

광섬유의 잔류응력 측정 방법

박용우[†] · 백문철

반도체 원천기술연구소, 한국전자통신연구원
Ⓣ 305-350 대전광역시 유성구 가정동 161번지

진애경 · 백운출 · 김덕영

정보통신공학과, 광주과학기술원
Ⓣ 500-712 광주광역시 북구 오룡동 1번지

(2003년 1월 24일 받음, 2003년 4월 21일 수정본 받음)

광섬유의 잔류응력(residual stress)을 측정하기 위해 위상보정 편광기(polariscope)를 새롭게 구성하고, 간섭이나 회절에 대한 영향을 최소화시키면서 빠르고 정확하게 측정하는 방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하여 일반 광섬유의 잔류 응력 분포를 측정할 수 있었다. 또한 광섬유의 잔류응력이 모재의 잔류응력분포와 달리 인출 시 발생하는 광섬유 내 온도의 냉각곡선에 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수 있었다.

주제어 : fiber stress measurement, polariscope, photoelasticity.

I. 서 론

광섬유에서의 잔류 응력 분포 변화는 광섬유 격자 제작 과정에서 UV나 CO₂ 레이저 조사에 의한 굴절을 변화를 설명하는데 유용한 근거를 제시하기 때문에 과거 몇 년 동안 많은 주목을 받아왔다. 잔류 응력의 변화를 분석하는 것은 실리카에서 영구적인 굴절률변화의 주요한 요인 중의 하나인 UV 조사로 인한 유리 밀도 변화를 설명하는 중요한 근거를 제시하는 것으로 알려졌다. 또한 최근에 CO₂ 레이저를 이용한 장주기 격자 유도 과정은 광섬유 잔류 응력의 변화에 의한 복굴절 변화로써 설명되었다. 광섬유의 응력 측정은 이러한 기본 현상과 광섬유 격자 제작의 각각의 분포를 이해하는데 필수적이다. 투명 매질의 잔류 응력 분포를 결정하는 기본적인 방법은 고정된 편광자(polarizer), 1/4파판(λ/4 wave plate), 편광 분석기(analyzer)로 구성된 편광기(polariscope)를 이용하는 것이다. 이 편광기는 광섬유의 응력 분포를 결정하기에는 충분치 못한 것으로 알려져 있다. 그 이유는 측정의 정확도가 낮고, 광섬유 안에서 이미지나 파면의 찌그러짐, 광선의 편향, 비균질한 외부 복굴절 등에 의해 공간 분해능 및 정확도가 낮기 때문이다. 최근에는 'half-shade' 방법 및 더 정교화된 광학계를 사용함으로써 잔류 응력 측정의 정확도 및 분해능을 향상시켰고, 이를 통해 광섬유 잔류 응력 측정과 결과의 해석이 이루어졌다.^[1]

본 논문에서는 잔류 응력 분포를 측정할 수 있는 정확하면서도 간단하고 유용한 측정 방법을 제시할 것이다. 수광 다이오드 대신에 CCD 카메라와 frame grabber를 사용함으로써 측정 시간과 정확도를 크게 향상시킬 수 있었다. 편광 분석기

를 회전하는 대신 고정시킴으로써 그 고정 편광자를 광섬유에 매우 가깝게 위치할 수 있기 때문에 높은 공간 분해능을 얻을 수 있다. 실험 장치에서 회절과 간섭 효과는 비간섭 이미징 시스템에 의해 효과적으로 억제된다.

II. 이 론

광섬유나 모재와 같은 원통 대칭 구조의 잔류 응력 분포를 결정하는데 횡단 측정을 일반적으로 사용한다. 그림 1은 광섬유의 단면적을 지나는 빛의 전파 궤적을 보여준다. x축 방향으로 진행되는 선편광된 입사파는 z 방향의 광섬유 축을 횡단한다. 유리 광섬유에서의 잔류 응력은 광 탄성 효과에 의한 복굴절을 일으키며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n_z - n_y = C(\sigma_z - \sigma_y) \quad (1)$$

여기서 n_z , n_y 와 σ_z , σ_y 는 각각 z축과 y축 방향에 해당하는 굴절률과 잔류 응력을 나타낸다. C는 광 탄성 계수이다. 이러한 복굴절 때문에 y축과 z축 방향의 직교하는 편광 성분들은 샘플 광섬유를 통과할 때 상대적인 위상 차를 일으킨다. 광섬유와 모재의 응력 분포를 측정하는 유용한 방법은 Chu와 Whitbread에 의해서 처음으로 제시되었다. 광섬유 축과 상대적으로 45° 편광을 이루는 집광된 He-Ne 레이저 빔을 사용하였고, 이 집광된 빔은 동일 굴절률을 갖는 액체 안에 담겨진 광섬유를 통과한 후 타원 편광을 갖게 된다. 이심률을 갖는 이 타원 편광은 1/4 파판을 투과한 후 선형 편광되며, 그 편광 각이 입력 편광각과 이루는 각은 광섬유 잔류 응력에 의해 발생된 복굴절의 빔 진행 방향을 따라 축적된 값(타원 편광의 이심률의 1/2)을 나타낸다. 1/4 파판 뒤에 위치한 편광자를 회전시킴으로써 출력 빛의 편광 방향을 얻을 수 있다. 광섬유의

[†]E-mail: ywpark@etri.re.kr

응력 분포는 레이저 빔을 광섬유의 단면방향으로 스캔함으로써 얻을 수 있다. 이러한 방법은, 비록 굴절률 정합 액체를 사용하더라도, 입사 빔이 광섬유의 코어 쪽을 통과할 때 광선 편향을 발생시키기 때문에 측정 정확성에 많은 문제를 갖고 있다. 이러한 방법의 공간 분해능은 모아진 레이저 빔의 크기에 제한되어 1 μm 보다 크다. 이 측정방법에서는 고정된 1/4 파판과 회전 편광 분석기가 고풍력 이미징 렌즈 뒤에 위치한다. 그 이유는 대물 렌즈의 작동 거리가 이러한 두 요소가 차지하는 수직 공간보다 더 짧기 때문이다. 이 방법을 응용하는데 있어서 고려되는 주된 문제점으로써 광섬유의 이미지를 만드는 광 경로에 포함된 1/4 파판의 비균질성과 편평도의 오차를 들 수 있다. 또한 먼지나 이 물질에 의해 오염된 편광기가 회전하면서 광섬유 이미지의 왜곡을 발생시킬 수도 있다.

이러한 문제를 극복하기 위해 회절 및 간섭이 억제되고 이미지 왜곡이 없는 측정 장치를 개발해야 할 필요가 있다. 그림 2(b)는 이 방법의 본 논문에서 제안하는 회전 편광판과 1/4 파판이 사용된 측정방법의 개략도를 보여준다. 레이저 빔은 그림 1에서 보는 것과 같이 광섬유를 횡단하여 투과한다. 편광자와 편광 분석기는 그들의 편광 축이 서로 수직이 되도록 설치한다. 광섬유와 가변 위상 보정기는 편광자와 편광 분석기 사이에 놓는다. 광섬유 축과 편광자 사이 각이 45°가 되었을 때, 광섬유 축 중심에서의 횡단 거리 y에 대한 투과된 빛의 세기 I(y)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(y) = I_0 \sin^2[\Phi(y)/2] \tag{2}$$

여기서 I₀는 입력 세기이고 Φ(y)는 광섬유 축에 대해 직교하는 두 편광 요소 사이의 축적된 상대적인 위상차를 나타낸다. 원형 대칭 광섬유에 대해 그림 1에서 보여지는 빛의 궤적을 따라 축적된 위상차 Φ(y)는 단지 축 방향 응력 분포, σ_z(r)에 의해서만 유도된다고 알려졌다.^[9] 광탄성 계수는 상수이고 지름 방향의 응력은 r ≥ c에서 소거된다는 것을 가정할때, 전체 위상차는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi(y) = \frac{2\pi C}{\lambda} \int_{-\sqrt{c^2-y^2}}^{\sqrt{c^2-y^2}} \sigma_z dx + \delta = \delta_0 + \delta \tag{3}$$

여기서 δ₀는 잔류 응력 σ_z에 의해서, δ는 위상 보정기에 의해 결정된다. 그리고 C는 광탄성 계수이다. λ는 빛의 파장이

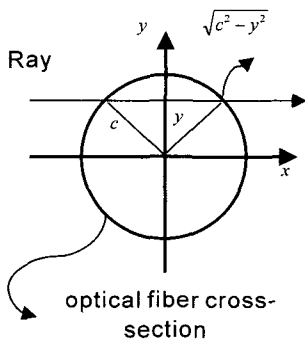


그림 1. 광섬유 단면을 횡단하는 광선의 궤적.

며, c는 광섬유의 반경이다. 여기서 잔류 응력 δ₀에 의한 위상차는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_0(y) = \frac{4\pi C}{\lambda} \int_y^c \frac{\sigma_z(r)}{\sqrt{r^2 - y^2}} r dr \tag{4}$$

만약 외부 위상차에 해당하는 δ을 가변 위상 보정기를 이용하여 조절할 수 있다면, 투과 세기가 최소가 되도록 만들 수 있다. 그때 식 (2)와 (3)에 의해 δ(y) = -δ₀(y)가 된다. 광섬유의 구조가 측 대칭이기 때문에 식 (4)를 다음과 같은 Abel 변환을 이용하여 광섬유의 반경 방향을 따라 잔류 응력 분포 δ_z(r)로 변환할 수 있다.

$$\sigma_z(r) = \frac{-\lambda}{2\pi^2 C r} \int_{\sqrt{y^2 - r^2}}^c \frac{d\delta_0/dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \tag{5}$$

외부 위상차 δ를 조절하기 위해 Babinet 또는 Berek 보정기를 사용할 수 있으나 이러한 장치는 가격이 비싸고 컴퓨터에 의해 조절하기가 어렵다. 그림 2(a)는 가변 위상 보정기를 회전 편광자와 광섬유 축에 대해 45°로 조절된 고정 1/4 파판으로 대체할 수 있다. 여기서 편광자를 통과한 후의 빛의 세기를 편광자의 회전각에 상관없이 일정하게 유지시키기 위해 랜덤하게 편광된 광원을 사용한다.

그림 3은 그림 2(a)와 그림 2(b)에서 보여지는 실험 장치의 편광 상태 형성을 비교할 수 있는 Poincare sphere의 그림이다. 각각의 S는 세 개의 구분된 편광 상태- 즉 수평 축에 평행하고, 수평에 45°를 이루는 선 편광 상태, 그리고 오른쪽으로 원 편광 상태-를 나타낼 수 있는 구 위의 점이다. 그림 2(b)에서 보여준 편광자에 의해 선 편광 빛은 가변 위상 보정기를 통과할 때 광섬유 샘플 앞에서 타원으로 편광된다. 이러한 과정은 그림 3에서 점선 화살표로 표시되어 있다. 그것은 위상차 δ 정도에 의해서 OS₁ 축을 중심으로 회전하며, S₂에서 시작하여 Q로 끝난다. 그림 2(a)에서 광섬유 샘플을 지난 빛의 편광 상태는 고정된 1/4 파판과 회전 편광자를 사용함으로써 그림 2(b)에서 광섬유를 지난 빛의 편광상태와 동일하도록 조절될 수 있다. 이러한 과정을 나타내는 Poincare sphere의 편광 상태 궤적은 그림 3의 실선으로 표시되어 있다. P는 S₁에서 S₂쪽으로 2θ만큼 회전하는 구 위의 점이다. 여기

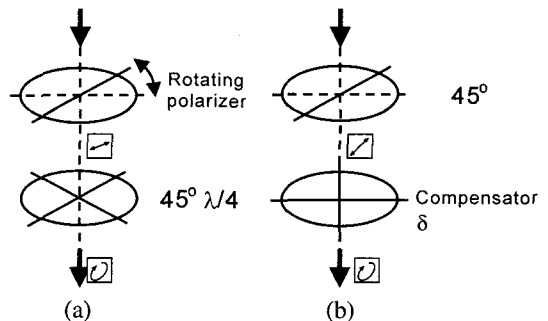


그림 2. 두 위상 지연을 측정하는 장치 구성의 개략도. (a) 회전하는 편광 판과 1/4 파판이 사용된 새로운 실험 장치. (b) 가변 위상 보정기가 사용된 실험 장치.

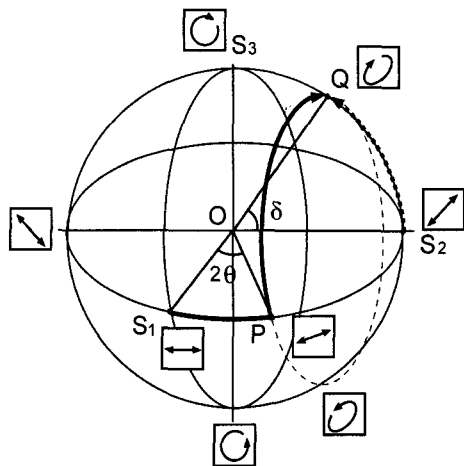


그림 3. 그림 2(a)와 그림 2(b)의 실험 장치에서 입력 빔의 진행에 따른 편광 상태 변화의 궤적을 가시화 해주는 Poincaré sphere.

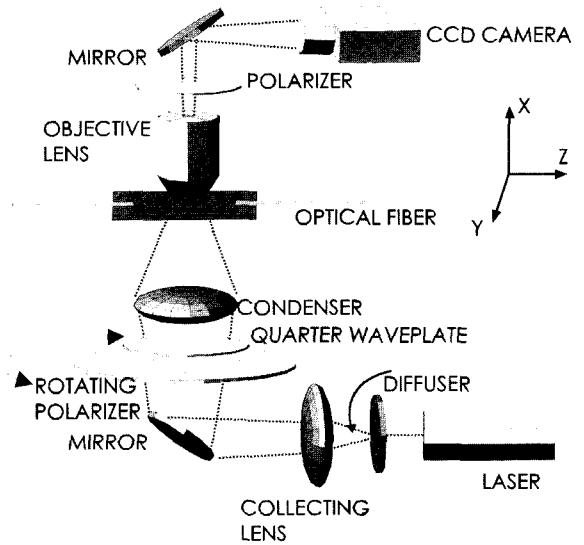


그림 4. 광섬유의 응력을 측정하는 실험 장치.

서 θ 는 편광자와 광섬유의 축사이의 각이다. 그림 2(a)에서 1/4 파판의 빠른 축(fast axis)이 광섬유 축과 45° 를 이루기 때문에 1/4 파판은 입력 편광상태를 축을 중심으로 Poincaré sphere 위의 점을 90° 만큼 회전시킨다. 그림 2(a)에서 편광자를 회전시킴으로써 Poincaré sphere에서 보여지는 P의 위치를 적절히 조절시킬 수 있고, 그것은 1/4 파판에 의해 90° 로 회전될 때 Q값과 일치할 수 있다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 편광자의 각도를 조절함으로써 그림 2(b)의 가변 위상 보정기에 의해 만들어진 편광 상태를 동일하게 구현할 수 있다. Poincaré sphere의 두개의 궤적에서 다음 관계를 알 수 있다.

$$\delta = 90^\circ - 2\theta \tag{6}$$

그림 1에서 보여지는 광섬유 수직 횡단축 y에 대하여, 편광자를 회전하면서 빛의 최소 세기를 나타내는 회전각을 찾음으로써 응력에 대해 유도된 위상 지연 δ_0 를 구할 수 있다. 그림 2(a)에서 시스템의 출력 세기가 최소화될 때의 편광자와 광섬유 축 사이의 각이 θ_0 라면, 잔류 응력에 의해 유도된 위상 지연은 식 (2)와 (3)에 의해 $-(90^\circ - 2\theta_0)$ 가 된다. θ_0 는 출력 세기를 횡단 축에 대해 θ 의 함수로서 얻은 후 각 횡단 축 y에 대해 이차 곡선으로 곡선 맞추기(curve fitting)를 함으로써 구할 수 있다. 광섬유의 단면을 통과하는 광 탄성 계수 C를 상수로 가정함으로써 식 (5)에서 광섬유의 잔류 응력 분포를 구할 수 있다.

III. 실험 장치

그림 4는 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 랜덤 편광을 갖는 7 mW He-Ne 레이저를 광원으로 사용하였다. 결맞은(coherent) 이미징 시스템이 회절에 의한 물체의 가장 자리에서 울리는 현상(ringing effect)을 발생시키기 때문에, 결맞지 않은 이미징 시스템을 만들기 위해 방산기를 사용한다. 방산기가 측정동안 매우 빠르게 회전하기 때문에, 상에 발생할 수 있는 광반점(speckle) 패턴은 효과적으로 제거될 수 있다. 회전 방산기로

부터 산란된 빛은 렌즈에 의해 모아진다. 빔은 Al이 코팅된 거울을 통해 선형 복굴절 장치에 수직으로 배열된 곳으로 입사한다. 랜덤하게 편광된 레이저 광원을 사용하기 때문에 거울에 의한 복굴절 현상은 무시될 수 있다. 여기서 회전 편광자와 1/4파판을 가변 위상 보정기로써 사용하며, 그 동작 원리를 그림 2(a)와 그림 3에 간략하게 나타내었다. 광섬유는 굴절을 정합 액체에 담아서 광섬유 표면으로 입사하는 빔의 회절을 최소화 시킨다. 광섬유 축에 45° 로 배열되어 있는 고정된 분석기를 광섬유의 바로 뒤에 설치한다. 고정된 분석기와 커버 글라스 사이의 거리는 0.5 mm이다. 편광자의 두께는 0.8 mm이다. 대물렌즈에 의해 확대된 이미지를 CCD 카메라로 검출하고, frame grabber로 읽어낸다. 횡단 길이 방향으로 검출된 데이터는 회전 편광자의 각 위치마다 30번씩 측정된다. 그리고 이러한 평균 값은 $\delta_0(y)$ 를 얻기 위한 θ 의 이차 함수로 맞춰진다.

IV. 결 과

본 논문에서 제안한 측정방법을 사용하여 실제 상용화된 광섬유(SMF-28, Corning)의 잔류응력을 측정하였다. 그림 5는 실험 장치로 측정된 횡단길이 방향에 대한 편광자 각도에 따른 빛 세기 분포의 변화를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 측정된 3차원 빛 세기 분포는 각 반경별로 $\sin^2\theta$ 함수를 따른다. 이때 식 (3)에서 보는 바와 같이 광섬유의 복굴절에 의해 발생한 위상차를 구하기 위해 빛에 세기가 최소가 되는 회전 편광자 각도를 그림 5로부터 2차 함수 곡선맞춤(the least square fitting)을 이용하여 구하였다. 그림 6은 광섬유에서 응력에 대해 유도된 위상 지연 분포 $\Phi(y)$ 를 나타낸다. 측정된 광섬유의 잔류응력에 의해 유도된 최대 위상지연 값은 2° 이하이다. 위상 지연분포 $\Phi(y)$ 는 식 (3)과 (5)를 이용하여 측방향 응력 σ_x 으로 변환된다. 여기서 광 탄성 계수 C는 실리카의 광탄성 상수로서 $35.5 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ 을 사용하였다. 그림 7은 변환

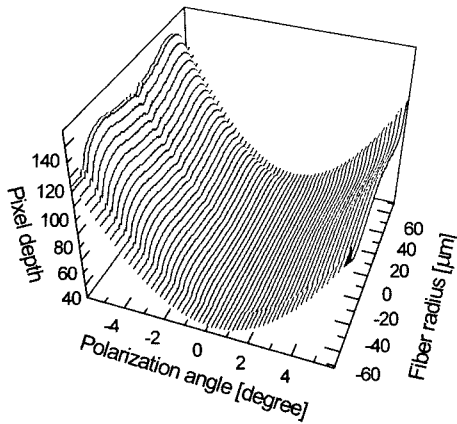


그림 5. 입력 편광각 회전에 따른 광섬유 반경별 빛의 세기변화.

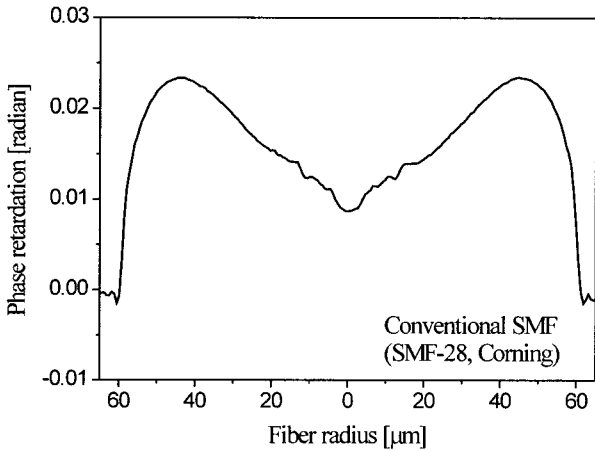


그림 6. 단일모드 광섬유(SMF-28, Corning)에 대해 스트레스 측정 장치를 이용하여 측정된 위상 지연 분포.

된 축방향 응력분포를 광섬유 반경에 대해 보여준다. 그림에서 양수는 인장력(tension)이고 음수는 압축력(compression)을 나타낸다. 측정된 잔류응력 분포는 주목할 만한 특징을 갖고 있다. 즉, 측정된 광섬유의 응력분포는 모재의 잔류응력분포와 매우 다른 분포를 갖는다. 일반적으로 광섬유의 잔류응력분포는 모재의 분포와 거의 같고, 그 분포모양이 굴절률 분포와 매우 흡사하고 도핑에 따라 비례하여 변화하기 때문에 응력 측정을 통해 굴절률로 변환할 수 있는 것으로 알려졌다.⁶⁾ 그러나, 그림 7에 보여지는 클래딩에서의 급격한 경사를 갖는 잔류응력분포 변화는 모재의 잔류응력에서 볼 수 없는 경향으로써, 기계적 잔류응력 효과(mechanically induced residual stress)에⁶⁾ 의해 광섬유 인출 시 발생하는 온도의 광섬유 반경에 대한 냉각곡선이 잔류응력으로 굳어진 것으로 볼 수 있다. 기계적 잔류응력은 점도(viscosity)의 변화에 영향을 받아 발생한다. 점도는 온도의 함수로써 광섬유 반경방향에 대한 온도 분포에 지수함수로서 분포하게 되므로 열팽창 계수의 온도에 대한 분포보다 점도의 온도에 대한 분포가 더 급격히 변화하고, 또 고속 인출 시 수반되는 강한 인장력을 고려할 때 기계적 잔류응력이 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 클래딩에 유도되는 응력의 방향이 tension이 증가하는 방향이므

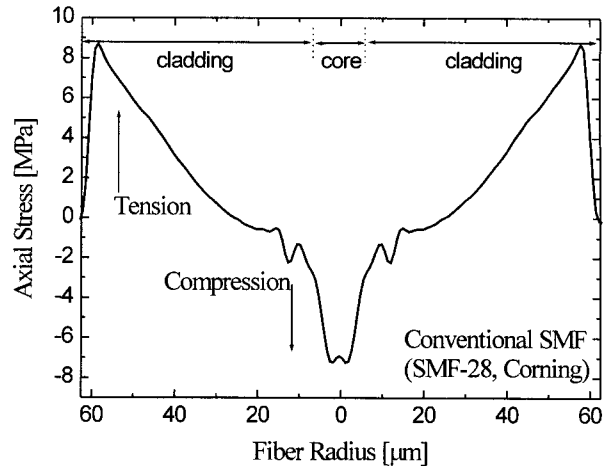


그림 7. 광섬유(SMF-28, Corning)의 반경에 대한 잔류 응력 분포.

로 참고문헌 [6]에 언급된 기계적 잔류응력의 유도방향 이론과 일치한다. 즉, 참고문헌 [6]에서 언급된 바와 같이 코어와 클래딩, 두 물질로 구성된 계단형 광섬유의 경우 기계적 잔류응력은 코어에서 압축력(compression)이 발생하고 클래딩에서 인장력(tension)이 발생하는데, 그림 7에서도 잔류응력은 코어에서 압축력을 받고 클래딩에서 점차적으로 증가하는 인장력을 받는다. 이는 열 냉각이 먼저 발생하고 상대적으로 점도가 높은 표면으로부터 기계적 응력에 의한 인장력이 발생하고 점도가 낮은 코어영역으로 갈수록 점차적으로 압축력이 발생하는 것으로 해석된다.

V. 결 론

광섬유의 잔류 응력 분포를 회전편광기와 1/4 파판이 결합된 위상보정기를 갖는 편광기를 이용하여 간단하고 정확하게 측정하는 방법을 새롭게 제시하였고, 상용 광섬유에 대해 실험적으로 입증하였다. 측정된 광섬유의 잔류응력 분포는 모재의 잔류응력분포와 달리 기계적 잔류응력 유도방식으로 주로 발생되며, 인출시 발생하는 온도의 냉각분포가 잔류응력으로 굳어진 모양임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 초고속광네트워크연구센터를 통한 한국과학재단 우수연수센터 지원금과 한국과학재단의 특정 기초연구(과제번호:R01-1999-00015)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- [1] P. Y. Fonjallaz, H. G. Limberger, and R. P. Salathe, "Tension increase correlated to refractive-index change in fibers containing UV-written Bragg gratings," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1346-1348, 1995.

- [2] M. Douay, W. X. Xie, T. Taunay, P. Bernage, P. Niay, P. Cordier, B. Poumellec, L. Dong, J. F. Bayon, H. Poignant, and E. Delevaque, "Densification involved in the UV-based photosensitivity of silica glasses and optical fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1329-1342, 1997.
- [3] S. Yamasaki, M. Akiyama, K. Nishide, A. Wada, and R. Yamauchi, "Characteristics of long-period fiber grating utilizing periodic stress relaxation," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E83-C, pp. 440-443, 2000.
- [4] C.-S. Kim, Y. Han, B. H. Lee, W. -T. Han, U.-C. Paek, and Y. Chung, "Induction of the refractive index change in B-doped optical fibers through relaxation of the mechanical stress," *Opt. Commun.*, vol. 185, pp. 337-342, 2000.
- [5] P. L. Chu and T. Whitbread, "Measurement of stresses in optical fiber and perform," *Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 4241-4245, 1982.
- [6] Y. Park, K. Oh, U. -C. Paek, D. Y. Kim, and C. R. Kurkjian, "Residual stresses in a doubly clad fiber with depressed inner cladding (DIC)," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 1823-1833, 1999.
- [7] K. W. Raine, "A microscope for measuring axial stress profiles with high spatial resolution and low noise," in the Fourth Optical Fiber Measurement Conference., National Physical Laboratory, Teddington, UK, pp. 269-272, 1997.
- [8] K. W. Raine, R. Feced, S. E. Kanellopoulos, and V. A. Handerek, "Measurement of axial stress at high spatial resolution in ultraviolet-exposed fibers," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 1086-1095, 1999.
- [9] H. Poritsky, "Analysis of thermal stresses in sealed cylinders and the effect of viscous flow during anneal," *Physics* (N.Y.), vol. 5, pp. 406-411, 1934.

Measurement method for profiling residual stress of an optical fiber

Yongwoo Park[†] and Mun Cheol Paek

Basic Research Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), Taejeon, 305-350, KOREA

[†]E-mail: ywpark@etri.re.kr

Ae-Kyung Jin, Un-Chul Paek, and Dug Young Kim

Dept. of Information and Communications, Kwangju Institute of Science and Technology (K-JIST), Kwangju, 500-712, KOREA

(Received January 24, 2003, Revised manuscript April 21, 2003)

A novel method was proposed for determining the residual stress profile of an optical fiber by using a modified polariscope. Measurement results of the axisymmetric residual stress for a conventional single-mode fiber were demonstrated by using this method. It was found that non-uniform stress is distributed in the cladding of the fiber. This means that large mechanical stress is induced as a function of temperature generated near the neck shape of the fiber preform.

OCIS codes : 060.2270, 060.2280, 060.2300, 060.2400.