

## 광섬유격자의 원리와 특성

이 병 하  
(광주과학기술원 정보통신공학과)

광섬유격자의 형성 원리와 제작 방법에 대하여 알아 본다. 광섬유격자는 그 격자 간격에 따라 단주기와 장주기로 구분되는데 격자 주기에 따른 제작 방법과 동작 원리 등을 실험 결과를 통하여 고찰한다. 센서 시스템과 광통신 용 소자로서 광섬유격자가 활발히 연구되고 있는데 각 응용에 대한 작동 원리 등을 살펴본다.

광섬유격자는 1978년 캐나다의 K.O. Hill에 의하여 처음으로 제작되어 아르곤 레이저의 공진기 거울로 사용되었다. 통상의 광섬유는 순수 실리카로 이루어진 클래딩과 Ge이도핑된 코어로 이루어져 있는데 244nm 근처의 자외선을 조사하면 코어의 굴절률이 약간 증가한다 [1]. 이는 도핑된 Ge으로 부터 야기된 defect의 영향으로 주로 해석 된다. 그러나 아직 받아 들일만한 정확한 설명이 제시되어 있지 않고 다만 광섬유의 광민감성으로 불려지고 있는데 주로 광섬유 격자를 만드는데 사용되고 있다. 광민감성에 영향을 주는 재료로는 germanium이외에도 boron, nitrogen, tin, antimony 등이 있다 [2].

광섬유격자란 광섬유의 길이 방향으로 위상 격자 (phase grating)를 만들어준 소자를 말한다. 격자 형성을 위하여 최근에 광섬유의 직경을 주기적으로 변조시키는 방법이 소개 되었지만 주로 광섬유의 광민감성을 이용하여 광섬유의 코아에 격자를 만드는 방법이 사용된다. 즉 광섬유의 측면을 주기적인 패턴을 갖는 UV레이저 빔에 노광시켜 광섬유 코아에 같은 주기의 굴절률 변화를 야기시킨다. 격자의 간격, 또는 주기에 따라 격자의 특성과 노광 방법이 달라진다.

격자의 특성을 알기 위하여 먼저 광섬유상에서 격자의 역할을 고찰해볼 필요가 있다. 통상의 격자는 입사된 백색 광을 그 파장에 따라 여러 방향으로 회절 시킨다. 그러나 입사빔이 단일 파장일 경우 회절된 빔도 한 방향으로 진행하는데 그 회절각이 입사빔의 파장과 격자의 주기에 의하여 결정된다. 단일모드 광섬유에서는 광섬유 코아를 따라 도파할 수 있는 코아모드가 하나이다. 그러므로 코아모드만을 생각할 때, 단일모드 광섬유에 만들어진 격자는 한 방향으로 진행해오던 코아모드 빔을 회절시켜 반대방향으로 진행하게 하는 역할을 한다. 그러나 격자에 의한 회절은 파

장의 함수이므로 역방향으로의 결합은 특정파장 주변에서만 가능하다. 수학적으로 보면 공진파장은 격자주기를 왕복하는 빔이 느끼는 광학거리로 주어진다. 그러므로 광통신 대역의 중심파장이 1.5 $\mu$ m 근방일 때 격자주기는 0.5 $\mu$ m 근방으로 주어진다 [3]. 이처럼 짧은 격자주기로 인하여 코아모드를 반대로 진행하는 코아모드로 결합 시키는 격자를 단주기 광섬유격자 또는 FBG (Fiber Bragg Grating) 이라고 부른다.

공진파장을 원하는 위치로 움직이기 위해선 단순히 격자의 주기를 바꾸어 주면 된다. 그러나 격자주기가 짧기 때문에 격자의 제작이 용이하지 않다. 광민감성을 이용하여 단주기 광섬유격자를 만들 때 일반적으로 그림 1에 나타낸 바와 같이 위상마스크 (phase mask)를 사용하는 방법을 쓴다. 원하는 격자 주기보다 2배의 주기를 갖는 홈을 실리카 유리 위에 만들어 준 위상마스크에 엑시머 레이저 등에서 나온 자외선 레이저 빔을 조사하여 준다. 마스크를 통과한 빔은 회절에 의하여 각각의 모드로 진행하게 되는데 이때 마스크에 새겨진 홈의 깊이를 적당히 조절하면 0차 모드의 세기를 감소시켜 +1차와 -1차 모드 빔간의 간섭무늬를 형성시킬 수 있는데 이 간섭 무늬에 광섬유를 넣어주면 단주기 광섬유격자가 만들어 진다 [4]. 이 방법은 격자 제작이 간단, 용이 하나 격자 주기가 마스크의 주기로 결정 되는 결정적인 단점이 있다. 자유로운 격자 주기의 조절을 위해

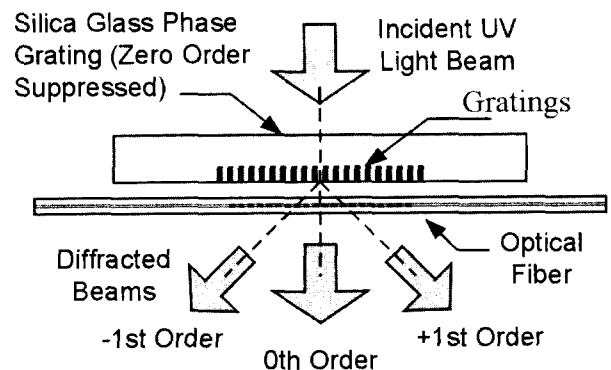


그림 1. 위상마스크를 이용한 단주기 광섬유격자 제작도.

선 광분과기 (beam splitter)를 사용하는 통상의 간접계를 이용하는 데 간접계 구성이 어렵고 진동등에 약하다 [5].

그림 2은 제작된 단주기 광섬유격자의 투과 스펙트럼이다. 1550 nm 근처에 0.6nm 정도의 폭을 갖는 stop band를 볼 수 있다. 이 stop band는 광섬유격자가 해당 파장의 빛을 반대 방향으로 회절 시켜서 형성된 것으로서 소자의 반사 스펙트럼에서는 강한 투과 밴드로 나타난다.

전술한 바와 같이 단주기 광섬유격자의 공진파장은 격자의 주기와 광섬유 코어모드의 유효굴절률과의 곱으로 나타나는데 이는 소자에 가해진 스트레인, 압력, 온도 등의 변화에 따라 변한다. 이를 이용하면 대형 토목, 건축 구조물에 사용할 수 있는 정교한 센서를 만들 수 있어 널리 연구되고 있다 [6]. 광섬유격자를 이용한 센서시스템의 장점으로는 전자파 간섭이 없고, 부피가 작아 구조물에 영향을 주지 않으며, 콘크리트 등 복합 구조물 내부에 설치가 가능하다는 것 등이다. 특히 일반 광통신에서 사용하는 파장분할 또는 시분할 방식을 채택하면 하나의 광섬유로 여러 곳의 변화를 동시에 측정할 수 있어 기존의 센서가 할 수 없었던 다양한 기능을 부과할 수 있다.

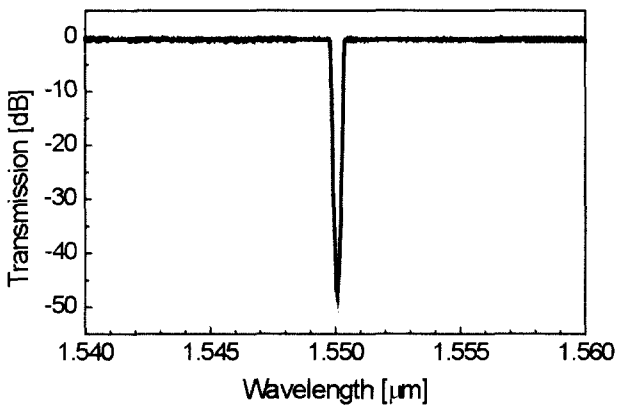


그림 2. 제작된 단주기 광섬유격자의 투과 스펙트럼.

단주기 광섬유격자는 광통신에서도 널리 응용되고 있는데 대표적인 예로서 색분산 조정기 (dispersion compensator)를 들 수 있다 [7]. 광섬유 증폭기의 등장으로 전기적으로 증계되지 않은 광신호를 수백 km이상 전송할 수 있는데 이런 장거리 광통신을 가로막는 결정적인 요인이 광섬유의 색분산이다. 하나의 광신호는 시간적으로 짧은 펄스로 주어지지만 그 펄스를 구성하는 빛의 파장군은 펄스 폭이 좁을수록 넓다. 또한 광섬유를 통과하는 빛의 속도는 빛의 파장에 따라 다르다. 일반적인 광섬유는 장파장을 갖는 빛의 속도가 단파장을 갖는 것에 비하여 전파속도가 빠른 분산 특성을 가지고 있다. 그러므로 광 펄스가 광섬유를 따라 진행할 때 진행거리가 멀어 질수록 시간상에서 펄스의 폭이 넓어지는 분산이 일어나게 된다. 이를 보상해 주기 위하여 그림 3과 같은 구조를 갖는 분산보상기가 활발히 연구되고 있다. 하나의 단주기 광섬유격자에 주기가 거리에 따라 선형으로 변하는 취핑 (chirping)을 주면 입사하는 빛의

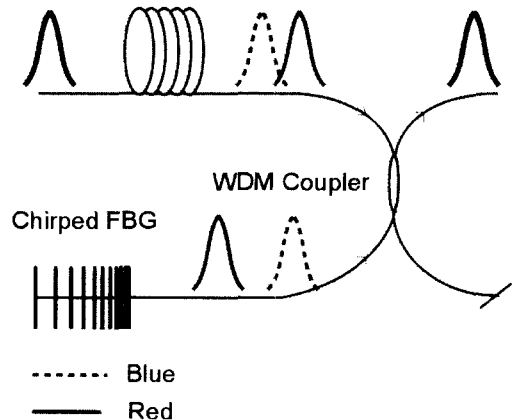


그림 3. 취핑된 단주기 광섬유격자를 이용한 분산 보상기의 개념도.

파장에 따라 반사되는 위치가 다르므로 원하는 분산을 얻을 수 있다. 이 분산을 광섬유에 의하여 야기된 분산과 반대되는 방향으로 조정해 줌으로써 분산보정이 이루어진다.

단주기 광섬유격자에 비하여 장주기 광섬유격자는 그 주기가 수백  $\mu\text{m}$ 로 크다. 단주기 격자가 코어모드간의 결합을 야기함에 반하여 장주기 격자는 코어모드를 같은 방향으로 진행하는 클래딩모드로 결합시키는 역할을 한다. 결합된 클래딩모드는 일반적으로 클래딩 외곽의 코팅 층에 산란 또는 흡수되어 다시 코어모드로 돌아오지 못하므로 소자의 투과 스펙트럼에 손실 밴드를 형성한다. 또한 단주기 격자는 달리 반사 스펙트럼에는 아무런 빛도 나오지 않는다 [8].

장주기 격자는 그 격자 간격이 넓어 주로 세기마스크 (amplitude mask)를 이용하여 만드는데 그 개념도를 그림 4에 나타내었다. 즉 마스크의 뚫린 부분만 레이저 빔을 통과시키는 간단한 원리를 이용한다. 또한 넓은 격자 간격은 집속된 레이저 빔을 이용하여 격자를 하나씩 만들어 나가는 step-by-step 방식을 가능하게 한다. 그러나 같은 길이의 격자를 볼 때 장주기 격자를 구성하는 각각의 격자 수가 단주기 격자에 비하여 현저히 (100배 정도) 적으므로 손실 밴드의 폭이 수십 nm 정도로 커진다.

그림 5는 제작된 장주기 격자의 투과스펙트럼이다. 삼성의 단일모드 광섬유에 500  $\mu\text{m}$  주기의 격자를 20 mm 길이로

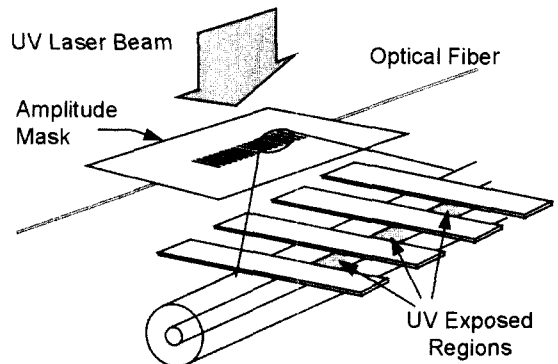


그림 4. 세기마스크를 이용한 광섬유격자의 제작도.

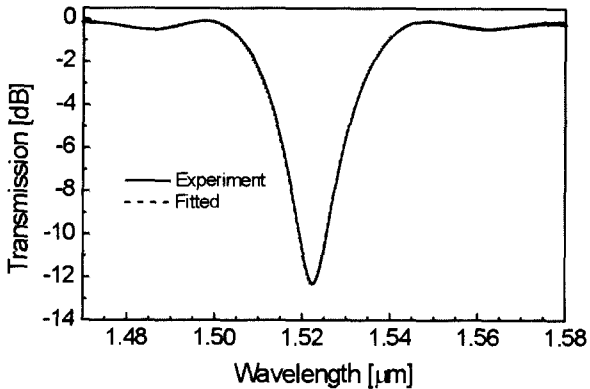


그림 5. 제작된 장주기 광섬유격자의 투과 스펙트럼. 점선은 계산에 의한 결과로서 실험 결과와 선폭 이내로 잘 맞는다.

KrF (248 nm)를 사용하여 만들었다. 손실 밴드의 중심파장은 1523 nm 이고 폭은 20 nm 정도이다. 밴드의 양쪽으로 작은 밴드를 볼 수 있는데 이는 격자의 전체 모습이 사각형으로 이루어져서 생긴 결과 (side lobe)로 가우시안 형태의 apodization을 해 주면 그림 2의 경우처럼 제거할 수 있다.

장주기 광섬유격자는 단주기에서처럼 센서나 필터로 사용되고 있는데 특히 넓은 손실 밴드 폭을 이용한 광섬유 증폭기 용 이득평탄화 필터로 활발히 응용되고 있다 [9]. 잘 알려진 EDFA, 즉 erbium을 도핑한 광섬유로 제작한 증폭기는 그 증폭률이 파장에 따라 다르다. 이는 erbium의 물질 특성에 의한 것으로 장거리 광통신에서 연속하여 사용할 경우 이득차이가 누적되어 문제를 발생한다. 이의 해결책으로서 과도한 이득을 제거해 주는 손실 필터를 생각할 수 있는데 장주기 광섬유격자의 손실 스펙트럼이 이와 비슷하다. 보다 넓은 평탄화된 이득 영역과 보다 균일한 평탄 이득을 얻기 위하여 여러 개의 장주기 광섬유격자를 연속하여 사용하기도 한다. 그림 6은 장주기 광섬유격자를 사용하여 EDFA의 이득을 평탄화 시키는 방법을 설명하는 개념도이다. 그림 아래 쪽에 평탄화된 EDFA의 이득 곡선을 나타내었다.

일반적으로 장주기 격자에 의하여 결합된 클래딩모드는 다시 코아모드로 돌아오지 못하고 손실로 처리되지만 같은

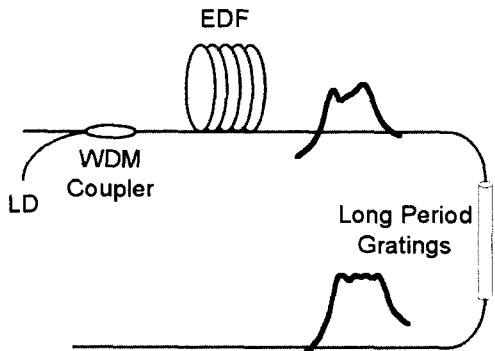


그림 6. 장주기 광섬유격자를 사용한 EDFA 용 이득평탄화 필터의 개념도.

격자를 만나면 코아모드로 돌아와 간섭을 일으키게 된다. 이를 이용하면 그림 7과 같은 가장 간단한 형태의 마젠더 간섭계를 구성할 수 있다 [10]. 즉 첫번째 격자에 의하여 각각 코아와 클래딩 모드로 결합되어 도파 되어온 두 빔이 두번째 격자를 지나면서 만나 간섭을 일으킨다. 이 때 간섭 무늬는 각 모드의 세기 비와 도파 되어온 광학거리에 의하여 주어진다.

그림 8은 제작된 장주기 격자 쌍의 투과 스펙트럼이다. 싸인 함수 형태의 전형적인 간섭무늬를 볼 수 있는데 중심에서 밖으로 벗어 날수록 contrast가 감소함을 볼 수 있다. 이는 격자 하나의 클래딩모드 결합률이 공진과장에서 멀어질수록 감소하기 때문이다. 간섭무늬의 간격은 광섬유 간의 도파 거리가 같으므로 모드에 따른 유효 굴절률의 차이와 두 격자간의 거리의 곱으로 주어진다 [11,12]. 그러므로 이 간섭무늬의 위치와 간격 등을 조사하면 광섬유의 분산특성에 대한 정보를 상당히 정확히 얻을 수 있다 [13]. 또한 광섬유 코아나 클래딩 모드의 유효굴절률 변화가 간섭무늬의 변화 (주로 이동)로 나타나므로 이를 이용하면 여러 물질의 광학특성 측정이 가능하다. 예로서 광섬유 코아의 광민감성 측정을 위하여 장주기 격자 쌍 사이에 UV 빔을 조사하면서 간섭무늬의 이동을 측정하면 UV에 의하여 야기된 코아의 굴절률 증가를  $10^{-5}$  이상의 해상도로 측정할 수 있다 [14].

광섬유 클래딩모드의 유효굴절률은 클래딩 외곽에 코팅된 물질의 굴절률에 의하여 영향을 받고 이는 격자 쌍의 간섭무늬 변화로 나타난다. 이를 이용하여 액상 물질의 굴절률을 측정할 수 있다 [15]. 금속의 경우 그 굴절률이 복소수로 주어진다. 이를 코팅 재료로 사용할 경우 유전체 물질

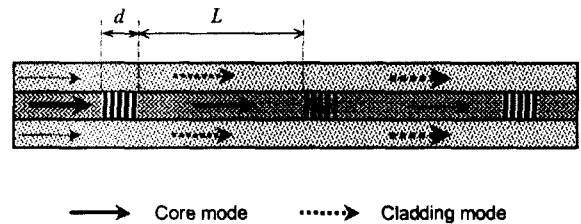


그림 7. 두개 이상의 장주기 광섬유격자를 이용한 마젠더 간섭계의 구성도.

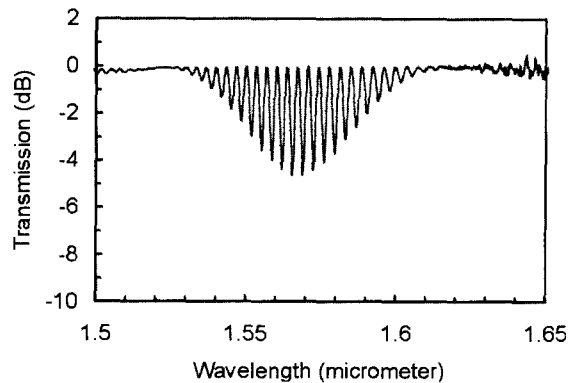


그림 8. 장주기 광섬유격자 쌍의 투과 스펙트럼.

에서 볼 수 없는 간섭무늬 변화를 볼 수 있는데 이를 이용하여 금속의 굴절률을 계산해 내는 연구 결과가 보고되었다 [16].

장주기 광섬유격자 쌍의 간섭무늬를 이용한 다파장 레이저가 보고 되었는데 이는 싸인 형태의 간섭무늬를 다중 채널 필터로 사용하여 가능했다 [17]. 그러나 이 경우 필터의 finesse가 2로 고정되는 단점이 되는데 이를 중대 시키기 위해선 3개 이상의 격자를 일정한 간격을 두고 연이어 만들어 주는 방법이 제안되었다 [18]. 그림 9는 3개의 장주기 광섬유격자를 사용하여 제작된 소자의 투과 스펙트럼이다. 좁고 강한 피크 사이에 하나의 얇은 피크를 볼 수 있다. 이때 격자의 수를 N 개로 하면 N-2 개의 얇은 피크가 얻어 지는데 그만큼 소자의 finesse가 증가된다 [19].

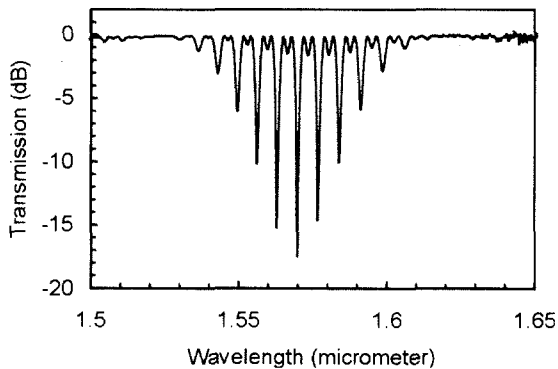


그림 9. 장주기 광섬유격자 3개를 일정 간격으로 하여 만들어진 소자의 투과 스펙트럼.

요약하면 광섬유격자는 광섬유의 길이방향으로 주기적인 굴절률 변화를 형성시켜 격자를 만들어준 소자를 말한다. 격자의 주기에 따라 단주기, 장주기 광섬유격자로 분류된다. 단주기 격자는 주로 위상 마스크를, 장주기격자는 세기마스크를 사용하고 광섬유 코어의 광민감성을 이용하여 UV 레이저로 만들어진다. 두 종류의 격자 모두 센서와 광통신용 필터 소자로서 활발히 연구되고 있다. 대표적인 응용으로 단주기 광섬유격자는 분산보상기에, 장주기 격자는 이득평탄화에 사용된다. 장주기 광섬유격자를 여러 개 사용하여 만든 간섭계로 광섬유에 대한 색분산, 코어의 광민감도, 코팅물질의 굴절률 등을 측정한다.

본 연구는 광주과학기술원 UFON의 ERC, 과학기술부 중점국가연구개발사업, BK-21 사업의 일부 지원에 의한 것입니다.

#### 참 고 문 헌

[1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, vol.32, no. 10, pp. 647-649, 1978.  
 [2] K. Oh, P. S. Westbrook, R. M. Atkins, P. Reyes, R. S. Indeler, W. A. Reed, T. E. Stockert, D. Brownlow,

and D. DiGiovanni, "Observation of rapid, thermally stable UV photosensitive response in an Sb doped optical fibre", BGPP, PD2-1,2, 2001.  
 [3] T. Erdogan, and J. E. Sipe, "Tilted fiber phase gratings", *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, no. 2, pp. 296-313, 1996.  
 [4] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask" *Appl. Phys. Lett.* vol. 62, no. 10, pp. 1035-1037, 1993.  
 [5] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method", *Opt. Lett.* vol. 14, no. 15, pp. 823-825, 1989.  
 [6] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, and K.P. Koo, "Fiber grating sensors", *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1463, 1997.  
 [7] J. F. Brennan, E. Hernandez, J. A. Valenti, P. G. Sinha, M. R. Matthews, D. E. Elder, G. A. Beauchesne, and C. H. Byrd, "Dispersion and dispersion-slop correction with a fiber Bragg grating over the full C-band", OFC, pp. PD12-1,2, 2001.  
 [8] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, and J. E. Sipe, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Lightwave Technol.*, vol.14, no.1, pp.58-64, 1996.  
 [9] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, and P. J. Lemaire, "Long-period fiber-grating-based gain equalizer," *Opt. Lett.*, vol.21, no.5, pp.336-338, 1996.  
 [10] E. M. Dianov, S. A. Vasiliev, A. S. Kurkov, O. I. Medvedkov, and V. N. Protopopov, "In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings," *Proc. European Conf. Optical Communication*, pp.65-68, 1996.  
 [11] B. H. Lee, and J. Nishii, "Dependence of fringe spacing on the grating separation in a long-period fiber grating pair," *Applied Optics*, vol.38, no.16, pp.3450-3459, 1999.  
 [12] B. H. Lee, and J. Nishii, "Bending sensitivity of in-series long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, vol. 23, no.20, pp.1624-1626, 1998.  
 [13] B. H. Lee, Y. J. Chung, W. T. Han, and U. C. Paek, "Dispersion measurement using fiber gratings," *Proc. Conf. on Optical Fiber Communications*, pp. WB5-1-WB5-3, 2000.  
 [14] T. J. Ahn, B. H. Kim, B. H. Lee, Y. J. Chung, U. C. Paek, and W. T. Han "Measurement of refractive index change upon UV irradiation of optical fiber

- using a LPG pair”, OECC '2000, pp. 276-277, 2000.
- [15] 김동희, 정재희, 김영재, 홍인기, 정영주, 한원택, 백운출, 이병하, “Effective cladding mode index variation of a long-period fiber grating”, COOC, pp. 1600-1602, 2000.
- [16] S. J. Lee, Y. G. Seo, Y. J. Kim, Y. J. Chung, W. T. Han, U. C. Paek, and B. H. Lee, “The effect of metal coating on long-period fiber gratings”, OECC '2001, pp. 112-113, 2001.
- [17] 이진형, 오승태, 한영근, 한원택, 백운출, 정영주, “장주기 격자쌍 다채널 필터를 이용한 다파장 광섬유 레이저”, 한국광학회 하계학술발표대회, pp. 138-139, 2001.
- [18] B. H. Lee, and J. Nishii, “Notch filters based on cascaded multiple long-period fiber gratings,” *Electron. Lett.*, vol.34, no.19. pp.1872-1873, 1998.
- [19] B. H. Lee, Y. J. Kim, Y. Chung, W. T. Han, and U. C. Han, “Analytic solution for cascaded long-period fiber gratings”, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E84-B, No. 5, pp. 1247-1253, 2001.