40 채널 파장 다중화 광신호 3000 km 전송에서 링크 구간 거리에 따른 광신호 세기 최적화

최보훈*

Power optimization of optical 40 wavelength division multiplexing channels at 3000 km transmission for link span variation

Bo-Hun Choi*

본 논문은 한국학술연구재단의 연구비 지원 (2010-0007718)에 의하여 연구되었음.

요 약

40 채널의 10 Gb/s 파장 다중화된 RZ 포맷 광신호를 3000 km 까지 전송하면서 전송 링크 구간의 거리 변화에 따른 광신호의 최적 신호 세기에 대해 연구하였다. 링크 구간의 거리를 40 km 로부터 140 km 까지 20 km 씩 변화시켰고, 각각의 링크 구간 조건에서 SSMF와 DCF에 입사되는 광신호의 세기를 변화시키면서 신호 성능인 Q 값을 측정하여 비교하였다. 링크 구간이 증가함에 따라서 SSMF에 입사되는 광세기의 최적값은 1 dB/km 의 비율로 선형적으로 증가하였고, DCF에 입사되는 광세기의 최적값은 100 km 링크 구간 거리까지는 0.5 dB/km 비율로 증가하였으나 그 이상의 구간 거리에서는 변화가 없었다. 이 같은 경향은 총전송 거리가 2000 km나 30000 km에서 동일하게 유지되었으며, 전송선에 사용된 광증폭기의 잡음지수를 5 dB에서 7 dB로 변경되어도 변화 없이 유지되었다.

ABSTRACT

Optical power optimization of 10 Gbps 40 wavelength division multiplexing channels was analyzed at the 3000 km long-haul transmission distance when the link span distance was changed between 40 km and 140 km. The signal performance of the transmission was obtained as a Q value and it was compared when input power into SSMF and input power into DCF on the transmission link were changed. The optimized input power into SSMF increased linearly to link span distance with 1 dB/km. The optimized power into DCF increased linearly with 0.5 dB/km up to 100 km link span, but it had no variation at longer link span than 100 km.

키워드

광섬유, 광통신, 분상보상, 에르븀 첨가된 광섬유 증폭기, 파장 분할 다중화

Key word

Optical fiber, Optical communications, dispersion compensation, Erbium-doped fiber amplifier, wavelength division multiplexing

* 정회원 : 동아대학교 신소재물리학과 (adamchoi@dau.ac.kr)

접수일자 : 2012. 11. 01

심사완료일자 : 2012. 11. 27

I. 서 론

파장다중화 광통신 장거리 전송기술은 초고속 대용량 정보 전송이라는 장점을 기반으로 급속히 발전하고 있다. 이 전송기술은 초저손실의 광섬유의 특성 때문에 먼저 기간망 전송에서 수천 km 이상의 장거리에 적용되고 있고 또한 최근에는 수십 km 이내의 근거리에서 초고속 전송이라는 특징을 살린 가입자망에도 적용되어 빠른 속도로 상용화되고 있다[1].

장거리 전송을 위해서는 광섬유의 초저손실 특성이 외에도 여러 가지 고기능 소자들과 전송기술이 함께 적용되어서 발전되고 있는데 이같은 전송기술에는 광신호 변조기술, 분산보상기술, 광증폭 기술, 광신호 다중화 기술, 광수신기술, 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. 분산보상기술은 사용되는 파장다중화 광신호들의 파장대역폭이 넓을수록 복잡해지는데 분산 보상에는 분산 기술기 보상이 함께 고려된다. 광신호 증폭을 위해서는 어븀 첨가된 광섬유 증폭기 (EDFA) 가 가장 실용성이 높지만 라만증폭기나 반도체광증폭기와 함께 사용되어 전체 링크의 거리에 따른 광신호 분포 (power budget)를 최적화하고 신호 성능을 높이고 있다[2].

이 같은 기술들을 장거리 전송링크에 적용시킬 때 다양한 첨단 방법들이 시도되고 있지만 시장에 적용 가능한 기술로는 여러 가지 제약이 있고 경제성을 고려해야 하므로 실용성은 아직 부족하다. 그러므로 표준광섬유를 전송선으로 사용하고 변조기술로는 RZ 를 신호 증폭은 EDFA를 그리고 분산보상을 위해서는 분산보상광섬유를 사용하는 방법이 경제적인 관점에서 주도적인 접근법으로 이해되고 있다. 최근에 광전송 링크분야의 기술적인 추세는, 학술적인 관점에서 고급기술 적용보다는 기존의 기술을 이용하여 최적화에 많은 제안들이 이루어지고 있다. 예를 들어 광링크의 power budget을 어떻게 설정하고 링크의 거리는 어떻게 최적화하며 광섬유에 입사되는 광신호의 세기는 얼마나 하는 것이 신호 성능을 최적화하는 것이냐이다[3,4].

이를 위해서 본 논문에서는 광링크에서 두 광섬유 즉

표준광섬유와 분산보상광섬유에 입사되는 광신호의 세기를 최적화하였다. 이 때 광링크의 반복구간의 길이가 다양한 현상의 상황을 반영하여, 광링크의 반복구간의 길이가 달라짐에 따라서 두 광섬유에 입사되는 광신호의 최적 입력세기도 어떻게 달라지는 가를 분석하고 최적값을 연구하였다. 이 같은 입력세기의 최적값이 총전송 거리에 어떻게 영향을 받는지 그리고 링크 증폭기의 성능에 어떻게 영향을 받는지도 함께 고찰하였다.

II. 실험 장치

파장분할 다중화 장거리 전송 링크의 구조가 간략하게 표현되어 그림 1에 주어져 있다. 파장에 따른 채널은 모두 40개로 각 채널들은 DFB LD에서 나온 광을 처핑없는 Mach-Zehnder 변조기를 사용하는 간접 변조를 통해 10 Gb/s 전송속도의 NRZ 신호를 먼저 형성한 뒤 RZ 포맷으로 변환되었다.

그림 1. 파장분할다중화 장거리 전송링크 개략도
Fig. 1 The experiment setup for the link of optical WDM long-haul transmission

각 DFB LD의 파장은 1533.5 nm와 1564.7 nm사이에서 100 GHz의 주파수 간격 (파장으로는 약 0.8 nm 간격)의 40 개의 파장분할 광신호들이 사용되었다. 각 채널의 파장값은 국제표준(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector: ITU-T)에 의해 표준화된 값을 사용하였다[5]. 이 광신호들은 파장분할다중화 장치 (AWG)에 의해 하나의 전송선으로 입사되었다. 전송구간을 통과한 광신호들은 파장역다중화기 (wavelength demultiplexer)를 거쳐 개별 신호로 분기되는데 이 역다중화기는 40 GHz 반진폭을 기지는 3차

대역 통과 Bessel 함수 필터로서 모델링되었다. 수신기는 1 A/W responsivity 와 3 pA/(Hz)^{1/2} single side-band thermal noise density를 가지는 PIN 광다이오드와, 7 GHz 반진폭과 3차 전기 저주파통과 Bessel 필터로 구성되었다. 각 신호들은 PD (photo-detector)에 수신된 후 클럭회복기와 비트 에러율 테스터기로 비트 에러율 (bit error rate; BER)을 측정하였다.

광신호들은 전송선인 SSMF (standard single mode fiber) 로 전송하면서 DCF (dispersion compensation fiber) 를 사용하여 분산보상 했는데, 두 광섬유인 SSMF와 DCF의 손실은 각각 0.25 와 0.5 dB/km 이고 분산은 17 과 -90 ps/nm/km 이다. 이들의 분산기울기는 0.058 과 -0.32 ps/nm²/k 이고 상대분산기울기는 0.0034 과 0.0036 nm⁻¹ 이다. 전송 링크를 구성하는 반복 구간인 링크구간에서 광섬유 전송의 광세기가 그림 2에 주어지 있다. 전송선로에 진입 전에 송신부의 부품들에 의해 감소된 세기가 광세기 증폭기 (power amplifier)로 사용된 EDFA에 의해 증폭되어 SSMF로 입사된다. 이들은 SSMF에 의해서 손실 (SSMF loss)를 겪은 후 광증폭기에 의해 증폭되고 다시 광신호는 DCF로 입사되고 (Input power into DCF), 이 신호가 다시 손실을 (DCF loss) 겪은 후 본래 신호 세기로 (Input power into SSMF) 복원된다. 이 과정이 반복되면서 최종 3000km 까지 전송되도록 링크를 설계하였다.

그림 2. 링크 반복 구간의 구조와 광신호 세기
Fig. 2 The schematic diagram of a link span

그림 2에서 두 광섬유에 입사되는 광원의 세기 즉 “SSMF로 입사되는 광세기”와 “DCF로 입사되는 광세기”가 광링크 성능의 중요한 변수가 되므로 이 신호 세기는 각 광섬유의 앞단에 있는 증폭기의 출력세기를 변

화시켜서 조정하였다. 사용된 증폭기는 모두 EDFA로 잡음지수는 5 dB이다. 분산보상은 SSMF의 뒤에 사용된 DCF에 의해서 완전분산보상하였고 분산보상기법으로 사용되는 전치분산보상이나 후치분산보상은 링크의 단순성을 위해 사용하지 않았다. 여기서 사용된 수치들과 광신호 세기값들은 우리의 과거 하드웨어실험에서 사용된 값들이다[6-7].

광전송 실험은 대규모 장치가 요구되며 더욱이 링크의 구성을 변경시키기가 쉽지 않아서 이 전송 링크 실험을 위해 모델링 소프트웨어인 VPITransmissionMaker를 사용하였다[6]. 컴퓨터 실험에서 광섬유의 광손실, 그룹속도분산(Group Velocity GVD), 자기위상변조(Self-Phase Modulation: SPM), 상호위상변조(Cross-Phase Modulation: XPM), four wave mixing (FWM), 그리고 라만산란 등의 효과와 이들 간의 상호작용이 모두 포함되었다. 신호잡음은 채널간의 라만산란 효과를 충분히 다루기 위해 40채널의 중심파장을 기준으로 하여 10240 GHz의 넓은 대역에서 계산되었다. 광신호들과 잡음의 상호작용들은 전송링크를 통해 신호가 진행하는 동안 계속해서 고려되었다. 이 링크 시스템의 성능 평가는 수신된 신호의 Q 값을 계산함으로써 얻어졌는데 사용된 40 채널 중 대표성을 가진 세 채널을 선택하고 이 값들을 상호 비교하였다. 세 채널은 장파장쪽 신호 쪽에서 채널 4번 (1562.2 nm)을, 그리고 한 가운데 채널 20번 (1549.3 nm), 그리고 단파장 쪽에서 채널 37번 (1535.8 nm)을 선택하여 이들의 Q 값들을 평가하였다. 제일 끝 쪽인 1번이나 40번을 피한 이유는 가장자리 채널들은 채널간 간섭 효과를 충분히 반영하지 못하기 때문이다 [4, 6-7].

III. 실험 및 실험 결과

그림 2의 광링크 구간에서 전체 광신호의 성능을 좌우할 주요변수 중의 하나는 “SSMF로 입사되는 광세기”와 “DCF로 입사되는 광세기”이다. 이 값의 크기는 첫째, 광선로를 지나는 동안 신호대 잡음비, 그리고 둘째로는 광선로의 비선형 현상에 의한 신호왜곡에 큰 영향을 주게 된다. 이 같은 영향의 결과는 최종 수신된 신호의 Q에 반영되므로, 두 광섬유에 입사되는 광신호 세기를 변화시키면서 이 Q 값의 변화가 2차원 그래프로 측정되었고 결과 중의 하나가 그림 3에 주어지 있다. 그림에서 수

평축은 SSMF로 입사되는 광세기를 수직축은 DCF로 입사되는 광세기를 나타내며, 모두 세 개의 그래프가 주어 있는데 각각 세 대표 채널인 4번, 20번, 37번에 대한 Q 값 변화 그래프다. Q 값의 변화가 0.5의 차이로 구분되어 표시되어 있으며 등고선처럼 나타나 있다.

그림 3. 1000 km 거리, 60 km 구간거리 조건에서 광신호 세기에 따른 Q값의 변화

Fig. 3 Input power vs. Q value for 1000 km link distance and 60 km span distance

그림 3의 실험에서 링크의 거리는 1000 km였고 링크 구간은 60 km 경우에 측정된 것이다. 각 그래프에서 최고 Q 값은 채널 20번이 가장 좋고 세 그래프에서 이 값은 차이가 있지만 이는 광링크에서 파장다중화 채널 간에 발생하는 자연스러운 일이다. 보다 중요한 것은 각 그래프에서 두 입력광세기의 변화에 따른 최적점이 서로 일치한다는 것이다. SSMF로 입사되는 광세기를 12 dBm ~ 18 dBm 사이에 변화시켰을 때 17 dBm 가 최적 광세기이며, DCF로 입사되는 광세기는 5 dBm ~ 11 dBm 사이에서 변화시켰을 때 10 dBm이 최적값이었다.

그림 3 실험의 방법을 이용하여 전송거리는 2000 km로 확대하고 이 전송거리에서 링크구간 거리는 달리하

는 실험을 수행하였다. 그림 4는 이중에서 링크구간을 100 km로 반복한 경우의 Q 값 결과를 보여준다. 그림 3과 비교하여 총 전송 거리가 두 배로 길어지고 링크구간도 길어져서 Q 값 자체는 작아졌지만 세 대표 채널 간에 공유될 수 있는 최적 지점이 존재함을 알 수 있고 더욱이 세 채널간의 Q 값 차이도 줄어들어서 채널 간 신호 성능이 어느 정도 균등화되어 있다. 최적 Q 값을 위한 공동 광신호 세기는 그래프에서 직선으로 표시된 구별되어 있는데 SSMF로 입사되는 광세기는 18 dBm, DCF로 입사되는 광세기는 9 dBm 이었다. 광섬유에 입사되는 최적 광세기 값이 DCF 경우가 SSMF 보다 작은 이유는 DCF의 광섬유 코어 크기가 SSMF의 코어 크기에 비해 사분의 일 이하로 작아서 비선형 효과에 더욱 민감하고 파장다중화 신호 간에도 신호 간섭효과도 크기 때문이다.

그림 4. 2000 km 거리, 100 km 구간거리 조건에서 광신호 세기에 따른 Q값의 변화

Fig. 4 Input power vs. Q value for 2000 km link distance and 100 km span distance

그림 5를 전송거리를 다시 1000km 더 확장하여 총 전송거리 3000 km에서 Q 값을 측정하였고 Q 값 그래프의 이해를 돕기 위해 그림 3과 4와 달리 3차원 그래프로 표

시하였다. 2차원 그래프가 채널 간에 공유되는 Q값 최적점을 찾기에는 편리하지만 3차원 그래프는 각 채널에서 Q값의 변화를 보기에는 유리한 장점이 있어 이 그림에서는 3차원 그림으로 표현하였다. 이 경우 링크 구간은 120 km에서 측정되었다. 전송 전체 길이와 링크 구간 모두 길어져서 상당히 Q값 자체는 상당히 낮아졌지만 FEC 기능 등을 사용하면 여전히 전송 가능한 상태임을 알 수 있다. 또한 각 채널에서 두 광섬유에 입사되는 광세기의 변화에 따른 Q값 변화가 보다 분명히 표시되어서 이 광세기 변화에 대한 영향을 잘 보여준다. SSMF로 입사되는 광세기는 20 dBm에서, DCF로 입사되는 광세기는 9 dBm에서 최적 결과를 보였다.

그림 5. 3000 km 거리, 120 km 구간거리 조건에서 광신호 세기에 따른 Q값의 변화
Fig. 5 Input power vs. Q value for 3000 km link distance and 120 km span distance

전송거리와 링크구간의 차이에 따라 Q값의 변화를 보여준 그림 3, 4, 그리고 5의 실험과정을 따라서 다양한 링크구간의 변화에 따른 Q값을 측정하였고 이러한 링크구간의 변화를 총 길이 2000 km와 3000 km에 반복함

으로써 전송구간이 달라짐에 따라서 광섬유에 입력되는 광신호의 최적값에 변화가 있는지가 분석되었다. 총 전송 거리가 이 보다 더 늘어나면 신호 성능이 현격히 떨어져서 BER이 크게 올라가게 된다. 물론 앞서 언급한 고급기술들을 사용하면 10,000 km 이상의 전송이 가능하지만 본 논문에서는 초점이 링크 구간 변화에 따른 입력광신호의 최적화에 있으므로 다른 조건은 가능한 가장 일반적인 조건에서 실험하였다. 실험조건에서 수신된 Q값 결과가 그림 6에 주어져 있다.

두 가지 각각 다른 총 전송거리에서 링크 구간의 거리를 40, 60, 80, 100, 120, 그리고 140 km로 바꾸면서 각각의 조건에서 두 광섬유에 입사되는 광신호 세기를 변화시켰고 그 결과인 Q값 그래프를 구했다. 통상적으로 링크구간은 60 km ~ 120 km 사이인데 이 보다 짧으면 신호 성능에 유리하지만 중계기 수가 늘어나서 비경제적이 되며 이 보다 더 길면 급격히 늘어난 전송 선로의 삽입 손실에 의해 광신호의 세기가 광증폭기의 잡음인 amplified spontaneous emission에 의한 세기에 근접하게 되어 신호 성능이 급격히 악화된다.

그림 6. 링크구간 길이 변화에 따른 광섬유 입력신호 세기 최적값의 변화

Fig. 6 Optimized input power according to link distance variation

실험 결과가 정리된 그림 6에서, 위쪽에 있는 두 그래프는 SSMF로 입사되는 광세기의 최적값의 변화를 보여주고 있고 아래쪽의 두 그래프는 DCF로 입사되는 광세기의 최적값의 변화를 보여준다. 이 그림은 두 광섬유의 종류에 따라 차이를 보이는데, 링크구간이 길어질수록 SSMF로 입사되는 광세기는 비례하여 증가하는

경향을 보이고 있다. 그러나 DCF로 입사되는 광세기는 100 km까지는 비례하여 증가하지만 더 이상에서는 링크 구간의 거리가 증가하여도 최적점에는 변화가 없었다. 장거리 광신호 전송구간에서 신호 성능에 영향을 위한 가장 크게 고려해야 할 요소는 광신호 세기를 충분히 확보함으로 신호대 잡음비를 높이고 그 결과로 EDFA의 잡음에 영향을 덜 받도록 하는 것이다. 따라서 링크 구간이 길어질수록 전송선의 삽입손실은 늘어나므로 발생하는 신호대 잡음 손실비를 회복하기 위해서는 SSMF로 입사되는 광세기의 최적값이 길이에 비례하여 커지는 것이 요구된다는 사실과 실험 결과는 일치하며 그 비례 값은 1 dB/km의 비율로 선형적으로 증가함을 보여주고 있다.

그러나 DCF의 경우 광섬유의 코어 직경이 2 μm ~ 3 μm 정도여서 진행되는 광의 공간 분포가 SSMF의 경우에 비해 조밀하여 SBS (stimulated Brillouin scattering)나 SPM (self phase modulation) 등과 같은 비선형 현상에 의한 신호 왜곡의 가능성이 더 크며, 이 같은 현상들은 광세기에 비례하여 더욱 커지게 된다. 따라서 링크 구간의 길이가 늘어나면 이미 언급한 바처럼 신호대 잡음비의 회복을 위해 입력신호의 증가가 요청되지만 이는 동시에 비선형 현상에 의한 신호 왜곡의 원인 되므로 적절한 균형점이 존재하리라 예상되며 실험 결과는 그 사실을 보여주고 있다. 100 km 링크 구간 거리까지는 6 dBm에서 9 dBm까지 0.5 dB/km 비율로 증가하였으나, 이 보다 더 긴 구간 거리에서는 더 이상 최적값이 증가하지 않았다. 이 같은 입력 광세기의 최적점의 변화는 총 전송 구간이 2000 km에서 3000 km로 변화여도 약간의 오차를 제외하고는 차이가 없는 결과를 얻었다.

총 전송 거리 조건과 링크 구간을 변화시키는 조건들을 동일하게 하면서 광증폭기인 EDFA의 잡음지수를 5 dB에서 7 dB로 악화시킨 조건에서 실험을 반복하였다. 전송 링크에 사용되는 증폭기의 잡음지수가 증가하면 신호 성능을 악화시키는 영향을 주겠지만 두 광섬유에 입사되는 광신호의 최적화 조건은 변화하지 않고 그림 6과 같은 결과를 주었다. 본 실험에서 사용된 링크 구조가 실제 현장에서 구현될 때 증폭기의 잡음지수 값은 5 dB ~ 7 dB가 가장 일반적이므로 이 결과는 증폭기의 잡음지수의 변화는 전송선에 입사되는 광신호의 최적 신호세기 조건에 영향을 주지 못하는 결과를 얻었다.

그림 7. 링크구간 길이와 광증폭기의 잡음지수 변화에 따른 Q 값 영향

Fig. 7 Q value variation according to a link distance and NF of EDFA

하지만 EDFA의 잡음지수의 차이가 신호 성능에는 영향을 줄 수 있는데, 그림 7은 이 잡음지수가 5 dB와 7 dB로 적용한 3000 km 전송거리에서 링크 구간의 변화에 따른 광의 Q 값을 비교하여 보여준다. 이 때 Q 값은 $20 \times \log(Q)$ 로 표시되었다. 두 광섬유에 입사되는 광신호의 최적세기와 달리 신호 성능을 분명한 차이를 보이는데 그 차이는 링크 구간의 거리가 길어질수록 잡음지수의 차이가 더 크게 나타난다. 이는 링크구간의 거리가 길어짐에 따라서 전송선의 삽입손실이 커지며 따라서 광신호의 신호대 잡음비가 보다 악화된다. 이 때 EDFA의 잡음지수의 증가는 이 같은 악화되는 정도에 주도적인 기여를 하므로, 링크 구간의 증가에 따라서 결국 신호 성능이 보다 악화되게 되는 결과와 잘 일치하였다. 그림 6의 결과와 함께 고려하면, 비록 신호 성능은 EDFA의 잡음지수에 따라 달라지지만 링크 시스템의 최적화 요소 중의 하나인 광섬유에 입사되는 광신호의 최적 세기 조건에는 영향을 주지 못했다.

IV. 결 론

40 채널의 파장 다중화된 광신호를 3000 km까지 전송하면서 전송 링크 구간의 거리 변화에 따른 광신호의 최적 신호 세기에 대해 연구하였다. 개별 광신호는 10 Gbps 대역폭의 RZ 신호포맷을 사용하였고 40 채널들의 파장은 1533.5 nm에서 1564.7 nm 사이에 100 GHz의 주

파수 간격을 가졌다. 링크구간은 전송선으로 SSMF가 사용되고 분산보상은 DCF로 완전분산보상하였고 전치 분산보상이나 후치분산보상은 사용하지 않았다. 광신호 손실을 EDFA만을 이용하여 증폭하였고 잡음지수는 5dB 였다. 총전송 거리에서 링크 구간의 거리를 40 km로부터 140 km 까지 20 km 씩 변화시켰고, 각각의 링크 구간 조건에서 SSMF와 DCF에 입사되는 광신호의 세기를 변화시키면서 신호 성능인 Q 값을 측정하여 비교하였다. 링크 구간이 증가함에 따라서 SSMF에 입사되는 광세기의 최적값은 12 dBm에서 22 dBm 까지 1 dB/km의 비율로 선형적으로 증가하였다. 링크 구간이 증가함에 따라서 DCF에 입사되는 광세기의 최적값은 100 km 링크 구간 거리까지는 6 dBm에서 9 dBm 까지 0.5 dB/km 비율로 증가하였으나 그 이상의 구간 거리에서는 광신호의 세기를 증가시키는 것이 신호 성능에 도움을 주지 못했다. 이 같은 경향은 총전송 거리가 2000 km나 30000 km에서 동일하게 유지되었으며 전송선에 사용된 광증폭기의 잡음지수를 5 dB에서 7 dB로 변경하였을 때 광신호 성능은 링크 구간 거리가 증가 할수록 잡음지수 5 dB인 조건에 비해 신호 성능이 악화되었지만 두 광섬유에 입사되는 광세기의 최적값은 변화 없이 같은 결과를 주었다.

참고문헌

- [1] J. D. Downie, "High-Capacity Long-Haul Transmission using Ultra-Low Loss Optical Fiber," Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2012), pp. 172 - 173, 2012.
- [2] K. Tanizawa, K. Kikuchi, K. Sugiura, S. Kurimura, H. Kuwatsuka, H. Nakajima, J. Ichikawa, and S. Namiki, "Parametric Tunable Dispersion Compensation With Spectrally Noninverting Wavelength Conversion Using Quasi-Phase-Matched Adhered Ridge Waveguide," IEEE J. Selected topics on Quantum Electronics, Vol. 18, No. 2, pp. 593 - 599, 2012.
- [3] L. E. Nelson, C. G. Jørgensen, M. Du, T. Loadholt, and D. Peckham, "Terminal-Only Compensation of a 6 x 80 km 10-Gb/s WDM Metro Link Using Raman-Pumped Dispersion-Compensating Fiber Amplifiers," IEEE

Photon. Tech. Lett., Vol. 18, No. 1, pp. 139 - 141, 2006.

- [4] B.-H. Choi, Y. J. Wen, and C.-B. Kim, "Modulation Format Comparison Experiments on Economic Long-haul Transmission Link Using SSMF and All EDFAs," Optical Engineering, Vol. 45, No. 10, pp. 1 - 8, 2006.
- [5] ITU-T G.694.2, "WDM applications: CWDM wavelength grid", <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1>
- [6] B.-H. Choi, and S. S. Lee, "Input power dynamic range analysis of SOA and EDFA link extenders on TDM-PON systems without burst effect control," Optics Communications, Vol. 286, No. 1, pp. 187 - 191, 2013
- [7] B.-H. Choi, M. Attygalle, Y. J. Wen and S. D. Dods, "Dispersion Map Optimisation and Dispersion Slope Mismatch Issue on 40 Channel x 10 Gbit/s Transmission Over 3000 km Using Standard SMF and EDFA Amplification," Optics Communications, Vol. 242, No. 4, pp. 525 - 532, 2004.

저자소개

최보훈(Bo-Hun Choi)

1992년 부산대학교 물리학 학사
1994~1995년 하이닉스 근무
1996~1998년 삼성전자 근무
2001년 8월 KAIST(ICU) 공학 박사

2001~2005년 Uni. Melbourne, Research fellow

현재 동아대학교 부교수

※관심분야: 광통신망, 광소자, 광센서시스템