

Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광섬유 격자쌍 스트레인 센서의 신호처리 방법

송민호 · 이병호

서울대학교 전기공학부

이상배 · 최상삼

한국과학기술연구원 광기술연구센터

(1997년 2월 28일 받음)

클래딩 지름이 다른 광섬유 브래그 격자를 용융 접착하여 스트레인과 온도를 분리하여 측정할 수 있는 센서를 구성하였다. 굵기차에 의해서 스트레인에 대한 각 브래그 파장 변화량은 서로 다르며, 동일한 모재(preform)에서 생산된 광섬유를 사용하였으므로 온도에 대한 파장 변화량은 같았다. 두 브래그 파장의 변화량을 측정하고 잘 정의된 행렬함수에 대입하여, 가해진 스트레인과 온도의 양을 분리하여 계산할 수 있었다. 0-1500 μ strain, 20-100°C 범위의 스트레인과 온도 변화를 가하면서 제작된 센서의 특성을 관측하였고, 브래그 파장 변화를 측정하여 계산한 결과, 온도계와 마이크로미터 값에 비하여 10% 이내의 측정오차를 얻을 수 있었다. 스트레인의 측정 정밀도를 높이기 위해서 일정한 광경로차를 갖는 마하젠더 간섭계를 이용하여 두 격자의 상대 파장변화를 간섭 신호의 크기변화로 변환하는 새로운 방법을 제안하였으며, 시스템을 구축하여 실험한 결과로 온도에 무관하게 분광분석기에 비하여 80배 이상 향상된 스트레인 측정 정밀도를 얻을 수 있었다.

I. 서 론

1978년 K. O. Hill 등^[1]에 의해서 처음 제시된 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating)는 1989년 자외선 레이저를 광섬유 측면에 조사하여 제조하는 방법^[2]과 1993년 발표된 위상마스크를 이용하여 제조하는 방법^[3,4]의 개발에 힘입어 광통신과 광섬유 센서 분야에서 활발히 연구, 응용되고 있는 소자이다. 광섬유 격자의 동작 특성은 아래 식과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (n_{eff}: \text{유효굴절률}, \Lambda: \text{격자간격}) \quad (1)$$

이 브래그 조건을 만족하는 파장 성분은 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장 부분은 그냥 통과한다. 따라서 그림 1과 같이 격자에 가해진 물리량에 의한 브래그 파장의 변화량으

로부터 미지의 물리량을 계산할 수 있으며 이것이 광섬유 격자 센서로서 사용될 수 있는 기본 원리이다.

파장의 변화로 물리량을 측정하는 파장 인코딩(wavelength encoding) 특성은 기존의 광량이나 광위상의 변화를 측정하는 광섬유 센서에 비하여 분포센서(distributed sensor)나 다중점 센서(multi-point sensor)의 실현에 있어서 매우 중요한 특징이다. 즉 출력면에서 파장분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM)기술을 이용하여 각 지점의 정보를 분리 측정할 수 있으며 파장의 변화를 측정하는 것이므로 시스템의 손실이나 기준값의 변화 등에 영향을 받지 않는다. 이같은 특성으로 광섬유 격자 센서는 최근 집중적인 관심을 받고 있는 스마트 구조물(smart structure)의 실현에 가장 적합한 센서 형태로 자리잡고 있다.^[5] 그러나 광섬유 격자 센서가 스마트 구조물이나 복합 구조물의 변형 등을 감지하기 위해서 적용될 경우에 선결되어야 하는 문제가 있으며 그것은 온도와 스트레인이 센서에 동시에 가해질 경우에 이들의 효과를 분리해 내는 것이다. 브래그 파장의 변화는 스트레인과 온도에 모두 민감하여 구조물의 온도변화에 의해서도 브래그 파장이 변화하기 때문에 정밀한 스트레인 측정이 이루어질 수 없기 때문이다. 1990년대 초반에 발표된 광섬유 격자를 이용한 스트레인 및 온도 센서에 관한 연구 결과들^[6-9]은 주로 한가지 물리량을 고정시켜 놓고 다른 물리량을 측정한 것이므로 실제 환경에 적용할 수 있는 개념은 아니었다. 최근 광섬유 격자 센서를 실제 콘크리트나 비행체의 복합 구조물등에 적용하는 실험이 활발히 행해지고 있는 시점에서 이런 문제점은 보다 크게 대두되고 있으며 이 분야에서의 최근 연구들은 이 온도 효과를 분리하는 것에 집중되는 실정이다.^[10-19]

본 논문에서는 그간에 이러한 목적으로 발표된 바 있는 연

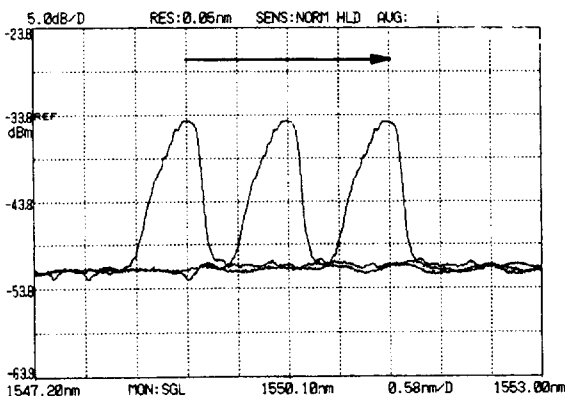


그림 1. 물리량(스트레인, 온도)에 따른 브래그 파장의 변화

구결과들이 모두 분광분석기(optical spectrum analyzer)를 이용하였으므로 그 측정 속도와 정밀도가 높지 않다는 것에 주목하여 분광분석기를 사용하지 않는 새로운 신호처리 방법을 제안하며 그 실험결과를 보고하고자 한다.

II. 이 론

2.1. 스트레인과 온도의 분리 측정

광섬유 격자 센서를 이용하여 스트레인과 온도의 효과를 분리하는 방법은 1994년 M. G. Xu^[10] 등에 의해서 처음 발표되었다. 이들은 브래그 파장이 크게 다른(850 nm, 1300 nm) 격자들을 광섬유에 중첩하여 새김으로써 가해진 물리량에 대해서 서로 다른 브래그 파장 변화율을 얻을 수 있었다. 광섬유 격자에 가해지는 스트레인과 온도에 의한 복합적 브래그 파장의 변화량은 아래 식과 같이 브래그 파장의 함수이다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left[(1 - \rho_e) \Delta\epsilon + (\alpha + \xi) \Delta T \right] = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_T \Delta T \quad (2)$$

K_ϵ : 스트레인 계수(strain coefficient)

K_T : 온도 계수(thermal coefficient)

$$\rho_e = \frac{n^2}{2} \left[\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12}) \right] \quad (3)$$

ρ_{11}, ρ_{12} : 스트레인 광학 텐서(strain-optic tensor)의 성분

ν : Poisson's ratio

식 (2)에서 λ_B 는 브래그 파장이고 $\Delta\epsilon$, ΔT 는 광섬유 격자에 가해진 스트레인과 온도의 변화량이다. α 는 광섬유의 열적 팽창에 따른 브래그 파장 변이(wavelength shift) 효과를 나타내는 계수(thermal coefficient of expansion)이고 ξ 는 광섬유의 온도 변화에 따른 굴절률 변화에 의한 브래그 파장 변이를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이며 ρ_e 는 식 (3)과 같은 유효 광탄성 상수(effective photoelastic constant)이다. 식 (2)와 같이, 브래그 파장이 다른 격자들은 같은 양의 온도나 스트레인이 가해진 경우에도 그에 따른 브래그 파장 변화량이 서로 다르다. 따라서 브래그 파장이 크게 다른 두 개의 격자로 이루어진 센서를 사용할 경우, 두 브래그 파장의 변화로부터 아래 식과 같이 스트레인과 온도를 분리하여 계산할 수 있다.^[10]

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\epsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\epsilon 2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (4)$$

Xu 등은 같은 광섬유에서 다른 파장 변화율을 얻기 위해서 두 브래그 파장을 크게 다르게 했기 때문에(850 nm, 1300 nm), 광폭 광원(broadband source)과 분광분석기(optical spectrum analyzer)를 두 대씩 사용해야 하는 큰 단점이 있었고 파장 차이에 따른 변화율 차이도 그리 크지 않아서 측정값의 계산 오차가 컸다. 따라서 이후 다른 방법을 이용하여 이러한 문제점들을 해결한 방법들이 계속 발표되었으나^[11-17] 그 기초적인 개념은 역시 두 개 이상의 서로 다른 파장 변화율을 가지는 광섬유 격자를 이용하는 것이다. 두 개의 광섬유 격자를

이용하는 방법 외에도 광섬유를 테이핑(taping)하거나 구조물 속에 삽입하여 온도에 의한 영향을 보상하고 스트레인에 의한 효과만이 브래그 파장의 변화에 반영되도록 하는 방법^[18,19]들이 있으나 센서의 개념보다는 온도에 의한 브래그 파장의 변화를 막는데 중점을 둔 연구들이다. 따라서 광섬유 격자 센서를 이용한 스트레인과 온도의 분리 측정은, 하나의 광폭 광원과 분광분석기만을 사용할 수 있도록 파장의 차이가 크지 않으면서도 두 가지 물리량을 분리하여 계산할 수 있을 만큼 브래그 파장 변화율이 서로 다른 격자로 이루어진 센서 헤드(sensor head)를 구현하는데 실제 적용성의 성패가 달려있다고 할 수 있다.

2.2. 굵기가 서로 다른 광섬유 격자쌍을 이용한 센서

굵기가 서로 다른 두 개의 광섬유 격자를 용융접착(fusion splicing)하여 광섬유의 축방향으로 스트레인을 가하면 광섬유의 단면적에 반비례하여 광섬유의 길이 변화가 생기므로 각 격자는 서로 다른 크기의 스트레인 효과를 받게 된다.

온도에 대한 민감성은 광섬유의 단면적과는 관계가 없으며 광섬유의 재질과 제조 과정에서 첨가되는 첨가물의 농도 등에 의해서 결정되는 것이므로 제작 조건이 다른 광섬유를 이용한다면 온도에 대한 파장 변화율이 서로 다른 광섬유 격자를 얻을 수 있다.^[13] 그러나 스트레인과 온도에 대한 변화율이 모두 다를 필요는 없으며, 오히려 온도에 대한 변화율이 같다면 두 브래그 파장의 상대적인 차이 변화를 관측하는 것 만으로도 가해진 스트레인을 알 수 있게 되므로 두 물리량의 계산이 보다 간단해진다.^[14] 또한 이후 설명할 "간섭계를 이용한 온도에 무관하게 스트레인을 측정할 수 있는 센서"는 두 격자가 온도에 대해서 같은 파장 변화율을 가질 때만 가능해지기 때문에 온도에 대한 민감성은 서로 같고, 굵기가 다른 광섬유에 격자를 새겨서 센서를 구성한다면 식 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_\epsilon \frac{\Delta\epsilon_1}{\Delta\epsilon} & K_T \\ K_\epsilon \frac{\Delta\epsilon_2}{\Delta\epsilon} & K_T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (5)$$

윗 식에서 두 광섬유 격자의 스트레인과 온도 계수(K_ϵ , K_T)는 같은 모재에서 제작된 광섬유를 가정하여 같으며 $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$ 는 격자 G_1 , G_2 가 각각 겪게 되는 스트레인이고 $\Delta\epsilon$ 는 센서에 가해진 전체 스트레인으로 아래 식과 같이 정의되는 양이다.

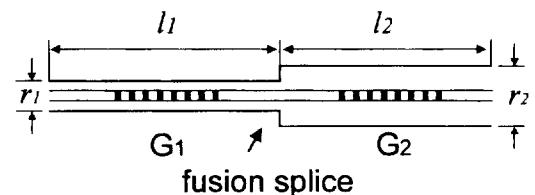


그림 2. 지름이 다른 광섬유 격자쌍을 이용한 센서

$$\Delta\epsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i} \quad (i=1,2), \quad \Delta\epsilon = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{l_1 + l_2} \quad (6)$$

l_1 과 l_2 는 두 광섬유의 접착지점(splicing point)으로부터 고정단(anchoring points)까지의 거리이며 Δl_1 과 Δl_2 는 스트레인에 의해서 l_1 과 l_2 가 광섬유 축방향으로 각각 늘어난 길이이다. 같은 힘이 주어질 때 광섬유의 축방향 길이 변화는 단면적에 반비례하기 때문에 식 (7)과 같이 각 격자의 스트레인과 단면적의 관계를 가정하였다.

$$\frac{\Delta\epsilon_1}{\Delta\epsilon_2} = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \quad (7)$$

여기에서 r_1 과 r_2 는 G_1 , G_2 가 새겨진 광섬유의 클래딩 반지름이다. 각 격자에 가해진 $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$ 를 실제 실험에서 관측하기 어려우므로, 식 (6)과 (7)을 식 (5)에 대입하여 센서에 주어진 전체 스트레인($\Delta\epsilon$)만으로 행렬식을 표현한다면 아래 식 (8)과 같으며 식 (9)와 (10)은 l_1 과 l_2 가 같은 경우의 스트레인과 온도 를 표현하는 식이다.

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{K_\epsilon(l_1+l_2)}{l_1+(r_1/r_2)^2 l_2} K_T \\ \frac{K_\epsilon(l_1+l_2)}{l_2+(r_2/r_1)^2 l_1} K_T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta\epsilon = \left(\frac{1}{2K_\epsilon}\right) \left(\frac{r_2^2+r_1^2}{r_2^2-r_1^2}\right) (\Delta\lambda_{B1}-\Delta\lambda_{B2}) \quad (9)$$

$$\Delta T = \frac{1}{K_T(r_2^2-r_1^2)} (r_2^2 \Delta\lambda_{B2}-r_1^2 \Delta\lambda_{B1}) \quad (10)$$

결론적으로, 온도 변화에 따른 파장의 변화율이 같고 굵기는 다른 두 광섬유 격자를 이용할 경우, 두 브래그 파장이 크게 분리될 필요가 없으므로 하나의 광폭광원과 분광분석기만으로 두 파장의 관측이 가능하며 광섬유 굵기 차이를 조절하여 스트레인에 대한 파장 변화율 차이를 크게할 수 있으므로 계산상의 오차도 줄게 된다.

2.3. 마하젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer)를 이용한 측정 정밀도의 향상

기술한 바와 같이 두 브래그 파장의 변화를 측정하고 행렬식에 대입하여 계산하므로써 센서에 가해진 스트레인과 온도는 분리, 계산될 수 있다. 이 때 측정의 정밀도는 브래그 파장의 변화를 얼마나 정확하게 관측할 수 있는가에 달려 있다. 가장 간단하게 브래그 파장의 변화를 측정하는 방법은 광폭광원(broadband source)과 분광분석기(optical spectrum analyzer)를 이용하여 투과 스펙트럼(transmission spectrum)의 변화를 관측하는 것이다. 그러나 광섬유 격자는 가해진 물리량에 대해서 변하는 브래그 파장의 정도가 그리 크지 않으므로(~10 pm/°C, ~1 pm/μstrain) 보통 0.05-0.1 nm의 파장 해상도(wavelength resolution)를 가지는 분광 분석기를 이용하는 센

서 시스템은 그 측정 정밀도가 높지 않다. 또한 일정한 파장 영역에 대해서 기계적인 주사(scanning) 동작을 해야 하므로 그 측정 속도가 느리다는 단점이 있다. 따라서 분광분석기를 이용하는 방법보다 정밀하고 빠른 속도를 가지는 센서 시스템이 계속적으로 요구되었으며 이에 따라 많은 해결책이 제시되어 왔다.^[6-9] 그 중 1992년에 Naval Research Lab. 의 A. D. Kersey^[6] 등에 의해서 발표된 마하젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer)를 이용한 광섬유 격자 센서 시스템은 그 측정 정밀도가 매우 높고 분광 분석기와 같은 기계적 주사(scanning) 동작이 없어서 측정 속도 또한 빠르기 때문에 가장 우수한 센서 형태의 하나로 인식되어왔다. 이 시스템은 기본적으로 하나의 브래그 격자에서 반사되는 광신호의 파장 변화를 측정하는데 사용되며 센서 네트워크의 경우, 시분할 다중화(time division multiplexing, TDM) 기술^[20]이나 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 기술^[21]을 이용하여 각 지점의 신호를 분리하여 측정한다. 하지만 본 논문에서 제안하는 센서 형태의 경우는 두 광섬유 격자가 공간적으로 밀접해 있으며 그 브래그 파장이 거의 같은 형태이므로 위의 기술(TDM, WDM)을 적용할 수는 없다. 그러나 간섭 신호의 위상 변화를 측정하는 기존의 방법^[6]을 이용하지 않고 간섭 신호의 크기 변화를 관측한다면 기술한 지름이 다른 광섬유 격자쌍 센서의 특성상 온도에 무관하게 스트레인을 정밀하게 측정할 수 있으며 그 원리는 다음과 같다.

그림 3은 일정한 광경로차(d)를 가지는 마하젠더 간섭계를 이용하여 브래그 파장 변화량을 측정하는 시스템의 개략도이다. 이 센서 시스템의 작동 원리는 국내외에서 수차례 발표된 바 있으므로^[6,22] 본 논문에서 세부적인 기술은 피하도록 한다. 기존의 방법은 브래그 파장이 변함에 따라 간섭신호의 위상이 변하는 것을 관측하여 광섬유 격자에 가해진 물리량을 알 수 있는 것이지만, 두 개의 격자로 이루어진 센서를 이 시스템에 적용할 경우 위상 변화를 측정하는 방법을 그대로 적용할 수는 없다. 두 개의 격자를 적용할 경우 간섭계를 통과하여 광검출기에서 발생하는 간섭 신호는 아래와 같이 표현된다.

$$I_{det} = I_{d.c.} + a \cos\phi_1 + b \cos\phi_2 = I_{d.c.} + (a^2 + b^2 + 2ab \cos\Delta\phi)^{1/2} \times \cos \left[\phi_1 - \tan^{-1} \left(\frac{b \sin\Delta\phi}{a + b \cos\Delta\phi} \right) \right] \quad (11)$$

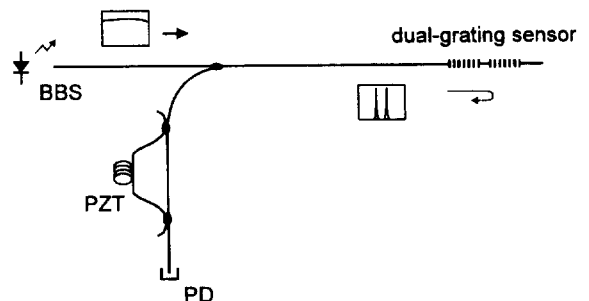


그림 3. 마하젠더 간섭계를 이용한 상대 파장 변화의 측정

윗 식에서 a, b 는 격자 G_1, G_2 에서 반사되는 빛의 세기와 코히어런스 정도(coherence degree)를 표현하는 값이며 ϕ_1 과 ϕ_2 는 각 간섭 신호의 위상을 나타내는 함수로서,

$$\phi_i = \omega t + \frac{2\pi nd}{\lambda_i} - \frac{2\pi nd}{\lambda_i^2} \Delta\lambda_i + \phi_0, \quad (i=1,2) \quad (12)$$

이며, n 은 광섬유의 굴절률, d 는 간섭계의 광경로차(optical path difference), λ_i 는 각 격자의 브래그 파장이고, ϕ_0 는 간섭계 주변의 온도 흐름에 의한 간섭계 출력의 위상 흐름(phase drift)이며, $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ 이다. 두 격자에서 반사되는 광신호가 발생시키는 최종적인 간섭 신호의 위상은 식 (11)과 같이 두 간섭 신호의 위상 정보가 혼합되어 있으므로 이로부터 센서에 가해진 스트레인과 온도의 양을 구분해낼 수는 없다. 그러나 간섭 신호의 크기를 나타내는 항은 상수 a, b 와 두 간섭신호의 상대 위상차 $\Delta\phi$ 에 의해서만 결정된다. 같은 모재를 이용하여 만든, 굽기가 다른 광섬유 격자 센서의 경우, 두 격자의 상대적인 브래그 파장차이는 온도에 무관하게 스트레인에 의해서만 변하며 $\Delta\phi$ 와 그에 따른 간섭 신호의 크기 또한 온도에 영향받지 않고 스트레인에 의해서만 변화한다. 따라서 간섭 신호의 위상 변화가 아닌 그 크기의 변화를 측정할 경우 센서에 가해지는 온도 변화에 무관하게 스트레인을 측정할 수 있다.

사용되는 격자의 브래그 파장이 거의 같다고 가정한다면 두 간섭 신호의 상대 위상차이 $\Delta\phi$ 는 아래 식과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &\cong \frac{2\pi nd}{\lambda^2} (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2) \\ &= \frac{2\pi nd}{\lambda^2} K_e \Delta\epsilon (l_1 + l_2) \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{r_1^2 l_2 + r_2^2 l_1} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 식 (11)에 윗 식을 대입하고 간섭 신호의 크기 변화와 비교한다면 센서에 가해진 스트레인을 계산해낼 수 있다. 이 과정에서 스트레인을 계산하기 위해서는 식 (11)의 a, b 값이 미리 결정되어야 하며 이 값들은 센서에 스트레인을 가하면서 간섭 신호의 최대값과 최소값을 관측하여 계산해낼 수 있다. 즉 신호의 크기가 최대가 되는 것은 두 간섭 신호의 위상이 일치하는 경우이며 최소가 되는 경우는 상대 위상차가 π 에 해당하는 경우이므로, 간섭신호의 교류 성분만을 고려하여 아래 식과 같이 a, b 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{\max} &= I (\Delta\phi = 2n\pi) = a + b, \\ I_{\min} &= I (\Delta\phi = 2n\pi + \pi) = |a - b|, \\ a &= \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}, \quad b = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \end{aligned} \quad (14)$$

간섭 신호의 크기 변화는 두 간섭 신호의 상대 위상차에 의해서 이루어지는 것이므로 위상을 측정하는 간섭계 센서 시스템의 경우와 같이 높은 측정 정밀도를 이 경우에도 그대로 얻을 수 있다.

III. 실험

3.1. 센서헤드의 제작과 동작 특성 측정

실험은 온도에 따른 파장 민감도를 갖게 만들기 위하여 같은 모재(preform)에서 제작된 135 μm 와 165 μm 의 클래딩 지름을 갖는 Germanosilicate 광섬유(Ge 18 mol %, 한국과학기술연구원 제조)에 격자를 새겨서 실행하였다. 광섬유 격자는 KrF 엑시머 레이저(Lambda Physik, 사용파장 248 nm)와 위상 마스크($\lambda_p=1550$ nm)를 사용하여 제작하였으며 LED($\Delta\lambda \sim 50$ nm)와 분광분석기(optical spectrum analyzer)를 이용하여 실시간으로 격자의 생성 과정을 관측하면서 브래그 파장과 반사율을 조절하였다. 제작된 광섬유 격자 G_1, G_2 의 브래그 파장은 상온에서 각각 1549.3 nm 와 1546.4 nm 이다. 광섬유가 늘어나는 방향의 스트레인을 가정하여, 두 파장이 겹치지 않도록, 굵은 격자가 짧은 브래그 파장을 가지도록 제작하였으나 경우에 따라서는 수축할 수도 있으므로 적용 대상에 따라 적절한 파장 간격이 요구된다. 제작된 광섬유 격자를 용융접착기(fusion splicer)를 이용하여 접착하였으며 이 때 접착부위의 광손실은 ~ 0.8 dB 정도로 관측되었다.

제작된 센서를 두 개의 마이크로 스테이지 사이에 고정시키고 마이크로미터(micrometer-screw)를 이용하여 축방향 인장력을 가해주었다. 온도는 코닝(Corning)사의 hot plate를 사용하여 변화시켰으며 디지털 온도계를 이용하여 0.1°C 단위 까지 관측하여 기준으로 삼았다. 그림 5는 스트레인과 온도 변화에 대한 두 브래그 파장의 변화를 LED와 분광분석기를 이용하여 관측한 결과이다.

그림과 같이 두 광섬유 격자의 브래그 파장 변화율은 온도 변화에 대해서는 서로 같으며 스트레인에 대해서는 다르다. 용융접착하기 전에 실측된 광섬유 격자의 스트레인과 온도의 계수 K_e, K_T 는 각각 1.3 pm/ μstrain 과 10.6 pm/°C이다. 이 값과 브래그 파장의 변화량을 식 (9)와 식 (10)에 대입하여 스트레인과 온도를 계산해 보았으며 이 계산값은 마이크로 미터와 온도계의 값에 비하여 10% 이내의 오차를 보였다. 측정 오차는 사용된 마이크로 미터와 온도계의 성능, 분광분석기의 낮은 분해능 등에 의한 오차로 생각되며 보다 정확한 장비와 측정 방법으로 오차를 줄일 수 있을 것이다.

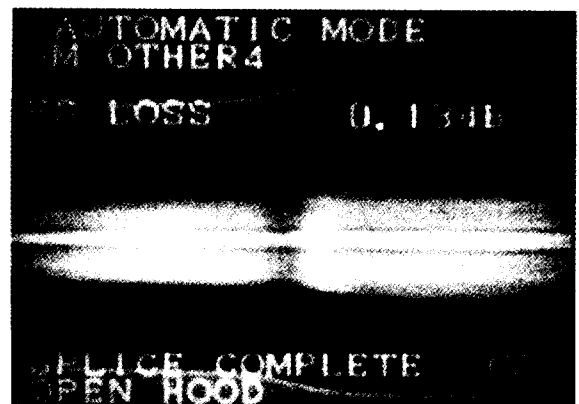


그림 4. 제작된 광섬유 격자쌍 센서

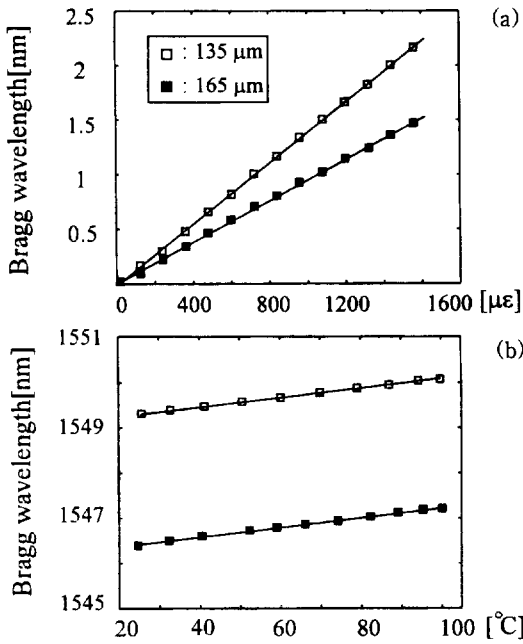


그림 5. 스트레인(a)과 온도(b)에 따른 브래그 파장의 변화

3.2. 마하젠더 간섭계를 이용한 정밀한 스트레인의 측정

앞서 행한 실험의 경우는, 분광분석기의 파장 분해능(wavelength resolution)이 0.1 nm이므로 정밀한 측정은 할 수 없으며 시간에 따라 빠르게 변하는 물리량의 측정도 불가능하다. 따라서 향상된 측정 정밀도와 속도를 얻기 위하여 앞서 기술한 마하젠더 간섭계 시스템(d~2 mm)을 광섬유 커플러(fiber coupler)를 이용하여 구성하였다. 그림 6은 제작된 마하젠더 간섭계 스트레인 측정 시스템이다.

광폭 광원(broadband source)으로는 펌핑(pumping)된 어븀 첨가 광섬유(Er-doped fiber)의 ASE(amplified spontaneous emission)를 사용하였다. LED를 이용하여 투과스펙트럼을 관측하는 실험과는 다르게 광섬유 격자에서 반사되는 빛이 광검출기에서 간섭 신호를 발생시켜야 하므로 광폭 광원의 파워(power)가 커야하기 때문이며 구성된 광폭 광원의 출력은 약 300 μW 이다. 간섭계의 한 쪽 팔은 원통형 PZT(piezoelectric transducer)에 감아서 신호발생기(signal generator)를 이용하여

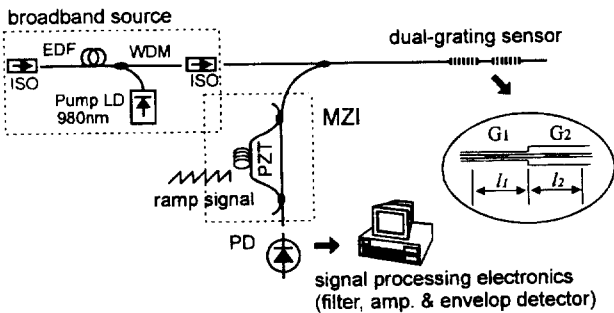


그림 6. 마하젠더 간섭계를 이용한 스트레인 측정 시스템 (EDF: Er-doped fiber, PD: photo-detector, ISO's: isolators, PZT: piezoelectric transducer, MZI: Mach-Zehnder interferometer, WDM: wavelength-division multiplexer)

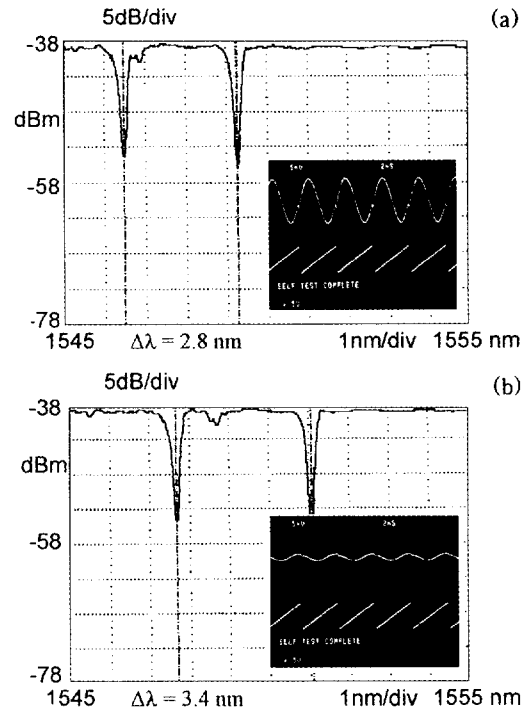


그림 7. 최대(a), 최소(b) 간섭신호와 투과 스펙트럼

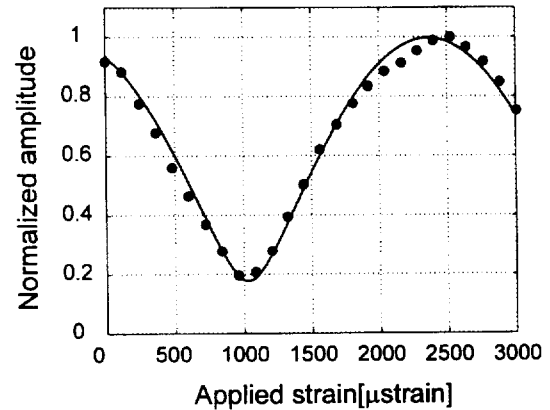


그림 8. 스트레인에 따른 간섭신호의 크기 변화

약 250 Hz의 톱니 파형(sawtooth signal)을 가해주었다. 센서에 스트레인을 가하면서 간섭 신호의 크기 변화를 측정 범위에 대해서 1/500의 해상도를 가지는 A/D 변환기(Analog to Digital converter)를 사용하여 정밀하게 측정하였다.

그림 7은, 지름이 다른 격자쌍 센서를 이용하여 실험한, 스트레인에 따라 변하는 최대, 최소 간섭신호(그림 7에서의 inset)와 그에 대한 브래그 파장의 투과 스펙트럼이다. 두 광섬유 격자의 반사율과 반사 스펙트럼의 폭이 거의 같으므로 최소값이 0에 가까워야 하지만 용융접착지점의 접촉손실에 의해서 최소값은 0이 아닌 다소 큰 값을 가진다. 접촉지점의 손실을 최소화한다면 측정 정밀도를 더욱 개선할 수 있을 것이다. 그림 8은 스트레인에 따른 간섭 신호의 크기 변화를 정밀하게 측정하여 표현한 것이다. 그림에서 실선은 식 (11)을 이용하여 계산한 값이고 점들은 실제 측정된 값이다.

예측한 바와 같이 거의 정확하게 일치하는 것을 관측할 수 있었다. 최대값과 최소값의 차이는 파장으로는 0.6 nm에 해당하며 이 사이에 1300 μ strain이 가해졌다. 따라서 사용한 1/500의 해상도를 가지는 A/D 변환기를 이용하여 측정할 수 있는 두 브래그 파장 간격의 변화는 1.2 pm이며 스트레인은 $\sim 2.6 \mu$ strain이다.

IV. 토의 및 결론

굽기가 다른 광섬유 격자를 용융접착하여 서로 다른 브래그 파장 변화로부터 스트레인과 온도를 분리하여 측정할 수 있는 센서헤드를 제작하였다. 제작된 센서는 기존에 발표되었던 것과는 달리 같은 모재에서 제작된 광섬유를 이용하였으므로 온도에 따른 두 격자의 파장 변화량이 같다. 이 특성은 본 논문에서 제안한 간섭신호의 크기변화를 이용하는 방법을 구현하는데 매우 중요한 특성이다. 온도특성이 다른 격자를 사용할 경우 온도에 의해서도 간섭신호의 크기가 변화하므로 온도에 무관한 측정을 할 수 없기 때문이다. 제안된 방법은 기존의 위상변화를 관측하는 방법과는 달리 그 크기의 변화를 보는 것이므로 보다 간단한 전자회로를 이용하여 측정이 가능하고, 광섬유 간섭계의 문제점인 간섭신호의 위상흐름(phase drift)에 따른 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 그림 8의 결과에 따르면, 간섭계 센서의 스트레인에 의한 브래그 파장 변화 측정 정밀도가 ~ 1.2 pm이므로 이것은 0.1 nm의 파장 해상도를 가지는 분광분석기에 비하여 80 배 이상 측정 정밀도가 향상된 것이다. 간섭계의 광경로차(optical path difference)를 조절하여 센서의 측정 정밀도는 조절될 수 있으며^[22] 두 광섬유 격자의 굽기의 차이를 달리하여도 같은 효과를 얻을 수 있으므로 수 백배 이상의 정밀도 향상도 가능할 것이다. 그러나 이럴 경우 모호하지 않은 측정을 할 수 있는 한 주기 이내의 측정 범위는 줄어들게 되므로 스트레인의 측정 범위와 정밀도를 같이 고려하여 시스템이 설계되어야 한다. 또한, 보다 해상도가 높은 A/D변환기를 사용하므로써 측정범위의 변화없이 측정 정밀도를 쉽게 향상시킬 수 있다.

상기한 간섭계 방법의 한가지 문제는, 브래그 파장 변화 이외의 다른 외적인 요인(시스템의 손실, 광원의 파워 변화 등)에 의해서도 간섭 신호의 크기가 변할 수 있다는 것이다. 이는 간섭계를 통과하기 이전의 광파워를 기준값으로 적용하는 방법등으로 그 해결책을 모색하고 있다. 또한 어븀 첨가 광섬유의 ASE가 1535 nm 근처 대역에서 이득 곡선(gain curve)의 변화가 심하기 때문에 파장 변화에 따른 광파워의 변화도 오차의 요인이 될 수 있다. 상기한 실험은 1550 nm 근처의 대체로 평탄한 이득을 갖는 대역을 사용했으나 보다 넓은 파장 대역을 이용하기 위해서는 해당 파장 범위에서 평탄한 이득을

갖는 고출력 광폭광원을 사용해야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, *Appl. Phys. Lett.* **32**, 647 (1978).
- [2] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, *Opt. Lett.* **14**, 823 (1989).
- [3] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 1035 (1993).
- [4] D. Z. Anderson, V. Mizrahi, T. Erdogan, and A. E. White, *Electron. Lett.* **29**, 566 (1993).
- [5] E. Udd, *Fiber Optic Smart Structures*(John Wiley & Sons, New York, 1995) p. 187.
- [6] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, *Electron. Lett.* **28**, 236 (1992).
- [7] S. M. Melle, K. Liu, and R. M. Measures, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **4**, 516 (1992).
- [8] M. G. Xu, H. Geiger and J. L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin, *Electron. Lett.* **29**, 1510 (1993).
- [9] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, *Opt. Lett.* **18**, 1370 (1993).
- [10] M. G. Xu, J. -L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin, *Electron. Lett.* **30**, 1085 (1994).
- [11] S. E. Kanellopoulos, V. A. Handerek, and A. J. Rogers, *Opt. Lett.* **20**, 333 (1995).
- [12] H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey, J. R. Pedrazzani, and A. M. Vengsarkar, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **8**, 1223 (1996).
- [13] S. W. James, M. L. Dockney, and R. P. Tatam, *Electron. Lett.* **32**, 1133 (1996).
- [14] M. Song, B. Lee, S. B. Lee, and S. S. Choi, *Opt. Lett.* **22**, 790 (1997).
- [15] M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, and B. Lee, *CLEO'97*, Baltimore, CThL59 (1997).
- [16] M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, and B. Lee, *CLEO'97*, Baltimore, CThQ3 (1997).
- [17] M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, and B. Lee, *Optical Fiber Technology* **3**, 160 (1997).
- [18] M. G. Xu, L. Dong, L. Reekie, J. A. Tucknott, and J. L. Cruz, *Electron. Lett.* **31**, 823 (1995).
- [19] G. W. Yoffe, P. A. Krug, F. Ouellette, and D. A. Thorncraft, *Appl. Opt.* **34**, 6859 (1995).
- [20] R. S. Weis, A. D. Kersey, and T. A. Berkoff, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **6**, 1469 (1994).
- [21] T. A. Berkoff, and A. D. Kersey, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 1522 (1996).
- [22] 송민호, 이상배, 최상삼, 이병호, 전자공학회 논문지 **34-D**, 105 (1997).

Novel dual-grating strain sensor signal processing technique using an unbalanced Mach-Zehnder interferometer

Minho Song and Byoung-ho Lee

School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Sang Bae Lee and Sang Sam Choi

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea

(Received : February 28, 1997)

We fabricated a sensor head which consists of spliced different-diameter fiber gratings for discrimination between strain and temperature. Because the fibers were drawn from the same preform, their temperature characteristics were the same but not for strain sensitivities which are inversely proportional to fibers' cross-sectional areas. In measurement range of 0-1500 μ strain and 20-100°C, we could obtain, by using the matrix calculation, the unknown physical quantities within 10 % of calculation error compared with the micrometer and thermocouple values. To improve the strain measurement accuracy, we suggest a new, novel method which deploys an unbalanced fiber Mach-Zehnder interferometer. This new signal processing technique converts the strain information to interference signal amplitude variation, temperature-independently. We obtained measurement accuracy nearly 80 times better than that obtainable with the conventional optical spectrum analyzer usage.