파장분할다중방식 광통신망의 모니터링 방식에 관한 기술 동향

Trend of Monitoring Methods of Wavelength Division Multiplexed Optical Networks

이우람(W.R. Lee)	WPON기술팀 연구원
조승현(S.H. Cho)	WPON기술팀 연구원
김봉규(B.K. Kim)	WPON기술팀 선임연구원
박재동(J.D. Park)	WPON기술팀 선임연구원
김병휘(B.H. Kim)	WPON기술팀 책임연구원, 팀장

파장분할 다중방식 광통신망(WDM -PON) 운영의 신뢰성을 높이기 위해 각 광 채널의 파장과 파워, 그리고 광섬유로 이어진 링크(link)의 절단상태 등을 모니터링(monitoring)하는 것은 필수적이다. 본 원고에서는 이러한 목적을 효율적이고 경제적으로 달성하기 위해 제시되고 검증되었던 방법들을 pilot tone을 이용한 방법, AWG, FBG, tunable filter 등의 파장 선택성 소자를 이용한 방법, electrical processing을 이용한 방법 등의 세 가지로 나누어 소개한다.

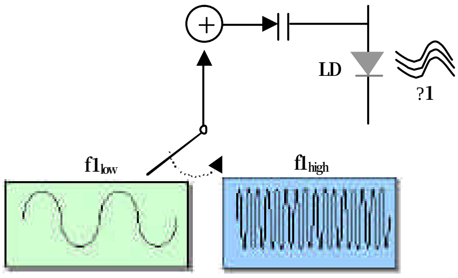
I. 서 론

오늘날 데이터 서비스와 대용량 멀티미디어 서비스 등에 대한 요구가 급증하면서 중앙기지국에서 가입자까지 광섬유로 직접 연결하는 광가입자망에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 광가입자망 중에서 경제적인 측면과 망의 유지보수의 용이함을 고려하여 중앙기지국에서 가입자까지 이르는 연결 경로에 급전이 필요 없는 수동형 광소자를 사용하는 방식을 수동형 광가입자망(Passive Optical Network: PON)이라 한다. 특히 가입자마다 하나의 파장을 할당하여 중앙기지국과의 통신이 이루어지는 파장분할 다중방식 수동형 광가입자망(Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network: WDM-PON)은 많은 장점을 가지고 있어 최근 한국과 일본의 이에 대한 관심은 더욱 증가하고 있다.

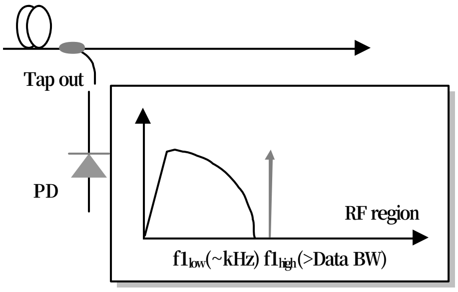
이러한 WDM-PON의 신뢰성 있는 운영을 위해 aging이나 온도변화에 의존하는 광원의 파장 및 파워, 주변온도에 의해 영향을 받는 MUX와 DMUX의 통과대역과 광원과의 파장정렬, 전송선로의 광섬유 절단상황에 대한 감시 등이 반드시 이루어져야 한다. 또한 가입자망에 적용되어야 하므로 경제적인 구현이 가능해야 한다는 제약을 가지고 있다. 본 고에서는 WDM-PON에 적용하기 위한 기존의 파장분할 다중방식의 광통신망을 위해 제안되었던 모니터링 방식을 pilot tone을 이용한 방법, FBG(Fiber Bragg Grating)와 AWG(Arrayed Waveguide Grating), tunable filter와 같은 파장 선택성 소자를 이용한 방법, electrical processing을 이용한 방법으로 나누어 소개한다.

II. Pilot Tone을 이용한 방법

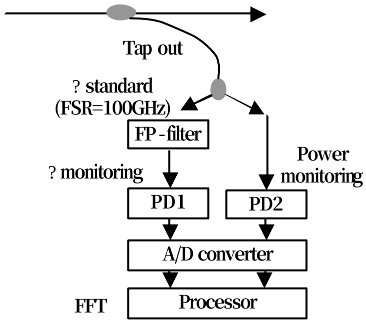
Pilot tone 방법은 (그림 1)에서 보여주는 것처럼 데이터의 대역폭보다 아주 낮거나(수 kHz) 훨씬 높은 주파수(수 GHz)를 가지는 정현파(pilot tone)를 데이터와 더하여 광원을 변조한 후 각 채널의 파워를 이러한 pilot tone을 통해 손쉽게 모니터링 하는



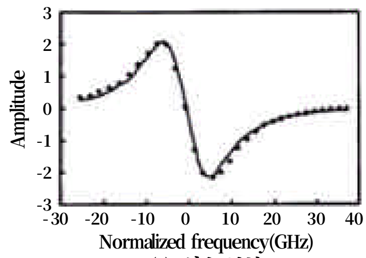
(그림 1) Pilot Tone을 이용한 광파워 모니터링 방법의 실험 구성도



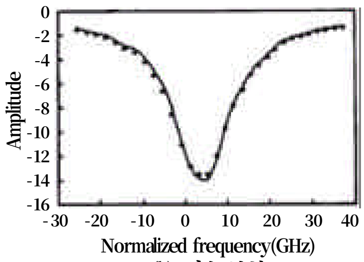
(그림 2) RF Domain의 Pilot Tone 관찰 결과



(그림 3) Pilot Tone을 이용한 광파워 및 광파장까지 모니터링 방법의 실험 구성도



(a) 실수 부분



(b) 허수 부분

(그림 4) 광신호에 포함된 Pilot Tone을 Etalon Filter를 통과시킨 후 FFT를 수행한 결과

방식을 말한다[1],[2]. 파장이 다른 광채널들을 각각 주파수가 다른 pilot tone들로 변조시키면 여러 파장이 다중화된 광채널들도 PD로 입력된 이후에 각 채널의 모니터링이 가능하다. 즉, 각각의 광채널에 섞인 pilot tone들도 실제 광신호와 마찬가지의 경로와 그 손실을 겪게 된다. 그러므로, 채널 별로 각각의 파워를 역다중화하고 채널 수대로 모니터링 PD를 사용하는 번거롭고 복잡한 과정 대신 (그림 2)와 같이 RF 도메인에서 pilot tone의 파워를 통해 손쉽게 실제 광채널들의 파워를 모니터링 할 수 있다[3].

또한 pilot tone을 이용하여 광채널의 파워뿐만 아니라 파장까지 모니터링 하는 방법도 제안되었다[4]. (그림 3)은 이러한 방법을 보다 자세히 설명하는 그림이다. 전송선로에서 모니터링을 위해 약간의 광파워를 tap-out하고 tap-out한 파워를 커플러로 나누어 한 쪽은 파장 모니터링을 위해, 다른 한 쪽은 파워 모니터링을 위해 사용한다. 파장 모니터링의 경우 파장 값의 기준을 정하기 위하여 FSR(Free Spectral Range)이 광 채널 간격과 일치하는 페브리-페롯 에탈론 필터(Fabry-Perot etalon filter)를 사용한다. 두 개의 PD에 입력된 신호는 A/D 컨버전되어 (그림 4)와 같이 Fast Fourier Transform (FFT)를 수행하게 된다. 파워는 앞에서 기술된 방법대로 측정하고 파장 측정을 위해서는 etalon filter를 통과한 후 FFT를 수행한 결과를 (1)과 같이 실수 부분과 허수 부분의 합으로 나누어 표현한다.

일단 측정된 허수 부분의 크기를 측정하면 (그림

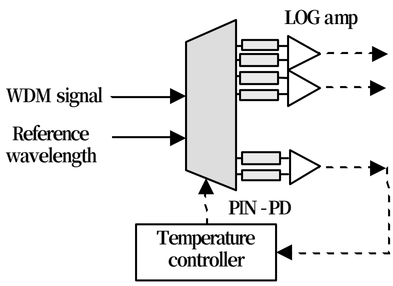
$$S(w)=\sum_{n}\frac{DPn}{4p}\left[\left\{-\frac{Dv_{n}}{M_{n}}sin(f_{n})T'(v_{n})+j\left(\frac{Dv_{n}}{M_{n}}cos(f_{n})T'(v_{n})-T(v_{n})\right)\right\}d(w-w_{n})\right] \quad (1)$$

4(b))와 같이 etalon filter의 peak와 채널의 파장의 차이를 알 수 있다. 이때 해가 두 개가 나올 수 있는데, 이는 (그림 4(a))의 실수 부분 값의 부호를 보고 한 개의 해를 최종적으로 도출할 수 있다. 이러한 방법으로 100GHz 채널 간격으로 16개의 광채널을 모니터링 했을 때 파워는 적정한 범위 내에서 ±0.5dB, 파장은 ±3GHz 이하의 정확성을 가진다.

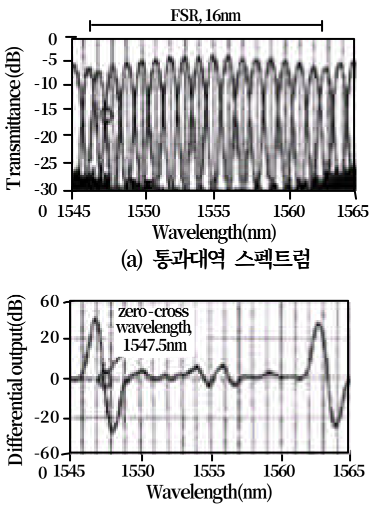
Ⅲ. FBG, AWG, Tunable Filter를 이용한 방법

1. AWG를 이용한 방법

(그림 5)는 한 채널의 파장을 감시하기 위해 두 개의 AWG 포트를 사용하는 방법이다[5],[6]. 두 개의 AWG 포트에서 출력된 각각의 광파워의 비율



(그림 5) 한 채널의 파장을 감시하기 위해 두 개의 AWG 포트를 사용하는 방법의 실험 구성도



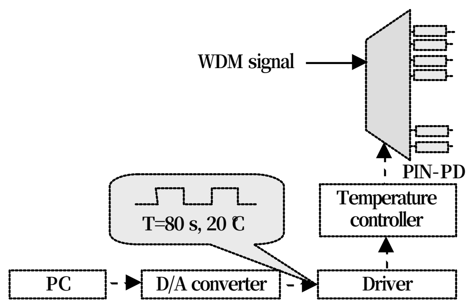
(a) 통과대역 스펙트럼

(b) Log amp의 출력

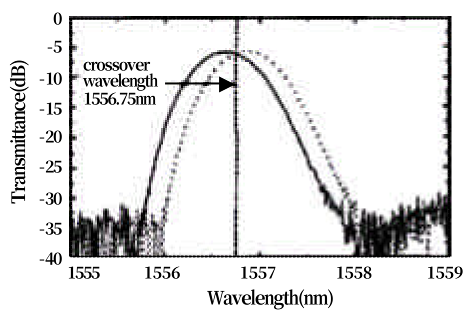
(그림 6) 두 개의 AWG 포트를 사용한 파장 측정 실험결과

을 log Amp로 입력했을 경우의 출력 결과를 (그림 6(b))에서 보여준다. Log Amp의 출력은 이웃한 두 개의 AWG 통과대역 곡선의 교차점을 중심으로 선형적인 영역을 가지는데, 이러한 선형적인 영역은 1nm 채널간격의 AWG의 경우 ±0.5nm 정도이다. 이러한 선형적인 영역을 이용해서 파장을 모니터링 할 수 있다. 이때, 채널간격에 비해 AWG의 통과대역이 클수록 선형적인 영역이 늘어나 dynamic range가 넓어져 측정범위가 넓어진다[6].

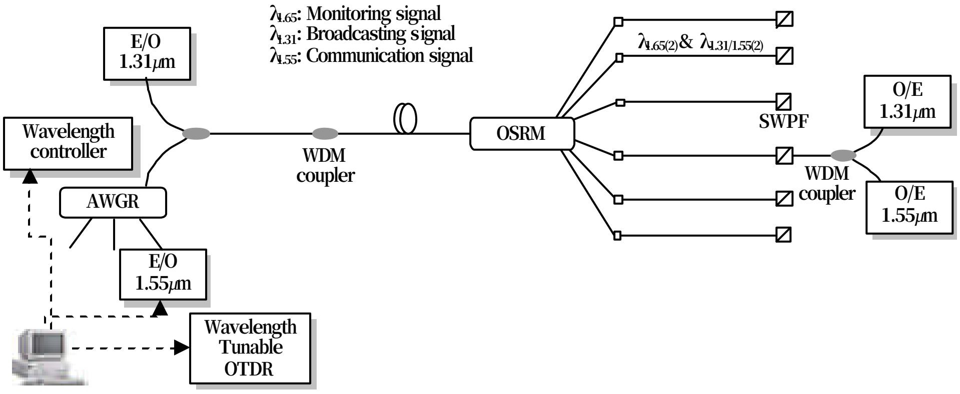
(그림 7)은 앞에서 기술했던 방법과 같이 두 개의 AWG 포트를 사용하는 것이 아니라 AWG 온도를 20℃의 크기로 주기적인 변화를 주어서 발생하는 통과대역의 파장변화를 이용하는 방법을 설명하고 있다[7]. 온도 변화로 AWG 포트의 통과대역이 (그림 8)처럼 파장 이동이 이루어지게 되고 교차점이 발생하게 된다. 이 방법은 앞에서 서술되었던 방법에 비해 AWG의 한 포트만 사용해도 되고 교차점에서의 손실이 크지 않아 비교적 정확한 측정을 할 수 있다.



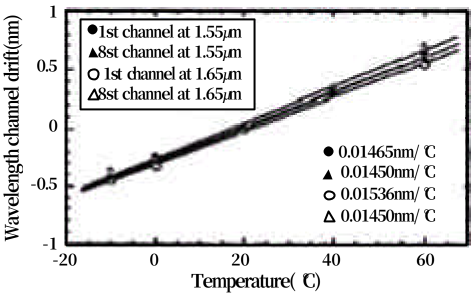
(그림 7) AWG 온도를 20 ℃의 크기로 주기적인 변화를 주어서 발생하는 통과대역의 파장변화를 이용하는 방법의 실험 구성도



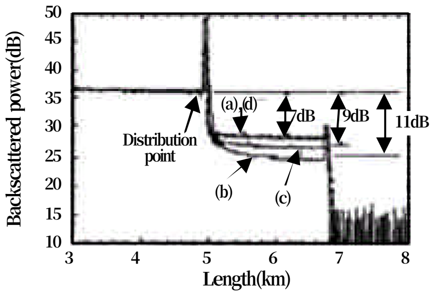
(그림 8) 온도에 따른 통과대역 이동과 교차점



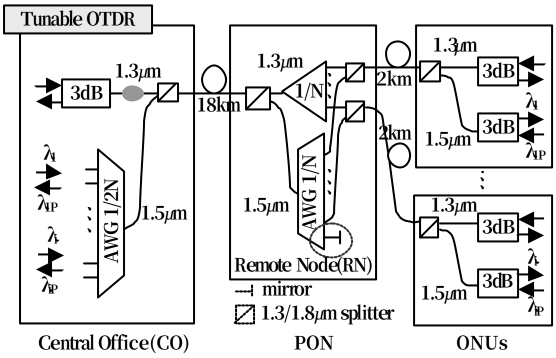
(그림 9) OTDR을 이용한 광링크 감시 시스템 구성도



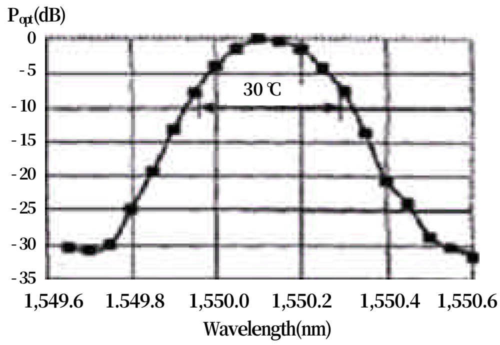
(그림 10) 온도와 채널의 파장이동 관계



(그림 11) OTDR의 출력: (a) 25도 1.6481㎛, (b) 40도 1.6481㎛, (c) 40도 1.6482㎛, (d) 40도 1.6484㎛

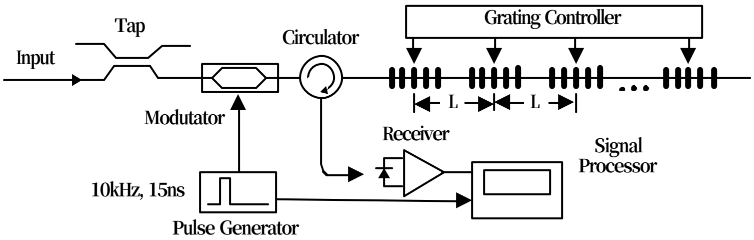


(그림 12) Tunable OTDR을 사용한 광채널의 감시 시스템의 또다른 구성도

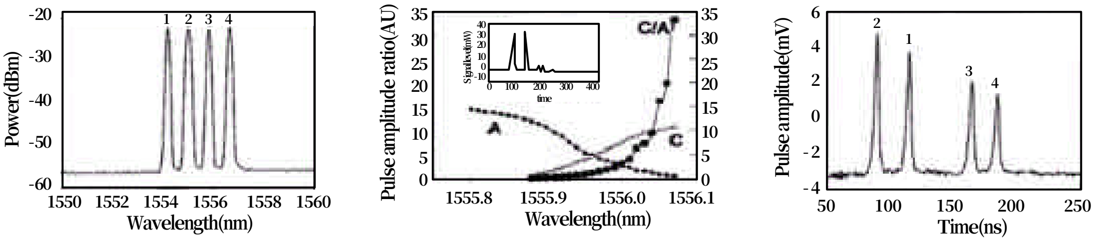


(그림 13) AWG의 통과대역 이동측정을 위한 결과

(그림 9)는 광원의 파장을 변화시킬 수 있는 Tunable Optical Time Domain Reflectometer(OTDR)를 이용하여 AWG와 LD의 통과대역의 파장 불일치 및 광섬유 절단 상태를 감시하는 방법을 제안한 구조이다[8]. 이 구조의 특징은 OSRM이라는 1.3㎛ 대역에서는 스플리터로 작용하고 1.5㎛ 대역에서는 AWG로 작용하는 소자를 사용한 점이다. 즉 1.3㎛ 대역의 파장은 방송용으로 사용이 되고, 1.5㎛ 대역의 파장은 가입자와의 통신을 위해 사용된다. 여기에서 네트워크의 운영에 영향을 주지 않고 모니터링을 하기 위해 데이터 대역파장보다 AWG의 FSR 만큼 먼 1.6㎛ 대역에서 OTDR의 파장을 바꿔가며 각 채널을 감시한다. (그림 10)은 온도의 변화에 대해 1.5㎛ 대역과 1.6㎛ 대역에서의 온도에 대한 파



(그림 14) Grating을 사용한 모니터링 방법의 구조도



(a) 채널의 광스펙트럼　(b) 파장 모니터링　(c) 파워 모니터링

(그림 15) 모니터링을 하려는 채널과 그에 따른 파장 모니터링을 한 결과와 파워 모니터링을 한 결과

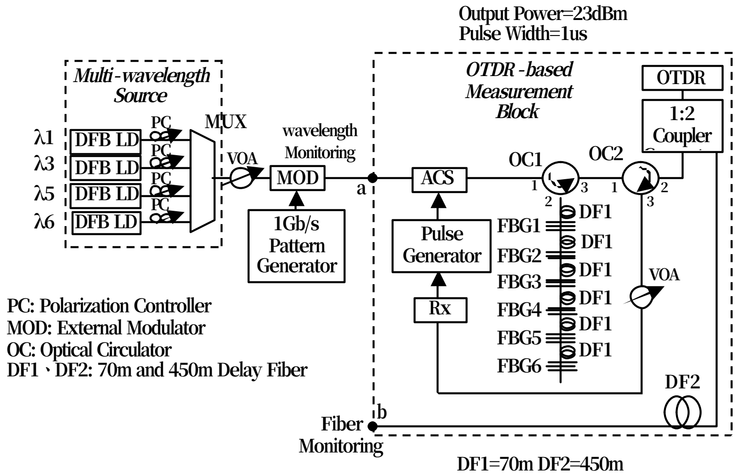
장 이동 상수가 일치한다는 것을 보여줌으로써 사용하는 채널 대신 FSR 만큼 떨어진 파장의 통과대역을 체크했을 때에도 원래 채널의 통과 대역의 파장 이동을 정확히 측정할 수 있다는 것을 보여준다. 그리고, (그림 11)은 OTDR을 통해 AWG 포트의 통과대역과 광원의 파장 불일치 및 광섬유의 이상에 따른 손실을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

(그림 12)는 앞의 방법과 마찬가지로 tunable OTDR을 사용해 채널을 감시하는 구조이다[9]. 다만 이미 설치가 되어 있던 시분할 방식 수동형 광가입자망(Time Division Multiplexed Passive Optical Network: TDM-PON)에서 WDM 커플러와 AWG를 추가함으로써 WDM-PON의 오버레이 구조로 통신 용량의 확장이 이루어진 시스템에서 모니터링을 고려한 구조이다. 이 구조도 앞서 설명한 구조와 같이 tunable OTDR을 사용한다. 다만 AWG에 null port를 두고 reflector를 설치하여 반사되어 나오는 파워를 측정한다. 이러한 방법으로 AWG 포트의 통과대역의 파장이동에 대한 감시가 가능하고, 그에 따라 OLT의 광원의 파장을 제어할 수 있다. (그림 13)은 tunable OTDR을 사용했을 때 null port에서 반사되어 나오는 파워를 측정한 그래프이다. 이러한 결과를 바탕으로 AWG의 통과대역의 파장 이동 정도를 판단할 수 있다.

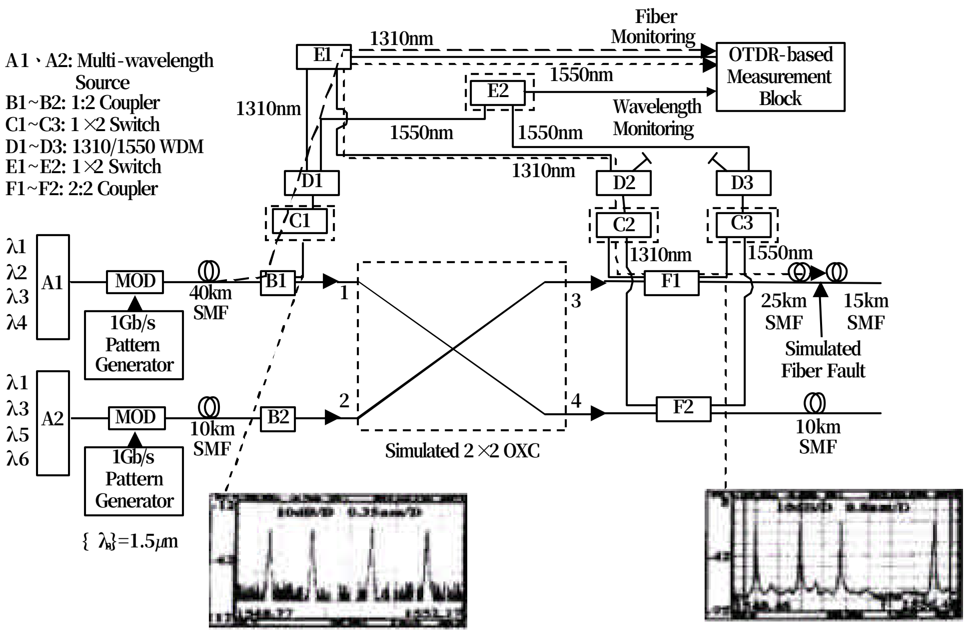
2. FBG를 이용한 방법

(그림 14)는 연달아 이어진 여러 개의 FBG를 사용하여 모니터링을 하는 방법이다[10]. 연결된 FBG의 사이사이에 delay 라인을 둔다면 가장 앞에 위치한 FBG의 중심파장에 일치하는 채널부터 차례로 시간차이를 두고 반사되어 circulator를 통해 시그널 프로세스로 입력된다. 이러한 방법으로 채널별 파워를 시간차를 두고 알 수 있다. 이때 동기는 모듈레이터와 pulse generator를 이용해 정해진 시간 동안 펄스를 발생시켜 맞출 수 있다. 이 경우 사용한 FBG의 통과대역의 크기에 따라 파장 모니터링의 resolution이 달라질 수 있다. 광 채널 전체를 포함할 수 있는 넓은 파장 대역폭을 가지는 FBG를 사용했다면 채널 파워 모니터링에 적합하다. 하지만 대역폭이 좁은 FBG를 사용하거나 두 개의 겹쳐진 FBG를 사용한다면 파장 모니터링을 가능할 만큼 정교한 resolution을 가질 수 있다.

(그림 15)는 모니터링을 하려는 채널과 그에 따른 파장 모니터링을 한 결과와 파워 모니터링을 한



(a) WDM 시스템에서 파장, 파워 모니터링과 함께 광섬유 절단까지지도 감시할 수 있는 모니터링 시스템



(b) OXC에 적용한 예

(그림 16) 모니터링 시스템 구성도와 실험 방법

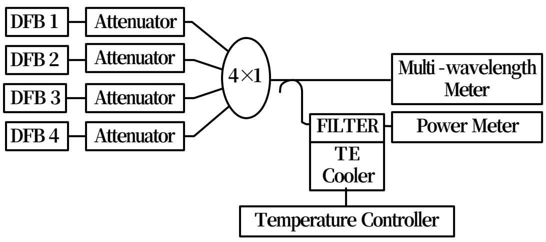
결과를 보여준다. 파장 모니터링은 교차점을 가지는 두 개의 FBG를 사용한 것으로 앞에서 설명하였던 AWG를 이용한 측정법과 동일하다. 그리고 파워 모니터링에서는 여러 개의 FBG를 지나게 될 때 발생하는 손실은 보정한 후 모니터링 해야 한다.

(그림 16)은 파장과 파워 모니터링과 함께 광섬유 절단 상태까지도 감시가 가능한 구조이다[11]. 적용된 예(그림 16(b))를 볼 때 하나의 모듈로 OXC 앞 단과 출력 단에서의 광섬유 절단 상태와 파장을 감시할 수 있다.

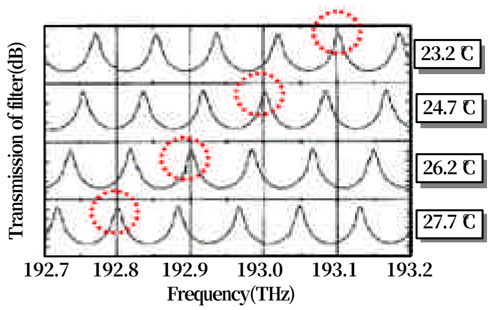
3. Tunable Etalon Filter를 이용한 방법

앞에서 제시되었던 방법들은 채널파워를 모니터링 하기 위해 pilot tone을 이용하거나, 파장을 감시하기 위해 AWG의 교차점을 측정하는 등 복잡한

과정을 겪어야 했다. 하지만 여기에서 제시된 방법은, 파워와 파장 모니터링에 있어서 (그림 17)과 같이 온도를 가변하여 통과대역을 조정할 수 있는 tunable etalon filter만 필요하다[12]. 파워 모니터링을 하기 위해 (그림 18)과 같이 온도를 변화시켜 가면서 각 채널 별로 파워가 최대가 되는 점을 파악한다. 필터의 FSR이 80GHz이기 때문에 채널간격이 100GHz인 채널은 단 하나만이 필터의 최대점에 일치하게 된다. 이때 각각의 채널에 대해 파워를 측정해 보면 <표 1>을 얻을 수 있다. 즉 채널 수 만큼 각각의 채널에 최적화된 온도로 변화시켜 가며 출력된 파워를 측정하면 원래의 채널 파워를 모니터링 하는 것이 가능하다. 그리고 원래 온도와 최적화된 온도와의 차와 etalon filter의 온도에 따른 파장 이동 상수를 알고 있다면 $f=(T_{if}-T_{i0})C_f+f_0$와 같은 간단한 식에서 채널의 파장도 구할 수 있다.



(그림 17) Tunable Etalon Filter를 이용하여 광채널 감시를 수행하는 실험 구성도



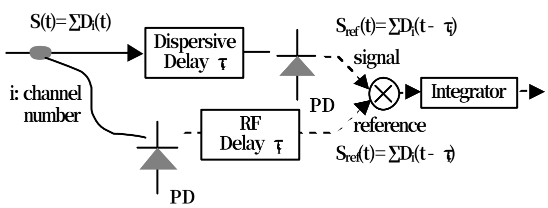
(그림 18) 온도에 따른 에탈론 필터의 투과특성

실험 결과 광파워는 -25dBm 이하에서 1dB 이내의 오차범위를 가지고, 주파수의 경우에는 ±1GHz 이내의 오차범위로 정확한 모니터링을 할 수 있다.

IV. Electrical Processing을 이용한 방법

(그림 19)는 tap-out한 광파워를 두 개의 arm으로 나누어 한 쪽에서는 optical dispersive delay medium을 이용하여 각 광채널 별로 각각 다른 delay를 주고, 다른 쪽에서는 PD로 수신한 이후에 전기적으로 delay를 준다. Electrical delay를 sweep 해 가면서 두 개의 arm을 통과한 신호를 믹싱하여 integration 해주면 (그림 20)과 같은 결과를 얻을 수 있다[13].

각 광채널은 채널마다 다양한 파장을 가지므로 그 파장에 따라 optical dispersive delay medium에서 겪는 delay는 달라지게 된다. 그리고 전기적으로 변화시켜 주는 delay가 각 채널이 optical dispersive medium에서 겪은 delay와 일치할 때 (그림 20)과 같이 펄스의 형태로 일시적인 큰 출력을 보이게 되는 것이다. 이러한 결과를 바탕으로 광채널의 역다중화 과정을 거치지 않고, 시간 별로 각 채



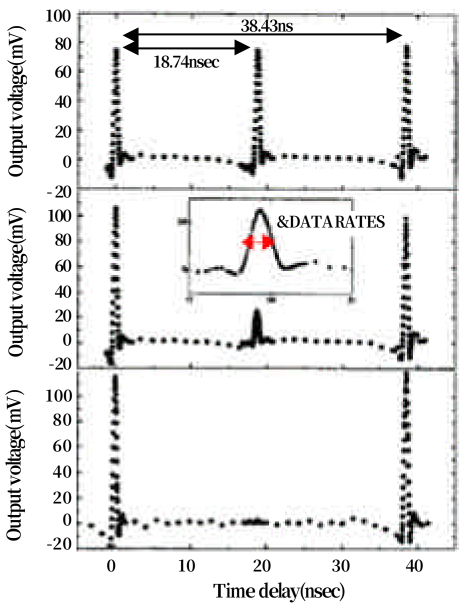
(그림 19) Electrical Processing을 이용한 방법의 실험 구성도

<표 1> Tunable Etalon Filter를 이용한 광채널 파워 실험 결과

	Channel number, *j*		1	2	3	4
	Frequency(THz)		193.1	193.0	192.9	192.8
Temperature T_l(℃)	1	27.0	0.23121	0.00324	0.00149	0.00218
	2	28.4	0.00321	0.23605	0.00333	0.00159
	3	29.8	0.00152	0.00307	0.22542	0.00371
	4	31.2	0.00217	0.00148	0.00301	0.22131

널의 광파워를 감시할 수 있다. 이 때 scope에 보이는 펄스의 폭은 데이터 전송속도에 비례한다.

(그림 21)은 파장에 따라 손실의 크기가 달라지는 WDA(Wavelength Dependent Attenuator)를 여러 개 사용하여 각각의 출력을 PD로 입력 받은 후 Blind Signal Separation(BSS) 방법을 이용하여, 각각의 채널의 파워를 추정하는 방법이다[14],[15].



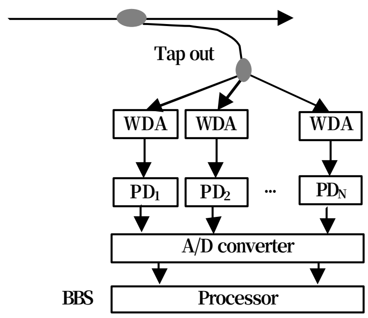
(그림 20) 채널 별 파워 모니터링 결과(맨 윗 그림에서 아래 그림으로 갈수록 두번째 채널의 변조 크기를 줄임)

다중화된 광신호는 WDA를 통과하면서 채널마다 다른 손실을 겪게 되고, N개의 WDA가 있다면 각각의 WDA마다 다양한 광출력 값을 얻을 수 있게 된다. WDA가 채널 수 만큼 있고 각 WDA의 파장 별 손실과 WDA를 통과한 후의 광출력 값을 알고 있다면 각 채널의 파워를 역추정하는 것은 연립방정식을 해결하면 쉽게 가능하다.

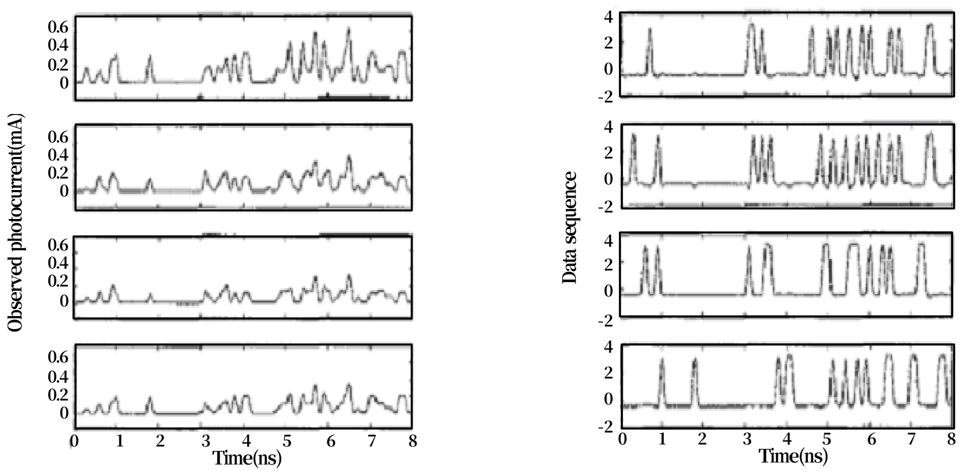
(그림 22(a))는 각각의 WDA를 통과한 후의 시그널을 보여주는 것이고, (그림 22(b))는 BSS 방법을 이용하여 4개의 채널을 분리한 결과이다.

V. 요약 및 결론

본 고에서는 파장분할 다중방식 광전송망의 안정



(그림 21) WDA와 BSS를 이용한 방법 광파워 모니터링 방법의 실험 구성도



(a) WDA를 통과한 후의 출력 결과

(b) BBS를 통해 채널별 분리가 이루어진 결과

(그림 22) BSS를 통해 채널별 분리가 이루어진 결과

적인 운영을 위해 각 광채널의 파장과 파워 그리고 광섬유의 절단상태 등을 모니터링 하는 여러 가지 방식들을 pilot tone을 이용한 방법, FBG와 AWG, tunable filter와 같은 파장 선택성 소자를 이용한 방법, electrical processing을 이용한 방법으로 나누어 살펴보았다. Pilot tone을 이용한 방법은 여러 채널의 파워를 한 번에 모니터링 할 수 있다는 장점이 있으나, 파장을 모니터링 하기에는 복잡한 과정을 거쳐야 한다는 단점이 있다. 그리고, 파장 선택성 소자를 이용한 방법은 파장과 파워를 비교적 정확하게 모니터링 할 수 있는 장점이 있지만, 많은 광소자를 사용하여 경제적으로 부담이 된다는 단점이 있다. 마지막으로 electrical processing을 이용한 방법은 광소자를 최소한으로 사용하고 전기소자를 사용하므로 경제성을 고려하고 소형화가 가능하다는 장점이 있으나, 파장을 추정하기는 힘들다는 단점이 있다. 세 가지의 방법 모두 각각의 장점과 단점이 있으므로, 목적으로 하는 WDM-PON 시스템에 맞게 선택하여 적용하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] G.R. Hill, "A Transport Network Layer Based on Optical Network Elements," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.11, No.5, 1993, pp.667-679.

[2] R. Gaudino, "WDM Channel Equalization Based on Subcarrier Signal Monitoring," OFC, 1998.

[3] Y.C. Chung, "Optical Monitoring Techniques for WDM Networks," OFC, 2000.

[4] K.J. Park, "A Simple Monitoring Technique for WDM Networks," OFC, 1998.

[5] M. Teshima, "Multiwavelength Simultaneous Monitoring Circuit Employing Wavelength Cross Over Properties of Arrayed-waveguide Grating," *Electron. Lett.*, Vol.31, No.18, 1995, pp.1595-1597.

[6] M. Teshima, "Analytical Estimation of Measurement Error Performance of Multiwavelength Simultaneous Monitoring," *Electron. Lett.*, Vol.33, No.19, 1997, pp1645-1647.

[7] S.Y. Kim, "WDM Channel Wavelength Monitoring by Periodically Modulating the AWG Temperature," OFC, 2002.

[8] Kuniaki Tanaka, "In-service Individual Line Monitoring and a Method for Compensating for the Temperature-dependent Channel Drift of a WDM-PON Containing an AWGR Using a 1.6um Tunable OTDR," ECOC, 1997.

[9] U. Hilbk, "High-Capacity Upgrade of a PON by Means of Wavelength-Routers and WDM Techniques," ECOC, 1997.

[10] C. Randy Giles, "Concatenated Fiber Grating Optical Monitor," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.10, No. 10, 1998, pp.1452-1454.

[11] C.C. Lee, "Simultaneous Optical Monitoring and Fiber Supervising for WDM Networks Using an OTDR Combined with Concatenated Fiber Gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.13, No.9, 2001, pp.1026-1028.

[12] S.K. Shin, "A Novel Frequency and Power Monitoring Method for WDM Network," OFC, 1998.

[13] L.E. Nelson, "Optical Monitoring Using Data Correlation for WDM Systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.10, No.7, 1998, pp.709-711.

[14] E. Tangdiongga, "WDM Monitoring Technique Using Adaptive Blind Signal Separation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.13, No.3, 1998, pp.248-250.

[15] Yumang Feng, "WDM Monitoring Through Blind Signal Separation," OFC, 2002.