《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 14, Number 1, February 2003

기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자 소자와 이를 이용한 EDFA 이득평탄화

김륜경 · 조준용 · 이경식†
성균관대학교 정보통신공학부 광통신연구실
㉾ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

(2002년 7월 26일 받음, 2002년 1월 2일 수정본 받음)

기계적으로 유도된 소자형 장주기 광섬유격자를 처음으로 제작해 보았다. 본 연구의 장주기 광섬유격자 소자는 제작이 용이하며, 다른 광 소자나 시스템에 적용 또는 장착이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 제작된 장주기 광섬유격자 소자는 격자 제작시 중심파장과 투과손실을 가변할 수 있는 특징을 가지고 있다. 장주기 광섬유격자 소자의 제작원리를 살펴보고, 제작된 장주기 광섬유격자의 파장가변 특성과 압력에 따른 투과특성을 실험해 보았으며, 장주기 광섬유격자 소자를 EDFA의 이득 평탄화 실험에 적용해 보았다.

주제어 : long-period gratings, tuning, EDFA, gain flattening.

I. 서 론

최근 급격한 통신량의 증가와 초고속 정보사회의 구현으로 광통신 관련 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 그 중 광통신 망에 쓰이는 여러 소자들 또한 많은 발전과 개발이 이루어졌다. 특히, 지난 10여년 동안 활발히 연구가 진행되어온 광섬유격자는 삽입손실이 적고 파장 선택도가 높은 특성이 있어 광통신 시스템과 광센싱 시스템에서 중요한 핵심소자로 이용되고 있다. 이러한 광섬유격자는 크게 단주기 광섬유격자(Short-period gratings)와 장주기 광섬유격자(Long-period gratings)로 구분할 수 있는데, 그 중 장주기 광섬유격자는 보통 한 주기가 수백 μm이며 진행하는 모드를 특정파장에서 진행 방향과 같은 방향의 고차모드로 변환시켜줌으로써 특정파장 성분을 크게 감쇄시킬 수 있는 소자로, 투과 선폭은 수십 nm에 이른다. 이러한 장주기 광섬유격자는 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 광통신 시스템에서 특정 파장성분을 제거시켜 줄 수 있는 광필터,[1] 모드 변환기,[2] 초고속 광전송 시스템에서 문제가 되고 있는 색분산을 보상해 줄 수 있는 분산보상기,[3] 광섬유격자 센서,[4] 그리고 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)의 이득평탄 필터 및 ASE(Amplified Spontaneous Emission)필터[5] 등 그 응용범위가 매우 다양하다. 현재 장주기 광섬유격자의 제작은 광섬유에 레이저빔을 노출시켜 굴절률 변화를 유도하는 방법[6]과 전극쌍을 이용하여 광섬유에 미세구부림(microbending)을 주어 광섬유격자를 형성시키는 방법[7] 등이 제시되고 있다. 그러나 기존의 제작방식으로 제작된 장주기 광섬유격자는 격자 제작시 결합되는 모드의 중심파장을 제어하기 어렵고, 격자를 제작한 후에는 중심파장이 고정되어 있다는 단점이 있다. 또한 광섬유격자 제작시 장시간이 소요되며, 제작하는데 고가의 장비가 필요하다는 단점이 있는데, 최근 이러한 단점들을 극복하기 위해 광섬유에 주기적인 압력을 인가하여 장주기 광섬유격자를 제작하는 방식이 제시되었다.[8] 제시된 방식은 간단히 장주기 광섬유격자를 제작할 수 있을 뿐만 아니라 튜닝성이 뛰어나 현재 이러한 제작방식을 이용한 장주기 광섬유격자에 관련된 논문들이 많이 발표되고 있다.[2,8,9] 그러나, 현재까지의 기계적으로 구현되는 장주기 광섬유격자는 부피가 너무 크고, 일체형이 아니기 때문에 실제 시스템에 적용 또는 장착이 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 단점을 보완하기 위해 일체화되고 소형인 장주기 광섬유격자 소자를 제작하였다. 이는 우리가 알기로는 세계 최초로 제작된 것으로써, 장주기 광섬유격자 제작시 쉽고 간단하게 광섬유에 주기적인 압박을 가할 수 있을 뿐만 아니라, 가해지는 압박과 격자주기를 가변할 수 있으며, 다른 광 소자나 시스템에 적용 및 장착이 용이하다. 2장에서는 장주기 광섬유격자 소자의 제작원리를 살펴보고, 3장에서는 제작된 장주기 광섬유격자 소자의 특성을 실험해 보았다. 그리고, 4장에서는 제작된 장주기 광섬유격자 소자를 EDFA의 이득평탄화 실험에 이용해 보았다.

II. 장주기 광섬유격자 소자의 제작원리

그림 1은 기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자 소자를 나타내고 있다. 이는 광탄성 효과(Photo-elastic effect)를 이용한 것으로, 광섬유에 주기적인 압력을 인가함으로써 격자를 제작하며, 원하는 중심파장을 갖기 위해 쉽게 격자주기를 조절할 수 있도록 설계되었다. 이렇게 기계적으로 유도하는 장주기 광섬유격자 소자의 구조는 크게 세 부분으로 나누어 볼 수 있는데, 외부에서 압박을 인가해 주기 위한 부분(a)과 압박을 받아 요철판을 누르는 부분(b), 그리고 눌림에 의해 광섬유(d)에 장주기 광섬유격자를 유도하는 요철판(c)으로 구성되어 있다. 여기서 (a)와 (b) 부분에는 나사산이 형성되어 있어 회전시킴으

†E-mail: kslee@skku.ac.kr

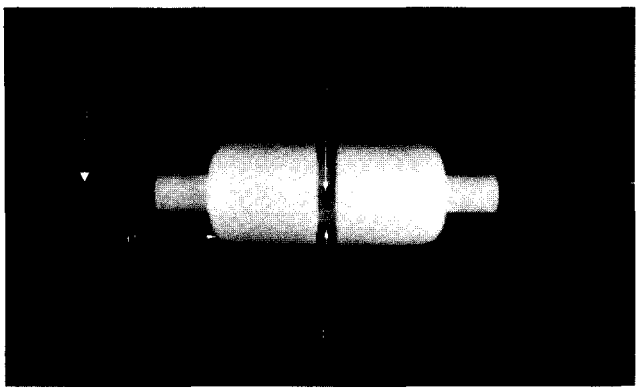

그림 1. 기계적으로 유도하는 장주기 광섬유격자 소자.

로써 압력을 쉽게 조절할 수 있으며, 격자주기 또한 회전각을 조절함으로써 쉽게 가변할 수 있도록 하였다. 이는 기계적으로 장주기 광섬유격자를 제작할 때 광섬유에 압력을 인가하기 위해 기존에 사용되었던 추나 micrometer, 그리고 요철판을 회전시키기 위한 rotary stage와 같은 부피가 큰 장치들을 사용하지 않고 소형(전체길이 6 cm, 외곽두께 3 cm)이고 경제적으로 제작되었다는 특징을 가지고 있다.

III. 제작된 장주기 광섬유격자 소자의 특성실험과 결과

그림 2는 기계적으로 유도하는 장주기 광섬유격자 소자의 스펙트럼 특성을 알아보기 위한 실험장치도를 나타낸다. 이 때, 사용한 요철판의 격자주기는 530 μm이며, 제작된 격자의 길이는 30 mm였다. 격자의 제작과정을 실시간으로 관측하기 위해 측정 광원은 광대역 광원인 LED를 사용하였으며, ANDO 사의 AQ-6310 스펙트럼 분석기(OSA)를 사용하여 특성을 분석하였다. 격자제작에 사용된 광섬유는 일반 광통신용 단일모드 광섬유를 사용하였다.

그림 3은 기계적으로 구현된 장주기 광섬유격자 소자의 투과 스펙트럼을 나타내고 있다. 이때의 공진파장은 $\lambda=(n_{co}^{01}-n_{cl}^{lm})\Lambda$에 의해 결정되고, 여기서 λ는 공진파장(resonant wavelength), n_{co}^{01}와 n_{cl}^{lm}은 각각 LP_{01} 코어모드와 lm 클래딩모드의 유효굴

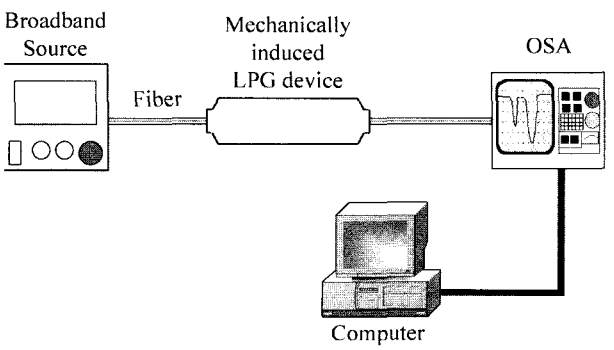

그림 2. 장주기 광섬유격자 소자의 특성실험을 위한 실험장치도.

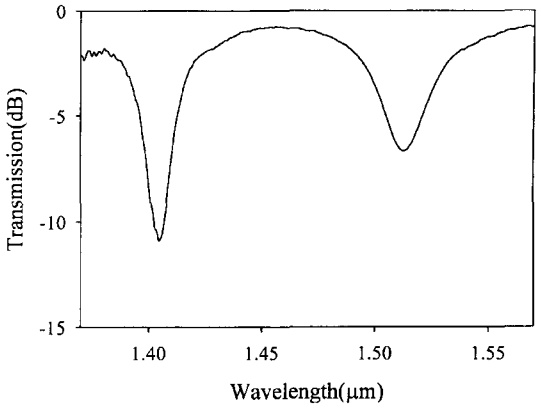

그림 3. 제작된 장주기 광섬유격자 소자의 투과 스펙트럼(Λ =530 μm).

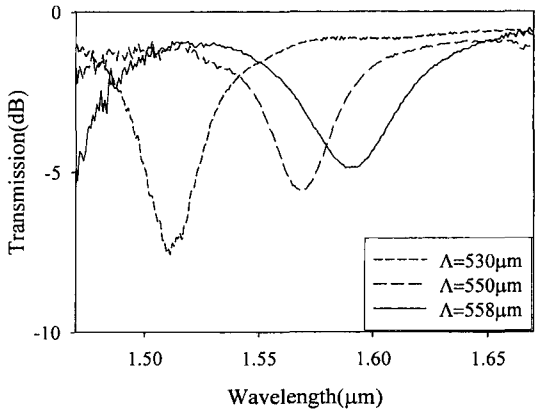

그림 4. 격자주기 가변에 따른 투과 스펙트럼 변화(--- : Λ=530 μm, -- : Λ=550 μm, — : Λ=558 μm).

절률(effective index)이며, Λ는 격자의 주기이다. 그림 3에서는 제작된 광섬유격자에 의해 1.403 μm와 1.511 μm의 파장대에서 모드결합이 일어나는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 격자주기를 530 μm에서 558 μm까지 증가 시켰을 때 투과 스펙트럼의 변화를 나타낸다. 격자주기는 광섬유를 압박하는 요철판을 틸트시킴으로써 쉽게 변화시킬 수 있었다. 장주기 광섬유격자의 격자주기를 증가시킴에 따라 투과 스펙트럼상의 중심파장이 장파장 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있고, 이때 틸트각(θ)과 격자주기(Λ)는 $\Lambda_c=\Lambda/cos\theta$의 관계를 가지며, Λ_c와 Λ는 가변 후와 가변 전의 격자주기를 나타낸다. 그림 4에서는 요철판의 틸트각을 18.2°로 하여 중심파장을 약 80 nm 까지 가변시켰으나 최대 180 nm 까지 가변할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

그림 5는 격자주기를 530 μm로 고정하고, 광섬유에 가해지는 압력을 점차 증가시켰을 때 투과 스펙트럼상에 손실 피크의 변화를 나타내는 그림이다. 광섬유에 인가되는 압력은 외부에서 압력을 인가하는 부분을 조절함으로써 쉽게 가변할 수 있었다. 그림 5에서 모드결합이 일어나는 파장인 1.511 μm에서 투과손실은 압박이 증가함에 따라 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 코어모드와 클래딩모드 사이의 모드결합이 일어나는 중심파장에서의 투과량은 식 (1)에 의해서 결정된다.

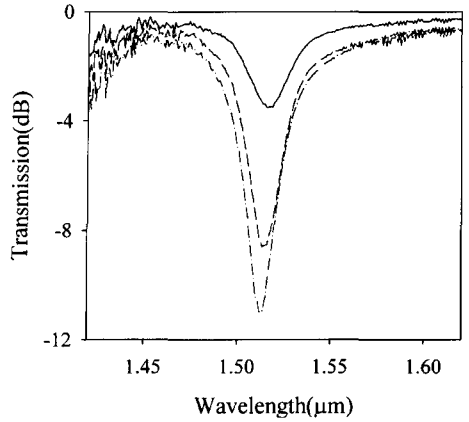

그림 5. 압력에 따른 장주기 광섬유격자 소자의 투과 스펙트럼(Λ =530 μm).

$$T=cos^2(\chi L/2) \quad (1)$$

여기서, L은 광섬유격자의 길이이며, χ는 결합상수(coupling constant)이다. 일반적으로 압력을 증가시키면 광탄성효과(Photo-elastic effect)에 의해 결합상수 χ가 증가하고 따라서 모드결합이 강하게 일어나게 되며, 그에 따라 모드결합이 일어나는 중심파장에서의 투과손실은 점점 증가하게 된다.[10] 하지만 식 (1)에서 볼 수 있듯이, 굴절률 변화량에 비례하는 결합상수 χ에 대해 투과량이 cosine 제곱함수 형태로 변하기 때문에, 어떤 값 이상에서는 점점 감소하는 경향을 보이게 된다.

모드결합이 일어나는 중심파장에서의 FWHM(Full Width at Half Maximum)은 결합모드 방정식에 의한 모드결합비로 유도되며,[9] 다음과 같이 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_{FWHM} = \frac{0.8\lambda_0^2}{L(n_{co}^{01} - n_{cl}^{lm})} \quad (2)$$

여기서, λ_0는 LP_{01} 코어모드와 lm 클래딩 모드들이 결합되는 중심파장이고, L은 격자의 길이를 나타낸다. 즉, 일정한 파장에서 FWHM($\Delta\lambda$)은 격자의 길이(L)에 반비례하며, 일반적으로 광섬유격자의 길이가 증가할수록, 광섬유격자 투과 스펙트럼의 대역폭은 더 좁아져 협대역 투과필터의 설계가 가능함을 알 수 있다. 그림 3의 투과 스펙트럼에서 모드결합이 일어나는 파장(λ=1.511 μm)에서의 FWHM($\Delta\lambda$)은 22 nm로 측정되었는데 식 (2)를 이용해 계산된 이론치 21.4 nm와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

IV. 기계적으로 유도하는 장주기 광섬유격자 소자를 이용한 EDFA 이득 평탄화

장주기 광섬유격자를 이용한 응용분야는 다양하다. 본 논문의 기계적으로 유도하는 장주기 광섬유격자 소자는 이러한 응용에 쉽게 적용하기 위해 제작되었으며 이의 필터로서의 성능을 알아보기 위하여 EDFA의 이득평탄화에 적용해 보았다. 그림 6은 제작된 광섬유격자를 이용해 EDFA의 ASE 스펙트럼

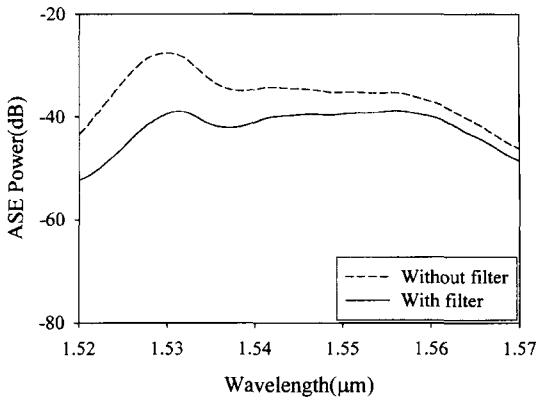

그림 6. 제작된 장주기 광섬유격자 소자를 이용한 EDFA 이득스펙트럼 평탄화 (--- : 평탄화 전, — : 평탄화 후).

을 평탄화한 것으로 점선(···)은 필터를 사용하기 전의 EDFA의 ASE 스펙트럼을 나타내고, 실선(—)은 본 연구에서 구현된 장주기 광섬유격자 소자를 이용해 평탄화 한 후의 ASE 스펙트럼을 나타낸다. 본 연구에서는 기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자 필터를 이용하여 ASE 스펙트럼상에서 이득 피크가 존재하는 1.53 μm 근처의 파장대역을 평탄화 하였다. 그 결과 그림 6에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 구현된 이득 평탄화 필터를 사용하여 1.53 μm에서 1.56 μm까지 약 30 nm의 파장영역에 걸쳐서 9.33 dB의 평탄도를 ±1.62 dB까지 향상시켰으며, 이때 삽입손실은 2.41 dB 이었다. 이 삽입손실은 광섬유에 압력을 인가할 때 발생된 마이크로밴딩에 의한 손실로 예상되며, 이 손실은 압력을 인가하기 전에 광섬유를 약간 인장해 줌으로써 줄일 수 있다.[8] 그리고 장주기 광섬유격자의 투과손실 스펙트럼의 대역폭을 좀 더 좁게 제작하였다면 더욱 향상된 평탄도를 얻을 수 있었을 것으로 생각한다. 이러한 대역폭의 문제점은 식 (2)에서 알 수 있듯이, 격자의 길이(L)를 증가시킴으로써 쉽게 해결할 수 있는데, 이는 본 논문의 장주기 광섬유격자 소자의 요철판의 길이를 더 길게 함으로써 격자의 길이를 늘릴 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 광섬유에 주기적으로 압력을 인가하는 방식의 장주기 광섬유격자 소자를 제작하였다. 이는 나사산을 이용하여 손쉽게 광섬유에 인가되는 압력을 조절하도록 구현되었으며 요철판의 회전각을 조절하여 격자주기를 가변함으로써 원하는 중심파장을 얻을 수 있도록 제작되었다. 기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자 소자는 파장과 투과손실의 튜닝성이 우수하여 원하는 필터를 정확하게 설계할 수 있었으며, EDFA의 이득 평탄필터로 적용되어, 약 30 nm(1.53 μm~1.56 μm)에 걸쳐서 ±1.62 dB의 평탄도를 얻을 수 있었다. 또한 본 논문에서 제시한 기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자 소자는 기존의 기계적으로 유도된 격자에 비해 부피가 작고 일체형으로 구현되어 장주기 격자를 요구하는 여러 광 소자 및 시스템에 적용 및 장착이 쉽다는 특징을 가지고 있다. 현재 본 연구실

에서는 제작된 격자의 특성 향상을 위해 계속적인 연구를 진행하고 있으며, 본 연구에서 제시된 격자소자에 대한 특허도 보유하고 있다.[11]

참고문헌

[1] Ashish M. Vengsarkar, Paul J. Lemaire, Justin B. Judkins, Vikram Bhatia, Turan Erdogan, and John E. Sipe, "Long period fiber gratings as band rejection filters," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 58-65, 1996.

[2] Kyung Shik Lee and Joon Yong Cho, "Polarization-mode coupling in birefringent fiber gratings," *JOSA A*, vol. 19, no. 8, pp. 1621-1631, 2002.

[3] Ouellette, F., Cliche, J. F. and Gagnon, S., "All-fiber devices for chromatic dispersion compensation based on chirped dirtributed resonant coupling," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 1728-1738, 1994.

[4] Y. Liu, L. Zhang and I. Bennion, "Fiber optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 8, pp. 661-663, 1999.

[5] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano and C. R. Davidson, "Long period fiber-grating-based gain equalizers," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 5, pp. 336-338, 1996.

[6] J. Martin and F. Ouellette, "Novel written technique of long and highly reflection in-fiber grating," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 10, pp. 811-812, 1994.

[7] T. Enomoto, M. Shigehara, S. Ishikawa, T. Danzuka and H. Kanamori, "Long-period grating in a pure-silica-core fiber written by residual stress relaxation," in OFC'98, San Jose, USA, 1998, pp. 277-278.

[8] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino and H. J. Shaw, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 710-712, 2000.

[9] 함정우, 이종훈, 이경식, "기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자의 제작 및 특성분석," *한국광학회*, vol. 12, no. 6, pp. 485-488, 2001.

[10] A. W. Snyder, J. D. Love, Optical Waveguide Theory (Chapman and Hall Ltd, 1983).

[11] 이경식, "광섬유격자 가변장치," 10-2001-25608, 2001.

Mechanically induced long-period fiber grating devices and EDFA gain flattening

Ryun Kyung Kim, Joon Yong Cho, and Kyung Shik Lee†

School of Information and Communications Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 440-746, KOREA

†E-mail: kslee@skku.ac.kr

(Received July 26, 2002, Revised manuscript January 2, 2002)

For the first time to our knowledge we have developed compact mechanically-induced long-period fiber grating devices which have an excellent tunability in the center wavelength and the depth of the notch. The compactness and ease to tune allow us to include them in other optical devices or systems. The devices were characterized by measuring their transmission spectra with different grating periods and applied pressures. We have also demonstrated the EDFA gain flattening using the mechanically-induced long-period fiber grating devices.

Classification code : FO.010.