

論文98-35S-1-3

Apodized 선형처프된 광섬유 grating의 분산보상특성에 대한 연구 (Characteristics of dispersion compensation for apodized linearly-chirped optical fiber gratings)

趙 祥 衍 * , 李 景 植 *

(Sang Yeon Cho and Kyung Shik Lee)

요 약

선형 처프된 광섬유 grating을 이용해 1.3 μm 용 기존 광섬유를 통해 520km를 색분산 없이 전송할 수 있도록 광섬유 grating을 설계하였다. 설계된 광섬유 grating에 Gaussian함수와 hyperbolic tangent함수로 각각 apodization시키는 경우의 분산보상특성을 서로 비교해 보았다. Gaussian함수와 hyperbolic tangent함수로 apodization했을 때 다같이 시간지연상의 ripple이 크게 줄어들었으며, hyperbolic tangent함수를 이용하는 경우 반사대역폭이 Gaussian apodization의 경우보다 크게 유지시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

Abstract

A linearly-chirped fiber grating for the dispersion compensation over 520km of 1.3 μm single mode fiber is designed. The compensation characteristics of the gratings apodized each with Gaussian and hyperbolic tangent function are studied. The ripples in reflection and delay curves are considerably reduced for both cases, but the reflection bandwidth for the hyperbolic tangent apodization is much less shrunk than that of the Gaussian apodization.

I. 서 론

기존 1.3 μm 대 광섬유를 이용한 광통신 시스템의 경우에는 1550nm의 파장 대에서 $\sim 17\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 의 색분산을 겪게 된다. 이렇게 광섬유에 의해서 광펄스에 야기된 색분산은 장거리 초고속 광통신 시스템에서 성능 저하의 원인이 되고 있다. 따라서 이렇게 광전송선로에서 야기되는 색분산을 보상하기 위해 그 동안 많은 연구들이 진행되어 왔다^[1,2]. 그 중에서도 분산보상용 광섬유 (Dispersion - Compensated Fiber)를 이용하는 방법^[3], 광섬유 grating을 이용하는 방법^[4]들이 제시되었다. 그러나 분산보상용 광섬유를 이용하는 경우는 기존의 광전송선로에 추가로 사용해야 하기 때

문에 비용 면이나 분산보상시스템의 설치에 있어서 많은 어려움이 있다. 따라서 최근 들어 처프된 광섬유 grating을 이용해 기존의 광전송선로를 그대로 이용하면서 광전송선로에서 광펄스에 야기되는 색분산을 보상하는 분산보상 시스템에 대한 연구가 많이 진행되고 있다^[5]. 처프된 광섬유 grating을 이용해 분산보상 시스템을 구성하는 경우, 광신호를 10Gbit/s이상의 전송속도로 1.3 μm 용 기존 전송선로를 통해 분산 없이 400km를 전송할 수 있음이 확인되었다^[6,7]. 따라서 이러한 선형처프된 광섬유 grating을 이용한 분산보상시스템은 분산보상용 광섬유를 이용하여 분산보상시스템을 구성하는 것에 비해서 제작 및 설치가 용이할 뿐만 아니라 분산보상 파장에 대해 파장선택성이 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 1.3 μm 용 광섬유를 통해 초고속 장거리 통신을 실현할 수 있도록 선형처프된 광섬유 grating을 이용한 분산보상기에 대해서 고찰해

* 正會員, 成均館大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Sung Kyun Kwan Univ.)

接受日字: 1997年8月25日, 수정완료일: 1997年12月31日

보고자 한다. 특히, 선형처프된 광섬유 grating의 시간지연 스펙트럼 상의 ripple을 줄이기 위해 선형처프된 광섬유 grating을 Gaussian 및 hyperbolic tangent함수로 apodization시킴으로써 선형처프된 광섬유 grating의 분산보상특성이 얼마나 향상되는지에 대해서 살펴보고자 한다.

II. 광섬유 grating을 이용한 색분산 보상원리

1.5 μ m파장대에서는 기존 1.3 μ m용 단일모드 실리카 광섬유의 경우 분산특성이 anomalous-dispersion 영역^[8]이므로 전송되는 광펄스의 단파장 성분(blue-shifted component)이 장파장성분(red-shifted component)에 비해 빠르게 전송된다. 따라서 이러한 광섬유의 분산특성을 보상해 주기 위해서 광섬유 grating을 이용하는 경우, 광섬유 grating의 처핑형태는 단파장 성분을 광섬유 grating의 뒷부분에서 반사시키고 장파장성분은 광섬유 grating의 앞부분에서 반사시킴으로써 광섬유 grating의 반사파장성분들 사이에 시간지연이 생기도록 해야 한다. 그런데 선형처프된 광섬유 grating의 경우에 광섬유 grating에서 반사되는 반사파장이 광섬유 grating의 위치에 따라 선형적으로 변하게 되는데, 이러한 특성을 이용하여 전송선로의 분산특성과 반대가 되도록 광섬유 grating을 처핑 시킴으로써 광섬유 내에서의 색분산을 보상시켜 줄 수 있다^[2].

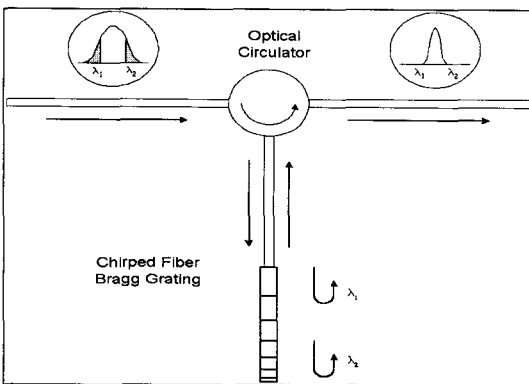


그림 1. 선형처프된 광섬유 grating을 이용한 분산보상 개념도

Fig. 1. The schematic representation of dispersion compensation using chirped fiber Bragg grating.

그림 1은 선형처프된 광섬유 grating을 이용한 색분산보상의 원리를 나타낸 것이다. 전송선로를 통해 전송되어온 여러 파장들로 구성된 광펄스는 앞에서 언급한 광섬유의 분산특성에 의해서, 파장성분들간에 군속도(group velocity) 차이에 의해 광펄스에 색분산이 야기된다. 따라서 이렇게 색분산이 야기된 광펄스를 optical circulator를 이용하여 선형처프된 광섬유 grating에 입사시킨 뒤, 광펄스를 구성하는 여러 파장성분들 중에서 전송속도가 느린 λ_1 성분을 광섬유 grating의 앞부분에서 반사시키고 전송속도가 빠른 λ_2 성분은 광섬유 grating의 뒷부분에서 반사시킴으로써 전송 도중에 광펄스에 야기되는 광펄스의 퍼짐(broadening)현상을 보상시켜 광펄스를 압축(compressing)시켜준 뒤, 다시 optical circulator를 이용하여 다음 단의 전송선로로 보내줌으로써 장거리 초고속 광통신 시스템에서 분산보상기의 역할을 할 수 있다.

선형처프된 광섬유 grating을 해석하기 위해 본 논문에서는 광섬유 grating을 100개의 subgrating으로 나누는 뒤, 각 subgrating의 주기를 선형적으로 감소시켰다. 이러한 선형처프된 광섬유 grating의 특성분석을 위해 S-matrix^[9]를 사용하여 선형처프된 광섬유 grating의 반사스펙트럼과 시간지연 특성을 아래와 같이 얻을 수 있었다.

$$r = \frac{B_{in}}{A_{in}} = \left| \frac{S_{21}}{S_{22}} \right| e^{j\theta} \tag{1}$$

$$\tau = \frac{\partial \theta}{\partial \omega} \tag{2}$$

여기서 r은 reflection coefficient이며, τ 는 시간지연 양이다.

III. 선형처프된 광섬유 grating의 분산보상특성

그림 2와 3은 각각 선형처프된 광섬유 grating의 길이에 따른 분산보상특성과 반사율 R의 변화를 나타낸 것이다. “I”, “II”와 “III”은 각각 광섬유 grating의 길이를 25mm, 50mm 그리고 100mm인 경우에 대하여 나타낸 것이다. 이 경우에 광섬유 grating의 처핑양은 광섬유 grating의 앞부분에서의 반사파장을

1550nm, 끝부분에서의 반사파장을 1548.76nm에 해당하는 grating의 주기를 갖도록 한 후 광섬유 grating의 주기를 선형적으로 변화시켰다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이 광섬유 grating의 길이가 25mm에서 50mm로 변함에 따라 분산의 기울기 δD 가 220ps/nm에서 440 ps/nm로 향상됨을 알 수 있었다. 또한 반사대역폭 $\delta\lambda$ 내에서 파장이 증가함에 따라서 시간지연(time delay) 값이 진동(ripple)하지만 평균치는 선형적으로 감소함을 알 수 있었다. 그림 3은 광섬유 grating의 길이가 25mm에서 100mm로 증가함에 따라 광섬유 grating의 반사율이 0.98에서 1로 변하게 됨을 보여주는 그림이다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 단일 광섬유 grating의 처평양이 작은 경우 광섬유 grating에서 야기되는 광손실은 아주 작음을 알 수 있다. 전체 처평양이 0.2 nm, 길이가 50cm인 선형처프된 광섬유 grating의 시간 지연 특성을 식 (1)을 이용하여 구해보면, 분산의 기울기가 8,840ps/nm가 된다. 따라서 이러한 광섬유 grating을 이용하면 분산이 17ps/(nm·km)인 1.3 μ m용 단일모드 광섬유 520km를 분산 없이 전송할 수 있다. 또한 이 경우 광섬유 grating의 처평양이 아주 작은 값이므로 분산보상시 광섬유 grating에 의해서 야기되는 광손실은 거의 무시할 수 있다.

표 1에서는 광섬유 grating의 길이가 5cm인 경우, 전체 처평양($\Delta\lambda_{tot}$)에 따라서 광섬유 grating의 분산 보상능을 나타내는 파라미터 값들이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다.

표 1. 처평양에 따른 분산보상특성
Table 1. The characteristics of dispersion compensation for chirping.

$\Delta\lambda_{tot}$ (nm)	$\delta\lambda$ (nm)	δD (ps/nm)	R(%)
0.2	0.6	887.1	100
0.4	1.2	443.5	100
1	3.1	177.4	99

여기서 우리는 표 1을 통해서 광섬유 grating의 처평양이 작은 경우, 반사율과 분산의 기울기는 크지만 분산보상 대역폭이 좁게 된다는 것을 확인할 수 있다. 전체 처평양이 0.2nm에서 1nm로 증가함에 따라 분산기울기는 887.1ps/nm에서 177.4ps/nm로 감소하지만 분산보상대역폭은 0.6nm에서 3.1nm로 증가된다. 따라서 광섬유 grating의 처평양이 작은 경우 분산보상대역폭은

줄어들지만 그에 비해 분산의 기울기 및 광섬유 grating에서의 반사율이 크므로 분산 보상 성능이 좋을 뿐만 아니라 분산보상시 광손실이 거의 없게 된다.

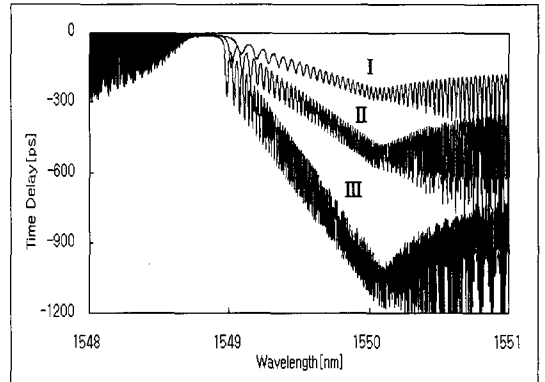


그림 2. 선형처프된 광섬유 grating의 길이에 따른 시간지연스펙트럼(" I ":25mm, " II ":50mm, " III ":100mm)

Fig. 2. The group delay of a linearly-chirped fiber Bragg grating as a function of the grating length(" I ": 25mm, " II ": 50mm, " III ":100mm).

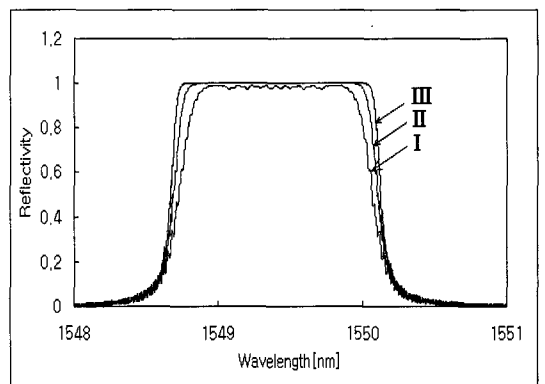


그림 3. 선형처프된 광섬유 grating의 길이에 따른 반사스펙트럼(" I ": 25mm, " II ": 50mm, " III ":100mm)

Fig. 3. The reflection spectrum of a linearly-chirped fiber Bragg grating as a function of the grating length(" I ": 25mm, " II ":50mm, " III ":100mm).

IV. Apodization된 광섬유 grating의 분산보상특성

일반적으로 선형처프된 광섬유 grating의 파장에 대한 시간지연 특성을 살펴보면 그림 2에서 확인할 수

있듯이 시간지연 스펙트럼 상에 ripple성분이 존재한다. 이러한 시간지연 스펙트럼 상에서의 ripple성분에 의해서 분산보상시 광펄스에 잡음이 야기되게 된다. 따라서 분산보상시 광섬유 grating에 의해서 야기되는 ripple을 제거해 주기 위해서 일반적으로 광섬유 grating의 굴절률차인 Δn 을 적당한 함수로 apodization시켜 준다.

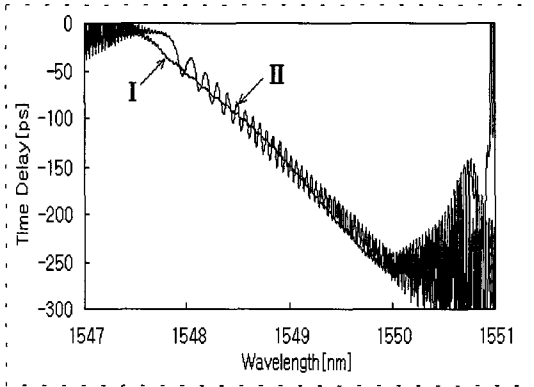


그림 4. Apodization을 통한 선형처프된 광섬유 grating의 분산보상능력 향상 (“I”:G=10, “II”:G=0)

Fig. 4. The improvement of the group delay through the apodization of fiber Bragg grating (“I”:G=10, “II”:G=0).

그림 4는 광섬유 grating을 apodization시켰을 때 시간지연스펙트럼이 어떻게 변화하는지를 나타내 주는 그림이다. 여기에서 광섬유 grating의 길이는 25mm, 전체 처핑양은 0.8nm로 했다. 또한 다음과 같이 Gaussian 함수의 형태로 apodization시켰다.

$$\Delta n = n_0 \exp\left[-G\left(\frac{x}{L}\right)^2\right] \quad (3)$$

여기에서, n_0 는 비굴절률의 최대 값이며, G 는 Gaussian window 파라미터이고, L 은 광섬유 grating의 전체 길이이다. “I”은 $G=10$ 이 되도록 apodization시켜 준 경우이고 “II”는 apodization시켜 주지 않은 경우의 시간지연 스펙트럼이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 광섬유 grating을 apodization시킴으로써 시간지연스펙트럼에서의 ripple을 크게 감소시켜 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 Gaussian 형태로 apodization시킨 경우에 G 값에 따라서 반사스펙트럼의 변화를 나타낸 것이

다. 광섬유 grating에 apodization의 정도를 변화시키기에 따라서 시간지연 스펙트럼 상에서 ripple은 감소하지만, 동시에 반사율과 반사대역폭이 줄어들게 되어 분산보상능력이 떨어지는 것을 알 수 있다.

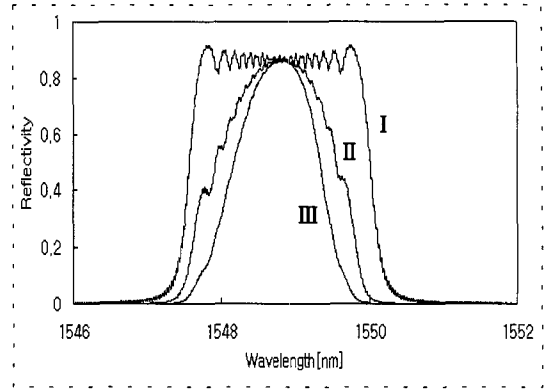


그림 5. Gaussian apodization시 선형처프된 광섬유 grating의 반사스펙트럼의 변화 (“I”:G=0, “II”:G=5, “III”:G=10)

Fig. 5. Degradation of reflection spectrum induced by Gaussian apodization (“I”:G=0, “II”:G=5, “III”:G=10).

표 2. Gaussian apodization양에 따른 분산 보상특성

Table 2. The characteristics of dispersion compensation for Gaussian apodization.

G	$\delta \lambda$ (nm)	δD (ps/nm)	D_{ave} (ps)
0	2.4	102.9	~8.4
5	1.6	155.3	~4.4
10	1.2	217.4	~0.4

표 2로부터 광섬유 grating의 길이를 25mm, 전체 처핑양을 0.8nm로 가정했을 경우에 G 값에 따라서 광섬유 grating의 분산보상 파라미터 값들이 어떻게 변하는지를 알 수 있다. 여기서 D_{ave} 는 시간지연스펙트럼상의 ripple의 크기를 평균편차로 나타낸 것이다. 광섬유 grating의 apodization정도를 나타내 주는 파라미터인 G 값이 0에서 5로 변함에 따라 D_{ave} 는 8.4ps에서 4.4ps로 줄어들게 되어 ripple이 감소됨을 알 수 있다. 그러나 동시에 반사대역폭은 2.4nm에서 1.6nm로 줄어들게 되어 33.3%감소되었다.

다음은 아래로 주어지는 hyperbolic tangent함수로

굴절률 차를 apodization했을 때 광섬유 grating의 분산보상특성이 어떻게 되는지를 살펴보겠다.

$$\Delta n = n_0(1 + \tanh[3(1 - 2|2 \cdot \frac{z}{L}|^3)]) \quad (4)$$

그림 6과 그림 7에 apodization의 형태에 따라서 반사스펙트럼과 시간지연스펙트럼의 변화가 어떻게 되는지를 각각 나타내었다. 광섬유 grating의 길이는 25mm로, 그리고 전체 처평양은 0.8nm로 가정했다. 그림 6에서 "I"은 apodization을 하지 않은 경우를, "II"는 hyperbolic tangent함수로 apodization한 경우를, 그리고 "III"은 Gaussian함수로 apodization시킨 경우의 반사스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 6과 7을 통해서 알 수 있듯이 hyperbolic tangent함수로 apodization시킨 경우 Gaussian형태로 apodization시킨 경우에 비해 반사율과 반사파장대역폭 값은 크게 유지할 수 있으면서 동시에 ripple이 Gaussian apodization의 경우처럼 제거되는 것을 알 수 있다.

표 3. Apodization함수에 따른 분산보상특성 비교

Table 3. Comparison of the characteristics of dispersion compensation as a function of apodization.

Apo-dization 유무	$\delta \lambda$ (nm)	δD (ps/nm)	ripple의 정도
No apodization(G=0)	2.4	102.9	Dave=8.4
Gaussian apodization(G=10)	1.2	217.4	Dave=0.4
Hyperbolic tangent	1.9	130.2	없음

표 3은 hyperbolic tangent함수를 이용하여 apodization한 경우에 분산보상특성을 나타낸 것이다. 광섬유 grating을 Gaussian함수(G=10)와 hyperbolic tangent함수로 apodization한 경우, 시간지연스펙트럼의 ripple은 둘 다 크게 줄어들어 거의 선형적인 특성을 나타내었다. 하지만 반사대역폭은 Gaussian apodization을 한 경우 52%나 크게 줄어들었으나 hyperbolic tangent의 경우는 이보다 훨씬 적은 21% 정도 축소되는데 그쳤다. 이것은 hyperbolic tangent함수로 apodization하는 경우 Gaussian함수에 비해서 반사대역폭을 크게 유지시켜 줄 수 있다는 장점이 있다는 것을 말해 주는 것이다.

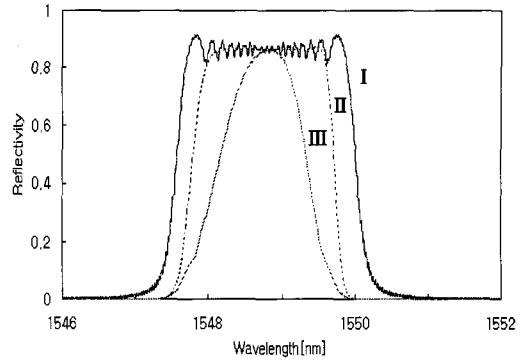


그림 6. Gaussian 과 hyperbolic tangent apodization 시 선형처프된 광섬유 grating의 반사스펙트럼 비교(" I":No apodization," II": hyperbolic tangent, " III ":Gaussian apodization)

Fig. 6. Comparison between Gaussian and hyperbolic tangent apodization in reflection spectrum(" I":No apodization," II": hyperbolic tangent, " III ":Gaussian apodization).

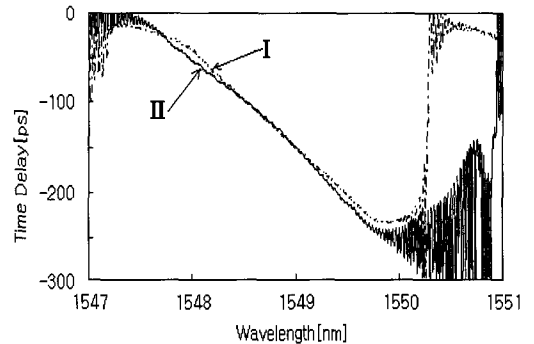


그림 7. Gaussian과 hyperbolic tangent apodization 시 선형처프된 광섬유 grating의 시간지연스펙트럼 비교(" I":No apodization," II": hyperbolic tangent, " III ":Gaussian apodization)

Fig. 7. Comparison of group delay between Gaussian and hyperbolic tangent apodization (" I":Hyperbolic tangent, " II": Gaussian apodization).

V. 결론

본 연구에서는 선형처프된 광섬유 grating을 이용한 색분산보상에 대해서 알아보았다. 길이가 50cm, 전체 처평양이 0.2nm, 분산의 기울기가 8,840ps/nm가 되도록 광섬유 grating을 설계할 경우, 520km까지 분산 없이 광섬유 분산이 17ps/(nm·km)인 1.3μm용 기존 광

섬유를 통해서 초고속 전송을 할 수 있다. 또한 Gaussian함수와 hyperbolic tangent함수로 각각 apodized 선형처프된 광섬유 grating의 분산보상특성을 비교해 보았다. Gaussian 함수로 apodization한 경우 G값이 커짐에 따라 시간지연스펙트럼에서의 ripple은 상당히 감소하지만, 동시에 반사율과 반사대역폭이 크게 줄어들게 되어 분산보상능력이 떨어지는 것을 알 수 있다. 광섬유 grating을 Gaussian함수 ($G=10$) 및 hyperbolic tangent함수를 이용하여 apodization한 경우, 시간지연스펙트럼의 ripple은 둘 다 크게 줄어들어 좋은 분산보상특성을 보여주었다. 특히 hyperbolic tangent함수로 apodization 해주는 경우, Gaussian함수로 apodization 해주는 경우에 비해서, 반사대역폭을 훨씬 크게 유지해 줄 수 있어서 hyperbolic tangent함수로 apodization해 주는 경우 분산보상특성을 높여 줄 수 있다.

※ 본 연구는 1996년도 정보통신부 산·학·연 공동 기술개발사업의 연구비지원으로 이루어 졌습니다.

참 고 문 헌

[1] K. O. Hill, F. Bilodeau, B. Malo, T. Kitagawa, S. Theriault, D. C. Johnson, and Albert, "Chirped in-fiber Bragg grating for compensation of optical-fiber dispersion," *Optics Letters*, vol. 19, no. 17, pp. 1314-1316, 1994.

[2] F. Quellet, "Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguide," *Optics Letters*, vol. 12, no. 10, pp. 847-849 1987.

[3] A. Goel, R. K. Shevgaonkar, "Wide-Band Dispersion Compensating Optical Fiber,"

IEEE Photonics Technology Letters, vol. 8, no. 12, pp. 1668-1670 1996.

- [4] Simon Thibault, Jocelyn Lauzon, Jean-Francois Cliche, Jean Martin, Michel A. Duguay, and Michel Tetu, "Numerical analysis of the optimal length and profile of a linearly chirped fiber Bragg grating for dispersion compensation," *Optics Letters*, vol. 20, no. 6, pp. 647-649, 1995.
- [5] 조 상연, 이 경식, 유 지범, 전 찬오, "1.3 μ m대 광섬유 분산보상용 apodized 선형처프된 광섬유 grating의 설계," *COOC'97*, pp. 320-322, 1997
- [6] R. I. Laming, W. H. Loh, X. Gu, M. N. Zervas, M. J. Cole, A. D. Ellis, "Dispersion Compensation with chirped fiber Bragg grating to 400km at 10Gbit/s in non-dispersion-shifted fiber," *OFC'96*, ThA5, pp. 203-204, 1997.
- [7] W. H. Loh, R. I. Laming, N. Robinson, A. Cavaciuti, F. Vanietti, C. J. Anderson, M. N. Zervas, and M. J. Cole, "Dispersion Compensation Over Distances in Excess of 500km for 10-Gb/s Systems Using Chirped Fiber Gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 7, pp. 944-946, 1996.
- [8] Govind P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, Second edition, pp. 7-12, 1995.
- [9] Govind P. Agrawal and stojan Radic, "Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings and their Application for Wavelength Demultiplexing", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 8, pp. 995-997, 1994.

저 자 소 개

趙 祥 衍(正會員) 第 34卷 第 7號 參照

李 景 植(正會員) 第 34卷 第 7號 參照