

기가급 WDM-PON 을 위 한 광기술 분석

Review on the Optical Link Technologies for the Gigabit-per-second Wavelength-Division-Multiplexing Passive Optical Networks (WDM-PONs)

윤 호 성*, 박 태 상, 박 근 열, 김 진 희
(Hosung Yoon, Tae-Sang Park, Kun Youl Park, Jin Hee Kim)

Abstract : This paper reviews the optical link technologies which have been developed for gigabit-per-second wavelength-division-multiplexing passive optical networks (WDM-PONs). Similarly to the 100Mb/s WDM-PON systems which have been deployed for trial services by KT, the most important requirement for 1Gb/s WDM-PON is wavelength independence (colorless feature) of its ONU/ONTs, which makes possible convenient operation and cost-effective maintenance with minimum inventory cost. Among various methods to implement such colorless feature, four promising candidates for gigabit WDM-PON are analyzed with their own development issues and their expected performances are compared.

Keywords: Passive optical network, WDM-PON

I. 서론

미래 보장형 (future-proof) 인프라로서 최근 국내에도 도입이 확대되고 있는 수동형 광가입자망 (passive optical network, PON) 기술은 국사에서 하나의 광섬유가 진행하여 원격 노드 (remote node, RN) 로 연결된 후, 수동소자로 구성된 RN에서 다시 여러 광섬유로 분기되어 가입자에게 연결되는 광가입자망 기술로서, 점대다점 (point-to-multipoint) 의 광섬유 망 구성을 가지기 때문에 광섬유 포설 비용의 큰 비중을 차지하는 간선 구간 (feeder fiber) 의 광섬유 소요량을 크게 줄일 수 있다는 점과, RN에 능동소자 없이 수동소자만이 사용되어 신뢰성이 높을 뿐만 아니라 유지 보수가 편리하여 망 운용 비용을 획기적으로 절감할 수 있다는 점에서 전 세계적인 각광을 받고 있다.

PON은 점대 다점을 구현하기 위 한 다중 접속 방법에 따라 크게 두가지로 분류되는데, 첫번째는 ATM-PON으로 시작되어 B-PON (broadband PON, ITU-T G.983.x) 을 거쳐 G-PON (gigabit-capable PON, ITU-T G.984.x) 과 E-PON (Ethernet PON, IEEE 802.3ah) 으로 진화된 TDM-PON (time division multiplexing PON) 으로서, 국사에서 다수의 가입자로 전송되는 하향 신호는 TDM으로, 가입자에서 국사로 전송되는 상향 신호는 TDMA (TDM access) 로 접속되는 방식이며, 이 경우 RN으로는 일반적인 광 파워 분기기 (optical power splitter) 가 사용된다. TDM-PON의 장점으로는 국사의 OLT (optical line termination) 송수신기를 여러 개의 ONT가 공유함으로써 장치비용을 줄일 수 있다는 점, 저가의 광원을 사용할 수 있다는 점, 그리고 망을 포설할 때에 분기구조를 자유롭게 선택할 수 있다는 점 등을 들 수 있지만, 한정된 전송용량을 다수의 가입자가 공유하는 구조이기 때문에 TDMA를 구현하기 위한 rang-

ing, DBA (dynamic bandwidth assignment) 등의 복잡한 MAC (medium access control) 기능이 요구되며 이로 인하여 전송 효율이 떨어진다는 단점을 갖는다.

PON 기술 방식 중 두번째는 WDM-PON (wavelength division multiplexing PON) 으로서, RN으로는 AWG (arrayed waveguide grating) 나 TFF (thin film filter) 등을 이용한 파장 분리기 (wavelength splitter) 를 사용하고 이에 따라 각 ONT에 고유의 파장을 유일하게 할 당함으로써, 망의 물리적 형상은 점대다점이지만, CO와 각각의 ONT 간에 고유의 파장으로 완전히 분리된 점대점 (point-to-point) 연결을 논리적으로 제공하는 방식이다. WDM-PON 의 장점은 논리적인 점대점 연결이 구현되기 때문에 복잡한 MAC 기능이 요구되지 않는다는 점, 그리고 여러 개의 WDM 파장이 사용되기 때문에 망의 대역폭을 증대시키는 것이 비교적 용이하다는 점 등을 들 수 있으나, 고가의 WDM 광원이 소요된다는 점과 가입자별로 고유의 파장을 할당하는 데 따르는 운용, 유지 비용이 높다는 점이 WDM-PON의 현장 적용을 어렵게 하는 제약 조건으로 작용해 왔다.

이를 해결하기 위해, 2000년 파장 잠김된 FP-LD (Fabry-Perot laser diode) 를 이용한 저가의 파장 무의존적 WDM-PON 광원이 제안되었다 [1]. FP-LD는 기본적으로 여러 모드 (mode) 들이 동시에 발진하는 멀티모드 레이저 (multi-longitudinal-mode laser) 이며, 저가의 광원으로 활용되어 왔지만, 좁은 선폭 (linewidth) 과 높은 파장 안정성이 요구되는 WDM용 광원으로는 사용이 불가능한 것으로 알려져 왔다. 그러나 이 FP-LD에 스펙트럼 분할된 비간섭성 (incoherent) 광원을 주입하여, 주입광원의 파장 대역에 일치하는 모드만 선택적으로 발진하도록 함으로써 단일모드 레이저 (single-longitudinal-mode laser) 와 유사한 특성을 갖게 하여, WDM용 광원으로 사용 가능하다는 사실이 알려졌다. 이를 이용하여, ONT 광 트랜시버 (transceiver) 에는 동일한 종류의 FP-LD를 사용하면서, ONT와 연결된 RN의 해당 파장에 맞게 발진 파장이 자동 조정되는 광원을 얻을 수 있게 되고, 이러한 파장

* 책임저자(Corresponding Author)

윤호성, 김진희: KT인프라연구소 (hsyoon@kt.co.kr, kimjih1@kt.co.kr)

무의존성은 WDM-PON의 운용, 유지 비용 뿐 아니라 광원의 재고 비용을 감소시키는 역할을 하게 된다. 이러한 장점을 바탕으로 파장당 100Mb/s 급의 시스템이 성공적으로 상용화되어 현재 KT에서 시범 서비스가 진행되고 있다 [2].

본 논문에서는 기존에 상용화된 100Mb/s 급 WDM-PON의 파장 무의존성이라는 장점을 그대로 유지하면서, 파장당 대역폭을 기가급으로 증대시키기 위한 광기술 방식들에 대해 살펴보고, 각 방식의 장단점을 분석하도록 한다.

II. 기가급 WDM-PON 광원 기술

1. FP-LD와 보조광원을 이용한 기술

첫번째로 소개할 기술방식은 FP-LD와 보조광원을 사용하는 기술로서, 그림 1에서 이를 이용한 WDM-PON 광링크의 구성도를 도시하였다. 이 방식은 기존에 상용화된 100M 급 WDM-PON과 동일한 구조로서, FP-LD에 스펙트럼 분할된 비간섭성 보조광을 주입하여 보조광의 파장과 일치하는 FP-LD의 해당 모드만을 발진시킴으로써 광원의 파장 무의존성을 구현하는 기술이다. 그림 1에서 도시한 구성도에서 OLT에서 ONT로 전송되는 하향 광신호를 위해서는 E-band 에서 동작하는 광대역 광원 (broadband light source, BLS) 이 보조광원으로 사용되었고, BLS와 동일한 E-band 에서 동작하는 FP-LD 가 OLT 신호광원으로 사용되었다. 반대로, ONT에서 OLT로 전송되는 상향 광신호를 위해서는 C-band 에서 동작하는 EDFA 기반의 BLS 가 보조광원으로 사용되었고, ONT 신호광원으로는 C-band FP-LD가 사용되었다. BLS로 구성된 보조광원은 OLT 내부에 실장되기 때문에, 상향 광신호를 위한 C-band BLS는 전송로를 따라 진행한 후 RN에서 스펙트럼 분할되어 ONT에 위치한 FP-LD에 주입되게 된다. 광수신기 (photodiode, PD) 는 광원과 반대로, OLT에는 C-band 의 상향신호를 수신하고, ONT에서는 E-band의 하향 신호를 수신하게 된다. 상·하향 광신호는 하나의 광섬유를 통해 양방향으로 진행하게 되므로 (bidirectional, BiDi), OLT 와 ONT 의 광송수신기 (transceiver, TRx) 에서는 상·하향 광신호를 분리하기 위한 C/E-band WDM 필터가 설치된다.

이 기술방식은 가장 저렴한 레이저 광원인 FP-LD를 이용하여 WDM-PON 에 필요한 파장 무의존 광원을 구현하였다는 큰 장점을 가지고 있으나, 보조광원으로 사용된 비간섭성 광원의 잡음 특성에 의해 전송성능이 제약되는 한계점 또한 가지게 된다. 먼저, 주입광원의 대역폭을 살펴볼 때, 광원의 대역폭이 좁아질수록 스펙트럼 분할된 주입광 자체의 RIN (relative intensity noise) 특성이 나빠지게 된다 [3]. 이후의 주입광 감쇠 과정에서 FP-LD의 포화특성 (saturation) 에 의하여 신호광의 RIN은 주입광의 RIN보다 개선되게 되나, 주입광의 RIN이 지나치게 높을 경우 최종 신호광의 RIN이 기가급 전송을 하기에 적절한 수준이 되지 못할 가능성이 있게 된다 [4]. 파장 분기기의 통과대역 형상을 고려하지 않을 경우, 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 스펙트럼 분할된 주입광의 대역폭은 파장 분기기의 채널 간격에 비례하게 되는데, RIN 조건으로 인하여 주입광의 대역폭을 어느 수준 이상으로 유지해야 한다는 것은, 제한된 광대역 광원의 대역 안에서 사용 가능한 WDM 채널 개수를 제한하는 요소로 작용하게 된다.

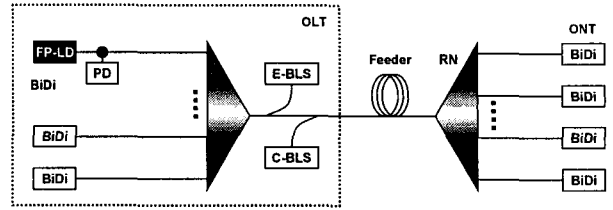


그림 1. 보조광원과 FP-LD를 이용한 WDM-PON 구성도

Fig. 1. WDM-PON configuration employing a wavelength-locked FP-LD with spectrum-sliced broadband light source

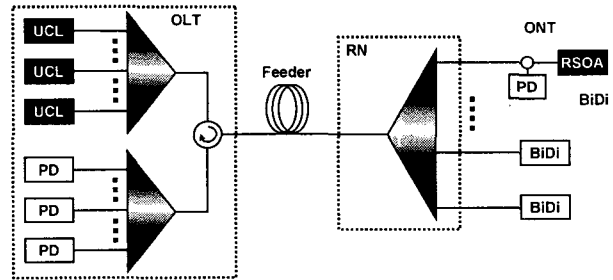


그림 2. RSOA의 재변조를 이용한 WDM-PON 구성도

Fig. 2. WDM-PON configuration employing an RSOA as an ONT transmitter which re-modulates downstream optical signal

또한 FP-LD의 포화 특성을 이용하여 주입광의 RIN보다 출력 광의 RIN이 개선된다고 하더라도, 이후 OLT 와 RN의 파장 분기기를 거치게 되면 개선되었던 RIN이 다시 악화되는 현상이 관찰된다. 이는 포화 특성으로 인하여 잡음 성분이 줄어드는 과정에서 광원의 주파수 성분 간에 상관성 (correlation) 이 발생하였던 것이, 파장 분기기를 거치면서 그 상관성이 파괴되어 다시 RIN이 증가하게 되는 것으로서 [5], 이를 최소화하기 위해서는 파장 분기기의 통과대역 형상을 통상적인 가우시안 (Gaussian) 이 아닌 평탄한 플랫폼 (flat-top) 형상으로 설계할 것이 요구되고 있다.

이 기술방식을 사용하여 100M 급 WDM-PON 에서는 32분기 시스템이 성공적으로 상용화되어 시범 서비스가 진행되고 있으며, 기가급에서는 16 파장분기 시스템이 현재 상용화를 앞두고 있다.

2. RSOA를 이용한 재변조 기술

그림 2에서는 기가급 WDM-PON을 위한 또다른 광링크 기술을 도시하고 있다. 앞서 논의하였던 FP-LD에 보조광원을 주입하는 방식 (그림 1) 과의 차이점은, OLT 에 고정파장 광원이 사용된다는 점과, ONT 에 반사형 반도체 광증폭기 (reflective semiconductor optical amplifier, RSOA) 를 사용하여 하향 광신호의 일부를 분기한 후 반사-증폭-변조하는 과정을 거쳐 재사용한다는 점에 있다 [6]. 이 과정을 통하여, ONT 광원의 파장이 하향 광원의 파장과 일치하게 되므로 ONT에서의 파장 무의존성이 구현된다. 동일한 관점으로, ONT 광원으로 일반적인 반도체 광증폭기 (semiconductor optical amplifier, SOA) 가 사용된 방식에 대해서는 이전에 연구가 진행된 바 있으나 [7], 그림 2의 경우에는 SOA를 RSOA로 대체함으로써

써 ONT 에서 단일 광섬유로 양방향 송수신을 경제성 있게 구현할 수 있도록 한다는 점에서 큰 장점을 갖는다.

이 방식의 경우 RSOA에 주입되는 보조광이 비간섭성 또는 간섭성 (coherent) 의 CW (continuous wave) 가 아닌, 데이터가 실린 하향 신호의 일부라는 점에서, 하향광의 소광비 (extinction ratio) 와 RSOA의 포화 특성에 따라 상향 광신호의 전송 품질이 큰 차이를 보이게 된다. 즉, 하향 신호의 소광비가 적절한 수준으로 낮을 경우, RSOA의 포화특성을 통하여 하향 신호의 변조 성분을 억제한 후 (amplitude squeezing) 상향 신호를 생성할 수 있으나, 하향 신호의 소광비가 지나치게 크거나 RSOA에 주입되는 파워가 포화 수준 이하일 경우 하향 신호의 변조 성분이 상향 신호에 있어서 잡음으로 작용하여 전송 특성을 저하시키는 요인으로 작용하게 된다. 따라서 RSOA의 동작 조건을 최대한 완화하기 위해서는 RSOA의 출력 파워 또는 증폭 이득이 커야 할 뿐만 아니라 포화가 시작되는 입력 파워 수준을 가능한 한 낮출 필요성이 있게 된다. 또한, 그림 2에서 볼 수 있듯이 하향 광원으로 사용되는 고정파장 광원의 경우 일반적으로 분산쇄환 (distributed feedback, DFB) 레이저가 사용되고, DFB LD 의 경우 특정 편광을 갖게 되기 때문에, RSOA 출력을 안정적으로 얻기 위해서는 RSOA 증폭 이득의 편광 의존성 (polarization dependent gain, PDG) 을 낮추는 것 역시 기술적 과제가 된다.

RSOA를 이용한 재변조 방식의 WDM-PON에 있어서 두 번째로 제기되는 이슈는 반사에 의한 영향이다 [8]. 반사로 인한 영향은 수신기와 RSOA 모두에서 발생하게 된다. 먼저 수신기에 미치는 영향에 대해서 살펴보면, 재변조 방식의 경우 그 원리에 의해 상하향 파장이 일치하고, 이로 인하여 반사광과 수신광이 동일한 파장을 갖게 된다. 이에 따라, 수신기에서는 반사광을 차단할 적절한 수단을 갖기 어렵게 될 뿐만 아니라, 반사광과 수신광의 파장이 정확히 일치하기 때문에 광 비팅 (optical beating) 으로 인하여 수신기에 큰 페널티를 야기하게 된다. 두번째로, ONT의 관점에서 보았을 때 ONT에서 발생한 상향광의 반사광은 ONT 수신기의 성능을 저하시킬 뿐 아니라, 되돌아간 반사광이 RSOA로 다시 주입되어 RSOA에서 변조된 상향신호의 품질을 저하시키게 된다. 이와 같은 두가지의 반사 영향으로 인하여, 이 방식을 이용한 WDM-PON의 경우, 일정 수준 이상의 광선로 광반사 손실 (optical return loss) 을 요구하게 된다.

또한, OLT 광원에 DFB 등의 파장 고정 광원이 이용되는데, 이 광원은 일반적으로 고가이기 때문에 이를 저가화하는 노력이 요구되고 있다.

ONT에 RSOA를 이용하여 하향광신호를 재변조하는 이 기술을 이용하여 16 파장분기 WDM-PON 시스템이 상용화를 앞두고 있다.

3. 파장 제어 광원을 이용한 기술

그림 3에서는 파장 제어 광원 (wavelength tunable laser) 을 이용한 WDM-PON의 구성도를 보여주고 있다. 파장 제어 광원은 단일 모드로 발진하는 광원이면서, 발진 파장을 임의로 제어 가능한 광원을 말한다. 그림 3에서 예시한 광원은 도파로 격자 (waveguide grating) 을 이용한 외부 공진 레이저 (ex-

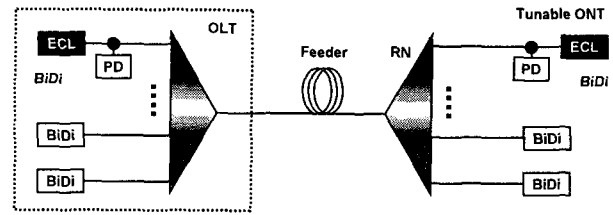


그림 3. 파장 제어 광원을 이용한 WDM-PON 구성도
Fig. 3. WDM-PON configuration employing a wavelength-tunable external cavity laser diodes

ternal cavity laser) 로서, 도파로 격자에 열을 가해 격자의 반사파장을 변화시킴으로써 레이저의 발진 파장을 조정하는 방식을 택하고 있다 [9].

파장 제어 레이저를 이용한 방식은, 그 특성에 의하여 파장 무의존성이 자동적으로 구현되면서, 외부 보조광원을 필요로 하지 않기 때문에 광링크의 구성이 가장 간단하다는 장점을 갖지만, 안정적인 파장 가변 특성을 갖는 파장 제어 레이저를 저가에 구현하는 것이 가장 큰 기술적 과제로 볼 수 있으며, 추가적인 외부의 조작 없이 RN과 연결된 파장을 검출, 추적하는 알고리즘을 구현하는 것이 요구된다 [10].

이러한 파장 제어 광원을 이용한 방식은 링크 구성이 가장 간단하여, 파장 분기/결합 및 광섬유로 인한 손실 외의 추가적인 손실이 없으며, 고품질의 광신호를 얻을 수 있다는 장점이 있기 때문에, 향후 장거리 (long-reach) WDM-PON 시스템 등에서도 적용 가능할 것으로 기대되고 있으며, 현재 16 분기 WDM-PON 시스템이 개발되고 있다.

III. 결론

본 논문에서는 파장당 기가급의 전송속도를 갖는 WDM-PON 시스템을 구현하기 위한 광기술에 대하여 소개하고, 그 특성과 기술적 과제를 분석하였다. 기존에 상용화된 100M WDM-PON 시스템과 마찬가지로 기가급 WDM-PON 에서는 편리한 운용, 관리 및 재고 비용 절감을 위하여 광원의 파장 무의존성이 크게 요구되고 있다. 이를 경제적으로 구현하는 것과 동시에, 기가급의 광전송을 구현하기 위한 방안이 다양한 접근 방법을 통해 연구가 진행되고 있으며, 이러한 기술들은 향후 WDM+TDM hybrid PON 및 장거리 PON 등으로 진화할 것으로 예상되고 있다.

참고문헌

[1] H. D. Kim, S. Kang, and C.-H. Lee, "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.
 [2] 김근영, 서재은, 강민정, 고석봉, 서한교, 박한춘, 김진권, 김종안, 강대경, 박형진, 박태상, 김진희, 정기태, "WDM-PON 기반의 FTTH 필드 테스트," 2005 광자기술 학술회의 논문집, pp. 9-10, November, 2005.
 [3] J.-S. Lee, Y.-C. Chung, and D. J. DiGiovanni, "Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multi-channel WDM applications," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 12, pp.

- 1458-1461, 1993.
- [4] K. Y. Park, J. S. Baik, T. W. Oh, and C.-H. Lee, "Intensity noise suppression and 1.25Gb/s transmission using wavelength-locked Fabry-Perot laser diode with filtered ASE injection," *Proc. of the 9th Optoelectronics and Communications Conference*, pp. 200-201, July, 2004
- [5] A. D. McCoy, P. Horak, B. C. Thomsen, M. Ibsen, and D. J. Richardson, "Noise suppression of incoherent light using a gain-saturated SOA: Implications for spectrum-sliced WDM systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 8, pp. 2399-2409, August 2005.
- [6] W. Lee, M. Y. Park, S. H. Cho, J. Lee, C. Kim, G. Jeong, and B. W. Kim, "Bidirectional WDM-PON Based on Gain-Saturated Reflective Semiconductor Optical Amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 11, November, 2005.
- [7] H. Takesue and T. Sugie, "Data rewrite of wavelength channel using saturated SOA modulator for WDM metro/access networks with centralized light sources," *Proc. of the 28th European Conference on Optical Communication*, paper 8.5.6, September, 2002.
- [8] M. Fujiwara, J. Kani, H. Suzuki, and K. Iwatsuki, "Impact of Backreflection on Upstream Transmission in WDM Single-Fiber Loopback Access Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 740-746, February, 2006.
- [9] J. H. Lee, M. Y. Park, C. Y. Kim, S.-H. Cho, W. Lee, G. Jeong, and B. W. Kim, "Tunable External Cavity Laser Based on Polymer Waveguide Platform for WDM Access Network," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 9, pp. 1956-1958, September, 2005
- [10] 윤 현호, 이강복, 김태연, 유정주, 김병휘, "과장분할다중화 방식의 수동형 광가입자망에서의 과장초기화 방법," 2005 광자기술 학술회의 논문집, pp. 510-511, November, 2005

윤 호 성

1998년 서울대학교 전기공학부 (공학사).
 2000년 서울대학교 전기공학부 (공학석사).
 2005년 서울대학교 전기공학부 (공학박사).
 2005년~현재 KT인프라연구소 FTTH개발담당 근무
 관심분야는 광가입자망, 광전송, 광계측

박 근 열

1999년 부산대학교 전자공학과 (공학사).
 2001년 한국과학기술원 전자전산학과 (공학석사).
 2006년 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사).
 2006년~현재 KT인프라연구소 FTTH개발담당 근무
 관심분야는 광가입자망, 레이저다이오드, 광증폭기

박 태 상

1994년 서강대학교 물리학과 (이학사).
 1997년 서강대학교 물리학과 (이학석사).
 1997년~현재 KT인프라연구소 FTTH개발담당 근무
 관심분야는 광통신, 광가입자망, 광전송 기술

김 진 희

1987년 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1991년 경북대학교 전자공학과(공학석사)
 1991년~현재 KT 인프라연구소 FTTH개발2부장
 관심분야는 광가입자망 전송기술, PON 기술