



광 네트워크 및 시스템 연구실

허윤석, 이재승

광운대학교 전자공학과

E-mail: wye@chol.com, jslee@daisy.kw.ac.kr

URL: http://www.wdmlink.com

서론

파장분할다중화(WDM) 방식은 그 풍부한 수용능력 때문에 늘어나는 인터넷 망 또는 고품질 통신망의 대용량 정보수요를 충족할 수 있는 최상의 해법이다. WDM 방식을 이용한 광전송시스템은 관리가 용이하고 설치비가 저렴하여, 최근 십여년 간 집중적으로 연구 개발되어지고 있다. 수년 전까지도 이 분야의 주된 연구목적은 WDM 채널간의 최소간격을 100GHz로 고정하고 채널 수를 늘려서 전체 광전송 용량을 증가시키려는 것이었다. 그러나 점차 광섬유의 손실을 보상하기 위해 사용되는 광섬유 증폭기의 비용부담이 증가하면서 채널간격을 줄여 대역효율을 높이는 전송기술이 연구되고 있다. 특히 가장 증폭특성이 좋고 저렴한 기존의 C-band 영역 내에서 최대한 많은 정보를 전송하는 방법이 가장 경제성이 높아 많은 관심을 보이고 있다.

최근 이러한 취지로 전송시스템에서 연구되는 분야가 크게 두 가지로 압축된다. 기존의 10Gbps를 고수하면서 채널간격을 점차 줄여나가는 방법과 기존의 채널간격을 유지하면서 전송속도를 올려나가는 방법이 있다.

먼저 전자의 방법(그림 1 참조)으로, 기존의 채널 당 전송속도는 통상 10Gbps이고, 채널 간격을 100GHz 이하로 하는 고밀도 파장분할다중화(DWDM) 전송방식의 채널 간격을 50GHz, 25GHz, 12.5GHz 순으로 점차 줄여 대역효율을 높일 수 있다. 이 때 채널 간격이 25GHz 이하인 경우를 통상 초고밀도 파장분할다중화(UD-WDM)라고 명명한다. 대역효율이 상당히 높아진 UD-WDM의 경우, 기존 광학 소자들에 대한 요구 조건이 마이크로웨이브 소자 수준으로 까다로워지며, 장거리 광전송 시 광섬유의 비선형 현상 및 OSNR에 대한 억제도 어려워진다. 특히 광채널들 간의 거리가 매우 좁고 광채널 수도 매우 많으므로, 보다 체계적인 광채널관리를 위한 새로운 기술들이 필요하다. 다시 말해서, 제한된 광파장대역

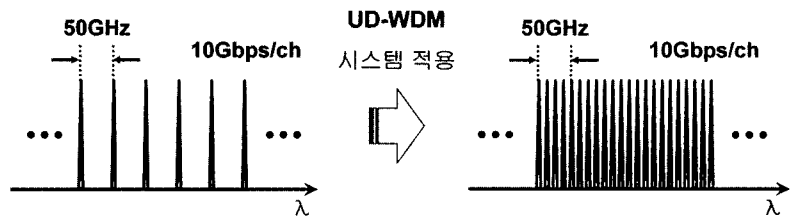


그림 1. UD-WDM 시스템을 적용하여 향상된 대역효율

내에 좁은 채널간격을 갖는 다수의 광원들을 정렬하고 제어 관리하는 기술들이 UD-WDM 방식의 성패를 결정짓는 새로운 핵심 기술로서 부각되고 있다.

한편 후자의 방법(그림 2 참조)으로, 채널 당 10Gbps의 전송속도를 40Gbps로 높이는 방법도 최근 많이 연구되고 있다. 같은 전송 용량을 기준으로 10Gbps에 비해 채널수를 줄일 수는 있으나, 이는 광섬유의 편광모드 색분산에 취약하고, 소자의 가격도 매우 높으며, 안정된 색분산 보상도 어렵고, 급속히 그 활용도가 높아지고 있는 Ethernet 망과도 연동성이 낮은 단점이 있다.

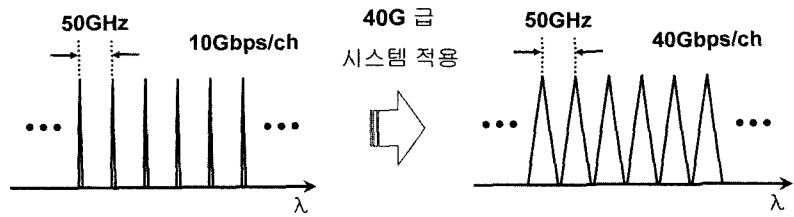


그림 2. 40G급 시스템을 적용하여 향상된 대역효율

그러나 UD-WDM 전송기술은 40Gbps급 전송기술과 비교하여 이런 문제점들이 비교적 적다. 즉, 편광모드 색분산의 영향이 적고, 선형적인 색분산 보상 허용치가 관대하고, 소자가격이 저렴하며, 가입자 채널 할당에서 유연하다. 나아가서 새롭게 각광 받고 있는 Ethernet 기술과의 접목도 용이하다. 그래서 이 UD-WDM 기술은 인구밀집지역이 많은 일본이나 한국의 지형에 우선적으로 적용이 가능하며, 직접 연결 가능한 10Gbps Ethernet 기술의 발전과 함께 조만간 미국의 metro 및 access용 DWDM 시스템도 UD-WDM 형태로 진화해나갈 것이다.

광운대학교 광 네트워크 및 시스템 국가지정연구실에서 수행한 UD-WDM 광통신 시스템 전송기술에 대한 연구를 간략히 기술한다.

UD-WDM 광통신 전송 기술

최근 Raman 기반의 광증폭기나 전송용 광섬유 또는 RZ 계열의 변조방식들이 연구되고 있지만, 본 연구실에서는 WDM 시스템을 UD-WDM 시스템으로 향상시키기 위하여 기존에 사용되고 있는 EDFA와 SMF 및 NRZ 변조방식을 이용하여 연구하였다.

먼저 채널들을 정렬하고 안정화시키기 위한 BFL 기술을 제안하고, 이를 이용한 128 채널 UD-WDM 광통신 시스템을 연구, 개발하였다. 또한 개발된 UD-WDM 광통신 시스템을 이용하여 양방향과 단방향에 대한 대역효율을 측정하고, long-haul 전송 실험과 원격노드정렬 실험에 응용하였다.

1. BFL(beat-frequency locking) 기술

BFL기술은 UD-WDM 광전송망을 손쉽게 구축할 수 있게 해주는 본 연구실이 보유한 핵심기술이다. 그 BFL 기술에 대해 그림으로 간략히 설명하였다. 그림 3에서는 TLS를 이용한 BFL 장치의 구성도를 나타내고 있다. 그림 3(a)에서와 같이 광섬유를 통해 전송되어지는 광원들의 파워 일부를 분기하여 TLS 출력광과 함께 광커플러로 입

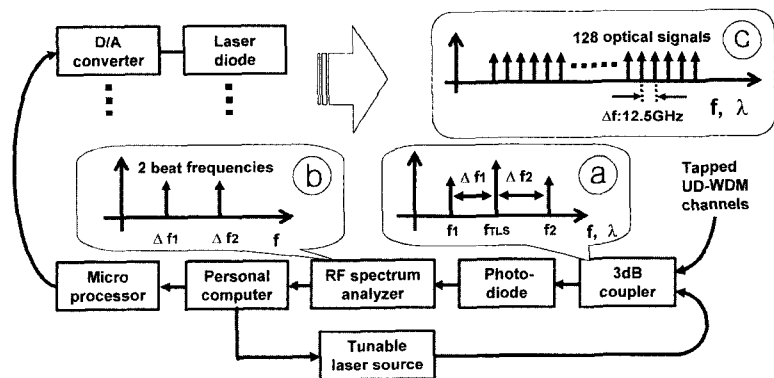


그림 3. TLS를 이용한 BFL 장치의 구성도

력시켜 광결합을 시킨다. 그런 후에 그림 3(b)에서와 같이 광결합된 TLS와 광원들을 동시에 PD에 입력시키면 광원들과 TLS 사이의 비트 주파수들이 발생한다. 이때 비트 주파수들 중에 가장 낮은 두 비트 주파수 Δf_1 과 Δf_2 의 합이 TLS에 가장 인접한 두 광원들의 간격이다. 이 두 비트 주파수 성분들을 개인용 컴퓨터가 주파수 분석기를 통해 읽어 들인 후, 각 광원들에게 온도제어 신호를 보내어 광채널을 정렬시킨다. TLS 광원을 순차적으로 이동시켜 가며 상기 동작을 반복적으로 수행시켜, 그림 3(c)와 같이 전체 128 광채널을 정렬한다. 광채널들을 안정화시키기 위한 기존의 wavelength locker의 경우 수 GHz의 오차를 갖는 반면, 제안된 TLS를 이용한 BFL 방식은 채널간격을 $\pm 100\text{MHz}$ 이내의 오차로 매우 안정화시킬 수 있다.

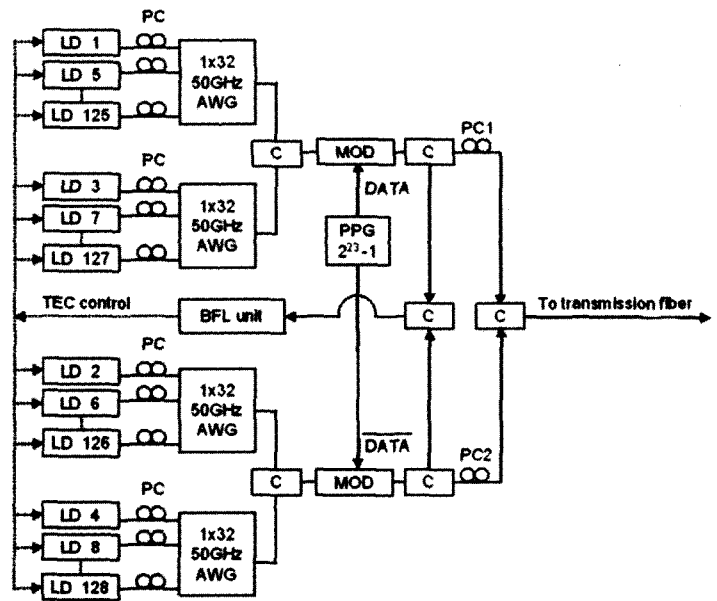


그림 4. 128 UD-WDM 광통신 시스템의 송신부

2. 128 UD-WDM 광통신 시스템 개발

그림 4에서는 128 UD-WDM 광통신 시스템의 송신부를 나타내었다. 128 채널의 UD-WDM 광원들을 50GHz 채널간격의 AWG 4세트와 2개의 2×1 광커플러를 이용하여 광다중화 하였다. 25GHz 채널간격으로 배치된 홀수번과 짝수번의 두 64개의 채널그룹들은 두개의 광변조기를 통하여 10Gbps의 PRBS 신호로 DATA와 $\overline{\text{DATA}}$ 로 각각 변조된다. 각각 변조된 광채널들은 광커플러를 통해 광결합 되어 12.5GHz 채널간격의 128 UD-WDM 광채널로 배열되어 광섬유 전송로를 통해 전송된다. 한편, 변조기 출력단에서 광원의 일부 파워를 분기하여 BFL 장치로 입력한다. 앞에서 설명한 그 TLS를 이용한 BFL 장치에서는 저장된 프로그램에 의해 광원의 파장을 자동으로 제어하고 정렬하여 전체 UD-WDM 광채널을 정렬 및 안정화 시킨다. Acetylene gas cell을 이용하여 광채널 하나를 고정하고, 정렬을 위한 기준채널로 정했다. UD-WDM 용 광수신부는 전송되어 온 신호들의 미약한 파워를 보상하기 위한 EDFA, 역다중화를 위한 AWG와 복조를 위한 10Gbps PD로 구성되었다. 이로써 128 채널 UD-WDM 광통신 시스템을 개발하였다.

그림 5에서는 전체 128 UD-WDM 광채널들 간 비트 스펙트럼을 나타내었고, 12.5GHz를 기준으로 $\pm 100\text{MHz}$ 이내에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 128개의 광채널들이 12.5GHz의 채널 간격으로 $\pm 100\text{MHz}$ 이내의 오차만으로 정렬되어 있다는 것을 의미한다. 그림 6에서는 전체 128 UD-WDM 광채널들의 광 스펙트럼을 나타내었다. 전체 광채널은 C-band EDFA의 1544.62nm~1557.32nm 내에 존재한다. 그 12.8nm 대역 내에 약 0.1nm의 채널간격으로 128채널이 정렬되어 있음을 확인할 수 있다.

그림 7에서는 실제 개발된 128 채널 UD-WDM 광통신 시스템의 사진을 나타내었고, 그 시스템의 주요 소자들을 표시하였다.

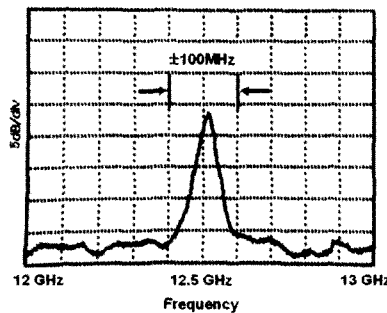


그림 5. 전체 128 UD-WDM 광채널들 간 비트 스펙트럼

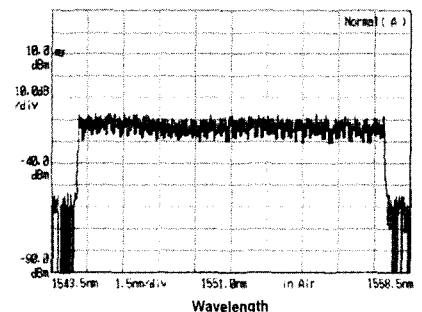


그림 6. 전체 128 UD-WDM 광채널들의 광스펙트럼

3. 대역효율 측정

3.1 양방향 대역효율 측정

기존의 양방향 WDM 시스템을 업그레이드하기 위하여 적합한 채널 간격을 찾고, 제안된 UD-WDM 시스템을 양방향으로 전송시켰을 때의 기본적인 성능을 확인하기 위하여 20, 80, 160km의 전송거리에 따른 채널 간격별로 10Gbps에 대한 BER과 7%의 보정치를 갖는 RSC 기반의 FEC 기술을 적용한 10.7Gbps에 대한 BER을 각각 측정하였다. 두 경우의 대역효율과 편광 조절에 의한 대역효율을 비교하고 분석하였다.

가. 실험구성

20 UD-WDM 광채널을 이용한 양방향 전송을 위하여 실험구성을 하였다. 동쪽노드와 서쪽노드에서 각각 10 UD-WDM 광채널을 이용하여 하나의 SMF를 통해 양방향 통신을 한다. 동쪽 노드의 송신부는 서쪽 노드 광원들의 채널간격의 절반 주파수 만큼 파장 이동(shift) 시킨 10 UD-WDM 광채널그룹으로 구성되어 있다. 즉, 홀수번은 동쪽노드에, 짝수번은 서쪽노드에 상호간에 일정한 채널간격으로 엇갈려서(interleaved) 배열되어 있다. 전송거리별 대역효율을 측정하기 위해 그 구성된 20 UD-WDM 광채널들을 500MHz 스텝의 채널간격별로 정렬하였다.

각각의 광채널그룹은 광변조기를 통하여 10Gbps 또는 10.7Gbps 신호의 DATA와 $\overline{\text{DATA}}$ 로 변조된다. 그 변조된 10 광채널로 구성된 2개의 그룹들은 SMF 두 스텝(2×80km)을 통해 160km로 서로 동쪽에서 서쪽으로 서쪽에서 동쪽으로 각각 전송된다. 160km 중간에 광증계기를 이용하여 중계한다. 그 광증계기는 2개의 광 씨클레이터와 2개의 EDFA로 구성되어 서로 다른 방향의 신호를 각각 중계한다.

SMF에서 생긴 색분산을 각각 노드의 수신단에서 80km 분산보상용 DCF를 이용하여 분산보상을 하였다. 사용된 변조기에서 생긴 -0.7의 처핑으로 첫 스텝의 분산은 보상하지 않았다. 그 색분산 보상된 신호들은 25GHz AWG를 통해 역다중화 되어 수신되었다.

본 실험에서는 동쪽노드의 광채널들을 1553.64 nm인 11번 광채널로 기준을 잡고, 나머지 광채널들을 일정 간격으로 정렬하였다. 모든 실험에서 그 기준채널로 BER을 측정하였다.

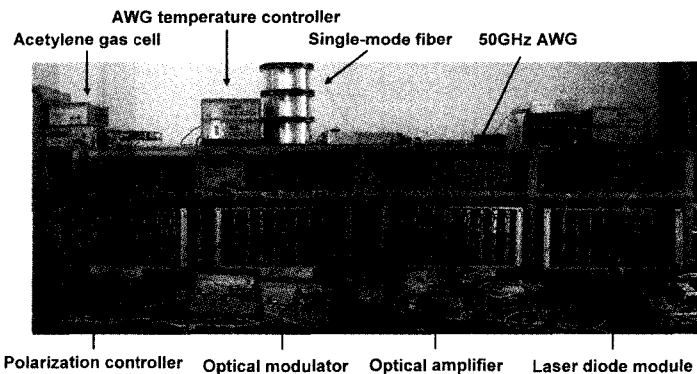


그림 7. 개발된 128 채널 UD-WDM 광통신 시스템

나. 10 Gbps로 전송한 결과

20 UD-WDM 광채널을 10Gbps로 변조하여 양방향 전송한 결과를 그림 8에 나타내었다. 전송 없이 한 채널만 실험한 결과와 비교하여 BER이 10^{-12} 에서의 파워페널티를 측정하였다. 좌측으로 선이 끊긴 것은 10^{-12} 을 얻지 못했기 때문이다. 좌측으로 채널 간격이 줄어들수록 파워페널티가 급하게 증가한

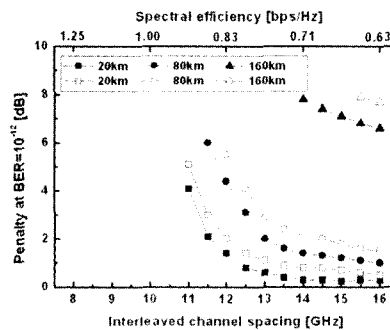


그림 8. 10 Gbps로 변조하여 양방향 전송한 결과

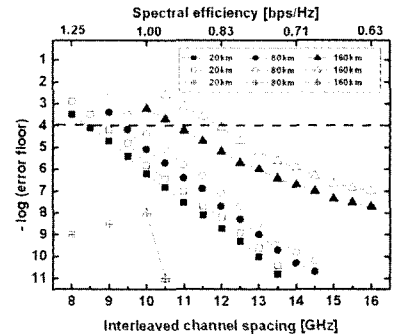


그림 9. 10.7 Gbps로 변조하여 양방향 전송한 결과

것은 이웃한 채널간의 cross-talk이 증가했기 때문이다. 이로써 최대 좁힐 수 있는 채널간격을 얻었다. 각각의 편광조절기 출력단에서 PC1과 PC2로 편광조절하여 가장 좋은 경우와 가장 나쁜 경우에 대해서 비교하였다.

표 1에서는 변조속도 10Gbps에 대한 전송거리별 최대 대역효율을 정리하여 나타내었다. 편광조절에 의해서 80km와 160km에서는 약 5%와 10%의 대역효율을 향상시켰다.

표 1. 변조속도 10 Gbps에 대한 전송거리별 양방향 대역효율

| 전송거리(km) | 대역효율 (bps/Hz) | | 개선비 (Best/Worst) |
|----------|---------------|------------|------------------|
| | Best case | Worst case | |
| 20 | 0.91 | 0.91 | 1.00 |
| 80 | 0.87 | 0.83 | 1.05 |
| 160 | 0.71 | 0.65 | 1.09 |

표 2. 변조속도 10.7 Gbps에 대한 전송거리별 양방향 대역효율

| 전송거리(km) | 대역효율 (bps/Hz) | | 개선비 (Best/Worst) |
|----------|---------------|------------|------------------|
| | Best case | Worst case | |
| 20 | 1.18 | 1.11 | 1.06 |
| 80 | 1.05 | 1.00 | 1.05 |
| 160 | 0.91 | 0.83 | 1.10 |

다. 10.7 Gbps로 전송한 결과

20 UD-WDM 광채널을 10.7Gbps로 변조하여 양방향 전송한 결과를 그림 9에 나타내었다. 대역효율을 비교하기 위해 수신기에 입력되는 광파워를 일정하게 입력하였다.

10Gbps의 경우와 비교하여, 채널 간격이 줄어들수록 BER이 천천히 증가한 것은 높은 BER에서 이웃한 채널간의 cross-talk의 영향이 적기 때문이다. 전송거리별로 최대 좁힐 수 있는 채널간격을 얻었다. 편광조절(PC1과 PC2)에 의한 최적의 경우와 최악의 경우에 대해서도 비교하였다. 또한 FEC 보드를 실제로 사용하여 측정된 결과도 나타내었다.

20km와 80km의 경우에는 에러 플로워의 값이 선형적으로 나타나 10^{-10} 이하의 값을 얻을 수 있는 반면, 160km에서는 채널 간격을 넓혀도 약 10^{-8} 의 값으로 제한되었다.

표 2에서는 변조속도 10.7Gbps에 대한 전송거리별 최대 대역효율을 정리하여 나타내었다. 20km와 80km의 경우 모두 대역효율이 1.00bps/Hz 이상이였다. 즉, 10Gbps의 신호가 10GHz의 대역만을 사용해서 통신할 수 있다는 것을 나타낸다. 편광조절에 의해서 20km와 80km에서는 각각 약 6%와 5%의 대역효율을 향상시켰다. 160km의 경우에는 double Rayleigh scattering이 누적되어 대역효율이 1.00bps/Hz를 넘지 못했다. 편광조절에 의해서는 약 10%의 대역효율을 향상시켰다. 또한, 실제로 FEC 보드를 이용하여 10^{-4} 이하에서 에러가 없다는 것을 확인하였다.

라. 10 Gbps와 10.7 Gbps의 변조속도에 따른 대역효율 비교

FEC를 사용하고 안하고에 따라 대역효율은 다르게 나타났다. 160km의 경우에는 0.71bps/Hz에서 0.91bps/Hz로 약 30%로 향상되었고, 10Gbps의 편광조절 안된 최악의 경우와 10.7Gbps의 최적의 경우와 비교하면 약 40%의 대역효율이 향상되었다.

20 UD-WDM 광채널을 이용한 양방향 전송으로 여러 경우의 전송거리에 따른 최적의 대역효율을 측정하였다. 편광조절과 FEC를 사용하면 160km의 전송거리에서 12.5GHz의 채널간격으로 교차된 UD-WDM 양방향 통신이 가능하다는 것을 확인하였다.

한편, 양방향 전송에서 가장 문제시되는 double Rayleigh scattering 때문에 더 이상 전송할 수 없었으나, 이런 문제를 최소화하기 위하여 UD-WDM에 적용할 수 있는 광필터의 개발이나 한 스패의 전송거리를 80km 이하로 줄이면, 전체 전송거리를 늘릴 수 있을 것이다.

3.2 단방향 대역효율 측정

기존에 사용되고 있는 단방향 WDM 시스템을 업그레이드하기 위하여 적합한 채널 간격을 찾고, 제안된 UD-WDM 시스템을 단방향으로 전송시켰을 때의 기본적인 성능을 확인하기 위하여 0, 80, 160, 240, 320km의 전송거리에 따른 채널 간격별로

10Gbps에 대한 BER을 측정하고, 또한 7%의 보정치치를 갖는 RSC 기반의 FEC 기술을 적용한 10.7Gbps에 대해서도 BER을 측정하였다. 두 경우의 대역효율을 비교하고, 또한 편광 조절한 경우에 대해서도 비교 분석하였다.

가. 실험구성

20 UD-WDM 광채널을 이용한 단방향 전송을 위하여 실험구성을 하였다. 10개의 광채널들이 다중화된 두 신호그룹들은 두 개의 광변조기를 통하여 10Gbps 또는 10.7Gbps 신호의 DATA와 DATA로 각각 변조된다. 각각 변조된 두 신호그룹은 광필터를 통해 광결합되어 EDFA에서 광증폭되어 광섬유 전송로를 통해 전송된다.

한편, 변조기 출력단에서 광원의 일부파워를 분기하여 BFL 장치로 입력하였다. 그 BFL 장치를 통해 광채널들을 제어하여 1553.64nm인 11번 광채널을 기준으로 전체 20 UD-WDM 광채널을 500MHz 스텝의 채널간격별로 정렬하였다. 모든 실험에서 그 기준채널로 BER을 측정하였다.

20 UD-WDM 광신호들은 SMF 네 스펠(4×80km)을 통해 320km까지 전송된다. 80km의 SMF마다 손실된 파워보상과 색분산 보상을 위하여 DCM2-DCM4를 배치하였다. 첫 스펠에서는 색분산 보상하지 않고, EDFA만을 배치하였다. DCM은 두개의 EDFA와 그 중간에 DCF로 구성되어 있다. 그 전송된 광채널그룹 신호들 중 11번 채널은 25GHz AWG를 통해 역다중화 되어 수신되었고, 그 수신된 신호의 성능을 측정하였다.

나. 10Gbps로 전송한 결과

20 UD-WDM 광채널을 10Gbps로 변조하여 단방향 전송한 결과를 그림 10에 나타내었다. 전송 없이 한 채널만 실험한 결과와 비교하여 BER이 10^{-12} 에서의 파워페널티를 측정하였다. 양방향과 마찬가지로 최대 좁힐 수 있는 채널간격을 얻었고, 편광조절(PC1과 PC2)에 의해 가장 좋은 경우와 가장 나쁜 경우에 대해서 비교하였다.

표 3에서는 변조속도 10Gbps에 대한 전송거리별 최대 대역효율을 정리하여 나타내었다. 편광조절에 의해서 240km와 320km에서는 약 23%와 19%의 대역효율을 향상시켰다. 20GHz 이상의 채널간격에서는 최소 320km까지 전송할 수 있으나, 12.5GHz의 채널간격에서는 back to back에서만 BER이 10^{-12} 값을 얻을 수 있었다. 즉, 이 조건에서는 전송할 수 없다는 것을 의미한다.

다. 변조속도 10.7Gbps로 전송

20 UD-WDM 광채널을 10.7Gbps로 변조하여 단방향 전송한 결과를 그림 11에 나타내었다. 비교하기 위해 수신기에 입력되는 광파워를 일정하게 입력하였다. 양방향의 경우와 비교하여, 80km 이하의 전송에서는 비슷한 기울기를 갖으나, 160km에서는 다른 기울기를 갖는다. 단방향에서는 double Rayleigh scattering의 효과가 거의 없기 때문이다. 또한 전체적으로 비선형 효과를 줄이기 위해 SMF와 DCF로 입력되는 신호의 광파워를 낮게 입력하였다. 그래서 같은 채널간격에서 거리별로 큰 차이를 보이지 않았다.

편광조절(PC1과 PC2)에 의한 최적의 경우와 최악의 경우에 대해서도 비교하였다. 또한 FEC 보드를 실제로 사용하여 측정된 결과도 나타내었다.

표 4에서는 변조속도 10.7Gbps에 대한 전송거리별 최대 대역효율을 정리하여 나타내었다. Back to back과 80km 전송의 경우에서, 편광조절에 의해서 두 경우 모두 약 19%의 대역효율을 향상시켰다. 160km와 240km 및

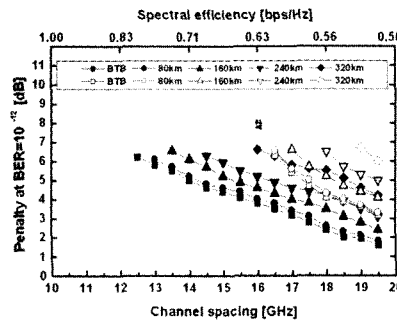


그림 10. 10 Gbps로 변조하여 단방향 전송한 결과

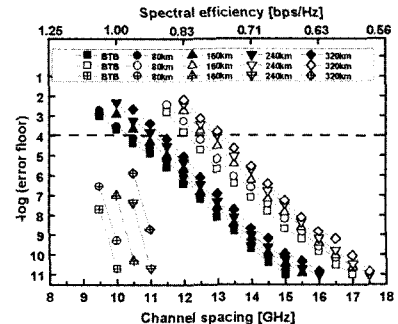


그림 11. 10.7 Gbps로 변조하여 단방향 전송한 결과

320km의 경우에는 편광조절에 의해서 각각 약 18%와 13% 및 18%의 대역효율을 향상시켰다. 또한, 실제로 FEC 보드를 이용하여 단방향 전송에서도 BER이 10^{-4} 이하에서 에러가 없다는 것을 확인하였다.

표 3. 변조속도 10 Gbps에 대한 전송거리별 단방향 대역효율

| 전송거리(km) | 대역효율 (bps/Hz) | | 개선비 (Best/Worst) |
|--------------|---------------|------------|---------------------|
| | Best case | Worst case | |
| back to back | 0.80 | 0.61 | 1.31 |
| 80 | 0.77 | 0.61 | 1.26 |
| 160 | 0.74 | 0.59 | 1.25 |
| 240 | 0.69 | 0.56 | 1.23 |
| 320 | 0.63 | 0.53 | 1.19 |

라. 10Gbps와 10.7Gbps의 변조 속도에 따른 대역효율 비교

FEC를 사용하고 안하고에 따라 대역효율은 다르게 나타났다. 240km와 320km의 경우에는 FEC를 사용했을 때가 사용하지 않았을 때보다 최적의 대역효율을 각각 약 26%와 38%로 향상시켰다.

표 4. 변조속도 10.7 Gbps에 대한 전송거리별 단방향 대역효율

| 전송거리(km) | 대역효율 (bps/Hz) | | 개선비 (Best/Worst) |
|--------------|---------------|------------|---------------------|
| | Best case | Worst case | |
| back to back | 0.95 | 0.80 | 1.19 |
| 80 | 0.95 | 0.80 | 1.19 |
| 160 | 0.91 | 0.77 | 1.18 |
| 240 | 0.87 | 0.77 | 1.13 |
| 320 | 0.87 | 0.74 | 1.18 |

320km 단방향 전송에서 10Gbps의 편광조절 안된 최악의 경우와 10.7Gbps의 최적의 경우와 비교하면 약 60%의 대역효율을 향상시킬 수 있었다.

20 UD-WDM 광채널을 이용한 단방향 전송으로 여러 경우의 전송거리에 따른 최적의 대역효율을 측정하였다. FEC 없이 12.5GHz의 채널간격으로 전송할 수 없었고, 편광조절과 FEC를 사용하면 320km의 전송거리에서 12.5GHz의 채널간격의 UD-WDM 단방향 통신이 가능하다는 것을 확인하였다.

4. 1 Tbps, 1200km long-haul 전송

최근 40Gbps 기반의 광통신은 변조방식과 광증폭기와 전송선로를 개선하여 장거리(long-haul) 통신용으로 연구되고 있다. 10Gbps 기반의 광통신에서는 장거리 통신을 하기에 문제점 즉, 비선형 현상과 crosstalk 등의 이유로 기피되어 왔다. 그러나 그 문제점들을 최소화 하여 채널당 10Gbps 기반으로 대역효율이 0.8bps/Hz인 1 Tbps(100×12.4 Gbps)를 SMF 1200km를 통해 성공적으로 전송시켰다.

SMF 1200 km를 통해 1 Tbps(100×12.4 Gbps) 전송을 위하여 실험구성을 하였다. 4개의 50GHz AWG를 이용하여 100개의 광원을 흡수번과 짝수번으로 나누어 광다중화 하고, 2개의 광변조기를 통해 각각 DATA와 DATA로 변조한다. RSC와 BTC 방식의 FEC 기술을 가정하여, 변조 속도를 10.7Gbps와 12.4Gbps로 각각 변조하여 실험하였다. 변조된 두 그룹은 광 커플러를 통하여 광결합 되었고, EDFA1에서 광증폭되어 re-circulating 루프로 입력된다.

한편 변조된 채널그룹의 광파워 일부를 분기하여 BFL 장치에 입력하였다. 그 TLS를 이용한 BFL 장치는 TLS를 스캔하여 광채널들의 채널간격을 읽고, 오차만큼을 파장제어(TEC control) 신호로 보상하여 광채널들을 정렬하였다.

그 루프로 입력된 광신호들은 1회 선회할 때마다 이득평탄용 필터를 내장한 2단 EDFA, 80km의 SMF, 1단 EDFA 및 DCF를 세 번 통과하고 광스위치의 손실보상을 위한 EDFA를 통과한다. DCF는 두 번은 80km 보상용으로, 한 번은 60km 보상용으로 구성되었다.

100 UD-WDM 신호들은 이 240km의 전송구간을 갖는 루프를 4회 또는 5회를 선회하고 수신부로 입력된다. EDFA2로 미약해진 광신호를 증폭하고 25GHz 채널간격의 AWG를 이용하여 역다중화 한다. 그 AWG는 FSR이 약 3.2nm 이기에 역다중화 시, 3~4개의 광채널이 출력된다. 한 채널만을 출력시키기 위해 AWG 전에 2.7nm의 대역통과 광필터를 사용하였다. 광 수신기 전에 부족한 분산 보상을 위하여 40km용 DCF를 배치하였다. 단, 4회 선회할 때는 광수신기 전에 20km의 SMF를 추가

로 삽입하였다. 전송 선로 상에서 이웃한 채널 간 간섭을 최소화 하기위해 두개의 PC를 이용하여 편광 조절하였다.

그림 12에서는 100 UD-WDM 광채널들의 정렬 전과 후의 주파수 편차를 비교하였다. 정렬 전에는 $\pm 2\text{GHz}$ 이내로 채널들이 분포되었으나, 정렬 후에는 그 오차치의 5%인 $\pm 100\text{MHz}$ 이내로 나타났고 매우 안정적으로 정렬되었다.

그림 13에서는 1200km 전송 후의 광 스펙트럼을 나타내었다. 광채널들 간의 최대 파워차이는 7dB이었고, 0.07nm 해상도에서 OSNR은 15dB 이상이었다. 같은 OSNR을 갖는 광채널의 전송 전과 비교하면, 전송에 따른 Q-페널티는 약 3.4dB이었다. 그림 14에서는 변조속도와 전송거리에 따른 파장별 Q-factor 값들을 나타낸다. 변조속도 10.7Gbps의 경우는 4회 선회에서 FEC threshold 값에 임계하였다. 따라서 전송거리가 960km로 제한되었다. FEC 보드를 이용하여 실험적으로 에리 보정하여 BER = 10^{-13} 이가 되는 것을 확인하였다. 또한 변조속도 12.4Gbps의 경우는 1200km까지 전송할 수 있었다. BTC 기반의 FEC는 non-Gaussian 잡음의 영향이 적다는 것을 확인하였다. 50GHz 간격의 25 광채널을 이용하여 실험한 결과, 비슷한 Q-페널티를 얻었다. 이 실험 결과로 장거리 전송에서 문제시 되는 비선형 현상 중 XPM 문제가 적다는 것을 확인하였다.

5. 원격노드 정렬

아주 멀리 있는 노드와의 파장동기화를 위하여 1680km 떨어진 원격노드를 정렬하는 실험을 수행하였다.

원격노드에서는 20 DWDM 광채널들을 50GHz 채널 간격으로 배치하고, AWG를 통해 파다중화시켰다. 그 신호들은 광변조기를 통하여 RSC-FEC를 가정한 10.7Gbps 또는 BTC-FEC를 가정한 12.4Gbps로 각각 변조된다. 그 변조된 20 광채널들은 EDFA1에서 광증폭되어 앞서 설명한 re-circulating 루프를 통해 전송된다. 단, DCF는 모두 80 km 보상용이었다.

20 DWDM 신호들은 240km의 전송 구간을 갖는 그 루프를 5회~7회를 선회하고 수신부로 입력된다. 수신된 광 신호들은 EDFA2에서 증폭되고 50GHz 채널간격의 AWG를 이용하여 역다중화 된다.

한편 중심노드에서는 25GHz 간격의 64 UD-WDM 광채널들을 정렬하고, 원격노드와 같은 변조속도로 변조하였다. 원격노드의 광채널들을 정렬하기 위하여, 중심노드의 64 광채널과 수신된 20 광채널의 파워 일부를 분기하여 BFL 장치에 동시에 입력하여 그 20 광채널들을 정렬하였다.

그림 15에서는 1680km로 전송된 광채널의 정렬 후의 주파수 편차를 나타내었다. 그 20 DWDM 광채널들이 50GHz로 정렬되었고 $\pm 100\text{MHz}$ 이내로 안정화되었다. 여러 노드를 원격정렬 하고자 할 때, 상기 방법을 이용하여 각 노드를 순차적으로 정렬하면, 장거리의 네트워크 망에서도 BFL 장치 하나만을 이용하여 한 네트워크 내의

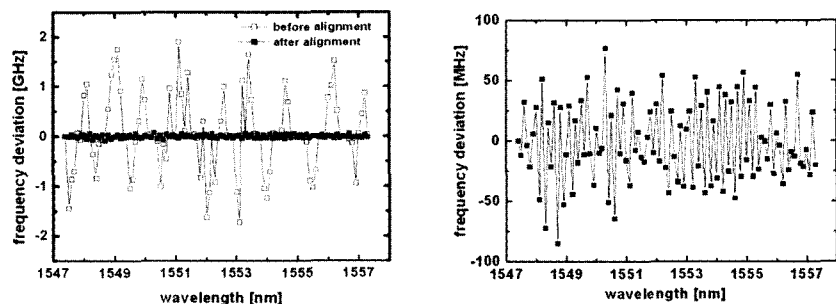


그림 12. 정렬 (a) 전과 (b) 후의 주파수 편차

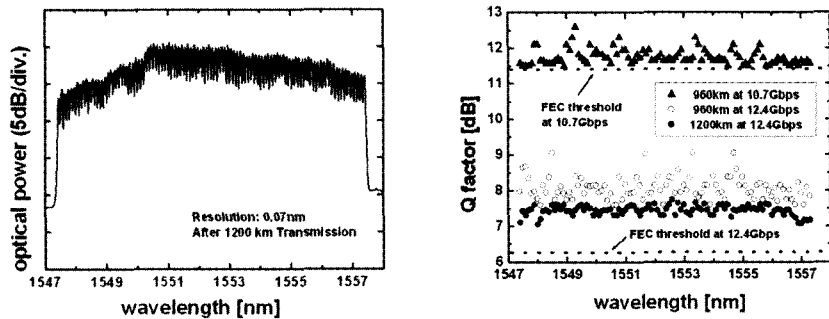


그림 13. 1200 km 전송 후의 광 스펙트럼

그림 14. 960 km와 1200 km 전송 후, 파장별 Q-factor 수치

모든 채널 파장을 동기화 시킬 수 있을 것이다.

그림 4. 16에서는 전송 거리에 따른 채널별 Q-factor 값을 나타내었다. RSC를 가정한 10.7Gbps로 변조한 경우는 1200km 전송 후에 그 FEC threshold 값에 임계하여 더 이상의 진행이 제한되었다. 그러나 BTC를 가정한 12.4Gbps로 변조한 경우는 2회를 더 선회하여, 1680km 까지 전송될 수 있었다. 1680 km의 장거리 노드를 BFL 장치 하나만으로 정렬하여 채널 파장을 동기화 시킬 수 있었고, 성공적으로 전송하였다.

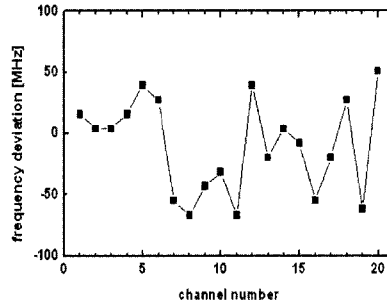


그림 15. 정렬 후의 주파수 편차

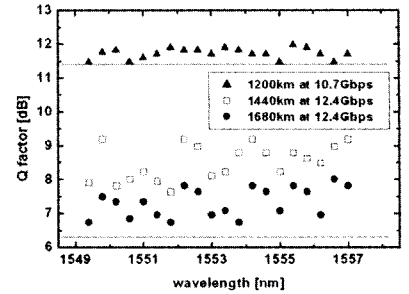


그림 16. 전송 거리에 따른 채널별 Q-factor 수치

3 결론

광운대학교 광 네트워크 및 시스템 국가지정연구실에서는 매우 좁은 채널간격의 광채널을 제어할 수 있는 BFL 방법을 제안하고, 이를 이용하여 여러 정렬실험을 수행하고, 대역효율 측정실험을 수행하였다. 또한 다양한 UD-WDM 전송실험을 수행하였다.

먼저 BFL 방법의 동작원리를 간략히 설명하였다. 그 BFL 방법을 이용한 정렬실험에서는 12.5GHz 채널간격의 128 UD-WDM 광채널들을 $\pm 100\text{MHz}$ 이내로 매우 정밀하게 정렬하고 안정화시켰다.

두 번째로 대역효율 측정실험에서, 10Gbps 기반의 20 UD-WDM 광채널들을 500MHz 스텝의 채널간격별로 정렬하여 채널 교차된 양방향과 단방향의 전송거리별 대역효율을 측정하였다. 7%의 보정치를 갖는 RSC 기반의 FEC 기술을 적용하여 채널 교차된 양방향 160km와 단방향 320km에서 대역효율을 각각 약 30%와 40%를 향상시켰다.

마지막으로 long-haul 전송실험에서는 BFL 방법을 이용하여 100 UD-WDM 광채널들을 $\pm 100\text{MHz}$ 이내로 정렬하여 1200km의 SMF를 통한 0.8bps/Hz의 대역효율을 갖는 1 Tbps($100 \times 12.4\text{Gbps}$) 전송을 수행하였다. non-Gaussian 잡음에 강한 BTC 기반의 FEC 기술을 적용하여 모든 채널들이 에러 없이 전송되었다. 또한 1680km 떨어진 원격노드의 50GHz 채널간격을 갖는 20 DWDM 광채널들을 $\pm 100\text{MHz}$ 이내로 정렬하고, BTC-FEC 기술을 적용하여 에러 없이 1680km를 전송시켰다.

결론적으로 12.5GHz 채널간격 128 채널 UD-WDM 광통신 시스템을 개발하였다. 이 개발된 시스템은 네트워크의 유연성을 향상시킬 수 있고, wavelength locker를 사용하지 않은 저비용 시스템이고, 채널간격 및 채널 위치 등을 신속하게 수정 및 관리를 하여 자동화 시킬 수 있다. 채널파장제어를 위한 BFL 장치의 소형화 저비용화가 가능하여 경제적이다. 한편, long-haul 전송에 응용할 수도 있어 기간망에 적용이 가능할 것이고, 10Gbps Ethernet 기반의 metro와 access망에도 적합할 것이다. 또한 그 BFL 방법을 모든 노드에 적용한다면, 쉽게 전체 UD-WDM 네트워크의 모든 채널들의 파장동기화를 시킬 수 있을 것이다. 모든 실험들은 기존의 WDM 시스템을 향상시키기 위하여 C-band EDFA와 SMF 및 NRZ 변조 방식을 이용하였다. 따라서 10 Gbps 기반의 UD-WDM은 소규모의 추가 투자로 기존의 WDM 네트워크를 향상시킬 수 있는 좋은 해결책이 될 것이다.

향후 본 국가지정연구실은 최적화된 광증폭기와 변조방식을 연구 개발하여 UD-WDM 광채널을 최대 2500km까지 전송할 것이며, BFL 방법을 이용한 UD-WDM 방식의 metro 및 access 네트워크를 연구할 것이다.

약어 풀이

AWG: arrayed-waveguide grating
 BFL: beat-frequency locking
 C: optical coupler
 DCM: dispersion-compensating module
 EDFA: erbium-doped fiber amplifier
 FSR: free-spectral range
 NRZ: non-return-to-zero
 PC: polarization controller
 PPG: pulse pattern generator
 Q: quality
 RZ: return-to-zero
 TLS: tunable laser source
 WDM: wavelength-division multiplexing
 초고밀도 파장분할다중화 광통신

BER: bit-error rate
 BTC: block-turbo code
 DCF: dispersion-compensating fiber
 DWDM: dense-WDM
 FEC: forward-error correction
 MOD: LiNbO3 modulator
 OSNR: optical signal-to-noise ratio
 PD: photodiode
 PRBS: pseudorandom bit sequence
 RSC: Reed-Solomon code
 TEC: thermo-electric cooler
 UD-WDM: ultra dense-WDM
 XPM: cross-phase modulation

약 령



이훈식

1998년 2월: 시립인천대학교 물리학과 학사
 2001년 2월: 광운대학교 전자공학과 석사
 2004년 8월: 광운대학교 전자공학과 박사예정



이재승

학 령 :
 1989년 8월 18일 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 졸업
 1985년 3월 1일 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 입학
 1985년 2월 22일 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정 졸업
 1983년 3월 1일 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정 입학
 1983년 2월 26일 서울대학교 공과대학 전자공학과 학사과정 졸업
 1979년 3월 1일 서울대학교 공과대학 전자공학과 학사과정 입학
 경력:
 1995년 9월 18일 - 현재: 광운대학교 전자공학과 부교수
 1989년 10월 24일 - 1995년 9월 18일: 한국전자통신연구원
 광통신연구실 선임연구원
 1993년 1월 26일 - 1994년 1월 31일:
 미국 AT & T Bell 연구소 Consultant
 (Crawford Hill Laboratory, New Jersey)