범위를 기존의 코드분할 다중방식 센서 시스템보다 넓혔다.

II. 코드분할 다중방식을 이용한 센서네트워크

코드분할 다중방식을 이용한 기본적인 센서 네트워크 시스템의 구성도와 각 센서로부터 되돌아오는 코드를 구별하는 방법에 대하여 기술한다. 특히 슬라이딩 자기상관 방법을 이용하여 코드를 구분하는 방법

에 대하여 기술한다.

2.1 센서 동작원리

광섬유 브래그 격자의 중심파장은 온도 및 압력 변화에 대하여 선형적으로 이동하는 특징을 가지고 있다. 따라서 기본적으로 광섬유 브래그 격자 기반의 코드분할 다중방식 센서 네트워크는 브래그 격자의 중심파장의 변화에 따른 자기상관 값을 모니터링 함으로써 가능하다.

그림 1은 광섬유 브래그 격자 기반의 기본적인 코드분할 다중방식 센서 네트워크 구성도이다. 광원은 PN (Pseudo Noise)생성기로부터 발생된 코드열과 함께 외부변조기로 입사되어 그 신호가 변조되고, 변조된 신호는 각 센서들로 입사된다. 일반적으로 광원은 단일 파장 레이저나 광대역 광원을 이용한다. 위 구성도에서는 단일모드 레이저 광원을 이용 하였으며, 이때 PN 코드는 PRBS의 한 종류로 사용 되었다. 그림 1에서 변조된 신호가 $p(t)$ 이고, PD (photo diode)에서 각 센서로부터 받은 신호의 합을 $q(t)$ 라 할 때 PD를 통하여 받은 신호의 합은 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$q(t) = \sum_{i=1}^n p'(t - \tau_i) \quad (1)$$

위 식에서 $p'(t)$ 는 반사된 신호, τ_i 는 i 번째 센서로부터의 시간 지연 그리고 n 은 센서의 총 합을 의미한다. 따라서 i 번째 센서의 신호는 시간지연이 τ_i 만큼 된 PRBS 코드 $p(t - \tau_i)$ 를 자기상관 함으로써 얻어진다. 또한 지연된 시간 τ 가 τ_m 이라 할 때 m 번째 신호의 자기 상관 값은 다음과 같이 나타낸다^[7].

$$R_{pq}(\tau_m) = p(t - \tau_m) * \sum_{i=1}^n p'(t - \tau_i) \quad (2)$$

$$\simeq p(t - \tau_m) * p'(t - \tau_m)$$

위 식에서 R_{pq} 는 자기상관 함수를 나타내며, m 번

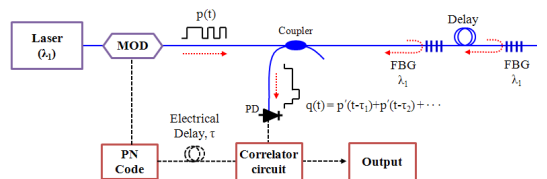


그림 1. 코드분할 다중방식 센서 네트워크 구성도

제 센서의 자기상관 값은 m 번째 센서로부터의 신호에만 영향을 받는다. 따라서 각 센서로부터 돌아오는 신호와 그 신호만큼의 시간 지연을 갖는 신호를 서로 자기상관 값을 구하게 되면 다른 센서의 코드와는 무관하게 원하는 센서의 상태를 모니터링 할 수 있다. 그러나 이러한 기존의 방식은 각 센서의 수만큼 모든 센서를 모니터링 하기 위해서 측정하고자 하는 센서의 거리와 일치하는 시간 지연을 주어야 한다는 단점을 가지고 있다. 즉 모든 센서의 수 만큼 자기상관 값을 측정 하거나 시간 지연 부분의 시간을 각 센서에 맞게 스캐닝 하는 방법을 이용해야 한다. 그러나 이러한 방법은 시스템의 구성이 복잡하여 지고 센서의 응답 속도가 느려지는 단점을 가지고 있다.

2.2 슬라이딩 자기상관 방식

슬라이딩 자기상관방식은 광섬유 브래그 격자 센서 네트워크에서 복조 회로로 사용된다. 이 방법은 신호 처리부의 복잡성이 줄어들고 복조 회로의 크기와 효율성 증대, 빠른 응답 속도 등의 장점을 갖는다. 슬라이딩 자기상관을 구현하는 방법 중 가장 단순한 방법은 PRBS 코드의 chip 주파수가 미세하게 다른 두 개의 신호를 이용하는 것이다^[8]. 그림 2는 슬라이딩 자기상관 방법을 개념적으로 보여준다. 그림에서 코드 1과 코드 2는 서로 주파수 차이가 거의 나지 않는 동일한 PRBS 신호를 이용한다. 따라서 이때 2개의 코드가 서로 같고 주파수 차이만 조금 나기 때문에 2번째 주파수는 1번째 주파수에 대하여 천천히 이동하는 것처럼 보인다.

이동하는 방향은 코드 1을 트리거로 잡았을 때 코드 2의 주파수가 크다면 왼쪽으로 그리고 주파수가 작다면 오른쪽으로 이동 한다. 이동 속도는 두 코드의 주파수 차이에 의해 결정되며, 주기 시간은 다음과 같은 식에 의하여 결정된다.

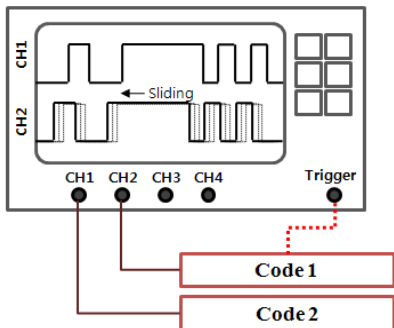


그림 2. 슬라이딩 자기상관 방법

$$T_R = n / \Delta f \tag{3}$$

이때 n 은 코드의 비트 길이, Δf 는 주파수 차이를 나타낸다. 또한 자기상관 값의 펄스 대역은 다음과 같은 식에 의하여 결정된다.

$$T_{width} = 2 / \Delta f \tag{4}$$

그림 3은 코드의 길이가 31비트이며 주파수가 각각 100, 100.1 MHz인 PN코드를 사용할 때 슬라이딩 자기상관을 값을 나타낸다. 자기 상관을 하기 위해서는 그림과 같이 Mixer, 그리고 저주파 대역 통과 필터가 필요하다. 그 이유는 믹서와 저주파 대역 통과 필터를 사용 하였을 때 수식 (2)와 같은 형태를 표현 할 수 있기 때문이다. 구현된 슬라이딩 자기상관에서 주기 시간과 펄스 대역은 식 (3), (4)에 의하여 3.10ms와 0.20ms로 계산되어지며, 실제 측정값은 3.09ms 그리고 0.23ms이다. 계산 값과 실제 측정 값이 거의 오차 가 없음을 알 수 있다.

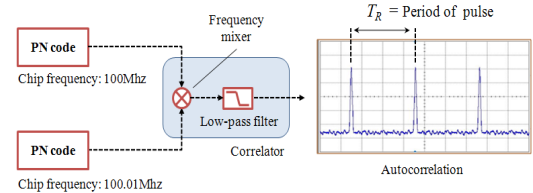


그림 3. 슬라이딩 자기상관 예시

III. 광섬유 브래그 격자 센서 네트워크

이 논문에서 사용된 기본적인 센서는 광섬유 브래그 격자를 이용하였다. 이러한 광섬유 브래그 격자는 센서로 많이 이용되며, 특히 본 논문에서는 코드분할 다중방식을 이용하여 센서 네트워크를 구성하였다.

3.1 센서 네트워크 구성

제안된 센서 네트워크는 광대역 광원인 RSOA를 이용하였다. RSOA는 30nm 이상의 광대역 특성을 보이기 때문에 센서의 파장이 다른 FBG를 센서로 사용 시 이용 가능한 센서의 개수가 증가되는 특징이 있으며, 또한 PRBS 신호를 이용하여 직접 변조시 고속의 신호 전송이 가능하여 센서의 응답 속도가 향상 되는 장점을 가지고 있다.

그림 4는 본 논문에서 제안하는 센서 네트워크의

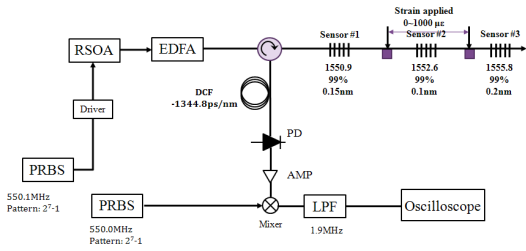


그림 4. 실험 구성도

실험 구성도를 보여준다. 그림에서 RSOA는 광대역 광원으로 사용되었다. 이는 광대역 광원을 사용함으로써 센서의 개수를 늘리고, 매우 빠른 응답 속도를 갖기 위함이다. RSOA를 PRBS 신호를 이용하여 직접 변조한후, 이때 생성된 코드열을 EDFA (Erbium Doped Fiber Laser)를 이용하여 증폭하고, 증폭된 신호는 Circulator를 통하여 각각의 센서로 이동한다. 본 실험에서는 총 3개의 센서를 사용 하였으며 각 센서의 중심파장은 1550.9, 1552.6, 그리고 1555.8nm이다. 또한 반사율은 모두 99%로 동일하며 대역폭은 각각 0.15, 0.1, 그리고 0.2nm로 거의 동일한 센서를 사용 하였다. 각 센서로 전달된 코드열은 각 센서의 중심파장에 일치할때 반사되어 돌아오게 된다.

그림 5는 광원인 RSOA를 각 센서로 입사하였을 때 되돌아오는 출력 파워를 측정할 것이다. 그림과 같이 사용된 센서의 펄스폭은 거의 일정하였으며, 최고 반사되어 돌아오는 광 출력 파워는 약간 상이함을 알 수 있었다. 그림 5는 반사되어 돌아오는 광학적 신호를 보여주며, 실제로는 이러한 돌아오는 중심파장에 코드가 실려서 오게 된다.

이렇게 반사되어 돌아오는 신호는 각 센서로부터 반사되어 합쳐진 형태로 오기 때문에 그 자체로 보면 아

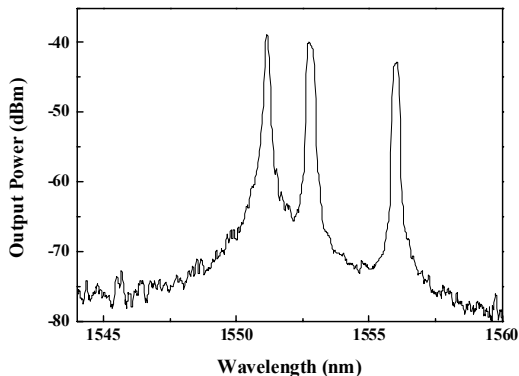


그림 5. 센서로부터 돌아오는 출력파워

무런 정보가 포함되지 않은 일종의 Noise처럼 보인다.

그림 6은 각 센서로부터 반사되어 돌아오는 코드들이 합쳐진 상태를 보여준다. 그림과 같이 위 신호는 일반적인 PRBS 신호가 아닌, 각 센서의 중심파장에서 반사되어 돌아오는 코드의 합으로 나타나며 이때의 신호는 본래 입사된 신호와 동일 한 신호가 있어야 복조를 할 수 있다. 그림과 같이 합쳐진 코드의 합은 circulator를 통하여 다시 분산보상 광섬유로 입사하게 된다. 분산보상 광섬유는 본래 단일모드 광섬유의 분산 값을 보상해 주기 위해서 사용하는 것으로 분산 값이 마이너스 값을 갖는다. 그러나 위 실험에서 분산보상 광섬유는 각 센서에 가해지는 외부 온도 및 압력 변화 등으로 인하여 발생하는 센서의 중심 파장의 이동을 높은 분산 값을 이용하여 시간상에서 이동하게 하고 이를 수신단에서 측정함으로써 자기상관의 값의 펄스열이 시간 축에서 이동하는 정도를 통하여 센서에 가해진 온도 변화나 압력 변화를 측정한다. 본 실험에서 사용된 분산보상 광섬유의 분산 값은 -1344.8ps/nm이다.

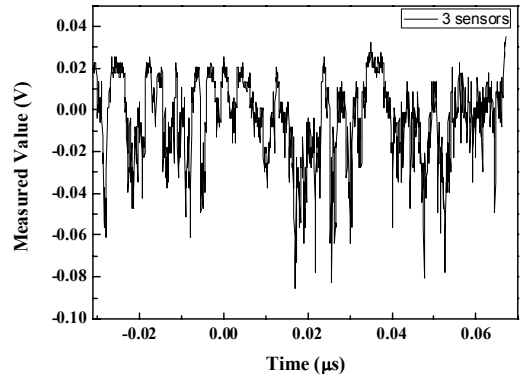


그림 6. 반사되어 돌아오는 PRBS 신호

3.2 결과 및 분석

그림 7은 분산보상 광섬유를 통하여 나온 코드열이 PD를 거치고 슬라이딩 자기상관을 거쳐 나온 값을 보여준다. 슬라이딩 자기상관을 위하여 사용된 PRBS 코드의 길이는 127 비트이며, 사용된 주파수는 550, 550.1 MHz 이다. 그림과 같이 펄스 주기는 1.27ms이다. 이는 수식 (3)에의한 계산 값과 일치함을 알 수 있었다. 일반적인 코드분할 다중방식의 경우 각 센서에 맞게 시간 지연을 시켜 자기상관 값을 구하므로, 여러 개의 센서를 동시에 측정하는 것은 불가능하다. 그러나 본 논문에서 제안된 슬라이딩 자기상관 기법은 한번의 자기상관에 의하여 여러개의 센서를 동시에 모

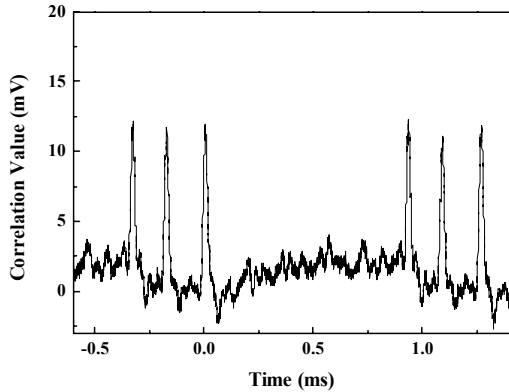


그림 7. 측정된 자기상관 값

니터링 하는 것이 가능하다.

자기상관 값에서 기본적으로 바닥에 형성되는 noise는 peak 값에 비하여 작으며, 위 논문에서 제안한 방식은 외부 압력 및 온도 변화시 peak 값이 줄어들지 않고 시간 축에서 움직이기 때문에 상대적으로 noise에 거의 영향을 받지 않는다.

구현된 센서 네트워크 시스템에서 실제 센서에 압력을 가하면서 센서가 동작하는 것을 관찰 하였다. 그림 4에 보이는 2번째 센서에 순차적으로 변형을 가하면서 그림 7의 자기상관 값이 변화 하는 것을 관찰 하였다.

그림 8은 센서 2에 변형을 가할 때 이에 따른 파장의 변화 정도를 측정된 그래프이다. 그림과 같이 압력을 가할 때 광섬유 브래그 격자의 중심 파장은 선형적으로 변화하는 것을 관찰 할 수 있었다. 또한 변형률은 1.1 pm/me 으로 실제 광섬유 브래그 격자의 변형률과 일치함을 보았다. 또한 센서2의 중심파장이 센서 3의 중심 파장과 겹치는 일이 발생 하여도 자기상관

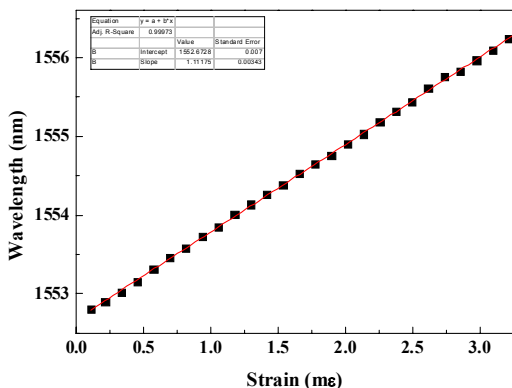


그림 8. 외부 변형에 대한 민감도

의 측정이 가능하다. 이는 파장분할 다중방식의 센서 시스템의 단점을 극복한 것이다.

IV. 결 론

본 논문은 광섬유 브래그 격자를 이용하여 선박에 가해지는 변형 및 온도 변화를 모니터링 할 수 있는 코드분할 다중방식 센서 네트워크 시스템에 관하여 연구 하였다. 광섬유 브래그 격자는 외부로부터 가해지는 변형 및 온도 변화에 선형적으로 중심 파장이 변화하는 특성을 가지고 있고, 크기가 작고, 여러개의 센서를 동시 측정 가능하다는 특성을 가지고 있어 센서 시스템에 많이 이용되고 있다. 특히나 철도, 토목 현장, 선박등 대형 시설물에 대한 외부 압력 변화를 쉽게 모니터링 할 수 있어 많이 이용되어 왔다.

이 논문은 RSOA를 광대역 광원으로 이용하고 PRBS신호를 직접 변조하여 생성된 코드열을 각 센서로 전달 하였다. 이러한 코드열은 각 센서의 중심파장과 일치할 때 다시 되돌아 오게 되며, 이때의 코드열은 각각의 센서들로부터 합하여진 상태로 전달 되게 된다. 따라서 이러한 신호를 슬라이딩 자기상관 방법을 이용하여 각 센서에 가해지는 압력을 측정 하였다.

일반적인 코드분할 다중방식의 경우 자기상관 값의 peak 값의 크기를 통하여 압력의 변화 정도를 측정하는데, 본 실험은 분산보상 광섬유를 통하여 외부 압력에 의한 파장의 변화를 시간 축에서의 이동으로 변환하여 보다 넓은 범위를 센싱 할 수 있도록 하였다. 또한 측정된 데이터를 통하여 압력의 변화에 따라 peak 값의 선형성이 매우 좋음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. Leblanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Puntam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.*, 15, pp.1442-1462, 1997
- [2] W. Liang, Y. Huang, R. K. Lee, A. Yariv, "Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors," *Applied Physics Lett.* 151122 pp.1-3, 2005
- [3] J. Leng, A. Asundi, "Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors," *Sensors and Actuators, A: Physical*, 103(3), pp.330-340, 2003

- [4] J. Mora, J. L. Cruz, M. V. Andres, and R. Duchowicz, "Simple high resolution wavelength monitor based on a fiber Bragg grating," *Appl. Opt.*, 43, pp.744-749, 2004
- [5] L. C. S. Nunes, B. S. Olivieri, C. C. kato, L. C. G. Valente, and A. M. B. Braga, "FBG sensor multiplexing system based on the TDM and fixed filters approach," *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 138, pp.341-349, 2007
- [6] K. P. Koo, A. B. Tveten, and S. T. Vohra, "Dense wavelength division multiplexing of fiber Bragg grating sensors using CDMA," *Electro. Lett.*, 35, pp.165-167, 1999
- [7] H. J. Lee, "Multiple fiber Bragg grating sensor system using code-division multiple access," *Appl. Opt.*, 41, pp.5245-5248, 2002
- [8] R. L. PICKHOLTZ, D. L. SCHILLING, and L. B. MILSTESIN, "Theory of Spread-Spectrum Communications-a tutorial," *IEEE Trans. Commun.*, COM-30, pp.855-884, 1982

김 영 복 (Youngbok Kim)

정회원



2004년 2월 전북대학교 전기
전자공학과 졸업
2006년 2월 광주과학기술원
정보통신공학과 석사
2006년 3월~현재 광주과학기술원
정보통신공학과 박사
과정

<관심분야> UWB 통신, 센서 네트워크 시스템

이 성 로 (Seong Ro Lee)

정회원



1987년 2월 고려대학교 전자공
학과 학사
1990년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 석사
1996년 8월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 박사
2005년 3월~현재 목포대학교 공
과대학 정보전자공학과 교수

<관심분야> 디지털통신시스템, 이동 및 위성통신
시스템, USN/텔레메틱스응용분야, 임베디드시스
템, 생체인식시스템

전 시 욱 (Sie-Wook Jeon)

정회원



2006년 2월 아주대학교 전자
공학과 학사
2007년 8월 광주과학기술원
정보통신공학과 석사
2007년 9월~현재 광주과학기술
원 정보통신공학과 박사
과정

<관심분야> 광통신 시스템, 센서 네트워크 시스템

박 창 수 (Chang-Soo Park)

정회원



1979년 한양 대학교 전기 공학
과 학사
1981년 서울대학교 전자공학과
석사
1990년 Texas A&M University
전자 공학과 박사
1982년~2000년 ETRI Principle
member

2000년~현재 광주과학기술원 정보통신공학과 교수
<관심분야> Optical Communication System,
Microwave Photonics Technology, Optical
Signal Processing