

특 집

Optical Transmission Systems (Recent developments & an example analysis)

박 남 규*, 주 무 정**, 이 종 현**, 박 재 형*, 박 종 한*, 이 한 석*, 김 나 영*

*서울대학교 공과대학 전기·컴퓨터공학부 광통신 시스템 연구실, **한국전자통신연구원 광통신연구부

I. 서 론

정보 통신에 대한 수요가 증대되면서 이의 물리적 기반을 이루는 전송망 내에서의 traffic 양은 기하급수적으로 증가하여 왔다. 전송망의 핵심부인 대용량 기간망에는 현재 광전송 기술이 사용되고 있는데, 향후의 기간망 용량확장에 있어서도, 광통신 기술은 아직 미 개척된 광섬유의 잠재적 대역폭과, 광통신 이외의 대체기술의 부재로 인하여 더욱 중요한 역할을 하게 될 것으로 예견된다. 본 고에서는 일반적인 전송시스템의 용량지표라고 할 수 있는 BL (Bandwidth \times Length) product 관점에서 광 전송 시스템의 최근 issue들을 점검하기로 한다. 지면의 한계로 인하여 모든 세부 기술사항에 대하여 논하기는 어려운 점이 존재하므로, 제2절에서는 bandwidth 확장 기술의 최근 동향들을 간단하게 점검하고, 전송거리 (Length) 확장 및 이러한 시스템 고속화에 관련된 새로운 문제들을 언급한 후, 3절에서는 특히 최근 2~3년간 집중적으로 연구되고 있는 라만 증폭 시스템의 기술동향에 대해 중점을 두어 정리하도록 한다. 제4절에서는 세부적인 기술의 적용 예로서 기존의 80 km SMF 구간에 Raman 기술을 적용하는 데에 있어서의 전송선로 설계의 최적화 방안에 대하여 살펴보기로 한다.

II. 기술 동향

WDM system에서의 총 전송용량은 N (number of channel) $\times B/CH$ (bit-rate per channel)로 주어지며, 이 때에 number of channel N 의 최대치는 궁극적으로 다시 광섬유나 광증폭기의 대역폭과, 또 한편으로는 전송 변조기술에 따라 결정되는 spectral efficiency에 의해 제한되게 된다. 이러한 전제 하에서 전체적 bandwidth expansion을 위한 접근은 크게 보아 WDM 전송기술을 위한 transmission bandwidth 확장, 그리고 TDM (base channel) 전송기술을 위한 channel rate 및 spectral efficiency의 극대화로 귀결된다. 최근의 동향을 이에 붙여서 간단히 서술한다면, 채널당 전송속도에 있어서는 대개 10~40 Gb/s 이상을 기본으로 진행하게 됨에 따라, 이제까지 상대적으로 연구에 대한 관심이 소수에 한정되어 있었던 전송 format에 대한 연구가 다수의 연구자로 확장되기 시작하였고, 이렇게 확산, 집중된 연구들을 통하여 높은 전송효율을 가지면서 비선형 현상에 덜 민감한 다양한 형태의 변조기술들이 (CS-RZ (carrier suppressed RZ), duo binary, SSB (single sideband) 등) 선을 보이고 있다^[1]. 한편으로 이를 지원하기 위한 부품들의 개발도 활발한 데, C/L band 대역 이후의 전송영역을 확보하기 위한 TDFA (Thulium Doped Fiber Amplifier) 또는 라만 (Raman) 증폭기 기술에 대한 최근의 기술발전 속도는 주목할 만 하다^[2]. 더불어서, 수신 감도를 -28 dBm까지 기록한 APD의 개발 및 40

Gb/s까지 수신할 수 있는 광변조기와 광수신기들이 발표되었고^[3,4], transmission 기술발전에 맞추어 고속, 고용량의 광교환기에 필요한 Optical MEMS와 수-Tera bit 이상의 용량을 가지는 광 버스트/패킷 라우터 등의 개발도 활발히 이루어지고 있다^[3].

이러한 전송속도 고속화에 대한 연구와 더불어서 채널당 10Gb/s 이상의 전송이 일반화되고 이후 40Gb/s 이상의 시스템 속도로의 이동이 요구됨에 따라, 그동안 잠재되어 있던 전송거리와 전송 용량을 제한하는 추가적인 요소들에 대한 원인 규명과 그 해결방안을 제시하려는 노력들 또한 동시에 이루어지고 있는데, channel bit 당 지속시간이 (unit interval : UI) 점차로 짧아지게 됨에 따라서 증대된 decision timing의 정확성에 대응하기 위한 timing jitter 발생요인들-고속화에 따라 수반된 optical power의 증가로 인한 각종 비선형 현상과, 편광모드분산(PMD: polarization mode dispersion)등-에 대한 분석과 이를 해결하기 위한 노력들이 이에 포함된다고 할 수 있다^[4]. 이러한 문제들을 해결하기 위해서 제안된 방법들은 다양한 계층에서 동시에 이루어지고 있는데, 우선 광섬유의 성능 개선에 있어서는 손실 지수를 줄이거나, 고속 전송에서의 주요 제한 요인인 색분산을 조절해주는 방안들이 발표되었다. 2002년에 이르러서는, 광섬유의 손실을 0.15dB/km 정도까지 낮추는데 성공하였고^[3], 이미 개발된 여러 가지 분산 천이 광섬유 등을 바탕으로 한 각종 전송실험들이 활발히 이루어지고 있다^[3]. 이와 더불어, 송신단 hardware 측면에서는 앞서 언급한 개선된 전송 format에 필요한 변조기술과 소자들이, 수신단의 hardware 측면에서는 여러 가지 형태의 보상기술(Chromatic dispersion compensator, PMD compensator : Electrical & Optical : Fixed & Tunable), 그리고 송수신 algorithm 측면에서는 FEC(forward error correction)과 같은 코딩 기법들이 개발되어 전송 라인에서 발생하는 비선형성이나 Timing jitter, 잡음 등을 상쇄시키기 위한 노력 또한 병행되어 이루어

지고 있다^[4]. 특히 FEC 기법은 현재 일반화되어 가는 추세로 상용 system에 implement 되어 사용되고 있으며 더 나은 Coding Gain을 더 낮은 overhead로 얻기 위한 노력 또한 계속되고 있다. 한편으로 각종 비선형 페널티 및 PMD 현상 등에 대해서 상대적으로 덜 민감하다고 알려진 CS-RZ(carrier suppressed RZ)나 duobinary, SSB(single sideband)와 같은 새로운 전송 포맷들은 현재 system 내에 적극적으로 implement 되어 있지는 않으나, 기존의 유무선 통신 발전사와 더불어서 유추하여 볼 때에 점차 고속 통신의 방향으로 진행되어 가는 시점에 있어서 향후 적용가능성이 높고 연구가치가 있는 주제로 떠오르고 있다^[5].

전술한 모든 연구들은 독자적으로 시스템의 성능을 향상시키는 데 이용되고 있기도 하지만, 다양한 측면에서의 연구들이 결합되어 전송 거리와 용량을 동시에 증가시켜 Tera bps에 이르는 초대용량 전송 시스템을 현실화하는 연구 결과들을 낳고 있다. 전송거리의 측면에서는 OSNR 개선을 위해 Hybrid Raman-EDFA 증폭기를 채용한 80nm, 256채널 10Gb/s 시스템에 FEC 기술을 결합한 11,000km의 초 장거리 전송과^[3], 용량측면에서는 C+L-band 만으로 256채널의 신호에 대해서 (채널당 42.7Gb/s) 총 용량 10 Tb/s에 이르는 300km 전송 실험이 보고 된 바 있다^[3]. 특히 이 전송 실험에서는 광대역 증폭을 위해서 라만 증폭기를 사용하였는데, 노이즈 특성의 개선을 위해 일반적 pumping 방식과는 다른 second order pumping 방식을 사용, 신호 여기광을 전송로의 내부로 보다 깊이 밀어 넣어 잡음지수를 개선하였고, 인접 채널간의 페널티를 줄이고 대역 효율을 증가시키기 위하여, VSB 필터링과, PDM(Polarization Division Multiplex) 기술을 사용하여, 채널 간격을 40GHz까지 줄인 것이 특징이라고 할 수 있다.

위와 같은 전송기술의 발전과 함께 최근의 WDM 이득대역폭 확장을 위한 TDFFA 및 Raman 기술의 발전은^[3,4] 향후 광 전송용량의 한계가 현재 기록된 10 Tbps에 머물지 않으리라

는 것을 강하게 시사하고 있다. 특히 flexible한 대역폭과 distributed gain을 가능하게 하여주는 Raman 증폭기는 현재 일부 system에 도입되어 운용되고 있고, OSNR 개선효과로 인하여 집중적으로 연구되고 있는 바, 다음절에서는 이러한 라만 광전송 시스템의 기술 동향에 대해서 살펴보겠다.

III. Raman 광전송 시스템

Optical Amplifier를 사용하는 전송시스템은 신호 증폭시에 발생하는 광증폭기 고유의 ASE (Amplified Spontaneous Emission) 잡음으로 인해 전송 속도와 거리에 제한을 받게 된다. 반면, 이상적인 전송시스템이 손실 없는 광섬유와 이에 따라 증폭기 및 ASE 잡음이 없는 전송로라고 가정한다면, 광전송로 내의 비선형 현상 중 하나인 Raman 현상을 이용한 분산형 Raman 증폭기(Distributed Raman Amplifier)는 광섬유의 손실 자체를 일정부분 없애주는 효과를 주게 되므로 동일한 Link Gain 상에서 EDFA 등의 이산형(Discrete) 증폭기에 비하여 작은 ASE잡음을 발생시키고, 따라서 더 먼 전송거리, 또는 높은 OSNR을 보장해 주게 된다. 이외에도, 라만 증폭기는 단일 펌프 이득대역이 수 THz에 이르고 다수의 펌프 광원 파장을 사용할 경우 100nm 이상의 광대역 증폭을 할 수 있으며, 펌프 파장에 따라 증폭대역을 가변적으로 설정할 수 있기 때문에 새로운 전송 대역의 적용을 쉽게 하여준다. 이러한 장점으로 인하여 낮은 출력효율성에도 불구하고 최근에 도입되는 대부분의 장거리 광전송 시스템에는 라만증폭기가 도입되고 있으며 최근 1~2년간 매우 활발한 연구가 집중적으로 이루어지고 있기도 하다.

라만 증폭기에 대한 최근의 주요 연구동향을 분류한다면 일차적으로 증폭기 자체의 특성을 중심으로 하여 볼 때에 우선 증폭대역의 확장, gain spectrum 디자인 algorithm, 잡음 특성의 개선

에 대한 문제와, 한편으로 전송시스템과 연관되어 해석되어야 할 문제로서 Raman 증폭기 적용시에 추가적으로 발생할 수 있는 비선형 페널티 문제 등으로 분류할 수 있다^[4]. 간단하게 증폭기 자체의 성능에 대한, 예측 가능한 최근의 결과를 정리하여 본다면 이득 대역의 확장에 있어서는 라만 증폭용 펌프파장을 신호파장들 사이에 끼워 넣는 방법으로 136.6nm의 이득대역이 보고된 바 있고^[4], 또한 기존의 C 밴드와 더불어 S밴드, L밴드를 사용할 경우 밴드간의 유도 라만 산란현상을 고려해 주어야 한다는 사실도 발표되었다^[4]. 한편으로 광 선로 내의 색분산 보상 광섬유(DCF)의 작은 유효면적과 이를 통해 높아진 Raman efficiency를 이용해 100nm에 걸친 색분산과 광 증폭을 동시에 수행한 실험도 보고 되었다^[4]. 또한, 증폭 이득 spectrum의 design에 있어서는 design 상에 있어서 원천적인 장애요소였던 펌프간의 상호 유도 라만 산란을 방지하기 위하여 펌프를 시간분할변조 분할하여 서로 다른 이득대역을 지원하도록 하는 hardware적인 방법들^[4-5]과 더불어, 지금까지의 고전적 미분방정식에 의거한 수치해석 방법을 개량한 여러 가지의 고속 수치해석 알고리즘, 그리고 semi-analytic 한 algorithm으로서 ASE power monitor나 OTDR 기능을 이용하여 각종 증폭기와 관련된 파라미터를 추출하지 않고도 쉽게 라만 증폭기를 디자인할 수 있음이 보고 되었다^[6]. 라만 증폭기 잡음 및 penalty에 관련한 연구에 있어서는 양방향 펌핑이나 2차 라만 펌핑을 통한 잡음 지수의 개선효과^[4], Double Rayleigh Scattering과 Multi-Path Interference 등에 대한 측정기법^[7,8], 그리고 이러한 잡음과 기존의 ASE 잡음 간의 상대적 영향에 대한 연구 결과도 보고되었다^[4]. 또한 gain spectrum design을 쉽게 하기 위해 사용하는 시간분할 펌핑의 경우 레일레이 산란이 심각하게 커질 수 있음도 보고 되었다^[4]. 또한, EDFA에서 해결된 문제인 transient 현상에 대한 연구도 활발하다.

한편으로 전송측면을 살펴볼 때에 분산 라만

증폭기의 경우는, EDFA에 비하여 ASE 잡음 특성이 좋아지지만 전송로 내의 평균 신호 power가 증가하여 광선로 내에서의 비선형 현상이 증가하게 되므로 이러한 점을 고려한 시스템 설계가 부각되게 된다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 전송로 특성에 따른 적절한 신호 입출력 및 link 이득을 디자인하고 정해진 비선형 값에서 최적의 잡음 특성을 가지는 시스템에 대한 연구들이 진행되고 있다^[4].

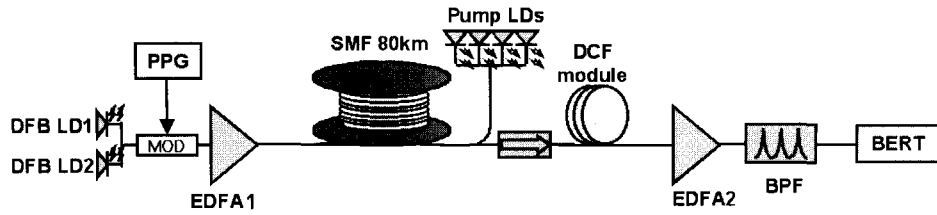
IV. 비선형을 고려한 라만 광전송 시스템 설계

일반적인 전송 시스템의 설계과정과 마찬가지로, 라만 광 전송 시스템의 설계과정에서 먼저 고려해야 할 사항은 전송 선로에서의 손실 및 색분산의 보정이며, 이를 위해서는 적절한 라만 이득 및 분산땀을 도입하여야 한다. 이와 더불어 각 증폭기에서의 ASE에 의한 신호의 OSNR 감소를 고려하여 span을 구성해야 하는데, 위의 일련의 과정은 기존 EDFA를 이용한 시스템의 설계과정과 동일하므로, 이렇게 얻어진 span을 바탕으로 SBS, SPM, XPM, FWM과 같은 각종 비선형 현상이 시스템에 미치는 영향을 분석해서 적절한 라만 이득 및 입력 파워를 찾는 것이 바로 라만 광전송 설계과정의 핵심이라 할 수 있다. 이 중에서 라만 전송선로 내에서의 비선형 현상은 각 비선형 현상을 나타내는 수식을 바탕으로 선로 내에서의 라만 이득분포와 그에 따른 신호의 크기 분포를 고려하여 이해될 수 있다^[1]. 비선형 현상의 경중은 pumping 방향, 전송에 사용된 광섬유의 특성, pumping이 이루어지는 위치 등 시스템의 세부적인 구성에 영향을 받기 때문에 이에 대한 link 구성방식 별로 다양한 연구가 있어 왔는데, 예를 들어 bi-directional pumping의 경우, 라만 이득에 따른 최적의 펌프 파워 비율과 같은 연구들이 발표된 바 있다^[9]. 한편으로는 광선로 내의 다양한 비선형 현상의 증감을 통합적으로 이해할 수 있는 지표로서 link 내의 누

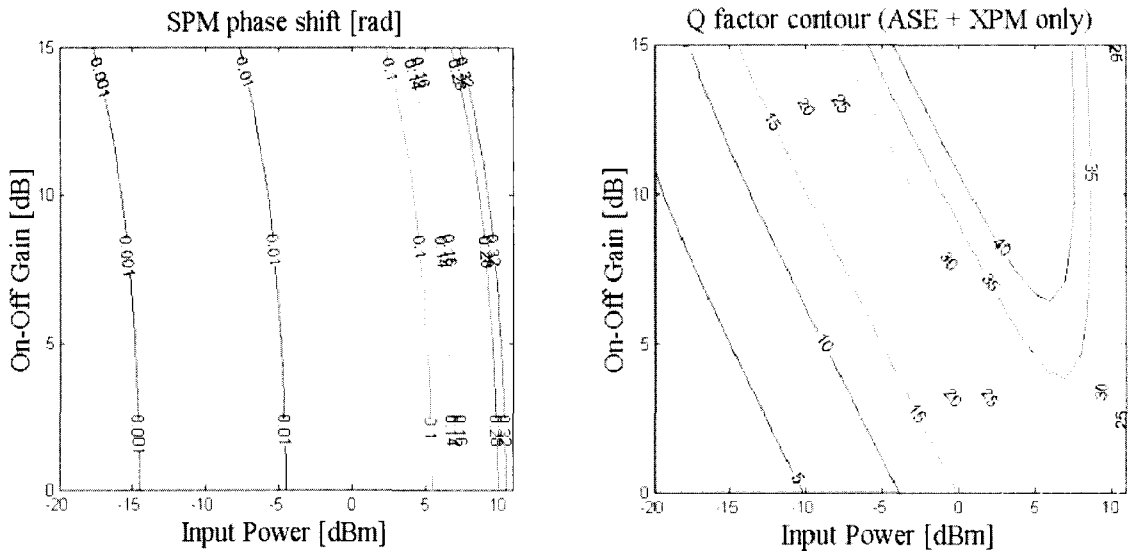
적 비선형 값을 정의하고 이를 OSNR과 비교하여 최적 전송시스템의 설계에 적용하려는 시도도 있어왔다. 해석의 방식에 불문하고, 이러한 라만 전송 연구들의 결과 및 EDFA를 이용한 일반적인 전송시스템 설계의 노하우를 바탕으로 실제 전송 선로를 구성하였을 경우, 전송 페널티를 줄이기 위해서 결정해야 할 사항은 결국 신호 입력 파워와 라만 이득이다. 이 두 가지 요소의 변화에 대한 각 비선형 현상의 페널티는 기존의 비선형 현상에 대한 수식을 바탕으로 예측될 수 있는데, 특정한 link design에 대한 수치 해석, 실험적 결과들이 간헐적으로 보고 된 바 있다.

실제적인 라만 광전송 설계 과정을 이해하기 위해서, 일반적인 전송 선로의 한 스패에 해당하는 SMF 80km에 대한 Raman 증폭기 적용의 예를 바탕으로 디자인 procedure를 설명하도록 한다. <그림 1>은 일반적인 80km 라만 전송 시스템의 블록도이다. 전송 선로 80km의 색분산을 보상하기 위해 분산보상광섬유(DCF)를 사용하였고 단일모드 광섬유에서의 손실은 라만 증폭기를 통해 거의 보상해 주었으며, 분산 보상 광섬유와 라만 증폭기에서 보상해주지 못한 스패 손실은 EDFA2를 통해 보상해 주었다. 최종적으로 50GHz ITU-T channel spacing 기반의 WDM system을 가정하고 그 특성을 간단히 모사하기 위하여 신호는 50GHz의 채널 간격을 가지는 1552.050nm와 1552.450nm, 두 개의 DFB LD를 동시에 변조하여 사용하였으며, 광전송로 내에서 일어날 수 있는 다중 패스 간섭(MPI) 효과를 억제하기 위해서 단일모드 광섬유의 출력 단에는 Optical isolator를 달았다^[10].

<그림 1>의 set-up을 바탕으로 하여, 대표적인 비선형 현상 중 중요한 몇 가지에 대한 기본적인 data 추출이 가능하다. <그림 2(a)>는 선로 상에 신호가 존재할 때에 modified OTDR technique을^[6] 이용하여 측정된 signal gain/loss profile을 바탕으로 구성한 Input power와 On-Off gain에 따른 signal phase shift map, 그리고 <그림 2(b)>는 두개의 DFB 신호 사이의 cross phase modulation 측정을 기반으



〈그림 1〉 라만 증폭 선로의 비트오율 및 Q 측정을 위한 실험 셋업

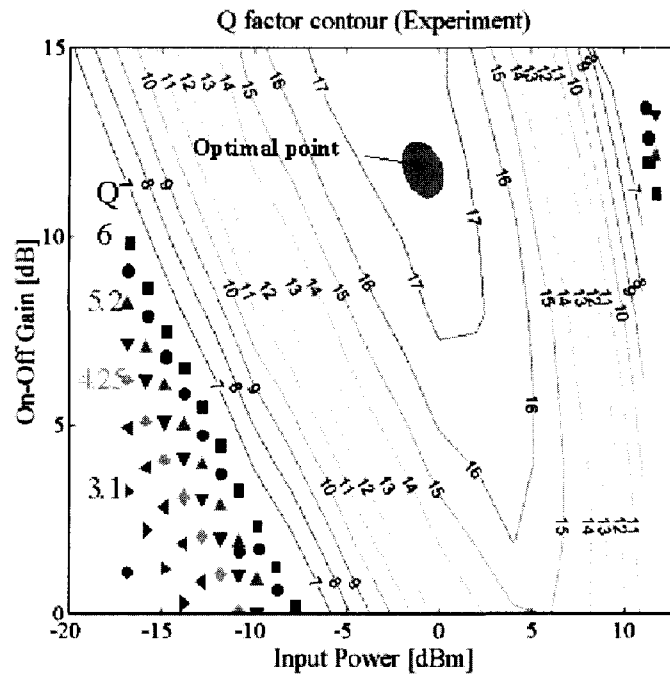


〈그림 2〉 (a) 입력파워와 on-off 이득에 따른 SPM의 경향 그림

(b) 입력파워와 on-off 이득에 따른 ASE와 XPM의 영향

로 하여 extrapolate한 XPM 및 ASE의 영향을 함께 보여주는 그래프이다. 일반적인 예상대로, SPM과 XPM의 경우 라만 on-off gain 및 입력 신호치가 작을수록 페널티가 적어짐을 확인할 수 있으며, ASE의 경우 라만 on-off gain 및 입력 신호치가 클수록 페널티가 커지기 때문에 〈그림 2(b)〉와 같은 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 여타 비선형현상인 SBS, FWM의 경우는 전송선로의 특성과 입력신호의 조건상 페널티가 미미하여 분석대상에서 제외하였다. 한편으로, 위와 같은 semi-empirical한 접근방식이 아니라도 위와 유사한 분석 tool을 사용하여 각각의 비선형현상에 대한 Raman 전송로 상에서의 penalty를 독립적으로 분석하는 것이 가능하다.

그러나, 이와 같이 각각의 비선형 현상들을 독립적으로 분석하는 접근방법은 실제 비선형에 의한 영향을 통합적으로 추정하기에는 상당히 복잡하고 우회적인 방법이다. 따라서, 분산맵과 ASE 등을 고려하여 이미 전송선로가 구성된 경우에는, 라만 이득과 신호입력파워에 대한 전송 시스템 성능의 변화를 측정하여 최적의 라만 이득과 신호입력파워를 규명하는 것이 비선형에 의한 페널티를 통합적, 효과적으로 확인하고 그 페널티를 줄이는 방법일 것이다. 이러한 통합적 페널티의 측정 및 설계방식은 광 선로 디자인의 최종 목표인 신호의 오류 최소화와도 부합한다. 즉, 실제 전송선로에서의 최적 동작점을 찾기 위해서 다양한 입력치와 라만 이득에 대한 출력 신호의 비트오율이나 전송품질 (Q factor)를 측정하는



〈그림 3〉 입력 파워와 on-off 라만 이득에 따른 페널티 ($Q < 7$ 이하는 BER 측정을 기반으로 Q 값을 산출하였음)

방법은 전송 과정에서 발생하는 다양한 현상들이 통합적으로 고려된 실질적인 최적점을 얻을 수 있는 접근방법이다. 〈그림 3〉은 입력치와 on-off 라만 이득에 대한 전송 출력단에서의 BER/Q값을 contour map으로 구성한 결과로서 ASE 영향과 제반 비선형 잡음 영향의 상호작용 하에서 전송특성이 가장 좋아지는 입력파워와 on-off 이득 값을 제시해준다.

측정 결과 약 0dBm의 입력파워와 12dB의 on-off 이득 근처에서 수신단에서 얻은 Q값이 가장 컸다. 〈그림 3〉의 최적점에서의 좌측은 ASE에 의한 한계 영역이고 우측은 비선형 현상에 의한 한계 영역이다. 즉 ASE 잡음 측면에서는 입력파워는 크고 on-off 이득이 클수록 광신호대 잡음비가 좋아져 전송특성이 좋아지는 반면에 비선형 잡음 측면에서는 입력파워가 작고 on-off 이득이 작을수록 신호의 왜곡이 줄어들어 전송특성이 좋아지게 된다. 이렇게 구해진 최적점은 위의 〈그림 1〉의 스펠 구성에 대한 것이지만, 동일한 방법으로 실제 전송선로에서의 Q-지

도로부터 실제로 존재하는 각종 비선형 현상과 ASE에 의한 시스템 페널티를 측정할 수 있으며, 최적 성능을 가지는 입력파워와 on-off 이득을 가지는 시스템을 디자인 할 수 있다.

V. 결 론

본고에서는 최근 광전송 기술들의 발전 및 연구 동향에 대해서 살펴보았고, 그 중에 차세대 광대역 전송 시스템으로 주목받고 있는 라만 증폭기가 도입된 광전송 시스템에 대해서 살펴보았다. 그리고 이러한 라만 광전송 선로 시스템의 디자인을 위해 분산 라만 광증폭기가 도입된 선로 내에서 생기는 비선형 현상에 대해서 분석하고, 이를 통해 실제로 가장 많이 쓰이는 10Gb/s 시스템에서의 최적화된 디자인 조건도출 방식을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] Ivan Kaminow, Optical Fiber Telecommunications IVB: Systems and Impairments, Academic Press, 2002.
- [2] Islam M. N., "Raman amplifiers for telecommunications", JSTQE02 Vol. 8, No. 3 May 2002
- [3] Postdeadline Papers, OFC2002, FA, FB, FC, FD, 2002
- [4] Proc. OFC2002, TuJ, TuR, WB, WI, WJ, WP, WV, ThB, ThZ, 2002
- [5] Proc. OECC2002, 12B1-2, 12B1-3, 10D2-3, 2002
- [6] Pilhan Kim, et al, "In-situ Design Method for Multi-channel Gain of Distributed Raman Amplifier with the multi-wave OTDR", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 14, No. 12, pp. 1683-1685, December 2002
- [7] Lewis, et al, "Characterization of double Rayleigh scatter noise in Raman amplifiers", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12, No. 5, pp. 528-530, May 2000
- [8] Fludger, et al, "Electrical measurements of multipath interference in distributed Raman amplifiers" IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 19, No. 4, April 2001
- [9] S. Wang, et. al., "OptComm02-Wang-Noise performance analysis of bidirectionally pumped distributed fiber Raman amplifiers with consideration of fiber nonlinearity and its impact on EDFA output OSNR" Opticas Communications, 210, p355-360, September 2002
- [10] Rene-Jean Essiambre, "Effects of Raman Noise and Double Rayleigh Backscattering on Bidirectionally Raman-Pumped Systems at Constant Fiber Nonlinearity", Proc. 27th Conference on Optical Communication (ECOC01), Tu. A. 1. 1, pp. 108-109, 2001.

저자 소개



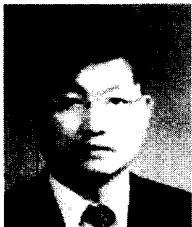
朴南奎

1987년 서울대학교 물리학 학사, 1988년 Brown University 물리학 석사, 1994년 California Institute of Technology 응용물리학 박사 경력, 2001년 9월: 서울대학교 부교수, 1997년 3월~2001년 9월: 서울대학교 조교수, 1996년 7월~1997년 2월: 삼성전자 선임연구원, 1994년 9월~1996년 6월: AT&T Bell Laboratory Post-doctoral Research Fellow, <주관심 분야: 광통신 시스템 (광증폭기, 광전송)>



朱武楨

1980년 연세대학교 이과대학 물리학과 (이학사), 1982년 한국과학기술원 물리학과 (이학석사), 1985년 한국과학기술원 물리학과 (이학박사), 1985년~1993년: 한국전자통신연구원 선임연구원, 1989년: 독일 Heinrich-Hertz-Institut 방문연구원, 1992년~1994년: 전북대학교 물리학과 겸임교수, 1997년 8월~1998년 12월: 한국전자통신연구원 광통신연구실장, 1994년~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원, 2000년과~현재: 한국전자통신연구원 광링크기술팀장, <주관심 분야: 비선형 광학, 광증폭 기술, 광전송 기술>



李鍾弦

1981년 성균관대학교 전자공학과 (공학사), 1983년 성균관대학교 전자공학과 (공학석사), 1992년 성균관대학교 전자공학과 (공학박사), 1983년 3월~현재: 한국전자통신연구원 광통신연구부장, 1992년 1월~1994년 2월: 정보통신연구관리단 파견관리역, <주관심 분야: 광 인터넷, WDM/OXC 시스템>



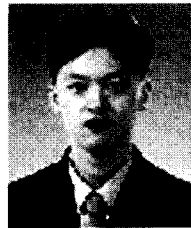
朴宰亨

1999년 서울대학교 공학 학사, 2001년 서울대학교 공학 석사, 2001년 3월: 서울대학교 공과대학 박사과정, <주관심 분야: 광통신 시스템 (광증폭기)>



朴鍾漢

2002년 서울대학교 공학 학사, 2002년 3월: 서울대학교 공과대학 석사과정 <주관심 분야: 광통신 시스템 (광증폭기)>



李韓錫

2001년 서울대학교 공학 학사, 2002년 3월: 서울대학교 공과대학 석사과정, <주관심 분야: 광통신 시스템 (광전송)>



金娜榮

1999년 서울대학교 공학 학사, 2001년 서울대학교 공학 석사, 2001년 3월: 서울대학교 공과대학 박사과정, <주관심 분야: 광통신 시스템 (PMD)>