장거리 전송 파장분할 다중방식 수동형 광가입자망을 이용한 차세대 국방 유선통신체계 구축방안

A Construction Scheme of Next Generation Wire Communication System by using Long-reach WDM-PON

김 민 환* 이 상 묵* 이 창 희*
Kim, Min-Hwan Lee, Sang-Mook Lee, Chang-Hee

ABSTRACT

We demonstrate an 80km-reach 64-channel DWDM-PON based on wavelength-locked F-P LDs by changing the position of the C-band BLS for upstream channels from the CO to the RN. It mitigates the necessity of the high power C-band BLS and its handling problems. It also reduces back scattering induced penalty. We obtained less than 10^{-6} PLRs in all 128channels through 80km SMF. We also demonstrate a 240km-reach DWDM-PON based on wavelength-locked F-P LDs by adding a bidirectional erbium-doped fiber amplifier(EDFA). We show packet-loss-free transmission in all 128channels at 125 Mb/s per channel over 240km SMF. We report the detuning effect of arrayed waveguide gratings(AWGs) and crosstalk effect in the implemented system. We propose an architecture of a next generation defense wire communication system with the demonstrated long-reach DWDM-PON.

주요기술용어(주제어) : Wavelength Division Multiplexing(파장분할 다중방식), Passive Optical Network(수동형 광가입자망), Long-Reach Transmission(장거리 전송)

1. 머리말

미래전 양상은 첨단 군사기술을 바탕으로 한 단순한 전투력 우위에 의한 전쟁보다는 정보·지식·기술 중심의 네트워크 중심전 양상을 띠고 있다. 네트워크 중심전은 전장의 제 전력요소들을 효과적으로 연결, 네트워킹 함으로써, 지리적으로 분산된 제 전력요소들이 전장의 상황을 상호공유·활용하여, 지휘관 의도 중심의 자체동기화와 속도지휘를 창출하는 정보·지식시대의 새로운 전쟁 및 작전개념으로 정보획득-지휘결심-타격을 위한 전 전장의 네트워크 체계가 필수적이다[1].

국내에서 추진 중인 정보통신기술 발전추세를 보면, 정통부 주관으로 통신, 방송, 인터넷이 융합된 품질보장형 광대역 멀티미디어 서비스를 언제 어디서나 끊김 없이 안전하게 광대역으로 이용할 수 있는 차세대 통합네트워크인 광대역 통합망(Broadband Convergence Network)을 추진 중에 있다[2].

† 2007년 2월 15일 접수~2007년 5월 18일 게재승인
* 한국과학기술원(KAIST)
주저자 이메일 : ky9975@kaist.ac.kr

미군의 경우에도 네트워크 중심전을 대비하기 위하여 다양한 전장 환경변화 속에서 미래 군 임무가 요구하는 다양한 정보의 획득, 융합, 공유가 가능한 생존성, 신뢰성이 보장된 확장성 있는 통신 인프라 구축을 위해 상용기술의 적극적인 도입과 함께 별도의 핵심기술 연구 및 개발을 통한 전술통신기반체계 구축을 추진 중에 있다[3].

최근 우리 군에서도 상용기술을 이용한 미래 국방정보통신망에 관한 구축방안들이 제시되어 왔다[4~6]. 차기 국방망 백본 구조로 DWDM 백본 네트워크가 제안되었고 차세대 통합 네트워크인 광대역 통합망 기반의 미래 국방 광대역통합망(D-BcN : Defence-BcN)이 제안되었다. 미래 국방 광대역 통합망에서 가입자망(전략통신망)은 유선기반의 스위치 기반의 메트로 이더넷, VPN, 유·무선 접속망, 광대역 무선망, 위성 통신망 등 주로 상용기술을 통한 망들을 이용할 것을 제안하고 있다.

오늘날 정보통신기술의 발전과 인터넷기술의 급속한 확산으로 인해 기존의 음성, 텍스트 중심의 서비스 요구가 영상 및 화상중심의 서비스 요구로 전환되면서 가입자망의 고속화에 대한 요구가 급격히 증가하고 있다. 이에 산업체·연구소·학교기관들은 넓은 대역폭을 안정적으로 제공하기 위한 방안으로 가입자까지 단일 모드 광섬유를 포설하여 서비스를 제공하는 FTTH(Fiber To The Home) 기술들을 많이 연구하고 있다[7,8]. 여러 기술 중에서도 경제적이면서 유지 보수가 쉬운 수동형 광가입자망(PON : Passive Optical Network)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 WDM-PON은 넓은 대역폭, 높은 QoS (Quality of Service), 높은 보안성, 쉬운 확장성, 그리고 전송속도와 프로토콜에 대한 투명성 등의 장점들을 갖고 있기 때문에 궁극적인 광대역 광가입자망으로 인식되고 있다[9].

본 논문에서는 차세대 전략통신망 중 유선통신체계를 통합할 수 있는 기술적 대안으로 장거리 전송 파장분할 다중방식 수동형 광네트워크를 제안하고 경제적인 파장 잠김된 F-P LD를 광원으로 사용하는 80 km 전송 및 240km 전송 64채널 DWDM-PON을 구현하며 구현된 시스템의 야외설치 타당성을 검증할 것이다. 또한 구현된 시스템을 이용한 차세대 국방 유선통신체계 구축방안에 대하여 논할 것이다.

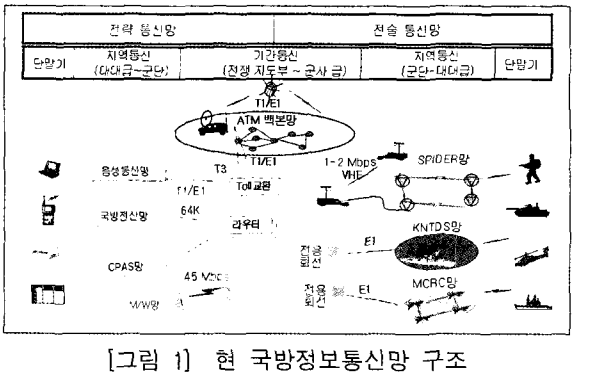
2. 관련연구

가. 현 국방정보통신망 현황

현재 국방정보통신망(DISN : Defense Information System Network)은 그림 1과 같이 음성, 데이터를 통합하는 ATM(Asynchronous Transfer Mode)망을 운영하는 전략통신망과 전시 임무수행 지원을 위한 무선위주의 전술통신체계로 분류 할 수 있다. 각각의 망들은 지역통신망을 경유하여 해당 단말 가입자에게 전달된다.

전략통신망은 전송수단에 따라 유선전송체계, 무선전송체계, 위성전송체계로 나누어진다. 유선통신체계는 ATM 백본망, 음성통신망, 전산망으로 구분되며 ATM 백본망을 중심으로 음성통신망은 ATM 접속노드에 연결된 Toll교환기를 거쳐 각 부대의 교환기로 연결된다. 데이터망은 물리적으로 분리된 국방전산망, 정보망, 기상망, 지휘소자동화망, 기무망 등이 별도로 운용되므로 복잡성을 갖는다. 전산망은 ATM 백본 교환기와 연결된 라우팅 서버를 이용하여 IP 백본망을 구성하고, 각 노드별로 분산되어 64K, T1/E1급 회선으로 군 인트라넷, 부대 LAN등에 대한 데이터 서비스를 제공한다.

현재의 국방정보통신망 구조는 음성망, 데이터망, 지휘통제망이 별도로 구축되어 있어 회선의 운용 면에 있어서 비효율적이며 낮은 대역폭으로 인하여 운영의 제한을 받고 있다. 현재 ATM기반의 국방망 백



[그림 1] 현 국방정보통신망 구조

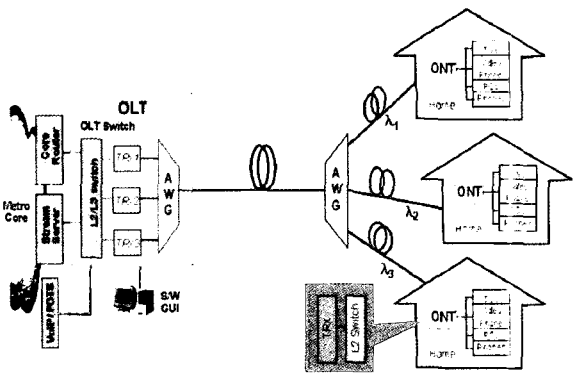
본을 그대로 유지하면서 필요에 따라 회선을 증속시키는 방안은 회선 대역폭이 제한되고 회선 증대시 증대할 때 마다 추가의 비용을 지불하며 더 많은 대역폭이 필요할 경우 ATM 장비 및 인터페이스 카드를 추가적으로 설치해야 한다.

그러므로 폭증하는 대역폭 요구에 능동적으로 대처하고 효율적인 자원관리를 위한 새로운 유선통신체계가 필요한 실정이다.

나. 장거리 전송 WDM-PON

WDM-PON은 WDMA(Wavelength Division Multiple Access)방식을 이용하여 광섬유를 공유할 수 있도록 하는 수동형 광네트워크로 구성도는 그림 2와 같으며 전화국에 설치되는 광 종단장치(OLT : Optical Line Termination)와 도파로 배열 격자(AWG : Arrayed Waveguide Grating)로 구현되는 원격노드(RN : Remote Node), 그리고 가입자단에 설치되는 광 종단장치(ONT : Optical Network Termination)로 구성되어 있다.

각각의 OLT와 ONT에는 광송수신기가 독립된 쌍으로 설치되어 통신을 하기 때문에 OLT와 ONT는 점대 점으로 연결된 것과 같으며 하나의 광섬유를 공유하기 위하여 각각의 ONT로 보내는 하향신호 및 OLT로 보내는 상향신호는 파장분할 다중화 된다. 따라서 각각의 가입자는 서로 다른 프로토콜을 사용할 수 있으며 보장되는 대역폭이 매우 넓으므로 TV, 전화, 화상전화, 인터넷 등과 같은 서비스를 통합함에도 완벽한 QoS를 보장할 수 있다.

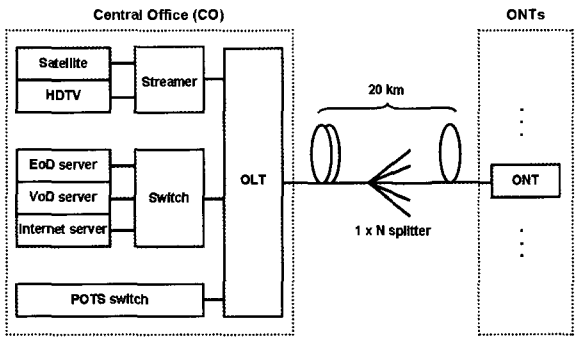


[그림 2] 파장분할 다중방식 수동형 광가입자망의 구성도

OLT에는 각각의 서비스별로 상단장치에 연결하기 위하여 서비스별 트래픽 분리를 위한 L2/L3스위치가 필요하다. RN과 OLT에 있는 AWG는 OLT와 ONT 간의 신호를 파장분할 다중화 및 역다중화하는 기능을 수행한다. 각각의 가입자에게 할당되는 파장은 AWG의 어떠한 출력단자를 사용하느냐에 따라 결정되며 가입자에 할당된 파장의 신호만 전달되므로 가입자 정보의 보안성은 완벽하게 보장된다[9].

일반적인 TDM-PON기반의 G-PON(Gigabit PON)에서는 중앙국(CO : Central Office)에서 가입자까지의 최대 전송 거리를 20km로 규정하고 있으며 CO의 구조와 일반적인 PON의 구성도는 그림 3과 같다[10]. CO에는 음성 전화와 인터넷, 주문형 영상 서비스(EoD, VoD), 위성 방송과 HD 방송 등의 다양한 서비스를 제공하기 위한 많은 장비들이 놓이게 되며, CO들이 서로 연결되어 메트로망(Metro Network)을 구성한다. 메트로망은 여러 단계의 집선 스위치(Aggregated Switch)를 거쳐 백본망의 에지 스위치에 연결된다. 이러한 망에서는 신호가 다단계의 스위치를 거쳐야 하기 때문에 QoS가 저하된다.

PON에서 CO의 수를 줄여 경제성을 제고하고, 신호의 QoS를 확보하기 위해서 광섬유의 전송 특성을 충분히 활용하여 CO로부터 가입자까지 장거리 전송이 가능한 PON 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[11~14]. 최대 전송 거리가 20km인 PON을 사용해서 어떤 지역을 서비스하기 위해서 9개의 CO가 필요하다고 가정할 때, PON의 최대 전송 거리를 60km로 늘리게 되면 같은 서비스 영역을 제공하기



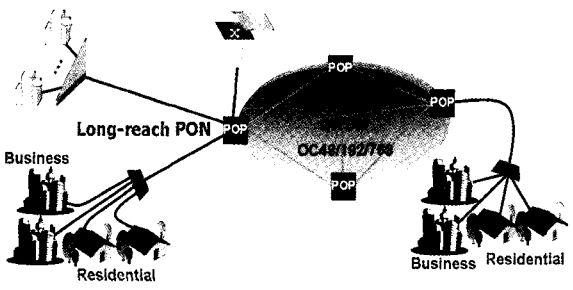
[그림 3] 일반적인 수동형 광가입자망의 구성도

위해서 하나의 CO만 있으면 충분하다. 즉, 장거리 전송이 가능한 PON은 필요한 CO와 장비를 줄임으로써 초기 설비비용과 관리비용을 줄일 수 있다. 기존의 광통신망에서 장거리 전송 PON을 사용해서 가입자망에서 발생한 트래픽을 메트로망을 거치지 않고 바로 백본망의 에지 스위치에 연결할 수 있다.

그림 4에서와 같이 장거리 전송 PON을 이용해서 메트로망과 가입자망을 통합시킴으로써 네트워크를 단순화하여 경제적이고, 신호가 거쳐야 하는 홉의 수를 줄임으로써 QoS가 보장되는 광통신망을 구현할 수 있다. 하지만, 시간분할 다중방식 수동형 광가입자망(TDM-PON : Time Division Multiplexing-PON)을 이용한 장거리 전송 PON에서는 광 분배기의 분배 손실(Splitting loss)과 장거리 광섬유의 손실을 보상하기 위해 CO와 가입자 사이에 광 증폭기(Optical Amplifier)의 사용이 불가피하다[13,14].

또한, 가입자당 넓은 대역폭을 보장하기 위해 전송속도를 증가시켜야 하고, 이로 인해 장거리 전송을 위해서는 광섬유의 색분산을 보상하기 위한 장치가 필요하게 된다. 이러한 광 증폭기와 색분산 보상 장치의 사용은 PON에서 비용을 증가시키고 시스템의 신뢰도를 감소시키며, 많은 가입자들이 대역폭을 공유하므로 보안성과 QoS의 보장이 어렵다.

그러므로 차세대 국방 유선통신체계로 가입자당 보장 대역폭이 100Mb/s이상이고 프로토콜의 투명성, 완벽한 QoS, 높은 보안성을 보장하며 다양한 서비스를 수용할 수 있는 유연성 및 높은 망 확장성을 가지고 있는 장거리 전송 DWDM-PON이 최적의 구현방법일 것이다.



[그림 4] 장거리 전송 PON을 적용한 광통신망 구성도

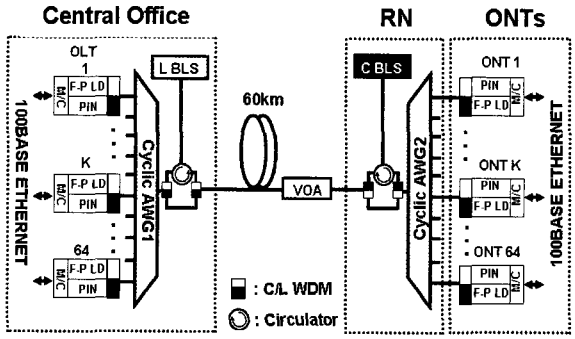
3. 장거리 전송 DWDM-PON 구현

가. BLS 위치 조정한 장거리 전송 DWDM-PON

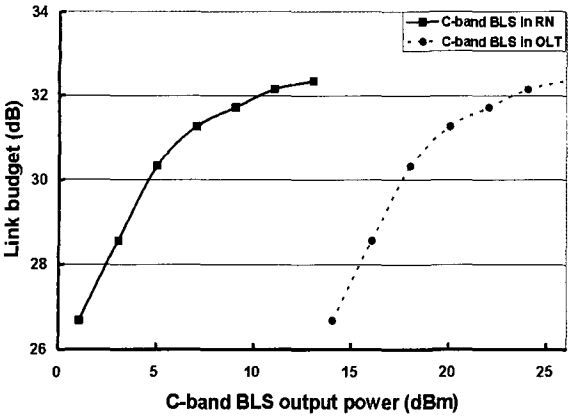
광가입자망에서 저가의 WDM 광원으로 외부에서 주입되는 스펙트럼 분할된 광대역 비간섭성 광원(BLS : Broadband Light Source)에 파장 잠김된(wavelength-locked) F-P LD가 제안되었다[15]. 이는 경제적이고 실용적인 방안으로 인식되어 WDM-PON을 구현하기 위한 광원으로 많이 사용되어 왔다[16,17]. 이러한 파장 잠김된 F-P LD를 광원으로 이용한 BLS 위치 조정한 DWDM-PON의 장거리 전송 실험 구성도를 그림 5에 나타내었다.

이는 크게 CO에 위치하는 OLT, RN, 그리고 가입자에 놓이는 ONT로 구성되어 있다. BLS로는 EDFA에서 발생하는 증폭된 자연 방출광(ASE : Amplified Spontaneous Emission)을 사용하였다. 기존에 제안된 장거리 전송 DWDM-PON에서는 C-밴드 및 L-밴드 BLS가 OLT에 위치하였다[18]. 이 경우 광섬유가 길어질수록 ONT의 F-P LD에 주입되는 C-밴드 BLS가 겪는 광섬유의 손실이 증가하게 되고, 이로 인해서 파장 잠김 효과는 점점 감소하게 되어 시스템 성능이 저하된다. 또한 광섬유에서 Rayleigh 역산란된 C-밴드 BLS와 상향신호간에 비트 잡음(beat noise)이 발생하여 파워 페널티를 유발시킨다.

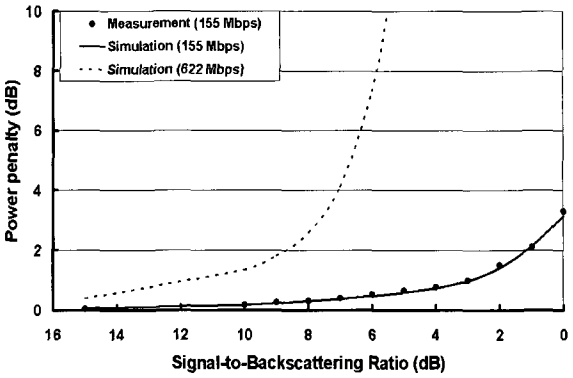
장거리 전송시 C-밴드 BLS의 주입 파워 감소 효과를 살펴보기 위하여 BLS 파워의 함수로서 시스템 링크 budget을 측정하였다. 측정된 결과는 그림 6과 같다. 시스템 링크 budget은 파장 잠김된 F-P LD의



[그림 5] BLS 위치 조정한 장거리 전송 DWDM-PON 구조



[그림 6] 측정된 시스템 링크 Budget



[그림 7] SBR에 따른 10^{-10} BER에서의 파워 페널티

출력파워와 10^{-10} BER에서의 수신기 민감도 사이의 차이이다. C-band BLS가 RN에 위치할 경우에 시스템 링크 budget을 30dB이상 얻기 위해서는 BLS 출력 파워가 5dBm이면 충분하다. 하지만 C-band BLS가 OLT에 위치할 경우 18dBm이상의 출력 파워가 필요함을 알 수 있다. 이는 C-band BLS가 60km 광섬유 손실(13dB loss)을 겪기 때문이다. C-밴드 BLS 위치를 RN에 위치함으로써 기존 방식보다 저출력 BLS를 사용할 수 있어 비용을 절감할 수 있고 기술적으로 쉽게 구현 할 수 있다. 또한, ONT의 F-P LD에 주입되는 BLS 파워는 OLT와 RN 사이의 광섬유의 길이가 변하여도 항상 일정하게 유지된다.

Rayleigh 역산란은 광신호를 양방향으로 전송할 때, 신호의 품질을 저하하는 주요한 원인으로 광섬유를 통과하는 광신호의 일부분이 전송 방향의 반대 방향으로 산란되면서 발생한다. 기존에 제안된 장거리 전송 DWDM-PON에서는 상향신호와 Rayleigh 역산란된 C-밴드 BLS 사이에 비트 잡음이 발생한다. 상향신호 대 Rayleigh 역산란 된 BLS 파워비(SBR : Signal-to-Backscattering Ratio)에 따른 10^{-10} BER에서의 파워 페널티는 그림 7과 같다.

비트 잡음은 수신기 대역폭이 클수록 증가하므로 622Mb/s일 때의 파워 페널티가 155Mb/s일 때보다 훨씬 크다. 일반적인 광전송에 사용되는 수십 km이상의 단일모드 광섬유의 경우, Rayleigh 역산란에 의한 등가반사계수가 -32dB이므로 C-밴드 BLS의 주입파워가 0dBm일 때, Rayleigh 역산란된 BLS 파워는 -32dBm이다. 60km 전송시 상향신호는 -25dBm의 파워를 가지므로 SBR은 7dB이다. 전송거리가 늘어남에 따라 상향신호의 파워는 감소되지만 Rayleigh 역산란된 파워는 포화되므로 SBR은 감소되고 그에 따른 파워 페널티가 증가하게 된다. 결과적으로 전송거리가 늘어남에 따라 시스템 성능이 저하된다. 또한 80km이상의 장거리 전송시(SBR < 5.5dB)에는 155 Mb/s이상의 전송속도를 보장할 수 없다.

즉, OLT에 두 종류의 BLS를 같이 사용했을 때, ONT의 F-P LD에 주입되는 BLS파워의 감소에 의해 전송거리가 제한되고 Rayleigh 역산란 효과에 의해 성능이 감소되는 것을 극복하기 위해 OLT에 하향채널을 위한 L-밴드 BLS를 사용하고 RN에 상향채널을 위한 C-밴드 BLS를 사용하였다.

서로 다른 파장의 광신호들을 다중화 및 역다중화하고 BLS의 스펙트럼을 분할하기 위해서 AWG를 OLT와 RN에 사용하였다. OLT에 사용된 AWG의 채널 간격과 3-dB 대역폭은 각각 50GHz와 25GHz이고 RN에 사용된 AWG의 채널 간격과 3-dB 대역폭은 각각 50GHz와 40GHz이다.

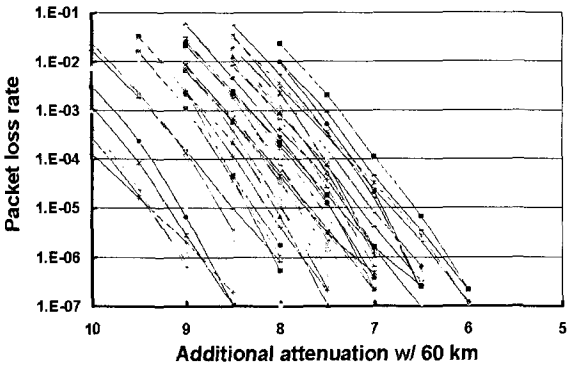
OLT와 ONT에 놓이는 각각의 광송수신기는 C/L 밴드 분리 파장분할 다중화기(C/L WDM : C/L Wavelength Division Multiplexer/Demultiplexer), F-P LD, 수신기, 그리고 미디어 컨버터(M/C : Media Converter)로 구성되어 있다. C/L WDM은 서로 다른 밴드를 사용하는 상하향 신호들의 밴드를 분리하기 위해서 사용되고, 미디어 컨버터는 Ethernet패킷을 전송하기 위한 100Base-Tx 신호와 100Base-Rx

신호간의 전광(E/O) 및 광전(O/E)변환하는 역할을 한다. OLT와 ONT 송수신기 사이의 링크 손실은 2개의 AWG 삽입 손실 11dB와 나머지 소자들의 삽입 손실 4dB, 그리고 60km 단일 모드 광섬유의 손실 약 13dB를 포함해서 약 28dB 정도이다. 여기서, 광송수신기를 구성하는 F-P LD, 수신기, 그리고 C/L WDM은 작은 부피의 양방향 모듈(BiDi module)로 패키징하거나 단일 플렛폼에 혼성 집적(Hybrid Integration) 할 수 있다.

파장 잠김된 F-P LD의 출력 파워를 증가시키기 위해서 TEC(Thermo Electric Cooler)를 사용해 F-P LD의 발진 모드 중심 파장을 주입되는 스펙트럼 분할된 BLS의 파장 근처로 제어하였고, 전면이 비반사 코팅되어 반사율이 0.1%인 F-P LD를 사용함으로써 BLS의 주입 효율을 높였다.

상향 채널의 경우, C-밴드 BLS에서 나온 광대역 광원은 RN에 위치한 AWG2에서 스펙트럼 분할된다. 스펙트럼 분할된 광원은 각 가입자들에 놓이는 F-P LD에 주입된다. 주입되는 스펙트럼 분할된 BLS의 중심 파장에서 가장 가까운 F-P LD의 발진 모드가 파장 잠김되기 때문에, 각 가입자들의 상향 신호 파장은 주입되는 스펙트럼 분할된 BLS의 파장에 의해서 결정된다. 각각의 파장 잠김된 F-P LD는 상향 100Base 이더넷 패킷으로 직접 변조 된다. 이러한 상향 신호들은 AWG2에서 다중화되고, 광섬유를 지나 CO에 위치한 AWG1에서 역다중화된 후, 각 가입자에 대응하는 OLT의 광송수신기에서 수신된다. 이와 유사하게 하향 채널의 경우는 L-밴드 BLS가 AWG1에서 스펙트럼 분할되어 OLT에 위치한 각각의 F-P LD에 주입된다. 주입된 BLS에 파장 잠김된 L-밴드 하향 신호들은 AWG1에서 다중화되어 ONT로 전송된다.

구현된 장거리 전송 DWDM-PON의 성능을 확인하기 위해서 상하향 신호로써 Anritsu의 데이터 품질 분석기(MD1230A, Data Quality Analyzer)를 이용해서 100Base 이더넷 패킷을 전송하였다. 다양한 상황을 고려하기 위해서 4개의 64바이트, 1개의 512바이트, 1개의 1024바이트, 4개의 1518바이트의 패킷들을 반복적으로 전송하였다. 모든 상하향 128채널들은 이들 패킷을 사용해서 직접 변조 되었다. 패킷 손실



[그림 8] 측정된 상향채널의 패킷 손실률

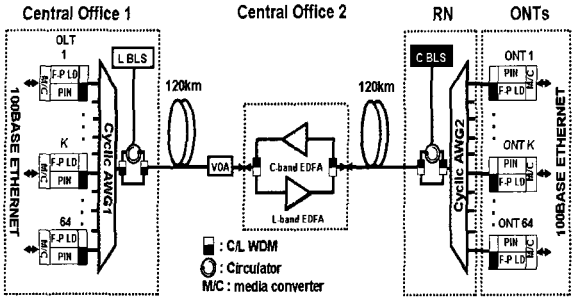
률(PLR : Packet Loss Rate)을 측정한 결과 모든 채널에서 하루 이상 패킷 손실 없는 전송을 확인하였다. 링크 손실에 따른 PLR를 측정하기 위해서 그림 5에서처럼 광섬유와 RN 사이에 가변 광 감쇄기(VOA : Variable Optical Attenuator)를 삽입하였으며 측정한 패킷 손실률의 결과는 그림 8과 같다.

그림 8에서 보는 바와 같이 모든 상향 채널에서 60 km 광섬유에 더해 약 6dB의 감쇄까지는 10^{-6} 이하의 PLR를 얻을 수 있었다. 여기서 10^{-6} PLR은 10^{-10} BER에 해당한다[19]. 이러한 결과를 바탕으로 VOA 대신에 20km의 광섬유를 삽입하여 다시 시스템의 성능을 측정하였다. 총 광섬유의 길이는 80km가 되고 모든 채널에서 10^{-6} 이하의 PLR를 얻을 수 있었다.

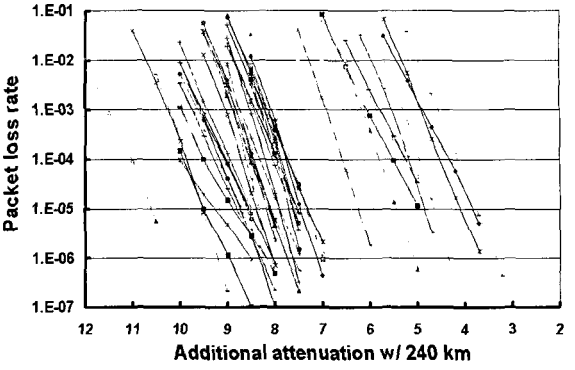
상향 채널을 위한 BLS의 위치를 RN로 조정한 장거리 전송 DWDM-PON을 필드에 설치할 경우에는 RN에 전력을 공급할 필요가 생긴다. 하지만, 장거리 전송을 구현함으로써 기존의 PON에서 바이패스(Bypass)되는 CO가 많이 생기게 되고, 이러한 CO들 중에서 가입자단에 가장 가까이 위치했던 CO를 전력 공급이 가능한 RN로 사용하면 전력 공급 문제를 쉽게 해결할 수 있다. 군 적용의 경우, RN는 기존에 설치된 각 제대의 통신실에 위치시킴으로써 전력 공급 및 장소 문제를 쉽게 해결할 수 있다.

나. 광 증폭기를 지닌 장거리 전송 DWDM-PON

앞 절에서 제안한 파장 잠긴된 F-P LD를 이용한 장거리 전송 DWDM-PON에 양방향 어븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA : Erbium-Doped Fiber Amplifier)



[그림 9] 광 증폭기를 사용한 장거리 전송 DWDM-PON 구조



[그림 10] 측정된 상향채널의 패킷 손실률

를 추가한 장거리 전송 DWDM-PON의 실험 구성도는 그림 9와 같다.

실험구성도는 3.1절의 장거리 전송 DWDM-PON과 동일하며 양방향 EDFA가 추가되었다. 양방향 EDFA는 상향신호를 위한 C-band EDFA, 하향신호를 위한 L-band EDFA, 2개의 C/L WDM으로 구성된다. C-밴드 EDFA 및 L-밴드 EDFA는 증폭 효율을 높이기 위해 2단으로 구성하였다. 상향 신호와 하향 신호를 증폭하기 위한 펌핑 광원으로 980nm의 LD를 사용하였으며 EDFA의 첫째 단은 전방 펌핑(Forward pumping), 둘째 단은 양방향 펌핑(Bidirectional pumping)으로 구성하였으며, 펌핑 파워로는 각각 120mW, 350mW, 120mW를 주입하였다. 구현된 C-밴드 EDFA의 이득과 잡음 지수는 38~45dB와 4.1~4.9dB이였으며, L-밴드 EDFA의 경우 35~39dB의 이득과 4.3~4.7dB의 잡음 지수를 보였다. OLT와 ONT 송수신기 사이의 링크 손실은 2개의 AWG 삽입 손실 11dB와 나머지 소자들의 삽입 손실 5dB, 그리고 240km 단일모드 광섬유의 손실 약 52dB를 포함해서 약 68dB 정도이다.

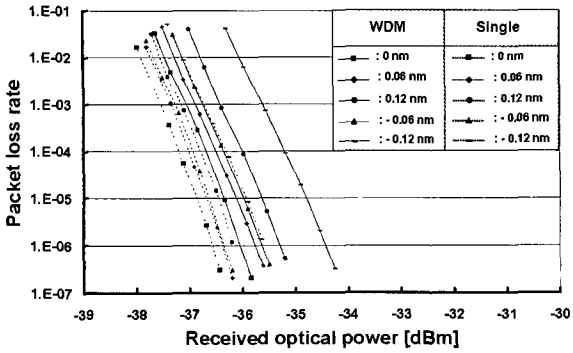
링크 손실에 따른 PLR를 측정하기 위해서 그림 9에서처럼 120km 광섬유와 양방향 EDFA 사이에 가변 광 감쇄기를 삽입하였다. 측정한 패킷 손실률의 결과는 그림 10과 같다.

그림 10에서 보는 바와 같이 모든 상향 채널에서 240km 광섬유에 더해 약 3dB의 감쇄까지는 10^{-6} 이하의 PLR를 얻을 수 있었다. 총 광섬유의 길이는 240km되고 시스템 파워 마진은 3dB이며 모든 채널에서 10^{-6} 이하의 PLR를 얻을 수 있었다.

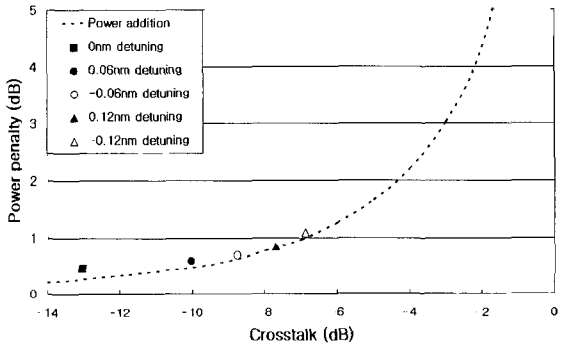
파장 잠김된 F-P LD는 AWG에서 다중화 될 때 필터링을 거치기 때문에, 이의 최대 선폭(Linewidth)은 AWG의 3-dB 대역폭과 같은 0.32nm가 된다. 이때, 단일 모드 광섬유를 사용하는 DWDM-PON 시스템의 전송 속도와 전송 거리의 곱(BL product)은 46Gb/s · km가 된다. 실험에서 100Base 이더넷 패킷을 전송할 경우(전송 속도 : 125Mb/s)에는 $L < 367$ km가 되어, 구현된 시스템에서 색분산에 의한 페널티는 무시할 수 있다.

일반적인 AWG는 온도에 따라 파장이 변하는 특성을 지니고 있다. 특히 AWG2는 원격노드에 위치하므로 온도변화에 따른 시스템 성능변화를 주의 깊게 살펴보아야 한다. AWG1과 AWG2 사이의 파장불일치(Detuning)의 효과를 알아보기 위하여 AWG2의 온도를 변화시키면서 PLR을 측정하였다. Detuning은 $\lambda_{AWG2} - \lambda_{AWG1}$로 정의되며 λ_{AWG2}는 AWG2의 채널별로 할당된 포트의 통과 파장이고 λ_{AWG1}은 AWG1의 채널 별로 할당된 포트의 통과 파장이다. Detuning의 범위는 -0.12nm에서 0.12nm까지 이며 Detuning 값에 따른 상향채널의 PLR은 그림 11과 같다.

64채널 WDM전송에 따른 누화(Crosstalk)효과를 알아보기 위하여 단일 채널 전송과 64채널 WDM 전송의 PLR을 측정하였다. 그림 11에서와 같이 64채널 WDM전송(0nm detuning)에 기인한 누화에 따른 파워 페널티는 10^{-6} PLR에서 약 0.5dB임을 알 수 있다. 한 채널에 입력되는 누화 파워를 Detuning에 따라 측정하고 누화에 따른 파워 페널티를 그림 12에 나타내었다. 파워 페널티는 ±0.12nm AWG Detuning



[그림 11] Detuning에 따른 측정된 패킷 손실률



[그림 12] 누화에 따른 파워 페널티

범위에서 1.2dB 이하이다. 즉, 구현된 장거리 전송 DWDM-PON에서는 ±0.12nm정도의 AWG 파장변화는 시스템 성능에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

그림 12에서의 점선은 무작위의 2진 누화 파워가 신호 파워에 첨가되면서 나타나는 파워 페널티의 이론적인 값을 도시화한 것이다[20]. 도형들은 그림 11에서 AWG Detuning에 따른 누화로 인한 측정된 파워 페널티로 이론적 예상치에 근접함을 알 수 있다.

Athermal AWG는 온도변화에도 항상 일정한 파장을 유지시켜주는 기능을 가진 AWG이다. 50GHz 채널 간격을 가진 80채널의 Athermal AWG는 2005년에 Furukawa Electric 회사에서 개발하였다[21]. 개발된 Athermal AWG의 중심 파장 변화는 -5℃에서 70℃ 온도 범위에서 ±0.015nm 이하이다. 따라서 구현된 시스템의 AWG2가 원격노드에 위치하더라도 실험에서 사용한 일반적인 AWG가 아닌 Athermal AWG를 사용한다면 온도변화에 따른 시스템 성능 저하는 일어나지 않을 것이다.

양방향 EDFA를 필드에 설치할 경우에는 CO_2에 전력을 공급할 필요가 생긴다. 하지만, 장거리 전송을 구현함으로써 기존의 PON에서 바이패스(Bypass)되는 CO가 많이 생기게 되고, 이러한 CO들 중에서 가입자단에 가장 가까이 위치했던 CO에 양방향 EDFA를 위치시키면 전력 공급 문제를 쉽게 해결할 수 있다. 군 적용의 경우, 양방향 EDFA는 기존에 설치된 각 제대의 통신실에 위치시킴으로써 전력 공급 및 장소 문제를 쉽게 해결할 수 있다.

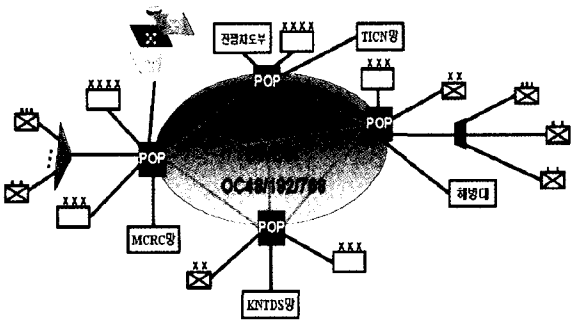
파장 잠김된 F-P LD를 사용하는 장거리 전송 DWDM-PON의 전송 용량은 BLS의 대역폭에 의해 제한된다. 32nm 정도의 대역폭을 가지는 EDFA 기반의 BLS를 사용할 경우, 50GHz의 채널 간격으로 최대 80명의 가입자까지 수용이 가능하다. 이는 한 방향으로 총 10Gb/s(125Mb/s × 80)의 용량을 제공한다. 여기서, SLD와 같이 EDFA 보다 더 넓은 대역폭을 가지는 BLS를 사용하면 가입자 수를 100명 이상으로 확장할 수 있어서 장거리 전송 DWDM-PON의 전송 용량을 개선할 수 있다[22,23].

본 논문에서는 파장 잠김된 F-P LD의 출력 파워를 높이기 위해서 TEC를 사용해서 파장을 제어하였다. 하지만 WDM-PON에 있어서 경제성과 플러그 앤 플레이(Plug and Play)를 위해서는 파장 무의존성을 지닌 ONT(Color-free ONT)의 구현이 중요하다. 이것은 ONT설치단계에서, ONT의 출력파워를 측정함으로써 ONT파장을 자동적으로 주입파장에 맞추는 학습과정(learning process)을 통해 구현 가능하다. 이때, 발진파장은 TEC로 유지시켜준다. 학습과정 이외에 color-free ONT를 구현하는 몇 가지 방법이 있다. 먼저, F-P LD의 발진 모드 간격을 채널 간격(여기서는 0.4nm) 보다 줄임으로써, 주입되는 BLS의 대역폭 내에 언제나 하나 이상의 F-P LD 발진 모드가 놓이게 함으로써 가능하다. 그리고 본 연구실에서 제안된 상호 주입된 F-P LD를 BLS로 사용함으로써 color-free ONT의 구현이 가능하다[24]. 마지막으로, F-P LD 대신에 발진 모드 특성을 갖지 않는 반도체 광 증폭기(RSOA : Reflective Optical Amplifier)를 사용함으로써 color-free 특성을 얻을 수 있을 것이다.

4. 차세대 국방 유선통신체계

차세대 국방 백본망은 long-haul DWDM을 활용하여 Mesh형태로 구성한다. DWDM 기반의 백본 네트워크는 신규 장비 도입으로 최초 투자비용은 많이 들지만 네트워크 구축 후 회선을 무한대로 증가시켜도 추가적인 요금이 들지 않고, 급변하는 대역폭 요구를 수용할 수 있어 차기 국방망 백본 구조로 적합하다. 백본교환기와 거리가 20km 미만의 가입자망은 DWDM-PON[17]을 사용하고 80km 미만의 가입자망은 구현된 장거리 전송 DWDM-PON을 사용하여 백본망의 에지스위치에 바로 연결한다. 80km 이상의 가입자망은 구현된 광 증폭기(Optical amplifier)를 사용한 장거리 전송 DWDM-PON을 활용하며, 이때 광 증폭기는 백본교환기와 가입부대의 중간에 있는 부대나 백본교환기에 설치하여 운용한다. 그림 13은 차세대 국방 유선통신체계를 도시화한 것으로 장거리 전송 DWDM-PON을 이용해서 메트로망과 가입자망을 통합시킴으로써 네트워크를 단순화하여 경제적이고, 신호가 거쳐야 하는 홉의 수를 줄임으로써 QoS가 보장되는 광통신망을 구현할 수 있다.

국방개혁 2020(안)에 따르면 2020년 부대구조의 목표는 중간계층 단축 및 부대 수 축소로 완전성을 보장하는 것이다[25]. 육군의 경우 군사령부, 군단, 사단의 수가 축소됨에 따라 작전지역은 넓어지고 부대 간 이격거리도 증가될 것이다. 이에 따라 국방정보통신망의 백본망에서 가입부대의 이격거리가 증가 될 것이며 장거리 전송 파장분할 다중방식 수동형 광가입자망의 중요성도 증대될 것이다.



[그림 13] 차세대 국방 유선통신체계 구축방안

5. 맺음말

본 논문에서는 차세대 전략통신망 중 유선통신체계를 통합할 수 있는 기술적 대안으로 장거리 전송 파장분할 다중방식 수동형 광네트워크를 제안하고 경제적인 파장 잠김된 F-P LD를 광원으로 사용하는 장거리 전송 64채널 WDM-PON을 구현하였으며 구현된 시스템의 군 적용방안에 대하여 살펴보았다. 장거리 전송 DWDM-PON을 이용해서 메트로망과 가입자망을 통합시킴으로써 네트워크를 단순화하여 경제적이고 QoS가 보장되는 광통신망을 구현할 수 있었다.

차세대 국방 유선통신체계로 가입자당 보장 대역폭이 100Mb/s이상이고 프로토콜의 투명성, 완벽한 QoS, 높은 보안성을 보장하며 다양한 서비스를 수용할 수 있는 유연성 및 높은 망 확장성을 가지고 있는 장거리 전송 DWDM-PON이 최적의 구현방법일 것이다. 아울러 DWDM-PON을 구축하는 경우, 인프라에 해당하는 광섬유 및 원격노드의 수명이 20년 이상이므로 인프라의 교체 및 재투자 등으로 인한 경제적 손실을 최소화 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 한국전략문제연구소, "미래전 양상연구", 2004.
[2] 정보통신부, "Broadband IT Korea 건설을 위한 BcN구축 기본계획", 2004.
[3] Jack L. Burbank et al., "COTS Communications Technologies for DoD Applications : Challenges and Limitation", The John Hopkins University Applied Physics Laboratory, 2003.
[4] 김한관, "BcN 기반의 국방정보통신망 구축방안", 석사학위논문, 국방대학교, 2004.
[5] 김영호, "국방정보통신망 종합발전계획(v.1.1)", 한국국방연구원, 2001.
[6] 윤선중, "국방메가센터 구축에 따른 국방망 구조 개선 방안 연구", 석사학위논문, 국방대학교, 2002.
[7] Soo-Jin Park et al., "Fiber-to-the-Home Services Based on Wavelength-Division-

Multiplexing Passive Optical Network", *IEEE J. Lightwave Technol.,* Vol. 22, No. 11, pp. 2582~2591, 2004.

[8] Hiromichi Shinohara, "Broadband Access in Japan : Rapidly Growing FTTH Market", *IEEE Communications Magazine,* Vol. 43, No. 9, pp.72~78, 2005.

[9] 이창희, "WDM-PON기술", *한국통신학회지,* Vol. 22, No. 6, pp.44~56, 2005.

[10] ITU-T Recommendation G984.2, "Gigabit-capable passive optical networks(GPON) : Physical media dependent(PMD) layer specification", 2003.

[11] D. B. Payne et al., "The future of fibre access systems?", *BT Technology Journal,* Vol. 20, No. 4, pp.104~114, 2002.

[12] Koji Akimoto et al., "Super-Dense WDM Transmission of Spectrum-Sliced Incoherent Light for Wide-Area Access Network", *IEEE J. Lightwave Technol.,* Vol. 21, No. 11, pp. 2715~2722, 2003.

[13] Derek Nesset et al., "Demonstration of 100 km Reach Amplified PONs with Upstream Bit-rates of 2.5Gb/s and 10Gb/s", ECOC2004, paperWe2.6.3, 2004.

[14] Giuseppe Talli and Paul D. Townsend, "Feasibility Demonstration of 100km Reach DWDM SuperPON with Upstream Bit Rates of 2.5Gb/s and 10Gb/s", OFC2005, paperOFI1, 2005.

[15] Hyun Deok Kim et al., "A low-Cost WDM Source with an ASE Injected Fabry-Perot Semiconductor Laser", *IEEE PTL.,* Vol. 12, No. 8, pp.1067~1069, 2000.

[16] D. J. Shin et al., "Transmission of HDTV and Ethernet data over a WDM-PON employing ASE-injected Fabry-Perot laser diodes", OFC2004, paperWO3, 2004.

[17] Sang-Mook Lee et al., "Dense WDM-PON Based on Wavelength-Locked Fabry-Perot Laser Diodes", *IEEE PTL.,* Vol. 17, No. 7, pp.1579~1581, 2005.

[18] Sang-Mook Lee et al., "Consolidation of a Metro Network into an Access Network based on Long-reach DWDM-PON", OFC2006, 2006.

[19] D. Penninckx et al., "Forward-Error Correction for time-slotted optical packets", OFC2002, paperWO5, 2002.

[20] E. L. Goldstein et al., "Performance Implications of Component Crosstalk in Transparent Lightwave Networks", *IEEE PTL.,* Vol. 6, No. 5, pp.657~660, 1994.

[21] Junichi Hasegawa et al., "Low Loss 50GHz-80ch Athermal AWG Module", OECC2005, paper7E3-3, 2005.

[22] Z. Y. Zhang et al., "High-Performance Quantum-Dot Superluminescent Diodes", *IEEE Photon. Technol. Lett.,* Vol. 16, No. 1, pp.27~29, 2004.

[23] D. Heo et al., "Polarization-independent, high-power, and angle-flared superluminescent diode for WDM-PON applications", LEOS2005, pp.611~612, 2005.

[24] Ki-Man Choi et al., "Broad-band Light Source Using Mutually Injected Fabry-Perot Laser Diodes for WDM-PON", *IEEE PTL.,* Vol. 17, No. 12, pp.2529~2531, 2005.

[25] 국방부, "21세기 선진 정예 국방을 위한 국방개혁 2020(안)", 2005.