

# 가간섭성 광섬유 센서에 대한 주파수 천이도의 영향

최규남\*

Effect of spectral drift to coherent optical fiber sensor

Kyoo-Nam Choi\*

요 약

페브리-페로 공진루프에서 광궤환이 가간섭성 광섬유 레이저의 주파수 천이도에 미치는 영향을 연구하였다. Er+3가 도핑 된 광궤환 방식 광섬유 레이저는 두 개의 광섬유브래그격자로 이루어진 페브리-페로 공진기에서 단방향 광궤환이 이루어지도록 구성하였다. 광궤환은 그렇지 않은 경우와 비교하여 광섬유레이저의 선폭 감소에 효과적인 것으로 나타났다. 위의 구성을 사용한 세 가지 광섬유 레이저는 모두 자기헤테로다인 선폭 측정 장치의 해상도 한계인 3kHz 이내로 나타났다. 마크-젠더 주파수 천이도 측정 장치의 한쪽 선로에 200m 길이의 광 지연 선로를 두고 측정한 결과는 광궤환 방식 광섬유 레이저의 주파수 천이도가 광궤환이 없는 광섬유 레이저 보다 우수한 300kHz/sec으로 나타났다.

## ABSTRACT

Effect of spectral drift in coherent fiber laser was investigated by injecting optical feedback to Fabry-Perot resonance loop. Er+3 doped fiber laser having unilateral optical feedback loop in Fabry-Perot configuration using two FBGs was fabricated. The optical feedback was found to be effective in linewidth reduction of fiber laser compared to the case without any optical feedback. The linewidth of three fiber lasers using above configuration were measured to be within 3kHz which is resolution-limited performance of self-heterodyne linewidth measurement set-up. The frequency drift measurement using Mach-Zehnder measurement set-up having 200m optical delay-line in one arm showed that the frequency drift rate of optical feedback fiber laser was measured as 300kHz/sec which was better than the case without optical feedback.

## 키워드

Optical Fiber Sensor, Coherent Sensor, Spectral Drift

광섬유 센서, 가간섭성 센서, 주파수 천이도

## 1. 서 론

광섬유 센서는 1개의 센서로 경제적으로 긴 거리를 고감도로 감지를 할 수 있어 보안 분야에서 센서로서의 활용 가치가 높다고 할 수 있다. 공장이나 산업시

설물 또는 중요 국가기관을 외부의 침입으로부터 보호하기 위하여 담장위에 철조망이나 그물철망을 설치하는 방식을 대신하는 여러 센서들이 모색되어 왔고 [1-3], 이중 광섬유 침입자 경보 시스템이 유력한 대안 중의 하나로 고려되고 있다.

\* 교신저자: 인천대학교 정보통신공학과  
•접 수 일 : 2016. 01. 11  
•수정완료일 : 2016. 03. 13  
•게재확정일 : 2016. 03. 24

• Received : Jan. 11, 2016, Revised : Mar. 13, 2016, Accepted : Mar. 24, 2016  
• Corresponding Author : Kyoo-Nam Choi  
Dept. of Information and Telecommunication Eng., Incheon National University,  
Email : knchoi@inu.ac.kr

광섬유 침입자 센서는 크게 광 강도 방식, 광 간섭 방식, 광 패턴인식 방식의 세 가지를 들 수 있다. 광 강도 방식은 외부 충격에 의하여 광섬유에 순간적으로 구부림이 발생하면 수신기에 도착하는 광 강도에 변화가 있는 것을 감지하는 방식으로 상대적으로 감도가 약해 지중매설이 어려운 단점이 있었다. 광 패턴인식 방식 센서로 감도 측면에서 광 간섭 감지방식과 광 강도 변화 감지 방식의 중간적인 성격을 갖는 다중모드 광섬유 내에서 외부 압력에 의하여 전파되는 모드간의 간섭무늬인 스페클(Speckle) 패턴의 변화를 감지하는 방식이 있었다[4]. 그러나 이러한 방식들은 위치 정보를 얻기 위해서는 여러 개의 광섬유 루프를 각기 다른 위치에 매설하여야 하는 단점이 있었다. 광 간섭 방식은 광의 경로를 두개로 분할한 후 다시 합칠 때 두개의 서로 다른 경로를 오는 광신호의 위상차 간섭에 의해 감지하는 방식으로 마이크로 단위의 변화에도 민감하게 작동하는 충분한 감도를 보이게 된다. 이중 마이켈슨(Michaelson) 타입의 광섬유 센서는 침입자의 위치정보를 제공할 수 없었으나 Sagnac 간섭계와 마이켈슨 간섭계를 같이 사용하여 위치정보를 제공하려고 시도한 적도 있었다[5].

이러한 고감도 광섬유 센서를 구현하기 위해서는 센서용 광원의 주파수 천이도의 안정성이 가장 중요한 요소가 된다. 광섬유 레이저는 광섬유 통과대역 파장내의 레이저를 발진 시킬 수 있고 가간섭성(coherent) 정도를 향상시키기 위해 레이저 구조를 용이하게 변경 시킬 수 있으며 광출력을 올리기 위하여 광섬유 증폭기와 같이 사용될 수 있는 확장성으로 인하여 많은 연구가 진행되고 있다[6-8]. 광섬유 레이저의 엔진으로 사용되는 자연방출 증폭광(Amplified Spontaneous Emission) 광원은 약 1300nm 에서 침두값을 갖고 약 1200-1700nm의 광대역 파장에 걸쳐 발광하므로 응용분야가 다양하다 하겠다. 이러한 자연방출 증폭광 광원을 이용한 광섬유 레이저는 일반적 구조에서는 다중모드를 발하므로 단일모드 레이저를 발광하도록 연구가 있었으며[9-11], 우수한 가간섭성 특성을 갖기 위해서는 발진파장의 선폭이 작아야하므로 10kHz 또는 그 이하의 선폭을 갖는 레이저가 발표된 바 있다[12-13]. 주파수안정도도 광섬유 레이저의 가간섭성 특성을 평가하는 중요한 항목이며 어비움 광섬유(Erbium-doped Fiber) 레이저를 분포궤환(DFB:

Distributed Feed-Back) 반도체 레이저와 인젝션-락킹(Injection Locking)시켜 28MHz/min의 주파수천이율이 발표된 바 있다[14]. 본 연구에서는 이러한 초고감도 감지를 가능하게 하는 가간섭성 레이저 광원들의 주파수 천이도를 광궤환 방식을 변화시키면서 가간섭성 특성을 비교 연구하였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 가간섭성 광섬유 레이저에 대하여 논하고, 3장에서는 가간섭성 광섬유 레이저 선폭에 대하여 논하였고, 4장에서는 주파수 안정도, 마지막으로 5장에서 결론으로 끝맺었다.

## II. 가간섭성 광섬유 레이저

가간섭성 광섬유 레이저의 엔진으로 사용되는 자연방출 증폭광 광원으로부터 레이저광을 발생시키기 위해서는 내부에 페브리-페로(Fabry-Perot) 공진기를 만든 후 특정 파장에서 발진을 일으키기 위해서 광섬유 브래그격자(Fiber Bragg Grating)와 같은 파장선택소자를 설치하는 방식을 사용한다. 광섬유브래그격자는 그림 1[15], 그림 2[11]와 같은 반사만을 이용하는 방식과, 그림 3[7]과 같이 반사와 투과를 모두 이용하는 방식이 사용된 바 있다.

그림 1에서 펌프레이저에서 주입되는 펌프광은 파장분할 커플러(WDM Coupler)를 통해 어비움 광섬유에서 자연방출 증폭광으로 변환된 후 광섬유 브래그격자에서 특정파장의 광만 반사되어 다시 어비움 광섬유를 통과하면서 증폭되어 파장분할 커플러를 통해 고출력의 레이저광이 외부로 출력되는 구조이다. 이러한 구조는 간단하게 고출력으로 특정 파장만을 방출할 수 있지만 다중모드 출력을 만들게 된다.

그림 2의 구조도 기본적으로는 그림 1과 유사하고 단지 고리구조 공진기(Ring Cavity)를 갖추어 공진효율을 높인 것이 특징이다. 이 구조에서는 펌프레이저에서 주입되는 펌프광은 어비움 광섬유, 회전기(Circulator), 광섬유 브래그격자를 통과하면서 특정파장의 광만 반사되고 다시 3dB 출력 광 커플러를 통해 일부가 고리구조 공진기로 유입되어 다시 위의 순서로 반사를 반복하게 되어 공진효율을 높일 수 있어 단일모드 레이저 출력을 가능하게 한다. 그러나 이 구조에서는 방출되는 레이저광이 고리구조 공진기를 회

전한 회수에 따라 공진기의 길이가 달라지므로 고차 모드가 출력에 일부 포함될 수 있다.

그림 3은 그림 2를 단순화하여 회전기를 없앤 변형으로서 고리구조 공진기를 주로 어비움 광섬유로 구성하여 어비움 광섬유는 공진기의 길이에 포함되지 않는 것을 이용하여 공진기의 실효 길이를 짧게 하여 단일모드 레이저광을 출력하도록 한 구조이다.

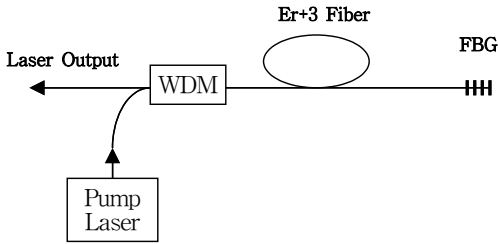


그림 1. 반사형 광섬유 레이저의 개념도  
Fig. 1 Concept of reflective fiber laser

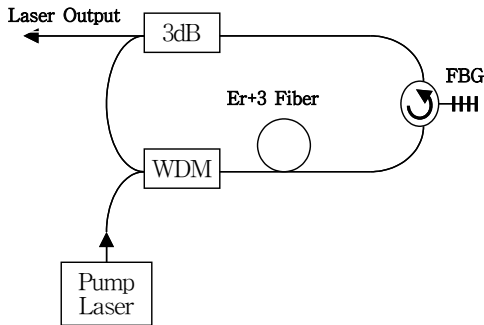


그림 2. 고리구조 반사형 광섬유 레이저의 개념도  
Fig. 2 Concept of reflective fiber laser having ring cavity

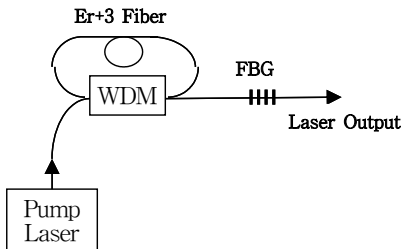


그림 3. 투과형 광섬유 레이저의 개념도  
Fig. 3 Concept of transmittable fiber laser

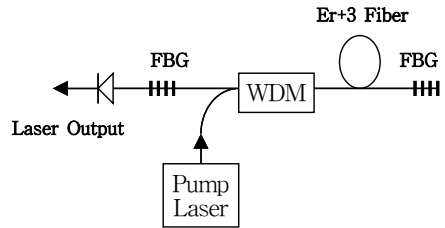


그림 4. 페브리-페로형 광섬유 레이저의 개념도  
Fig. 4 Concept of Fabry-Perot fiber laser

그림 4의 구조는 이러한 광섬유 레이저의 가간섭성을 향상시키기 위해 강력한 공진을 유도하도록 페브리-페로 공진기를 광원 루프 내에 도입한 방식이다.

### III. 가간섭성 광섬유 레이저 선폭

광원의 주파수 안정도를 향상시키기 위해서 그림 4 구조에서 광궤환을 도입한 그림 5 와 같은 구조를 사용하였다. 여기서 펌프용 광원은 974nm 파장에서 110mW 출력을 사용하였다. 광섬유 브래그격자는 1555.49nm에서 침두 파장을 갖게 하였다. 외부에서 반사되어 돌아오는 역광이 광섬유 레이저에 유입되는 것을 방지하기 위하여 역광방지기(Optical Isolator)를 사용하였다. 또한 1530nm에서 7.5dB/km와 980nm에서 5dB/km의 손실 특성을 갖는 어비움 광섬유를 사용하였다.

그림 4와 같은 페브리-페로형 광섬유레이저에서 광궤환 루프가 없을 경우 광파장 대역에서는 그림 6 과 같은 특성을 보이고 있다.

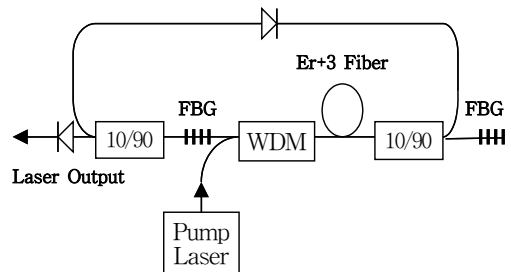


그림 5. 주파수안정형 광섬유 레이저의 구성도  
Fig. 5 Structure of frequency stabilized fiber laser

그림 4의 형태에 광궤환 루프를 추가한 그림 5와 같은 구조의 광섬유 레이저에서는 광파장 대역에서 그림 7과 같은 특성을 보이고 있다. 광궤환 방향의 민감도를 조사하기 위하여 그림 5의 구조에서 광궤환 루프에 있는 역광방지기를 역방향으로 하여 측정된 광파장 대역에서의 특성을 그림 8에 보이고 있다. 그림 6, 그림 7, 그림 8과 같이 측정된 광파장 대역 특성은 모두 3dB 대역폭 기준으로 0.04nm FWHM 인 것으로 나타났다. 이는 광섬유 브래그격자의 반사파장 대역폭인 0.4nm FWHM 보다 1/10로 감소되었으므로 파장 대역폭이 압축되었다고 할 수 있고 광섬유 레이저에 페브리-페로 공진기를 도입하는 것은 파장 대역폭 압축에 효율적으로 할 수 있다. 광궤환이 있는 경우의 20dB 대역폭은 그림 7과 같이  $\Delta\lambda=1\text{nm}$ 인 반면에, 광궤환이 없는 경우의 20dB 대역폭은 그림 6과 같이  $\Delta\lambda=3.5\text{nm}$ 이므로 광궤환이 파장대역폭 압축에 보다 더 효율적인 것으로 나타났다. 그러나 광궤환 방향을 역전시킨 경우에는 20dB 대역폭은 그림 8과 같이  $\Delta\lambda=3.5\text{nm}$ 으로 파장 대역폭 압축에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 광출력을 다시 후미 쪽으로 궤환 시키는 정방향 광궤환의 경우에는 압축된 광출력을 다시 압축시킬 수 있지만, 광궤환 방향이 역전된 경우에는 압축이 완료되지 않은 광출력이 출력부의 광섬유 브래그격자에서 바로 반사되어 외부로 나가기 때문인 것으로 분석된다. 따라서 그림 5와 같은 정방향 광궤환을 갖는 구조가 광파장폭 압축에 효과적임을 알 수 있다.

그러나 광파장분석기(Optical Spectrum Analyzer)의 파장분해능이 약 0.5nm에 불과하므로 실제 출력되는 광파장 대역폭은 이보다 작을 수 있다고 하겠다.

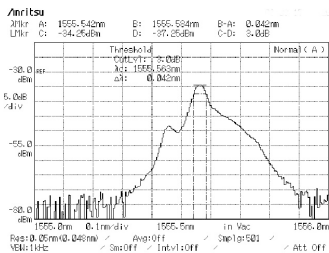


그림 6. 광궤환이 없는 페브리-페로형 광섬유 레이저 광파장 대역 특성

Fig. 6 Optical wavelength spectrum of FP fiber laser without optical feedback

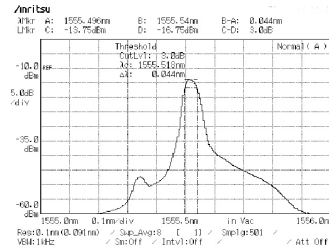


그림 7. 정방향 광궤환을 갖는 페브리-페로형 광섬유 레이저 광파장 대역 특성

Fig. 7 Optical wavelength spectrum of FP fiber laser with positive optical feedback

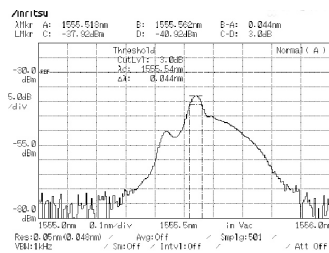


그림 8. 역방향 광궤환을 갖는 페브리-페로형 광섬유 레이저 광파장 대역 특성

Fig. 8 Optical wavelength spectrum of FP fiber laser with negative optical feedback

출력광의 광파장 대역폭을 정밀하게 측정하기 위하여 3kHz의 파장 대역폭 분해능에 해당하는 63km의 광지연 선로를 갖는 자기헤테로다인(Self-heterodyne) 측정 장치를 사용하여 파장 대역폭을 측정하였다. 그림 9는 광궤환이 없는 페브리-페로형 광섬유 레이저 광파장 대역 특성을, 그림 10은 정방향 광궤환을 갖는 페브리-페로형 광섬유 레이저 광파장 대역 특성을 각각 나타내고 있다. 그림 9와 10에서 고주파 스펙트럼 분석기의 X축은 5kHz/div을 나타내고 Y축은 10dB/div을 나타낸다. 그림 9와 그림 10에서 모두 3dB 파장 대역폭은 3kHz 이하로 나타나므로 이는 63km의 광지연 선로를 갖는 자기헤테로다인 측정 장치의 파장 분해능보다 작으므로 실제 광파장 대역폭은 이보다 더 작을 것으로 추정된다.

여기서 광궤환이 없는 경우는 -20dB 아래의 고주파 스펙트럼이 넓어지는데 반해 정방향 광궤환이 있는 경우는 -65dB 아래까지 깨끗한 고주파 스펙트럼이 얻어지므로, 자기헤테로다인 측정 장치의 분해능

이하이므로 수치로 읽을 수는 없지만, 광케환이 있는 경우가 광파장 대역폭이 더 작은 것으로 유추할 수 있겠다. 여기서 3kHz FWHM의 광파장 대역폭은  $2 \times 10^{-8}$  nm의 3dB 파장 대역폭에 해당한다[16].

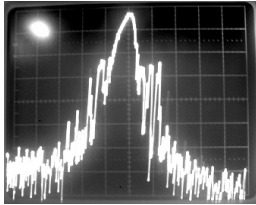


그림 9. 광케환이 없는 페브리-페로형 광섬유 레이저의 광파장 대역폭 특성

Fig. 9 Optical wavelength spectrum characteristic of FP fiber laser without positive optical feedback

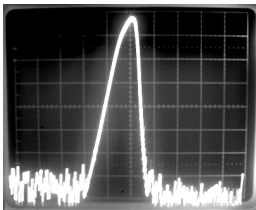


그림 10. 정방향 광케환이 있는 페브리-페로형 광섬유 레이저의 광파장 대역폭 특성

Fig. 10 Optical wavelength spectrum characteristic of FP fiber laser with positive optical feedback

#### IV. 주파수 안정도

광섬유 레이저의 주파수 안정도를 측정하기 위하여 한쪽에 200m의 지연선로를 갖는 마크-젠더 (Mach-Zehnder) 간섭계를 이용한 자기헤테로다인 측정 장치를 사용하였다. 여기서 200m의 광지연 선로는 1  $\mu$ s의 지연시간에 해당한다. 따라서 간섭파형의 페이딩(Fading) 주기 1sec는 1MHz/sec의 주파수 변위에 해당된다.

그림 5와 같은 정방향 광케환 구조를 갖는 광섬유 레이저는 그림 11과 같이 간섭파형의 페이딩 주기가 약 3.3초로 측정되었다. 이는 300kHz/sec의 주파수 천이에 해당한다. 그림 11에서 X축은 1s/div을 나타내고 Y축은 20mV/div을 나타낸다.

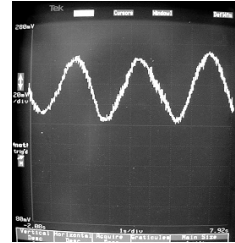


그림 11. 정방향 광케환이 있는 페브리-페로형 광섬유 레이저의 자기헤테로다인 측정 특성

Fig. 11 Characteristic of FP fiber laser with positive optical feedback using self-heterodyne measurement set-up

#### V. 결론

페브리-페로 공동 양쪽 끝에 광섬유 브래그격자를 사용한 광섬유 레이저에서 광케환이 가간섭성에 미치는 영향을 연구하였다. 정방향의 광케환 루프는 광케환 루프가 없거나 역방향의 광케환 루프를 갖는 경우에 비해 레이저의 파장폭 압축에 효과적임을 보여주었다.

광파장분석기와 자기헤테로다인 측정 장치를 사용 측정한 3dB 파장폭은, 광파장분석기에서는 파장폭 해상도인 0.5nm 이하이며, 자기헤테로다인 측정 장치에서도 파장폭 해상도인 3kHz 이하인 것으로 측정되었다. 이는 광섬유 레이저의 출력이  $2 \times 10^{-8}$  nm FWHM 파장 대역폭 이하인 것에 해당된다.

또한 페브리-페로 공동 양쪽 거울에 광섬유 브래그격자를 사용하고 정방향의 광케환 루프를 갖는 광섬유 레이저 출력의 주파수 천이도를 한쪽에 200m의 지연 선로를 갖는 마크-젠더 간섭계를 사용하여 측정 결과 주파수 천이도가 300kHz/sec인 것으로 나타났다. 이는 가간섭성 광섬유 센서에 적용하는데 적합한 주파수 천이도 범위로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2015년도 인천대학교 자체연구비 지원에 의하여 수행되었음.

## References

- [1] K. Choi, "Line Edge Detection Sensor using Visual Spectral Wavelength," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 2, 2012, pp. 303-308.
- [2] T. Kim, Y. Rhee, and S. Kim, "Implementation of a Microwave Doppler Sensor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 4, no. 2, 2009, pp. 75-81.
- [3] K. Choi, "Vehicle Collision Avoidance Sensor with Interference Immunity to Own Transmitted Sign," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 2, 2013, pp. 433-438.
- [4] C. Leung, C. Huang, and I. Chang, "Optical fiber security system: a field test report," *Proc. SPIE, 838, Fiber Optic and Laser Sensors V, Paper 51*, San Diego, USA, March 1988, pp. 365-371.
- [5] J. Dakin, D. Pearce, A. Ptrong, and C. Aade, "Novel distributed optical fiber sensing system enabling location of disturbances in a Sagnac loop interferometer," *Proc. SPIE, 838, Fiber Optic and Laser Sensors V, Paper 18*, San Diego, USA, March 1988, pp. 325-328.
- [6] N. Park, J. Wawson, and K. Jahala, "Frequency locking of an erbium-doped fiber ring laser to an external fiber Fabry-Perot resonator," *Opt. Lett.*, vol. 18, no.11, 1993, pp. 879-881.
- [7] Y. Cheng, J. Tringlebotn, W. Loh, R. Iaming, and D. Nayne, "Stable single-frequency travelling-wave fiber laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter," *Opt. Lett.*, vol. 20, no.8, 1995, pp. 875-877.
- [8] D. Ihang, M. Guy, S. Vhernikov, J. Raylor, and H. Kong, "Single-frequency erbium fiber laser using the twisted-mode technique," *Electron. Lett.*, vol. 32, no.19, 1996, pp. 1786-1787.
- [9] G. Bonfrate, F. Vaninetti, and F. Negrisolo, "Single-frequency MOPA Er<sup>3+</sup> DBR fiber laser fro WDM digital telecommunication systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no.8, 1998, pp. 1109-1111.
- [10] H. An, X. Lin, W. Ju, and H. Diu, "Novel single-frequency erbium-doped fiber loop laser," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 23, no.2, 1999, pp.95-97.
- [11] C. Lee, Y. Chen, and S. Liaw, "Single-longitudinal-mode fiber laser with a passive multiple-ring cavity and its application for video transmission," *Opt. Lett.*, vol. 23, no.5, 1998, pp. 358-360.
- [12] R. Paschotta, J. Nilsson, L. Reekie, A. Trooper, and D. Hanna, "Single-frequency ytterbium-doped fiber laser stabilized by spatial hole burning," *Opt. Lett.*, vol. 22, no.1, 1997, pp. 40-42.
- [13] H. Hee, G. Lee, and T. Pewson, "Narrow Linewidth CW and Q-switched erbium-doped fiber loop laser," *Electron. Lett.*, vol. 34, no.13, 1998, pp. 1318-1319.
- [14] N. Kishi and T. Yazaki, "Frequency control of a single-frequency fiber laser by cooperatively induced spatial-hole burning," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no.2, 1999, pp. 182-184.
- [15] W. Loh, B. Namson, L. Dong, G. Jowle, and K. Hsu, "High performance single frequency fiber grating-based erbium:ytterbium-codoped fiber lasers," *J. Lightwave Tech.*, vol. 16, no.1, 1998, pp. 114-118.
- [16] R. Fuerker, J. Munch, and L. Heflinger, "Coherence length measured directly from holography," *Appl. Opt.*, vol. 28, no.5, 1989, pp. 1015-1017.

## 저자 소개

**최규남(Kyoo-Nam Choi)**

1976년 서울대학교 졸업(공학사)  
1989년 Texas A&M Univ. 전자  
공학과 졸업(공학석사)

1992년 Texas A&M Univ. 전자공학과 졸업(공학박사)  
1992년~1994년 LG전자기술원 연구실장  
1994년~2010년 인천전문대학 정보통신과 교수  
2000년~2002년 미국 CEMDAS연구소 연구원  
2010년~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수  
※ 관심분야 : 센서시스템, 광통신시스템