

## 압전 소자형 광섬유 격자 소자를 이용한 파장 분할 다중화 시스템용 파장 가변형 광 분기/결합 장치

김세윤 · 이상배 · 최상삼  
한국과학기술연구원 광기술연구센터

정 준\* · 정지채\*\*

\*한국통신 광통신기초연구팀, \*\*고려대학교 전파공학과

(1997년 4월 28일 받음)

기존의 광섬유 격자 소자를 이용한 광 분기/결합 장치들이 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당하는 신호만을 선택할 수 있었던 단점을 극복하기 위해 압전 소자에 광섬유 격자 소자를 부착한 압전 소자형 광섬유 격자 소자를 제작하고, 이러한 압전 소자형 광섬유 격자 소자와 편광 선속분할기를 이용하여 파장 분할 다중화 시스템용 파장 가변형 광 분기/결합 장치를 제안하고 실험하였다. 본 장치는 두 빛의 편광 상태를 이용하여 광섬유 격자 소자에 해당하는 파장의 신호를 분기/결합하는 장치로서 외부의 온도 변화에 크게 영향을 받지 않는 안정적인 특성을 보였다. 압전 소자에 전압을 인가함으로써 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당되는 신호(1549.3 nm)뿐만 아니라 가변된 파장(1550.1 nm)의 신호도 분기/결합할 수 있었다. 파장을 가변하지 않을 경우와 파장을 가변했을 경우 모두 광섬유 격자 소자에 의해 분기된 신호와 인접 채널 신호간의 차이 -26 dB 이하였으며 분기된 신호 중 광섬유 격자 소자를 통해 나오는 누설 신호는 -34 dB 였다.

### I. 서 론

시분할 다중화(time division multiplexing, TDM) 전송방식은 전자회로를 기반으로 한 소자의 한계로 인해 수십 Gbps 이상의 전송용량을 확보하는 데 어려움을 겪고 있다. 파장분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 전송방식은 광신호의 파장특성을 이용하여 광섬유의 넓은 파장 영역을 여러 채널로 다중화하여 여러 파장대의 신호를 동시에 전송함으로써 광정보의 전송용량을 증가시키는 방식이다. 이러한 파장분할 다중화 기술은 전송용량의 확장이 용이하고 네트워크 구성에 있어 많은 다양성을 제공하기 때문에 초대용량 국간 전송망이나 가입자용 광통신 시스템 등의 향후 전송 기술의 핵심 기술로 자리잡게 될 전망이다. 이러한 파장분할 다중화 기술은 시분할 다중화 기술에 비해 파장이 다른 신호를 수동소자로써 분기하거나 결합함에 있어서 비교적 용이하다는 장점을 지니고 있다. 광 분기/결합 장치(optical add/drop multiplexer, OADM)는 파장분할 다중화 시스템의 송신단과 수신단 사이의 임의의 지점에서 연속된 신호들의 각 채널을 추가하거나 삭제할 수 있는 기능 소자로서 파장분할 다중화 시스템의 핵심 기술중 하나이다. 현재 전세계적으로 광통신용 소자나 광섬유 센서등으로 활발히 연구되고 있는 광섬유 격자 소자(fiber Bragg grating)는 매우 작은 삽입 손실과 파장 선택도가 높아 광필터로서 매우 좋은 특성을 지니고 있다.<sup>[1-5]</sup> 그러나 광섬유 격자 소자는 기본적으로 대역 반사 필터(band-rejection filter)이기 때문에 광섬유 격자 소자를 대역 통과 필터(band-pass filter)인 광 분기/결합 장치로 바로 사용하기는 어렵다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 한 가지 방법은 Mach-Zehnder 간섭계의 두 팔에 동일한 광섬유 격자 소자를 삽입하여 입력 단자(input port)로 들어간 채널들이 간섭계의 두 팔로 나누어져 들어가다가 채널들 중에서 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당되는 채널만이 반사되어 입력 단자쪽으로는 상쇄간섭을 일으키고 분기 단자(drop port)쪽으로는 보강간섭을 일으켜 분기단쪽에서만 신호가 빠져나오는 원리를 이용하는 것이다.<sup>[6]</sup> Mach-Zehnder 간섭계형 광 분기/결합 장치는 이론적으로 매우 명확하고 간단하나 구현함에 있어서 간섭계 두 팔의 경로차를 일치시켜야 하는데 경로차를 일치시키기 위해서는 자외선 빛을 광섬유에 쏘아 굴절률을 변화시킴으로써 경로차를 조정하는 UV-trimming이라는 특수한 기술을 사용해야 한다. 이밖에 다른 방법으로는 써큘레이터(circulator)의 양단에 광섬유 격자 소자를 연결하는 방법<sup>[7]</sup>, 동일한 광섬유 격자 소자들을 연마하여 결합시키는 결합기(coupler)형<sup>[8]</sup>이 있다. 그러나 이런 방법들은 고가의 소자들을 사용해야 하거나 제작이 매우 어렵고 성능이 떨어지는 등의 문제점들을 지니고 있다.

최근에 우리는 앞에서 기술한 문제점들을 해결할 수 있는 편광 선속분할기(polarization beam splitter)와 광섬유 격자 소자를 이용한 광 분기/결합 장치를 제안한 바 있다.<sup>[9]</sup> 이 방법은 빛의 편광상태를 이용하여 분기, 결합하므로 경로차를 일치시킬 필요가 없고, 써큘레이터에 비해 저가인 편광 선속분할기를 이용하며, 제작이 간단하면서도 좋은 성능을 보이는 장점을 지니고 있다. 그러나 광섬유 격자 소자를 이용한 모든 광 분기/결합 장치는 분기/결합할 수 있는 신호가 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 의해 정해지므로 하나(한쌍)의 광섬유

격자 소자는 고정된 한 채널만을 분기,결합할 수 있다는 단점을 지니고 있다.

이 논문에서는 광섬유 격자 소자가 가해진 인장(strain)에 의해 브래그 파장이 변화하는 성질을 이용하여 파장 가변형 광 분기/결합 장치를 제안하고 실험하였다. 앞서 제안한 편광 선속분할기를 이용한 방법에서 광섬유 격자 소자에 압전소자(piezoelectric actuator)를 부착하여 전압을 가하여 광섬유 격자 소자의 브래그 파장을 변화시켜 분기/결합하려는 채널을 가변시킬 수 있도록 하였다. 따라서 광섬유 격자 소자의 브래그 파장의외에 인접한 채널까지도 분기 결합할 수 있어 채널 간격이 0.8 nm(100 GHz)인 고밀도 파장분할 다중화(dense wavelength division multiplexed, DWDM) 시스템에서 매우 유용한 소자로서 사용될 수 있을 것이다.

II. 이론 및 동작원리

1. 광섬유 격자 소자의 특성

광섬유 격자 소자는 광섬유의 코어에 자외선영역의 엑시머 레이저(KrF 또는 ArF excimer laser)를 이용하여 주기적인 굴절률 변화를 영구적으로 새김으로써 광섬유가 식 (1)과 같이 굴절률 변화의 주기에 의해서 결정되는 파장의 빛( $\lambda_b$ )에 대하여 반사특성을 보이는 소자이다.<sup>[10]</sup>

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

윗 식에서  $n_{eff}$  은 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)이고  $\Lambda$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 따라서 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 스트레인 등의 외부 물리량을 가할 경우 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다.<sup>[11]</sup>

$$\Delta\lambda_B = \lambda_b [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\Delta\epsilon] = K_T\Delta T + K_\epsilon\Delta\epsilon \tag{2}$$

여기에서

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right)[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \tag{3}$$

이며, 식 (2)에서  $\alpha$ 는 광섬유의 온도에 따른 팽창계수(thermal expansion coefficient)이고,  $\xi$ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. 또한  $p_e$ 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)이고  $p_{11}$ 과  $p_{12}$ 는 스트레인 광학 텐서(strain-optic tensor)의 성분이며  $n$ 은 코어의 굴절률,  $\nu$ 는 Poisson's ratio이다. 광섬유 격자의 온도 및 인장의 변화( $\Delta T$ ,  $\Delta\epsilon$ )에 대한 브래그 파장의 변화는 대체로 선형적이며 온도 변화에 따른 파장 변화는 약 0.01 nm/°C로서 상온에서 사용하는 경우에는 온도에 따른 파장의 변화는 무시할만 하다. 따라서 선형적으로 인장을 가함으로써 브래그 파장을 우리가 원하는 대로 가변할 수 있다.

최근에 발표된 편광 선속분할기와 광섬유 격자 소자를 이

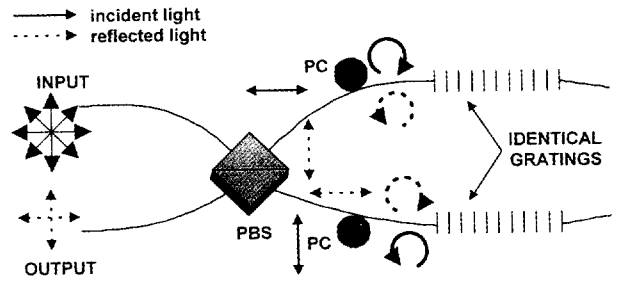


그림 1. 편광 선속분할기를 사용한 전광 분기 결합장치의 동작 원리

용한 광 분기/결합 장치는 이미 WDM 전송 시스템에 부착하여 성능을 평가한 바 있다. 여기서는 자세한 언급은 피하고 간단하게 동작원리만 살펴보도록 하겠다.

그림 1은 임의의 편광상태를 지니고 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당하는 빛이 입력 단자(input port)로 들어 경우의 소자의 동작원리를 보여주고 있다. 입력 단자(input port)로 입사된 빛은 편광 선속분할기를 통과하면서 각각 수직인 선형편광된 상태로 갈라진다. 두 팔로 갈라진 신호들은  $\lambda/4$  편광조절기(polarization controller)를 통과하면서 원편광된 상태로 변화한다. 편광조절기를 지난 빛이 진행하다가 광섬유 격자 소자에서의 반사되고, 반사된 빛의 원편광의 방향이 반대가 되어 다시 편광조절기를 통과하게 된다. 그러므로 반사 후에 신호는 원래 입력 신호의 수직 방향으로 선편광된 상태를 가지게 되고 따라서 빛은 출력 단자(output port)로 출력되게 된다.

따라서 앞에서 설명한 원리를 이용한 필터를 대칭적으로 구성하면 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당되는 빛을 분기하거나 결합시킬 수 있다.

III. 실험 및 결과

압전 소자형 광섬유 격자 소자와 편광 선속분할기를 이용한 광 분기/결합 장치의 구성을 그림 2에 나타내었다. 실험에 사용한 광섬유 격자 소자는 본 실험실에서 제작한 Ge 농도가 18 mol[%], 클래딩(cladding)의 지름이 135  $\mu$ m인 광섬유에 KrF 엑시머 레이저(450 mJ/pulse, 반복주기 20 Hz)와 위상 마스크<sup>[12]</sup>를 사용하여 제작되었다. 브래그 파장과 반사율에서

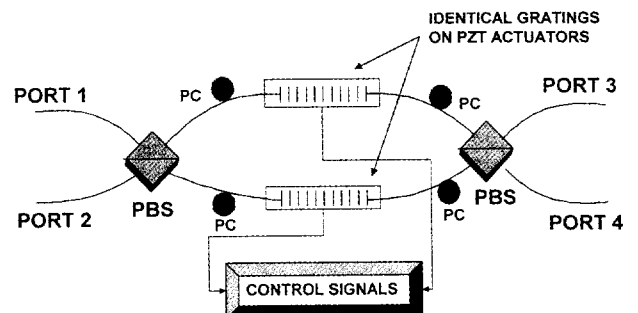


그림 2. 압전 소자형 광섬유 격자 소자와 편광 선속분할기를 이용한 광 분기/결합 장치 실험 구성도

동일한 특성을 보이는 두 개의 광섬유 격자 소자를 사용하였다. 사용된 광섬유 격자 소자는 대역폭(bandwidth)이 0.4 nm, 광 반사율이 1549.3 nm에서 99% 이었다. 편광 선속분할기는 bulk 형태에 입력 단자쪽은 단일모드 광섬유(single mode fiber)와 출력 단자쪽으로는 편광 유지 광섬유(polarization maintaining fiber)로 pig-tail된 것을 사용하였다. 본 실험에서는 편광 선속분할기로부터 갈라져 나온 두 팔에 편광조절기(polarization controller)를 부착하여  $\lambda/4$  판(plate)으로 작동하게 하였는데, 이를 위하여 광폭 스펙트럼(broadband spectrum)의 LED 광원을 입력단자로 입사한 뒤 분기 단자쪽으로 나오는 반사 스펙트럼을 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer)로 통해 관측하면서 편광조절기를 조정하여 최대의 출력이 관측되도록하여  $\lambda/4$  판(plate)을 구성하였다.

브래그 파장을 조정하기 위해 광섬유 격자 소자에 인장을 가하는 방법으로 압전소자를 이용하였다. 길이가 18 mm인 압전 소자위에 광섬유 격자 소자의 격자 부분을 인장이 가해졌을 때 미끄러짐이 없도록 고정시키고, 전압을 인가하면서 광섬유 격자 소자의 브래그 파장의 이동을 관찰하였다. 전압이 가해지면 압전 소자가 늘어나면서 광섬유 격자 소자에 인장을 가하여 브래그 파장은 장파장쪽으로 이동하게 된다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 인가된 전압과 브래그 파장 변화는 기울기가 12.3pm/V 이고 매우 선형적인 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 실험적으로 관찰한 결과, 압전 소자형 광섬유 격자

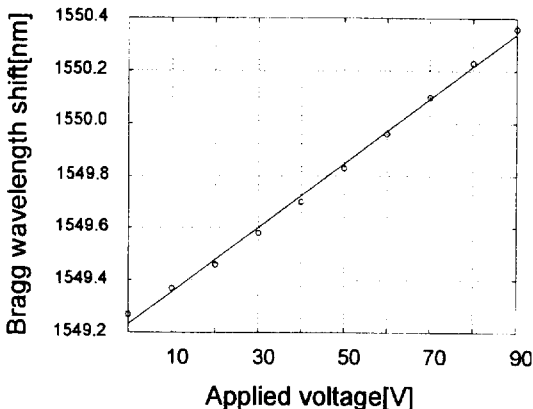


그림 3. 압전 소자에 전압이 인가되었을 때 브래그 파장의 응답 특성

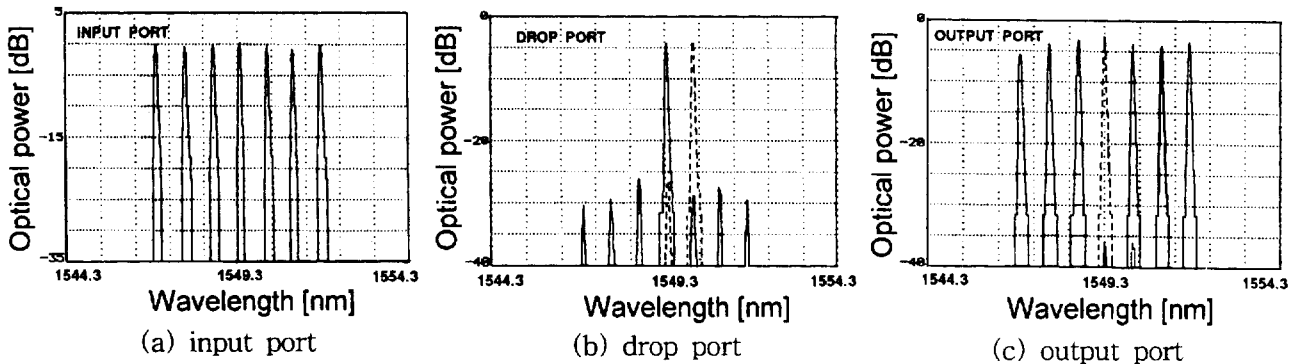


그림 5. 광 분기/결합 장치의 각 단자에서의 스펙트럼 (광섬유 격자 소자의 파장 가변전(1549.3 nm)-실선, 파장 가변후(1550.1 nm)-점선)

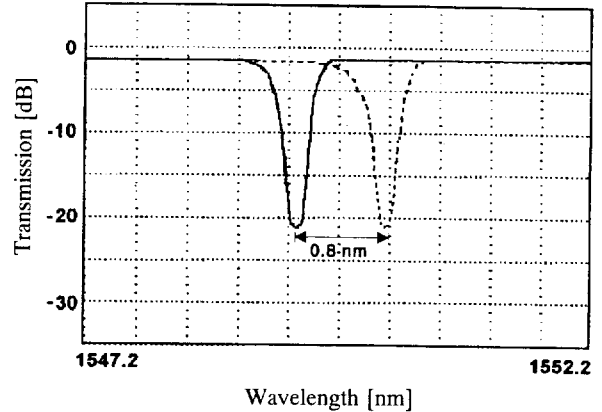


그림 4. 광 분기/결합 장치에 사용된 광섬유 격자 소자의 투과 스펙트럼(실선)과 압전 소자에 67.5 V를 인가하였을 때의 파장 가변된 광섬유 격자 소자의 투과 스펙트럼(점선)

소자는 전압을 인가하기 전의 브래그 파장과 100 V를 압전 소자에 인가한 후 0 V로 돌아왔을 때의 브래그 파장의 차이가 0.015 nm 이하였다. 광섬유 격자 소자는 90%의 반사율을 갖는 대역폭이 0.2 nm이기 때문에 압전 소자를 사용할 때 문제가 되는 이력 현상(hysteresis)에서 오는 영향은 무시할 수 있다.

본 장치는 그림 4와 같이 67.5 V가 인가되었을 때 광섬유 격자 소자의 브래그 파장이 0.8 nm만큼 변화하기 때문에 고밀도 파장 분할 다중화 시스템에서 사용되었을 때 원래 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 인접한 채널까지도 선택적으로 분기/결합할 수 있는 파장 가변형 광 분기/결합 장치로서 사용될 수 있다.

그림 5는 본 장치의 각 단자에서의 스펙트럼들을 나타내고 있다. 입력 광신호는 그림 5 (a)와 같이 파장 가변 레이저 (Santec TSL-900)를 사용하여 1546.9 nm에서 1551.7 nm까지 채널 간격이 0.8 nm(100 GHz)인 7 채널을 사용하였고 각 단자에서의 스펙트럼들은 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, 분해능 0.1 nm)를 이용하여 측정하였다. 그림 5 (b)는 단자 2(drop port)에서의 스펙트럼으로 7 채널의 광 신호중에서 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당하는 채널 4(1549.3 nm)와 채널 5(1550.1 nm)가 가변적으로 분기되는 것을 나타낸 것이다. 실선은 광섬유 격자 소자의 브래그 파장이 1549.3 nm일 때이고, 점선은 압전 소자에 67.5 V를 인가하여 광섬유 격자 소자의 브래그 파장을 1550.1 nm로 만들었을 때

이다. 각각의 경우 분기된 채널과 0.8 nm 떨어진 인접 채널의 반사된 신호들과 차이는 -26 dB 이하로 동일한 특성을 나타내었다. 편광 선속분할기를 통해 입사된 빛이 광섬유 격자 소자에서 반사되어 나오는 동안 빛의 편광 상태가 변화하게 되면 분기 단자에서의 특성이 변화하기 때문에 파장을 가변했을 때 같은 특성을 보이는 것에서 압전 소자로 광섬유 격자 소자에 인장을 가하는 것에 의한 빛의 편광 상태의 변화는 없음을 알 수 있다. 그림 5 (c)에서와 같이 분기된 1549.3 nm의 신호중에서 광섬유 격자 소자를 통해 나온 누설 신호는 단자 4(output port)에서 -34 dB 정도로 측정되었으며 1550.1 nm로 가변하였을 때도 같은 특성을 보였다. 이것은 높은 반사율을 갖는 광섬유 격자 소자를 사용함으로써 누설 신호에 의한 영향이 거의 없다는 것을 보여주고 있다. 1549.3 nm 혹은 1550.1 nm의 신호를 결합하기 위하여 단자 3(add port)으로 입사시킨 경우는 앞에서 설명한 같은 원리로 단자 1(input port)을 통해 진행하던 신호들과 합쳐져서 출력 단자로 나오는 것을 확인하였고, 그 특성은 신호를 분기하는 경우와 차이가 없었다.

#### IV. 토의 및 결론

기존의 광섬유 격자 소자를 이용한 필터들이 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당하는 신호만을 선택할 수 있었던 단점을 극복하기 위해 광섬유 격자 소자에 인장이 가해졌을 때 브래그 파장이 변하는 성질을 이용하여 압전 소자에 광섬유 격자 소자를 부착한 압전 소자형 광섬유 격자 소자와 편광 선속분할기를 이용하여 WDM용 파장 가변형 광 분기/결합 장치를 제안하고 실험하였다. 본 장치는 두 빛의 간섭 현상을 이용하는 것이 아니라 편광 상태를 이용하는 것으로 외부의 온도 변화에 의한 영향을 받지 않는 안정적인 특성을 보일 뿐 아니라 제작이 쉽고, 압전 소자에 전압을 인가함으로써 광섬유 격자 소자의 브래그 파장을 변화시켜 간단하게 원하는 채널을 선택할 수 있는 채널 가변적 특성을 보였다. 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당하는 채널(1549.3 nm)과 파장 가변 후 채널(1550.1 nm) 각각의 경우, 좁은 대역폭과 높은 반사율을 갖는 광섬유 격자 소자를 이용함으로써 분기 단자에서 인접 채널 신호들의 반사를 -26 dB 이하로 줄였고, 분

기된 신호 중 광섬유 격자 소자를 통해 나오는 누설 신호를 -34 dB 정도로 억제할 수 있었다. 본 장치를 이용한 WDM 전송 실험에서 이러한 누설 신호에 의한 BER 특성은 분기 신호와 동일한 파장의 신호가 결합 단자(add port)로 입사하는 경우와 없는 경우에 따른 crosstalk 파워 페널티는 0.3 dB 이하로 측정된 바 있다.<sup>[13]</sup>

#### 참고 문헌

- [1] G. A. Ball and W. W. Morey, *Opt. Lett.*, **17**, 420-422 (1992).
- [2] F. Bilodeau, K. O. Hill, B. Malo, D. C. Johnson and J. Albert, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **6**, 80 (1994).
- [3] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano and C. R. Davidson, *Opt. Lett.*, **21**, pp. 336-338 (1996).
- [4] M. J. Guy, S. V. Chernikov, J. R. Taylor and R. Kashyap, *Electron. Lett.*, **30**, 1512 (1994).
- [5] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, *Electron. Lett.*, **28**, 236 (1992).
- [6] F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault, B. Malo, J. Albert and K. O. Hill, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7**, 388 (1995).
- [7] C. R. Giles and V. Mizrahi, in *Tenth International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication 1995 Technical Digest*, **3**, paper ThC2-1 (1995).
- [8] J.-L. Archambault, P. St. J. Russell, S. Barcelos, P. Hua and L. Reekie, *Opt. Lett.*, **19**, 180 (1994).
- [9] S. Y. Kim, S. B. Lee, J. Chung, S. Y. Kim, J. Jeong and S. S. Choi, *OFC '97 Technical Digest*, ThJ3 (1997).
- [10] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 647 (1978).
- [11] S. M. Melle, K. Liu and R. M. Measures, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 516 (1992).
- [12] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson and J. Albert, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1035 (1993).
- [13] 김세윤, 이상배, 최상삼, 정 준, 김상용, 박일종, 정지채, *전자공학회 논문지 제 34-D권 제 4호*, 게재 예정, (1997).

## **Optical tunable wavelength add/drop multiplexer employing piezoactuated fiber Bragg gratings for WDM system**

Se Yoon Kim, Sang Bae Lee and Sang Sam Choi

*Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea*

Joon Chung\* and Jichai Jeong\*\*

*\*Transmission Technology Research Laboratories, Korea Telecom, Taejon 305-348, Korea*

*\*\*Department of Radio Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

(Received : April 28, 1997)

We proposed and demonstrated a tunable wavelength optical add/drop multiplexer(OADM) employing piezoactuated fiber grating pairs and polarization beam splitters. We used piezostack act as a linear fiber stretcher, using the fact that the resonant wavelength of the grating can be controlled by the axial strain along the fiber grating. The polarization controlled configuration showed high stability because the reflected signals from the two identical gratings are dropped or added not by interference but by polarizations of the beams. We could add and drop not only 1549.3 nm signal channel(original gratings), but also 1550.1 nm(tuned gratings) with PZT actuators and in both cases, we found that the rejection of adjacent channels was more than -26 dB, and signal leakage at the gratings was less than -34 dB.