

광섬유 응력측정을 이용한 CO₂ Laser로 제작된 LPFG 의 축 방향 비대칭 구조 분석 Non-axisymmetric Structure Analysis of CO₂ LPFG by measuring fiber stress anisotropy

류형숙*, 박용우, 한영근, 오승태, 정영주, 백운출, 김덕영
광주과학기술원 정보통신공학과
dykim@kjist.ac.kr

Abstract: A measurement of stress-induced anisotropy in LPFG fabricated by CO₂ laser and an analysis of birefringence by a perturbation method is used for demonstrating the contribution of non-axisymmetric stress distribution to the distortion of transmission spectrum. The experimental analysis shows that the nonsymmetric stress distributions are directly related to birefringence of respective modes in LPFG and it can give rise to the complicated spectrum distortion.

CO₂ Laser 노출에 의한 광섬유 잔류응력 해소 효과로 LPFG(Long Period Fiber Grating)를 만들면 감광성이 없는 광섬유에도 사용이 가능하고 노출 정도를 변화시켜 공명 파장을 조절할 수 있을 뿐 아니라, 높은 온도에서 안정성을 갖는다.[1][2] 그러나 광섬유 격자 제조 시 한 쪽 방향에서만 조사하였을 경우 비대칭이 생긴다는 것이 알려져 있으며,[3] 이 경우의 복잡한 spectrum은 코어와 클래딩 층의 비대칭 적인 굴절을 변화로 인한 것임이 제시되었다.[4] 이러한 비대칭에 의한 모드의 분리를 실험적으로 입증하기 위하여 잔류응력 측정장치로 얻어진 비대칭 응력 분포로부터, 모드가 분리되는 정도를 복굴절(birefringence) 값으로 구하고자 한다. 이를 위해 stress 측정 결과와 scalar 1D-FEM 으로 계산된 코어 및 클래딩 모드를 이용하여, 각 편광 모드들의 coupled equation 을 구성하고 계산하였다. 이로부터 격자에서의 각 모드들에 대한 복굴절(birefringence) 분포를 얻어내어 그 효과가 spectrum 의 왜곡에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

이러한 격자 구조는 radial 방향 뿐 아니라 방위(azimuthal) 방향으로도 비대칭이다. 이와 같은 응력의 비대칭과 기하학적인 변형에 의한 광섬유의 복굴절 정도를 결정하기 위하여, 방위 방향으로 대칭이면서 radial 방향으로 변하는 1차 vector mode 에 perturbation 을 가하는 방법을 사용하였다. 이로부터 비대칭으로 인해 분리된 mode fields 의 전파상수(propagation constants)의 변화값을 알 수 있다.[5] 본 논문에서는 기하학적으로는 대칭으로 가정하여 응력의 비대칭성만을 고려하였다.

Perturbed mode fields 를 두개의 degenerate 된 편광모드 e_1, h_1, e_2, h_2 의 선형 결합으로 가정, perturbed fields E, H 를 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 x_1, x_2 는 임의의 상수이다.

$$E = x_1 e_1 + x_2 e_2, \quad H = x_1 h_1 + x_2 h_2 \quad (1)$$

Maxwell's equation 과 vector mode 의 orthonormality 조건 을 이용하여 x_1 과 x_2 의 coupled equation 을 얻을 수 있다

$$db \sum_{i=1}^2 |x_i|^2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 D_{ij} x_i x_j^* \quad (2)$$

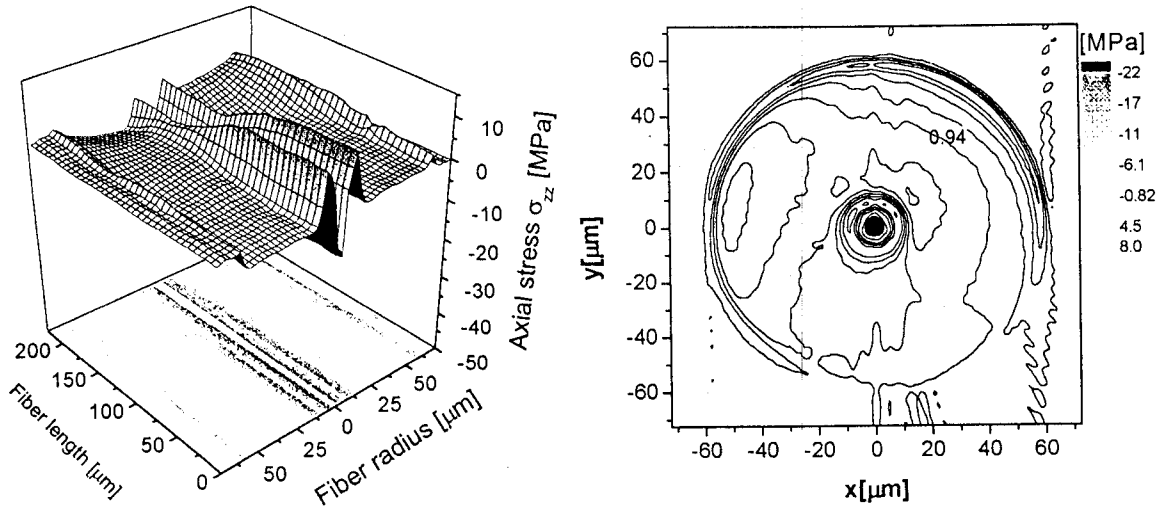
$$D_{ij} = w e_0 \left[\int_{q=0}^{2p} \int_{r=0}^{\infty} e_i^* \cdot de \cdot e_j r dr dq \right] / \left[\int_{q=0}^{2p} \int_{r=0}^{\infty} (e_i^* \times h_i + e_i \times h_i^*) \cdot u_z r dr dq \right] \quad (i, j) = 1, 2 \text{ 이다.}$$

여기서 db 는 전파상수의 변화량, de 는 perturbed 유전상수, w 는 각주파수, e_0 는 azimuthally symmetric permittivity 이다. 고유방정식 (2) 의 고유상수(eigenvalue) 는 전파상수의 변화량이며 이를 통해 비대칭 정도를 나타내는 복굴절 값 $B = (db_1 - db_2)/k$ 를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 식 (2)의 de 을 잔류응력 측정 장치를 이용, 광섬유 격자의 축 방향 z에 대한 비대칭 응력분포에 의한 perturbation 으로 고려하여 계산하였다.

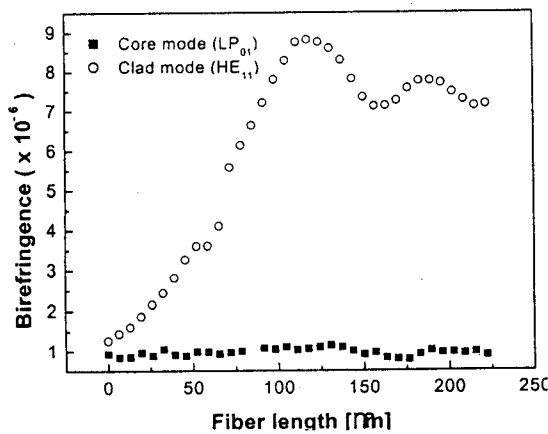
[그림 1]과 [그림 2]에서 잔류응력 측정 장치를 통해 얻은 격자의 응력분포가 축 대칭성을 갖지 않음을 확인 할 수 있다. 이러한 응력 분포 결과로 식 (2)를 통해 격자의 길이 방향으로 코어 모드의 LP₀₁ 모드와 클래딩 모드의 HE₁₁ 모드의 복굴절 분포를 얻었다.([그림3]) [그림1] 은 측정 시작 위치(0 μ m)로부터 격자의 길이방향으로 클래딩 부분의 비대칭 정도가 커지는 것을 보여준다. [그림3]에 보이는 바와 같이 격자의 길이 방향으로 클래딩 모드의 복굴절 값이 점차적으로 커지는 것을 통해, 격자의 비대칭성이 커짐에 따라 mode가 분리되는 정도가 커짐을 알 수 있다. 이는 격자구조를 만드는 주 요인인 응력해소의 비대칭성이 커질수록 스펙트럼 왜곡에 큰 영향을 미침을 설명한다. [그림4]는 이 광섬유 격자의 투과 스펙트럼을 보여준다. 공명 파장 옆의 작은 투

과 스펙트럼은 비대칭성에 의해 분리된 모드의 커플링에 의한 것으로 볼 수 있다.

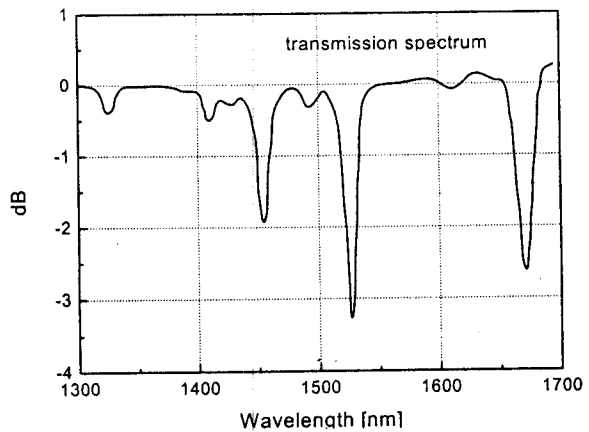
CO₂ 레이저로 조사된 광섬유 격자 잔류응력의 축 비대칭성이 투과 스펙트럼의 왜곡에 미치는 영향을 알아보기 위하여 광섬유 격자의 잔류응력 분포 측정 결과와 scalar 1D-FEM 으로 계산된 코어 및 클래딩 모드를 이용하여, 각 편광 모드들의 coupled equation 을 구성하고 이로부터 전파상수를 계산하였다. 이로부터 격자에서의 각 모드들에 대한 복굴절(birefringence) 분포를 얻어 냈으며 그 광섬유 격자의 길이방향으로의 복굴절 변화경향이 잔류응력의 축 비대칭성의 변화와 매우 일치함을 보였다. 이를 통해 응력의 비 대칭성이 스펙트럼에 왜곡을 줄 수 있음을 알 수 있었다.



[그림1] 광섬유 격자 축방향 응력분포 $\sigma_{zz}(r, 30^\circ, z)$ [그림2] 광섬유 격자 단면의 축방향 응력분포 $\sigma_{zz}(r, \theta, 183 \mu\text{m})$



[그림3] 광섬유 길이 방향으로의 코어 모드 LP₀₁과 클래딩 모드 HE₁₁의 복굴절 분포.



[그림4] CO₂레이저의 조사로 제조된 장주기 광섬유 격자의 투과 스펙트럼.

본 실험은 삼성전자(주) 광소재 사업부의 지원을 받아 수행되었습니다.

[1] D.D.Davis, T.K. Gaylord, E.N., Glytsis, S.G., Kosinski, S.C. Mettler and A.M. Vengsarkar, "Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂ laser pulses" Electron. Lett., Vol. 34, No. 3, pp302-303 (1998)
 [2] D.D.Davis, T.K. Gaylord, E.N., Glytsis, and S.C. Mettler, "CO₂ laser induced long-period fibre gratings", Electron. Lett., Vol.34, No. pp1416-1417 (1998)
 [3] A.M. Vengsarkar, Q. Zhong, D.Inniss, W.A.Redd, P.J.Lemaire, and S.G. Kosinski, "Birefringence reduction in side-written photoinduced fiber devices by a dual-exposure method" Opt. Lett., Vol.19, No.16, pp.1260-1262 (1994)
 [4] Yuki Kondo, Kentaro Nouchi, and Tsuneo Mitsuyu, Masaru Watanabe, Peter G. Kazansky, Kazuyuki Hirao, "Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses" Opt. Lett., Vol.24, No.10, pp.646-648(1999)
 [5] Dipak Chowdhury and David Wilcox, "Comparison Between Optical Fiber Birefringence Induced by Stress Anisotropy and Geometric Deformation" IEEE.J. Quantum Electronics., Vol.6, No. 2, pp227-232 (2000)