

Self-seeding FP-LD을 이용한 파장 가변 레이저 광원

김정민¹, 이혁재^{2*}¹(주)쉬운기술, ²경남대학교 정보통신공학과

Tunable laser source using a self-seeding FP-LD

Jung-Min Kim¹, Hyuek-Jae Lee^{2*}¹Schntec, Inc.²Department of Information & Communication Engineering, Kyungnam University

요약 본 논문에서는 self-seeding FP-LD (Fabry Perot Laser Diode)를 이용하여 WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing - Passive Optical Network)에서 사용될 수 있는 새로운 파장 가변 광원의 가능성을 검증한다. 파장 가변 광원을 이용한 WDM-PON의 기존 구현은 AWG (Arrayed Waveguide Grating) 소자의 중심 파장과 광원의 중심 파장을 세밀히 정렬해 주어야 하는 단점이 발생한다. 그러나, 본 논문에서 제안하는 파장 가변 광원은 매우 간단한 구조로 구성되며, 가변 파장이 AWG의 중심 파장에 자동 정렬되는 장점을 갖는다. 구현된 파장 가변 광원은 약 14 nm 정도 이상의 파장 가변 대역을 보였고, 상대적 세기 잡음, RIN (Relative Intensity Noise)은 최대 약 -124dB/Hz로 나타났으며, 외부 변조기를 통해 변조한 결과 10Gb/s 신호에 대한 변조 가능성을 확인 할 수 있었다.

• 주제어 : 수동형 광 네트워크, 파장 분할 다중화, 주입 잠김, 페브리 페롯 레이저, 상대적 세기 잡음

Abstract In this paper, we experimentally demonstrate a self-seeding FP-LD (Fabry Perot Laser Diode) to verify the possibility of a new tunable light source that can be used in WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing - Passive Optical Network) system. The conventional implementation of WDM-PON using a tunable light source has a disadvantage that the center wavelength of the AWG (Arrayed Waveguide Grating) device and the tunable light source must be precisely aligned. However, the proposed tunable light source has the advantage that the tunable wavelength is automatically aligned with the center wavelength of the AWG as well as simple structure. The implemented tunable light source had a tunable band of about 14 nm or more, and the maximum RIN (Relative Intensity Noise) of about -124 dB/Hz, which showed the possibility of modulating 10 Gb/s signal by an external modulator.

• Key Words : Passive Optical Network (PON), Wavelength Division Multiplexing (WDM), Injection Locking, Fabry Perot Laser Diode (F-P LD), Relative Intensity Noise (RIN)

Received 13 September 2021, Revised 28 September 2021, Accepted 30 September 2021

* Corresponding Author Hyuek-Jae Lee, Department of Information & Communication Engineering, Kyungnam University, 7 Kyungnamdaehak-ro, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 51767, Korea.
E-mail: hyuek@kyungnam.ac.kr

I. 서론

최근 UHD 영상서비스, 가상현실(VR)/증강현실(AR), 차세대 와이파이 등 대용량 대역폭이 필요한 인터넷 서비스를 제공해 줄 수 있는 가입자망의 요구가 더욱 가중되고 있다. 이를 위해 기가 인터넷에 이어 10기가 인터넷 시대를 앞당기려 노력 중이다[1]. 광 가입자망의 일반적 구현 방법은 PON (Passive Optical Network) 방식으로, TDM (Time Division Multiplexing)-PON과 WDM (Wavelength Division Multiplexing)-PON 으로 크게 나뉜다. TDM-PON 방식은 시분할에 의해 가입자별 할당된 시간 슬롯에 데이터를 송수신하는, 즉 전체 대역폭을 가입자 간에 나눠 쓰는 기술이고, WDM-PON 방식은 각 가입자 마다 별도의 파장을 할당하여 등가적인 점대점 통신을 할 수 있는 방식이다. WDM-PON 방식이 우수한 성능을 가짐에도 불구하고 TDM-PON 방식에 비해 가격 경쟁력이 떨어져 광 가입자망에 잘 적용되지 못하는 실정이다.

WDM-PON 시스템의 구성은 Central Office (CO)의 Optical Line Terminal (OLT)과 Optical Network Unit (ONU)으로 구성되며, OLT 와 ONU들 사이를 연결하는 광 분배망으로 이루어져 있다. 가입자들의 인접 지역 가까이 구내에는 광다중/역다중화기를 포함하는 Remote Node (RN)을 설치하여 광 분배망을 구성하며, RN은 AWG (Arrayed Waveguide Grating) 소자가 주로 사용된다. CO와 RN 사이는 단일 광섬유로 연결되고, 종단 쪽의 ONU 장치들은 RN 장치의 AWG 소자에서 분기되는 광섬유로 각각 연결된다[1]. FP-LD (Fabry Perot - Laser Diode)의 주입 잠금 (Injection Locking) 원리를 기반으로 하는 WDM-PON의 구현 기술은 외부 광원을 주입하여 파장을 고정하는 seeded-WDM[2] 과 외부 광원 없이 파장 가변 광원을 사용하여 AWG 통과대역에 맞추는 seedless-WDM[3] 방식으로 크게 나뉘어진다. seedless-WDM 방식은 FP-LD의 앞단에 외부 공진기를 이용하여 광원을 만드는 방법이다. 이는 광 신호의 파장 제어가 필요하여 구축 비용도 상대적으로 높아지지만 시스템 설계가 단순하고 장거리 전송이 가능하다는 장점을 갖는다. 반면에 seeded-WDM 방식은 파장 제어 장치가 필요치 않는 간단한 장치 구성의 장점은 있지만, 외부 광대역 주입 광원의 잡음 특성이 광 신호 품질에 직접적으로 연관되는 단점을 갖는다.

또한, 상향 광 신호는 광섬유에서 발생하는 Rayleigh 역산란 잡음의 영향 등이 시스템의 제약 요인으로 작용하여 전송 거리가 짧아지는 단점이 발생한다.

본 논문에서는 외부 광원의 주입 없이 자기 자신의 빔이 주입되고, 주입 파장의 결정은 OLT 내의 AWG 통과 대역에 의해 자동으로 결정되는 self-seeding FP-LD를 이용한 WDM-PON에서의 새로운 파장 가변 광원에 대한 구조를 제안한다. 이 방법은 외부의 광대역 주입 광원 없이 자기 빔을 이용하여 주입하기 때문에 노이즈 특성이 좋아지고, 파장이 자동 결정되기 때문에 파장 제어 장치가 필요 없는 간단한 시스템 구조를 갖는다. 따라서, 제안되는 광원으로 구성된 시스템은 seedless-WDM과 seeding-WDM의 특성을 모두 갖게 되는 하이브리드 형태가 된다.

II. Self-seeding FP-LD 기반의 WDM-PON 구조

주입잠금의 기본적인 원리는 Christiaan Huygens 라는 과학자가 1865년 병 때문에 침대에 누워만 있으면서 호기심에 의해 발견되었다. 벽면에 부착되어 있는 두 개의 시계를 가까이 놓아두게 되면 시계추의 흔들림 동기가 점차적으로 맞아 진다는 사실을 발견했다 [4]. 그러나, 시계를 서로 멀리 떨어트려 놓으면 각자 free-running 상태로 독립 동작하는 것을 확인하였다. 벽면을 타고 전달되는 진동이 한쪽 시계에서 다른 쪽으로 기계적으로 전달되고, 그것에 의한 커플링이 형성되어 한쪽 시계추의 흔들림에 동기가 맞아지는 것을 밝혀냈다. 이는 그네의 에너지 전달 과정을 가지고 이해할 수도 있다. 그네가 흔들릴 때, 그네를 더욱 힘차게 흔들리게 하려면 그네의 움직임과 동기가 맞게 힘을 가해 줘야지, 그 반대로 힘을 주게 되면 그네가 흔들리지 못하고 멈춰 서게 된다는 것을 경험적으로 알고 있다. 따라서, 외부의 흔들림에 free-running 하는 그네가 동기가 맞춰지는 현상이라고 볼 수 있다. 이를 레이저에서 비교해 보면, 외부 주입 빔의 위상에 동기가 맞아지는 주입 잠금 현상으로 이해 될 수 있다. 앞서 설명한 두 개 시계의 시계추와 비슷한 방식으로 동작하는 상호 주입 잠금에 의한 광원은 참고문헌 [5]에서 발표되었다.

외부 레이저 빔에 의한 주입 잠금을 이용하는 응용은 여러 분야에서 다양하게 적용되어 왔고, 2000년 즈

음엔 외부에서 광대역 광원을 FP-LD에 주입하여 WDM-PON의 광원으로 사용하는 연구가 매우 활발히 연구되어 좋은 성과를 얻은 바 있다[2]. 그러나, 외부 광대역 광원의 잡음 특성이 주입 잠김 되는 광원에 반영되어 잡음을 줄이는 데 한계가 있고, 어떤 불의의 사고로 광대역 광원이 고장 나는 경우 전체 시스템이 다운되는 단점을 갖게 된다. 이런 단점을 보완하기 위해 레이저의 자기 빔을 주입하여 잠김 현상을 유도하는 self-seeding 방식의 WDM-PON 광원을 제안하였다 [6].

그림 1에서는 self-seeding FP-LD을 이용한 WDM-PON 시스템의 구조를 보였다. 외부 주입 빔을 만들기 위한 광대역 광원이 없기 때문에 구조가 매우 간단해지고, 그에 따라 저가 구현이 가능한 장점을 갖는다. 그러나 FP-LD에서 발생한 빔이 AWG를 지나 OC (Optical Circulator)의 2번에서 3번으로 나오고, FC (Fiber Coupler)에서 양분된 빔의 일부가 OC의 1번에서 2번으로 나와 AWG를 통해 다시 FP-LD에 주입되는 경로를 갖게 되는데, 피드백 시간이 길어지게 되어 있다. 이것이 몇 가지 문제를 야기 시키는데, 첫째로 FP-LD를 ON/OFF 직접 변조 (OOK, On/Off Keying) 하면, OFF 되는 구간이 피드백될 시 제대로 빔이 주입 안되는 단점이 발생하고, 두 번째는 AWG, OC, FC, 이들 광소자들을 연결한 광섬유가 온도에 따라 미세하게 변해 주입 잠김의 위상 미스매치를 유발하는 문제를 갖는다. 따라서 첫 번째 문제는 소광비 (ON/OFF ratio)를 줄여 OFF 구간에서도 약간의 빔이 피드백하도록 하면 어느 정도 해결할 수 있으나, 작은 소광비로 인해 성능 저하를 초래한다.

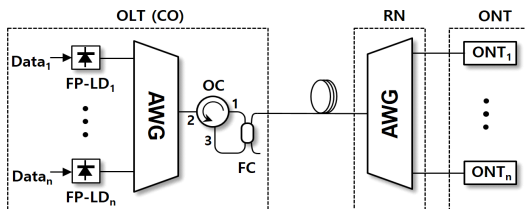


Fig. 1. Structure of WDM-PON based on self-seeding FP-LDs (OLT: Optical Line Terminal, CO: Central Office, RN: Remote Node, ONT: Optical Network Terminal)

두 번째 문제는 온도에 따른 광소자들의 미세한 길이 변화에 의해 유발되는 위상 천이 문제인데, 이는 그림 1의 OLT 부분을 광 집적회로로 만들고 단일 칩

상에서 온도제어를 하면 해결할 수 있는 가능성이 있다. 혹은 최근엔 광소자들이 온도 비의존적인 특성을 갖도록 제작되고 있으므로 어느 정도는 해결 가능하다. 그러나 이러한 방법으로 WDM-PON 시스템을 구현할 수 있으나, 낮은 소광비로 짧은 전송 거리를 보낼 수밖에 없는 제한을 갖는다. 또한, 주입 잠김에 사용된 FP-LD가 직접 변조를 함으로써 주입전류의 변동이 생기고, 이로 인해 복잡한 동적 동작을 유발한다. 따라서 안정된 self-seeding 주입 잠김 현상이 일어나는 조건 범위가 매우 좁아진다. WDM-PON 시스템이 약간 복잡해지지만, 사용된 FP-LD는 self-seeding 주입 잠김 현상만이 유도되고, 광변조는 외부 변조기를 이용하는 그림 2와 같은 구조를 제안한다. 이와 같은 구조를 이용하면 광신호의 소광비는 외부변조기(MZ-mod)에 의해서만 결정되고, FP-LD는 self-seeding 주입 잠김에만 전념할 수 있어 전체적인 광원 안정화에 훨씬 유리하게 된다.

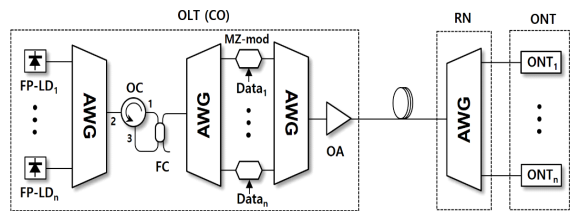


Fig. 2. Structure of WDM-PON based on self-seeding FP-LDs using a Mach-Zehnder modulator (MZ-mod)

III. 상호 주입 잠김 F-P LD 광원에서 파장변화에 따른 성능 측정

그림 1에서의 WDM-PON 시스템 광원을 테스트하기 위해 그림 3과 같은 셋업을 구성하였다. 제한된 실험실 여건으로 그림 1의 AWG는 그림 3의 Tunable BPF (Band Pass Filter)로 바꾸어 실험을 수행했다. 또한, 실험의 편의를 위해 FC는 광 피드백을 주기 위한 루프 밖에 위치시켰고, AWG 대신 사용된 Tunable BPF는 루프 안에 위치시켰다. Tunable BPF가 동일한 양방향 특성을 갖지 못하여 그와 같은 구성으로 실험하였다. Self-Seeding 기반의 파장 가변 광원의 실험적 검증을 위한 셋업이므로 그림 3의 구조로 충분하다.

그림 3은 unpolarized FP-LD (AR:0.1%, HR:30%)를 이용하여 self-Seeding 기반의 파장 가변 광원에 대한

실험 구성도이다. CO에 위치한 FP-LD는 PRBS (Pseudo Random Bit Sequence) Pattern length가 $2^9 - 1$ 인 1.25 Gb/s의 속도로 NRZ (Non-Return to Zero) 직접 변조된 신호가 생성된다. 이렇게 생성된 신호는 90:10 FC를 통해 OC에 주입되게 되며 Tunable BPF (BW: 0.8nm)를 통해 스펙트럼 필터링 되어 다시 CO의 FP-LD로 주입되는 방식으로 광원이 생성되게 된다. 이렇게 생성된 광원은 RN의 AWG (Arrayed Waveguide Grating)를 통해 ONU (Optical Network Unit)의 가입자로 전송된다.

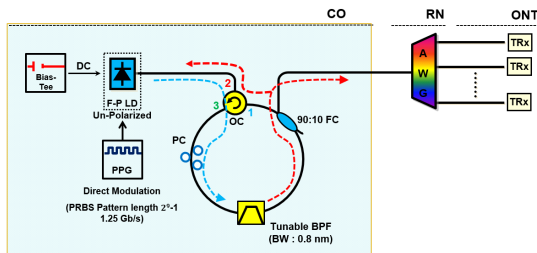


Fig. 3 Experimental setup for a tunable source based on a self-seeding FP-LD

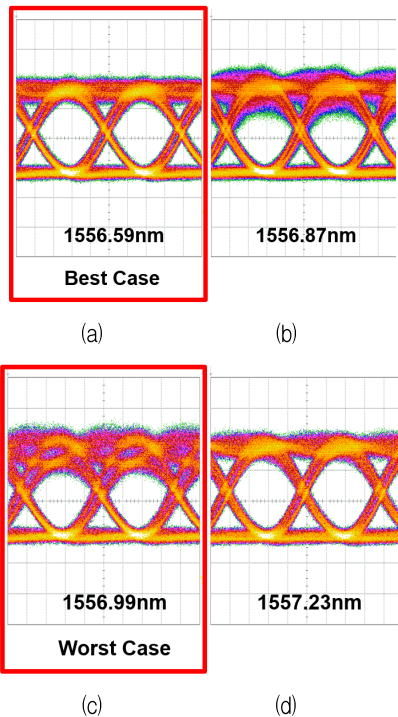


Fig. 4. Eye diagram of 1.25 Gb/s direct modulation using a self-seeding FP-LD at (a) 1556.59nm, (b) 1556.87nm, (c) 1556.99nm, and (d) 1557.23nm

그림 4는 self-seeding 주입 잠김에 의해 생성된 1.25Gb/s 속도의 광 신호 eye 패턴에 대한 오실로스코프 파형을 보여준다. 광신호 데이터는 그림 3의 Tunable BPF의 중심 파장을 변화시켜가면서 FP-LD가 self-seeding 주입 잠김 되도록 유도하면서 여러 파장에서 측정했다. 1556.59nm 파장에서 제일 좋은 결과를 얻었고, 1556.99nm에서 제일 안 좋은 결과를 얻었다. 그림에서 알 수 있듯이 데이터 ‘0’ 부분보다는 데이터 ‘1’ 부분에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는 피드백 되는 신호의 영향이 반영된 것으로 분석된다. 또한, self-seeding 주입 잠김 현상을 발생시키려면 대략 7dB 이하로 변조시켜야 하며, -10dBm 이상의 광 전력을 주입하고, 피드백 광신호의 편광을 잘 맞춰야 한다.

그림 5에서는 파장을 변화 시켜 가면서 self-seeding 주입 잠김 된 광신호의 레벨 ‘1’ 전압에 대한 측정값의 standard deviation 결과를 보였다. 파장은 1546nm부터 1560nm 까지 변화 시켜 보면서 측정했고, 약 14nm 의 가변 범위에서 잘 동작함을 확인하였다. Tunable BPF의 가변 범위가 제한되어 결과를 더 얻지는 못했지만, FP-LD가 동작하는 범위 내에서 가변 가능할 것으로 예상된다. 이와 같이 ‘1’ 레벨 신호의 잡음이 ‘0’ 레벨 신호의 잡음보다 크게 나타나게 되는 경우에는 수신 단에서 판단 문턱값을 조절하면 최적을 성능을 얻을 수 있는데, adaptive threshold 기능을 갖는 광 수신기가 요구된다.

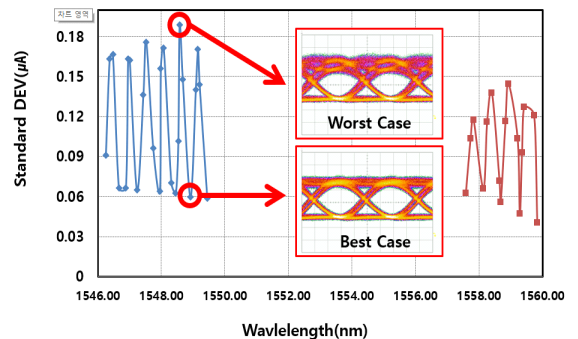


Fig. 5. Standard deviation of the measured voltage at level ‘1’ of the obtained optical signal according to the wavelength

그림 6은 self-seeding FP-LD를 이용하여 구현된 파장 가변 레이저 광원 대한 RIN (Relative Intensity Noise)을 측정된 결과이다. 그림 6의 왼쪽 그래프가 RIN 데이터이고, 오른쪽은 DC 광신호를 디지털 오실로스코프로 캡처한 그림을 보였다. 그 결과 가장 좋은 성능을 갖는 파장에서 -124dB/Hz의 성능을 확인 할 수 있었으며, 이는 10Gb/s 고속 전송을 위한 최저 RIN Threshold를 수용 할 수 있음을 확인하였다. 또한, 가장 안 좋은 RIN 도 -110dB/Hz 보다 낮음을 확인하였고, 1.25 Gb/s 신호를 전송하기 위한 RIN -110dB/Hz를 만족함을 확인 할 수 있다.

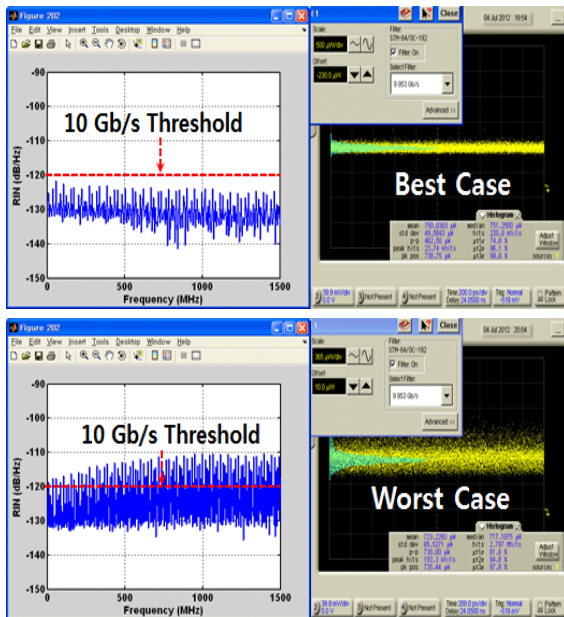
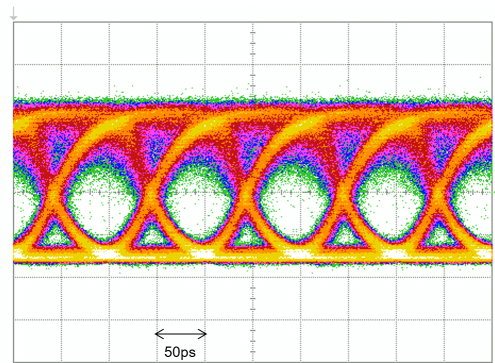
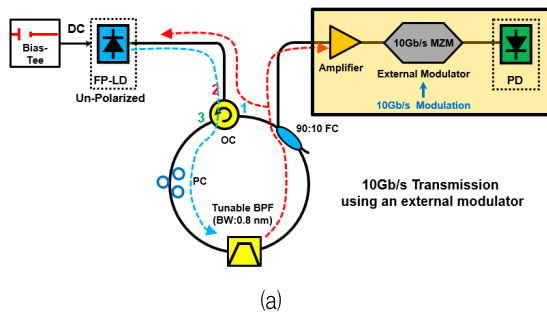


Fig. 6. Measurement results of RIN (Relative Intensity Noise) for a tunable laser light source using self-seeding FP-LD



(b)

Fig. 7. (a) Experimental setup for Mach-Zehnder external modulation to a tunable source based on a self-seeding FP-LD, and (b) Eye diagram of 10 Gb/s optical signal by the external modulation

그림 7(a)는 self-seeding FP-LD 기반의 파장 가변 광원으로 얻어진 빔에 마하젠더 외부 변조기 (MZM)를 사용하여 10Gb/s 고속 광신호를 얻기 위한 실험 셋업이다. 그림 7(b)는 얻어진 10Gb/s 광신호의 오실로스코프 eye 패턴을 보여준다. BER (Bit Error Rate)을 재보지 않았지만, eye 패턴으로 보았을 때 10⁻⁹ 이하 정도로 예측된다. 부가 비트가 추가되었지만 오류정정 코드로 코딩하여 보내면 충분히 error free를 구현할 수 있을 것이다. 이와 같이 외부 변조기로 변조한 경우 약 15dB 이상의 소광비를 얻었을 수 있었으며, self-seeding FP-LD 기반의 파장 가변 광원을 이용한 10Gb/s 고속 신호에 대한 변조 가능성을 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 self-seeding FP-LD 기반의 파장 가변 광원을 이용하여 1.25Gb/s의 속도에서 직접 변조된 신호 발생이 가능하였고, 간단한 방법을 통해 저 가격 광원 구현이 가능함을 살펴보았다. 제안된 파장 가변 광원은 RIN 측정 결과 최대 약 -124dB/Hz로 10Gb/s 이상의 고속 전송을 위한 최소 Threshold를 수용 할 수 있었으며, 약 14nm의 큰 파장 대역에서 파장 가변 범위가 넓은 것을 확인 할 수 있었다. 얻어진 15nm는 Tunable BPF의 가변범위이고, FP-LD가 동작하는 파장 영역 내에서 안정한 가변 파장 광원을 구현할 수 있을 것으로 예상된다. 최소 RIN이 -110dB/Hz 이하임을 확

인하였고, 이는 최소한 1.25Gb/s 이상의 신호를 생성할 수 있음을 의미한다. 또한, 마하젠더 외부 변조기를 이용하였을 때 10Gb/s 고속 광 신호 변조가 가능함을 실험적으로 증명하였다. 그러나 self-seeding FP-LD 기반의 파장 가변 광원을 구성하기 위해서는 비교적 긴 광루프가 형성됨에 따라 온도 변화에 따른 안정화 제어가 필요하다. 본 논문에서의 실험은 실험실 환경에서 30분 이상 안정함을 확인하였지만, 실제 필드에서 사용하려면 안정화 회로를 삽입하든지 혹은 광 집적 회로로 구현하는 것이 필요하다.

REFERENCES

- [1] C.-H. Lee., S.-M. Lee, K.-M. Choi, J.-H. Moon, S.-G. Mun, K.-T. Jeong, J. H. Kim, and B. Kim, "WDM-PON experiences in Korea [Invited]," *Journal of Optical Networking*, Vol. 6, No. 5, pp. 451-464, May 2007.
- [2] H. D. Kim et al., "A Low-Cost WDM Source with an ASE Injected Fabry-Perot Semiconductor Laser", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.12, No.8, pp 1067-1069, August, 2000.
- [3] G. Jeong, J.-H. Lee, M.Y. Park, C.Y. Kim, S.-H. Cho, W. Lee, and B.W. Kim, "Over 26-nm Wavelength Tunable External Cavity Laser Based on Polymer Waveguide Platforms for WDM Access Networks," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, No. 20, pp 1956-1958, 2006.
- [4] Siegman, *Lasers*, University Science Books, pp.1129-1170, 1986.
- [5] J.H. Hwang, H.J. Lee, J.M. Park, "Cost Effective Mutual Injection Locked F-P LD for WDM-PON System,, The Journal of Korea Institute of Convergence Signal Processing, Vol. 21, No. 4, pp.162-169, 2020.
- [6] C. H. Yeh, F. Y. Shih, C. H. Wang, C. W. Chow, and S. Chi, "Cost-effective wavelength-tunable fiber laser using self-seeding Fabry-Perot laser diode," *Optics Express*, Vol. 16, Issue 1, pp. 435-439, 2008.

저자소개

김 정 민 (Jung-Min Kim)



2006년 2월 : 경남대학교

정보통신공학과(공학사)

2008년 2월 : 경남대학교 첨단공학과

융합IT전공 (공학석사)

2018년 3월 ~ 현재 : 경남대학교

융합IT공학과 박사과정

2006년 4월~현재 (주)쉬운기술 대표

2010년 3월~현재 경남대학교 경영정보학과 겸임교수

관심분야 : 임베디드시스템&펌웨어, 초고속통신망,

광통신

이 혁 재 (Hyuek-Jae Lee)



1994년 2월 : KAIST

전기및전자공학과(공학박사)

1994년 3월~1995년 7월 :

LG전자기술원 선임연구원

1995년 7월~2000년 7월 :

ETRI 선임연구원

2000년 8월~2001년 11월 UC Davis

: post-doc & asst. researcher

2001년 12월~2002년 12월 ROSWIN-USA, Inc CEO

2003년 9월~현재 : 경남대학교 정보통신공학과 교수

관심분야 : 광통신/광스위칭, 초고속통신망, 딥러닝응용