

최적화된 반복루프를 이용한 파장분할다중화 광신호 장거리 전송

최보훈*

Long haul transmission link using a optimized circulating loop for optical wavelength division multiplexing signals

Bo-Hun Choi*

Department of Materials Physics, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

요 약

채널당 속도 10 Gb/s 인 8개의 NRZ 포맷을 가지는 파장다중화 광신호를 장거리 전송 링크에 적용시켜 720 km 를 전송하였다. 반복되는 링크구간은 80 km 단일모드광섬유, 완전 구간보상을 위한 분산보상광섬유, 어븀첨가 광섬유 증폭기들로 구성되었다. 전송 링크 구현을 위해 반복루프 실험 방법이 적용되었고 반복루프의 구조에 따른 신호 성능 차이가 조사되었다. 파장별 이득 평탄화는 고가의 평탄화 필터를 사용하지 않고 증폭기들의 이득 기울기를 서로 역으로 배치하여 구현하였다. 720 km 전송 후에 평균적인 OSNR 값은 22 dB 였고, 채널별로 OSNR 값의 최고 편차는 9.7 dB 였다. 이득 편차의 주원인은 Hole burning 효과에 의한 것임을 광스펙트럼 조사를 통해 확인했으며, 이득 평탄화 필터 없이도 560 km 전송이 가능함을 확인했다.

ABSTRACT

Optical wavelength division multiplexing signals of eight non-return-to-zero 10 Gb/s channels were transmitted on the long-haul link up to 720 km. The link span was composed of 80 km single mode fiber, dispersion compensation fiber for complete compensation, and EDFAs. A circulating loop method was applied to the link experiment and the loop was optimized for the transmission link. Wavelength-dependent gain variation of EDFA was compensated using EDFAs of opposite gain slopes without expensive gain flattening filters. Average OSNR was aggravated to 22 dB and the worst OSNR channel variation was 9.7 dB after the transmission. It was confirmed by analyzing optical spectra that this OSNR variation was mainly caused by the hole burning effect of EDFA

키워드 : 광섬유, 광통신, 이득평탄화, 어븀 첨가된 광섬유 증폭기, 파장 분할 다중화

Key word : Optical fiber, optical communications, gain fattening, Erbium-doped fiber amplifier, wavelength division multiplexing

접수일자 : 2014. 01. 13 심사완료일자 : 2014. 02. 06 게재확정일자 : 2014. 02. 17

* **Corresponding Author** Bo-Hun Choi(E-mail:adamchoi@dau.ac.kr, Tel:+82-51-200-7221)

Department of Materials Physics, Donga University, Busan 604-714, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.7.1757>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

정보통신 기술의 급격한 발전은 초고속 대용량 정보 전송의 수요를 폭발적으로 증가 시키고 있으며, 파장다중화(wavelength multiplexing) 기반의 광통신 전송 기술은 이를 위한 독보적인 기술로 인정받고 있다. 광통신 전송 기술은 수백 km의 도시망뿐만 아니라, 최근에는 수십 km 이내의 근거리에서도 초고속 전송이라는 특징을 살린 가입자망에 적용되어 빠른 속도로 상용화되고 있지만, 초저손실의 광섬유를 전송선으로 사용하는 특성으로 인해 수백 km이상의 장거리 기간망 전송에 보다 큰 강점을 가지고 있다.

광신호 장거리 전송을 위해서는 광섬유의 초저손실 특성이외에도 여러 기능의 소자들과 전송기술이 함께 적용되어서 발전되고 있는데, 그 중에는 광신호 변조 기술, 분산보상 기술, 광증폭 기술, 광신호 다중화 기술, 광수신 기술, FEC (forward error correcting) 기술들이 있고 이들이 복합화 되어 적용되고 있다. 광신호 변조 기술은 최근 DQPSK (differential quadrature phase shift keying) 같은 고급 기술을 적용하여 신호 성능을 많이 향상시켰지만 여전히 NRZ (non-return-to-zero) 나, RZ (return-to-zero) 가 상업적으로 강력히 사용되고 있다. 광신호 증폭을 위해서는 라만증폭기나 반도체광증폭기 등도 함께 사용되지만 가장 실용성이 높은 어븀 첨가된 광섬유 증폭기(EDFA)가 주로 사용되어 전체 링크의 거리에 따른 광신호 세기 분포 (power budget)를 최적화하고 신호 성능을 높이고 있다[1].

이 같은 기술들을 장거리 전송링크에 적용시킬 때 다양한 첨단 방법들이 시도되고 있지만 시장에 적용 가능한 기술로는 제약이 있고 경제성을 고려해야 하므로 실용성은 부족하다. 그러므로 단일모드광섬유를 전송선으로 사용하고, 변조기술로는 NRZ나 RZ를, 신호 증폭은 EDFA (Erbium-doped fiber amplifier)를, 그리고 분산보상을 위해서는 분산보상광섬유를 사용하는 방법이 경제적인 관점에서 주도적인 접근법으로 이해되고 있다. 따라서 최근 광전송 링크분야의 기술적인 추세는, 학술적 흥미를 위한 고급기술 적용보다는 기존의 기술을 이용한 최적화에 많은 제안들이 이루어지고 있다. 예를 들어 광링크의 power budget, 광섬유에 입사되는 광신호의 세기, 링크의 반복 거리, 그리고 분산보상 방법 등에 대한 최적화 연구가 많은 관심을 받고 있다[2].

본 논문에서는, 파장다중화 광신호들의 파장에 따른 이득 평탄화는 고가의 이득평탄화 필터를 사용하는 대신, 광증폭기들의 파장에 따른 이득기울기를 조정함으로써 파장에 따른 이득 차이로 발생하는 신호 악화를 최소화하고자 하였다. 80 km 전송 링크를 사용하여 전송 가능한 최대 거리도 확인하였다. 이 장거리 전송링크 실험에서는 요구되는 부품들의 수를 줄이고 링크들의 균일성을 유지하기 위해 반복루프 방식이 적용되었다[3, 4]. 반복루프의 구성과 신호세기를 최적화하였다. 전송된 광신호의 거리에 따른 스펙트럼 변화를 측정하여 파장에 따른 신호성능의 악화 원인도 확인하였다.

II. 실험 장치

장거리 전송을 위해 반복루프 실험 방법을 적용한 실험 구조가 그림 1에 주어져 있다. 사용된 파장다중화 채널은 모두 8 개로 광원은 모두 DFB LD를 사용했는데 파장은 1549.3 nm에서 1554.9 nm 사이에 100 GHz 간격을 가졌으며 각 파장 값들은 국제표준 (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector: ITU-T) 에 의해 표준화된 값을 선택했다. 이들은 파장분할 다중화기 (wavelength multiplexer) 에 의해 하나의 전송선으로 입사되었다. 이들은 Mach-Zehnder 변조기 (MZM)을 사용하는 간접 변조를 통해 10 Gb/s 전송속도의 NRZ (non-return-to-zero) 신호로 변환되었는데, 디지털 신호는 PPG (pulse pattern generator)에 의해 10^{23} PRBS (pseudorandom bit stream) 신호가 인가되었다. 변조된 신호들은 3 dB 커플러에 의해 반복루프 장치로 입사되었다. 반복루프에서 먼저 편광 조정기 (PC)를 지나고, 80 km의 SMF (single mode fiber) 통해 전송된다. 전송 후 약화된 광세기는 광증폭기에 의해, 그리고 누적된 분산은 DCF (dispersion compensation fiber) 에 의해 보상된다. 이 때 분산보상은 완전분산보상이 되도록 DCF의 길이를 선택했다. 이 신호는 반복루프를 총 전송거리를 위해 필요한 만큼 반복하다가 최종적으로 반복루프를 벗어나게 된다. 수신부에 도달한 광신호들은 파장분할 역다중화기 (wavelength demultiplexer)를 거쳐 개별 신호로 분기되는데, 파장 분할 다중화기와 역다중화기로는 모두 AWG (arrayed waveguide grating)를 사용하였다. 이 후 파장선택 필터로 광증폭기의

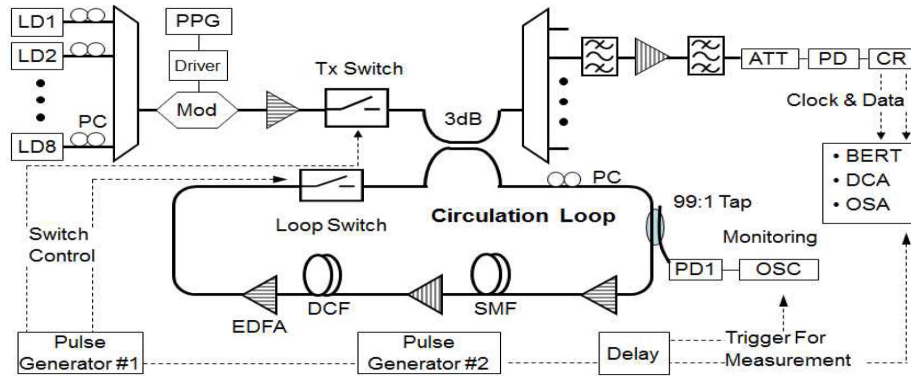


그림 1. 구간루프 (circulating loop)를 적용시킨 파장다중화 광신호 장거리 전송 실험장치도
 Fig. 1 A schematic of the experiment setup for optical WDM long-haul transmission using a circulating loop

ASE(amplified spontaneous emission) 잡음을 제거 한 뒤 광수신기 (photodetector; PD)에 수신되었다. PD 에 수신된 후 클럭회복기와 비트 에러율 테스터기로 비트 에러율(bit error rate; BER)을 측정하였다. OSA (Optical spectrum analyzer)를 이용하여 최종 전송된 신호들의 광학적 특성이 조사되었고 동시에 반복루프 내의 신호 특성 변화의 실시간 조사를 위해 1% 분기 신호를 광수신기로 측정하여 전기신호로 변환한 뒤 오실로스코프로 관측하였다.

광신호 장거리 전송실험은 많은 실험 장비를 요구하는 대규모 실험이므로 연구실에서 수행하기에는 어려움이 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로 반복루프 방법이 사용되었다. 이는 긴 전송구간에서 주기적으로 반복되는 구간을 하나만 구현한 뒤 이 구간을 광신호가 여러 번 반복하여 지나가게 함으로써 긴 전송구간의 효과를 관측하는 실험방법이다. 이 방법은 사용될 실험 부품 수를 크게 줄일 수 있는 것이 큰 장점이다.

그림 1에 이 반복루프의 하드웨어 구조가 주어져 있다. 이 루프 구간의 작동방법은 그림 2에 설명되어 있다. 반복 구간의 핵심은 Tx 스위치와 Loop 스위치이다. 변조기를 거친 광신호는 Tx 스위치가 켜져 있는 시간(τ_{Load}) 동안만 반복루프로 입사된다. Tx 스위치가 켜지면 Loop 스위치가 켜지게 된다. Loop 스위치가 켜져 있는 동안에는 반복루프 내에 들어온 광신호는 계속 구간을 반복하여 전송된다. 이 때 매 반복 시마다 일부신호는 3 dB 커플러에 의해 루프를 빠져 나가 송신부로 입사된다. 반복루프를 1회 회전하는데 소요되는 시간을 계산하면 임의의 횟수만큼 반복한, 혹은 특정 거리를 진행한 광신호를 선택하여 읽을 수 있게 된다. 이 반복횟수가 끝나면 Loop 스위치는 꺼져서 반복루프 내의 광신호가 제거되고 동시에 Tx 스위치가 켜져 새로운 광신호들이 반복루프를 채우게 된다. 이 같은 Tx 스위치의 주기가 반복루프의 측정 주기가 되어서 광신호의 BER이 측정될 수 있다. 이 두 스위치는 펄스발생기 (pulse generator) 1에 의해 시간차를 가지고 작동이 되며 이 발생기에 연동된 펄스발생기 2가 발생시키는 신호가 시간 지연기에 의해 조절되면서 정확히 광신호를 측정할 시간을 알려주게 된다. 따라서 τ_{Loop} 를 위한 시간은 식 (1)에서 계산되며 475 us를 사용하였다. τ_{Load} 는 500 us로 그리고 τ_{Meas} 400 us로 식 (2)처럼 τ_{Loop} 나 τ_{Load} 보다 작게 선택했다. 루프 반복시간은 식 (3)에 의해 결정되었다.

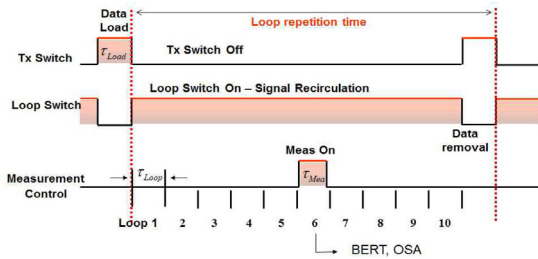


그림 2. 반복루프의 작동원리에 대한 설명도
 Fig. 2 The operating principle of the circulating loop

$$\tau_{Loop} = \frac{\text{Loop Length}}{\text{Velocity of light in fiber}} = \frac{n \cdot L_{Loop}}{c} \quad (1)$$

$$\tau_{Meas} < \tau_{Loop} \leq \tau_{Load} \quad (2)$$

$$\text{Loop Repetition Time} \geq \tau_{Loop} + \text{Loop Number} \times \tau_{Loop} \quad (3)$$

III. 실험 및 실험 결과

장거리 전송 실험에 핵심인 반복루프의 특성을 최적화하기 위해 반복루프 증폭기의 위치에 따른 특성이 조사되었다. 반복루프 방법을 사용함으로써 Tx 스위치, Loop 스위치 그리고 3 dB 커플러가 장거리 전송링크에 포함되어 이들에 의한 신호 감소를 위한 광증폭기가 필요하며 이를 다른 증폭기와 구분하기 위해 루프 증폭기로 부른다. 루프 증폭기의 적합한 위치는, 광신호들이 루프에 들어간 직후의 입구와 루프를 거치고 나서 나오기 직전인 출구 위치가 가능하다. 이 두 경우를 비교하기 위해서 먼저, 출구 위치에 루프 증폭기를 두고 측정된 결과가 그림 3에 주어지고, 입구 쪽에 루프 증폭기를 위치시킨 결과가 그림 4에 주어지고 있다. 그림 3에서 Loop 스위치와 3 dB 커플러 사이에 광증폭기가 위치되어 있고 다른 증폭기와 구별하기 위해 L자를 포함하고 있다. 그림 3에서 반복루프의 하드웨어 구성도를 중심으로 시계방향 순서로 첫째, SMF와 첫 번째 증폭기 다음의 광스펙트럼, 둘째, DCF와 두 번째 증폭기를 지난 후의 광스펙트럼, 마지막으로 루프 증폭기인 세 번째 증폭기를 지난 후의 광스펙트럼이 주어지고 있다. 사용된 증폭기들은 모두 EDFA지만 두가지 종류가 사용되었는데 하나는 출력이 18 dBm 이고 잡음지수가 7.2 dB이고 다른 것은 출력이 14 dBm 이고 잡음지수가 5 dB 였다.

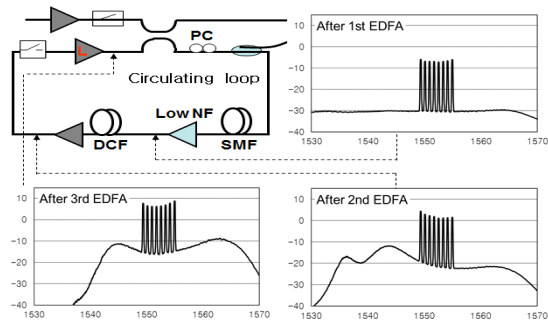


그림 3. 반복루프 출구 쪽에 증폭기 배치 경우의 광 스펙트럼의 변화
Fig. 3 A loop optical amplifier at output area of the loop

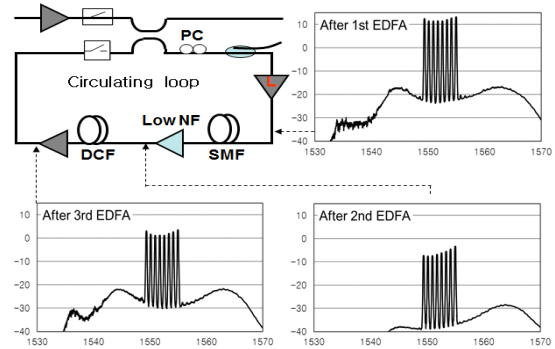


그림 4. 반복루프 입구 쪽에 증폭기 배치 경우의 광 스펙트럼의 변화
Fig. 4 A loop optical amplifier at input area of the loop

장거리 전송 후, 파장에 따른 이득 평탄화와 누적 잡음지수의 최소화를 위해 SMF 다음에 잡음지수가 낮은 증폭기를 배치하고 다른 위치에는 고효율 증폭기를 위치시켰다. 이득평탄화 필터는 사용하지 않았고 대신 증폭기들의 이득 스펙트럼 기울기를 적절히 이용하였다. 그림 4에서는 PC와 SMF 사이에 루프 증폭기가 놓여져 있고 이 증폭기 후의 광스펙트럼이 첫 번째 그래프로, 두 번째는 SMF 후에 증폭된 광스펙트럼이, 세 번째로는 DCF 후에 증폭된 광스펙트럼이 그래프로 시계방향의 순서대로 주어지고 있다.

그림 3과 4를 비교하면 반복루프를 빠져 나오기 전의 광신호의 신호대 잡음비인 OSNR (Optical Signal to Noise Ratio)에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 전자는 20 dB 정도나 후자는 30 dB로 10 dB의 차이가 난다. 이 큰 차이의 원인은 두 그림에서 첫 번째 광스펙트럼을 비교해 보면 알 수 있는데 OSNR의 악화가 각 증폭기들을 거치면서 이루어진 것이 아니라 첫 번째 증폭기 이후에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 즉 Tx 스위치와 3 dB 커플러를 통해 약 8 dB의 광 손실이 발생했고 다시 80 km의 늘 거치면서 신호세기가 크게 약화되어 EDFA의 ASE 잡음에 크게 영향을 받았음을 첫 번째 광스펙트럼을 비교함으로써 잘 알 수 있다. 스펙트럼에서 그림 4의 경우 신호세기가 10 dBm 이상 이지만 그림 3 경우는 -10 dBm 보다 약간 커서 큰 차이가 있다. 이 결과에 따라서 루프 증폭기를 반복루프의 입구 쪽에 설치하여 반복루프에 의한 광신호의 OSNR 악화를 방지하였다.

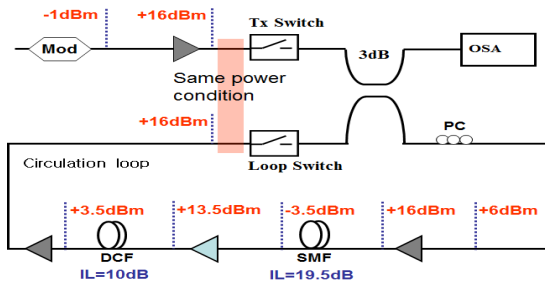


그림 5. 반복루프를 포함한 전송구간에서 광신호 세기 변화
Fig. 5 Optical power budget on the link

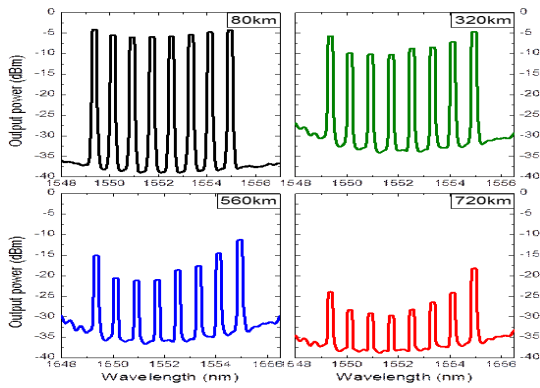


그림 6. 전송 거리에 따른 광 스펙트럼의 변화
Fig. 6 Optical spectra according to the transmission distance

전송 실험을 위해서 반복루프의 광신호 세기를 최적화하여 위치에서 다른 광신호 세기를 조절하였고 그 결과로 설계된 광신호 세기 변화가 그림 5에 주어졌다. 반복루프 구현을 위한 장치들을 거쳐 반복루프에 입사된 신호는 +6dBm이고, SMF의 손실 19.5 dB 후 17 dB 이득으로 증폭된다. 다시 DCF 모듈에 의해 10 dB 손실을 겪은 후 최종적으로 16 dB으로 증폭된다. 반복루프의 중요한 특성은 매번 루프를 반복한 후 광신호 세기가 동일하게 유지되는 것이고, 이를 위해서는 다음 두가지 방법으로 이를 충족시켰다. 첫째는 그림에서 표시된 것처럼 Tx 스위치를 지나기 전 지점과 루프 내에서 Loop 스위치를 지나기 전 지점을 반복되는 장치들의 기준 점으로 삼아 이 두 지점의 광세기를 같게 반복루프의 광세기 조건을 설계해야 한다. 두 번째는 이렇게 같게 잘 설계했다더라도 실제 값들에 약간의 오차가 발생

되며, 이 오차가 비록 작더라도 반복루프에서 광신호의 반복횟수가 증가할수록 누적되어 결국 광신호 성능은 장거리 전송 후 반복루프의 잘못된 조건으로 악화되게 된다. 이를 위해 반복루프 내에 장착된 1% 탭에 연결된 OSC의 신호를 실시간 관측함으로써 광신호 세기의 오차를 미세 조정하여 보정했다.

최적화된 반복루프를 이용하여 광신호를 720 km 까지 전송했고 각 80 km 마다 광신호의 변화를 측정하였다. 그 결과가 그림 6에 주어져 있는데 80 km, 320 km, 560km, 720 km에서 측정된 결과가 시계방향으로 각각 주어졌다. 거리가 증가함에 따라 OSNR이 급격히 악화되는 것을 확인할 수 있다. 80 km 전송 후에는 OSNR이 37 dB 정도였으나 최종 720 km 전송 후에는 이 값이 평균 15 dB 이하로 악화되었다. 평균적인 OSNR의 악화에 외에 채널에 따른 OSNR값의 편차도 전송 거리에 따라 급격히 악화되는 것을 확인할 수 있다. 즉 파장에 따른 광세기의 차이가 커져서 장파장과 단파장의 채널들에 비해 중간에 있는 파장을 가진 채널의 OSNR이 더 크게 악화되었다. 이 같은 파장에 따른 신호특성의 악화는 장거리 전송에서 이득 평탄화 필터의 사용이 반드시 필요함을 의미하며 만약 이 평탄화 필터 없이 전송하는 경우 전송 가능한 거리가 급격히 짧아진다는 것을 의미한다.

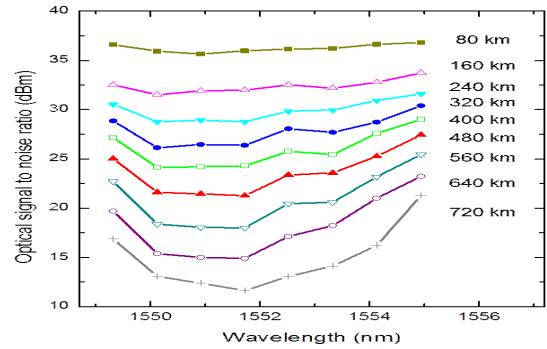


그림 7. 전송 거리에 따른 채널별 OSNR
Fig. 7 OSNRs according to transmission distance

그림 7은 그림 6에서 얻은 결과를 이용하여 각 전송 거리에 따른 채널별 OSNR의 변화를 측정한 결과다. 파장 분해능 0.1 nm으로 측정된 스펙트럼으로 계산된 값들로, 80 km에 비교하여 최종 720 km에서 평균적인

OSNR 값은 22 dB 정도 악화되었음을 알 수 있다. 또한 80 km 에서는 채널별로 OSNR 값의 최고 편차가 1.1 dB 였지만 320 km 는 4.2 dB, 560 km 는 7.4 dB 그리고 720 km는 9.7 dB로 거리에 따라서 급격히 나빠지는 것을 알 수 있다.

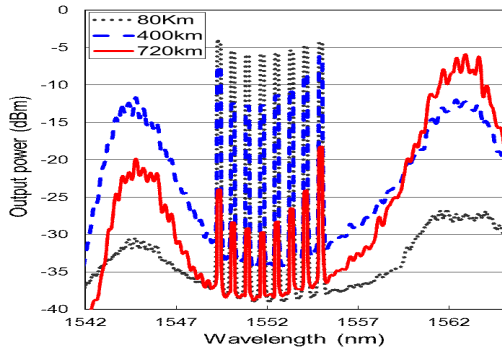


그림 8. 전송 거리에 따른 ASE 잡음의 증가
Fig. 8 ASE increment by the transmission distance

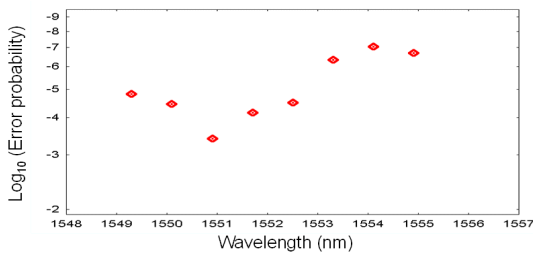


그림 9. 560 km 전송 후 신호 성능
Fig. 9 signal performance after 560 km transmission

이 같이 전송 거리에 따른 채널별 OSNR 값의 편차가 증가하는 이유는 그림 8에서 측정된 광 스펙트럼을 통해서 알 수 있는데, 각각 80 km, 400 km, 720 km에서 측정된 결과를 보여준다. 광신호 채널로 사용된 파장 바깥 영역인 1545 nm 근처와 1562 nm 근처의 ASE 잡음들이 전송거리의 증가와 함께 급격히 증가되는 것을 알 수 있다. 즉 광신호를 증폭하기 위해 사용되어 할 증폭기의 에너지가 앞 선 광증폭기에서 나온 ASE를 증폭하는데 점점 더 많이 사용되어서 나중에는 광신호보다 잡음인 ASE를 더 크게 증폭시키고 있음을 알 수 있다. 이 원인은 EDFA의 spectrum hole burning 현상에 원인

이 있는데 1552nm를 중심으로 한 좁은 파장 영역에 광 세기가 집중되어 있으므로 이 파장에 해당되는 밀도반전이 빨리 소모되어 이득이 오히려 낮아지게 되고 이 파장을 벗어난 이웃한 영역에서 밀도반전이 높게 유지되어 이득이 더 크게 나타나는 것이다[5]. 이 같이 전송된 광신호들의 채널 별 비트 에러율 (Bit Error Rate; BER)이 측정되었다. 그림 9는 560 km 전송 후에 측정된 값으로 FEC (Forward Error Corrector)를 사용하지 않았다. BER 값 역시 가운데 파장에 해당되는 신호 채널에서 크게 악화됨을 알 수 있고 따라서 OSNR 측정 결과와 같은 경향을 보여주고 있다.

IV. 결 론

채널당 속도 10 Gb/s 인 8개의 NRZ 포맷을 가지는 파장다중화 광신호들이 장거리 전송 링크를 통해 720 km 전송되었다. 전송 링크는 80km 단일모드광섬유, 완전 구간보상을 위한 분산보상광섬유, EDFA들로 구성되었다. Tx 스위치, Loop 스위치 그리고 3 dB 커플러로 구성된 반복루프 실험 방법이 적용되었다. 반복루프를 최적화를 위해, 루프의 부품 손실을 만회하기 위한 증폭기를 루프의 입력부에 설치하였고 이 증폭기의 출력이 최적화되어 되었다. 80 km 전송과 비교하여 720 km 전송에서 평균적인 OSNR 값은 22 dB 정도 악화되었다. 또한 80 km 에서는 채널별로 OSNR 값의 최고 편차가 1.1 dB 였지만 320 km 는 4.2 dB, 560 km 는 7.4 dB 그리고 720 km 전송 후에는 9.7 dB로 거리에 따라서 급격히 나빠지는 것을 알 수 있다. 이 같은 파장에 따른 이득 편차의 원인은 Hole burning 효과에 의한 것임을 광 스펙트럼 조사를 통해 확인하였다. 또한 파장에 따른 증폭기 이득의 차이가 전송 거리가 증가할수록 신호의 OSNR의 악화에 결정적인 영향을 주었으며, 이 채널별 이득 차이는 증폭기 간의 이득 기울기의 조정으로 인한 보정으로 500 km 까지는 전송이 가능했지만 그 이상의 거리에서는 적용하기 어려움을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 동아대학교 연구비를 지원 받았음

REFERENCES

- [1] B.-H. Choi, "Comparison of post-dispersion compensation methods for optical 40 wavelength division multiplexing channels at 3000 km transmission" *J. Korea. Inst. Inf. Commun. Eng.*, Vol.17, No. 1, pp. 197-203, 2013.
- [2] Y. Oikawa, N. Sato, K. Ota, S. Petit, and N. Shiga, "0.2-dB Gain Excursion AGC-EDFA with a High Speed VOA for 100-Channel Add/Drop Equivalent Operation," *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2012)*, OW4D.3, 2012.
- [3] T. Zami, P. Henri, L. Lorcy, and C. Simonneau, "Impact of the optical routing on the transmission in transparent networks," *Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2012)*, Paper 1.5.2, 2009.
- [4] F. Smyth, D. C. Kilper, S. Chandrasekhar, and L. P. Barry, "An all-optically gain-controlled two-stage amplifier using two independent feedback loops," *J. Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 21, pp. 4686-4696, 2009.
- [5] F. I. Khatri, D. G. Duff, M. Vaa and A. L. Simons, "Spectral hole burning effects on partially loaded, 19 nm bandwidth, 6246 km long EDFA lightwave transmission system," *Electronics Letters*, vol. 36, no. 8, pp. 739-740, 2000.



최보훈(Bo-Hun Choi)

1992년 부산대학교 물리학 학사
1996 ~ 1998년 삼성전자 근무
2001년 8월 KAIST(ICU) 공학 박사
2009 ~ 현재 동아대학교 교수