
단주기 광섬유 격자(Fiber Grating)와 장주기 광섬유 격자의 온도 의존성 비교

최보훈*

Comparison of temperature dependance between short and long period fiber gratings

Bo-Hun Choi*

이 논문은 동아대학교 연구비를 지원받았음

요 약

가우스 광분포를 가지는 KrF 엑시머 레이저와 위상마스크를 이용해 3dB 파장 선포이 0.7 nm인 단주기 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating)가 제작되었고, 이 격자의 파장에 따른 삽입 손실이 단일파장 광원과 cutback방식을 이용해 측정되었다. 이 격자의 온도 의존성을 확인하기 위해 -10 °C ~ 70 °C 범위에서 중심 파장의 변화를 측정하였는데 0.01 nm/°C를 얻었으며 이 값은 온도 변화 방향과 무관하였다. 진폭마스크를 이용해 3 dB 선포이 14.22 nm인 장주기 격자도 제작되었으며 이 경우는 같은 온도 범위에서 0.044 nm/°C로 단주기 격자에 비해 온도 의존성이 4배 이상 컸다. 장주기 격자는 광섬유 코팅의 존재 여부도 온도 변화에 큰 영향을 미쳤다.

ABSTRACT

An optical fiber short period grating of 0.7 nm as a 3 dB wavelength linewidth was fabricated using a Gaussian distributed KrF Eximer laser and a phase mask. This grating has temperature dependancy of 0.01 nm/°C over the range of -10 °C ~ 70 °C and no difference between temperature directions. An optical fiber long period grating of 14.22 nm as a 3 dB linewidth was also fabricated using a amplitude mask and has dependancy of 0.044 nm/°C over the same range.

키워드

광섬유 격자, 단주기 광섬유 격자, 장주기 광섬유 격자, 엑시머 레이저, 위상 마스크

Key word

Optical fiber grating, short period grating, long period grating, Eximer laser, phase mask

I. 서 론

게르마늄(Ge)이 첨가된 광섬유 코어는 240 nm 근처의 파장 광선에 노출될 때 굴절율이 증가하는데 이 성질을 이용하여 광섬유에 주기적인 굴절을 변화를 형성시켜 광섬유 격자(Fiber Grating; FG)를 얻게 된다[1]. 최근 광섬유격자는 광통신 및 광센서 분야 등에서 응용 범위가 넓어지고 있는데 특히, 1550nm 대역 광섬유격자는, 기존에 포설되어 있는 표준형 단일 모드 광섬유를 근간으로 하는 광전송시스템에서의 응용을 위해 다양하게 연구 개발되고 있다. 예를 들어 파장 반사 필터, 이득 평탄화 필터, 광원 안정화 장치 등으로 사용되고 또한 고속 DWDM (dense wavelength division multiplexing) 전송에서 다양한 변조포맷 생성을 위해, Optical Add/Drop Multiplexer로, 분산보상기 및 EDF 광섬유증폭기/레이저 등에서도 다양하게 응용되고 있다 [2].

광섬유 격자는 특성에 따라 분류가 가능한데 대표적인 것이 굴절을 변화 주기의 간격이 마이크로 미터 단위의 단주기 격자와 수백 마이크로 미터인 장주기 격자로 나누어 지는데 두 종류의 광섬유 격자는 큰 특성 차이를 보인다. 단주기 격자는 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating; FBG)라고도 불리는데 이 경우 광섬유를 따라 진행하는 빛의 파장이 다음 식의 Bragg 조건을 만족하는 경우 광섬유격자는 반사형 필터의 기능을 갖게 된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$$

여기서 λ_B 는 반사가 일어나는 파장, n_{eff} 는 반사되는 빛의 굴절율, Λ 는 광섬유격자의 주기를 나타낸다[3]. 제작 과정에서는 주로 격자의 굴절을 변조 주기를 조정함으로써 원하는 파장에서 반사를 일으키는 광섬유격자를 얻게 되며 좁은 선폭 특성을 가지게 된다. 장주기 격자는 격자 주기에 맞는 파장의 빛을 광섬유 코어 밖으로 결합시켜서 반사 없이 감쇄만 일으키는 특성을 가지고 있다. 광섬유 격자의 제작 기술은 크게 홀로그래피 방식과 마스크 방식으로 나누어지는데 홀로그래피 방식은 굴절을 주기를 임의로 조정 가능하지만 제작상의 어려움이 있고 마스크를 이용한 광섬유격자 제작방식은 마스크의 주기에 의해 결정되는 광섬유 격자의 중심파장을 변경하기 어려운 단점이 있지만 제작 과정이 외부 환경에 덜 민감해 상대적으로 격자의 제작이 용이하고 재현성이 높은 장점이 있다[4].

본 논문에서는 가우스 광분포를 가지는 KrF 엑시머 레이저 빔과 위상마스크를 이용하여 단주기 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating)를 제작하고 제작된 광섬유의 삽입손실 특성, 온도 의존성 등이 분석된다. 비교를 위해 진폭마스크를 이용하여 장주기 광섬유 격자 또한 제작되고 제작된 광섬유 격자의 광학적인 특성과 온도 의존성이 분석된다. 또한 장주기 격자에서 광섬유 코팅의 존재와 온도 영향의 관계도 조사된다.

II. 실험 장치

광섬유 격자를 제작하기 위한 실험 장치도가 간략하게 그림 1에 주어져 있다. KrF 가스를 사용하는 엑시머 레이저(Lambda Physik사)의 파장은 248 nm이고 펄스의 시간폭은 25 nsec 이며, 사용되는 에너지 영역은 0.1-1 J/cm² 이다. 반사경에 의해 수직으로 방향을 바꾼 빔은 planoconvex cylindrical 렌즈(초점 거리는 30 cm)에 의해 평행 광이 된다.

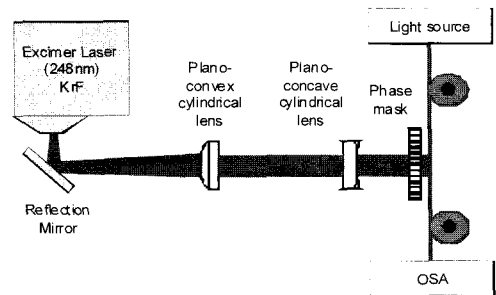


그림 1. 광섬유 브래그 격자 제작 장치도
Fig. 1. the experiment setup

이후 planoconcave cylindrical 렌즈에 의해 광섬유의 길이 방향으로 선 초점을 맺게 한다 (이 Concave cylindrical 렌즈는 경우에 따라 선택적으로 사용되었다.). Cylindrical 렌즈를 지난 레이저는 마스크를 거쳐서 광섬유에 레이저가 도착하게 된다. 레이저 빔의 좌우 조정은 반사경의 각도를 이용하였고 제작 장치의 정렬 기능을 높이기 위해 반사경과 렌즈, 마스크와 광섬유의 지지대들이 모두 같은 레일에 놓여 있도록 했으며 이들을 지지하는 홀더들의 위치를 통해 상대적인 거리를 조정

하였다. 빔의 높이 변화에 따른 정렬을 위해 개별 광 부품 홀더들은 높이 조정이 가능하도록 했다. 이들 광 부품들을 모두 함께 진동 흡수 기능을 가진 광테이블 위에 위치시켜서 외부 진동에 영향을 받지 않도록 했다. 또한 평형자를 이용하여 광테이블의 높이 평형을 세심하게 맞추었다.

III. 실험 및 실험 결과

그림 1의 장치를 이용하여 광섬유 단주기 격자를 제작하였다. 격자를 위한 광섬유(Fibercore사)는 광통신용 표준광섬유보다 광감광도(Photosensitivity)가 향상된 광섬유로 코어 직경은 4 μm 이며 차단주파수(cutoff wavelength)는 1.4 μm 이다. 사용되는 광섬유의 폴리머 피복은 CH_2Cl_2 용액에 담구어 최소한 5cm 길이 이상 제거한 뒤 광섬유의 클래딩이 마스크에 직접 밀착되도록 하였다. 마스크는 회절빔의 간섭을 이용하기 위해 위상마스크(Ipsen사)가 사용되었는데 1.072 μm 주기를 가진다. 위상 마스크의 정확한 위치를 위해 가시광선인 HeNe 레이저를 보조적으로 사용하여 위상마스크와 광섬유를 평행하도록 정렬하였다.

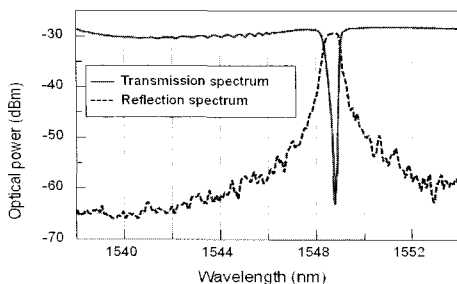


그림 2. FBG의 반사와 투과 스펙트럼
Fig. 2. Transmitted and reflected spectra of the fabricated fiber Bragg grating

그림 2는 그림 1의 실험 장치를 통해 제작된 단주기 광섬유 격자의 투과 스펙트럼과 반사 스펙트럼으로 각각은 실선과 점선으로 구분하여 나타내었다. 투과 스펙트럼은 광섬유 격자를 지난 광원의 변화를 측정함으로써 얻을 수 있으나 반사 스펙트럼은 스펙트럼을 측정하기

위한 입사광과 광섬유 격자 사이에 광세기 커플러를 두어 광섬유에 의해 반사된 빛이 입력광과 다른 단자를 통해 출사되는 빛을 측정하는 것이다. 이때 커플러에 의한 광세기 손실은 보정되었다. 반사율은 투과 스펙트럼을 통해 알 수 있는데 피크 값은 파장 1548.8 nm에서 -35.1 dB의 값이었으며, 이는 최고 반사율이 99.9% 이상임을 의미한다. -3 dB 반사 선포는 0.7 nm이고 -20 dB 반사 선포는 2.47 nm였다. 이 스펙트럼의 단파장 쪽을 살펴보면 피크에서 다소 떨어진 위치에 미세한 피크들이 있는 것을 알 수 있는데 이들은 광섬유 코어 내로 반사되는 피크가 아니라 클래딩 모드로 결합되는 광신호의 결과로 순수히 광신호 감쇄로서만 작용한다[5].

그림 2에서 투과 스펙트럼과 반사 스펙트럼 측정을 위해 광역 광원 (broadband light source)인 EDFA (erbium-doped fiber amplifier)의 ASE (amplified spontaneous emission)가 사용되었고 광섬유 격자를 거친 광은 광 스펙트럼 분석기 (optical spectrum analyzer)로 측정되었다. 이 스펙트럼은 전체 파장에 따른 특성을 잘 보여주지만 스펙트럼 측정 상의 측정 오류나 ASE 광원의 세기 안정성이 다소 부족한 점을 고려할 때 파장에서 절대값의 정확성을 검증할 필요가 있다. 이를 위해 몇몇 파장 위치에서 광섬유 격자의 삽입 손실이 측정되었다. 이때 사용된 장치로서 광섬유로 입력되는 광원은 파장 정확도가 0.001 nm 이하인 단일 파장 레이저 광원인 파장 가변 레이저 (tunable light source)가 이용되었고 광섬유를 거친 광원은 광수신기 (power meter)로 세기를 측정하였다. 광섬유에서의 측정 방법은 cutback 방식을 이용하여 용착 접합점에 의한 손실이나 출력 포트의 상태가 광섬유의 삽입 손실에 영향을 미치지 못하도록 하였다.

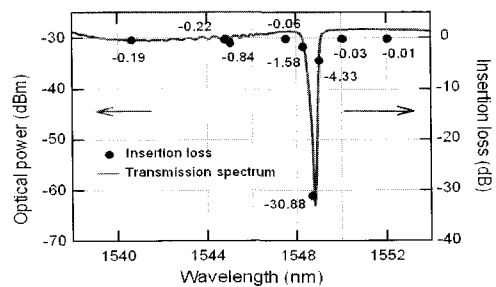


그림 3. 투과 스펙트럼과 삽입 손실 측정값의 비교
Fig. 3. Comparison between transmission spectrum and insertion loss

이 같이 측정된 여러 파장 위치에서의 삽입손실 값들을 그림 2의 투과 스펙트럼과 겹쳐져 그림 3으로 나타내었다.

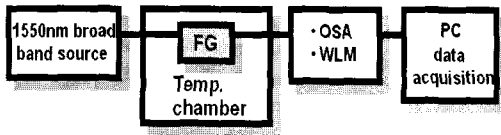


그림 4. FBG 온도 의존성 실험 개략도
Fig. 4. the experiment schematic for temperature dependence of fiber Bragg grating

그림의 좌변은 투과스펙트럼에 대한 수치를 나타내고 우변은 파장 가변 레이저를 이용하여 측정된 삽입손실에 대한 수치를 나타낸다. 광섬유 격자의 피크 밖에서는 삽입손실이 0.1 dB 이하였으며, 최고 반사율 파장 영역에서는 손실 값이 30 dB 이상임을 보여 준다. 삽입손실이 적은 영역이나 큰 영역 모두에서 전체적인 경향이 ASE로 측정된 값과 정확히 일치함을 알 수 있으며 ASE로 측정된 스펙트럼이 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

이 같이 제작된 광섬유 격자가 소자로 사용되기 위해서는 환경에 대한 특성 의존성을 파악하는 것이 중요한데 환경 의존성 중 제일 영향력이 큰 것은 온도의 의존성이다. 이를 측정하기 위한 장치가 그림 4에 설명되어 있다. 1550 nm 대역의 광대역 광원이 입사된 광섬유 격자를 온도 챔버 속에 놓고 온도를 변화시키면서 발생하는 변화를 광섬유 격자의 출력 단자 쪽에서 OSA와 파장측정기(wavelengthmeter; WLM)로 측정하였다. 이 측정 과정을 컴퓨터 프로그램을 통해 자동화시켜서 규칙적인 시간 간격으로 온도 변화에 따른 영향을 관측하였다.

그림 5는 -10 °C에서 70 °C까지 5 °C 간격으로 온도를 변화시키며 단주기 광섬유 격자의 투과 피크 파장을 측정 한 결과다. 각 측정 때마다 측정하기 전, 챔버 내의 온도가 변화한 후 안정화되는 시간을 충분히 갖기 위해 30분의 안정화 시간 후에 측정하였다. 그리고 측정은 온도에 대한 히스테리시스 특성이 있는지를 동시에 확인하기 위해서 온도 상승시와 하강시 모두에서 변화를 측정하였다. 그림에서 원형점은 온도가 올라가는 동안, 그리고 삼각형점은 온도가 내려가는 동안 측정된 결과로 피크 파장은 온도에 대해서 선형적인 변화를 가지는 것을 알 수 있으며 그 값은 0.01 nm/°C 였다. 0 °C 이하에서 온

도 변화의 방향에 따른 차이가 약간 보이지만 전체적으로는 오차 범위로 판단된다.

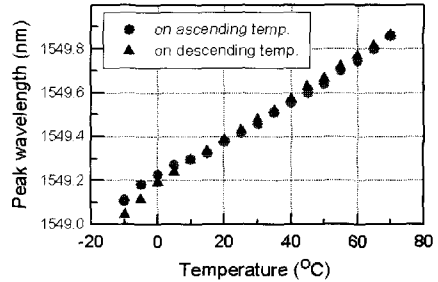


그림 5. 단주기 광섬유 격자의 온도에 따른 투과 스펙트럼의 파장 변화
Fig. 5. the wavelength shift of short period grating according to temperature variation

그림 5에서 OSA를 이용해 얻은 결과의 정확성과 측정 장치 의존성을 검증하기 위해, 온도를 내리면서 측정 한 결과에 대해서 WLM으로 측정 한 결과와 비교하여 그림 6에 나타내었다. 결과적으로 온도에 따른 중심 파장의 변화율은 차이가 없었지만 온도에 상관없이 두 측정 장치치는 0.1 nm의 파장 차이를 보여주었다. 이는 파장 측정에서 정확도가 높은 WLM를 기준으로 하였을 때 OSA의 절대 파장 측정이 0.1 nm 정도 오차가 있음을 의미하지만 파장의 변화 측정에는 문제가 없음을 알 수 있다.

특성 비교를 위해 장주기 격자도 제작되었는데 이를 위해서는 진폭마스크가 이용되었다. 사용된 광섬유는 Coming사의 Flexcore 1060 을 사용하였으며 제작 과정은 먼저 단주기 격자와 같은 방식으로 광섬유의 폴리머 코팅을 제거한다.

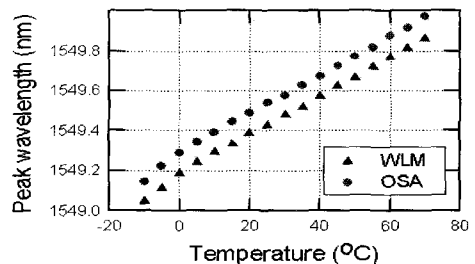


그림 6. 단주기 광섬유 격자의 온도 의존성 측정에서 OSA와 WLM의 측정 결과 비교
Fig. 6. Measurement comparison between OSA and WLM for FBG temperature dependency

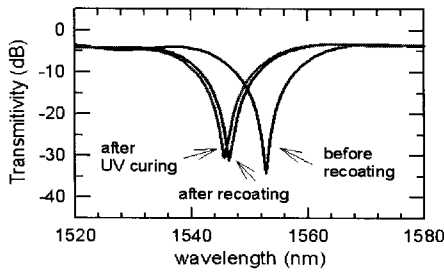


그림 7. LPG 투과 스펙트럼
Fig. 7. The transmission spectra of LPG

다음으로 장주기 격자 제작을 위한 광섬유의 광민감도를 향상시키기 위해 90°C 온도 조건과 100 atm 압력 조건에서 3일 이상 수소 처리하였다. Eximer laser 레이저로 격자를 세긴 뒤, 격자의 광학적 성질을 안정화시키기 위해 120°C 온도 조건에서 12 시간 이상 잔존하는 수소를 제거하는 annealing 과정을 거쳤다. 그림 7에 제작된 장주기 격자의 투과 스펙트럼들이 주어졌는데, 첫째는 장주기 격자는 세긴 뒤 annealing을 거친 후에 측정된 스펙트럼이고 두 번째는 벗겨진 폴리머 코팅을 복구하기 위해 폴리머 물질을 입힌 후 UV curing 전에 측정한 것이며, 세 번째는 폴리머 코팅 후 UV curing 한 후의 스펙트럼이다. 세 스펙트럼에서 중심파장은 1552.8 nm, 1546.4 nm, 그리고 1545.6 nm 로 중심 파장이 단파장 쪽으로 7.2 nm 이동한 것을 알 수 있다. 이는 광섬유의 크래딩을 감싸는 물질의 굴절률 값의 차이에 기인한 것이다. 단주기 격자인 경우 격자의 주기에 영향을 주는 것은 광섬유의 코어와 클래딩만이지만 장주기 격자는 클래딩 모드와의 결합으로 인해 폴리머 코팅의 여부와 이 코팅의 굴절률 상태가 영향을 미치게 된다. UV 코팅 후 3 dB 반칙폭의 선폭은 14.22 nm인데, 이 값은 그림 2 단주기 격자의 반칙폭에 비해 상당히 큰 것을 알 수 있고 이점이 또한 장주기 격자의 특징이다.

그림 8은 그림 7의 특성을 가지는 장주기 격자를 이용하여 그림 4와 같은 방법으로 측정된 장주기 격자의 온도 의존성 결과다. 온도 변화 범위, 온도 변화 간격과 시간 등의 실험 조건은 단주기 격자의 경우와 똑같이 하였다. 그림에서 원형 점들은 온도를 올리면서 측정된 것이고 삼각형 점들은 온도를 내리면서 측정된 것이다. 온도의 변화 방향에 대한 차이는 전혀 없었으며 온도에 따른 중심 파장의 이동 정도는 0.044 nm/°C 였다. 이 값은 단주기 격자의 4배 이상으로 장주기 격자가 온도 변화에 훨씬

민감한 것을 알 수 있다. 만약 높은 온도 민감성이 요구되는 응용인 경우 장주기 격자가 센서로서는 보다 적합한 것을 알 수 있다.

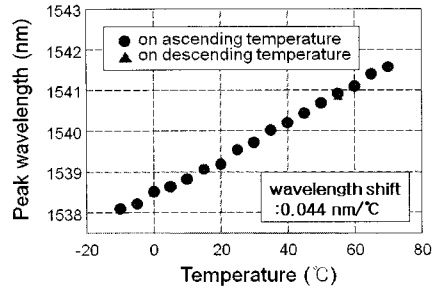


그림 8. 장주기 광섬유 격자의 온도에 따른 투과 스펙트럼의 파장 변화
Fig. 8. the wavelength shift of long period grating according to temperature variation

그림 9는 그림 8의 결과를 위한 측정 과정을 보여주고 있는데, 각 온도 측정시에 편차가 있긴 하지만 중심 파장 변화의 실시간 측정 과정을 잘 보여주고 있다. 수평 축은 온도의 변화가 발생하는 시간 흐름을 보여주는데 측정은 30초당 1회씩 측정되도록 자동 측정 프로그램을 설계하였다.

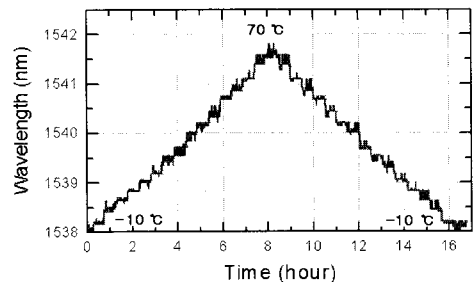


그림 9. 점진적인 온도 변화와 함께 연속 측정된 광섬유 격자의 중심파장의 변화
Fig. 9. continuous wavelength measurement of fiber grating according to temperature variation

광섬유 격자를 제작하는 과정에서 폴리머 코팅을 제거하고 다시 복원시키는 것이 여러 가지 중요한 의미를 갖는다. 이는 격자의 패키징의 일부가 되기 때문이다. 따라서 폴리머 코팅의 존재 여부가 장주기 격자에 온도의 존성에 어떤 영향을 주는지를 확인하는 것이 필요하다. 따라서 코팅을 복원한 후의 온도 의존성이 그림 9에서

주어져 있으므로 코팅이 없는 경우의 온도 의존성이 측정되었고 그 결과가 그림 10에 주어져 있다.

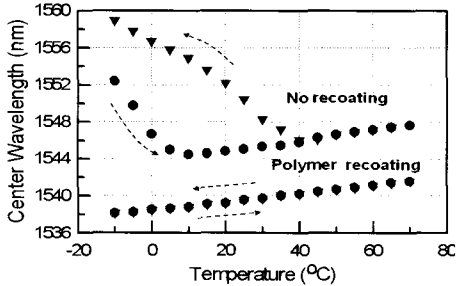


그림 10. 온도에 따른 중심 파장의 변화에 대한 광섬유 코팅의 영향

Fig. 10. wavelength shift effect with and without optical fiber coating

코팅이 없는 경우가 그림 속에서 위쪽 곡선으로 주어져 있다. 결과는 온도 변화에 따라 일정한 중심파장 변화를 보여주지 못했으며 특히 온도 하강시의 변화와 온도 상승시의 변화가 큰 차이를 보였다. 이는 폴리머 코팅이 있는 부분과 제거된 부분사이에서 온도 상승 시는 strain이, 온도 하강시에는 stress가 작용하여 광섬유 전자의 휨을 다르게 하기 때문이다. 장주기 격자는 엑시머 레이저에 의해 생성된 굴절률 변화의 주기가 단주기 격자에 비해 약 1000배 이상 커서 격자에 가해지는 strain이나 stress로 의한 물리적인 변화로 격자의 주기가 변하기 때문이다. 이 결과를 통해 장주기 격자에서 폴리머 코팅이 필수적임을 알 수 있다.

V. 결 론

가우스 광분포의 KrF 엑시머 레이저와 1.072 μm 주기의 위상마스크를 이용하여 3dB 선포이 0.7 nm 이고 최저 투과율이 -35 dB 이상인 단주기 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating)가 제작되었다. 제작된 광섬유 격자의 파장에 따른 삽입 손실을 단일파장 광원과 cutback 방식으로 측정하여 광역파장 광원으로 측정한 결과를 검증하였다. 이 광섬유의 온도 의존성이 측정되었는데 -10 °C ~ 70 °C 범위에서 0.01 nm/°C를 보였으며 이 값은 온도 변화 방향과 무관하였다. 장주기 광섬유 격자도 제작되었는데 3 dB 선포이 14.22 nm이며 최저 투과율이 -25 dB 이상이었다.

이 장주기 격자의 온도 의존성은 0.044 nm/°C로 단주기 격자에 비해 온도 의존성이 4배 이상 컸다. 광섬유 코팅이 복원된 장주기 격자는 온도 변화 방향에는 무관한 특성을 보였지만 광섬유 코팅이 없을 때는 이 같은 온도 변화 특성이 불안정하고 온도 방향에도 큰 영향을 받는 특성을 보였다.

참고문헌

- [1] A. Quintela, J. M. Lazaro, M. A. Quintela, C. Jauregui, J. M. Lopez-Higuera, "Fabrication of FBGs With an Arbitrary Spectrum," IEEE Sensors J., Vol. 8, No. 7, pp. 1287 - 1291, 2008.
- [2] T. L. Lowder, K. H. Smith, B. L. Ipson, A. R. Hawkins, R. H. Selfridge, S. M. Schultz, "High-Temperature Sensing Using Surface Relief Fiber Bragg Gratings," IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 17, No. 9, pp. 1926 - 1928, 2005.
- [3] E. G. Turitsyna, S. Xuewen, S. K. Turitsyn, I. Bennion, "Design and Fabrication of Fiber Bragg Gratings With V-Shaped Dispersion Profile," J. Lightwave Tech., Vol. 25, No. 2, pp. 606 - 611, 2007.
- [4] J. Poulin and R. Kashyap, "Novel Fabrication of Fiber Bragg Gratings Using Silicone Rubber Phase-Mask Stamp on the Cladding," J. Lightwave Tech., Vol. 27, No. 24, pp. 5602 - 5606, 2009.
- [5] S.R. Blais, and Y. Jianping, "Optical Single Sideband Modulation Using an Ultranarrow Dual-Transmission-Band Fiber Bragg Grating," IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 18, No. 21, pp. 2230 - 2232, 2006.

저자소개

최보훈(Bo-Hun Choi)



1992년 부산대학교 물리학 학사
2001년 8월 ICU 공학 박사
현재 동아대학교 부교수